
EVOLUTION DE LA ZONE HUMIDE DU MARAIS MARQUIS

- Comblement naturel plurimillénaire et impacts anthropiques -

Elie DHIVERT, Ingénieur de recherche,
Laboratoire Anthro-Crisis

Novembre 2019



Points forts :

- Enregistrement d'un passé lacustre entre ≈ 12.1 ka BC à ≈ 6.2 ka BC
- Comblement de la cuvette lacustre entre ≈ 7.5 ka BC et ≈ 6.2 ka BC
- Mise en place d'une tourbière minérotrophe (environnement de bas marais)
- Modification de l'exutoire et du drainage de la zone humide depuis le V-VI^{ème} s.
- Dégradation de la tourbe en surface et jusqu'à ≈ 150 cm de profondeur

Mots clés :

Paléolac, Bas-Marais, Dynamique de comblement, Archives sédimentaires, Paléoenvironnement, Datation ^{14}C

Anthropo-crisis

**Ju
ra**
LE DÉPARTEMENT

Résumé :

Dans le cadre du projet de restauration du Marais Marquis, des questionnements ont émergé quant à l'évolution de cet environnement aquatique au cours du temps. Cette étude a ainsi pour objectif de **reconstituer la dynamique de comblement de la zone humide**.

Pour ce faire, 6 archives sédimentaires ont été analysées. La **succession des paléoenvironnements** a été définie à partir de : (i) la description des faciès sédimentaires, (ii) la caractérisation des fossiles de mollusques et végétaux présents dans les différentes séquences, (iii) la datation au ^{14}C de niveaux sédimentaires.

Ces analyses mettent en évidence la présence de craie lacustre sur une hauteur de 165 à 406 cm reposant sur le substratum rocheux. Cette séquence témoigne d'un **long passé lacustre**, mis en place au Tardiglaciaire (datation de l'interface avec le substratum rocheux à 12.1 ± 0.2 ka BC). Un sondage en amont de la moraine a permis de mettre en évidence une accumulation de sédiments argileux sur une hauteur de plus de 600 cm, très probablement mis en place à cette époque. L'analyse des coquilles archivées dans la craie (en majorité des individus des genres *Pissidium* et *Valvata*) atteste d'une **augmentation progressive du degré trophique du lac** au cours de sa période de fonctionnement.

Au-dessus de ces carbonates repose une séquence de tourbe, composée en grande partie de restes d'herbacés (en majorité des feuilles et rhizome de *Carex* et *Phragmites*). La transition entre la sédimentation à dominante carbonatée et la **tourbière minérotrophe** est plus ancienne à l'amont du réservoir qu'en aval, s'étalant entre 7.5 ± 0.0 ka BC et 6.2 ± 0.1 ka BC. Le comblement de la cuvette lacustre a été la conséquence de l'avancement de la zone littorale au cours du Boréal et du début de l'Atlantique. **La transformation du paléolac en bas marais a eu lieu de manière naturelle et progressive**, laissant très probablement persister des lacs résiduels au niveau des parties qui sont actuellement les plus humides.

La partie supérieure de l'enregistrement tourbeux (dernier 50 à 150 cm environ) fait apparaître une séquence avec **un gradient de dégradation de la matière organique vers la surface**. La minéralisation de la matière organique est importante en surface. Ces observations mettent en évidence **une altération du processus d'accumulation/conservation de la matière organique**, qui est à relier à l'important battement de la nappe. Un sondage au niveau de l'exutoire naturel du système (talweg historique de la moraine), met en évidence **une première phase d'anthropisation au cours des V et VI^{ème} s. de notre ère** ayant modifié les écoulements. Il s'agit vraisemblablement de l'aménagement d'une brèche dans la moraine pour faciliter le drainage de la zone humide. Plus tardivement, une digue a été construite en amont pour transformer la zone en étang, pour autant on ne relève pas de traces sédimentaires de cette occupation de la zone.

TABLE DES MATIERES

1. Contexte et objectifs	4
2. Analyse du remplissage sédimentaire	6
3. Caractérisation des paléoenvironnements aquatiques	9
4. Dynamique d'évolution de la zone humide	13
5. Conclusion	17
6. Références	19
7. Annexes	20

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

Le conseil départemental du Jura a acquis les terrains du **Marais Marquis** entre Bourg-de-Sirod et Sapois, dans le but de **restaurer cette zone humide**.

