

# Orpalm

*Synthesis*

2025 - No 18 (1)

**Margeride (3)**

**Photo de couverture :** Raphael Honnet

## ORPALM Synthesis

Revue bisannuelle  
de Paléocécologie  
n°18 (1) - Année 2025

Editeurs en chef  
Jean-Frédéric TERRAL<sup>1,2</sup>  
Serge MULLER<sup>1,2</sup>

Editeurs associés  
Ana EJARQUE<sup>1,3</sup>  
Camille HENRIET<sup>1,2</sup>  
Reyes LUELMO<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>ISEM, <sup>2</sup>UM, <sup>3</sup>CNRS

### Auteurs

Coline BAILLEUX, Clothilde  
DIGEON, Manon DURAND, Liyu  
GODICHON, Raphaël HONNET,  
Timon LAVAL, Yann PANAIOTIS,  
Mélicca PHILOCLES, Léa POTHIER,  
Antonio RABBIA-RE, Amandine  
VIALA

Travail éditorial  
Serge MULLER

Publication  
1<sup>er</sup> trimestre 2025  
Université de Montpellier

## ORPAM 2024-2025

### Margeride 3 : La Margeride, un héritage glaciaire au cœur de granite

La Margeride, située au cœur du Massif central, s'étend sur les départements de la Lozère, de la Haute-Loire et du Cantal. Ce plateau granitique culminant entre 800 et 1550 m d'altitude, fruit d'une longue histoire géologique marquée par des phases tectoniques et volcaniques, a été le théâtre de l'école de terrain d'ORPAM durant 3 années consécutives (28-30 août 2025 pour la 3<sup>ème</sup> année).

Le socle granitique de la Margeride date de l'orogénèse hercynienne, qui eut lieu au Paléozoïque, il y a environ 300 millions d'années. Cette période a vu l'émergence de vastes massifs de granite suite à des mouvements tectoniques majeurs et à la cristallisation du magma en profondeur. Le granite confère à la Margeride son relief doux et ondulé, parsemé de blocs erratiques et de chaos rocheux formés par l'érosion (Fig. 1).

Dans la région, les sols sont peu profonds et acides, ce qui limite leur fertilité. Ils sont souvent recouverts de tourbières, héritage des périodes glaciaires du Quaternaire. Ces milieux, où l'eau stagne, témoignent du rôle central joué par les conditions climatiques et géomorphologiques dans la formation des paysages. La Margeride se distingue également par ses vallées fluviales, creusées par des rivières comme la Truyère (bassin versant de la Garonne) et l'Allier (bassin de la Loire) qui sillonnent et érodent les flancs du plateau.



Figure 1. Chaos granitique situé entre la tourbière à Saule des lapons et la tourbière des Crozes

La végétation de la Margeride reflète à la fois son climat montagnard et la nature granitique du substratum géologique. La région, marquée par une alternance de forêts, de landes, de pinèdes préforestières et de pâturages, a été façonnée par des siècles d'activités humaines. Les forêts, qui dominent une grande partie de la Margeride, sont dominées par les conifères, comme le sapin pectiné (*Abies alba*) et l'épicéa (*Picea abies*), souvent plantés pour la sylviculture. Les forêts originelles furent pourtant structurées d'abord autour du chêne sessile (*Quercus petraea*), puis du hêtre (*Fagus sylvatica*). Ces forêts mixtes, rares aujourd'hui, offrent une biodiversité plus riche que les plantations monospécifiques. Les landes, dominées par des plantes

bien adaptées aux sols pauvres et acides, comme la callune (*Calluna vulgaris*), le genêt à balais (*Cytisus scoparius*) ou la myrtille (*Vaccinium myrtillus*), occupent également une place importante dans le paysage. Elles sont aujourd'hui souvent colonisées par le pin sylvestre, introduit dans la région il y a moins de 150 ans. Ces landes, souvent issues du défrichement des forêts, témoignent de l'impact de l'agriculture et du pastoralisme sur l'écosystème. Les prairies et pâturages, qui couvrent de vastes surfaces, sont utilisés pour l'élevage extensif, notamment des bovins et ovins, une activité clé pour l'économie locale.

Les tourbières, bien que plus localisées, constituent des habitats remarquables. Ces zones humides, au cœur des recherches orpamiennes, abritent une végétation spécialisée, composée de sphaignes (*Sphagnum* spp.), de plantes carnivores (*Drosera rotundifolia*), de laïches (*Carex* spp.), de linaigrettes (*Eriophorum* spp.), du ményanthe (*Menyanthes trifoliata*) et du comaret (*Comarum palustre* ; Fig. 2). Ces espèces témoignent de l'adaptation à des conditions hydriques extrêmes et à des sols très pauvres en nutriments. Les changements d'usage des sols, notamment le boisement intensif et l'abandon de certains pâturages, ont modifié la composition végétale de la région. Toutefois, des efforts sont entrepris pour préserver les habitats naturels, notamment via des programmes de gestion durable des forêts et la mise en place de réserves écologiques.



Figure 2. *Comarum palustre*, Rosaceae), tourbière des Crozes. Photo : J.-F. Terral

La Margeride est ainsi un véritable refuge pour la biodiversité. Son isolement géographique, ses habitats variés et ses conditions climatiques rigoureuses en font une région d'une richesse écologique remarquable, abritant une faune riche et variée. Parmi les mammifères emblématiques, on trouve le cerf élaphe (*Cervus elaphus*), le chevreuil (*Capreolus capreolus*) et le sanglier (*Sus scrofa*), qui peuplent les grandes forêts. Le loup (*Canis lupus*), réapparu en France dans les années 1990, est également présent dans la région et commet de temps en temps quelques actes de prédation. Sa présence suscite encore des débats entre défenseurs de la biodiversité et éleveurs, plus de 250 ans après les méfaits de la bête du Gévaudan. Les rivières et tourbières de la Margeride accueillent des espèces aquatiques et semi-aquatiques, comme la loutre d'Europe (*Lutra lutra*).

Les batraciens, tels que la salamandre tachetée (*Salamandra salamandra*) et plusieurs espèces de tritons, profitent des zones humides pour se reproduire. Les oiseaux sont également nombreux : la chouette de Tengmalm (*Aegolius funereus*), le

circaète Jean-le-Blanc (*Circaetus gallicus*) et le grand tétras (*Tetrao urogallus*), dont la réintroduction est difficile, figurent parmi les espèces les plus emblématiques. Plusieurs espèces sont aujourd'hui menacées par la fragmentation des habitats, le changement climatique et les activités humaines. Le grand tétras, par exemple, subit une forte pression en raison de la disparition progressive des forêts mixtes et des dérangements liés aux activités touristiques. Les tourbières, habitats essentiels pour de nombreuses espèces, sont elles-aussi en danger à cause du drainage des sols et de l'intensification agricole, comme nous l'avons constaté à la tourbière des Crozes. Le papillon *Erebia sudetica*, une espèce inféodée aux milieux montagnards, voit ses populations diminuer en raison de la perte de ses habitats spécifiques (Fig. 3). De même, certaines plantes rares des tourbières, comme la laïche des borbiers (*Carex limosa*) et la grassette (*Pinguicula vulgaris*), sont particulièrement sensibles à la modification de leur environnement.

Face à ces défis, des initiatives locales ont vu le jour pour préserver la biodiversité. La région de la Margeride bénéficie d'une protection partielle grâce à des zones classées Natura 2000 et des réserves naturelles locales. Ces programmes favorisent la gestion durable des milieux naturels et promeuvent la coexistence entre activités humaines et conservation. L'élevage extensif, en particulier, est encouragé pour maintenir les prairies ouvertes et éviter l'embroussaillage.

L'éducation et la sensibilisation jouent également un rôle clé. Les associations locales et les écoles (ex. du collège de St Chély-d'Apcher – dispositif des cordées de la réussite) organisent régulièrement des sorties nature pour faire découvrir la richesse écologique de la Margeride et sensibiliser le grand public à l'importance de préserver ces paysages uniques.

« *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 Master 1 Chrono-environnements et Paléoécologie, les travaux d'ORPAM 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'ORPAM 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.

L'équipe tient à adresser ses plus vifs remerciements à la commune de Lajo. Merci à Adrien Mazel pour ses photographies de drone de toute beauté (Fig. 4). Merci à Daniel Martin pour son accueil à l'*Auberge Le Bon Accueil*. Nous sommes reconnaissants envers le département Biologie-Ecologie (FDS, UM) et à son personnel hightech pour son appui technique et logistique et à l'Institut des Sciences de l'Evolution-Montpellier, soutien de l'innovation pédagogique. Ces deux institutions nous permettent de développer depuis des années cet apprentissage par la recherche et pour la recherche. L'équipe pédagogique était cette année constituée de Fiona Cornet et Camille Henriet (doctorantes), Ana Ejarque, Reyes Luelmo, Serge Muller et Jean-Frédéric Terral.

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



Figure 3. Moiré des Sudètes, très rare mais encore présent dans le nord de la Margeride (source : <https://inpn.mnhn.fr>)



Figure 4. Une portion de la tourbière des Crozes vue du ciel (photo : Adrien Mazel)



*L'équipe des intrépides paléontologues de JURASSIC ORPARKM pose pour la postérité.  
Face aux grands prédateurs qui rodent, les tenues de camouflage sont de rigueur.  
Les daltoniens du groupe ne survivront sans doute pas...*

# 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<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> 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 2024-2025

## Margeride (3) : tourbière des Crozes

- Henriet C., Ejarque A., Luelmo R., Muller S.D. & Terral J.-F. : *Le complexe tourbeux de Lajo, Margeride (Lozère) : les tourbières des Crozes et de Bos Grand* ..... 9
- Durand M., Panaïotis Y. & Viala A. : *Installation et expansion du pin sylvestre (Pinus sylvestris) sur et autour de la tourbière des Crozes (Lajo, Lozère) pendant la période contemporaine* ..... 33
- Godichon L., Philoclès M. & Pothier L. : *Contribution à la reconstruction de l'histoire de la tourbière des Crozes (Lajo, Lozère) à l'aide de l'étude de la turfigenèse et des changements du milieu au cours du temps* ..... 47
- Bailleux C., Laval T. & Rabbia-Re T. : *Histoire de la tourbière des Crozes (Margeride, France) et de ses alentours : étude pollinique* ..... 63
- Digeon C. & Honnet R. : *Reconstitution paléoenvironnementale de la tourbière des Crozes (Lajo, Margeride, Lozère) : dynamiques climatiques, écologiques et anthropiques des derniers 8000 ans sur la base des palynomorphes non-polliniques* ..... 77



*L'hépatique à thalle Pellia epiphylla (Pelliaceae), qui affectionne les berges de ruisseau siliceux, se développe dans la tourbière des Crozes, sur la bordure du fen.*

# LE COMPLEXE TOURBEUX DE LAJO, MARGERIDE (LOZERE) : LES TOURBIERES DES CROZES ET DE BOS GROND

Camille Henriet <sup>1</sup>, Ana Ejarque, Reyes Luelmo, Serge D. Muller, Jean-Frédéric Terral

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

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

<sup>1</sup> camille.henriet@umontpellier.fr

*Citation* : Henriet C., Ejarque A., Luelmo R., Muller S.D. & Terral J.-F. (2025). Le complexe tourbeux de Lajo, Margeride (Lozère) : les tourbières des Crozes et de Bos Grond. *Orpalm Synthesis*, 18 (1) : 9-31.

---

**Résumé** : Les tourbières des Crozes (env. 40 ha) et de Bos Grond (env. 6 ha) abritent une mosaïque d'habitats comprenant respectivement 74 et 63 espèces végétales, dont plusieurs espèces nordiques rares en France. Leur répartition locale est contrôlée par l'hydrologie et le pâturage qui affecte les milieux les plus fragiles au profit des jonçaias. Les mesures altimétriques et pachymétriques réalisées sur la tourbière des Crozes ont permis la réalisation de profils longitudinaux (892 m au total) avec une profondeur maximale de 179 cm (CRZ1). Les datations radiocarbone obtenues sur cette tourbière montrent que l'accumulation de la tourbe a commencé dans la partie centrale vers 8000 cal. BP et a atteint la partie sud vers 4500 cal. BP.

**Mots clés** : Massif central, zones humides, conservation, végétation tourbigène

**Abstract**: *The Lajo peatland complex, Margeride (Lozère): the Crozes and Bos Grond peatlands.* The Crozes peatland (ca. 40 ha) and Bos Grond peatland (ca. 6 ha) harbour a mosaic of habitats composed of 72 and 63 plant species respectively, including several northern species, rare in France. Their local distribution is controlled by hydrology and grazing that affects the most fragile habitats, favouring *Juncus* development. Altimetric and pachymetric measurements were taken on the Crozes peatland allowing us to realize longitudinal profiles (892 m in total) with a maximum depth of 179 cm (CRZ1). Radiocarbon dating on this peatland shows that the peat accumulation began in the central zone around 8000 cal. BP and reached its southern part around 5000 cal. BP.

**Keywords**: Massif central, wetlands, conservation, peat-forming vegetation

Le complexe tourbeux de Lajo est situé en Margeride, un massif montagneux témoin de l'ancienne chaîne hercynienne qui traverse les départements de la Lozère, du Cantal et de la Haute-Loire. Les tourbières qui le composent diffèrent par leurs superficies (0,4 à 40 ha), leur hydrologie, leur couvert forestier et leur charge pastorale. Ces différents facteurs ont impacté leur composition floristique, générant une mosaïque de milieux.

Alors que la session d'ORPAM 2023 avait travaillé sur les tourbières « Saule des Lapons » et « Ronc de la Gleize », c'est la tourbière « Les Crozes », située au nord du site, qui a, cette année, été étudiée en détail (Fig. 1 ; Table 1). Quelques données pachymétriques et floristiques exploratoires ont été collectées dans la tourbière de « Bos Grond », située au sud-est du complexe. En parallèle, des données dendrométriques ont également été recueillies sur 70 pins sylvestres (*Pinus sylvestris*). L'objectif de ce travail

préliminaire est de dater l'émergence du pin sylvestre aux abords de la tourbière des Crozes et de caractériser la structure en âge de la population.

Le présent article introductif présente les données phytosociologiques, topographiques, et pachymétriques (ainsi que les datations radiocarbone) acquises lors d'une session de terrain préliminaire réalisée par les

enseignants le 11 juillet 2024, et lors du stage de terrain à proprement parler avec 12 étudiants du 28 au 30 août 2024. Ces données ont permis une étude paléoécologique pluridisciplinaire : les différents travaux réalisés par les étudiants portent sur la sédimentologie, le pollen, les palynomorphes non-polliniques et la dendrochronologie.

Table 1. Coordonnées GPS et altitude des milieux étudiés

Nom	Les Crozes-Fen	Les Crozes-Jonçaille	Les Crozes-Buttes	Bos Grond
Code	CRZ-F	CRZ-J	CRZ1	LAJO-BG
Latitude (ddd)	44,853225	44,851348	44,850558	44,848403
Longitude (ddd)	3,440091	3,443825	3,442614	3,431835
Altitude (m)	1385	1375	1379	1345

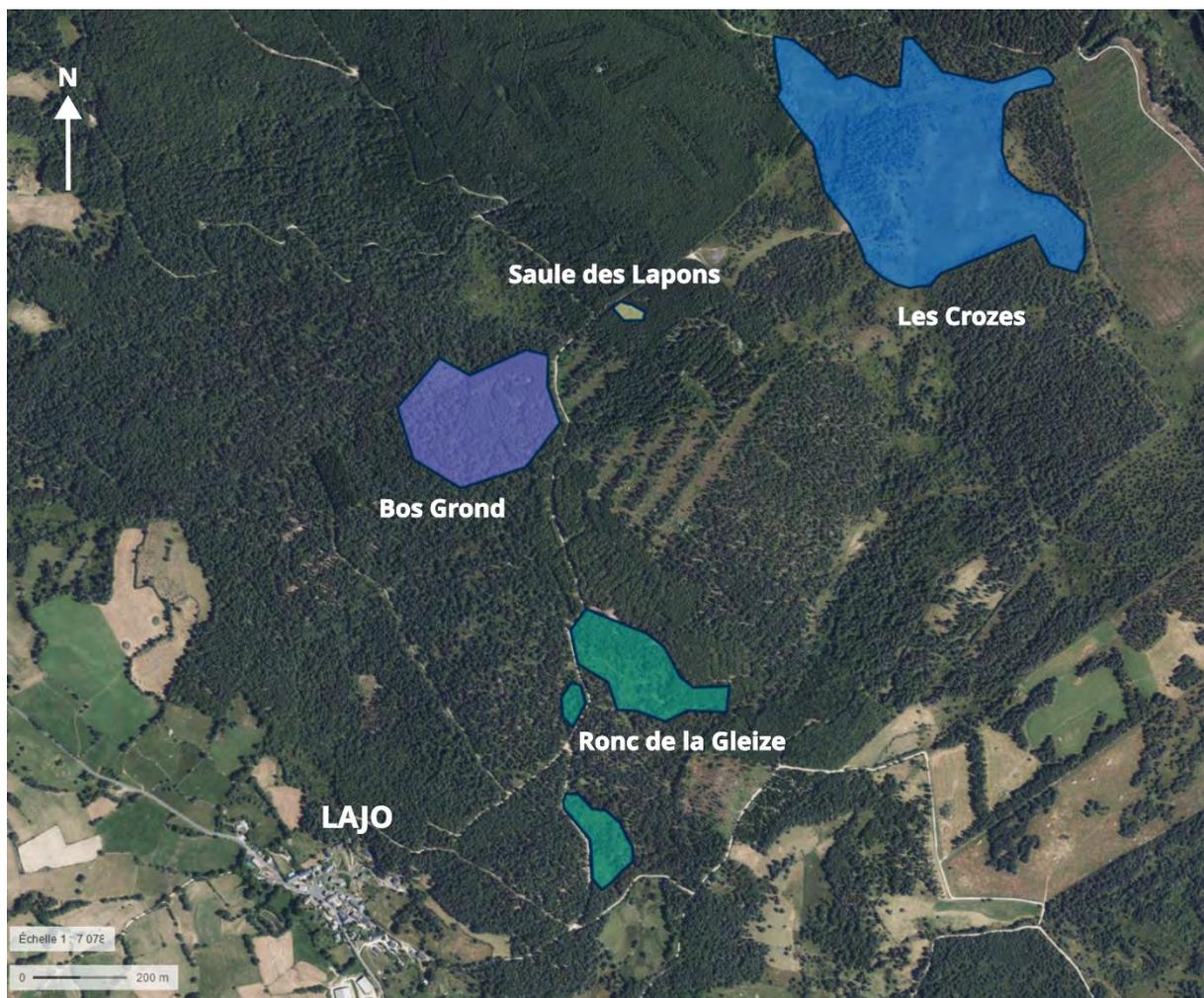


Figure 1. Carte du complexe tourbeux de Lajo. Données cartographiques : © IGN 2024.

## MATERIEL ET METHODES

### 1- Inventaires et relevés de végétation

Des relevés phytosociologiques ont été effectués suivant la méthode de [Braun-Blanquet \(1932\)](#) sur les tourbières des Crozes et de Bos Grond. Certains de ces relevés ont été réalisés sur les placettes suivies par le CEN Occitanie depuis 1987, matérialisées sur le terrain par des piquets de bois (A. Rémond, com. pers.). Les indices de recouvrement qui ont été utilisés sont :

- + : quelques individus
- 1 : 0-5 %
- 2 : 5-25 %
- 3 : 25-50 %
- 4 : 50-75 %
- 5 : 75-100 %
- X : présence non quantifiée

Des inventaires de végétation ont également été réalisés à plusieurs personnes sur différentes communautés végétales des deux tourbières. Les groupes pris en compte lors des relevés et des inventaires sont : Bryophytes, Lycopodiophytes, Polypodiophytes, Gymnospermes et Angiospermes. Les taxons dont l'identification était incertaine sur le terrain ont été prélevés pour être observés en laboratoire à la loupe binoculaire et/ou au microscope. L'identification des Bryophytes a été réalisée à l'aide des flores de [Daniels & Eddy \(1985\)](#), [Frey et al. \(2006\)](#), [Hugonnot et al. \(2015\)](#) et [Hugonnot & Chavoutier \(2021\)](#), ainsi que d'une clé des sphaignes de France inédite, initiée dans le cadre des mémoires ORPAL de S. Caubet, S. Chollet et C. Lemarchand (2006-2007 ; non publié) et [Kotarba et al. \(2009\)](#). L'identification des autres groupes de plantes a été réalisée à l'aide de Flora Gallica ([Tison & de Foucault, 2014](#)).

L'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) et la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) ont été réalisées sur les

taxons apparaissant au moins 2 fois dans le jeu de données, avec le logiciel Past 3.20 ([Hammer et al., 2001](#)).

### 2- Topographie et pachymétrie

Les étudiantes et étudiants ont réalisé des mesures topographiques et pachymétriques tous les 5 à 20 m – selon l'hétérogénéité des communautés végétales – le long de 4 transects nommés TA à TD répartis dans la tourbière des Crozes ([Fig. 2](#)). La topographie a été mesurée grâce à un système de niveau à bulle et de mire permettant d'évaluer la différence d'altitude entre deux points successifs. Dans les habitats présentant des buttes, l'altitude a été mesurée au pied de celles-ci et la hauteur des buttes a été mesurée séparément. L'altitude absolue de référence du premier point a été définie grâce à la position GPS précise et l'outil en ligne Géoportail géré par l'Institut Géographique National (IGN). La pachymétrie a été mesurée à l'aide d'une tige métallique enfoncée jusqu'à l'arène granitique sous-jacente.

### 3- Carottage de tourbe

Les carottages ont été réalisés les 11 juillet et 29 août 2024 à l'aide d'un carottier russe dont la chambre de prélèvement mesure 1 m de long et 5 cm de diamètre ([Jowsey, 1966](#)). Deux séquences ont été prélevées, l'une dans la partie centrale de la tourbière (CRZ1) et l'autre à l'extrémité sud (CRZ2) ([Fig. 2](#)). La séquence CRZ1 est constituée de 3 carottes (A, B, C), prélevées dans des trous distants de 10 cm. Les carottes ont été décrites et photographiées sur le terrain avant d'être emballées dans de la cellophane noire et une chaussette plastique de protection, et ont été conservées à +8°C jusqu'à l'échantillonnage. L'échantillonnage (méthodes détaillées dans les articles concernés) et la description des carottes ont été réalisés le 9 septembre 2024.



Figure 2. Carte de la tourbière des Crozes. Ligne noire = limites de la tourbière ; ligne jaune = barrière ; lignes blanches = transects ; points = relevés de végétation. Données cartographiques : © IGN 2024.

#### 4- Datation radiocarbone

Les âges étalonnés (cal. BP, i.e. années calendaires « before present ») ont été calculés à l'aide du logiciel Calib 8.1.0 (Stuiver & Reimer, 1993), en utilisant le référentiel IntCal20 (Reimer et al., 2020).

### RESULTATS

#### 1- Inventaire des Bryophytes

L'inventaire préliminaire des Bryophytes de la tourbière des Crozes réalisé en 2024 a révélé la présence de 2 espèces d'hépatiques (Marchantiidae) et de 16 espèces de Bryopsides, incluant 10 espèces de sphaignes. Notre prospection rapide de la tourbière de Bos Grond a permis d'y observer 8 espèces de Bryidae, dont 3 espèces de sphaignes (Table 2). Parmi les Bryidae, *Dicranum scoparium*, *Heterocladium heteropterum* et

*Pleurozium schreberi* ont été observées pour la première fois dans le complexe de Lajo.

Les collectes de sphaignes réalisées en juillet et août 2024 ont permis de retrouver 8 espèces déjà observées sur le complexe tourbeux de Lajo : *Sphagnum angustifolium*, *S. auriculatum* (probablement non distinguée de *S. subsecundum* par Sarrassat, 1931), *S. capillifolium*, *S. divinum* (non distinguée de *S. magellanicum* par Boudier, 1987), *S. fallax*, *S. palustre*, *S. subnitens* et *S. teres*. Deux espèces, *S. flexuosum* et *S. platyphyllum*, ont été observées pour la première fois dans le complexe de Lajo en 2024. Avec la présence possible de *S. compactum*, signalée par Sarrassat (1931) mais non revue depuis, le complexe comprendrait donc 11 espèces de sphaignes. Au total, 30 espèces de mousses et 11 espèces d'hépatiques ont été observées jusqu'à aujourd'hui sur le complexe de Lajo (Table 3).

## 2- Relevés phytosociologiques et inventaire des Trachéophytes

Les inventaires et relevés réalisés depuis 1996 sur les deux tourbières étudiées permettent de dresser une liste assez complète de leur flore respective (Tables 4 et 5). Le suivi de placettes sur les deux tourbières renseigne sur l'évolution temporelle de ces milieux depuis presque 30 ans. Située dans la tourbière de Bos Grond, la placette P6 présente une richesse spécifique à peu près constante (autour de 14 espèces), tandis que la placette P7 a vu sa richesse augmenter, passant de 15 à 23 espèces de plantes vasculaires entre 1997 et 2009, puis diminuer jusqu'à 12 espèces en 2024.

### Classification Hiérarchique Ascendante (CHA)

La CHA (Fig. 3), réalisée à partir des relevés phytosociologiques de la tourbière des Crozes (Table 4), permet de distinguer deux groupes d'habitats : un groupe constitué des deux placettes du CEN (P1 et P2) et des points de carottage (CRZ1 et CRZ2), et un groupe constitué du fen (CRZ-F), de la jonçaie (CRZ-J), du diverticule sud-ouest (CRZ-D) et de l'exclos non pâturé (CRZ-E et CRZ-P). La CHA montre deux résultats plutôt intrigants : le relevé de 1996 de la placette P1 est significativement différent du reste des habitats humides. De même, le relevé de 2024 de la placette P2 apparaît un peu différent du reste des relevés de cet endroit.

### Analyse Factorielle des Correspondances (AFC)

L'AFC, réalisée à partir des relevés phytosociologiques de la tourbière des Crozes (Table 4), comprend 18 axes (nombre de milieux étudiés - 1), dont les huit premiers sont significatifs (valeur propre supérieure à  $1/18 * 1,5 = 3,7\%$ ). La Figure 4 présente le plan 1/2 de cette analyse. L'AFC confirme les subdivisions observées sur la CHA. L'axe 1 distingue *Betula nana*, *Calluna vulgaris*, *Drosera rotundifolia*, *Festuca rubra*, *Nardus stricta*, *Pinus sylvestris*, *Vaccinium*

*microcarpum*, *V. myrtillus* et *V. vitis-idaea* des autres taxons. L'axe 2 montre une séparation de ces autres taxons en deux ensembles : d'une part, un milieu caractérisé par *Agrostis canina*, *Carex rostrata*, *Cirsium palustre*, *Epikeros pyrenaicus* et *Viola palustris*, et d'autre part, un milieu avec *Juncus acutiflorus*, *J. conglomeratus*, *Galium uliginosum*, *Montia fontana* et *Ranunculus flammula*.

## 3-Topographie et pachymétrie

Les relevés réalisés ont permis de reconstituer la topographie du substratum (arène granitique) et la profondeur de la tourbe le long de 4 transects de la tourbière des Crozes (Fig. 5). La profondeur la plus importante le long des transects est de 127 cm et est localisée dans un milieu de buttes le long du transect A. On retrouve aussi des profondeurs supérieures à 120 cm dans des cariçaias et dans le point de carottage du fen CRZ1 (179 cm).

Hors du fen, la tourbe est plus profonde dans les milieux où les buttes sont présentes, ce qui semble cohérent car les espèces de buttes, adaptées aux habitats les plus secs, occupent les zones les plus éloignées de la nappe phréatique.

L'évolution diachronique du couvert végétal du complexe tourbeux de Lajo est présentée en Figure 6. On peut y observer les limites de la tourbière qui correspond aux zones plus foncées. On observe également une forte fermeture du milieu, aussi bien à l'échelle du complexe que sur les quelques kilomètres autour.

## 4- Datation radiocarbone

2 échantillons de tourbe, prélevés à la base des deux séquences extraites en juillet 2024 (CRZ1 et CRZ2) ont été envoyés pour datation au laboratoire radiocarbone de Poznan (Pologne) (Table 6). Le modèle âge-profondeur de la séquence étudiée (CRZ1) est présenté Figure 7.

Table 2. Inventaires et relevés des Bryophytes du complexe de Lajo (détail des tourbières des Crozes et de Bos Grond). Observations antérieures : 1928 (Sarrassat, 1931), 1987 (Boudier, 1987), 2003 (A. Rémond, com. pers.); observations récentes : 2024 (S.D. Muller). Pour les relevés effectués en 2024 : BG, Tourbière de Bos Grond ; CRZ, Tourbière des Crozes ; CRZ1 et CRZ2, carottages ; D, Diverticule ; E, Exclos ; F, Fen ; J, Jonçaille ; P, Périphérie de l'exclos ; P1 à P7, placettes du CEN (A. Rémond, com. pers.).

	Complexe Lajo			CRZ							BG			
	1928	1987	2003	CRZ1	CRZ2	D	E	F	J	P	P1	P2	P6	P7
Eau libre (%)				0	0	0	10	10	10	10	0	0	0	0
Recouvrement végétation (%)				100	100	100	100	90	80	100	100	90	80	100
Sol nu (%)				0	0	0	0	0	10	0	0	10	20	0
Surface relevé (m <sup>2</sup> )				16	16	16	16	16	16	16	1	1	1	1
<i>Aulacomnium palustre</i> (Hedw.) Schwaegr.		x	x	1		1			1		1	+	1	1-2
<i>Dicranum scoparium</i> Hedw.													1	
<i>Heterocladium heteropterum</i> (Brid.) Schimp.													1	
<i>Pellia epiphylla</i> (L.) Corda		x						x						
<i>Pleurozium schreberi</i> (Willd. ex Brid.) Mitt.													2	
<i>Polytrichum commune</i> Hedw.		x				1							1	1
<i>Polytrichum strictum</i> Menzies ex. Brid.		x		+										
<i>Scapania irrigua</i> (Nees) Nees		x		1										
<i>Sphagnum angustifolium</i> (Warnst.) C.E.O. Jens.		x	x	1		1								
<i>Sphagnum auriculatum</i> Schimp.		x	x	1										
<i>Sphagnum capillifolium</i> (Ehrh.) Hedw.	x	x	x	2		1	1				3			
<i>Sphagnum divinum</i> Flatberg & Hassel		x	x			3								
<i>Sphagnum fallax</i> (Klinggr.) Klinggr.			x	1-2	1	4		1	1	1		1	1	5
<i>Sphagnum flexuosum</i> Dozy & Molk.								3-4						
<i>Sphagnum palustre</i> L.			x				1						1	2
<i>Sphagnum platyphyllum</i> (Lindb. ex Braithw.) Warnst.									1					
<i>Sphagnum subnitens</i> Russ. & Warnst.			x		2								2	
<i>Sphagnum teres</i> (Schimp.) Angstr.		x	x					1						

Table 3. Inventaire des Bryophytes du complexe de Lajo. Observations antérieures : 1928 (Sarrassat, 1931), 1987 (Boudier, 1987), 2003 (A. Rémond, com. pers.), 2023 et 2024 (S.D. Muller). Observations de 2023 et 2024 : RGH = Ronc de la Gleize (haut) ; SL = Saule des Lapons ; CRZ = Les Crozes ; BG = Bos Grond.

Espèce	Section	Famille	Obs. antérieures			RGH	SL	CRZ	BG
			1928	1987	2003	2023	2023	2024	2024
<b>Hépatiques à thalles</b>									
<i>Pellia epiphylla</i> (L.) Corda		Pelliaceae		x				x	
<b>Hépatiques à feuilles</b>									
<i>Calypogeia azurea</i> Stotler & Crotz		Calypogeiaceae		x					
<i>Calypogeia neesiana</i> (C.Massal. & Carestia) Müll.Frib.		Calypogeiaceae		x					
<i>Cephalozia bicuspidata</i> (L.) Dumort		Cephaloziaceae		x					
<i>Cephalozia connivens</i> (Dicks.) Lindb.		Cephaloziaceae		x					
<i>Chiloscyphus pallescens</i> (Ehrh. ex Hoffm.) Dumort.		Jungermanniaceae		x					
<i>Gymnocolea inflata</i> (Huds.) Dumort.		Anastrophyllaceae		x					
<i>Lophocolea bidentata</i> (L.) Dumort.		Geocalycaceae		x					
<i>Lophocolea heterophylla</i> (Schrad.) Dumort.		Geocalycaceae		x					
<i>Scapania irrigua</i> (Nees) Nees		Scapaniaceae		x				x	
<i>Scapania undulata</i> (L.) Dumort.		Scapaniaceae		x					
<b>Sphagnales</b>									
<i>Sphagnum angustifolium</i> (Warnst.) C.E.O. Jens.	<i>Cuspidata</i>	Sphagnaceae		x	x	x		x	
<i>Sphagnum auriculatum</i> Schimp.	<i>Subsecunda</i>	Sphagnaceae	x		x		x	x	
<i>Sphagnum capillifolium</i> (Ehrh.) Hedw.	<i>Acutifolia</i>	Sphagnaceae	x	x	x		x	x	
<i>Sphagnum compactum</i> DC.	<i>Rigida</i>	Sphagnaceae	x						
<i>Sphagnum divinum</i> Flatberg & Hassel	<i>Sphagnum</i>	Sphagnaceae		x	x	x		x	
<i>Sphagnum fallax</i> (Klinggr.) Klinggr.	<i>Cuspidata</i>	Sphagnaceae			x	x		x	x
<i>Sphagnum flexuosum</i> Doz. & Molk.	<i>Cuspidata</i>	Sphagnaceae						x	
<i>Sphagnum palustre</i> L.	<i>Sphagnum</i>	Sphagnaceae			x	x		x	x
<i>Sphagnum platyphyllum</i> (Braithw.) Warnst.	<i>Subsecunda</i>	Sphagnaceae						x	
<i>Sphagnum subnitens</i> Russ. & Warnst.	<i>Acutifolia</i>	Sphagnaceae			x		x	x	x
<i>Sphagnum teres</i> (Schimp.) Angstr.	<i>Squarrosa</i>	Sphagnaceae		x	x	x		x	

Espèce	Section	Famille	Obs. antérieures			RGH	SL	CRZ	BG
			1928	1987	2003	2023	2023	2024	2024
<b>Autres Bryidae</b>									
<i>Aulacomnium palustre</i> (Hedw.) Schwaegr.		Aulacomniaceae		x	x	x	x	x	x
<i>Calliergon stramineum</i> (Dicks. Ex Brid.) Kindb.		Amblystegiaceae		x					
<i>Calliergonella cuspidata</i> (Hedw.) Loeske		Amblystegiaceae		x					
<i>Ceratodon purpureus</i> (Hedw.) Brid.		Dicranaceae		x					
<i>Climacium dendroides</i> (Hedw.) F.Weber & D.Mohr		Climaciaceae		x					
<i>Dicranum scoparium</i> Hedw.		Dicranaceae							x
<i>Drepanocladus exannulatus</i> (Schimp.) Warnst.		Amblystegiaceae		x					
<i>Drepanocladus exannulatus</i> var. <i>brachydicton</i> Ren.		Amblystegiaceae		x					
<i>Heterocladium heteropterum</i> (Brid.) Schimp.		Lembophyllaceae							x
<i>Philonotis fontana</i> (Hedw.) Brid.		Bartramiaceae		x					
<i>Pleurozium schreberi</i> (Willd. ex Brid.) Mitt.		Entodontaceae							x
<i>Pogonatum aloides</i> (Hedw.) P.Beauv.		Polytrichaceae		x					
<i>Pohlia nutans</i> (Hedw.) Lindb.		Bryaceae		x					
<i>Polytrichum commune</i> Hedw.		Polytrichaceae		x				x	x
<i>Polytrichum piliferum</i> Hedw.		Polytrichaceae		x					
<i>Polytrichum strictum</i> Menzies ex Brid.		Polytrichaceae		x				x	
<i>Racomitrium heterostichum</i> (Hedw.) Brid.		Grimmiaceae		x					
<i>Rhizomnium pseudopunctatum</i> (Bruch & Schimp.) T.J.Kop.		Mniaceae		x					
<i>Tomentypnum nitens</i> (Hedw.) Loeske		Brachytheciaceae	x						

Table 4. Inventaires et relevés de végétation de la tourbière des Crozes (Lajo, Margeride, Lozère). De 1996 à 2021, placettes P1 et P2 (CEN Occitanie) : Lacoste & Duguépéroux (22.07.1996 et 30.09.1997) ; Rémond & Jorland (31.07.2003) ; Rémond (27.07.2012) ; Rémond & Chazalmartin (02.08.2016) ; Lacoste (17.08.2021). En 2024 : Muller (11.07.2024) ; Etudiant.e.s ORPAM 2024 (29.08.2024) ; cf. Table 2 pour le détail des intitulés.

Quadrat	CRZ (2024)							P1						P2					
	CRZ1	CRZ2	D	E	F	J	P	1996	2003	2012	2016	2021	2024	1997	2003	2012	2016	2021	2024
Eau libre (%)	0	0	0	10	10	10	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Recouvrement végétation (%)	100	100	100	100	90	80	100	100	100	100	100	100	100	95	90	100	100	90	90
Sol nu (%)	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	5	10	0	0	10	10
Richesse spécifique (Trachéophytes)	8	11	28	14	20	30	20	8	8	8	8	7	8	9	9	12	13	10	8
Surface relevé (m²)	16	16	16	16	16	16	16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>Bryophytes</b>																			
<i>Aulacomnium palustre</i> (Hedw.) Schwaegr.	1		1			1									+				+
<i>Polytrichum commune</i> Hedw.			1					4	3	2	2	+		2	1	1	2		
<i>Polytrichum strictum</i> Brid.																	+		
<i>Scapania irrigua</i> (Nees) Nees	1																		
<i>Sphagnum angustifolium</i> (Warnst.) C.E.O. Jens.	1		1																
<i>Sphagnum auriculatum</i> Schimp.	1																		
<i>Sphagnum capillifolium</i> (Ehrh.) Hedw.	2		1	1															
<i>Sphagnum divinum</i> Flatberg & Hassel			3																
<i>Sphagnum fallax</i> (Klinggr.) Klinggr.	1-2	1	4		1	1	1	3	4	4	4	4		3	4	4	3	2	
<i>Sphagnum flexuosum</i> Doz. & Molk.					3-4														
<i>Sphagnum palustre</i> L.				1															
<i>Sphagnum platyphyllum</i> (Braithw.) Warnst.						1													
<i>Sphagnum subnitens</i> Russ. & Warnst.		2																	
<i>Sphagnum teres</i> (Schimp.) Angstr.					1														
<b>Lycopodiophytes et Polypodiophytes</b>																			
<i>Dryopteris carthusiana</i> (Vill.) H.P.Fuchs	1																		
<i>Equisetum fluviatile</i> L.					1-2														
<b>Spermatophytes</b>																			
<i>Agrostis canina</i> L.				2		1	1-2												
<i>Agrostis capillaris</i> L. var. <i>capillaris</i>			1												+	+			
<i>Agrostis stolonifera</i> L.																	2		
<i>Avenella flexuosa</i> (L.) Drejer	1	1-2	1			1								2	1	+	2		
<i>Betula nana</i> L.	2	1	2			1	2	3	3	2	3	2		3	3	3	2	2	
<i>Betula pubescens</i> Ehrh.	1																		
<i>Calluna vulgaris</i> (L.) Hull	3	3	2			1-2		+	2	3	4	3		+			+	2	
<i>Caltha palustris</i> L.			1	2	1	1	2												

Quadrat	CRZ (2024)							P1						P2						
	CRZ1	CRZ2	D	E	F	J	P	1996	2003	2012	2016	2021	2024	1997	2003	2012	2016	2021	2024	
<i>Cardamine pratensis</i> L.						1														
<i>Carex canescens</i> L.			+		3	1	1													
<i>Carex echinata</i> Murray			2		1	2-3								2	2	1	1			
<i>Carex nigra</i> (L.) Reichard		1	3	5	1	3														
<i>Carex panicea</i> L.						1														
<i>Carex rostrata</i> Stokes			2	2	1		4													
<i>Cirsium palustre</i> (L.) Scop.			1	2		1	1													
<i>Comarum palustre</i> L.			1-2	5	3	1	2													
<i>Dactylis glomerata</i> L.				1-2																
<i>Dactylorhiza maculata</i> (L.) Soo							1-2													
<i>Drosera rotundifolia</i> L.			1-2					+	2	2	+									
<i>Epikeros pyrenaicus</i> (L.) Raf.			1	4			3													
<i>Epilobium palustre</i> L.				2	1	1	1													
<i>Equisetum fluviatile</i> L.					1-2															
<i>Equisetum palustre</i> L.							1													
<i>Eriophorum angustifolium</i> Honck.			1		1	+	1-2	+	+	1	2	+								
<i>Eriophorum vaginatum</i> L.	5	4	1	1		1		+	2	2	3	2		3	2	3	3	2		
<i>Festuca nigrescens</i> Lam.						1														
<i>Festuca rubra</i> L.																1			+	
<i>Galium uliginosum</i> L.					2	1-2												+	+	
<i>Genista anglica</i> L.						1														
<i>Juncus acutiflorus</i> Ehrh. ex Hoffm.			1-2		5															
<i>Juncus conglomeratus</i> L.					2-3	4														
<i>Juncus effusus</i> L.			2																	+
<i>Juncus squarrosus</i> L.		1	1-2			2										1	1		+	
<i>Juniperus communis</i> L.		1																		
<i>Lotus pedunculatus</i> Cav.			2	4	3	1	2													
<i>Luzula congesta</i> (Thuill.) Lej.					1															
<i>Menyanthes trifoliata</i> L.					5	1	4													
<i>Molinia caerulea</i> (L.) Moench			1																	
<i>Montia fontana</i> L.					2	1														
<i>Myosotis scorpioides</i> L.					2		1													
<i>Nardus stricta</i> L.																+	2		1	
<i>Parnassia palustris</i> L.					1															
<i>Picea abies</i> (L.) H.Karst.		1																		
<i>Pinus sylvestris x uncinata</i>		1	+																	
<i>Potentilla erecta</i> (L.) Rauschel			1-2	1		2	1								+	+	+			
<i>Ranunculus flammula</i> L.					1-2	2														
<i>Salix aurita</i> L.			1		1	1	1													

Quadrat	CRZ (2024)							P1					P2						
	CRZ1	CRZ2	D	E	F	J	P	1996	2003	2012	2016	2021	2024	1997	2003	2012	2016	2021	2024
<i>Salix lapponum</i> L.			1				1							2	+	+	+		
<i>Salix repens</i> L.							1												
<i>Succisa pratensis</i> Moench				1															
<i>Vaccinium microcarpum</i> (Turcz. ex Rupr.) Schmalh.			2				3	+	2	2	2	2							
<i>Vaccinium myrtillus</i> L.	2	2	1					+	1	1	+	+		+	2	1	+	1	
<i>Vaccinium vitis-idaea</i> L.	2	2	1				1	+	2	3	2	2		+	1	1	1	+	
<i>Veronica scutellata</i> L.							1												
<i>Viola palustris</i> L.			2	4			1	1-2											

Table 5. Inventaires et relevés de la végétation de la tourbière de Bos Grond (Lajo, Margeride, Lozère) : Lacoste & Duguépéroux (30.10.1997) ; Rémond & Couvoisier (06.08.2003) ; Rémond, Tillier & Michon (29.06.2009) ; Rémond (25.07.2012) ; Rémond & Chazalmartin (02.08.2016) ; Rémond (30.06.2021) ; Muller (11.07.2024) ; Etudiant.e.s ORPAM 2024 (30.08.2024). Les relevés de 1997 à 2021 ont été réalisés par le CEN Occitanie. L'inventaire de 2024 a été réalisé sur l'ensemble de la tourbière.

Placette Année	P6							P7							2024
	1997	2003	2009	2012	2016	2021	2024	1997	2003	2009	2012	2016	2021	2024	
Eau libre (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Recouvrement végétation (%)	100	95	90	95	90	80	80	100	100	100	100	100	100	100	
Sol nu (%)	0	5	10	5	10	20	20	0	0	0	0	0	0	0	
Richesse spécifique (Trachéophytes)	14	15	13	15	13	13	12	15	17	23	21	21	20	12	
Surface relevé (m <sup>2</sup> )	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
<b>Bryophytes</b>															
<i>Aulacomnium palustre</i> (Hedw.) Schwaegr.					1	+	1	1	1	2	2	2	2	1-2	x
<i>Dicranum scoparium</i> Hedw.															x
<i>Heterocladium heteropterum</i> (Brid.) Schimp.															x
<i>Pleurozium schreberi</i> (Willd. ex Brid.) Mitt.															x
<i>Polytrichum commune</i> Hedw.					1		1					1	+	1	x
<i>Polytrichum formosum</i> Hedw.									+		2				
<i>Polytrichum strictum</i> Brid.	2	1	2	2	1	1									
<i>Sphagnum fallax</i> (Klinggr.) Klinggr.								3	4	4	5	4	5	5	x
<i>Sphagnum palustre</i> L.														2	x
<i>Sphagnum subnitens</i> Russ. & Warnst.	4	4	4	4	4	3	2								x
Bryophytes indéterminées			1		+		1		2	2	2		+		
<b>Polypodiophytes</b>															
<i>Athyrium filix-femina</i> (L.) Roth.															x
<i>Dryopteris carthusiana</i> (Vill.) H.P.Fuchs															x
<b>Spermatophytes</b>															
<i>Abies alba</i> Mill.															x
<i>Agrostis canina</i> L.											3	+			
<i>Agrostis capillaris</i> L.														+	
<i>Agrostis stolonifera</i> L.	+	+		+			+		2	+		2	1		
<i>Anthoxanthum odoratum</i> L.								+		+	1	+	2		
<i>Avenella flexuosa</i> (L.) Drejer	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2					
<i>Betula nana</i> L.	+	1	+	+	1	+	+	2							
<i>Betula pendula</i> Roth.															x
<i>Betula pubescens</i> Ehrh.			+	+											x
<i>Calluna vulgaris</i> (L.) Hull		+													

Placette Année	P6							P7							2024
	1997	2003	2009	2012	2016	2021	2024	1997	2003	2009	2012	2016	2021	2024	
<i>Caltha palustris</i> L.										1	1	1	1		
<i>Cardamine pratensis</i> L.										+					
<i>Carex canescens</i> L.										+	+	+	+		
<i>Carex echinata</i> Murray	+	1	1	1	2	1				2	2	1	1	1	
<i>Carex nigra</i> (L.) Reichard						+			1	2	2	2	2	1-2	
<i>Carex ovalis</i> Gooden.										+	+				
<i>Cirsium palustre</i> (L.) Scop.								+	2	1	+	+	1		
<i>Comarum palustre</i> L.								+	1	1	2	1	1		
<i>Epikeros pyrenaicus</i> (L.) Raf.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	1	2	2	
<i>Epilobium obscurum</i> Schreb.													+		
<i>Epilobium palustre</i> L.												+			
<i>Epilobium parviflorum</i> Schreb.									+	+	+				
<i>Eriophorum angustifolium</i> Honck.								+		+			+		
<i>Eriophorum vaginatum</i> L.	2	1	2	+											
<i>Fagus sylvatica</i> L.															
<i>Festuca rivularis</i> Boiss.									+	+	1	1	+		
<i>Galium palustre</i> L.														+	
<i>Galium saxatile</i> L.				+	+	+			+	+			+		
<i>Holcus lanatus</i> L.								1			+	+	+		
<i>Holcus mollis</i> L.												+		+	
<i>Juncus acutiflorus</i> Ehrh. ex Hoffm.								1	4	3	3	3	2	2	
<i>Juncus effusus</i> L.	+	2	2	2	2	1	1			2	2	3	3	2	
<i>Juncus squarrosus</i> L.											+				
<i>Juniperus communis</i> L.	+	+													
<i>Lotus pedunculatus</i> Cav.								1	2	3	3	2	1	1	
<i>Menyanthes trifoliata</i> L.										+	1	1	2	2	
<i>Micranthes stellaris</i> (L.) Galasso et al.										1	1	+	1		
<i>Molinia caerulea</i> (L.) Moench	2	2	2	2	2	2	1								
<i>Nardus stricta</i> L.	+														
<i>Poa trivialis</i> L.					+										
<i>Populus tremula</i> L.							+								
<i>Pinus sylvestris</i> L.							2-3								
<i>Potentilla erecta</i> (L.) Rauschel	+	+		+	+	+	1	1	2	2	1	1	2	2	
<i>Quercus petraea</i> (Matt.) Liebl.															
<i>Salix aurita</i> L.									+						
<i>Salix cinerea</i> L.								+							
<i>Sorbus aucuparia</i> L.					+										
<i>Succisa pratensis</i> Moench															
<i>Vaccinium microcarpum</i> (Turcz. ex Rupr.) Schmalh.	2	2	1	1	1	1		1	+						

Placette Année	P6							P7							2024
	1997	2003	2009	2012	2016	2021	2024	1997	2003	2009	2012	2016	2021	2024	
<i>Vaccinium myrtillus</i> L.	2	2	3	3	3	4	4	1	+						
<i>Vaccinium uliginosum</i> L.	2	2													
<i>Vaccinium vitis-idaea</i> L.			3	2	2	2	2	2	1						
<i>Viola palustris</i> L.		1	+	1	1	1	1		2	1	2	1		2	

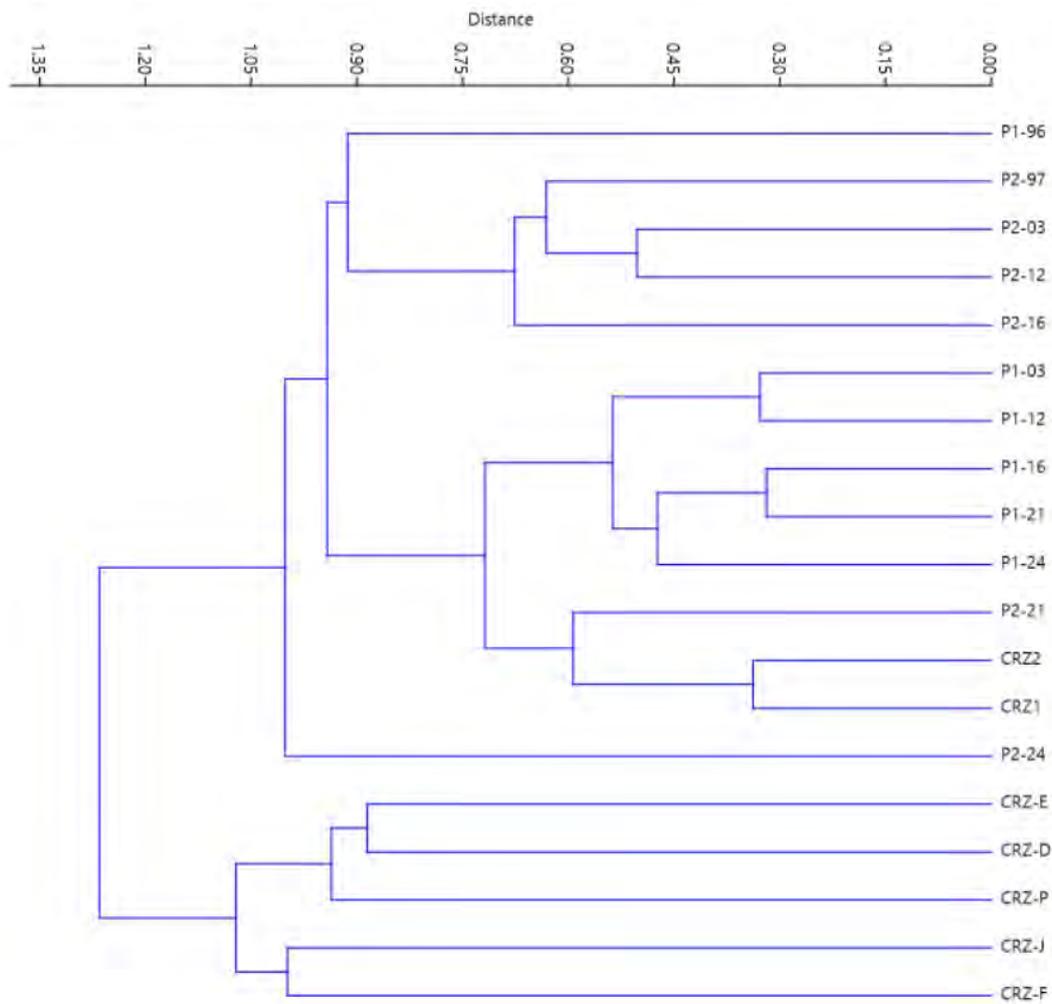


Figure 3. Classification hiérarchique ascendante réalisée sur 37 taxons et 19 sites de la tourbière des Crozes (les sites notés P suivi d'un numéro correspondent à la même placette suivie plusieurs années). Indice de similarité employé : distance de Chord.



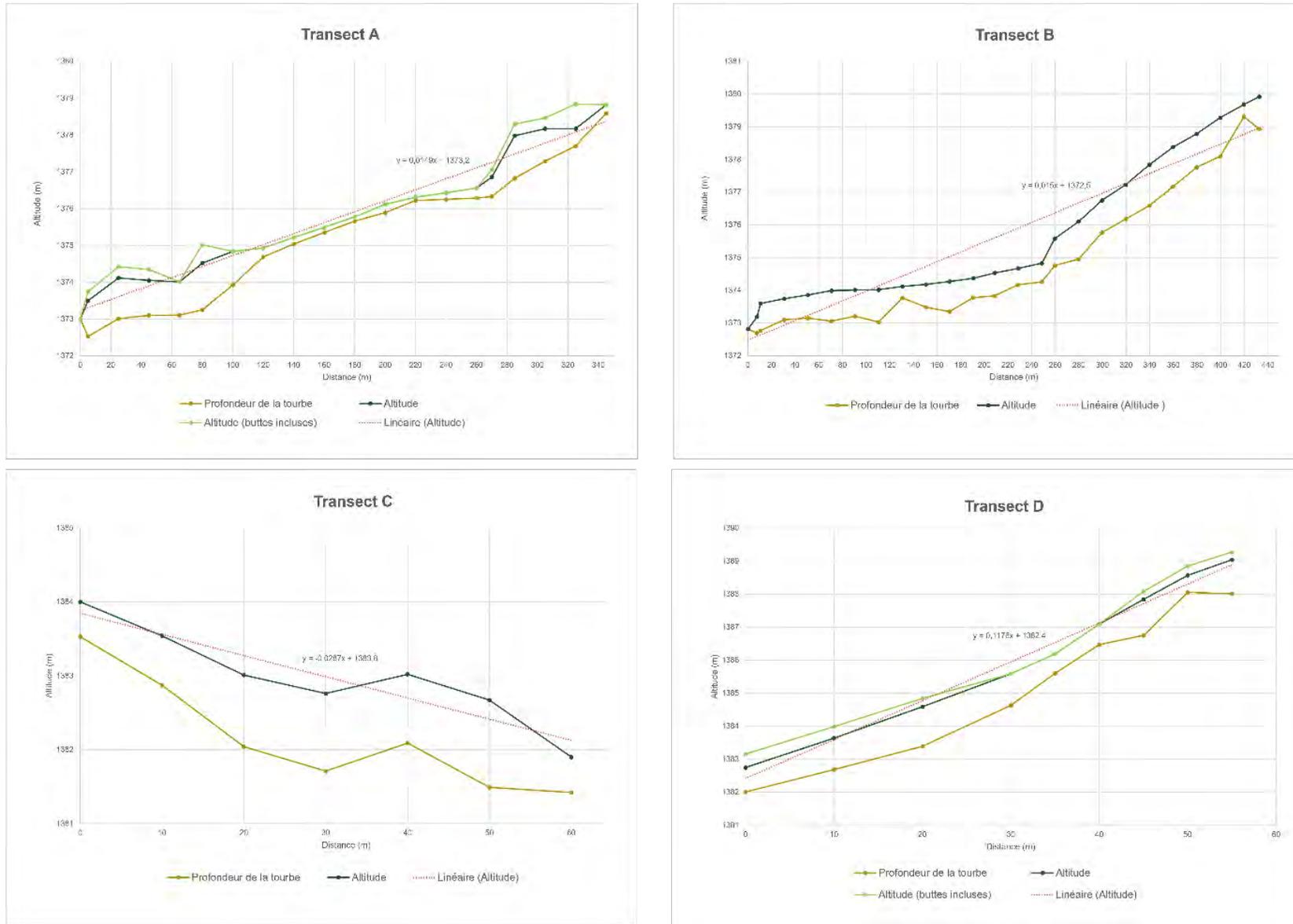


Figure 5. Topographie de surface et de l'arène granitique de la tourbière des Crozes. L'altitude relative du substrat a été calculée à partir d'un référentiel choisi arbitrairement comme profondeur « 0 » lors de la prise des mesures sur le terrain ; il s'agit ici de la première mesure effectuée.

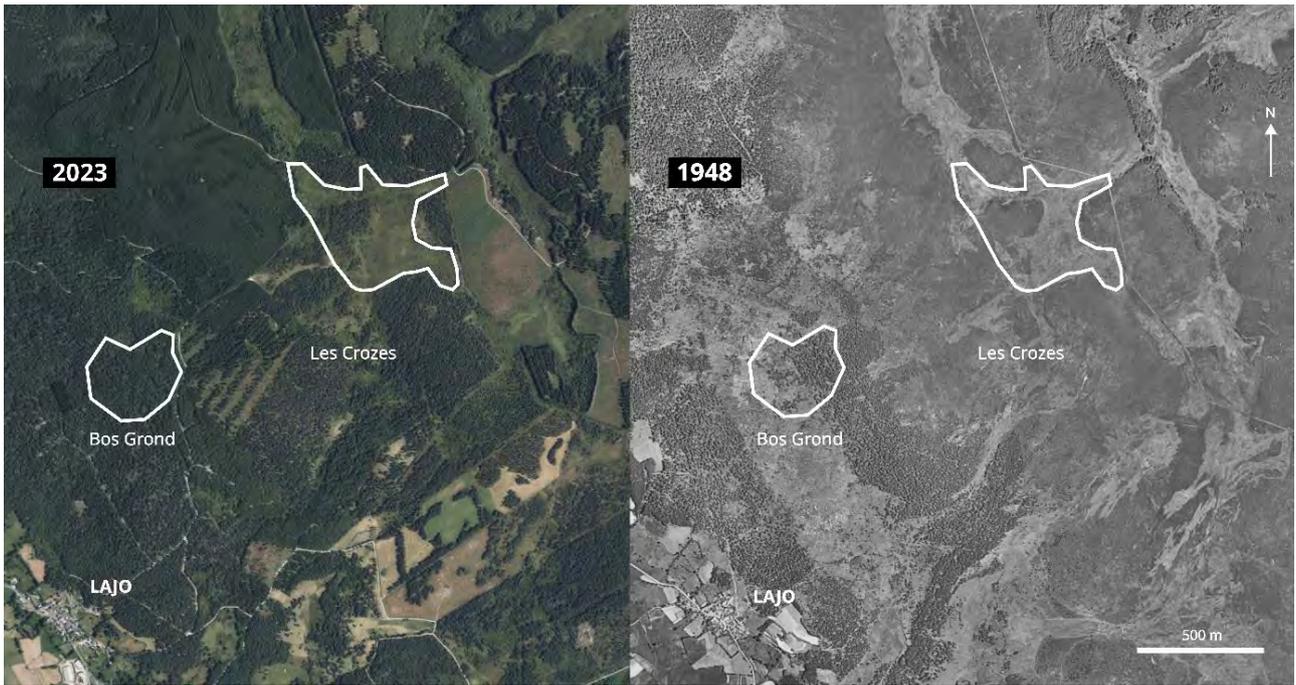


Figure 6. Photographies aériennes diachroniques du complexe tourbeux de Lajo. Les traits blancs correspondent au contour actuel des tourbières. Données cartographiques : © IGN 2024.

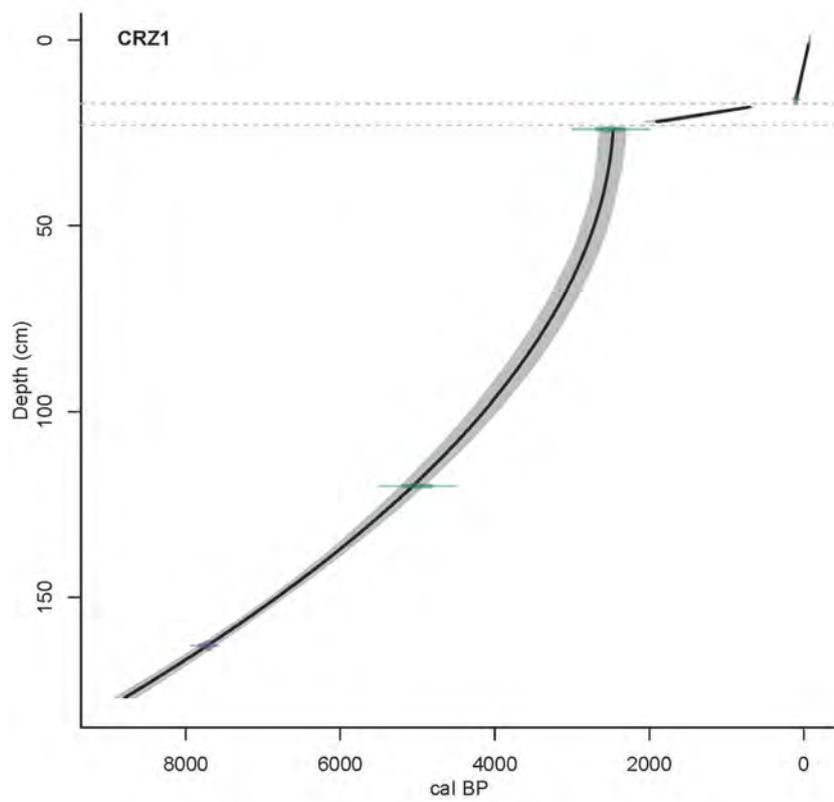


Figure 7. Modèle âge-profondeur de la carotte CRZ1 (Les Crozes)

Table 6. Datations radiocarbone de la tourbière des Crozes (LAJO-CRZ).

Profil	Code Labo	Matériel	Prof. (cm)	Age BP	Age cal. BP
CRZ1	Poz-184911	Tourbe	163-164	6890 ± 40	7750-7670
CRZ2	Poz-184677	Tourbe	96-97	4195 ± 35	4770-4610

## DISCUSSION

### 1- Âge de la tourbière

La datation radiocarbone et l'étude pollinique de la carotte nous ont conduit à l'hypothèse d'un hiatus sédimentaire situé entre 16 et 26 cm, ce qui semble fournir le modèle âge-profondeur le plus probable et cohérent par rapport au modèle théorique d'accumulation de tourbe. Le carottage CRZ1 a été réalisé dans la partie centrale de la tourbière des Crozes et présente un âge basal d'environ 8000 ans. C'est pour l'instant l'âge le plus ancien obtenu dans le complexe de Lajo (Muller et al., 2024). L'âge basal de la séquence CRZ2 (4500 cal. BP), prélevée dans la partie haute, est plus récent, ce qui suggère que le développement de la tourbière s'est fait d'aval en amont (Fig. 2).

### 2- Contexte paléobiogéographique et historique

L'étude des tourbières des Crozes et de Bos Grond s'inscrit dans un contexte paléobiogéographique mal connu. Le complexe tourbeux de Lajo abrite plusieurs espèces nordiques emblématiques rares en France comme *Betula nana*, *Carex diandra*, *C. limosa*, *Drosera rotundifolia*, *Salix lapponum* et *Vaccinium microcarpum* (Tables 4 et 5). Certaines de ces espèces, comme le bouleau nain et le saule des lapons, sont considérées comme des relictés glaciaires en Margeride (Reille et al., 1985 ; Vasari & Vasari, 1985), mais leur histoire reste mal connue (Reille, 1987). Le bouleau nain (*Betula nana*) n'est actuellement présent en France que dans deux régions, le Doubs (25) et la Margeride (48), qui correspond à sa limite méridionale en Europe. Caractérisé par de petites feuilles rondes et dentées et des chatons sessiles à écailles trifides, il est aisément reconnaissable des espèces

arborescentes dans le registre macrofossile (van Dinter & Birks, 1996).

De nombreuses études palynologiques ont permis de reconstituer la dynamique de végétation à l'échelle du Massif central depuis le Tardiglaciaire (par exemple, de Beaulieu et al., 1987, 1988). Bien que le Tardiglaciaire soit mal connu en Margeride (Reille et al., 1985 ; Reille, 1987), il est bien enregistré dans des régions proches (par exemple, Reille & de Beaulieu, 1981 ; de Beaulieu et al., 1994). Ces études ont montré que la végétation du dernier maximum glaciaire (vers 22 000 cal. BP) était dominée par *Artemisia*, *Ephedra* et des *Amaranthaceae*. Ces steppes furent progressivement remplacées au cours du Tardiglaciaire (entre 18 000 et 12 000 cal. BP) par des formations ligneuses à *Juniperus* et *Betula*. Les pins restent anecdotiques dans les communautés végétales du Massif central et en particulier en Margeride jusqu'à la révolution industrielle et jusqu'aux grands programmes de reboisements des zones montagneuses (Reille & Pons, 1982).

Les données polliniques n'ont pas été utilisées en Europe pour discriminer les différentes espèces de bouleaux (par exemple, David & Barbero, 1995). Il est pourtant possible de les distinguer, au moins en partie, par leur taille (Birks, 1968 ; Clegg et al., 2005 ; Karlsdóttir et al., 2007 ; Theuerkauf et al., 2024). De telles analyses morphométriques pourraient être appliquées aux tourbières de Margeride afin de mieux y caractériser la dynamique passée du bouleau nain.

### 3- Richesse spécifique des Bryophytes

La tourbière des Crozes est la tourbière du complexe de Lajo contenant le plus d'espèces de sphaignes, avec 10 espèces, dont 8 déjà connues (Sarrassat, 1931 ; Boudier, 1987 ; A. Rémond, com. pers.) et 2 nouvellement

découvertes dans le cadre de la session ORPAM 2024 (Table 2). Des espèces associées à des micro-habitats différents coexistent sur des surfaces réduites, révélant ainsi l'hétérogénéité de certaines zones : par exemple le diverticule SO de la tourbière abrite *Sphagnum capillifolium* (buttes), *S. divinum* (marges de buttes) et *S. fallax* (dépressions). *S. capillifolium* et *S. fallax* semblent être les espèces les plus communes de la tourbière.

La tourbière de Bos Grond est beaucoup moins riche, avec seulement 3 espèces de sphaignes qui sont d'ailleurs également présentes dans la tourbière des Crozes (Table 2). Cette faible richesse spécifique peut s'expliquer par sa taille réduite et son caractère plus sec (rappelons également que l'inventaire de cette tourbière a été réalisé de manière très exploratoire). Deux des espèces de sphaignes observées, *Sphagnum fallax* et *S. palustre*, sont toutefois caractéristiques de milieux plutôt humides. Ce sont des sphaignes à croissance rapide, mais qui se dégradent vite, contribuant ainsi faiblement à l'accumulation de tourbe. La dernière espèce que l'on retrouve sur le site est *S. subnitens*, qui forme des buttes. Cette espèce, à l'inverse des deux précédentes, montre une croissance et une dégradation plus lentes : elle compose ainsi une part plus importante de la tourbe (Andrus, 1968).

Les cortèges de sphaignes révèlent le caractère essentiellement minérotrophe des tourbières des Crozes et de Bos Grond. On observe cependant une différence importante entre la première, tourbière de grande taille et très ouverte avec une grande richesse spécifique, et la deuxième qui est une tourbière boisée formée d'une mosaïque de milieux. La tourbière de Bos Grond abrite notamment des espèces forestières que l'on ne retrouve pas aux Crozes, parmi lesquelles les mousses *Dicranum scoparium* et *Heterocladium heteropterum* (Table 2).

#### 4- Richesse spécifique et enjeux conservatoires des Trachéophytes

Les relevés réalisés (Tables 4 et 5) permettent

d'évaluer la richesse spécifique des deux tourbières prospectées : la tourbière des Crozes abrite 56 espèces vasculaires et la tourbière de Bos Grond en abrite 55. Les deux tourbières contiennent environ le même nombre d'espèces, mais la tourbière des Crozes est bien plus homogène que la tourbière de Bos Grond au regard de sa taille beaucoup plus importante (env. 40 vs. 6 ha).

Quatre espèces protégées au plan national présentent un fort intérêt patrimonial à Lajo : *Betula nana*, *Carex limosa*, *Drosera rotundifolia* et *Salix lapponum* (Annexe II - Arrêté du 20 janvier 1982 fixant la liste des espèces végétales protégées sur l'ensemble du territoire). Beaucoup d'autres ne sont pas protégées, mais sont déterminantes ZNIEFF en Occitanie : par exemple, *Carex diandra*, *Comarum palustre*, *Crepis paludosa*, *Menyanthes trifoliata*, *Sedum villosum* et *Vaccinium microcarpum*. Enfin, *Micranthes stellaris* est protégée dans plusieurs régions frontalières de l'Occitanie.

#### 5- Habitats

L'analyse AFC réalisée sur la tourbière des Crozes (Fig. 4) permet de distinguer différents habitats de la tourbière. L'axe 1, qui apparaît comme un gradient d'humidité, sépare d'une côté les habitats de buttes plus ou moins boisées (*Betula nana*, *Calluna vulgaris*, *Eriophorum vaginatum*, *Pinus sylvestris*, *Vaccinium myrtillus*) des milieux plus humides. L'axe 2, qui distingue, au sein des milieux humides, les cortèges non pâturés (CRZ-P, CRZ-E ; *Agrostis canina*, *Carex rostrata*, *Cirsium palustre*, *Epikeros pyrenaicus*, *Viola palustris*) des milieux pâturés (CRZ-F, CRZ-J ; *Juncus acutiflorus*, *J. conglomeratus*, *Galium uliginosum*, *Montia fontana*), reflète un gradient de perturbation. La différence de composition floristique de ces deux groupes réside essentiellement dans l'abondance des joncs, qui apparaissent ici comme des marqueurs de pâturage.

#### 6- Dynamique récente et perturbations

La dynamique de végétation peut être évaluée localement par l'étude diachronique des deux

placettes suivies par le CEN depuis 1996. Les données recueillies révèlent des changements dans les deux quadrats, plus précoces à P1 (1996-2003) qu'à P2 (2016-2021). Ces changements apparaissent relativement similaires, avec un développement des arbustes (en particulier la callune) au détriment de milieux plus ouverts : à P1, l'habitat, dominé par les sphaignes et *Polytrichum commune*, est colonisé entre 1996 et 2003 par un cortège floristique typique des buttes sèches (*Eriophorum vaginatum*, *Vaccinium microcarpum*, *V. myrtilloides* et *V. vitis-idaea*), associé à *Drosera rotundifolia* ; à P2, la communauté d'habitat humide dominée par *Carex echinata*, *Polytrichum commune*, *Salix lapponum* et *Sphagnum fallax* régresse entre 2016 et 2021 au profit de la callune. Cette évolution des placettes pourrait traduire un assèchement du milieu entraînant sa fermeture, peut-être lié à une modification de la pression de pâturage (la tourbière étudiée est en effet pâturée de manière extensive par des vaches Aubrac). L'étude diachronique des deux placettes révèle ainsi une hétérogénéité des habitats et des dynamiques dans un petit périmètre. Elle suggère par ailleurs que les communautés végétales locales sont extrêmement sensibles, même à de légers changements environnementaux.

Nous avons observé une végétation herbacée moins piétinée, plus haute et comprenant plus d'inflorescences dans la zone sommitale NO de la tourbière des Crozes, ce qui peut être attribué à la présence d'une clôture, qui exclut le troupeau de cette zone (Fig. 2). Cela suggère que la présence de bovins pose certains problèmes, car le pâturage, le piétinement et l'enrichissement du substrat semblent favoriser le développement des joncs et de la callune au détriment des habitats humides riches en espèces à fort intérêt patrimonial, comme *Carex limosa*, *C. diandra*, *C. pallescens*, *Drosera rotundifolia* et *Eriophorum angustifolium*. Une extrémité de canalisation qui semble reliée à une cabane a été observée dans le même coin nord-ouest de la tourbière des Crozes ; son rôle et son impact sont inconnus. Son installation est postérieure à 2013 d'après

les photographies aériennes (Mission P13000252 2013, IGN).

L'étude des photographies aériennes (Fig. 6) est complémentaire des relevés phytosociologiques, et permet d'y ajouter une vision diachronique beaucoup plus large au niveau spatial. A Bos Grond, les photographies aériennes montrent une fermeture du milieu depuis 1948, ce qui est confirmé par le relevé de 2024 des placettes du CEN, qui atteste de la présence locale des pins et du peuplier tremble. L'occurrence de jeunes individus d'*Abies alba*, *Fagus sylvatica* et *Quercus petraea* dans le sous-bois de la tourbière de Bos Grond (Table 5) confirme d'ailleurs sa dynamique d'afforestation. L'étude diachronique de photographies des Crozes (Fig. 6) montre également une dynamique de boisement aux abords de la tourbière, où des hybrides de *Pinus sylvestris* et *Pinus uncinata* se développent. Quelques-uns de ces hybrides sont également présents au cœur de la tourbière, mais conservent une taille réduite. Quelques souches témoignent d'action de gestion visant à conserver un milieu ouvert.

## CONCLUSION

Les relevés phytosociologiques réalisés depuis 1996 sur les tourbières des Crozes et de Bos Grond ont permis d'identifier différents milieux : prairie humide, fen, jonçaie, buttes à Ericacées et bois tourbeux. L'analyse multivariée de ces relevés met par ailleurs en avant un gradient hydrologique et un gradient de perturbation lié au pâturage qui favorise le développement des joncs. Ceci s'inscrit dans une dynamique d'afforestation globale appuyée par les inventaires de végétation et l'étude des photographies aériennes.

L'étude paléoécologique de la tourbière des Crozes, encore jamais réalisée, devrait permettre de préciser sa date et son mode d'initiation, sa dynamique végétale postglaciaire et les éventuelles perturbations anthropiques qui ont pu l'affecter. Ces données représentent des informations majeures pour aider à sa gestion conservatoire sur le long terme. Ce travail, entrepris cette année dans le cadre de la session ORPAM

2024, sera réalisé dans un cadre paléoécologique régional bien défini par plusieurs études palynologiques antérieures (par exemple, Reille & Pons, 1982 ; Reille et al., 1985 ; Reille, 1987).

## REMERCIEMENTS

Nous remercions la municipalité de Lajo pour l'autorisation de travail sur les tourbières ainsi que le département enseignement Biologie-Ecologie et l'équipe du bât. 35 de la Faculté des Sciences pour le prêt et la préparation du matériel de terrain.