Les études menées par le Bureau d'Etudes Teleos, à l'aide de relevés Lidar, ont permis de délimiter les contours d'une **dépression qui se rattache selon toute attente vraisemblance à un ancien système lacustre (paléolac)**. Une moraine a été identifiée dans la partie aval du site attestant de **son origine glaciaire**. La carte géologique de la région confirme cela avec la présence :

- de **sédiments fluvio-glaciaires datant de la dernière glaciation** (Würm) au fond de la vallée,
- ainsi que de **sédiments plus récents datant de l'Holocène** au centre de la formation, dans la zone repérée par le bureau d'étude Teleos (Fig. 1).

Des recherches menées dans les archives départementales par Théo-Paul Hans (chargé de missions Haute Vallée de l'Ain), ont permis de mettre à jour différentes dates clés permettant de retracer l'histoire récente du site. Les archives les plus anciennes datent de la fin du XVIème s (1580) et font état d'un marais. Plus tard, **un petit et un grand étang** sont référencés dans les documents de 1789 et 1869. Cette occupation semble avoir été abandonnée entre cette période et 1905, date à laquelle il est fait mention d'une zone de marais. Plus tard dans la seconde moitié du XXème s. le terrain a été massivement drainé et **converti en plantation d'épicéas**.

L'objectif principal des travaux de restauration de la zone humide entrepris par le conseil général est **de retrouver le fonctionnement naturel de l'environnement aquatique**. Ces observations font émerger différentes interrogations quant à l'évolution du système :

- Quelle a été **la trajectoire d'évolution naturelle de l'environnement ?**
- Quelle a été **la chronologie des différentes étapes du comblement ?**
- Trouve-t-on **des traces sédimentaires des aménagements anthropiques** et de quand datent-elles ?
- Dans quelle mesure ces aménagements ont-ils **altéré le fonctionnement naturel de la zone humide ?**

Afin de répondre à cela, nous avons **analysé l'enregistrement sédimentaire** du site :