## REFERENCES

- Birks H.J.B. (1968). The identification of *Betula nana* pollen. *New Phytologist*, 67 : 309-314.
- Andrus R.E. (1968). Some aspects of *Sphagnum* ecology. *Canadian Journal of Botany*, 64 : 416-426.
- Boudier P. (1987). Bryophytes observées au cours de la 13<sup>ème</sup> session extraordinaire de la SBCO : Causse Comtal, Aubrac et Margeride. *Bulletin de la Société Botanique du Centre-Ouest*, 18 : 363-380.
- Braun-Blanquet J. (1932). *Plant sociology, the study of plant community*. McGraw Hill Book, New York, 432 p.
- Clegg B., Tinner W., Gavin D., & Hu F. (2005). Morphological differentiation of *Betula* (birch) pollen in northwest North America and its palaeoecological application. *The Holocene*, 15 : 229-237.
- Daniels R.E. & Eddy A. (1985). *Handbook of European Sphagna*. Institute of Terrestrial Ecology, Abbots Ripton, Huntingdon, 262 p.
- David F. & Barbero M. (1995). De l'histoire du genre *Betula* dans les Alpes Françaises du Nord. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 89 : 455-467.
- de Beaulieu J.-L., Pons A. & Reille M. (1987). History of vegetation, climate and human action in the French Massif Central over the last 15,000 years. In : *Palaeohydrological changes in the temperate zone in the last 15000 years*, Symposium Höör, Sweden.
- de Beaulieu J.-L., Pons A. & Reille M. (1988). Histoire de la flore et de la végétation du Massif Central (France) depuis la fin de la dernière glaciation. *Cahiers de Micropaléontologie*, 3 (4) : 5-36.
- de Beaulieu J.-L., Andrieu V., Ponel P., Reille M. & Lowe J.J. (1994). The Weichselian Late-glacial in southwestern Europe (Iberian Peninsula, Pyrenees, Massif Central, Northern Apennines). *Journal of Quaternary Science*, 9 (2) : 101-107.
- Frey W., Frahm J.-P., Fischer E. & Lobin W. (2006). *The liverworts, mosses and ferns of Europe*. T.L. Blockeel (ed.), Harley, Colchester, 527 p.
- Hammer Ø., Harper D.A.T., & Ryan P.D. (2001). PAST: Paleontological Statistics software package for education and data analysis. *Paleontologia Electronica*, 4 : 1-9.
- Hugonnot V., Celle J. & Pépin F. (2015). *Mousses et hépatiques de France. Manuel d'identification des espèces communes*. Biotope, Mèze, 288 p.
- Hugonnot V. & Chavoutier L.C. (2021). Les Bryophytes de France, vol. 1. Anthocérotes et Hépatiques. Biotope, Mèze & Muséum d'Histoire Naturelle, Paris, 652 p.
- Jowsey P.C. (1966). An improved peat sampler. *New Phytologist*, 65 : 245-248.
- Karlsdóttir L., Thórsson Æ.T., Hallsdóttir M., Sigurgeirsson A., Eysteinnsson T., & Anamthawat-Jónsson K. (2007). Differentiating pollen of *Betula* species from Iceland. *Grana*, 46 : 78-84.
- Kotarba A., Moresco E. & Roux L. (2009). Inventaire et cartographie des sphaignes du Caroux. *Orpalm Synthesis*, 2 : 7-14.
- Muller S.D., Bonnet C., Cornet F., Montade V. & Terral J.-F. (2024). Les tourbières de Lajo, Margeride (Lozère). *Orpalm Synthesis*, 17 (1) : 9-28.
- Reille M. & de Beaulieu J.-L. (1981). Analyse pollinique de l'étang de Cheylade (Massif Central, France) : histoire tardiglaciaire et holocène de la végétation de la planète de Saint-Flour. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, Série III, Sciences de la Vie*, 292 : 243-246.
- Reille M. & Pons A. (1982). L'histoire récente de *Pinus sylvestris* L. en Margeride (Massif

- Central, France) et la signification de cette essence dans la végétation actuelle. *Comptes rendus des Séances de l'Académie des Sciences*, 249 (3) : 471-474.
- Reille M., de Beaulieu J.-L. & Pons A. (1985). Recherches pollenanalytiques sur l'histoire tardiglaciaire et holocène de la végétation du Cézallier, de la Planèze de St-Flour et de la Margeride (Massif-Central, France). *Pollen et Spores*, 27 (2) : 209-270.
- Reille M. (1987). L'histoire de la végétation de Margeride (Massif Central, France) depuis quelques siècles révélée par l'analyse pollinique de la tourbière de la Fouon de la Bique. *Revue du Gévaudan*, 1987 (2) : 17-25.
- Reimer P.J., 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.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 : 725.
- Sarrassat C. (1931). Mousses récoltées pendant la session de la Société botanique de France en Auvergne et Margeride (juillet 1928). *Bulletin de la Société Botanique de France*, 78 (4) : 508-510.
- Stuiver M. & Reimer P.J. (1993). Extended <sup>14</sup>C database and revised CALIB radiocarbon calibration program. *Radiocarbon*, 35 : 215-230.
- Theuerkauf M., Nehring E., Gillert A., Bodien P.M., Hein M. & Urban B. (2024). First automatic size measurements for the separation of dwarf birch and tree birch pollen in MIS 6 to MIS 1 records from Northern Germany. *Ecology and Evolution*, 14 (6), e11510.
- Tison J.-M. & de Foucault B. (2014). *Flora Gallica*. Biotope, Mèze et Société Botanique de France, Paris, 1196 p.
- van Dinter M. & Birks H.H. (1996). Distinguishing fossil *Betula nana* and *B. pubescens* using their wingless fruits: implications for the late-glacial vegetational history of western Norway. *Vegetation History and Archaeobotany*, 5 : 229-240.
- Vasari A. & Vasari Y. (1985). Relic occurrence of *Betula nana* L. in Massif Central, France. *Ecologia mediterranea*, 11 (1) : 65-68.



# INSTALLATION ET EXPANSION DU PIN SYLVESTRE (*PINUS SYLVESTRIS*) SUR ET AUTOUR DE LA TOURBIERE DES CROZES (LAJO, LOZERE) PENDANT LA PERIODE CONTEMPORAINE

Manon Durand <sup>1</sup>, Yann Panaïotis <sup>2</sup>, Amandine Viala <sup>3</sup>

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

<sup>1</sup> durandferu.manon@gmail.com, <sup>2</sup> yann.panaïotis@gmail.com, <sup>3</sup> amandine.viala29@sfr.fr

Encadrement : Jean-Frédéric Terral et Laure Paradis

*Citation* : Durand M., Panaïotis Y. & Viala A. (2025). Installation et expansion du pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) sur et autour de la tourbière des Crozes (Lajo, Lozère) pendant la période contemporaine. *Orpalm Synthesis*, 18 (1) : 33-46.

---

**Résumé** : L'installation et la dynamique de colonisation du milieu du pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.), espèce pionnière, aux abords immédiats de la tourbière des Crozes (Lajo, Lozère, massif de la Margeride) sont étudiées. L'analyse dendrochronologique menée sur 70 individus établit un modèle prédictif de l'âge des arbres en fonction de leur circonférence mesurée à la base du tronc. Les données suggèrent que cette essence est arrivée il y a une centaine d'années. La déprise pastorale, les aléas météorologiques et les perturbations anthropiques ont probablement affecté la structure en âge de la population et la dynamique de colonisation de l'espèce.

**Mots clés** : Dynamique forestière, Massif central, dendrochronologie, modèle prédictif de l'âge des arbres

**Abstract**: *Establishment and expansion of Scots Pine (Pinus sylvestris L.) within and around the Crozes Peatland (Lajo, Lozère) during the modern period.* The establishment and colonisation dynamics of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), a pioneer species, in the immediate vicinity of the Crozes peat bog (Lajo, Lozère, Margeride massif) were studied. The dendrochronological analysis carried out on 70 individuals established a predictive model of tree age based on their circumference measured at the base of the trunk. The data suggests that this species arrived around a hundred years ago. Pastoral abandonment, meteorological hazards and human disturbance have probably affected the age structure of the population and the colonisation dynamics of the species.

**Keywords**: Forest dynamics, French Massif central, dendrochronology, radial growth models

**L**e pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L., Pinaceae) présente l'aire de répartition la plus étendue des conifères européens : il s'étend d'est en ouest sur 9000 km du Portugal à la

Russie orientale, et du nord au sud sur 4000 km depuis la Norvège jusqu'au sud de l'Espagne, en Andalousie (Arbez, 1987). Dans la région méditerranéenne, il est principalement cantonné aux montagnes de l'ouest (Portugal, Espagne et

France) (Médail, 2001). Ses capacités de dispersion et de colonisation des zones à sol pauvre lui ont permis de s'étendre en Europe depuis l'Asie. Plus récemment, sa plantation pour la commercialisation de son bois a contribué à son expansion dans les zones en dehors de la zone de dispersion naturelle de ses graines (Pérot et al., 2007).

Sa capacité d'hybridation avec les espèces proches phylogénétiquement (section *Pinus*, Subsection *Pinus* ; Germandt et al., 2005) lui assure également une forte probabilité d'installation dans les zones où il est absent (Neet-Sarqueda et al., 1988). Parmi les 111 espèces de pins existant actuellement (Germandt et al., 2005), le pin noir (*Pinus nigra* Legay), le pin à crochets (*Pinus uncinata* Ramond ex DC) et le pin mugho (*Pinus mugo* Turra) partagent son aire de répartition (Roman-Amat, 1986). Cette espèce pionnière et expansionniste colonise efficacement les zones perturbées, notamment les régions où les pratiques agro-sylvo-pastorales traditionnelles sont abandonnées (Caplat et al., 2006). L'ensemble de ses attributs lui ont permis de coloniser le Massif central, et en particulier la Margeride. Ce massif montagneux culminant à 1551 m est situé aux limites des départements du Cantal, de la Haute-Loire et de la Lozère. Dans cette région, il recouvre l'ensemble du socle granitique et les pentes du massif, cohabitant principalement avec le pin à crochets, lui-aussi introduit récemment. Son abondance actuelle dans le Massif central a conduit à l'hypothèse de l'existence d'un 'étage du pin sylvestre', zone où, en l'absence d'intervention humaine et dans des conditions spécifiques (climat sec et substrat pauvre), cet arbre constituerait une série de végétation. Cette hypothèse a été invalidée par Reille & Pons (1982), qui montrent son introduction récente dans le Massif central. Son installation et son expansion sont liées à la déprise agricole de la révolution industrielle (Doree, 1995 ; Bollena, 1983 ; Bailleux et al., 2025). Faute de pression pastorale significative, le pin sylvestre a

contribué, avec *Betula pendula* (bouleau verruqueux) et *B. pubescens* (bouleau pubescent) au boisement des tourbières (Cubizolle et al., 2014).

Les tourbières sont des archives sédimentaires paléoenvironnementales précieuses qui permettent reconstruire les paléo végétations et comprendre les dynamiques de colonisation végétales grâce aux analyses palynologiques (Streel, 2023). Lorsqu'on s'intéresse à des périodes de quelques siècles, il est possible d'y associer des analyses dendrologiques. La dendrologie est une discipline de la biologie qui étudie les interactions entre les arbres et leur environnement à travers l'analyse de leurs cernes de croissance (Fritts & Swetnam, 1989). Ce sont des cercles concentriques de xylème secondaire ou bois formés annuellement par le fonctionnement du cambium, lequel est tributaire de facteurs intrinsèques (liés à l'espèce et à des paramètres développementaux) et est modulé par des facteurs externes, abiotiques (ex. sol et paramètres climatiques) et biotiques (densité du boisement, compétition). Désormais, la morphologie et la génétique des arbres sont prises en compte pour l'analyse des cernes et les techniques peuvent également être appliquées sur des arbres morts ou brûlés (Payette & Filion, 2010). La dendrochronologie, composante de la dendrologie, permet d'évaluer l'âge des arbres et des communautés végétales, et de dater des événements marquants dans l'histoire des arbres (Latte et al., 2012). Cette technique est l'une des disciplines les plus utilisées dans la recherche paléo-forestière.

Elle est utilisée ici pour mieux comprendre l'émergence et la dynamique de colonisation de la population de pin sylvestre, actuellement présente autour de la tourbière. L'approche développée, combinant dendrochronologie et statistiques, doit permettre d'estimer quand cette espèce s'est installée dans la zone étudiée, c'est-à-dire aux abords de et sur la tourbière des Crozes (Lajo, Lozère). *Pinus sylvestris* pouvant vivre 400 ans, si les

arbres du peuplement sont plus jeunes, ils seront considérés comme les premiers individus de ce peuplement. L'étude vise également à étudier la structure en âge de la population.

## MATERIEL ET METHODES

### 1- Du terrain au laboratoire

Le travail de terrain a eu lieu en août 2024, aux abords et sur la tourbière des Crozes (Fig. 1). Les contextes géologiques et environnementaux sont décrits dans l'article introductif (Henriet et al, 2025). Soixante-dix individus de pin sylvestre de différentes classes d'âge et de taille ont été sondés avec une tarière de Pressler. Les prélèvements ont été réalisés à hauteur de

poitrine ou le plus bas possible en fonction de la morphologie de l'arbre. Les prélèvements de carottes à la base n'étaient physiquement pas possibles au vu du matériel utilisé. L'objectif était d'atteindre le centre du tronc (la moelle résiduelle) afin de pouvoir déterminer l'âge de l'arbre à la hauteur de la zone carottée. Pour chaque arbre préalablement géoréférencé (Annexe 1), la circonférence du tronc a été mesurée en deux points : au niveau du carottage (*circ-carotte*) et à la base du tronc (*circ-base*). Les carottes dendrologiques ont ensuite été analysées à l'Université de Montpellier (ISEM et département BE). Pour chacune, le nombre de cernes a été comptabilisé en allant du cambium au centre.

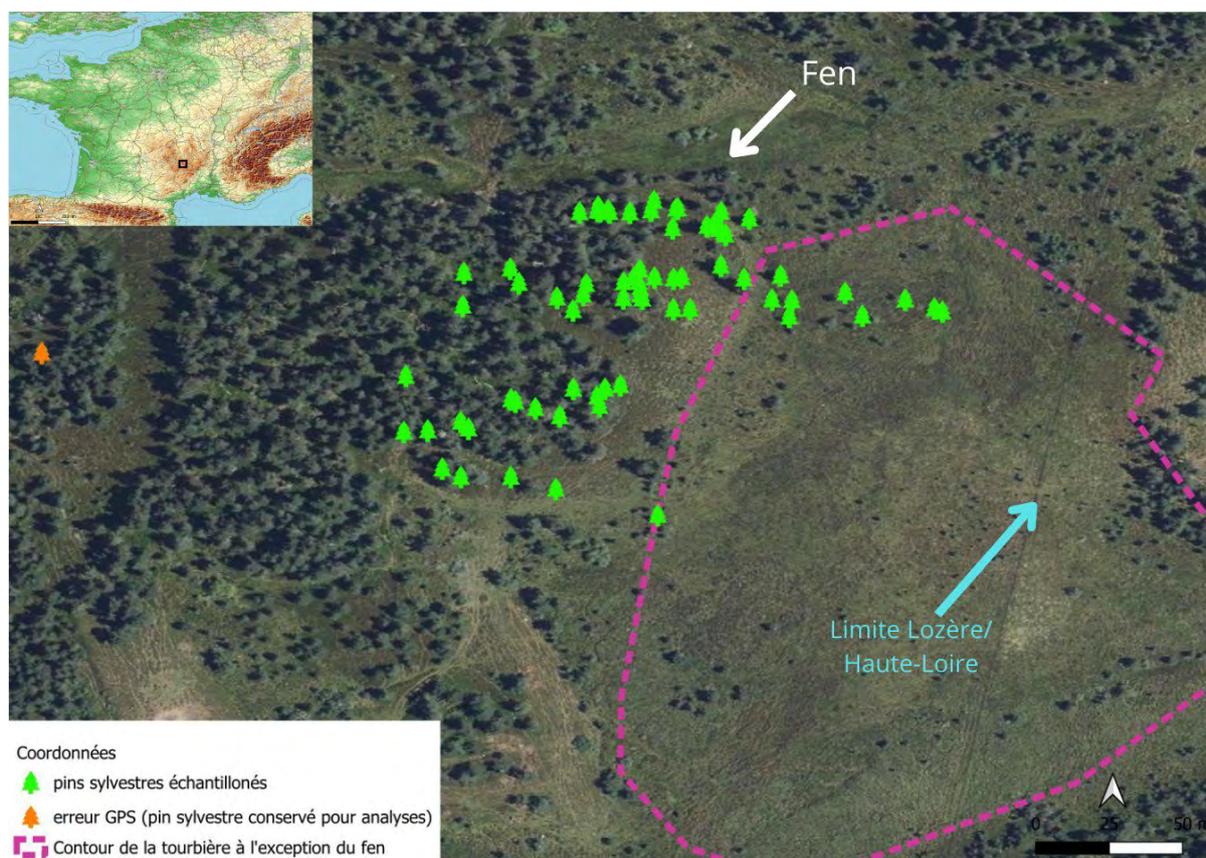


Figure 1. Localisation géographique de la tourbière des Crozes et des pins sylvestres échantillonnés  
Modèle de référence : circonférence à la carotte =  $f(\text{âge})$

L'établissement d'un modèle prédictif de l'âge des arbres nécessitait de modéliser au préalable la relation entre circonférence à la carotte (cm) et âge (années comptés).

Cette première étape permettait de mettre en évidence la force du lien qui existait entre l'âge et la circonférence. En cas de lien trop faible ou inexistant, il aurait été

impossible de prédire l'âge de l'arbre à sa base grâce à sa circonférence car la partie incertaine (partie non expliquée et imprédictible) de l'âge aurait été supérieure à la partie expliquée. Cette étape préalable fût réalisée à partir de données mesurées et reliées directement les unes aux autres (l'âge compté et la circonférence à la carotte ont été pris au même endroit). Pour ce faire, une régression linéaire a été utilisée en considérant la circonférence comme une variable dépendante et l'âge comme une variable explicative. Il a été nécessaire de vérifier ses conditions de validité. Un test de *Shapiro-Wilks* a été réalisé sur les résidus du modèle, avec comme hypothèse  $H_0$  "Les résidus suivent une loi normale". Un test de *Durbin-Watson* a été également réalisé pour vérifier l'autocorrélation des résultats, ainsi qu'un test de *Breusch-Pagan* qui vérifiait l'homoscédasticité. Un dernier test a été réalisé pour connaître le poids de chaque valeur dans la régression. Les distances de *Cook* et les DFFITS (*difference in fit*) et DFBETAS (*difference in beta*) ont été calculées. La première donnait le poids relatif de chaque valeur sur la déviation du modèle. Les deux autres permettaient de connaître l'évolution du modèle si chaque valeur était enlevée chacune leur tour. L'ensemble de ces tests justifiait la validité du modèle explicatif de référence et autorisait la construction d'un modèle prédictif sur sa base.

*Modèle prédictif :  $\hat{age} = f(circ-base)$*

Le modèle transposé du modèle de référence ( $circ-carotte = f(\hat{age})$ ), soit le modèle inverse ( $\hat{age} = f(circ-carotte)$ ) a été établi. Les paramètres de pente et d'ordonnée à l'origine estimés ont été utilisés comme modèle prédictif. Un intervalle de confiance sur la prédiction a été calculé pour déterminer au mieux l'âge des arbres. Les mêmes tests de validité que ceux utilisés pour le modèle explicatif ont été appliqués sur ce modèle. Les hypothèses de normalité des résidus, d'homoscédasticité, d'indépendance des résidus et de poids équivalent des données devaient être respectées.

*Structure en âge de la population*

Le modèle prédictif a ensuite été appliqué sur les mesures de circonférence prises à la base des troncs des arbres (*circ-base*). Les âges prédits donnent la structuration en classe d'âge de la population actuelle de pin sylvestre étudiée. Un test de normalité de *Shapiro-Wilk* a été réalisé sur chaque cohorte qui se démarquait.

*Dynamique de colonisation*

Grâce aux images aériennes de l'IGN, la dynamique de colonisation du pin sur la tourbière fût estimée pour la période 1963-2024. Sur chacune d'elles, un rectangle représentant 0,034 km<sup>2</sup> était positionné. Le taux de recouvrement par *Pinus sylvestris* fût estimé grâce à *ImageJ* ainsi que le sens de progression de l'espèce. Les résultats ont été comparés aux données dendrologiques.

*Analyses sur R*

Les traitements de données ont nécessité l'utilisation des packages R "*tidyverse*" ([Wickham, 2016](#)), "*ggplot2*" ([Wickham et al., 2007](#)), "*lmtest*" ([Zeileis & Hothorn, 2002](#)) et "*ggpbur*" ([Kassambara, 2016](#)). Ces packages ont permis la réalisation des graphiques et le contrôle de la validité des modèles.

## RESULTATS

### 1- Modélisation linéaire de la relation circonférence au point de carottage du tronc / âge de l'arbre

Les hypothèses  $H_0$  des tests de *Shapiro* (test de normalité des résidus), de *Durbin Watson* (indépendance des résidus) et de *Breusch Pagan* (homoscédasticité des résidus) sont conservées ( $p-value > 0,05$  ; Annexe 2). Par conséquent, la régression linéaire est considérée comme valide et exploitable. Six valeurs se sont révélées plus influentes que les autres par le test de *Cook*. Toutefois, en comparant les coefficients obtenus lors du recalcul du modèle sans elles, à ceux du modèle original, avec un test de *Student*, les différences n'apparaissent pas signifi-

tives ( $p\text{-value} > 0,05$ ). Le modèle est considéré comme valide et utilisable dans la suite de l'étude. Il présente un  $R^2$  ajusté de 0,80. La circonférence du tronc mesurée pour chaque individu au point du carottage réalisée est représentée en fonction de l'âge (Fig. 2). Une relation linéaire est établie entre ces deux variables, par

l'équation  $Y=0,27+0,68X$ . La ligne rouge représente la régression associée à l'équation, entourée par l'intervalle de confiance à 95% associé. La régression révèle une relation positive entre les deux variables, soit quand l'âge augmente la circonférence augmente.

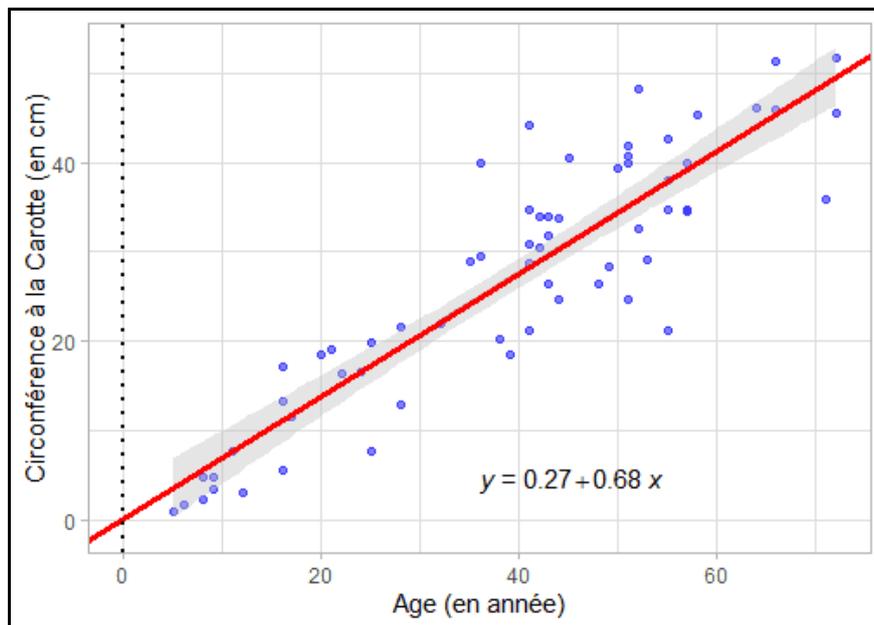


Figure 2. Modèle linéaire de référence décrivant la relation entre la circonférence du tronc mesurée à hauteur de carottage (en cm) et le nombre de cernes de croissance comptabilisés (âge en années)

## 2- Modélisation linéaire de l'âge de l'arbre en fonction de sa circonférence à la base du tronc

Les conditions de validité du modèle prédictif étant respectées (Annexe 2), il est considéré comme valide. 8 valeurs de circonférences sont plus influentes que les autres (test de *Cook*). Néanmoins, en comparant les coefficients obtenus lors du recalcul du modèle sans elles, à ceux du modèle original, les différences n'apparaissent pas significatives ( $p\text{-value} > 0,05$ ). Le modèle prédictif est donc considéré comme utilisable en l'état dans la suite de l'étude. Il présente un  $R^2$  ajusté de 0,81 (81% de l'âge est "expliqué" par la

circonférence). L'âge prédit de l'arbre est représenté en fonction de sa circonférence mesurée (Fig. 3). Une relation linéaire est établie entre ces deux variables, par l'équation  $Y=7,37+1,17X$ . Chaque point représente un individu échantillonné autour de la tourbière, dont l'âge est estimé par le modèle. La ligne rouge représente la droite de régression associée à l'équation, entouré par l'intervalle de confiance à 95%. La régression révèle une relation positive entre les deux variables. Il est ainsi possible de prédire l'âge d'un individu à partir de sa circonférence, avec un intervalle de confiance inférieur à 6,5 ans. Les arbres étudiés ont des âges estimés compris entre 8,5 et 77,8 ans (Annexe 3).

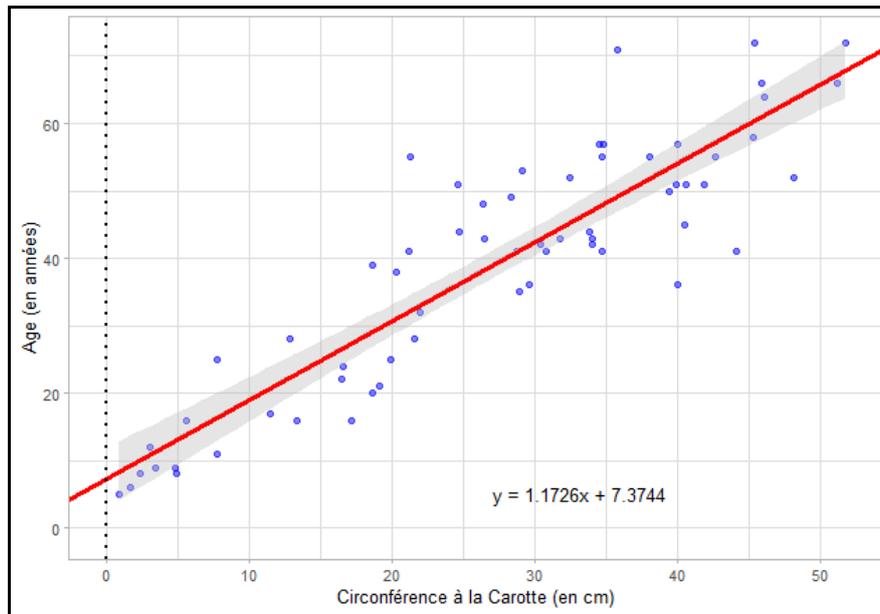


Figure 3. Modèle linéaire prédictif de l'âge (en années) en fonction de la circonférence mesurée à la base du tronc (en cm)

### 3- Structuration en âge de la communauté

La Figure 4 décrit la structure en âge de la population étudiée. Quinze classes d'âge  $y$  sont définies à partir de âges moyens prédits, avec un pas de temps de 2 ans. La distribution s'étale entre 8 et 78 ans. La classe [54 ; 56] est la plus importante avec 5 individus. Lorsqu'on détermine la normalité de la distribution générale, il est impossible de dire qu'une seule population est observée (*Shapiro-Wilk* :  $p$ -value < 0,01). Le dépassement du seuil de 1% indique des distributions non normales dans la population. Il est alors possible d'observer 3 modes statistiques qui correspondent à 3 cohortes. Le premier se compose de 13 individus allant de 8 à 24 ans ( $p$ -value > 0,05). Le second regroupe 14 individus, d'âges compris entre 26 et 39 ans ( $p$ -value > 0,05). La troisième et dernière catégorie se compose de 38

individus, échelonnés entre 42 et 78 ans ( $p$ -value > 0,05), cette dernière catégorie comprend le plus vieil arbre de l'échantillon ( $77 \pm 5$  ans).

### 4- Images aériennes

Les photographies aériennes (cartes IGN ; <https://remonterletemps.ign.fr>) de cette parcelle en Margeride, montrent la colonisation du milieu par le pin à partir des années 1960 (Fig. 5). Sur la photo aérienne de 1963, pour un carré de 0,034 km<sup>2</sup>, le recouvrement en *P. sylvestris* est d'environ 5%. En 1976, 13 ans plus tard, le recouvrement atteint 30%. En 2004, le recouvrement est de 70% et en 2020, de 60%. Ainsi, entre 1963 et 1976 soit en 13 ans, la surface recouverte a été multipliée par 6, puis par 2,3 entre 1976 et 2004 soit en 28 ans. En outre, de 2004 à 2020, en 16 ans, la population est divisée par 0,85.

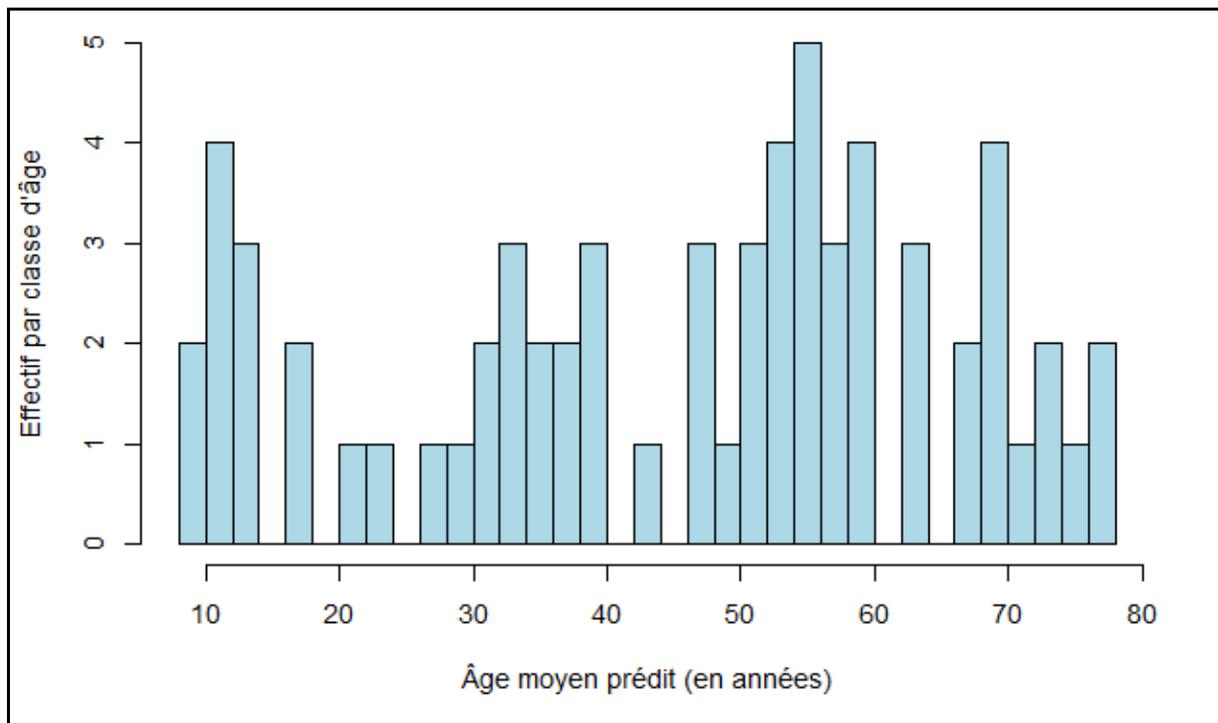


Figure 4. Nombre d'individus de pins sylvestres par classe d'âge (pas de temps = 2 ans)

## DISCUSSION

### 1- Relation entre la circonférence du tronc de l'arbre et son âge

L'analyse des données dendrochronologiques permet de déterminer un lien entre âge des arbres étudiés et circonférence à la carotte (Fig. 2). Cette corrélation linéaire très forte entre les deux variables est rare dans la littérature pour le genre *Pinus* (Devineau, 1991 ; Cantegrel et al., 2023). Le modèle construit se base sur les circonférences qui dépendent de l'épaisseur des cernes qui les composent. Or, l'accroissement en épaisseur est constant entre 0 et 50 ans pour *Pinus sylvestris*, ce qui correspond à notre jeu de données (Nicault et al., 2010). Ainsi, la croissance des cernes des individus au niveau du prélèvement semble être linéaire du fait de leur jeunesse. En effet, *P. sylvestris* pouvant vivre 400 ans en moyenne (Houston-Durrant et al., 2016), les arbres de moins de 100 ans peuvent être considérés comme jeunes. Si les âges comptés sur les carottes avaient été plus importants (proches de 100 ans), la relation

linéaire aurait été moins forte. En effet, plus le pin vieillit, plus l'épaisseur des cernes diminue (épaisseur d'un cerne à 10 ans = épaisseur de 5 cernes à 150 ans) (Nicault et al., 2010). La croissance ralentit et évolue de manière non linéaire et asymptotique. Aussi, l'estimation de l'âge par la circonférence deviendrait moins précise (Cantegrel et al., 2023) avec un risque de sous-estimation de l'âge. Le modèle linéaire aurait considéré l'épaisseur engendrée par plusieurs cernes comme celle d'un seul cerne.

### 2- Installation et structure de la communauté actuelle de pin sylvestre autour de la tourbière des Crozes

La population de pin sylvestre présente actuellement autour de la tourbière des Crozes semble émerger durant la deuxième moitié du 20<sup>e</sup> siècle, puisque le plus vieil arbre documenté à partir de l'analyse dendrochronologique se situe dans cette classe d'âge. Cette hypothèse est supportée par l'imagerie aérienne de la zone (Fig. 5). La colonisation semble être rapide en

début de peuplement du fait de conditions climatiques montagnardes favorables au pin sylvestre (climat sec et substrat pauvre), la diminution des perturbations (piétinement, broutage) liées à l'agropastoralisme ou des mécanismes biologiques, comme une augmentation de

production de graines ou une meilleure dispersion. Elle aurait commencé à partir de diaspores provenant de communautés plantées ailleurs dans le massif dans les années 1870 dans un but d'exploitation du bois (Lacaze, 1964 ; Ningre, 2007).

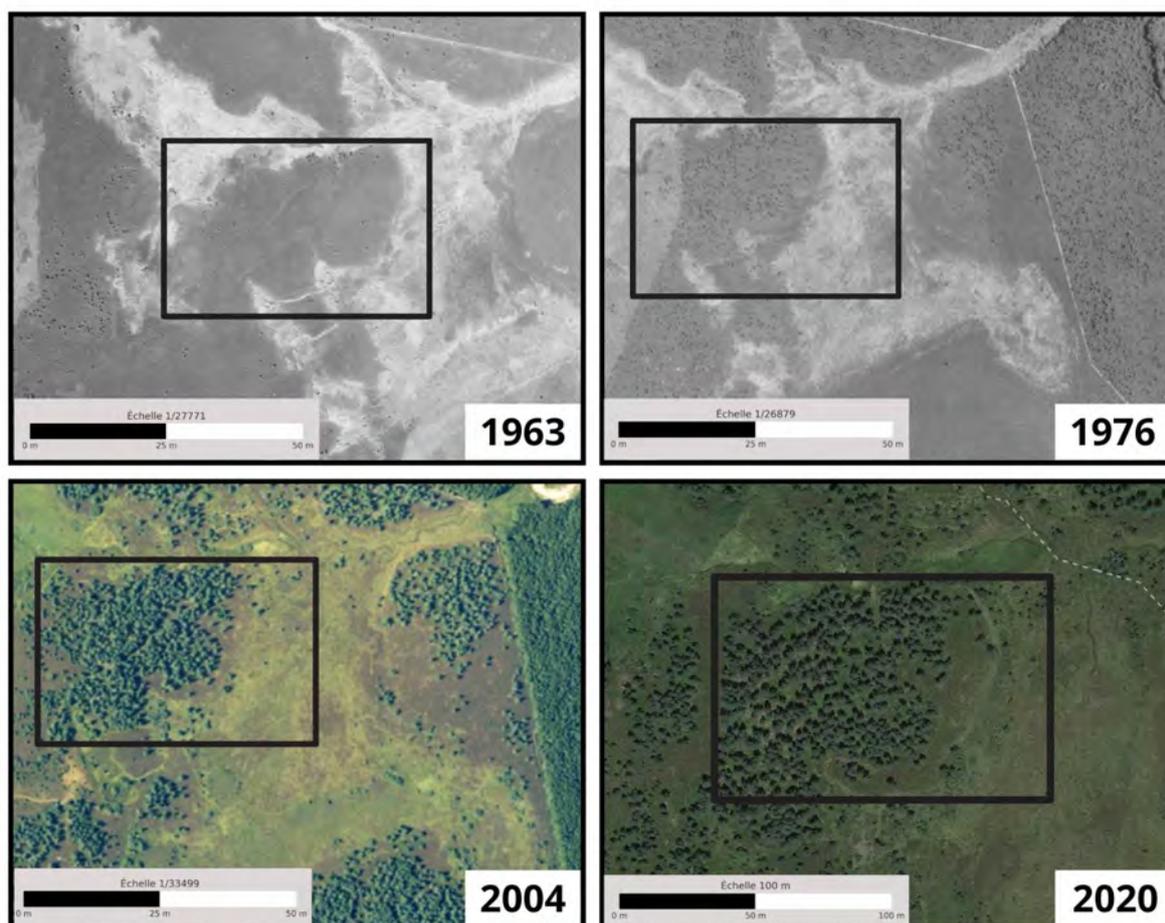


Figure 5. Photographies aériennes pour la période 1963-2024 de la zone d'étude (rectangle noir) (IGN, 2024)

Le pin sylvestre échantillonné le plus ancien a  $77 \pm 5$  ans. Néanmoins, il est probable que l'installation de la population ait débuté avant 1947. En effet, l'individu échantillonné se situe sur les bords de la tourbière. Or, d'après les photos aériennes, les premiers individus observables se situent plus loin, à l'ouest de la zone. Une calibration à partir des pins aux abords immédiats de la tourbière permet de dire qu'il faut au moins 40 ans à un individu pour être observable depuis le ciel avec la résolution actuelle. Il est possible d'estimer

que les pins visibles en 1963 ont au moins 40 ans, donc qu'ils ont germé au plus tard en 1920. La population aurait donc environ 100 ans. Cette hypothèse est en accord avec les données palynologiques de la Lozère en général (Servera Vives et al., 2014) et de la tourbière des Crozes en particulier (Bailleux et al., 2025).

Grâce aux photos aériennes, il est également possible de voir que les individus poussent en groupements serrés et non en ligne régulière. Cela suggère que

la population n'est pas issue d'une plantation, mais d'une dynamique spontanée. Cette dynamique a probablement été permise par la réduction de la pression pastorale. Les vaches qui pâturent encore dans la zone sont moins nombreuses qu'avant 1910, début du déclin de la population régionale (Ogden, 1978) et de la réduction des pratiques agropastorales. Trois cohortes distinctes sont observées au lieu de la population unique présumée (Fig. 4), probablement en relation avec des perturbations liées aux activités humaines ou à des aléas météorologiques ayant détruits des classes d'âges entières. Le gyrobroyage de la zone ayant eu lieu en 2004 (Lepart, 2005), ainsi que les événements météorologiques de 1982 (tempête suivi de fortes chutes de neige entraînant la mort des semis par écrasement ou sectionnement de leur tête ; Staron, 1986) peuvent expliquer l'absence des classes d'âges [18;20[ et [40;42[. Ces absences causent des manques dans la distribution, ce qui entraîne le rejet de l'hypothèse d'une population suivant une loi normale. D'autres événements ont pu impacter la population mais de manière moins marquante. Ainsi, les tempêtes Lothar et Martin en 1999 ont pu avoir un impact sur la distribution des individus âgés de 25 ans, puisque les trajectoires passaient directement sur la zone étudiée (Salomon, 2000).

La population actuelle de *Pinus sylvestris* autour de la tourbière s'inscrit dans une succession végétale. Il est possible d'observer l'ensemble des étapes de la succession autour des Crozes. La callune (*Calluna vulgaris*), favorisée par le pâturage, a d'abord colonisé les milieux ouverts (Fig. 6A). *P. sylvestris* s'installe ensuite, à l'abri sous le couvert végétal dense qu'elle forme. Le relâchement de la pression pastorale exercée sur les semis de pin permet leur croissance (Fig. 6B). Toutefois, les vaches paissent encore sur et autour de la tourbière, mais leur nombre et la durée de leur présence est vraisemblablement plus faible qu'au 19<sup>e</sup> siècle. Lors de la colonisation du pin, le

milieu tend à se refermer, créant alors des conditions favorables à l'installation du hêtre (Fig. 6C). Cet arbre très compétitif tend à remplacer le pin sylvestre (Prevosto & Coquillard, 2001 ; Curt & Prevosto, 2002). La forêt mixte pin-hêtre peut perdurer une cinquantaine d'années jusqu'au dépérissement des pins, incapables de se régénérer sous le couvert des hêtres (Doree, 1995; Dreyer, 2005). L'écosystème étudié est actuellement dans une phase de transition entre les deux peuplements forestiers, avec quelques individus de hêtre au cœur d'un peuplement dense de pin sylvestre. Les données palynologiques des Crozes ne permettent pas de dater le début de cette succession du fait d'un hiatus entre 2000 et 100 cal. BP. La végétation avant le hiatus (hêtraie) est très différente de l'actuelle, où *Calluna vulgaris* et *Pinus sylvestris* sont présents (Bailleux et al., 2025).

## CONCLUSION

La population de *Pinus sylvestris* installée actuellement sur la tourbière des Crozes se serait établie il y a au moins 80 ans d'après les données dendrochronologiques, et environ 100 ans pour les données photographiques et palynologiques. Échantillonner plus de pins, localisés sur l'ensemble du pourtour de la tourbière des Crozes permettrait une description plus complète de la structure en âge de la population, donc une évaluation plus précise de l'ancienneté de son émergence. Il est peu probable que l'individu le plus ancien de notre échantillon (~80 ans) corresponde à la première installation du pin autour de la tourbière des Crozes. L'étude de la structure spatiale et d'âge de la communauté permet de comprendre que la dynamique d'expansion du pin sylvestre a probablement été impactée par des aléas naturels et anthropiques. Une application du modèle prédictif sur l'ensemble des pins de la tourbière dont la circonférence à la base aura été mesurée permettrait de connaître la date d'arrivée du pin sur site et pas uniquement dans la zone étudiée.

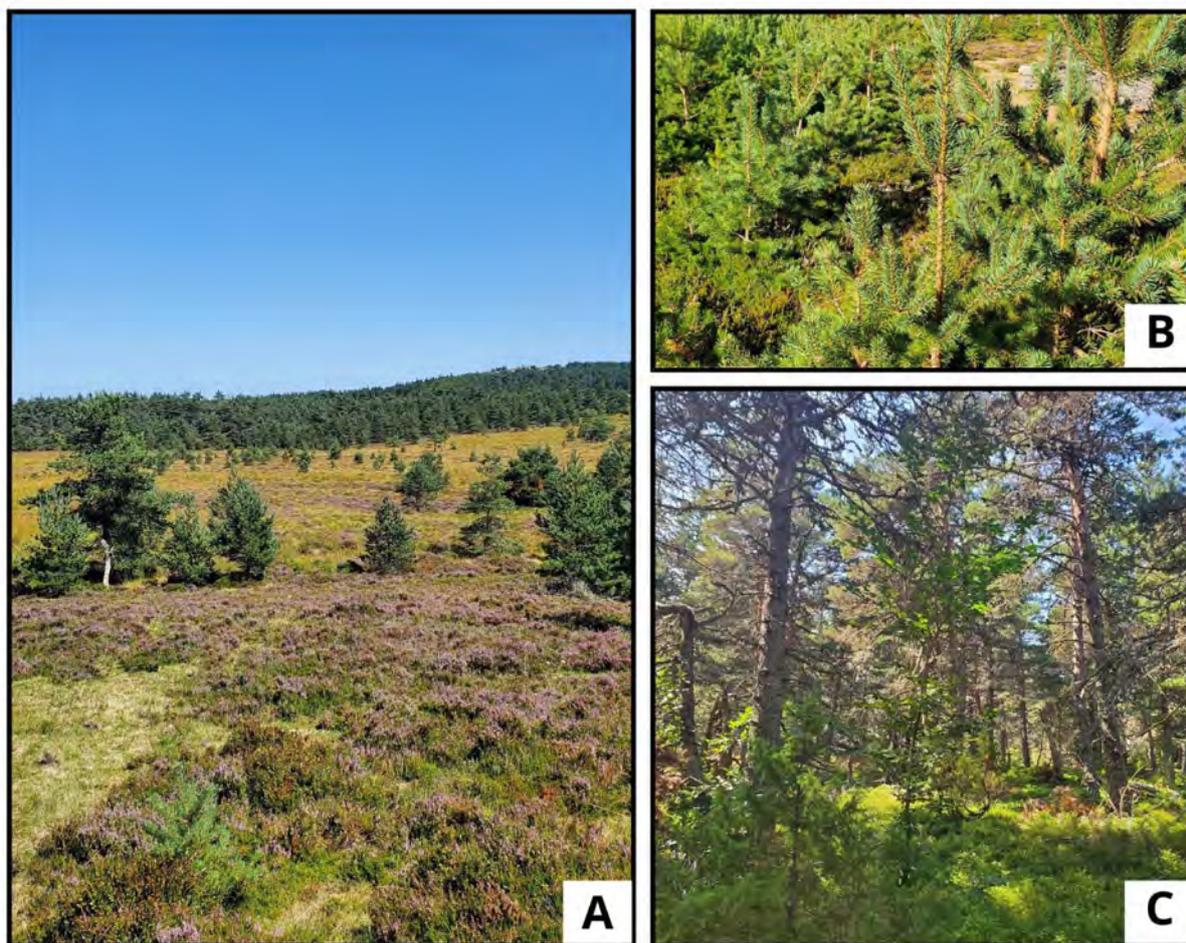


Figure 6. Vues du site. A, Lande à callune et pin sylvestre (Lajo, Margeride) ; B, Recolonisation après une perturbation (ici, gyrobroyage) du pin sylvestre ; C, Installation du hêtre (individus au premier plan) dans la pinède à pin sylvestre dont le sous-bois est dominé par le myrtillier commun (*Vaccinium myrtillus*).

## REFERENCES

- Arbez M. (1987). *Les ressources génétiques forestières en France. Tome 1 : Les conifères*. Quae, Paris, 239 p.
- Augé J.-C. (2010). *Tourbières et agriculteurs*. Pôle-relais tourbières, Besançon, 6 p. [document non publié].
- Bailleux C., Laval T. & Rabbia-Ré A. (2025). Histoire de la tourbière des Crozes (Margeride, France) et de ses alentours : étude pollinique. *Orpalm Synthesis*, 18 (1) : 63-76.
- Bollena R.S. (1983). Les forêts de la Lozère. *Forêt méditerranéenne*, 1 : 3-44.
- Cantegrel R., Renaux B. & Lathuillière L. (2023). Le Pin à crochets arverne, ou l'indigénat de *Pinus uncinata* Ram. dans les montagnes d'Auvergne. *Revue forestière française*, 74 : 429-448.
- Caplat P., Lepart J. & Marty P. (2006). Landscape patterns and agriculture: modelling the long-term effects of human practices on *Pinus sylvestris* spatial dynamics (Causse Mejean, France). *Landscape Ecology*, 21 : 657-670.
- Cubizolle H., Argant J., Fassion F., Latour-Argant C., Deng-Amiot Y. & Dietre B. (2014). L'histoire de la végétation depuis la fin du tardiglaciaire et l'évolution de l'emprise humaine à partir du milieu de l'holocène dans le Massif Central oriental (France). *Quaternaire*, 25 (3) : 209-236.
- Curt T. & Prévosto B. (2002). Scots pine colonization of heathlands after grazing

- abandonment in a mid-elevation area (French Massif Central): population structure, impacts on vegetation composition and diversity. In: *Fourth International Conference on Forest Vegetation Management*, Nancy, 17-21 juin 2002, France, pp. 151-153.
- Devineau J.-L. (1991). Variabilité de la croissance en circonférence des arbres dans les forêts semi-décidues de Lamto (Côte d'Ivoire). *Revue d'écologie*, 46 : 95-124.
- Doree A. (1995). Pâturage ovin sous forêt de Pin sylvestre. II. Impact des activités sylvopastorales sur les processus de colonisation et de régénération naturelles de *Pinus sylvestris* L. *Cahiers Options Méditerranéennes (CIHEAM)*, 12 : 251-254.
- Dreyer E. (2005). Avant-propos : « L'avenir du Hêtre dans la forêt française ». *Revue forestière française*, 57 (2) : 109-110.
- Fritts H.C. & Swetnam T.W. (1989). Dendroecology: a tool for evaluating variations in past and present forest environments. *Advances in Ecological Research*, 19 : 111-188.
- Gernandt D.S., López G.G., García S.O. & Liston A. (2005). Phylogeny and classification of *Pinus*. *Taxon*, 54 : 29-42.
- Henriet C., Ejarque A., Luelmo R., Muller S.D. & Terral J.-F. (2025). Le complexe tourbeux de Lajo, Margeride (Lozère) : les tourbières des Crozes et de Bos Grond. *Orpalm Synthesis*, 18 (1) : 9-31.
- Houston-Durrant T., de Rigo D. & Caudullo G. (2016). *Pinus sylvestris* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. *European atlas of forest tree species*, 14 : 845-846.
- Kassambara A. (2016). ggpubr: "ggplot2" Based Publication Ready Plots. *R package version 0.4.0*.
- Lacaze J.-F. (1964). Comparaison de diverses provenances de Pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) représentées dans les arboretums forestiers. *Revue forestière française*, 16 (8-9) : 658-686.
- Latte N., Debruxelles J., Sohier C., Degré A. & Claessens H. (2012). La dendroécologie : un outil pour affiner nos connaissances sur l'autécologie des essences forestières. *Forêt Wallonne*, 116 : 3-17.
- Lepart J. (2005). *Rapport d'activité 2004*. Conservatoire des Espaces Naturels Languedoc-Roussillon, Montpellier, 24 p. [document non publié].
- Médail F. (2001). Biogéographie, écologie et valeur patrimoniale des forêts de pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) en région méditerranéenne. *Forêt méditerranéenne*, 22 : 5-22.
- Neet-Sarqueda C., Plumettaz Clot A.-C. & Becholey I. (1988). Evidence for introgressive hybridation between *Pinus sylvestris* L. and *Pinus uncinata* DC. in Valais (Switzerland) by two multivariate methods. *Botanica Helvetica*, 98 : 161-169.
- Nicault A., Bégin Y. & Guiot J. (2010). Standardisation des séries dendrochronologiques. In: *La dendroécologie : principes, méthodes et applications*. Presses de l'Université Laval, Québec, pp. 199-227.
- Ningre J.-M. (2007). Le reboisement du Ventoux au XIX<sup>e</sup> siècle : techniques et travaux. *Forêt méditerranéenne*, 28 : 319-326.
- Ogden P. E. (1978). Analyse multivariée et structure régionale : transformations socio-économiques récentes dans le Massif Central de l'Est. *Méditerranée*, 33 : 45-58.
- Payette S. & Filion L. (2010). *La dendroécologie : principes, méthodes et applications*. Presses de l'Université Laval, Québec, 759 p.
- Pérot T., Perret S., Meredieu C. & Ginisty C. (2007). Prévoir la croissance et la production du Pin sylvestre : le module Sylvestris sous Capsis 4. *Revue Forestière Française*, 59 (1) : 57-84.
- Prévosto B. & Coquillard P. (2001). Dynamique des boisements spontanés dans la chaîne des Puys : une approche pour la modélisation. *Forêt méditerranéenne*, 22 (1) : 29-36.

- Roman-Amat B. (1986). Pin sylvestre. *Revue forestière française*, 38 : 132-134.
- Salomon J.N. (2000). La « tempête du siècle » (27 et 28 décembre 1999) et notamment en Aquitaine. *Travaux du Laboratoire de Géographie Physique Appliquée*, 19 (1) : 31-53.
- 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 (1) : 123-139.
- Staron G. (1986). Exemples de calamités climatiques sur l'Est du Massif Central (septembre 1980-novembre 1982). *Revue de géographie de Lyon*, 61 : 283-290.
- Streel M. (2023). Origine, développement et déclin des recherches sur la palynologie des tourbières hautes encore actives à la Station scientifique des Hautes-Fagnes (SSHF). *Hautes Fagnes*, 330 (2) : 1-9.
- Wickham H. (2016). *tidyverse: Easily Install and Load the "Tidyverse"* [Logiciel].
- Wickham H., Chang W., Henry L., Pedersen T.L., Takahashi K., Wilke C., Woo K., Yutani H., Dunnington D. & Van Den Brand T. (2007). *ggplot2: Create Elegant Data Visualisations Using the Grammar of Graphics* [Logiciel]
- Zeileis A. & Hothorn T. (2002). Diagnostic Checking in Regression Relationships. *R News*, 2(3) : 7-10 [Logiciel]

## ANNEXE 1. Localisation géographique (données GPS) des arbres échantillonnés

Individu	Latitude	Longitude	Individu	Latitude	Longitude
<b>1</b>	44,852548	3,442865	<b>36</b>	44,852235	3,442586
<b>2</b>	44,852535	3,442915	<b>37</b>	44,852236	3,442505
<b>3</b>	44,852555	3,442897	<b>38</b>	44,852305	3,442506
<b>4</b>	44,852511	3,442945	<b>39</b>	44,852297	3,442345
<b>5</b>	Erreur GPS	Erreur GPS	<b>40</b>	44,852251	3,442332
<b>6</b>	44,852581	3,443047	<b>41</b>	44,852239	3,442219
<b>7</b>	44,852539	3,442717	<b>42</b>	44,852364	3,442018
<b>8</b>	44,852616	3,442624	<b>43</b>	44,852302	3,442055
<b>9</b>	44,852657	3,442637	<b>44</b>	44,852346	3,441818
<b>10</b>	44,852624	3,442740	<b>45</b>	44,852204	3,441813
<b>11</b>	44,852623	3,442732	<b>46</b>	44,851900	3,441568
<b>12</b>	44,852607	3,442533	<b>47</b>	44,851860	3,442492
<b>13</b>	44,852609	3,442926	<b>48</b>	44,851845	3,442426
<b>14</b>	44,852617	3,442439	<b>49</b>	44,852184	3,442288
<b>15</b>	44,852608	3,442445	<b>50</b>	44,851845	3,442289
<b>16</b>	44,852608	3,442445	<b>51</b>	44,851770	3,442402
<b>17</b>	44,852633	3,442396	<b>52</b>	44,851811	3,442391
<b>18</b>	44,852613	3,442405	<b>53</b>	44,851726	3,442231
<b>19</b>	44,852608	3,442316	<b>54</b>	44,851761	3,442126
<b>20</b>	44,852615	3,442393	<b>55</b>	44,851799	3,442021
<b>21</b>	44,852334	3,443182	<b>56</b>	44,851790	3,442040
<b>22</b>	44,852321	3,443025	<b>57</b>	44,851702	3,441804
<b>23</b>	44,852377	3,442925	<b>58</b>	44,851673	3,441838
<b>24</b>	44,852156	3,443219	<b>59</b>	44,851659	3,441559
<b>25</b>	44,852227	3,443231	<b>60</b>	44,851665	3,441662
<b>26</b>	44,852231	3,443145	<b>61</b>	44,85150	3,441725
<b>27</b>	44,852190	3,442792	<b>62</b>	44,851464	3,441805
<b>28</b>	44,852189	3,442720	<b>63</b>	44,851464	3,442020
<b>29</b>	44,852326	3,442756	<b>64</b>	44,851412	3,442214
<b>30</b>	44,852321	3,442721	<b>65</b>	44,851299	3,442653
<b>31</b>	44,852326	3,442639	<b>T1</b>	44,852260	3,443460
<b>32</b>	44,852359	3,442576	<b>T2</b>	44,852161	3,443534
<b>33</b>	44,852284	3,442577	<b>T3</b>	44,852230	3,443719
<b>34</b>	44,852324	3,442549	<b>T4</b>	44,852192	3,443844
<b>35</b>	44,852252	3,442577	<b>T5</b>	44,852178	3,443879

## ANNEXE 2. Détail des P-values des tests de validité des modèles

Modèle	Shapiro-Wilk	Breusch-Pagan	Durbin-Watson	Cook <sup>1</sup>	Student
Référence	0,513	0,092	0,892	2, 9, 10, 26, 40, 53, 56, 64	0,828
Prédictif	0,054	0,269	0,517	2, 4, 10, 23, 26, 31, 53, 56	0,424

<sup>1</sup> Test permettant d'identifier les individus listés dans le tableau ayant une forte influence sur le modèle (outliers).

## ANNEXE 3. Âges prédits des arbres échantillonnés grâce au modèle

<b>Individu</b>	<b>Âge prédit</b>	<b>Individu</b>	<b>Âge prédit</b>	<b>Individu</b>	<b>Âge prédit</b>
<b>1</b>	52,5	<b>23</b>	75,0	<b>45</b>	37,7
<b>2</b>	68,2	<b>24</b>	32,6	<b>46</b>	63,4
<b>3</b>	10,2	<b>25</b>	30,00	<b>47</b>	56,3
<b>4</b>	11,1	<b>26</b>	9,4	<b>48</b>	63,1
<b>5</b>	34,0	<b>27</b>	16,5	<b>49</b>	46,9
<b>6</b>	32,6	<b>28</b>	20,9	<b>50</b>	56,5
<b>7</b>	55,2	<b>29</b>	11,5	<b>51</b>	16,5
<b>8</b>	51,5	<b>30</b>	23,1	<b>52</b>	68,7
<b>9</b>	69,5	<b>31</b>	10,2	<b>53</b>	38,0
<b>10</b>	8,5	<b>32</b>	73,4	<b>54</b>	38,1
<b>11</b>	46,3	<b>33</b>	34,7	<b>55</b>	59,5
<b>12</b>	59,0	<b>34</b>	59,0	<b>56</b>	54,6
<b>13</b>	69,4	<b>35</b>	55,5	<b>57</b>	52,8
<b>14</b>	50,8	<b>36</b>	55,2	<b>58</b>	77,7
<b>15</b>	56,2	<b>37</b>	47,8	<b>59</b>	76,8
<b>16</b>	59,0	<b>38</b>	51,7	<b>60</b>	35,2
<b>17</b>	38,5	<b>39</b>	71,2	<b>61</b>	29,3
<b>18</b>	67,4	<b>40</b>	66,9	<b>62</b>	13,0
<b>19</b>	54,3	<b>41</b>	42,3	<b>63</b>	14,0
<b>20</b>	39,9	<b>42</b>	26,8	<b>64</b>	13,1
<b>21</b>	49,00	<b>43</b>	62,7	<b>65</b>	30,1
<b>22</b>	72,5	<b>44</b>	53,6		

# CONTRIBUTION A LA RECONSTRUCTION DE L'HISTOIRE DE LA TOURBIERE DES CROZES (MARGERIDE, LOZERE) A L'AIDE DE L'ETUDE DE LA TURFIGENESE ET DES CHANGEMENTS DU MILIEU AU COURS DU TEMPS

Godichon Liyu <sup>1</sup>, Philoclès Méliissa <sup>2</sup>, Pothier Léa <sup>3</sup>

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

<sup>1</sup> liyu.godichon@gmail.com, <sup>2</sup> mel.philocles@gmail.com, <sup>3</sup> lea.pothier.03@hotmail.com

Encadrement : Camille Henriet et Serge D. Muller

*Citation* : Godichon L., Philoclès M. & Pothier L. (2025). Contribution à la reconstruction de l'histoire de la tourbière des Crozes (Lajo, Lozère) à l'aide de l'étude de la turfigenèse et des changements du milieu au cours du temps. *Orpalm Synthesis*, 18 (1) : 47-62.

---

**Résumé** : L'histoire de la tourbière des Crozes (Lozère), milieu à fort enjeu conservatoire, a été étudiée par la sédimentologie et l'analyse des macrorestes. Les résultats obtenus montrent que la végétation a changé depuis 8000 ans : d'abord une mégaphorbiaie, puis une prairie humide et enfin une tourbière sèche. Certains changements physiognomiques de la tourbière (végétation, humidité et accumulation) sont à mettre en relation avec des pratiques humaines, telles que le pastoralisme et l'exploitation de la tourbe.

**Mots clés** : Macrorestes, sedimentology, hydrogéologie, décomposition, matière organique, Massif central

**Abstract**: *Contribution to the reconstruction of the history of the Crozes peatland (Margeride, Lozère) using the study of turfigenesis and environmental changes through time.* History of Crozes Peatland (Lozère), an area of high conservation value, has been investigated through sedimentology and macrofossil analysis. The obtained results show that the vegetation has changed for 8000 years: first a megaphorb, then a wet meadow and finally a dry peatland. Some of the peatland physiognomic changes (vegetation, humidity and accumulation) can be linked to human practices, such as pastoralism and peat mining.

**Keywords**: Macroremains, sedimentology, hydrogeology, decomposition, organic matter, Massif Central

**L**es tourbières acides abritent une flore et une faune spécifiques comprenant de nombreuses espèces végétales (appartenant notamment aux genres *Carex*, *Drosera*, *Eriophorum*, *Sphagnum*, *Vaccinium*; Julve, 1994) et des animaux aux modes de

vie adaptés à ces milieux, comme *Euphydrias aurinia*, *Phengaris teleius* et *Zootoca vivipara* (Manneville, 1999). En France, ce sont également des écosystèmes refuges d'espèces relictées de la dernière glaciation, comme *Betula nana* ou *Salix lapponum* (Muller et al., 2024). Les

tourbières des régions méridionales d'Europe sont cependant en net déclin : [Manneville et al. \(2006\)](#) estime que 50 à 75 % des tourbières françaises ont été détruites au cours des deux derniers siècles.

Il existe une grande diversité de milieux que l'on appelle tourbières. Ces dernières sont le plus souvent divisées en deux catégories principales, les tourbières minérotrophes et les tourbières ombrotrophes. Les premières sont alimentées en eau à la fois par le ruissellement et les eaux souterraines, alors que les secondes ne dépendent que des précipitations ([Rydin et al., 2013](#)). Pour toutes les tourbières, on distingue deux zones sur le profil d'accumulation de la tourbe ([Yu et al., 2001](#)) : le catotelme correspond à la partie inférieure constamment ennoyée, alors que l'acrotelme est la partie supérieure de la tourbière, soumise aux fluctuations de la nappe phréatique. La limite acrotelme - catotelme correspond à la position estivale de la surface de la nappe. L'acrotelme, qui se retrouve dans l'eau en hiver et hors de l'eau en été, est la zone où se déroule la majeure partie de la décomposition de la tourbe.

La tourbe est une accumulation de matière organique subfossile qui est peu décomposée du fait de l'anoxie du milieu, des températures froides et de l'acidité ([Rydin et al., 2013](#)). La formation de la tourbe est possible, car la décomposition du matériel végétal est plus lente que son accumulation. Certains types de végétation peuvent ralentir ou accélérer la vitesse d'accumulation de tourbe. Par exemple, les Cypéracées sont généralement associées à des phases de forte accumulation, car ces végétaux présentent une forte productivité et une faible décomposition, alors que les Éricacées et les sphaignes sont associées à de faibles accumulations, car leur production est moins importante et leur décomposition plus efficace ([Muller, 2002](#)). La tourbe peut ainsi être considérée comme une archive fossile pouvant s'accumuler sur plusieurs milliers

d'années. Elle conserve du pollen, des spores, des charbons et d'autres matériaux essentiels pour la compréhension et la reconstitution des paysages anciens et de l'anthropisation ([Shoty et al., 2004](#)).

Les Crozes, la plus grande tourbière du complexe de Lajo (Margeride), abrite plusieurs espèces emblématiques des hautes latitudes comme *Drosera rotundifolia* et *Vaccinium microcarpum* et des relictés glaciaires telles que *Betula nana* et *Salix lapponum*. Hormis *Vaccinium microcarpum*. Ces espèces patrimoniales rares en France bénéficient d'une protection nationale (arrêté interministériel du 20 janvier 1982).

Considérant le fort enjeu conservatoire de la tourbière des Crozes qui est pourtant actuellement exploitée par l'Homme (pastoralisme bovin), cette étude préliminaire aborde de manière diachronique : (1) la dynamique de l'accumulation de la tourbe, (2) la composition végétale post-glaciaire de la tourbière, (3) l'évolution du milieu, afin d'en apprendre plus sur son histoire et de mesurer un potentiel impact anthropique.

## MATERIEL ET METHODES

### 1- Zone d'étude

La Margeride est une région de moyenne montagne (1000 à 1550 m d'altitude environ) au sud-est du Massif central, soumise à un climat montagnard ressemblant fortement à celui de l'Islande ([Besqueut, 1953](#)). Ce massif montagneux, majoritairement granitique ([Couturié, 1977](#)), a été formé durant l'orogénèse hercynienne, il y a  $323 \pm 12$  millions d'années ([Couturié et al., 1979](#)). Depuis leur formation, ces granites se sont progressivement altérés en argile peu perméable qui a favorisé la formation de nappes permanentes. Aussi, la Margeride est couverte par 5 % de substrats tourbescents ([Bornand & Menier, 1989](#)), dont le complexe des tourbières de Lajo situé en Lozère (48) et classé zone Natura 2000 (arrêté ministériel du 25 mars 2011).

Les tourbières “Saulé des Lapons” et “Ronc de la Gleize” du complexe de Lajo ont déjà été étudiées dans le numéro 17 (1) de la revue *Orpalm Synthesis*.

La présente étude porte sur la plus grande tourbière, la tourbière des Crozes, située à plus de 1300 m d’altitude, à la limite entre les départements de la Lozère et de la Haute-Loire. Elle est actuellement pâturée par un troupeau de bovins. Le pastoralisme étant apparu dans la région, ainsi que dans les Cévennes et les Causses, vers -6000 ans (Néolithique), la Margeride est, depuis longtemps, une des destinations finales des voies de transhumance, les drailles, qui relient les basses-terres méridionales aux plaines d’altitude (Biber, 2010).

La tourbière des Crozes peut être divisée en trois grands milieux : des fens au nord, des buttes généralement plus sèches au sud

et des jonçaises entre les deux (Fig. 1). Les fens sont caractérisés par *Carex rostrata*, *Myosotis scorpioides* et plusieurs espèces de *Sphagnum*, tandis que les buttes sèches de *Calluna vulgaris* abritent *Betula nana*, *Salix lapponum*, et plusieurs espèces de *Vaccinium* (détail dans Henriet et al., 2025). Au cœur des buttes, dans des zones plus humides, *Drosera rotundifolia* est également présent. Les jonçaises possèdent des espèces en commun avec les deux autres milieux, mais sont caractérisées par *Cardamine pratensis*, *Genista anglica* et plusieurs espèces de *Juncus* (Henriet et al., 2025 ; Annexe 1). Les carottes de tourbe, support des analyses, ont été prélevées dans une zone à buttes, à 1377 m d’altitude, au point 44,850559°N ; 03,442614°E (Fig. 1).

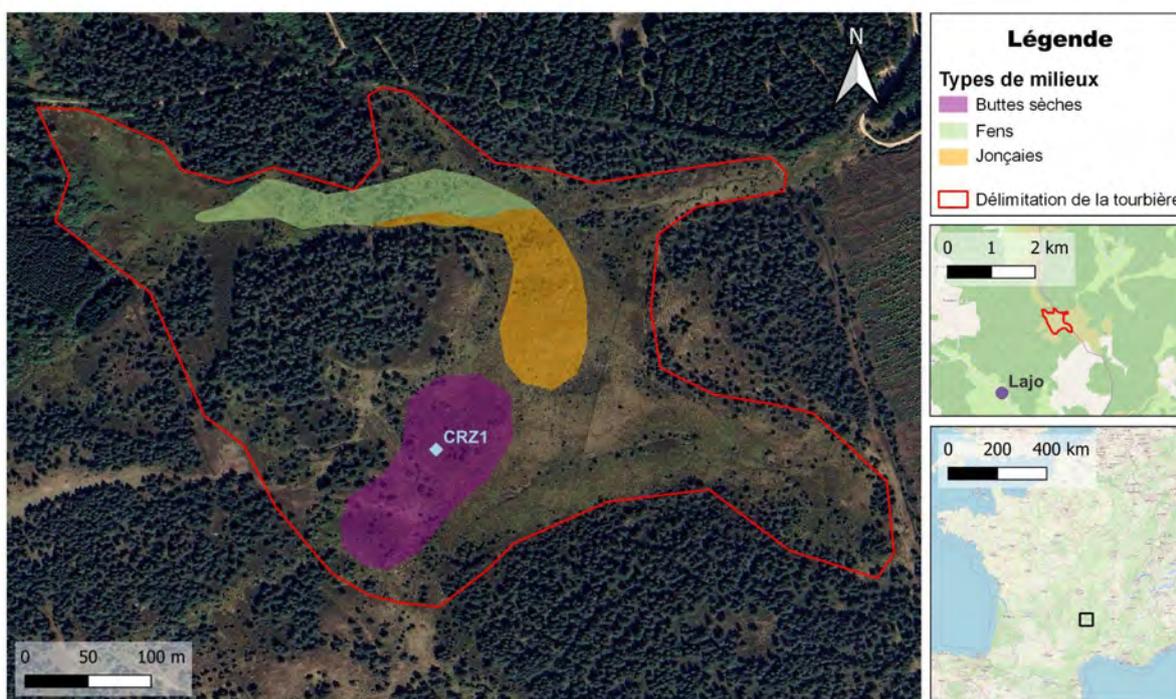


Figure 1. Carte de la tourbière des Crozes localisant le point de prélèvement des carottes CRZ1 et délimitant trois types de milieux. Le découpage des milieux n’est pas exhaustif et leurs limites, basées sur des points de relevé de la végétation, sont simplifiées (Henriet et al., 2025). La figure a été réalisée sur le logiciel QGIS® 3.22.11 à l’aide des fonds de cartes © Google Satellite 2024 et © OpenStreetMap 2024.

## 2- Relevés de données sur le terrain

### *Carottage*

Une tige en fer a été utilisée à plusieurs endroits de la tourbière pour sonder la profondeur et choisir un point de prélèvement optimal, soit le plus profond. Trois carottes, CRZ1-A (0-75 cm), CRZ1-B (68-168 cm) et CRZ1-C (79-179 cm), ont été prélevées à l'aide d'un carottier russe au même point d'extraction (Fig. 1), permettant d'obtenir une séquence de 179 cm de profondeur. Avant emballage, les carottes ont été décrites visuellement, afin de caractériser la couleur de la tourbe et la part visible de sédiments minéraux. Ces analyses ont servi à l'élaboration du log stratigraphique. Une fois ramenées au laboratoire, les carottes ont été conservées au réfrigérateur.

### *Inventaire floristique*

Un inventaire floristique a été réalisé afin de pouvoir caractériser le type de végétation sur et autour de la tourbière étudiée (Annexe 1). Cet inventaire a été réalisé dans les différents habitats. Il a par la suite été mis en relation avec les analyses en laboratoire visant à reconstituer l'évolution de la végétation de la tourbière. Plusieurs relevés phytosociologiques (méthode de Braun-Blanquet, 1932) ont également été réalisés dans chacun des habitats (Henriet et al., 2025).

## 3- Analyses en laboratoire

Le carottier russe permet de prélever des carottes qui ont une section semi-circulaire. Pour échantillonner les carottes, la face plate pouvant être polluée par du sédiment d'un précédent carottage, les prélèvements se font sur la face arrondie et la couche superficielle de tourbe est raclée à l'aide d'une spatule. Ensuite, le volume de tourbe nécessaire est prélevé pour chaque échantillon. Le nombre de prélèvements et le pas d'échantillonnage varient en fonction du type d'analyse. Les outils sont essuyés entre chaque prélèvement pour éviter les contaminations

entre échantillons.

### *Caractérisation de la tourbe*

La méthode de caractérisation de la tourbe repose sur les travaux de Troels-Smith (1955). S'effectuant sous loupe binoculaire, elle permet d'identifier les différents composants de la tourbe, d'estimer leur taux de décomposition et de leur attribuer une abondance relative. Le degré de décomposition de la tourbe est divisé en trois catégories : les restes identifiables de grande taille (*Turfa*), les fragments (0,1 à 2 mm) identifiables (*Detritus*) et les particules (< 0,1 mm) trop décomposées pour être identifiables (*Limus detrituosus*). Les restes identifiables plus ou moins décomposés peuvent être de nature herbacée (*T. herbacea*, *D. herbosus*) ou ligneuse (*T. lignosa*, *D. lignosus*). Les particules minérales ont été classées dans la catégorie *Grana* (Annexe 2). L'abondance relative de chaque catégorie a été évaluée en 5 classes : 0-5 %, 5-25 %, 25-50 %, 50-75 % et 75-100 %.

Cette méthode a été appliquée sur les trois carottes tous les 4 cm, de 0 à 69 cm pour CRZ1-A, de 72 à 164 cm pour CRZ1-B et de 168 à 176 cm pour CRZ1-C. Les bases respectives (167-168 cm et 178-179 cm) des carottes B et C ont également été analysées. Cette méthode de caractérisation, se basant sur une analyse visuelle, reste subjective. Pour limiter les biais liés à l'observateur, chaque échantillon a été observé par trois opératrices (les trois auteurs de l'article) et les abondances relatives déterminées en moyennant les abondances estimées par chacune.

### *Susceptibilité magnétique*

La susceptibilité magnétique détermine la capacité d'un sédiment à réagir à un champ magnétique externe (Loizeau, 1989). Dans cette étude, la susceptibilité magnétique a été utilisée pour mesurer la présence de matière minérale sur les trois carottes CRZ1, en continu. Cette méthode a été réalisée à l'aide d'un capteur MS3-meter

connecté à un ordinateur sur lequel est installé le logiciel de Bartington Bartsoft® 4.2.1.5, permettant d'enregistrer les données. La sonde a d'abord été calibrée afin d'éviter les biais d'interférence externes dans les mesures. Ensuite, un nombre de cycles de mesure a été entré dans le logiciel afin de compter 3 mesures/cm et 3 mesures dans l'air tous les 10 cm. Pour les carottes A et B, les mesures ont été effectuées à travers des sachets plastiques qui contenaient 1 cm<sup>3</sup> de tourbe. Les mesures de la carotte C ont été prises directement sur la carotte recouverte d'un film plastique fin (0,02 mm). La dérive des mesures a été corrigée par la macro Excel® (Version 2410) *suzsi* de W. Finsinger.

#### *Perte au feu*

La méthode de perte au feu (PAF) consiste à chauffer un échantillon à haute température, entraînant ainsi la combustion des matériaux organiques (à 550 °C). En analysant les résidus minéraux, il est possible de déterminer la proportion de matière organique et minérale dans la tourbe (Ball, 1964).