1 – Description des faciès sédimentaires dans le remplissage du réservoir

2 - Reconstitution des paléoenvironnements aquatiques

3 – Datation des séquences sédimentaires

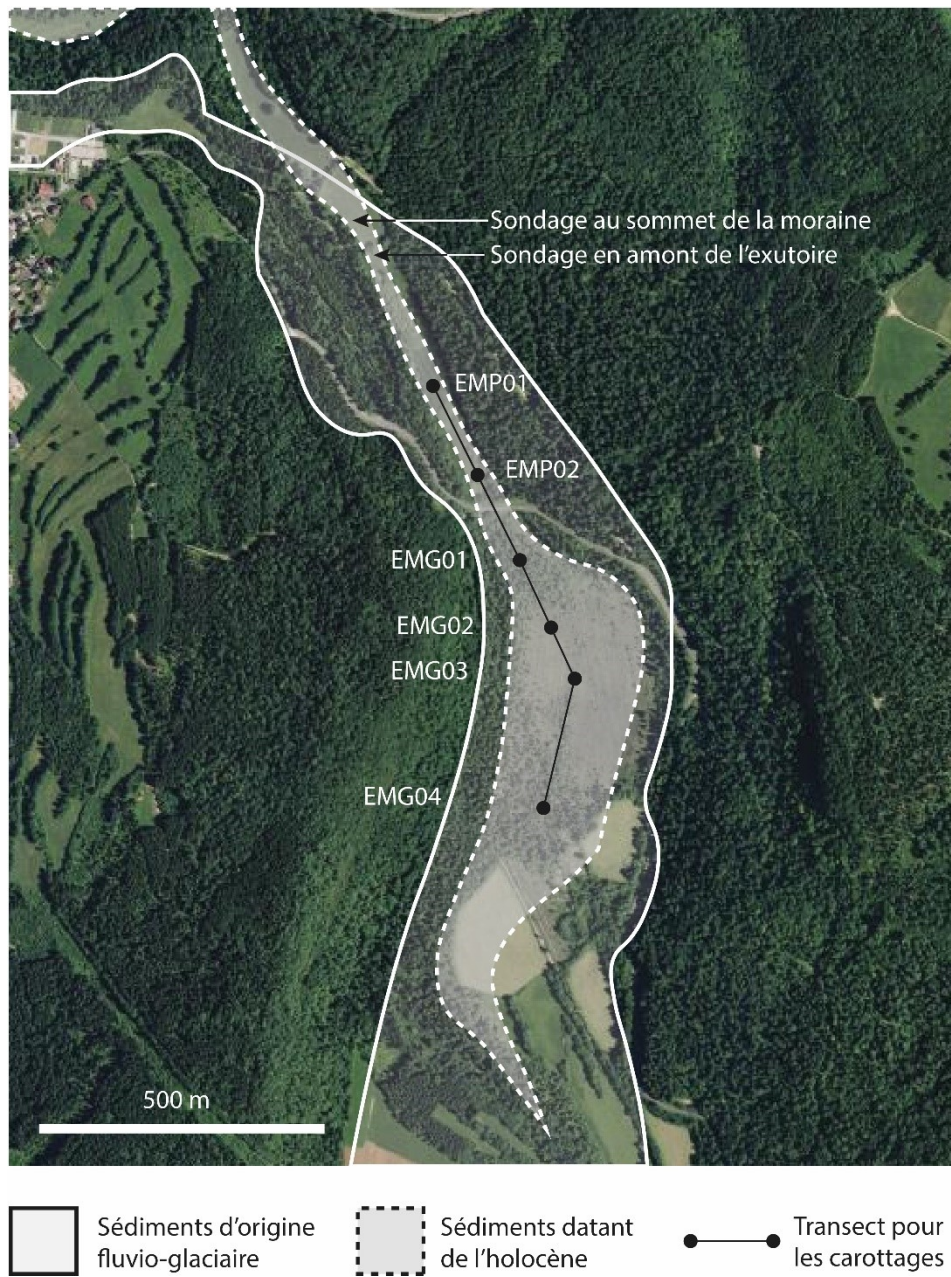


FIG. 1 : GEOLOGIE DE SURFACE DU SITE DU MARAIS MARQUIS ET POSITIONNEMENT DU TRANSECT LE LONG DUQUEL LES CAROTTAGES ONT ÉTÉ RÉALISÉS.

2. ANALYSE DU REMPLISSAGE SEDIMENTAIRE

La première étape de l'analyse correspond en **une description des différents faciès sédimentaires** constituant le remplissage de la zone humide. L'objectif est ici de **repérer la distribution spatiale des séquences sédimentaires et leurs profondeurs**.

Pour ce faire **6 carottages ont été réalisés le long d'un transect longitudinal** (Fig. 1, annexe 1). Les prélèvements ont été faits à l'aide **d'un carottier russe**. Les carottages ont atteint le substrat rocheux et présentent 4 faciès différents (Fig. 2) :

- **U1** : un **sol organique** (matière organique minéralisée) avec de nombreuses radicelles et des horizons présentant des traces d'hydromorphie,
- **U2** : une séquence de **tourbe sombre avec un gradient de dégradation de la matière organique** entre la base et le sommet de la couche,
- **U3** : une séquence de **tourbe brune** avec des débris végétaux peu altérés
- **U4** : une séquence de **craie lacustre** présentant une alternance de lamines fines, claires et sombres.

Le remplissage du réservoir sédimentaire est compris entre 410 et 490 cm dans la partie en amont de la route départementale et entre 428 et 620 cm dans la partie en aval. **Une différence d'altitude du substratum rocheux de l'ordre de 232 cm est ici mise en évidence de part et d'autre des deux bassins**, documentant ainsi l'existence d'un seuil naturel sur lequel la digue de la route départementale est appuyée. Le fond du réservoir est rocheux et non composé de dépôts glaciaires imperméables.

Un **important dépôt argileux a toutefois été identifié au niveau de l'exutoire**, d'une épaisseur supérieure à 600 cm. Il ne s'agit pas ici de varves lacustres présentant une alternance de lamines sombres et claires. Le faciès est homogène avec des graviers épars retrouvés au sein de la colonne sédimentaire. Ce faciès est similaire à celui mis en évidence dans le remplissage sédimentaire du lac Fioget situé quelques kilomètres plus au sud, datant du Tardiglaciaire (Magny, 1992).