Pour cette étude, 32 échantillons de 1 cm<sup>3</sup> ont été prélevés tous les 6 cm, puis tous les 2 cm à partir de 174 cm, sur la séquence de la tourbière des Crozes. Des creusets ont été utilisés afin de faciliter la pesée de chaque échantillon. De plus, pour éviter tout apport de matière grasse, donc un biais dans les résultats, chaque creuset a été manipulé avec des gants. Dans un premier temps, les creusets ont été pesés à vide ( $M_{tare}$ ) à l'aide d'une balance de précision, après avoir passé 12 h dans l'étuve à 105 °C puis 1 h dans le dessiccateur. Ensuite, l'opération a été répétée, cette fois avec un échantillon de tourbe dans chaque creuset, permettant d'obtenir le poids du creuset et de l'échantillon après séchage ( $M_{105}$ ). Ensuite, pour l'étape de calcination, les échantillons ont été placés dans le four à moufle à 550 °C pendant 5 h, puis dans le dessiccateur pendant 1 h. Une nouvelle pesée a alors été réalisée ( $M_{550}$ ), permettant de déterminer la teneur

en matière organique en pourcentage dans chaque échantillon :

$$PAF_{550} = [(M_{105} - M_{550}) / (M_{105} - M_{tare})] \times 100$$

La teneur en matière minérale ( $T_{min}$ ) a également été calculée :

$$T_{min} = [(M_{550} - M_{tare}) / (M_{105} - M_{tare})] \times 100$$

#### *Macrorestes*

L'étude des macrorestes se compose d'analyses couplées de différents types d'échantillons sous loupe binoculaire. Les macrorestes des trois carottes CRZ1 ont été identifiés et dénombrés tous les 4 cm lors de la caractérisation de la tourbe. En complément, pour les carottes A et B, ils ont été analysés tous les 16 cm grâce aux refus de tamis des traitements polliniques et NPP (Bailleux et al., 2025 ; Digeon & Honnet, 2025). Enfin, d'autres échantillons ont été prélevés également tous les 4 cm sur la carotte C et tamisés à 125 µm. Les identifications reposent sur l'atlas d'identification carpologique de Cappers et al. (2006) et la collection de référence de l'ISEM. Les concentrations de ces macrorestes ont été calculées en divisant l'effectif total d'un taxon par le volume total de tourbe prélevé pour chaque échantillon étudié.

L'approche pluri-méthodes, couplée aux faibles volumes des échantillons qui varient en fonction des méthodes, peuvent être responsables de biais dans les résultats de cette analyse. De plus, les macrorestes ont été étudiés à partir d'une carotte prélevée à un point précis et ne saurait donc constituer une étude exhaustive de la végétation passée.

#### **4- Traitements graphiques et statistiques**

Le log stratigraphique a été dessiné sur Inkscape® (version Inkscape.1.4) illustrant la caractérisation de la tourbe. Les graphiques ont été tracés sous R dans l'environnement de développement RStudio® (version 2024 9.0.0), à l'aide des packages *ggplot2* et *rioja*. L'échelle chronologique utilisée est issue du modèle d'âge de la tourbière des Crozes (Henriet

et al., 2025).

Des tests de corrélation ont également été effectués, afin de déterminer s'il existe d'une part une relation entre le taux d'accumulation de la tourbe – obtenu à partir du modèle d'âge – et la présence de certains taxons ; d'autre part, une relation entre les occurrences de *Cenococcum geophilum* et de *Betula* (Bailleux et al., 2025).

## RESULTATS

### 1- Accumulation de la tourbe au cours du temps

De 8900 à 2750 cal. BP, le taux d'accumulation augmente lentement,

passant de 0,2 à 0,5 mm/an (gain de 0,3 mm/an en 6150 ans). A partir de 2750 cal. BP, le taux d'accumulation connaît une augmentation rapide, passant de 0,5 à 3 mm/an en seulement 280 ans (gain de 2,5 mm/an). Le point d'inflexion de la courbe délimite deux dynamiques différentes. Un hiatus sédimentaire, identifié par l'analyse pollinique (Bailleux et al., 2025), entraîne une absence de données entre 2500 et 100 cal. BP. Au cours du dernier siècle, le taux d'accumulation ne dépasse pas 1 mm/an (Fig. 2). Les tests de corrélations effectués n'ont pas montré de relation entre le taux d'accumulation et les différents taxons testés.

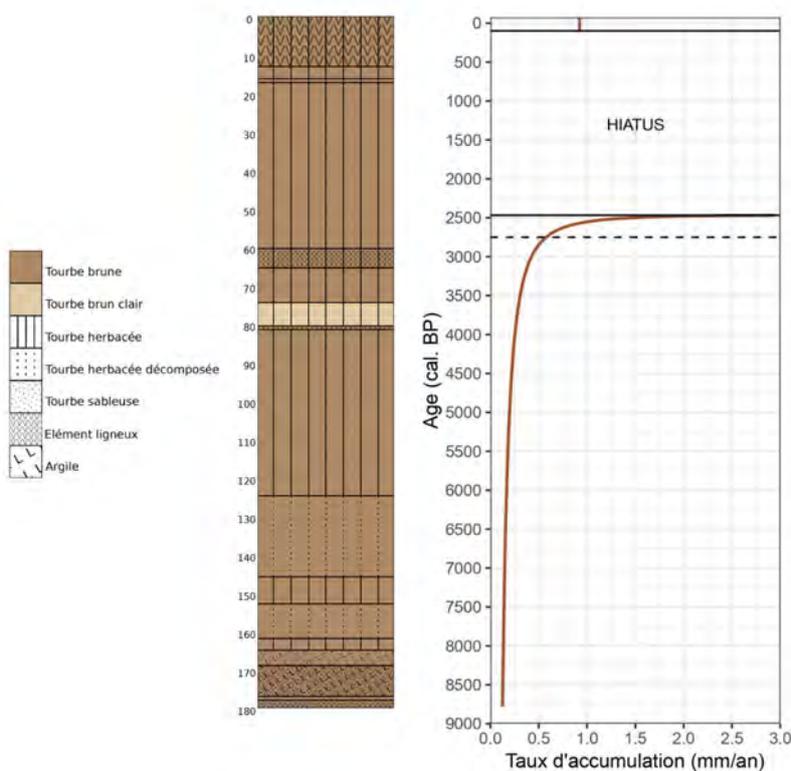


Figure 2. Log stratigraphique en profondeur (cm) et taux d'accumulation de la tourbe obtenu à partir du modèle d'âge de la tourbière des Crozes (Henriet et al., 2025). Le trait en pointillés correspond au point d'inflexion de la courbe.

## 2- Composition végétale post-glaciaire des carottes de tourbe

La nature des restes de grande taille et des fragments identifiés lors de la caractérisation de la tourbe renseigne sur l'évolution de la nature de la végétation (Fig. 3). Sur l'intervalle de temps étudié, la végétation de la tourbière est à dominance herbacée, avec une majorité de *Turfa herbacea* et *Detritus herbosus*. Le genre *Sphagnum* n'est pas mis en évidence. Des traces de ligneux (*Turfa lignosa*) ne dépassant pas 5 % sont également présentes épisodiquement de 8900 à 8100 cal. BP, de 3400 à 2900 cal. BP et de 100 à 30 cal. BP. Actuellement, les restes ligneux atteignent leur maximum (25 %) et représentent la même part que les restes herbacés.

Lors de l'analyse des macrorestes (Fig. 4), les graines et les akènes retrouvés dans les carottes ont permis de déterminer trois grands taxons végétaux : *Juncus* cf. *effusus*, *Juncus* cf. *acutiflorus*-type et *Carex limosa-rostrata*-groupe. De plus, le champignon ectomycorhizien *Cenococcum geophilum*, des restes d'arthropodes et quelques éléments ligneux ont aussi été relevés. *Juncus* cf. *effusus* est présent en forte concentration de 7400 à 5000 cal. BP, délimitant une zone spécifique sur la figure. *Juncus* cf. *acutiflorus*-type est observable quasiment à la même période, de 7500 à 6400 cal. BP, puis plus récemment vers 2700 cal. BP. Dans la zone délimitée, *Cenococcum geophilum*, présent de 8500 cal. BP à l'actuel, connaît également un pic de concentration. Ses occurrences semblent correspondre à celles de *Betula* (Bailleux et al., 2025), mais le test de corrélation de Spearman n'a pas montré de corrélation entre les deux taxons (p-value > 0,1). *Carex limosa-rostrata*-groupe est quant à lui observable de 5500 à 3800 cal. BP, avec une absence au niveau de la zone délimitée par *Juncus* cf. *effusus*. Les restes d'arthropodes suivent la même distribution, avec en plus une forte concentration aujourd'hui. Enfin, les

périodes où des éléments ligneux ont été retrouvés correspondent aux épisodes identifiés plus haut.

## 3- Evolution du milieu tourbeux

La caractérisation de la tourbe (Fig. 3) donne également des informations sur la présence de matière minérale (*Grana*) et sur le taux de décomposition grâce aux proportions relatives des trois catégories *Turfa*, *Detritus* et *Limus detrituosus*. Cinq périodes différentes ont été délimitées. De 8900 à 7500 cal. BP, la matière minérale domine dans le milieu (75 à 25 %) avec quelques restes organiques peu décomposés. De 7500 à 5000 cal. BP, la matière minérale diminue progressivement pour disparaître à 6700 cal. BP. Le taux de décomposition atteint quant à lui son maximum, avec une nette dominance de *Limus detrituosus* à 75 %. Puis la matière très décomposée diminue à 50 % de 5000 à 3000 cal. BP avec une récurrence de matière minérale (5 %) à 3200 cal. BP. Plus récemment, de 3000 à 2500 cal. BP, la matière très décomposée atteint son minimum (25 %). Enfin, de 2500 cal. BP à l'actuel, le pourcentage de matière très décomposée (*Limus detrituosus*) est égal à celui des restes peu décomposés (*Turfa*). Néanmoins, les restes moyennement décomposés (*Detritus*) sont absents. De plus, une récurrence de matière minérale (5 %) est observée à 100 cal. BP. Par ailleurs, les pics de matière minérale semblent coïncider avec les épisodes ligneux identifiés plus haut.

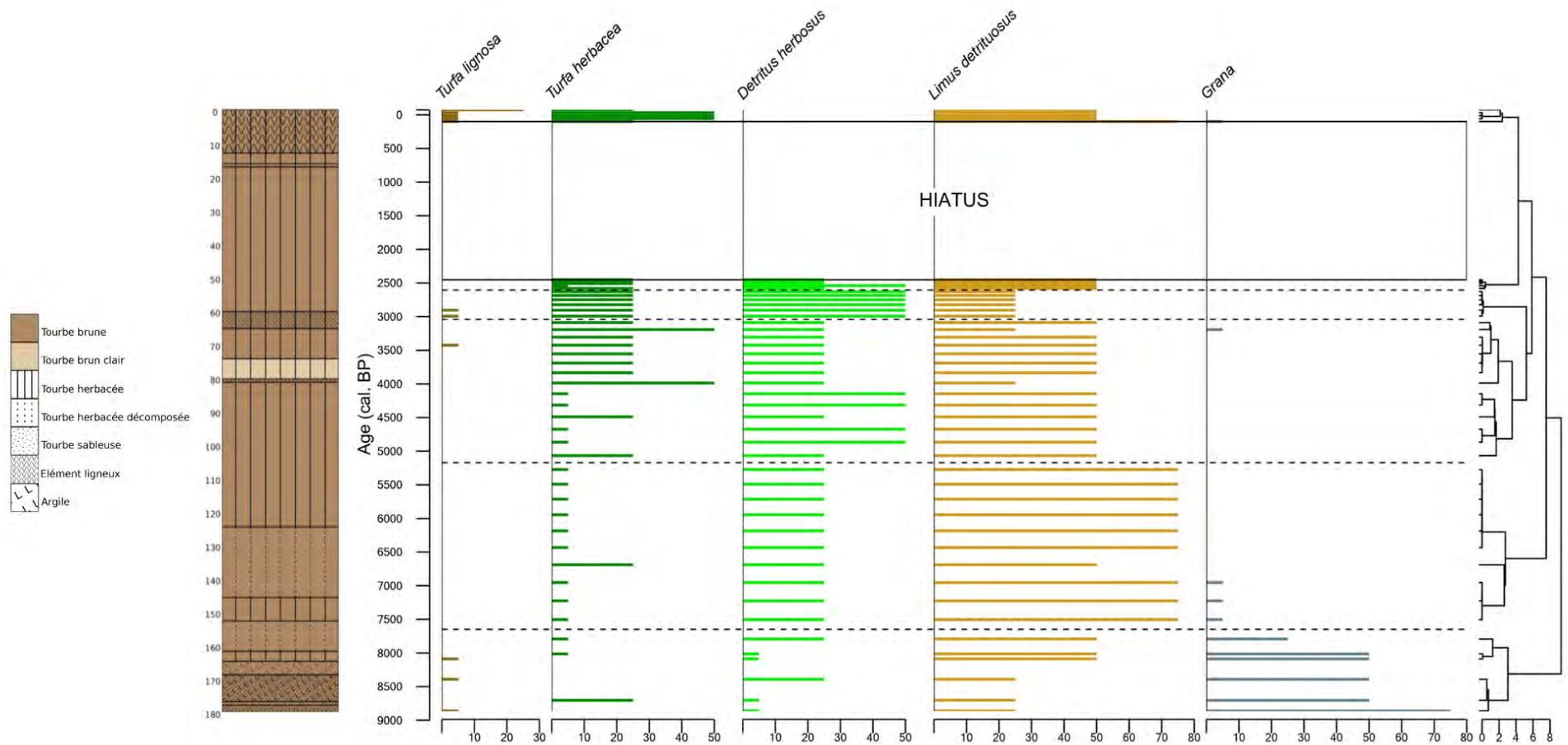


Figure 3. Log stratigraphique en profondeur (cm) et résultats de la caractérisation de la tourbe des carottes CRZI. Seules les bornes supérieures de chaque classe d'abondance relative ont été considérées dans cette représentation graphique.

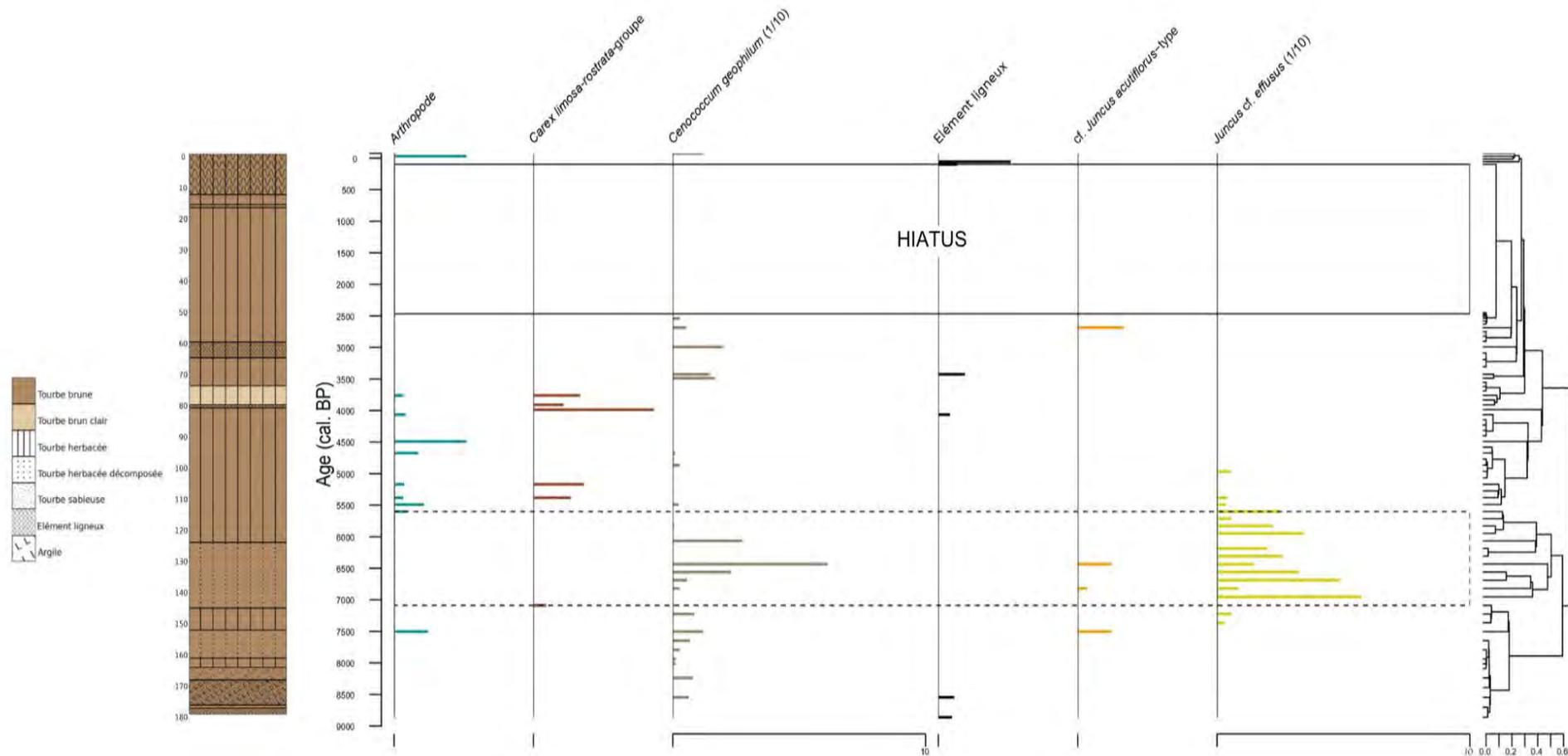


Figure 4. Log stratigraphique en profondeur (cm) et évolution des concentrations respectives de chaque catégorie de macro-restes identifiées sur les carottes CRZ1 en individu/ml. Les concentrations de *Cenococcum geophilum* et de *Juncus cf. effusus* ont été divisées par 10 pour faciliter la lecture de la figure.

Les résultats de la PAF et de la susceptibilité magnétique (Fig. 5) permettent de délimiter la même période de dominance (95-65 %) de matière minérale (8900-7500 cal. BP) que la caractérisation de la tourbe. Vers 7500 cal. BP, une transition s'opère : la matière organique augmente significativement pour atteindre presque 100 % de la composition du substrat tourbeux. D'après la PAF, la tourbière connaît deux épisodes de récurrence de matière minérale (environ 15 %) autour de 6400, puis autour de 50 cal. BP. Le premier épisode semble être confirmé par la susceptibilité magnétique qui montre un pic de matière minérale vers 6250 sur CRZ1-C et deux petits pics à 5770 et 6370 cal. BP respectivement sur CRZ1-B.

## DISCUSSION

Sur l'intervalle de temps étudié, la végétation de la tourbière est préférentiellement herbacée avec quelques épisodes ligneux (Fig. 3). La tourbière des

Crozes semble ainsi s'être maintenue dans des stades de succession écologique de type herbacés ou arbustifs.

### 1- Initialisation de la tourbière

La caractérisation de la tourbe, la PAF et la susceptibilité magnétique montrent que la tourbière s'est initiée vers 7500 cal. BP (Fig. 5), au moment où l'accumulation de matière organique devient plus importante que sa décomposition. Antérieurement, l'abondance de matière minérale suggère que le milieu était ouvert avec une eau circulante. Entre 8900 et 7500 cal. BP, l'enregistrement pollinique de *Corylus*, accompagné de *Betula*, *Salix* et de Poacées (Bailleux et al., 2025), révèle que l'environnement immédiat de la tourbière n'était pas complètement forestier, mais plutôt arbustif (Fig. 4). L'épisode détritique enregistré vers 6400 cal. BP suggère que le milieu environnant était probablement encore relativement ouvert plus de 1000 ans plus tard.

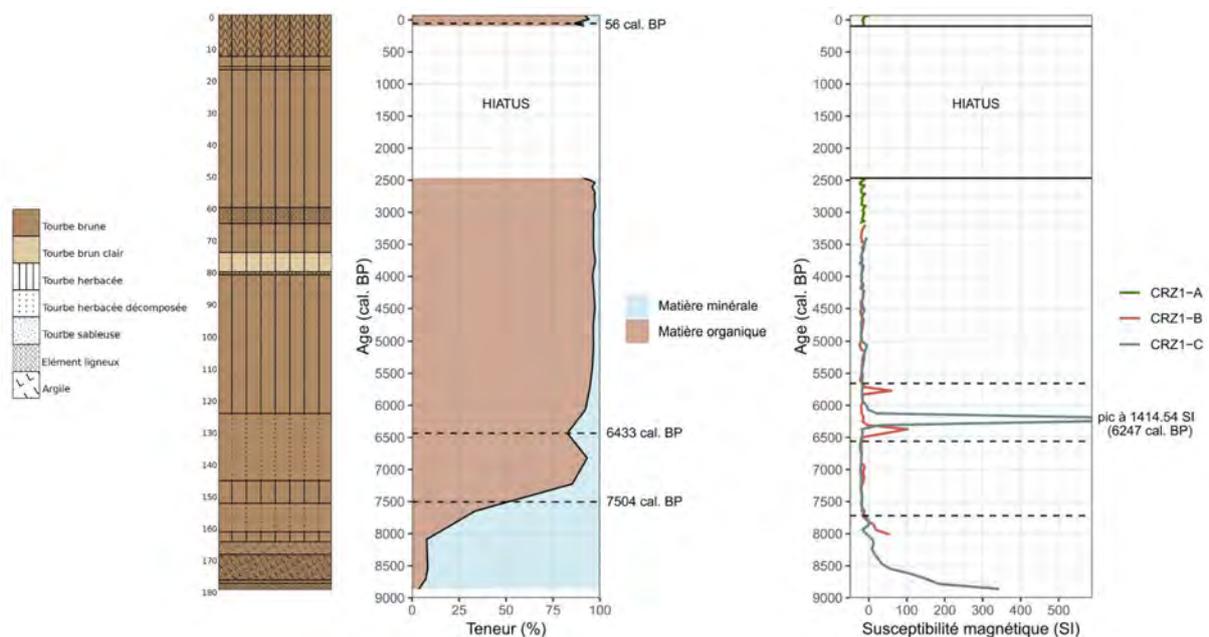


Figure 5. Log stratigraphique en profondeur (cm), résultats de la perte au feu représentant la part de matière minérale et de matière organique sur la séquence de la tourbière des Crozes et mesures de la susceptibilité magnétique sur les carottes CRZ1. Le pourcentage de matière minérale est déductible à partir de celui de matière organique.

La présence de *Juncus* cf. *effusus* de 7400 à 5000 cal. BP (Fig. 4), couplée à celle de *Bistorta* et de Cypéracées de 6000 à 4000 cal. BP (Bailleux et al., 2025), est un indice d'un milieu plus humide. Ce cortège de grandes herbacées est caractéristique d'une mégaphorbiaie (Géhu, 1985). De 7500 à 5000 cal. BP, la décomposition est maximale (Fig. 3). La mégaphorbiaie pourrait donc être associée à une plus forte décomposition et une faible production, puisqu'à cette période, le taux d'accumulation est effectivement bas (Fig. 2).

A partir de 6000 cal. BP, le milieu environnant se ferme avec l'installation d'une forêt qui limite l'érosion. Cette forêt était d'abord composée de *Quercus* caducifolié, puis de *Fagus sylvatica* et *Abies alba* (Bailleux et al., 2025).

Durant cette première période, la présence de *Cenococcum geophilum* pourrait être rattachée au moins en partie à celle de *Betula* (Bailleux et al., 2025). L'absence de relation s'expliquerait par le fait que *Betula* puisse accueillir d'autres espèces de mycorhizes et que *Cenococcum geophilum* soit un champignon ectomycorhizien extrêmement ubiquiste (Obase et al., 2017). Il pourrait ainsi être associé à la présence d'autres ligneux entre 8900 et 8100 cal. BP (Fig. 4). L'hyphe de ce champignon étant résistant à la décomposition, les racines mycorhizées par celui-ci le sont aussi (Langley et al., 2006). Néanmoins, la présence de ligneux reste épisodique par rapport à celle de *Cenococcum geophilum*. Ce champignon ectomycorhizien reste cependant un marqueur de la colonisation du milieu par des espèces arborées, adaptées au sol acide et humide de la tourbière (par exemple *Betula nana*).

## 2- Assèchement et anthropisation de la tourbière

L'observation des akènes de *Carex limosa-rostrata*-groupe de 5500 à 3800 cal. BP (Fig. 4) indique l'apparition locale d'une

communauté de tourbière minérotrophe (fen). A cette même période, les champignons coprophiles augmentent graduellement et du pollen de *Plantago*, *Secale* et *Triticum* sont présents (Bailleux et al., 2025 ; Digeon & Honnet, 2025). Ces indices d'anthropisation, enregistrés ici à la fin du Néolithique, traduisent l'expansion locale du pâturage (*Plantago*) et le développement régional de l'agriculture (*Secale*, *Triticum*) (Perrière & Leroyer, 2006). Ils pourraient être en lien avec la transition entre *Juncus* cf. *effusus* et *Carex limosa-rostrata*-groupe, qui révèle un changement physiologique de la tourbière qui évolue d'une mégaphorbiaie vers un fen. Ce dernier semble plus riche en arthropodes, puisqu'aucun reste de cette nature n'a été identifié durant la période précédente. *Cenococcum geophilum*, qui est toujours enregistré, pourrait être associé à l'épisode ligneux de 3400 à 2900 cal. BP (Fig. 4) et plus généralement à la continuité du développement d'espèces arborées dans la tourbière, malgré les changements hydrologiques.

L'absence d'accumulation de tourbe à partir d'environ 2500 cal. BP pourrait être due à un assèchement du milieu, permettant la prolifération des décomposeurs (Moore et al., 2005). Un tel assèchement pourrait résulter de causes naturelles, comme cela a été documenté dans les Alpes du Sud (Muller et al., 2012). Toutefois, aucun indice ne semble révéler ici le développement *in situ* d'un milieu fortement boisé. Il pourrait également avoir été causé par le drainage de la tourbière pour l'agropastoralisme, ou même par l'exploitation de la tourbe pratique connue dans le Cantal au 19<sup>e</sup> siècle (Miras et Guenet, 2013). Dans ce dernier cas, la tourbe aurait été prélevée pour être utilisée comme combustible ou engrais, créant ainsi un hiatus.

## 3- Evolution récente du milieu

Après le hiatus, un second épisode détritique est enregistré dans les dernières

décennies (Fig. 5). Cet événement érosif a pu être causé par l'exploitation forestière à partir du début du 19<sup>e</sup> siècle (Larrère et al., 1980). Les palynomorphes non-polliniques montrent par la suite une fermeture et un assèchement du milieu (Digeon & Honnet, 2025), ce qui concorde avec la végétation actuelle de la tourbière (carotte prélevée dans une zone de buttes sèches) et de ses abords boisés. La zone carottée semble avoir évolué d'une tourbière humide et minérotrophe (mégaphorbiaie puis fen à *Carex*) vers une tourbière sèche plus ombrotrophe.

Vers 2750 cal. BP, le changement de dynamique qui s'opère avec l'augmentation soudaine du taux d'accumulation (Fig. 2) permet de mettre en évidence la limite acrotelme - catotelme. En se basant sur le modèle d'âge, la limite supérieure de la nappe phréatique se situe à environ 52 cm de profondeur. Selon Quinty et Rochefort (2003), cette profondeur est habituellement comprise entre 30 et 50 cm. La valeur trouvée est donc un peu plus élevée que dans la littérature, mais peut s'expliquer par le fait que les carottes ont été prélevées sur une butte.

L'augmentation récente de la proportion des ligneux depuis 100 cal. BP (Fig. 3) s'explique par la présence d'une végétation actuelle composée de *Betula nana*, *Calluna vulgaris* et de plusieurs espèces de *Vaccinium* dans la zone de prélèvement. La date de 100 cal. BP correspondant à 16 cm de tourbe, les restes de ligneux retrouvés sont certainement les racines de la végétation en surface. La mise en place de cette végétation ligneuse semble donc plutôt récente.

Aucune trace de Bryophytes n'a été retrouvée dans les trois carottes, alors que plusieurs espèces de *Sphagnum* ont été relevées lors de l'inventaire floristique (Annexe 1). Il est possible que la végétation passée n'ait pas été composée de sphaignes puisqu'il existe des tourbières qui en sont dépourvues (Manneville et al., 2006). Des spores de *Sphagnum* ont

néanmoins été identifiées à 100 cal. BP (Bailleux et al., 2025). Il pourrait ainsi s'agir d'une absence locale propre au point de prélèvement. Les spores auraient alors été transportées depuis une zone proche. Les restes de sphaignes pourraient être trop décomposés pour être identifiables. *In fine*, la présence de sphaignes pourrait être récente et témoigner de l'acidification du milieu (Clymo, 1963).

Il est important de noter que l'absence ou la présence des certains taxons pourraient être liées à des erreurs d'identification lors des analyses, ainsi qu'au pas d'échantillonnage entre les échantillons.

## CONCLUSION

La tourbière des Crozes présente un fort enjeu conservatoire lié à la présence d'espèces patrimoniales (rares et/ou protégées). Son étude paléocologique permet de comprendre son histoire et de contribuer à son éventuelle gestion.

Au cours des 9 derniers millénaires, plusieurs écosystèmes se sont succédés localement. Tout d'abord, avant l'initialisation de la turfigenèse vers 7500 cal. BP, le milieu était ouvert avec une eau circulante (ruisseau). A partir de 6000 cal. BP jusqu'au hiatus, le milieu environnant s'est fermé (développement d'une forêt), tandis qu'au sein de la tourbière, se succèdent une mégaphorbiaie de 7400 à 5000 cal. BP, puis un fen pâturé de 5500 à 3800 cal. BP. Enfin, durant le dernier siècle, la tourbière est acide, sèche et pâturée.

La tourbière des Crozes possède ainsi une histoire riche et complexe, en partie façonnée par l'Homme. Les résultats obtenus apportent de nouveaux éléments à la compréhension de l'histoire des tourbières du complexe de Lajo. D'autres études complémentaires pourraient être envisagées en paléoclimatologie ou en anthropologie pour approfondir la connaissance des impacts naturels et anthropiques sur ces milieux spécifiques.

## REFERENCES

- Bailleux C., Laval T. & Rabbia-Ré A. (2025). Histoire de la tourbière des Crozes (Margeride, France) et de ses alentours : étude pollinique. *Orpalm Synthesis*, 18 (1) : 63-76.
- Ball D.F. (1964). Loss-on-ignition as estimate of organic matter and organic carbon in non-calcareous soils. *Journal of Soil Science*, 15 : 84-92.
- Besqueut L. (1953). La Margeride. *Bulletin de la Société Botanique de France*, 100 (10) : 21-26.
- Biber J.-P. (2010). Transhumance in France. *Pastoralism*, 1 (1) : 91-98.
- Bornand M. & Menier D. (1989). Approche pédologique du milieu prairial en Margeride. *Agronomie*, 9 : 13-26.
- Braun-Blanquet J. (1932). *Plant Sociology: The Study of Plant Community*. McGraw Hill Book, New York, 439 p.
- Cappers R.T.J., Bekker R.M. & Jans J.E.A. (2006). *Digitale zadenatlas van Nederland (Digital seed atlas of the Netherlands)*. Barkhuis Publishing, Eelde, 502 p.
- Clymo R.S. (1963). Ion exchange in Sphagnum and its relation to bog ecology, *Annals of Botany*, 27 : 309-324.
- Couturié J.-P. (1977). *Le massif granitique de la Margeride (Massif Central Français)*. Thèse de Doctorat, Université de Clermont II, 344 p.
- Couturié J.-P., Vachette M., Vialette Y. (1979). Age namurien d'un laccolite granitique différencié par gravité : le granite de la Margeride (Massif Central Français). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, sér. 2, 289 : 449-452.
- Digeon C. & Honnet R. (2025). Reconstitution paléoenvironnementale de la tourbière des Crozes (Lajo, Margeride, Lozère) : dynamiques climatiques, écologiques et anthropiques des derniers 8000 ans sur la base des palynomorphes non-polliniques. *Orpalm Synthesis*, 18 (1) : 77-92.
- Géhu J.-M. (1985) *Les végétations nitrophiles et anthropogènes : Bailleul, 1983 ; Les mégaphorbiaies : Bailleul, 1984*. J. Cramer, Stuttgart, 801 p.
- Henriet C., Ejarque A., Luelmo R., Muller S.D. & Terral J.-F. (2025). Le complexe tourbeux de Lajo, Margeride (Lozère) : les tourbières des Crozes et de Bos Grond. *Orpalm Synthesis*, 18 (1) : 9-31.
- Julve P. (1994). Les tourbières de France : répartition, caractères biogéographiques, fonctionnement écologique et dynamique, valeur patrimoniale (Peat-bogs: localisation, biogeographic characters, ecological functioning, patrimonial value). *Bulletin de l'Association de géographes français*, 71 (3) : 287-293.
- Langley J.A, Chapman S.K. & Hungate B.A. (2006). Ectomycorrhizal colonization slows root decomposition: the post-mortem fungal legacy. *Ecology letters*, 9 (8) : 955-959.
- Larrère R., Brun A., Kalaora B., Nougarède O. & Poupardin D. (1980). Reboisement des montagnes et systèmes agraires. *Revue forestière française*, 32 (S) : 20-36.
- Loizeau J.L. & Dominik J. (1989). La susceptibilité magnétique : un outil efficace pour l'étude des sédiments du Léman. *Cahiers de la Faculté des Sciences, Université de Genève*, 19 : 57-67.
- Manneville O. (1999). Les tourbières de France : causes de régression, intérêts de leur conservation, mise au point nomenclaturale. *Le journal de Botanique*, 12 (1) : 73-82.
- Manneville O., Vergne V., Villepoux O. & le Groupe d'Etudes des Tourbières (2006) *Le monde des tourbières et des marais. France, Suisse, Belgique, Luxembourg, deuxième édition*. Delachaux & Niestlé, Paris, 320 p.
- Miras Y. & Guenet P. (2013). Une histoire plurimillénaire des paysages du Cézallier et ses liens avec les activités agrosylvopastorales depuis le Néolithique à partir de l'analyse pollinique de la tourbière de La Borie (1170 m, Saint-

- Saturnin, Cantal). In : F. Trément (dir.), *Les Arvernes et leurs voisins du Massif Central à l'époque romaine. Une archéologie du développement des territoires*, tome 1. Revue d'Auvergne, Alliance Univ. d'Auvergne, Clermont-Ferrand, pp. 481-497.
- Moore T.R., Trofymow J.A., Siltanen M., Prescott C. & Group C.W. (2005). Patterns of decomposition and carbon, nitrogen, and phosphorus dynamics of litter in upland forest and peatland sites in central Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 35 (1) : 133-142.
- Muller S.D. (2002). Influence de la végétation sur l'accumulation de la tourbe au Québec méridional. *Comptes Rendus Biologies Académie des Sciences*, 325 (5) : 629-640.
- Muller S.D., Miramont C., Bruneton H., Carré M., Sottocornola M., Court-Picon M., de Beaulieu J.-L., Nakagawa T. & Schevin P., 2012. A palaeoecological perspective for the conservation and restoration of wetland plant communities in the central French Alps, with particular emphasis on alder carr vegetation. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 171 : 124-139.
- Muller S.D., Bonnet C., Cornet F., Montade V. & Terral J.-F. (2024). Les tourbières de Lajo, Margeride (Lozère). *Orpalm Synthesis*, 17 (1) : 9-28.
- Obase K., Douhan G.W., Matsuda Y. & Smith M.E. (2017). Progress and challenges in understanding the biology, diversity, and biogeography of *Cenococcum geophilum*. *Biogeography of mycorrhizal symbiosis*, 230 : 299-317.
- Perrière J. & Leroyer C. (2006). Impact sur le milieu végétal et activités agropastorales des groupes néolithiques d'après la séquence pollinique d'Arman-court (Oise). In : P. Duhamel (éd), *Impacts interculturels au Néolithique moyen. Du terroir au territoire : sociétés et espaces*. Artheis Editions, Dijon, pp. 151-160.
- Quinty F. & Rochefort L. (2003). *Guide de restauration des tourbières, deuxième édition*. Association canadienne de mousse de sphaigne et Ministère des Ressources naturelles du Nouveau-Brunswick, Québec, 131 p.
- Rydin H., Jeglum J.K. & Bennett K.D. (2013). *The Biology of Peatlands, 2nd edition*. OUP Oxford, Oxford, 382 p.
- Shotyk W., MacKenzie A. & Norton S. (2004). Archives of environmental contamination. *Journal of Environmental Monitoring*, 6 (5) : 417-417.
- Troels-Smith J. (1955). *Karakterisering af løse jordarter (Characterization of Unconsolidated Sediments)*. C.A. Reitzels Forlag, København, 101 p.
- Yu Z., Campbell I.D., Vitt D.H., & Apps M.J. (2001). Modelling long-term peatland dynamics. I. Concepts, review, and proposed design. *Ecological Modelling*, 145 (2-3) : 197-210.

ANNEXE 1. Inventaire floristique réalisé sur la tourbière des Crozes le 29 août 2024. L'occurrence de chaque espèce dans chacun des grands types de milieux est marquée par un « x ».

Espèces par groupe systématique	Fen	Jonçaie	Butte
<b>Bryophytes</b>			
<i>Aulacomnium palustre</i> (Hedw.) Schwägr.		x	x
<i>Polytrichastrum formosum</i> Hedw.	x		
<i>Polytrichum commune</i> Hedw.			x
<i>Sphagnum capillifolium</i> (Ehrh.) Hedw.	x		x
<i>Sphagnum divinum</i> Flatberg & K.Hassel			x
<i>Sphagnum flexuosum</i> Dozy & Molk.	x		
<b>Polypodiophytes</b>			
<i>Equisetum fluviatile</i> L.	x		
<b>Spermatophytes</b>			
<i>Avenella flexuosa</i> (L.) Drejer		x	x
<i>Betula nana</i> L.		x	x
<i>Betula pubescens</i> Ehrh.			x
<i>Calluna vulgaris</i> (L.) Hull			x
<i>Caltha palustris</i> L.	x	x	
<i>Cardamine pratensis</i> L.		x	
<i>Carex echinata</i> Murray	x	x	x
<i>Carex nigra</i> (L.) Reichard	x	x	x
<i>Carex rostrata</i> Stokes	x		
<i>Cirsium palustre</i> (L.) Scop.		x	
<i>Comarum palustre</i> L.	x	x	
<i>Drosera rotundifolia</i> L.			x
<i>Epikeros pyrenaicus</i> (L.) Raph.			x
<i>Epilobium palustre</i> L.	x	x	
<i>Eriophorum vaginatum</i> L.		x	x
<i>Galium uliginosum</i> L.	x	x	
<i>Genista anglica</i> L.		x	
<i>Holcus lanatus</i> L.			x
<i>Juncus acutiflorus</i> Ehrh. Ex Hoffm	x		
<i>Juncus conglomeratus</i> L.	x	x	
<i>Juncus squarrosus</i> L.		x	
<i>Lotus pedunculatus</i> Cav.	x	x	
<i>Menyanthes trifoliata</i> L.	x	x	
<i>Molinia caerulea</i> (L.) Moench			x
<i>Montia fontana</i> L.	x	x	
<i>Myosotis scorpioides</i> L.	x		
<i>Nardus stricta</i> L.		x	
<i>Pinus sylvestris</i> L.			x
<i>Pinus uncinata</i> Ramond ex DC.			x
<i>Pinus sylvestris x uncinata</i>			x
<i>Potentilla erecta</i> (L.) Raeusch.		x	x
<i>Ranunculus flammula</i> L.	x	x	
<i>Salix aurita</i> L.	x	x	
<i>Salix lapponum</i> L.			x
<i>Vaccinium microcarpum</i> (Turcz. ex Rupr.) Schmalh			x
<i>Vaccinium myrtillus</i> L.			x
<i>Vaccinium vitis-idaea</i> L.			x
<i>Viola palustris</i> L.	x		

ANNEXE 2. Catégories définies par [Troels-Smith \(1955\)](#) utilisées pour caractériser la tourbe de la tourbière des Crozes.

<i>Turfa</i>	<i>Tl</i>	<i>T. lignosa</i>	Rameaux, racines, radicelles de plantes ligneuses
	<i>Th</i>	<i>T. herbacea</i>	Tiges, feuilles, rhizomes, radicelles de plantes herbacées
<i>Detritus</i>	<i>Dh</i>	<i>D. herbosus</i>	Fragments (0,1-2 mm), non identifiables, de plantes herbacées
<i>Limus</i>	<i>Ld</i>	<i>L. detrituosus</i>	Fragments décomposés (< 0,1 mm) de plantes et d'animaux
<i>Grana</i>			Particules minérales

# HISTOIRE DE LA TOURBIERE DES CROZES (MARGERIDE, FRANCE) ET DE SES ALENTOURS : ETUDE POLLINIQUE

Bailleux Coline <sup>1</sup>, Laval Timon <sup>2</sup>, Rabbia-Ré Antonio <sup>3</sup>

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

<sup>1</sup> coline@bailleux.eu, <sup>2</sup> timonvictorlaval@gmail.com, <sup>3</sup> antonio.rr@orange.fr

Encadrement : Serge D. Muller

Texte en partie réécrit par S.D. Muller.

*Citation* : Bailleux C., Laval T. & Rabbia-Ré A. (2025). Histoire de la tourbière des Crozes (Margeride, France) et de ses alentours : étude pollinique. *Orpalm Synthesis*, 18 (1) : 63-76.

---

**Résumé** : Les tourbières sont des environnements clés menacées par les activités humaines. La tourbière des Crozes (Lajo, Margeride) a fait l'objet d'une étude pollinique permettant de remonter jusqu'à 8000 cal. BP. Initialement, le milieu est dominé par une chênaie mésophile qui devient une hêtraie vers 4600 cal. BP. Depuis cette période, des traces d'anthropisation apparaissent. Aujourd'hui la tourbière présente encore une forte activité humaine avec notamment *Calluna vulgaris* (pâturage) et *Pinus sylvestris*-type (activité sylvicole). Cette étude permet de replacer les changements de la tourbière dans un contexte régional et d'aider à la compréhension de l'impact anthropique.

**Mots clés** : Massif central, anthropisation, pâturage, paléoenvironnement, sylviculture

**Abstract**: *History of the Crozes mire (Margeride, France) and its surroundings: pollen study.* Mire are key environments threatened by human activity. The Crozes peatland (Lajo, Margeride) has been the subject of a pollen study dating back to 8,000 cal. BP. Initially, the environment was dominated by a mesophilous oak forest, which became a beech forest around 4,600 cal. BP. Traces of human activity can be detected from this period to the present day when the mire landscape is dominated by *Calluna vulgaris* (grazing) and *Pinus sylvestris*-type (forestry). This study compares the changes in the mire's surrounding landscape with the records analysed in a regional frame and helps to understand the impact of human activity.

**Keywords**: Massif central, anthropization, grazing, palaeoenvironment, afforestation

**L**es tourbières sont des écosystèmes qui présentent une faune et une flore particulièrement riches et constituent d'importants puits de carbone (Heinemeyer et al., 2018). Leur étude et leur préservation sont importantes dans le contexte du réchauffement climatique et de l'érosion de la biodiversité. Dans l'hémisphère nord, les tourbières se créent dans des conditions spécifiques : une

saturation en eau entraînant une anoxie, souvent couplée à de basses températures et un sol acide (Potzger, 1934). En résulte un processus de tourbification : l'accumulation de tourbe, matière organique peu décomposée (majoritairement constituée de sphagnes et de laïches). L'anoxie et la baisse de température permettent une très bonne conservation et favorisent la fossilisation des restes de certains organismes, rendant ces milieux

propices à l'étude et à la reconstitution des paléoenvironnements. La bonne conservation du pollen fossile (Reille, 1987) permet la réalisation d'études palynologiques, comme celles de Cuenot et al. (2024) et Féat et al. (2024) qui ont étudié les tourbières de Lajo (Margeride, France) pour en reconstituer l'histoire de la végétation.

Les tourbières de Margeride sont impactées par les activités anthropiques : elles sont souvent drainées, voire asséchées, pour y permettre le pâturage ou la sylviculture. Le réchauffement climatique augmente le risque de sécheresse et perturbe le rythme des précipitations, augmentant leur vulnérabilité. En raison des perturbations anthropiques et des contraintes climatiques, le nombre de tourbières en Europe et en France régresse depuis des décennies, impactant leur biodiversité (Bernard, 2016).

La présente étude porte sur la tourbière des Crozes (Margeride, France), actuellement pâturée de manière extensive par un troupeau de bovins. Ce travail a consisté à reconstruire l'histoire de la végétation à partir du pollen contenu dans une carotte sédimentaire, dans le but (1) d'identifier les changements de la végétation locale et régionale, mais aussi (2) d'évaluer l'impact des activités anthropiques sur ces derniers. Il s'inscrit dans un cadre plus large en s'intégrant dans l'histoire de la végétation régionale connue grâce aux études antérieures réalisées à l'échelle du Massif central (Reille et al., 1985 ; Guenet, 1986 ; Marambat, 1986 ; Servera Vives et al., 2014 ; Féat et al., 2024) et souhaite participer à une meilleure compréhension de l'impact des activités humaines sur les tourbières.

## MATERIEL ET METHODES

### 1- Contexte géographique et phytosociologique de la tourbière des Crozes

La tourbière des Crozes (44° 51' 02,0" N, 3° 26' 33,4" E) est située à 1379 m d'altitude

dans le complexe des tourbières de Lajo, lui-même situé dans le massif de la Margeride (Massif central, France ; Fig. 1). La Margeride est un plateau granitique, situé entre 1000 et 1550 m d'altitude, dans l'étage montagnard (Besqueut, 1953 ; Montard et al., 1983 ; Bornand & Menier, 1989). Le climat montagnard s'accompagne d'étés frais et humides, ainsi que d'hivers longs et froids. Entre 1991 et 2020, la température moyenne annuelle était de 7,9 °C, et les précipitations annuelles moyennes sont de 1061,2 mm/an (station météorologique de Paulhac-en-Margeride, données 1991-2020 ; ID : 48110001). La tourbière est minérotrophe, avec un apport en eau de ruissellement très minéralisée (Henriet et al., 2025).

Il est possible de distinguer quatre grandes zones dans la tourbière des Crozes avec chacune une végétation différente :

- Fen : *Carex canescens*, *Comarum palustre*, *Juncus acutiflorus*, *Lotus pedunculatus*, *Menyanthes trifoliata*
- Buttes à Ericacées : *Betula nana*, *Calluna vulgaris*, *Eriophorum vaginatum*, *Pinus sylvestris*-type, *Vaccinium myrtillus*
- Platière non pâturée, en exclos : *Agrostis canina*, *Carex rostrata*, *Cirsium palustre*, *Epikeros pyrenaicus*, *Viola palustris*
- Jonçaille pâturée de manière extensive par des vaches Aubrac : *Juncus acutiflorus*, *J. conglomeratus*, *Galium uliginosum*, *Montia fontana*

Les zones de fen et à buttes sont pâturées. La tourbière est entourée d'une forêt à *Fagus sylvatica* et *Pinus sylvestris* avec quelques *Abies alba* et *Quercus petraea*.

### 2- Méthodologie de terrain

Deux carottages (CRZ1, CRZ2) ont été réalisés sur la tourbière des Crozes en juillet 2024 en utilisant un carottier russe. La présente étude ne s'est concentrée que sur la séquence CRZ1, constituée de deux carottes : CRZ1A (0-75 cm) et CRZ1B (68-168 cm).

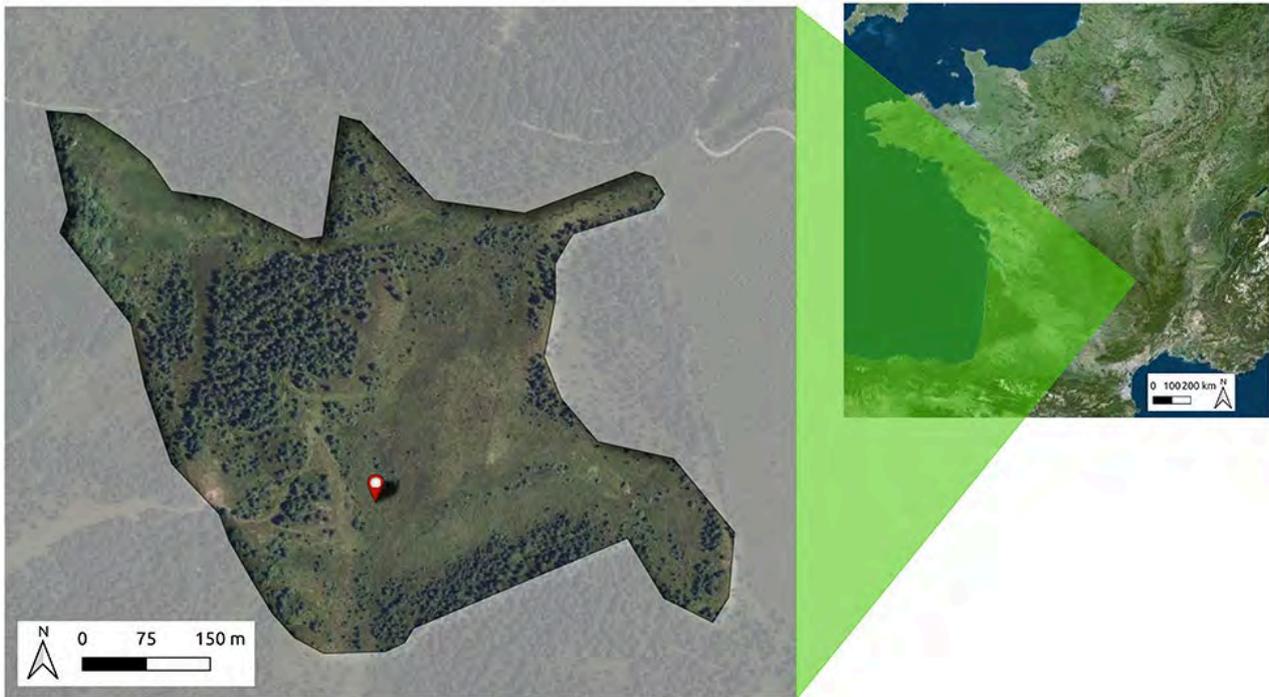


Figure 1. Localisation de la tourbière des Crozes, Lajo, Margeride (48) (source : Google satellite).

Des relevés phytosociologiques ont été réalisés dans les différentes communautés végétales de la tourbière afin d'avoir un aperçu de la végétation actuelle et de l'abondance de chaque espèce. Certains relevés ont été réalisés sur des placettes suivies depuis 1987 par le CEN Occitanie (Henriet et al., 2025). Le pourcentage de recouvrement et l'abondance ont été calculés selon la méthode de Braun-Blanquet (1932).

### 3- Traitement des échantillons en laboratoire

#### *Extraction du matériel pollinique et préparation des lames*

12 échantillons de 1 cm<sup>3</sup> ont été prélevés sur la séquence CRZ1, tous les 16 cm, à l'exception de l'échantillon basal, espacé de 7 cm par rapport au précédent. Il n'y a pas eu de profondeur redondante sur la partie commune des carottes (entre 68 et 75 cm). Les échantillons ont été récupérés sur le côté arrondi de la carotte pour éviter toute pollution liée au frottement du carottier. La partie sommitale de la carotte, soit les végétaux non décomposés, a été enlevée pour éviter les contaminations. Un échantillon de tourbe a été envoyé au *Poznań Radiocarbon*

*Laboratory* (Pologne) pour datation radiocarbone (Henriet et al., 2025).

Plusieurs traitements ont été appliqués sur les échantillons afin de permettre leurs analyses au microscope. Le protocole respecte Berglund & Ralska-Jasiewiczowa (1986). Le volume des échantillons a été mesuré par déplacement d'eau et va de 0,2 à 1,5 ml. Les échantillons ont été filtrés par un tamis de 0,5 mm pour éliminer les macrorestes. Ils ont subi une défloculation de la matière organique (séparation des éléments de la tourbe) avec de l'hydroxyde de potassium (KOH 10 %) pendant 20 min à 90 °C. L'élimination de la silice a été réalisée avec de l'acide fluorhydrique (HF, 70 %), à froid, pendant minimum 12 h. L'élimination des fluosilicates et l'acidification ont été réalisées via l'acide chlorhydrique (HCl, 20 %) pendant 10 min à 100 °C puis centrifugé, afin d'éliminer les éventuels carbonates. Les échantillons ont ensuite été déshydratés via l'acide acétique (CH<sub>3</sub>COOH). Ensuite, une acétolyse (mélange d'anhydride acétique C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>O<sub>3</sub>, 97 % et d'acide sulfurique H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 96 %) a été utilisée pour éliminer la cellulose. Enfin un rinçage à l'eau et un à l'alcool ont été réalisés. Pour chaque échantillon, 25 µl de culot ont

été montés dans de la glycérine entre lame et lamelle, fixées avec de l'histolaque.

#### *Observation et identification au microscope*

Les comptages ont été réalisés à l'aide de microscope Leica, au grossissement x40, par 3 analystes. L'identification a été faite grâce à la collection de référence de l'ISEM et à l'atlas de Reille (1992). Chaque analyste comptant au minimum 100 grains de pollen sur un tiers de chaque lame, pour un minimum 300 grains de pollen par lame. En tout 6630 grains de pollen ont été comptés pour une moyenne de 552 grains par lame (minimum : 383 ; maximum : 714). Pour répondre à nos problématiques, nous avons étudié les taxons polliniques indicateurs d'anthropisation (*Castanea sativa*, *Juglans regia*, *Glyceria*-type, *Plantago*, Poaceae, *Secale*, *Triticum* ; Behre, 1981 ; Dolez, 2018 ; Muller et al., 2022), de milieux mésophiles (*Abies alba*, *Corylus avellana*, *Fagus sylvatica*, *Picea abies*, *Pinus sylvestris*-type, *Quercus pubescens*-type et *Tilia*) et de tourbières (*Betula*, *Bistorta*, *Calluna vulgaris*, Cyperaceae et *Salix*). Les autres taxons polliniques et le pollen non identifié ont également été comptés en tant qu'« indéterminés ». Il est important de noter que certains taxons polliniques peuvent avoir une signification ambiguë. Par exemple, les Poaceae ou *Glyceria*-type comprennent à la fois des espèces hydrophiles locales et des espèces mésophiles.

#### **4- Traitement des données et analyses statistiques**

Les comptages des analystes ont été additionnés. Le diagramme pollinique a été réalisé avec le package « Rioja » de R. La zonation a été faite en fonction de la distance euclidienne, avec la méthode CONISS (Grimm, 1987). Des courbes de concentration ont été faites pour certains taxons polliniques afin de vérifier leurs variations sans être potentiellement écrasées par le pourcentage des autres taxons polliniques. Les concentrations polliniques ont été calculées selon la formule suivante :

$$\frac{NP.LT.VC}{LC.VG.VS}$$

Avec :

NP, nombre de grains de pollen  
LT, nombre total de lignes  
VC, volume du culot (ml)  
LC, nombre de lignes comptées  
VG, volume de la goutte (ml)  
VS, volume de sédiment (cm<sup>3</sup>)

L'influx a été calculé en multipliant la concentration (en particules/cm<sup>3</sup>) par le taux de sédimentation (obtenu grâce à l'étude de Godichon et al., 2025). Une analyse factorielle des correspondances (AFC) a été réalisée sur R pour visualiser les tendances et les groupes.

## **RESULTATS**

### **1- Diagramme pollinique en pourcentage**

Les principaux résultats obtenus sont présentés Figure 2. Sur toute la carotte, le pollen arboréen (PA) domine le pollen non-arboréen (PNA) au ratio moyen de 83/17. Le diagramme est subdivisé en trois zones polliniques (ZP). Sur la base du modèle d'âge et de l'enregistrement pollinique, Henriet et al. (2025) ont proposé l'existence d'un hiatus de sédimentation entre 22 et 17 cm, soit de 2500 à 100 cal. BP.

ZP1 (167-119 cm, 8000-5000 cal. BP). Le rapport PA/PNA est en baisse, mais reste entre 90/10 et 80/20 sur cette période. La zone est dominée par *Betula* qui atteint son maximum à 6400 cal. BP (35 %). *Corylus avellana* et *Salix* sont également très abondants à la base de la carotte, respectivement à des maximums de 22 et 18 %, mais diminuent progressivement sur la période. On observe une augmentation de *Quercus pubescens*-type et de Poaceae. On note une présence continue de *Tilia* de moins de 10 % tout le long de cette période.

ZP2 (119-32 cm, 5000-2500 cal. BP). Le rapport PA/PNA est en augmentation sur toute cette période, atteignant son maximum à 93/7 vers 2700 cal. BP. *Corylus avellana*, *Quercus*

*pubescens*-type et *Salix* diminuent au profit de *Fagus sylvatica* qui apparaît et domine la zone pollinique (43 %). *Betula* présente un court plateau à 33 % de 3420 cal. BP à 2990 cal. BP. Il y a une baisse de *Fagus sylvatica* sur cette même période, ce dernier restant à 36 %. Les Poaceae baissent progressivement jusqu'à 2 % à 3980 cal. BP. Pendant cette période, plusieurs taxons indicateurs d'anthropisation (*Plantago*, *Secale*, *Triticum* ; Behre, 1981) apparaissent momentanément, ainsi que deux taxons indicateurs de zones humides (*Bistorta* et Cyperaceae ; Mishra *et al.*, 2015). Il y a un hiatus entre les zones polliniques 2 et 3, de 2000 à 100 cal. BP.

ZP3 (16-0 cm, 100-0 cal. BP). Le rapport PA/PNA est à 40/60 à 100 cal. BP et remonte jusqu'à 60/40 à l'actuel. La zone est caractérisée par l'apparition de *Calluna vulgaris*, *Castanea sativa*, *Juglans regia* et *Picea abies* tandis que la proportion de *Pinus sylvestris*-type augmente fortement jusqu'à l'actuel à un maximum de 23 %. *Calluna vulgaris* domine la zone avec un maximum de 35 %. *Betula*, *Quercus pubescens*-type et *Plantago* augmentent de nouveau progressivement au contraire de *Fagus sylvatica* et Cyperaceae. Même si les Poaceae atteignent un de leurs pourcentages les plus élevés au début de la zone pollinique (9 %), elles diminuent progressivement vers le sommet. Il y a réapparition de *Secale* à 1 % de présence après le hiatus.

## 2- Diagramme pollinique en concentration

Les résultats obtenus en concentration sont présentés Figure 3. L'influx total montre la

quantité totale de pollen déposée à chaque période par cm<sup>2</sup>.

Dans la ZP1, *Betula*, *Quercus pubescens*-type, Poaceae et *Plantago* ont une concentration plus importante que les autres taxons avec des moyennes comprises entre 45 500 et 2000 grains/cm<sup>3</sup>. L'influx baisse à la base de la carotte et reste ensuite constant à 3500 grains.an<sup>-1</sup>.cm<sup>-2</sup> jusqu'à 6430 cal. BP, après quoi il remonte.

La ZP2 voit l'émergence de *Fagus sylvatica* qui domine les autres taxons avec une concentration moyenne de 52 000 grains/cm<sup>3</sup>. *Betula* a un pic de 75 000 grains/cm<sup>3</sup> à 3400 cal. BP mais diminue ensuite à 2680 cal. BP. *Quercus pubescens*-type diminue également et atteint son minimum à 2680 cal. BP, contrairement à *Plantago* qui augmente légèrement et atteint son maximum à 4000 cal. BP. L'influx connaît une baisse à 4000 cal. BP et remonte jusqu'à 3400 cal. BP. Il connaît un minimum (1190 grains.an<sup>-1</sup>.cm<sup>-2</sup>) à 2700 cal. BP, puis à une croissance très rapide jusqu'au hiatus.

La ZP3 est constituée majoritairement de *Calluna vulgaris* qui atteint presque 120 000 grains/cm<sup>3</sup> à 100 cal. BP. *Pinus sylvestris*-type, Poaceae et *Plantago* ont leurs concentrations polliniques les plus importantes à cette période, avec des pics à 100 cal. BP de, respectivement, 46 000, 31 000 et 2800 grains/cm<sup>3</sup>. *Fagus sylvatica* est fortement réduit et disparaît presque à l'actuel, tandis que *Quercus pubescens*-type redevient plus important. L'influx est à son maximum (31 000 grains.an<sup>-1</sup>.cm<sup>-2</sup>), juste après le hiatus, puis baisse toute la période.

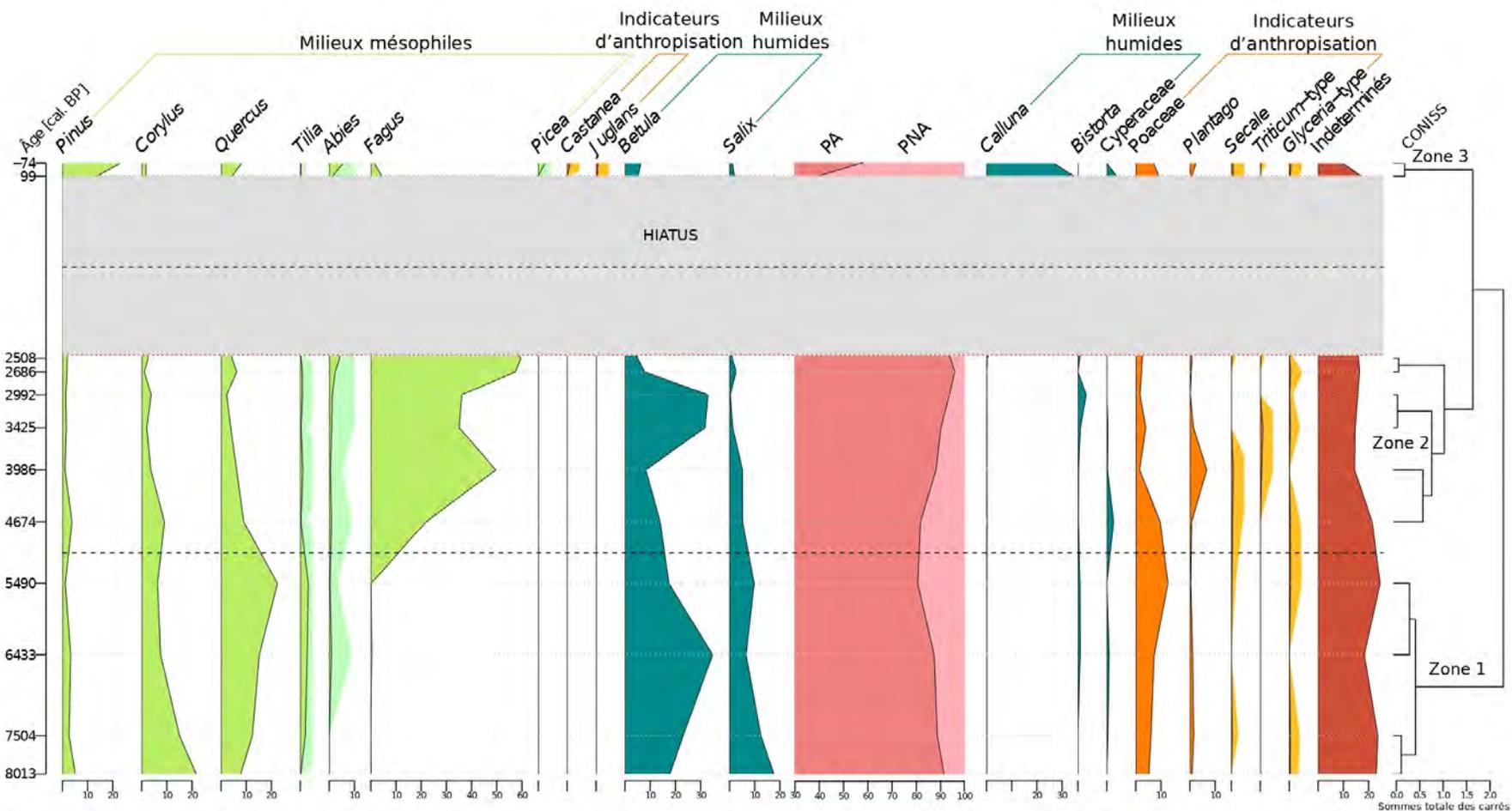


Figure 2. Diagramme pollinique en pourcentage de la tourbière des Crozes (CRZ1). Les taxons en vert correspondent aux indicateurs de milieux mésophiles, ceux en bleu aux indicateurs de milieux humides et enfin ceux en orange aux indicateurs d'anthropisation. Les ombres correspondent à une exagération des données de 10 fois. On retrouve à gauche le pollen arboréen (PA) et à droite le pollen non arboréen (PNA).

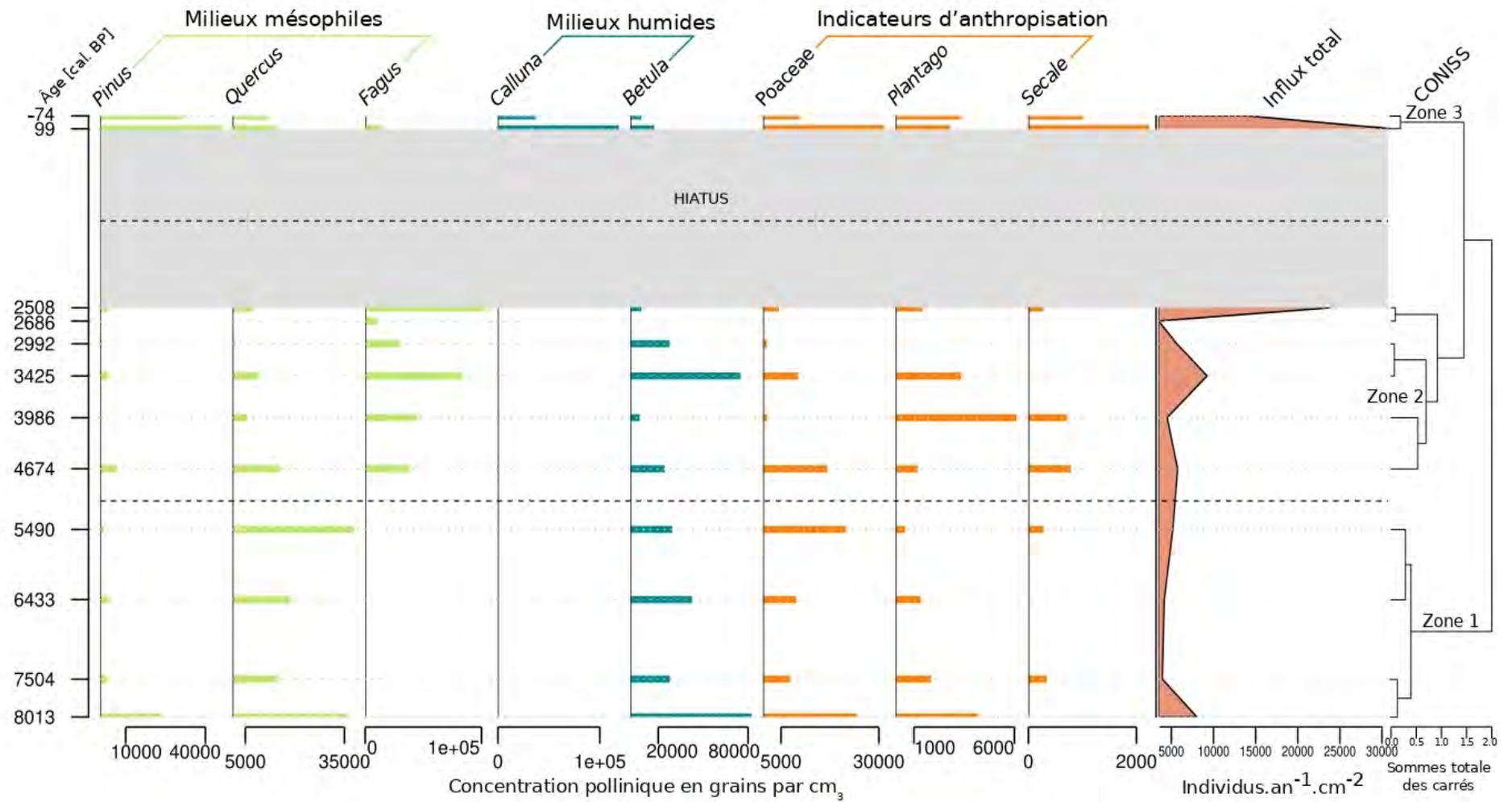


Figure 3. Diagramme pollinique en concentration de la tourbière des Crozes (CRZI). Les concentrations sont données avec des échelles différentes. Les taxons en vert correspondent aux indicateurs de milieux mésophiles, ceux en bleu aux indicateurs de milieux humides et enfin ceux en orange aux indicateurs d'anthropisation.

### 3- Analyse multivariée

L'analyse factorielle des correspondances (AFC) des âges est présentée **Figure 4**. Les variables sont réparties en 3 groupes. L'axe 1 représente un gradient d'anthropisation et explique 44,21 % de la variation. Quant à lui, l'axe 2 représente un gradient de compétition et explique 34,64 %. Le premier groupe, nommée « hêtraie », correspond à la période intermédiaire (3986-2508 cal. BP). Le second groupe, nommée « chênaie », correspond à la période la plus ancienne (8013-5490 cal. BP).

Enfin, le troisième groupe, nommée « formation d'origine anthropique » correspond à la période récente (100-0 cal. BP). Ils permettent de définir les taxons dominants sur ces trois périodes :

- ZP1 (8000-5000 cal. BP) : *Corylus avellana*, *Quercus pubescens*-type, *Salix*, *Tilia*
- ZP2 (5000-2500 cal. BP) : *Bistorta*, *Fagus sylvatica*, *Triticum*
- ZP3 (100-0 cal. BP) : *Calluna vulgaris*, *Castanea sativa*, *Juglans regia*, *Picea abies*

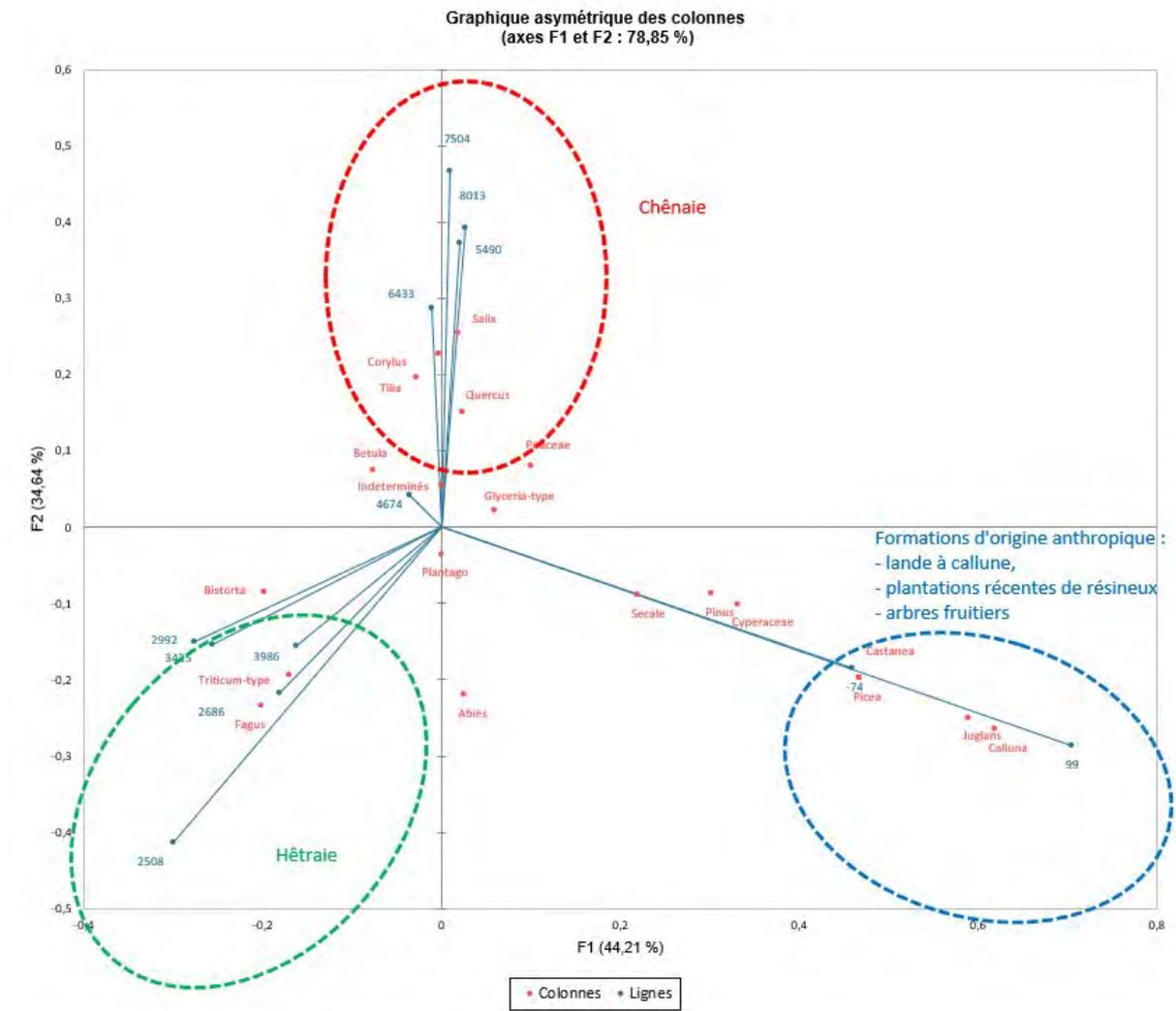


Figure 4. Analyse factorielle des correspondances (AFC) réalisée sur 12 échantillons et 19 taxons. Les valeurs propres (pourcentages d'inertie) des axes 1 et 2 sont respectivement de 44,21 et 34,64 %.

On note cependant que *Betula*, les Poaceae et *Glyceria*-type sont proches de la zone pollinique 2. Les Cyperaceae, *Pinus sylvestris*-type et *Secale* sont proches de la zone Zone pollinique 3. Enfin, *Abies alba* et *Plantago* ne sont proches d'aucun groupe, même si *Abies alba* est plus proche du groupe de la hêtraie que des autres groupes. Certains de ces taxons comme *Plantago* et *Betula* ainsi que les indéterminées sont proches du centre du graphique et ne contribuent donc peu ou pas à l'explication des axes. La distribution des données forme un effet Guttman (forme en fer à cheval).

## DISCUSSION

### 1- Histoire de la végétation locale et régionale

La base de la carotte est datée à 8000 cal. BP (Fig. 2). Cette date correspond à l'Atlantique Ancien (Reille et al., 1985). *Corylus avellana* domine la végétation mésophile, tandis que *Betula* et *Salix* se développent sans doute localement, sur la tourbière (Argant & Cubizolle, 2005). Le maintien tardif du noisetier, qui constitue le pionnier des forêts caducifoliées au Boréal, est probablement lié à la position altitudinale du site étudié, au sein de l'étage montagnard. Cette observation est cohérente avec les tourbières étudiées par Reille et al. (1985), qui font le même constat sur l'ensemble du Massif central. *Corylus avellana* décline vers 7500 cal. BP, au profit de *Quercus pubescens*-type (Fig. 2). L'abondance de *Quercus pubescens*-type, associé à *Tilia* et *Corylus avellana* (Fig. 2), traduit la mise en place d'une chênaie tempérée typique de l'Atlantique, riche en noisetiers. La phase à *Quercus pubescens*-type est caractérisée par une augmentation des Poaceae (Fig. 3). Les Poaceae étant héliophiles, leur enregistrement pourrait provenir de la tourbière elle-même, probablement plus ouverte que les forêts alentours.