Une accumulation de craie lacustre (sédimentation carbonatée authigène) repose sur le substratum rocheux (entre 165 et 256 cm dans la partie amont et entre 275 et 406 cm dans la partie aval). Cette séquence sédimentaire **témoigne d'un long passé lacustre**. Le sommet de la couche crayeuse est tabulaire autour d'une altitude de 572 m dans la partie amont et 571.5 m pour la partie aval. La différence d'altitude entre les sommets de U4 dans les deux réservoirs peut s'expliquer par la topographie du fond. Pour autant, l'accumulation de craie est plus importante dans l'archive la plus amont du plus petit réservoir (EMP02). La sédimentation carbonatée à l'origine de la séquence U4 a été réalisée sous une hauteur d'eau maximale potentielle (substratum-sommet de la moraine hauteur de sol déduit) de l'ordre de **5.0 à 5.5 m dans la partie amont et 5.8 à 6.9 m dans la partie aval**. Ce paléolac était donc peu profond et bénéficiait d'un bassin versant relativement réduit.

Une séquence de **tourbe brune minérotrophe, composée de débris d'herbacés relativement peu dégradés** (U3) recouvre la séquence de craie lacustre. Dans chaque archive, la transition entre U4 et U3 concernent quelques centimètres au cours desquels **la sédimentation de matière organique l'emporte sur celle carbonatée**. Cette transition fait intervenir un mélange de craie et matière organique altérée de type kalkgyttja / gyttja, riche en coquilles de

mollusques. La mise en place de cette séquence peut être conséquences de deux processus complémentaires :

- la **diminution du niveau du paléolac**, opérant une transition vers **un processus de sédimentation à dominante organique**,
- la **progression du domaine littorale et l'atterrissement associé**, processus typique des petits lacs jurassiens de faible profondeur (Magny, 1992 ; Walls, 2010).

L'épaisseur de la séquence U3 diminue d'amont en aval. En effet, une différence de 45 cm existe au niveau du sommet de la couche de tourbe entre la carotte amont et aval du réservoir principale et atteint 1.30 m avec le réservoir secondaire. Il s'agit ici d'indices pouvant traduire **le comblement progressif de la cuvette lacustre et l'existence d'au moins un lac résiduel en amont de la moraine** qui s'est comblé au cours du temps. Une dépression persiste de nos jours à proximité de l'exutoire.

Les unités U2 et U1 correspondent à des **séquences dans lesquelles la matière organique est de plus en plus dégradée alors que l'on se rapproche de la surface**. La séquence U1 est un **horizon de matière organique minéralisé**. La présence de touradons et des traits d'hydromorphie attestent d'une importante variabilité de la ligne d'eau alternant entre période d'inondation et de sècheresses. Alors que la préservation de la matière organique dans l'unité U3 tient à son ennoisement permanent, les **séquences U2 et U1 résultent de la dégradation de la tourbe associée au battement de la ligne d'eau**. Ce processus a été vraisemblablement favorisé par les aménagements anthropiques au niveau de l'exutoire et au drainage massif de la zone humide. Dans la carotte sédimentaire EMP01, l'unité U2 recouvre l'ensemble de l'enregistrement tourbeux. Les plus amples variations de hauteurs d'eaux relevées par le piézomètre à proximité pourraient expliquer que le processus de dégradation de la matière organique atteint des profondeurs plus importantes à ce niveau.

Dans les enregistrements sédimentaires, aucune séquence caractéristique de la sédimentation en étang n'a été identifiée (accumulation de vase riche en matière organique). Cette occupation du site a très probablement été très intermittente et/ou les eaux peu amendées.

Lors des carottages, des échantillons ont été prélevés en fonction des enregistrements sédimentaires et conditionnés en vue des analyses futures (chambre froide à 5°C ; Annexe 2).

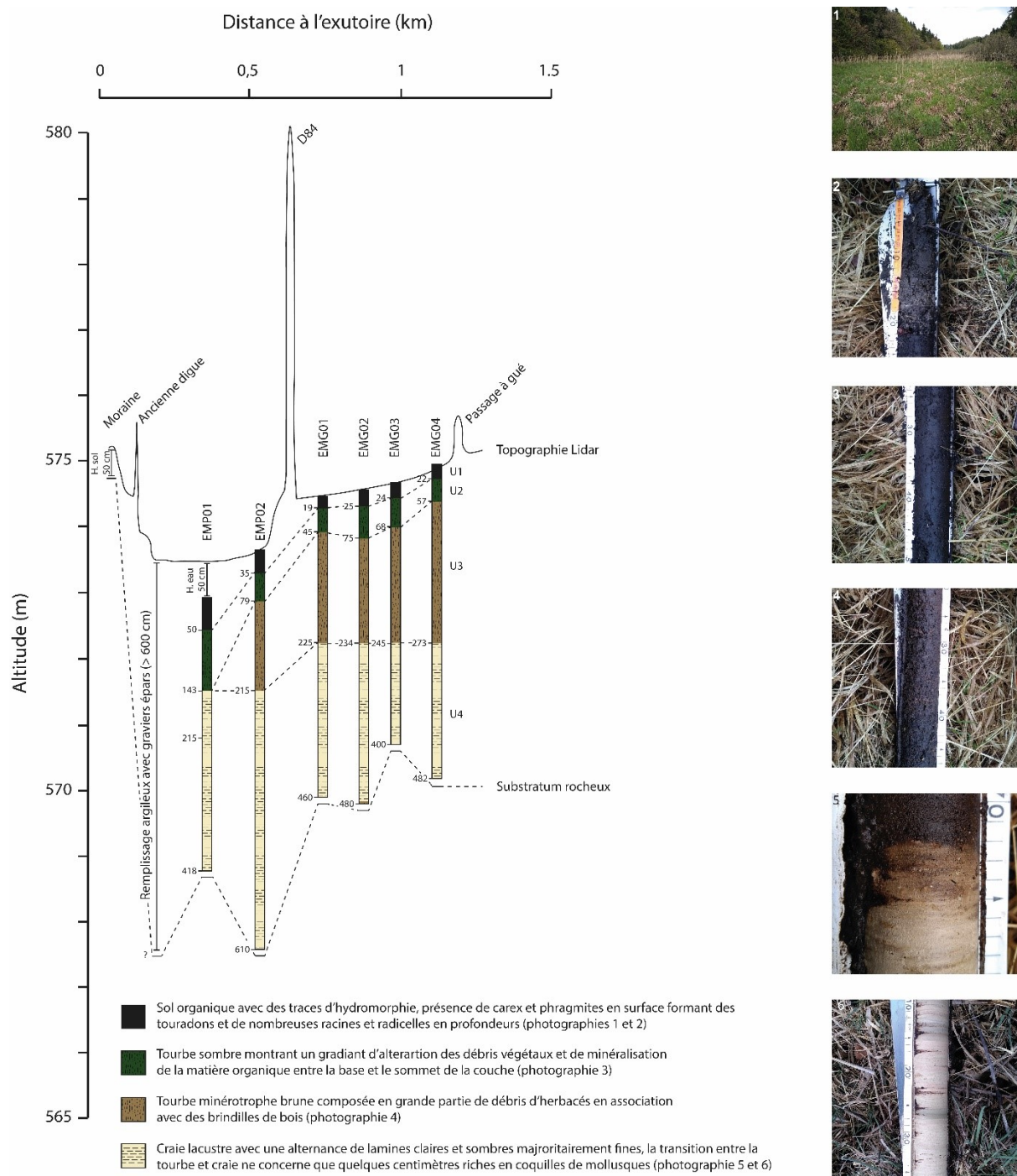


FIG. 2 : LOG SEDIMENTAIRES DES CAROTTES PRELEVEES DANS LA ZONE HUMIDE

3. CARACTERISATION DES PALEOENVIRONNEMENTS AQUATIQUES

Cette seconde étape a pour objectif de **reconstituer aussi précisément que possible les environnements aquatiques** dans lesquels les différentes séquences sédimentaires se sont mises en place. Compte tenu de la description des carottes sédimentaires prélevées, **ces analyses ont été réalisées sur les unités U3 et U4** : les séquences de craie lacustre et de tourbe la mieux préservée.

U4 – Evolution des paléoenvironnements lacustres archivés dans les craies lacustres.