On observe une apparition précoce d'*Abies alba* dès 7500 cal. BP (Fig. 2), soit 1000 cal. BP plus tôt que ce qui est observé

en moyenne dans le reste du Massif central (Plancher, 2017). Toutefois, bien qu'il soit très compétitif, le sapin ne s'étend pas au cours du déclin de *Quercus pubescens*-type. A l'inverse, *Fagus sylvatica* s'étend rapidement malgré une apparition plus tardive vers 5500 cal. BP, et devient dominant sur l'ensemble de la zone pollinique 2 (5000-2500 cal. BP ; Fig. 2). En parallèle à la hausse du hêtre, on observe une augmentation du pollen arboréen. Les dates d'apparition d'*Abies alba* et *Fagus sylvatica* sont cohérentes avec ce qui a été déterminé dans l'étude de Féat et al. (2024). Ainsi, la zone pollinique 2, correspondant au Subboréal (5500-2800 cal. BP ; Cubizolle et al., 2015), apparaît largement dominée par une hêtraie, avec des proportions de *Fagus sylvatica* pouvant parfois dépasser les 60%.

Le fait que les dynamiques de *Betula* et *Bistorta* ne sont pas corrélées à celle de *Fagus sylvatica* témoigne de l'origine locale de leur enregistrement pollinique. La concentration de *Fagus sylvatica* (Fig. 3) reste stable sur cette période. Au cours de cette seconde période, les milieux mésophiles régionaux sont dominés par la hêtraie, tandis que la tourbière est probablement occupée par des formations de mégaphorbiaie en partie boisées. On peut de ce fait supposer la présence locale de *Betula pubescens* ou *B. nana*, espèces de milieux humides (Dubois, 2022). Cette hypothèse s'accorde avec l'étude de Digeon & Honnet (2025), qui révèle à cette période, parmi les palynomorphes non-polliniques, l'occurrence de perforations scalariformes d'*Alnus-Betula*. De plus, *Betula nana* est présent dans les tourbières du complexe de Lajo depuis plusieurs milliers d'années (Féat et al., 2024).

Il n'est pas possible de connaître les changements de végétation ayant eu lieu au cours du hiatus de 2000 à 100 cal. BP. Après ce dernier, la végétation est dominée par *Pinus sylvestris*-type et *Calluna vulgaris* celle-ci étant présente au niveau local, sur la tourbière et ses alentours, tandis que *Pinus sylvestris*-type domine au niveau régional. L'abondance de *Calluna vulgaris* et des Poaceae indique une ouverture croissante du

milieu au cours de cette période. Cela se corrèle avec la baisse importante du Pollen arboréen (Fig. 2). Au niveau régional, les apparitions de *Picea abies* et l'importance de *Pinus sylvestris*-type, toutes deux absentes lors des phases précédentes, sont liées aux activités anthropiques comme le pastoralisme et la sylviculture.

## 2- Indices d'anthropisation

Plusieurs taxons polliniques marqueurs d'anthropisation sont présents sur l'ensemble de la carotte (Fig. 2). Bien que l'impact humain puisse avoir un fort impact sur la végétation, il faut rester prudent quant à l'interprétation de leur présence.

### De 8000 à 5000 cal. BP (ZP1)

Au cours de la première phase, *Glyceria*-type est présent dès la base de la carotte (Fig. 2). Ce taxon comprend à la fois des espèces cultivées comme l'avoine (*Avena sativa*) et l'orge (*Hordeum vulgare*) et des espèces sauvages, notamment *Glyceria* spp. (Muller et al., 2022). Au vu de l'âge de la zone pollinique 1, le pollen de *Glyceria*-type provient probablement d'espèces sauvages des zones humides, car il apparaît avant les premières traces d'anthropisation dans la région, datées vers 5400 cal. BP (Richard, 2004). On observe également la présence de Poaceae, et surtout de *Plantago* et *Secale*, qui révèlent peut-être les premières activités agropastorales dans la région (Dendievel, 2017).

### De 5000 à 2500 cal. BP (ZP2).

Plus de marqueurs d'anthropisation ont été identifiés au cours de la seconde période pollinique. Elle correspond au Subboréal et au début du Subatlantique et englobe les âges du Bronze et du Fer (Cubizolle et al., 2015). Le début de cette zone pollinique correspond au Néolithique final où l'on trouve *Plantago*, un marqueur de pâturage (Iversen, 1973 ; Behre, 1981). Digeon & Honnet (2025) montrent un pic de champignons coprophiles, organismes que l'on retrouve dans les excréments et pouvant indiquer la présence de bétail, vers

4000 cal. BP, confortant l'hypothèse du pâturage (Galop et al., 2003).

Les enregistrements de *Secale* observés pendant les pics de champignons coprophiles laissent penser que des céréales ont pu être cultivées. Ceci n'est pas très cohérent avec la hausse du rapport PA/PNA (Fig. 2), qui suggère plutôt une fermeture du milieu. Des signes d'activités humaines sont pourtant enregistrés dès 4500 cal. BP dans le Massif central (de Beaulieu et al., 1991). Ils correspondent, d'après ces auteurs, à des prises de terre par incendie sans impact durable sur le couvert végétal. Ces pratiques peuvent expliquer la présence des taxons polliniques caractéristiques de l'agriculture au même moment qu'un fort pourcentage de PA par la création d'une mosaïque d'habitats. On note également dans la Figure 4 l'enregistrement de *Triticum* en parallèle de la hêtraie. La présence du blé ici pourrait indiquer une activité anthropique précoce.

Les pics de pollen potentiellement indicateur d'activité humaine peuvent être mis en relation avec la baisse du taux d'influx total à la même période (Fig. 3), vers 4000 cal. BP. Une chute globale du taux de pollen d'arbre peut indiquer une activité humaine, que ce soit pour l'utilisation du bois ou libérer les milieux pour la culture, menant à une baisse de taxons pollinisateurs (Argant & Cubiolle, 2005).

### De 100 cal. BP à aujourd'hui (ZP3).

L'apparition de *Calluna vulgaris*, juste avant le hiatus, au début du Subatlantique, vers 2500 cal. BP traduit une ouverture du milieu (Reille, 1987). La callune est ensuite enregistrée en forte proportion, à l'échelle locale, durant le dernier siècle. Elle se trouve soit dans des milieux ouverts secs (landes), soit sur des buttes dans les tourbières, mais elle révèle dans tous les cas des activités de pâturage. Ici, la présence conjointe de la callune et du plantain (*Plantago*) révèle que le milieu est ouvert et pâturé (Dendievel et al., 2019). Cette activité, toujours présente localement sur la tourbière des Crozes, a probablement favorisé le développement des joncs (*Juncus acutiflorus* et *J. effusus*),

considérés comme marqueurs de pâturage (Henriet et al., 2025).

*Picea abies* et *Pinus sylvestris*-type ne sont enregistrés qu'après le hiatus, vers 100 cal. BP, ce qui traduit leur introduction récente. L'épicéa n'est indigène en France que dans les Alpes où il n'est arrivé que vers 2000 cal. BP (Dendievel et al., 2019). *Pinus sylvestris* a été massivement planté dans le Massif central dans la première moitié du 20<sup>e</sup> siècle (Reille, 1989). Les études précédentes réalisées dans la région (Féat et al., 2024), confirment que le pin, absent au cours de l'Holocène, n'apparaît qu'après la révolution industrielle. Enfin, *Castanea sativa* et *Juglans regia*, introduits dans le sud de la France vers 2500 cal. BP (Dolez, 2018), ne sont enregistrés aux Crozes que durant le dernier siècle, postérieurement au hiatus.

Ainsi, au cours du temps, les activités humaines ont eu un impact croissant sur la tourbière des Crozes, jusqu'à devenir déterminantes dans la dynamique et l'évolution de la végétation régionale et locale.

### 3- Gradients de perturbation et de compétition

L'axe 1 de l'AFC (Fig. 4) oppose la hêtraie de la ZP2 aux formations anthropiques de la ZP3. Cet axe peut être interprété comme un gradient d'anthropisation. Toutefois, la position intermédiaire de la chênaie qui n'est pas affectée par les activités humaines ne cadre pas bien avec cette interprétation. L'axe 2 oppose quant à lui la chênaie et la hêtraie, ce qui peut cette fois laisser penser à un gradient de compétition. Cependant, on a cette fois un problème avec la position intermédiaire des formations anthropiques.

Ces observations peuvent s'expliquer en raison de la formation des données en fer à cheval. Il s'agit d'un effet Guttman, qui indique une interdépendance des deux axes. On aurait ainsi un double gradient superposé, avec en premier lieu un gradient d'anthropisation nul dans la chênaie, intermédiaire dans la hêtraie et fort dans les formations anthropiques. Ce gradient

confirme bien les observations faites précédemment, avec un impact humain d'abord nul, puis se faisant de plus en plus fort jusqu'à l'actuel. Le second gradient serait un gradient de compétition d'abord fort dans la chênaie et la hêtraie et plus faible dans les formations anthropiques récentes. La chênaie a connu peu de perturbations et la végétation y est relativement stable et couvrante amenant ainsi le développement d'espèces arborescentes compétitives. La hêtraie, probablement favorisée par les modifications des équilibres compétitifs engendrées par les défrichements anthropiques, n'en reste pas moins une formation végétale dominée par les espèces les plus compétitives de la flore européenne. Enfin, la zone pollinique la plus récente est fortement marquée par les activités anthropiques, favorisant les espèces rudérales au détriment des espèces compétitives (Grime, 1977).

### 4- Limites de l'étude

L'étude réalisée n'est pas exempte de limites. D'une part, la présence du hiatus entraîne une grande perte de données et empêche toute reconstitution sur une grande période (2000 à 100 cal. BP). D'autre part, le travail de Godichon et al. (2025) révèle l'abondance des macrorestes de *Carex* à la base de la carotte, indiquant qu'il y avait des Cyperaceae à 5400 et vers 4000 cal. BP (Godichon et al., 2025). Leur abondance a clairement été sous-évaluée dans l'étude pollinique, en raison de la difficulté à les reconnaître. D'autres taxons ont également pu être mal identifiés. Il est possible que nous ayons confondu *Pinus sylvestris*-type avec *Abies alba* avant le hiatus, mais il est également possible que son enregistrement traduise un apport régional, facilité par sa grande capacité de dispersion (Brugiapaglia et al., 1998). Enfin, dans l'AFC (Fig. 4), les informations sur le local et le régional sont mélangées sans distinction. Ici, le régional prend beaucoup de place par rapport au local et écrase partiellement ce dernier, biaisant les interprétations.

## CONCLUSION

L'étude de la carotte sédimentaire CRZ1 a ainsi permis de reconstituer l'histoire de la végétation de la tourbière des Crozes depuis 8000 cal. BP et d'évaluer l'impact passé des activités humaines sur cette tourbière. La première période, plus ancienne (8000 à 5000 cal. BP), montre la mise en place d'une forêt mésophile dominée par le chêne et le noisetier. La seconde phase (5000 à 2500 cal. BP) présente un milieu local humide dominé par le bouleau, entouré d'une hêtraie, soumise à des influences anthropiques. Un hiatus occupe la période 2000 à 100 cal. BP. La dernière phase, de 100 cal. BP à l'actuel, se caractérise par un fort impact des activités anthropiques sur le milieu, avec une régression du hêtre, l'arrivée de la callune et du pin, qui indiquent les activités de pâturage et de sylviculture. Cette dernière phase reflétant surtout les activités humaines ayant impactées le milieu, il serait intéressant de mener de nouvelles études en identifiant l'ensemble des taxons polliniques afin d'affiner les résultats et de mieux distinguer les changements locaux et régionaux. Il serait aussi intéressant de récupérer les informations de la période du hiatus afin de connaître la dynamique des différents taxons entre 2000 et 100 cal. BP, comme la date d'arrivée de *Pinus sylvestris*-type.

## REFERENCES

- Argant J. & Cubizolle H. (2005). L'évolution holocène de la végétation des monts de la Madeleine, du Forez, du Livradois et du Pilat (Massif central oriental, France) : l'apport d'une nouvelle série d'analyses palynologiques. *Quaternaire*, 16 (2) : 119-142.
- Behre K.-E. (1981). The interpretation of anthropogenic indicators in pollen diagrams. *Pollen et Spores*, 23 : 225-245.
- Berglund B.E. & Ralska-Jasiewiczowa M. (1986). Pollen analysis and pollen diagrams. In : B.E. Berglund (éd.), *Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology*, pp. 484-486. J. Wiley & Sons, Chichester.
- Bernard G. (2016). *Panorama des services écosystémiques des tourbières en France. Quels enjeux pour la préservation et la restauration de ces milieux naturels ?* Pôle-relais Tourbières – Fédération des Conservatoires d'espaces naturels, Besançon, 47 p.
- 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.
- 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. Revue de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*, 26 (4) : 293-306.
- Cuenot E., Loïs P. & Jade T. (2024). Reconstitution paléoenvironnementale des tourbières de Lajo (Margeride, Lozère), sur la base de l'étude des palynomorphes non polliniques. *Orpalm Synthesis*, 17 (1) : 43-55.
- de Beaulieu J.-L., Pons A. & Reille M. (1991). La végétation du Massif central depuis 15 000 ans (The history of the vegetation in the Massif central for 15000 years). *Bulletin de l'Association de géographes français*, 68 (1) : 3-10.
- Dendievel A.-M. (2017). Paléoenvironnements holocènes du plateau du Béage (massif du Mézenc, Massif central, France). Les variations climatiques et les activités anthropiques révélées par l'étude des macrorestes dans les sédiments tourbeux et la gyttja. *Bulletin de la Société préhistorique française*, 114 (4) : 753-755.
- Dendievel A.-M., Dietre B., Cubizolle H., Hajdas I., Kofler W., Oberlin C. & Haas J.N. (2019). Changements paléoécologiques de l'holocène et impact agropastoral sur la mire de La Narce du Béage (Massif central, France). *The Holocene*, 29 (6) : 992-1010.
- Digeon C. & Honnet R. (2025). Reconstitution paléoenvironnementale de la tourbière des Crozes (Lajo, Margeride,

- Lozère) : dynamiques climatiques, écologiques et anthropiques des derniers 8000 ans sur la base des palynomorphes non-polliniques. *Orpalm Synthesis*, 18 (1) : 77-92.
- Dolez L. (2018). *Évolution des paysages végétaux en Languedoc durant l'Holocène : apport de la palynologie à l'étude des milieux et des agrosystèmes*. Thèse de Doctorat, Université Montpellier 3, 234 p.
- Dubois H. (2022). *Le bouleau (Betula pendula ROTH et B. pubescens EHRH.), essence d'avenir en Europe occidentale?* Thèse de Doctorat, Université de Liège, 178 p.
- Féat C., Millot T. & Ramecourt C. (2024). Dynamiques paléoenvironnementales en Margeride (Lozère, France) depuis 6000 ans via l'étude pollinique des tourbières de Lajo. *Orpalm synthesis*, 17 (1) : 57-69.
- Galop D., Mazier F., Lopez-Saez J.A. & Vannièr B. (2003). Palynologie et histoire des activités humaines en milieu montagnard. Bilan provisoire des recherches et nouvelles orientations méthodologiques sur le versant nord des Pyrénées. *Archéologie du Midi Médiéval*, 21 : 1-159.
- Godichon L., Philoclès M. & Pothier L. (2025). Contribution à la reconstruction de l'histoire de la tourbière des Crozes (Lajo, Lozère) à l'aide de l'étude de la turfigenèse et des changements du milieu au cours du temps. *Orpalm Synthesis*, 18 (1) : 47-62.
- Grime J.P. (1977). Evidence for the existence of three primary strategies in plants and its relevance to ecological and evolutionary theory. *The American Naturalist*, 111 (982) : 1169-1194.
- Grimm E.C. (1987). CONISS: a FORTRAN 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares. *Computers & Geosciences*, 13 (1) : 13-35.
- Guenet P. (1986). *Analyse pollinique de la tourbière de Chambedaze et recherches pollenanalytiques dans les Monts Dore et le Cézallier, Massif central, France*. Thèse de Doctorat, Université Aix-Marseille III, 107 p.
- Heinemeyer A., Asena Q., Burn W.L. & Jones A.L. (2018). Peatland carbon stocks and burn history: Blanket bog peat core evidence highlights charcoal impacts on peat physical properties and long-term carbon storage. *Geo : Geography and Environment*, 5 (2) : 1-17.
- Iversen J. (1973). Geology of Denmark III: The Development of Denmark's Nature since the Last Glacial. *Danmarks Geologiske Undersøgelse V. Række*, 7 : 1-126.
- Marambat L. (1986). Étude palynologique de la Tourbière de la Barthe (Picherande, Puy-de-Dôme). *Réunion des Sciences de la Terre*, 11 : 120.
- Mishra S., Ashutosh T., Durgesh K.T., & Devendra K-C. (2016). Role of sedges (Cyperaceae) in wetlands, environmental cleaning and as food material: Possibilities and future perspectives. *Plant-environment interaction: Responses and approaches to mitigate stress*, 327-338.
- Muller S.D., Bottollier-Curtet M., Daoud-Bouattour A., El Madihi M., Fauquette S., Rifai N., Robles M., Saber E.-R. & Rhazi L. (2022). Holocene history of peatland communities of central Rif (N. Morocco). *Geobios*, 70 : 35-53.
- Plancher C. (2017). *Végétations holocènes reflétées par le registre pollinique de la tourbière de Lapsou (Massif central, France) : histoires paléobotaniques du site et de la région d'étude*. Mémoire de Stage, Université de Montpellier, 26 p.
- Potzger J.E. (1934). A Notable Case of Bog Formation. *The American Midland Naturalist*, 15 : 567-580.
- Reille M., de Beaulieu J.-L. & Pons A. (1985). Recherches pollenanalytiques sur l'histoire tardiglaciaire et holocène de la végétation du Cézallier, de la Planèze de St. Flour et de la Margeride (Massif central, France). *Pollen & Spores*, 27 (2) : 209-270.
- Reille M. (1987). L'histoire de la végétation de Margeride (massif central, France) depuis quelque cent siècles révélée par l'analyse pollinique de la tourbière de la Fouon. *Revue du Gévaudan*, 2 : 17-25.

- Reille M. (1989). L'origine du Pin à crochets dans le Massif central français. *Bulletin de la Société Botanique de France. Lettres Botaniques*, 136 : 61-70.
- Reille M. (1992). *Pollen et spores d'Europe et d'Afrique du Nord*. Éditions du Laboratoire de botanique historique et palynologie, Marseille, 530 p.
- Richard H. (2004). *Néolithisation précoce : premières traces d'anthropisation du couvert végétal à partir des données polliniques*. Presses Université de Franche-Comté, Besançon, 219 p.
- Servera Vives G., Miras Y., Riera S., Ramon J., 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.
- Tison J.-M. & de Foucault B. (2014). *Flora Gallica*. Biotope, Mèze et Société Botanique de France, Paris.

# RECONSTITUTION PALEOENVIRONNEMENTALE DE LA TOURBIERE DES CROZES (LAJO, MARGERIDE, LOZERE) : DYNAMIQUES CLIMATIQUES, ECOLOGIQUES ET ANTHROPIQUES DES DERNIERS 8000 ANS SUR LA BASE DES PALYNOMORPHES NON-POLLINIQUES

Digeon Clotilde <sup>1</sup> & Honnet Raphaël <sup>2</sup>

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

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

<sup>1</sup> clotilde.digeon@outlook.fr, <sup>2</sup> raphael.honnet@gmail.com

Encadrement : Ejarque Ana et Luelmo Lautenschlaeger Reyes

*Citation* : Digeon C. & Honnet R. (2025). Reconstitution paléoenvironnementale de la tourbière des Crozes (Lajo, Margeride, Lozère) : dynamiques climatiques, écologiques et anthropiques des derniers 8000 ans sur la base des palynomorphes non-polliniques. *Orpalm Synthesis*, 18 (1) : 77-92.

**Résumé** : L'analyse des palynomorphes non-polliniques (PNPs) de la tourbière des Crozes a permis de mettre en évidence les dynamiques paléoenvironnementales locales et activités humaines passées. Les PNPs ont été comptés, répertoriés puis regroupés par écologie pour servir de marqueur de ces dynamiques et traces anthropiques. La tourbière des Crozes, relativement arborée depuis le début de la turfigenèse, connaît aujourd'hui un épisode de fermeture locale. Malgré un assèchement actuel et un potentiel drainage passé, cette tourbière a toujours été très humide et alimentée d'un cours d'eau. Probablement pâturée dès 5000 cal. BP, elle est ensuite exploitée puis reboisée sur les derniers siècles.

**Mots clés** : Microfossiles, Néolithique, pastoralisme, humidité

**Abstract**: *Paleoenvironmental reconstitution of the Crozes peatland (Lajo, Margeride, Lozère): climate, ecological and human dynamics of the past 8000 years on the basis of non-pollen palynomorphs.* The analysis of non-pollen palynomorphs (NPPs) from the Crozes peatland highlighted local paleoenvironmental dynamics and past human activities. The NPPs were counted, identified, and grouped by ecology to serve as markers of these dynamics and anthropogenic traces. The Crozes peatland, relatively forested since the beginning of peat formation, is currently undergoing a phase of local closure. Despite ongoing drying and possible past drainage, it has consistently remained very wet and fed by a watercourse. Likely grazed as early as 5000 cal. BP, it was later exploited and reforested in recent centuries.

**Keywords**: Microfossiles, Neolithic, pastoralism, humidity

**L**es tourbières sont des milieux humides présents sur tous les continents. Elles sont définies par l'accumulation de tourbe (matière organique morte formée et déposée *in situ*),

qui résulte d'une production de matière organique excédant sa dégradation. Le substrat, gorgé d'eau toute l'année, est anoxique, ce qui inhibe en partie la décomposition de la matière organique. Ce

phénomène est amplifié par les basses températures. En Europe, les tourbières se trouvent essentiellement dans les massifs montagneux et les régions boréales (Joosten, 2008 ; Cubizolle, 2019). Le caractère anoxique de la tourbe permet la préservation des restes organiques (subfossiles) pendant des milliers d'années, et son accumulation verticale, sans déplacement de matière, constitue une archive stratifiée, où chaque profondeur peut être datée. L'étude des restes subfossiles contenus dans la tourbe permet ainsi de reconstituer les conditions écologiques et climatiques passées (Joosten, 2008).

Parmi ces restes, se trouvent les Palynomorphes Non-Polliniques (PNPs), sur lesquels porte cette étude. Contrairement au pollen qui est dispersé, parfois sur de grandes distances, les PNPs attestent la présence locale (*in situ*) du taxon considéré (Van Geel, 2002). Ces microfossiles à enveloppe organique présentent une très grande variété morphologique (Jansonius & McGregor, 1996 ; Cugny, 2011) et sont, pour certains, résistants à la décomposition et aux traitements chimiques. Les PNPs comprennent de très nombreuses spores de champignons, mais incluent également des radicules, des microalgues ou des restes de microfaune, qui représentent ainsi les trois règnes eucaryotes. L'étude des PNPs est un champ récent de la palynologie qui a émergé dans les années 1980, sous l'impulsion de B. Van Geel. Van Geel (1978) a été le premier à les catégoriser, à leur donner des codes, et le cas échéant, à les associer à un taxon connu. Cependant, la rareté des études référentielles rend parfois impossible leur identification. Malgré cela, les PNPs sont souvent corrélés à certaines conditions climatiques et écologiques et, par principe d'actualisme, ils permettent de déduire les caractéristiques des écosystèmes passés en identifiant divers paramètres locaux, tels que les oscillations de la nappe d'eau, la présence locale de plantes ou encore l'état trophique de la tourbière (Baudu, 1994). De ce fait, l'étude des PNPs est essentielle pour comprendre et retracer non seulement l'histoire climatique et écologique du lieu d'étude, mais aussi les

pratiques humaines qui y sont associées.

La présente étude porte sur la tourbière des Crozes, qui fait partie du complexe tourbeux de Lajo (Margeride, Lozère, Massif central). Elle s'inscrit dans la continuité des autres études réalisées dans la région (Baty et al., 2023 ; Cuenot et al., 2024) et vise à apporter de nouveaux éléments sur l'histoire climatique, écologique et anthropique de la Margeride depuis 8000 ans. Le complexe tourbeux de Lajo constitue la limite méridionale de l'aire de répartition du bouleau nain (*Betula nana*) et abrite une autre espèce végétale relictive, le saule des lapons (*Salix lapponum*) (Henriet et al., 2025). Bien que le bouleau nain soit commun dans les régions boréales d'Amérique du Nord et d'Eurasie, il ne subsiste que sous forme de populations isolées dans le Massif central (De Groot et al., 1997 ; Thórsson et al., 2010). Son ancienneté en Margeride est attestée par le registre macrofossile (Vasari & Vasari, 1985) depuis au moins la fin du Tardiglaciaire, vers 12000 cal. BP. Cette période marque la transition entre le Pléistocène et l'Holocène.

Par son approche généraliste, cette étude cherche à comprendre l'évolution des conditions écologiques de la tourbière des Crozes en association avec l'histoire humaine, ce qui est inédit pour le complexe tourbeux de Lajo. La reconstitution de cette histoire hydrologique, écologique et anthropique est d'autant plus importante qu'elle concerne la dynamique passée d'espèces rares, présentant des enjeux de conservation majeurs.

## MATERIEL ET METHODES

### 1- Zone d'étude

La tourbière des Crozes (44.85292°N, 03.44372°E), située à environ 1250 m d'altitude, appartient au complexe tourbeux de Lajo (Fig. 1), en Margeride (Lozère, Massif central). Le climat montagnard du massif de la Margeride est rude et comparable à celui de l'Islande ou de la Suède (Besquet, 1953 ; Celle & Hugonnot, 2011).

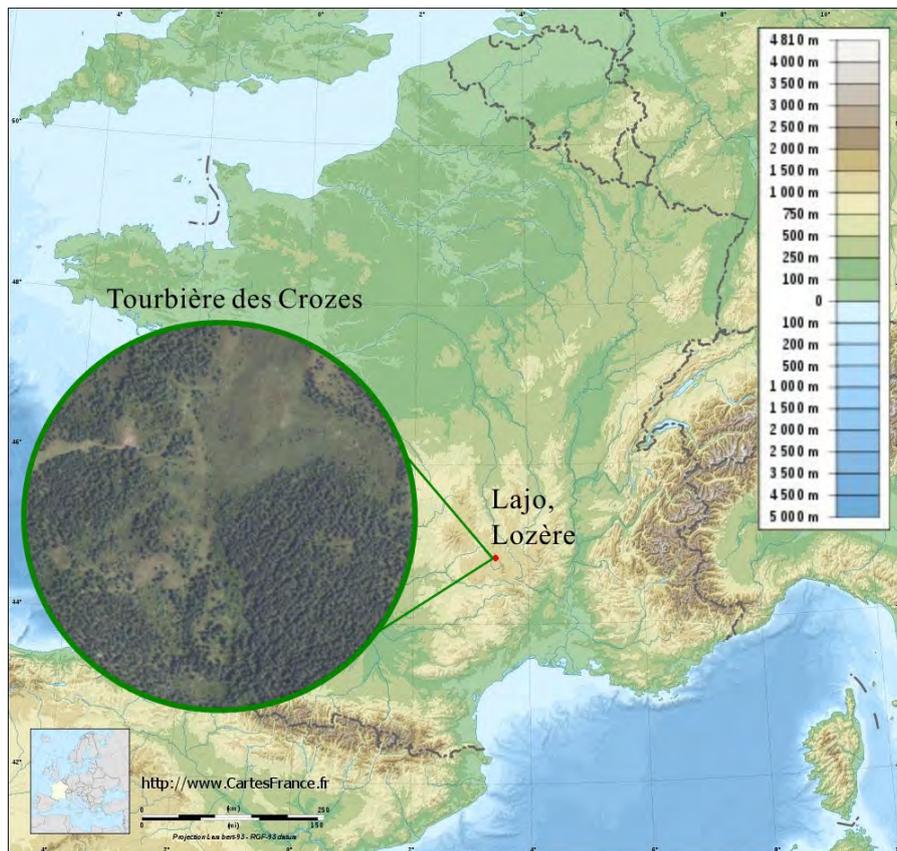


Figure 1. Localisation de Lajo et de la tourbière des Crozes (sources : Carte satellite IGN, France, 2023 ; Carte du relief de la France, cartesfrance.fr, 2024)

On y retrouve une période d'enneigement relativement longue pouvant aller d'octobre à avril, une température annuelle moyenne de 5°C et des étés chauds et orageux (Celle & Hugonnot, 2011). Géologiquement, la Margeride est un massif granitique pétrographiquement homogène (Besqueut, 1953), dont les fissures superficielles favorisent l'apparition de cours d'eau. Cela implique qu'il n'y a pas de formation de réserve d'eau en profondeur (Freeze & Cherry, 1979). La tourbière des Crozes est en partie traversée d'un ruisseau, provenant probablement d'une résurgence d'eau infiltrée dans les diaclases du granite : c'est une tourbière essentiellement minérotrophe.

Le complexe tourbeux de Lajo abrite des tourbières classées Natura 2000 (site Natura 2000 MONTAGNE DE LA MARGERIDE, arrêté du 25 mars 2011) et les principales activités humaines actuelles y sont le tourisme (randonnée) et l'élevage (pâturage bovin). La tourbière des Crozes est dominée par des

jonçaises (*Juncus* spp.) et des zones de fen à ményanthe (*Menyanthes trifoliata*) et comaret (*Comarum palustre*), bordées de buttes à callune (*Calluna vulgaris*) et de buttes à sphaignes (*Sphagnum* spp.). Elle est environnée de landes à callune (*Calluna vulgaris*) et de pinèdes de pin sylvestre (*Pinus sylvestris*). La végétation environnante, majoritairement boisée, comprend le chêne sessile (*Quercus petraea*), l'épicéa commun (*Picea abies*), le hêtre (*Fagus sylvatica*), le mélèze (*Larix decidua*) et le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) (Cuenot et al., 2024).

## 2- Travail de terrain : carottages

En juillet 2024, la séquence CRZ1 (Annexe 1), qui a atteint 167 cm de profondeur, a été prélevée sur la tourbière à l'aide d'un carottier russe de 1 m de long et 5 cm de diamètre (Jowsey, 1966). Pour en assurer la conservation jusqu'au laboratoire, elle a été enveloppée dans un film plastique noir, puis placée dans un tube en PVC. Elle a

ensuite été conservée au réfrigérateur.

l'aide d'histolaque.

### 3- Travail en laboratoire

#### *Réalisation du modèle d'âge*

Suite au travail de terrain, un échantillon de la séquence CRZ1 prélevé à 163-164 cm a été daté au radiocarbone par le *Poznan Radiocarbon Laboratory* en novembre 2024. Cette datation a servi de base pour construire le modèle d'âge (Henriet et al., 2025).

#### *Extraction des PNPs et montage des lames de microscopes*

12 échantillons de 1 cm<sup>3</sup> ont été prélevés tous les 16 cm de la base jusqu'au sommet de la séquence CRZ1. Ces échantillons ont subi des traitements chimiques pour en extraire les PNPs et le pollen (Berglund & Ralska-Jasiewiczowa, 1986). Le volume des échantillons a été mesuré par déplacement d'eau. Les échantillons ont été défloculés avec de l'hydroxyde de potassium (KOH, 10 %), puis tamisés sur des tamis à mailles de 0,5 mm. Les silicates ont été éliminés avec de l'acide fluorhydrique (HF, 70 %), et les fluosilicates avec de l'acide chlorhydrique (HCl, 20 %). Enfin, la cellulose a été éliminée par acétolyse (anhydride acétique ; acide sulfurique à 96%). Les PNPs et le matériel pollinique ont ensuite été transférés dans des eppendorfs, dans de la glycérine. Le matériel traité a été monté sur lame mince, fixée à

#### *Comptage et identification des PNPs*

Les palynomorphes non-polliniques ont été comptés et identifiés sous microscope optique au grossissement x400. Pour réduire les biais de comptage et d'identification, chaque membre du groupe a compté la moitié des lignes de chaque échantillon et a donc travaillé sur l'ensemble des lames. L'étude des lames a été faite sur un même microscope afin de garantir l'uniformité des comptages et limiter les erreurs dues à la variation du nombre de lignes entre les microscopes. Un minimum de 3 lignes a été compté pour chaque échantillon et pour calculer la concentration de chaque échantillon en PNPs ; l'observateur ajoutait éventuellement des lignes jusqu'à ce qu'un minimum de 30 PNPs soit atteint. Une fois ce quota minimal atteint pour les 12 lames, les concentrations, le taux de sédimentation et les influx en PNPs ont été calculés à partir des formules suivantes : (1) La concentration (en particules/cm<sup>3</sup>) représente la quantité de matériel dans 1 cm<sup>3</sup> de sédiment. (2) Le taux de sédimentation (en cm.an<sup>-1</sup>) est calculé à partir du modèle d'âge. (3) L'influx (en individus.an<sup>-1</sup>.cm<sup>-2</sup>) représente la quantité de PNPs accumulés par unité de surface et de temps.

$$(1) \text{ Concentration} = \frac{\text{Nbre de NPPs comptés} \times \text{Nbre de lignes totales} \times \text{Volume du culot}}{\text{Nbre de lignes comptées} \times \text{Volume de la goutte} \times \text{Volume de sédiment par déplacement d'eau}}$$

$$(2) \text{ Taux de sédimentation} = \frac{(\text{profondeur}+1) - \text{profondeur de l'échantillon}}{(\text{age}+1) - \text{age de l'échantillon}}$$

$$(3) \text{ Influx} = \text{taux de sédimentation} \times \text{Concentration}$$

#### *Identification des PNPs*

L'identification des PNPs a été faite en parallèle de leur comptage, sur la base des atlas photographiques de Jouffroy-Bapicot (2010), Cugny (2011) et Van Geel (1978), ainsi que de la base de données illustrée en

ligne de Shumilovskikh et al. (2022). Afin de répondre à l'objectif de cette étude et d'affiner son interprétation, certains PNPs ont ensuite été regroupés par préférence écologique (Table 1).

Table 1. Taxons ou espèces regroupés par préférences écologiques

Préférences écologiques	PNPs	Références
Milieu sec	HdV-3A	Van Geel (1978)
	HdV-3B ( <i>Pleospora</i> )	Van Geel (1978)
	HdV-10 ( <i>Trichocladium opacum</i> )	Cugny (2011)
	HdV-14 ( <i>Meliola ellisii</i> )	Cugny (2011)
	HdV-83	Cugny (2011)
Milieu humide	HdV-16	Jouffroy-Bapicot (2010)
	HdV-18	Jouffroy-Bapicot (2010)
	HdV-77A ( <i>Geoglossum sphagnophilum</i> )	Van Geel (1978)
	HdV-121	Cugny (2011)
	HdV-126 ( <i>Clasterosporium caricinum</i> )	Van Geel (1978)
	HdV-130 ( <i>Spirogyra</i> )	Cugny (2011)
	HdV-28	Jouffroy-Bapicot (2010)
	HdV-179	Jouffroy-Bapicot (2010)
	Copépode entier indifférencié	Jouffroy-Bapicot (2010)
	Sac à œufs de <i>Diaptomus</i>	Jouffroy-Bapicot (2010)
	<i>Gyratrix</i>	Haas (1996)
	NN-39 ( <i>Microdalyellia armigera</i> )	Haas (1996)
NN-109 ( <i>Strongylostoma radiatum</i> )	Haas (1996)	
Milieu ouvert	TM-4010	Cugny (2011)
Milieu fermé	HdV-44 ( <i>Ustulina deusta</i> )	Shumilovskikh et al. (2015)
	HdV-360 ( <i>Brachysporium pendulisporum</i> )	Shumilovskikh et al. (2015)
	HdV-1053 ( <i>Dictyosporium heptasporum</i> )	Shumilovskikh et al. (2015)
	TM-M1 ( <i>Triposporium elegans</i> )	Cugny (2011)
Coprophiles	HdV-55 ( <i>Sordaria</i> )	Jouffroy-Bapicot (2010)
	HdV-112 ( <i>Cercophora</i> )	Jouffroy-Bapicot (2010)
	HdV-172 ( <i>Coniochaeta ligniaria</i> )	Cugny (2011)
	TM-252	Cugny (2011)
	TM-355 ( <i>Cercophora</i> )	Cugny (2011)
TM-518	Cugny (2011)	
Milieu eutrophisé (hors coprophiles)	HdV-140 ( <i>Valsaria</i> )	Jouffroy-Bapicot (2010)

#### 4- Traitement des données

Les données acquises ont été répertoriées dans un tableur, puis exportées vers la console de programmation *Rstudio* (version 4.2.2). En utilisant les packages “rioja” et “vegan”, les données ont été transformées en diagrammes palynologiques grâce à la commande “strat.plot”. Une zonation a pu être réalisée sur le jeu de données avec la commande “chclust” en utilisant la méthode CONISS.

## RESULTATS

### 1- Modèle d'âge

L'échantillon situé à 163-164 cm de profondeur dans la séquence CRZ1 a été daté au radiocarbone à  $6890 \pm 40$  BP (7830-7620 cal. BP) : la base de la carotte aurait environ 8000 ans. Les données palynologiques préliminaires obtenues par Bailleux et al. (2025) ont révélé l'existence

d'un hiatus sédimentaire entre les profondeurs de 26 et 16 cm (Henriet et al., 2025).

## 2- Description générale

Le très bon état de conservation des palynomorphes non-polliniques a permis de les identifier facilement au microscope optique. Au total, 42 types ont été identifiés, comprenant 30 types fongiques, 1 algue, 9

restes d'animaux et 2 restes végétaux.

L'influx total de PNPs n'est pas constant tout au long de la carotte. Il est relativement faible entre 167 et 48 cm de profondeur ( $< 500$  individus.an<sup>-1</sup>.cm<sup>-2</sup>), avec un pic à 112 cm (env. 750 individus.an<sup>-1</sup>.cm<sup>-2</sup>). Entre 40 et 16 cm, l'influx augmente fortement pour atteindre env. 3000 individus.an<sup>-1</sup>.cm<sup>-2</sup> en surface (Fig. 2).