Les séquences de craies lacustres ont permis de **préserver des coquilles de mollusques** à partir desquelles une analyse de la **composition de la malacofaune fossile** a été réalisée. Pour ce faire, les échantillons de craie lacustre prélevés dans l'unité U4 des carottes ont été **tamisés par voie humide** avec des tamis de 1 et 0.3 mm. Les coquilles présentes dans la fraction > 1 mm ont été collectées et déterminées aux taxons à partir de l'ouvrage de référence en matière d'invertébrés d'eau douce (Tachet et al, 2010). Ce sont ainsi **3461 individus** qui ont été inventoriés au travers de **37 échantillons analysés** (annexe 3). La fraction 0.3-1 mm est composée d'un mélange de microstructures de carbonates, de matières organiques indifférenciées et de coquilles de mollusques pour beaucoup à l'état de fragments. Les déterminations et comptages étant trop hasardeux dans cette fraction, l'inventaire des communautés de mollusques n'a pas pu être réalisé.

La malacofaune fossile du paléolac est composée de **6 taxons**. Les individus des genres **Valvata et Pisidium sont les plus abondants** (respectivement 63 et 34% de l'effectif total) et cela sur l'ensemble des 6 carottes. Les coquilles de mollusques ont été particulièrement bien préservées dans l'unité U4 des deux carottes prélevées dans le plus petit réservoir (EMP01 et EMP02). Ces deux archives permettent aussi de mettre en évidence **une évolution dans la proportion de Valvata et Pisidium au sein de la colonne sédimentaire** (Fig. 3). L'archive EMP02 montre une évolution linéaire statistiquement significative de l'abondance relative des 2 genres au cours du remplissage sédimentaire c.-à-d. une diminution pour *Valvata* vs augmentation pour *Pisidium* $r > 0.95$; $p < 0.05$. En ce qui concerne EMP01, l'évolution n'est pas statistiquement significative, mais l'on observe une dynamique similaire (abondance relative de *Valvata* comprise entre 66 et 100 % en dessous de 80 cm depuis le sommet de U4, effectifs proches au-dessus de 80 cm, Fig. 3).

Les taxons identifiés dans l'unité U4 sont **affiliés à des environnements aquatiques oligotrophes à mésotrophes** selon les traits écologiques référencés par Tachet et al, 2010. Les travaux de Mouthon (1992) apportent une analyse plus précise. Cet auteur a caractérisé la composition des communautés malacologiques spécifiques à certaines typologies de lacs jurassiens en termes de degrés trophique et de profondeur. Le genre *Valvata* est ainsi caractéristique des lacs avec des sédiments riches en carbonates et pauvre en matière organique. La modification de la composition de la malacofaune de la base au sommet de U4 c.-à-d. une augmentation des effectifs de *Pisidium* en association avec d'autres taxons comme *Lymnaea*, *Gyraulus* et *Anisus* peut traduire différents processus complémentaires :

- une **augmentation la charge en nutriments** du milieu,
- et/ou **une diminution de la colonne d'eau**,

- se traduisant également par **une diminution du taux d'oxygénation et une augmentation de la température.**

Les coquilles de *Planorbis* se retrouvent exclusivement dans la séquence de transition entre U3 et U4. Ce genre d'escargot d'eau douce est affilié **aux milieux aquatiques riches en matières végétales en décomposition**, comme la zone littorale.

Ces résultats attestent ainsi d'une **évolution à long terme de la qualité des eaux du paléolac** induisant une modification de la malacofaune. Au sommet de l'unité U4 la malacofaune est caractéristique de la zone littorale.

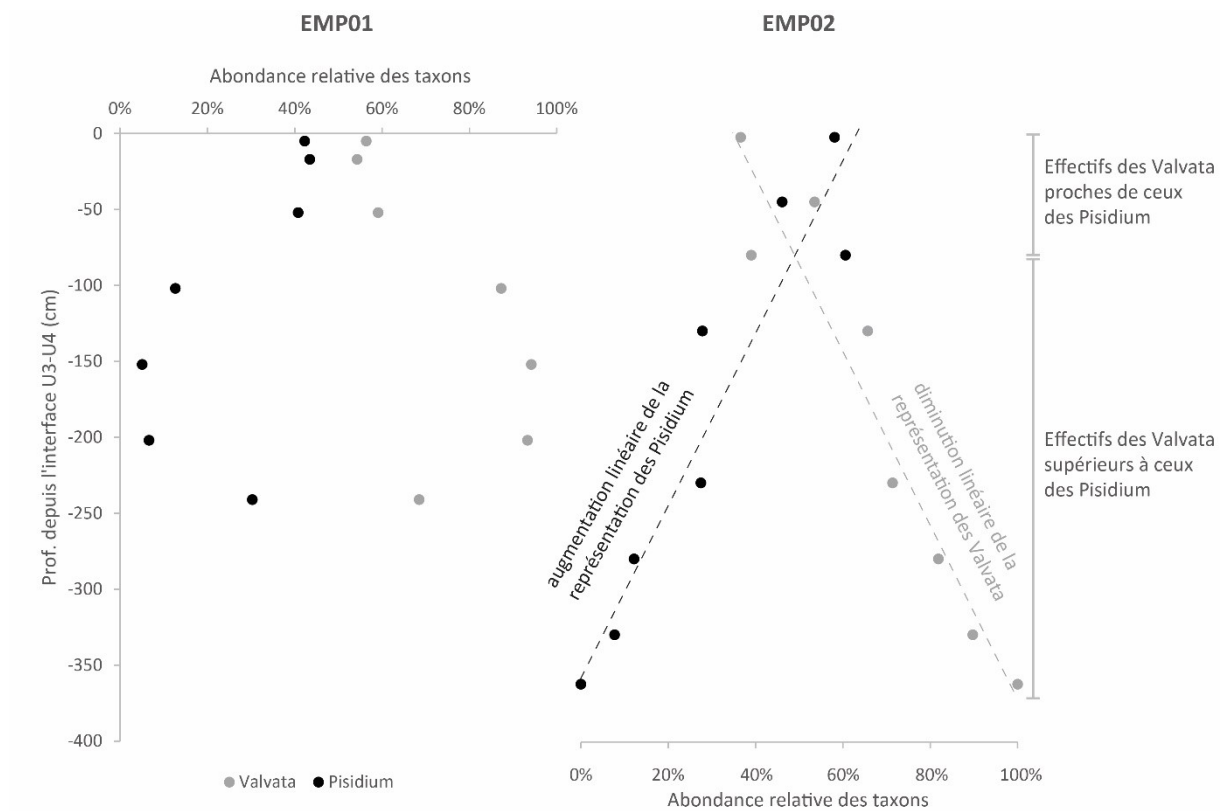


FIG. 3 : ABONDANCE RELATIVE DES EFFECTIFS DES GENRES VALVATA ET PISIDIUM DANS L'UNITÉ U4 DES CAROTTES PRELEVÉES DANS LE PETIT RESERVOIR (EMP01 ET EMP02)

U3 – Formations végétales archivées dans la séquence de tourbe.

La taille et l'état de préservation des restes végétaux présents dans l'unité U3 sont très variables, ne permettant pas une analyse quantitative des différents taxons au sein et entre les archives sédimentaires. Pour autant, une **analyse qualitative des fossiles végétaux a été réalisée sur la fraction > 1 mm** (après mise en suspension de la tourbe dans de l'eau à 70°C puis tamisage). La détermination des restes végétaux a été réalisée sous loupe binoculaire (X20 - X40) à l'aide du guide réalisé par Mauquoy et Van Geel (2007).

Dans l'unité U3 des carottes sédimentaires du petit réservoir et les 3 plus en aval du grand réservoir (EMP01, EMP02, EMG01, EMG02 et EMG03) seul **des restes de rhizomes, tiges et feuilles de Carex sp. et Phragmites sp. sont identifiables** (Fig. 4). Aucune évolution de la composition de la végétation n'est visible au sein des colonnes sédimentaires. Ces enregistrements attestent de la présence d'une **formation végétale similaire à celle en place de nos jours : cariçaie / roselière** depuis la mise en place de l'unité U3. Cette végétation est affiliée à un environnement de **bas marais typiquement retrouvé dans ce type de cuvettes lacustres**. Les hauteurs d'eau maximales sont relativement peu profondes (quelques dizaines de centimètres ; Crassous et Karas, 2007).