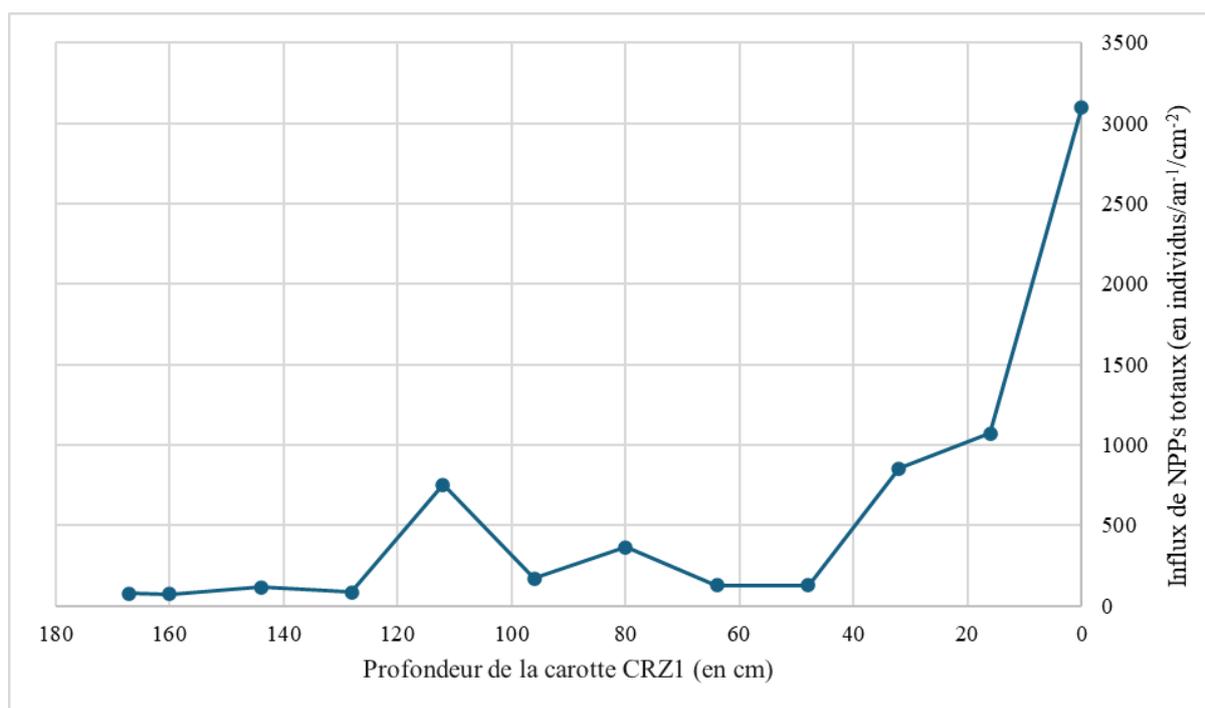


Figure 2. Influx des PNPs totaux sur la carotte CRZ1 en fonction de sa profondeur

## 3- Description des zones

Le diagramme en influx des PNPs (Fig. 3) est divisé en 3 zones significativement différentes (Annexe 2), révélant des changements majeurs dans la distribution des PNPs au sein de la séquence étudiée. Les zones ont été numérotées de la plus profonde (zone 1) à la surface (zone 3).

*Zone 1 (167-40 cm ; 8010-2600 cal. BP)*

La zone 1 s'étend sur environ 5400 ans, entre 167 et 40 cm de profondeur. Elle est marquée par l'abondance de spores de champignons

(HdV-18, *Sordaria*, HdV-55 ; *Cercophora*, HdV-112), mais comprend également quelques restes végétaux (perforations scalariformes, HdV-114) et des restes d'animaux (HdV-28). Cette zone peut être divisée en 2 sous-zones qui diffèrent par leur composition en PNPs (Fig. 3) :

La zone 1A (167-120 cm) est caractérisée par la présence de spores de champignons tels que HdV-18 et des phragmoascospores. *Sordaria* (HdV-55), *Meliola ellisii* (HdV-14) et HdV-16 sont présents en faibles quantités. Les restes animaux (HdV-28) sont faiblement représentés et les restes végétaux se

manifestent par la présence de perforations scalariformes (HdV-114).

La zone 1B (120-40 cm) se différencie de la zone 1A par une augmentation significative en diversité et en abondance des PNPs. On note l'apparition de nouveaux restes fongiques : *Ustulina deusta* (HdV-44), HdV-83, *Cercophora* (HdV-112), HdV-121, *Valsaria* (HdV-140) et TM-108. La majorité de spores de champignons présents dans cette sous-zone appartiennent à HdV-16, HdV-18, HdV-55 et HdV-112. Les restes animaux (HdV-28, restes d'insectes et de mandibules d'arthropodes) sont également mieux représentés. Enfin, les perforations scalariformes (HdV-114) sont toujours présentes.

#### *Zone 2 (40-8 cm ; 2600-10 cal. BP)*

La zone 2 présente en grande majorité HdV-18, HdV-83 et des phragmoascospores (env. 100 individus.an<sup>-1</sup>.cm<sup>-2</sup>), dont l'influx augmente en comparaison de la zone 1. Plusieurs restes fongiques disparaissent (HdV-14, HdV-16, HdV-44, HdV-112, HdV-121 et TM-108) ou sont moins abondants (*Sordaria*, HdV-55). Par contre, TM-252 apparaît. Ce sont cependant les restes animaux qui caractérisent cette zone avec un plus fort influx de HdV-28 (jusqu'à 335 individus.an<sup>-1</sup>.cm<sup>-2</sup>) et de mandibules d'arthropodes. On remarque aussi l'apparition de *Gyratrix* (Rhabdoceole). Les perforations scalariformes (HdV-114) sont présentes dans toute la zone.

#### *Zone 3 (8-0 cm ; 10 cal. BP à aujourd'hui)*

Cette dernière zone est composée de la couche de tourbe de surface. Elle présente un influx plus important de spores de champignon comparé aux autres zones. On y trouve des quantités notables de phragmoascospores, *Sordaria* (HdV-55) et *Cercophora* (HdV-112), dont les influx excèdent 400 individus.an<sup>-1</sup>.cm<sup>-2</sup>. On note

aussi une grande quantité de PNPs indifférenciés. Plusieurs restes fongiques apparaissent : HdV-3A, *Trichocladium opacum* (HdV-10), *Dictyosporium heptasporum* (HdV-1053) et *Triposporium elegans* (TM-M1). Les perforations scalariformes ne sont plus enregistrées alors que les restes animaux sont représentés par des restes de copépodes et des mandibules d'arthropodes.

## DISCUSSION

La fluctuation de l'influx des PNPs observée tout au long de la carotte (Fig. 2) indique des variations marquées dans la dynamique des palynomorphes au sein de ces horizons. La zonation des échantillons (Figs. 3 et 4) a rendu possible l'identification de transitions dans la composition des PNPs, permettant de comprendre ces dynamiques et de les associer à des événements écologiques ou anthropiques passés.

### 1- L'histoire du couvert arboré de la tourbière des Crozes et de ses alentours

La base de la séquence (8010 à 5080 cal. BP, zone 1A) marque en France la transition entre la fin du Mésolithique et le Néolithique Ancien (Vazeilles, 1982). Avant cette période, entre 8860 et 7500 cal. BP, Godichon et al. (2025) décrivent une région caractérisée par un milieu ouvert, dominé par un stade pionnier forestier ou des landes arbustives. Cette phase correspond au début de la turfifigénèse du milieu, qui aurait eu lieu aux alentours de 7500 cal. BP. Cette hypothèse est corroborée par le registre pollinique, qui met en évidence une végétation composée principalement de *Salix*, *Betula* et *Corylus* à la base de la carotte (Bailleux et al., 2025).

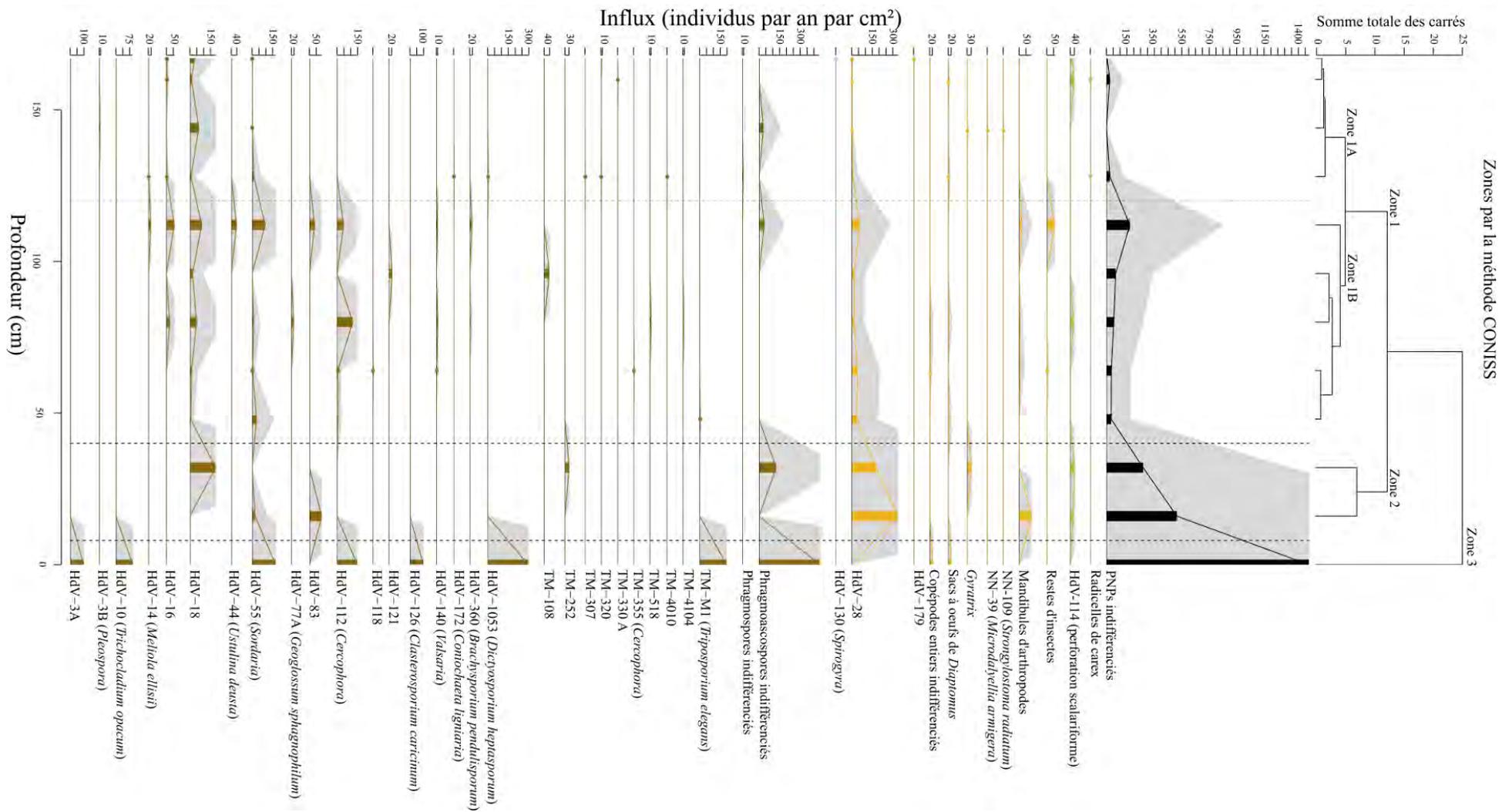


Figure 3. Diagramme en influx des PNPs de la tourbière des Crozes. Les limites des zones sont modélisées par des traits en pointillés noirs. Les limites des sous-zones sont modélisées par des pointillés gris. L'exagération (facteur 5) est représentée par les zones grises. Les valeurs inférieures à 5 individus.an<sup>-1</sup>.cm<sup>-2</sup> ont été représentées par des points. Les taxons fongiques sont représentés en marrons, les algues en bleu clair, les restes animaux en jaunes et les restes végétaux en vert.

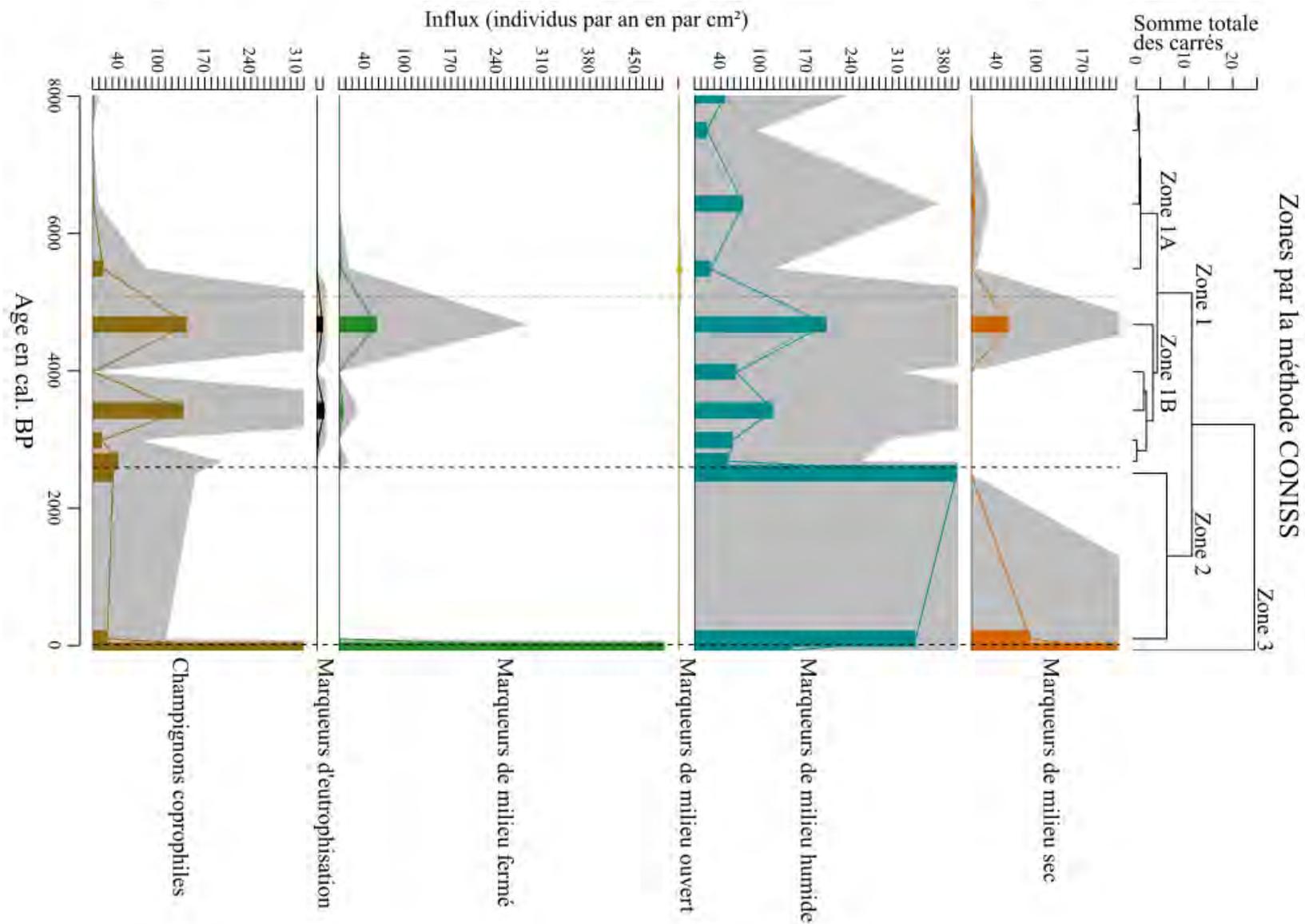


Figure 4. Diagramme en influx des marqueurs de milieux de la tourbière des Crozes. Les limites des zones sont modélisées par des traits en pointillés noirs. Les limites des sous-zones sont modélisées par des pointillés gris. L'exagération (facteur 5) est représentée en gris. Les valeurs inférieures à 5 individus.an<sup>-1</sup>.cm<sup>2</sup> ont été représentées par des points.

Autour de 5500 cal. BP, les perforations scalariformes (HdV-114 ; Fig. 3) révèlent la présence locale d'*Alnus* et/ou *Betula* (Prager et al., 2012), une observation confirmée par des traces de *Betula* dans le registre pollinique (Bailleux et al., 2025). Ces arbres, adaptés aux sols humides, pourraient former des boisements sur tourbe. Par ailleurs, Bailleux et al. (2025) décrivent l'installation d'une chênaie tempérée à l'échelle régionale dès 6000 cal. BP, comme l'indiquent également les données macrofossiles (Godichon et al., 2025). Cette fermeture du milieu succède à un premier épisode détritique, témoignant d'une dynamique écologique et sédimentaire qui contribue à la fermeture progressive à l'échelle régionale. À l'échelle locale, la persistance de Poaceae atteste néanmoins que la tourbière des Crozes était ouverte (Bailleux et al., 2025).

Du Néolithique ancien à l'Age du Fer (5080 à 2600 cal. BP, zone 1B ; Vazeilles, 1982), l'augmentation des influx de PNPs révèle une transition écologique (Fig. 2). On retrouve durant toute cette période une importante accumulation de spores de champignons coprophiles facultatifs (*Sordaria* et *Cercophora*), ainsi qu'une apparition de marqueurs d'eutrophisation strictement non-coprophiles (*Valsaria*) (Fig. 4). Ces organismes sont généralement présents dans du bois mort et/ou de la matière organique, ce qui peut être lié à l'augmentation des marqueurs de milieux fermés comme HdV-44, associé au hêtre (Shumilovskikh et al., 2015). Ceci est corroboré par Bailleux et al. (2025), qui observent une régression de *Corylus*, *Quercus* et *Salix* au profit de *Fagus* entre 5000 et 2510 cal. BP. Ils décrivent ainsi, à l'échelle régionale, l'expansion de la hêtraie, dans laquelle la proportion de *Fagus* excède parfois 60%. D'autre part, à l'échelle locale, la présence du champignon mycorhizien *Cenococcum geophilum* entre 3400 et 2900 cal. BP dans le registre macrofossile confirme la présence locale d'espèces ligneuses (Godichon et al., 2025).

Près de 2000 ans après ce contexte écologique (après le hiatus), on constate l'augmentation des marqueurs de milieu sec (Fig. 4), avec

une grande quantité de HdV-83, un PNP associé à *Calluna* (Cugny, 2011). De plus, la zone définissant la période la plus récente (1940 AD à aujourd'hui) se caractérise par l'abondance de marqueurs de milieu fermé (Table 1 ; Fig. 4) : les saproxylophages tels que HdV-1053 (Shumilovskikh et al., 2015) et TM-M1, marqueur du hêtre (Cugny, 2011), indiquent une potentielle fermeture du milieu. Ceci révèle une tourbière ouverte dont les alentours se refermeraient progressivement. Ainsi, l'analyse des PNPs en regard des résultats obtenus par Bailleux et al. (2025) suggère qu'au cours des dernières décennies, la tourbière des Crozes était localement ouverte, abritant *Calluna vulgaris* et des Poaceae, et entourée de milieux boisés dominés par *Pinus*. Cela correspond bien à ce que l'on retrouve actuellement sur la tourbière des Crozes. En complément, Godichon et al. (2025) soulignent une augmentation de la proportion de restes ligneux dans les derniers 16 cm de la séquence de tourbe, témoignant de la présence actuelle de *Betula nana*, *Calluna vulgaris* et *Vaccinium* spp. Enfin, on peut noter que sur l'ensemble de la séquence, le pollen arboréen domine le pollen non-arboréen, à 89% contre 11% respectivement (Bailleux et al., 2025).

## 2- L'hydrologie locale

Entre 8010 et 5080 cal. BP, la tourbière des Crozes était un milieu globalement humide, comme en témoignent les PNPs HdV-18, HdV-28 et HdV-114, présents tout au long de cette période (Fig. 3). HdV-28 correspond aux spermatophores de copépodes. Ces arthropodes sont des organismes vivant en eau libre (Jouffroy-Bapicot, 2010). Par ailleurs, les sédiments minéraux observés à la base de la séquence étudiée révèlent un milieu avant la turfigenèse, avec de l'eau libre et circulante (Godichon et al., 2025). La présence d'eau libre (probablement un ruisseau) confirmerait que la tourbière des Crozes était déjà minérotrophe à cette époque. La présence contemporaine de *Betula* pourrait confirmer l'existence d'un milieu humide (Bailleux et al., 2025). Cependant, la présence de PNPs associés à des conditions de

sécheresse (HdV-3B, HdV-14, HdV-83 ; Fig. 4) autour de 6500 cal. BP suggère des conditions variables, soit dans l'espace (mosaïque de milieux), soit dans le temps (saisonnalité). Aux alentours de 4700 cal. BP, les PNPs marqueurs d'humidité (HdV-16, HdV-18, HdV-28 ; Fig. 4) augmentent, en même temps que sont enregistrés dans le registre pollinique certains taxons de zone humide comme *Bistorta* et les Cyperaceae (Bailleux et al., 2025). Ces marqueurs d'humidité sont abondants jusqu'à la partie finale de l'Âge du Fer (2510 cal. BP ; Fig. 4). Ainsi, la tourbière des Crozes semble se définir par son humidité marquée durant cette longue période, liée à son alimentation par de l'eau libre.

Ceci change après le hiatus (2600 cal. BP à aujourd'hui) avec la diminution des marqueurs de milieu humide corrélée à une augmentation des marqueurs de milieu sec (Fig. 4). Cela traduit un assèchement local de la tourbière confirmé par la disparition des perforations scalariformes. Parallèlement, les marqueurs de milieux secs (Table 1), tels que HdV-3A et HdV-10 qui traduisent l'abondance de *Calluna vulgaris* (Cugny, 2011), indiquent l'évolution du milieu local vers une lande ouverte. La tourbière des Crozes demeure toujours traversée par le ruisseau : malgré son assèchement, elle reste tout de même une zone humide.

### 3- Les activités anthropiques sur et autour de la tourbière des Crozes

Le Néolithique se met en place dans le sud de la France vers 7700 cal. BP (Thévenot et al., 2015). Cependant, il met jusqu'à 1500 ans pour arriver dans le Massif central (Miras, 2004 ; Vazeilles, 1982). Dans la séquence CRZ1, des champignons coprophiles tels que *Sordaria* (HdV-55) apparaissent vers 5500 cal. BP (Fig. 4), ce qui pourrait refléter une augmentation locale de l'activité animale, possiblement en lien avec une présence ancienne du pâturage, connu dans le Massif central entre 5500 à 4250 cal. BP (Dendievel et al., 2019).

L'abondance des champignons coprophiles

facultatifs (*Cercophora*, *Sordaria*) augmente drastiquement après 5000 cal. BP et reste élevée jusqu'à 2600 cal. BP. L'enregistrement contemporain de taxons polliniques indicateurs d'anthropisation (*Plantago*, *Secale*, *Triticum* ; Bailleux et al., 2025) confirme localement une intensification des activités humaines néolithiques liées au pâturage (Miras, 2004 ; Dendievel et al., 2019). Les champignons coprophiles sont beaucoup moins nombreux dans la suite de la séquence, juste avant le hiatus (Fig. 4), ce qui suggère une baisse d'activité pastorale locale (Jouffroy-Bapicot, 2010) ou une diminution de la matière organique présente sur la tourbière. C'est d'ailleurs ce qui est supposé par Godichon et al. (2025), qui avancent que le hiatus résulterait d'un assèchement local. Ce phénomène pourrait provenir de pratiques de drainage au cours du 19<sup>e</sup> siècle, documentées dans le Cantal à des fins agricoles ou pour l'exploitation de la tourbe (Miras & Guenet, 2013). Cela aurait permis aux décomposeurs de proliférer.

Les spores du coprophile facultatif *Sordaria* (Table 1) retrouvées après le hiatus (vers 1940) pourraient indiquer du pâturage local. L'analyse sédimentaire a révélé un épisode détritique sur cette période, pouvant être relié à l'exploitation forestière dans les années 2000 (Godichon et al., 2025). Par ailleurs, la présence de *Pinus*, introduit par les populations humaines dans le Massif central au cours du siècle dernier à des fins de reboisement (Reille, 1989 ; Bailleux et al., 2025), révèle également une influence anthropique à cette période. Localement, l'implantation de *Pinus sylvestris* est datée d'environ 100 ans (Durand et al., 2025). Cela coïncide avec l'augmentation fulgurante des marqueurs de milieu fermé à cette même époque (Fig. 4). Cependant, l'analyse dendrochronologique révèle une faible abondance pour certaines classes d'âge. C'est notamment le cas de celle âgée de 20 ans, que Durand et al. (2025) relie à une éclaircie sélective et du gyrobroyage (Lepart, 2005), détruisant toute une génération de semis. Ainsi, la tourbière des Crozes demeure encore aujourd'hui influencée par l'activité humaine.

## CONCLUSION

Les résultats obtenus confirment l'importance de la tourbière des Crozes comme archive paléoécologique locale et révèlent l'influence humaine dans l'évolution de ce milieu à partir de l'Holocène moyen. Les changements observés montrent une histoire marquée par des dynamiques de végétation aux échelles locale et régionale, des variations d'humidité locale et l'intensification des activités humaines entrecoupée d'une déprise. Initialement caractérisée par un milieu ouvert et humide, la tourbière a progressivement évolué vers un système plus fermé à partir de 6000 cal. BP. On constate aussi un assèchement de la tourbière dès 2600 cal. BP. De plus, on peut noter une intensification des activités humaines, notamment pastorales dès 5500 cal. BP, puis de drainage et de reboisement au 19<sup>e</sup> siècle.

L'étude des palynomorphes non-polliniques est essentielle pour comprendre les changements passés et mieux prédire ceux à venir. La tourbière des Crozes, en plus d'être un refuge pour des espèces relictées comme le saule des Lapons et le bouleau nain, est un témoin précieux de ces transformations.

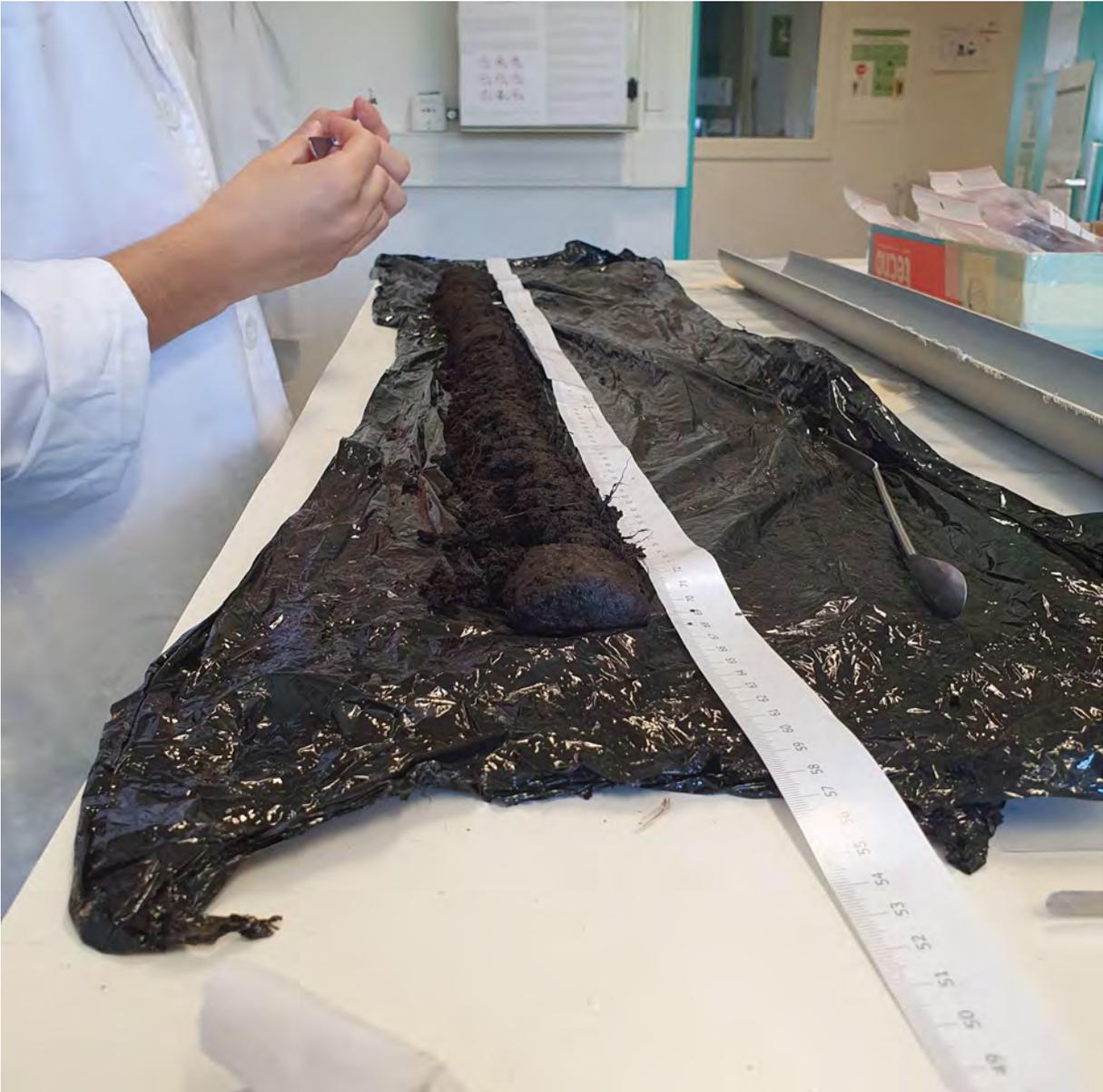
## REFERENCES

- Bailleux C., Laval T. & Rabbia-Ré A. (2025). Histoire de la tourbière des Crozes (Margeride, France) et de ses alentours : étude pollinique. *Orpalm Synthesis*, 18 (1) : 63-76.
- Baty M., Boudet R. & Deppe C. (2023). Reconstruction paléoenvironnementale de la tourbière de Bourge (Paulhac-en-Margeride, Lozère) : fonctionnement et dynamiques internes sur 7500 ans, via les palynomorphes non polliniques. *Orpalm Synthesis*, 16 : 47-61.
- Baudu V. (1994). *Les palynomorphes, marqueurs de paléoenvironnement et indicateurs de variations eustatiques dans le Dévonien inférieur armoricain (France)*. Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1, 197 p.
- Berglund B.E. & Ralska-Jasiewiczowa M. (1986). Pollen Analysis and Pollen Diagrams. In : B.E. Berglund & M. Ralska-Jasiewiczowa (éds.), *Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology*. John Wiley and Sons Press, Chichester, pp. 86-87.
- Besqueut L. (1953). La Margeride. *Bulletin de la Société Botanique de France*, 100 : 21-26.
- Celle J. & Hugonnot V. (2011). Compte rendu de la Minisession bryologique SBCO en Margeride, 3, 4 et 5 juillet 2009. *Bulletin de la Société Botanique du Centre-Ouest (nouvelle série)*, 42 : 617-624.
- Cubizolle H. (2019). *Les tourbières et la tourbe : géographie, hydro-écologie, usages et gestion conservatoire*. Lavoisier-Tec & Doc, Paris, 419 p.
- Cuenot E., Petitjean L. & Tommasini J. (2024). Reconstitution paléoenvironnementale des tourbières de Lajo (Margeride, Lozère), sur la base de l'étude des palynomorphes non polliniques. *Orpalm Synthesis*, 17 : 43-55.
- Cugny C. (2011). *Apports des microfossiles non-polliniques à l'histoire du pastoralisme sur le versant nord Pyrénéen : entre référentiels actuels et reconstitution du passé*. Thèse de Doctorat. Université Toulouse le Mirail - Toulouse II, 280 p.
- De Groot W.J., Thomas P.A. & Wein R.W. (1997). *Betula Nana* L. and *Betula Glandulosa* Michx. *Journal of Ecology, British Ecological Society*, 85 : 241-264.
- Dendievel A.-M., Dietre B., Cubizolle H., Hajdas I., Kofler W., Oberlin C. & Haas J.N. (2019). Holocene paleoecological changes and agro-pastoral impact on the La Narce du Béage mire (Massif Central, France). *The Holocene*, 29 : 992-1010.
- Durand M., Panaiotis Y. & Viala A. (2024). Installation et expansion du pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) sur et autour de la tourbière des Crozes (Lajo, Lozère) pendant la période contemporaine. *Orpalm Synthesis*, 18 (1) : 33-46.
- Freeze A.R. & Cherry A.J. (1979). *Ground water*. Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, 624 p.
- Godichon L., Philoclès M. & Pothier L. (2025). Contribution à la reconstruction de l'histoire de la tourbière des Crozes (Lajo,

- Lozère) à l'aide de l'étude de la turfigenèse et des changements du milieu au cours du temps. *Orpalm Synthesis*, 18 (1) : 47-62.
- Haas J.N. (1996). Neorhabdocoela oocytes — palaeoecological indicators found in pollen preparations from Holocene freshwater lake sediments. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 91 : 371-382.
- Henriet C., Ejarque A., Luelmo R., Muller S.D. & Terral J.-F. (2025). Le complexe tourbeux de Lajo, Margeride (Lozère) : les tourbières des Crozes et de Bos Grond. *Orpalm Synthesis*, 18 : 9-31.
- Jansonius J. & McGregor D.C. (1996). *Palynology: Principles and Applications. Volume 1*. AASP Foundation, [s.l.], 1330 p.
- Joosten H. & Couwenberg J. (2008). What are peatlands ?. In : F. Parish, A. Sirin, D. Charman, H. Joosten, T. Minayeva, M. Silvius & L. Stringer. (éds.), *Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change Main Report*. Global Environment Centre & Wetlands International, Kuala Lumpur & Wageningen, pp. 99-117.
- Jouffroy-Bapicot I. (2010). *Évolution de la végétation du massif du Morvan (Bourgogne - France) depuis la dernière glaciation à partir de l'analyse pollinique. Variations climatiques et impact des activités anthropiques*. Thèse de Doctorat, Université de Franche-Comté, 436 p.
- Jowsey P.C. (1966). An Improved Peat Sampler. *New Phytologist*, 65 : 245-248.
- Lepart J. (2005). Rapport d'activité 2004. Conservatoire des Espaces Naturels Languedoc-Roussillon, Montpellier, 24 p. [document non publié].
- Miras Y. (2004). *L'analyse pollinique du plateau de Millevaches (Massif central, France) et de sites périphériques limousins et auvergnats : approche des paléoenvironnements, des systèmes agropastoraux et évolution des territoires ruraux*. Thèse de Doctorat, Université de Franche-Comté, 317 p.
- Miras Y. & Guenet P. (2013). Une histoire plurimillénaire des paysages du Cézallier et ses liens avec les activités agrosylvopastorales depuis le Néolithique à partir de l'analyse pollinique de la tourbière de La Borie (1170 m, Saint-Saturnin, Cantal). In : F. Trément (éd.), *Les Arvernes et leurs voisins du Massif Central à l'époque romaine. Une archéologie du développement des territoires*, tome 1. Revue d'Auvergne, Alliance Univ. d'Auvergne, Clermont-Ferrand, pp. 481-497.
- Prager A., Theuerkauf M., Couwenberg J., Barthelmes A., Aptroot A. & Joosten H. (2012). Pollen and non-pollen palynomorphs as tools for identifying alder carr deposits: A surface sample study from NE-Germany. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 186 : 38-57.
- Reille M. (1989). L'origine du pin à crochets dans le Massif central français. *Bulletin de la Société Botanique de France, Lettres Botaniques*, 136 : 61-70.
- Shumilovskikh L.S., Schlütz F., Achterberg I., Bauerochse A. & Leuschner H.H. (2015). Non-Pollen Palynomorphs from Mid-Holocene Peat of the Raised Bog Borsteler Moor (Lower Saxony, Germany). *Studia Quaternaria*, 32 : 5-18.
- Shumilovskikh L.S., Shumilovskikh E.S., Schlütz F., Van Geel B. (2022). NPP-ID: Non-Pollen Palynomorph Image Database as a research and educational platform. *Vegetation History and Archaeobotany*, 31 : 323-328.
- Thévenot J.-P., Martineau R., Moreau C., Bontemps C., Ducreux F., Lemerrier O., Prestreau M., Duriaud J. & Nicolardot J.-P. (2015). Le Néolithique du bassin versant de la Saône (Saône-et-Loire, Côte-d'Or). *Revue archéologique de l'Est*, 39 : 193-194.
- Thórsson Æ.T., Pálsson S., Lascoux M. & Anamthawat-Jónsson K. (2010). Introgression and phylogeography of *Betula nana* (diploid), *B. pubescens* (tetraploid) and their triploid hybrids in Iceland inferred from cpDNA haplotype variation. *Journal of Biogeography*, 37 : 2098-2110.
- Van Geel B. (1978). A palaeoecological study of Holocene peat bog sections 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 : J.P. Smol, H.J.B. Birks, W.M. Last, R.S. Bradley & K. Alverson (éds.), *Developments in Paleoenvironmental Research, Tracking Environmental Change Using Lake Sediments, Volume 3*, Ontario, pp. 99-119.
- Vasari A. & Vasari Y. (1985). Relic occurrence of *Betula nana* L. in Massif Central, France. *Ecologia mediterranea*, 11 (1) : 65-68.
- Vazeilles M. (1982). *Le Pays d'Ussel (Préhistoire et histoire ancienne). Manuel pratique d'archéologie régionale*. Les Monédières, Brive, 234 p.

ANNEXE 1. Carotte de la séquence CRZ1 (tourbière des Crozes), sur laquelle ont été réalisées les analyses.



ANNEXE 2. Résultat de l'analyse des distances statistiques entre les échantillons par la méthode CONISS. On observe que les courbes noir et rouge se croisent proche du point  $x=3$ .