Dans l'unité U3 de la carotte EMG04, les restes végétaux préservés dans la tourbe appartiennent à d'autres taxons : **Cladium mariscus (marisque), Erioforum sp. (linaigrettes), Scirpus sp. (scirpes), Scheuchzeria palustris (Scheuchzérie palustre) en association avec des Carex sp.** (Fig.4). De la même manière, ces vestiges sont retrouvés dans l'ensemble de la colonne sédimentaire. Cette végétation est généralement localisée dans la **partie marginale des lacs-tourbières ou les zones plus élevées/asséchées** (Manneville et al, 2006). Elle traduit une zone avec une hauteur d'eau maximale plus faible que pour les autres carottes (affleurant à quelques cm).

Dans l'ensemble, des archives sédimentaires **des morceaux de végétaux ligneux** ont été relevées, pouvant provenir :

- du bassin via le ruissèlement,
- d'une fermeture partielle et temporaire du milieu.

Principaux fossiles de mollusques
retrouvés dans l'unité de craie U4



Coquilles de *Valvata sp.*



Coquilles de *Pissidium sp.*

Principaux fossiles de végétaux
retrouvés dans l'unité de tourbe U3



Rhizome de *Phragmites sp.*



Feuille de *Carex sp.*

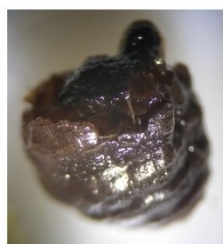
Fossiles de végétaux retrouvés uniquement
dans l'unité de tourbe U3 de la carotte la
plus en aval EMG04



Inflorescence de *Scirpus sp.*



Graines de *Scheuchzeria palustris*



Base de la tige de *Cladium mariscus*
ou *Eriophorum sp.*

FIG. 4 : PHOTOGRAPHIES SOUS BINOCULAIRES DES PRINCIPAUX FOSSILES RETROUVES DANS LES ARCHIVES SEDIMENTAIRES

4. DYNAMIQUE D'ÉVOLUTION DE LA ZONE HUMIDE

La datation des séquences sédimentaires est rendue possible par **l'analyse du radiocarbone (¹⁴C) contenu dans la biomasse**. Les êtres vivants détiennent une certaine proportion de ¹⁴C, suite à leur mort, le carbone n'est plus renouvelé et la proportion de ¹⁴C décroît progressivement. En analysant **l'activité du ¹⁴C dans la biomasse**, l'âge de la mort des êtres vivants peut être déterminé à partir de la loi de décroissance du radioélément.

Dans le cadre de cette étude, **des analyses ont été réalisées sur les restes de végétaux, charbons et des coquilles de mollusques** (Tab. 1). Les analyses ont été réalisées par **spectrométrie de masse par accélérateur (AMS- MICADAS)** par les laboratoires CDRC Université de Lyon et CIR Université de Groningen. **L'âge ¹⁴C est exprimé en année depuis 1950 (BP pour Before Present)**. La datation conventionnelle (issue de l'analyse isotopique et accompagnée de l'erreur standard du détecteur) demande à être **calibrée afin d'être convertie en année calendaire**. La datation calibrée peut ainsi être exprimée par rapport à 1950 (BP) ou par rapport à l'année 0 (BC pour avant JC et AC pour après JC). Dans cette analyse la **calibration a été réalisée par la méthode de densité de probabilité élevée (HDP)**. Un total de **10 échantillons ont été analysés** au sein des carottes sédimentaires (Fig. 5).

Le plan d'échantillonnage de cette analyse a été défini afin de permettre la datation de différents événements. La **mise en place de l'environnement lacustre** a ainsi été datée à l'aide d'une séquence de tourbe présente à la base de l'archive EMG02. De plus des restes organiques présents dans plusieurs séquences de craie des carottes EMP01 et EMP02 permettent de calculer le taux de sédimentation de l'unité U4. **La datation de la transition entre les unités de craie (U4) et de tourbe (U3)** a fait l'objet d'une attention particulière. Des restes de végétaux ont été analysés dans les séquences prélevées à l'interface entre les 2 unités ou à proximité dans l'ensemble des archives. Les échantillons de la carotte EMG01 n'ont cependant pas été retenus, car plus éloignés de cette interface. **L'âge des modifications de l'exutoire** a également été recherché. Dans talweg historique de la moraine, un sol d'environ 75 cm de profondeur s'est formé. Selon toute vraisemblance, sa mise en place est postérieure à l'aménagement d'une brèche dans la moraine, modifiant les écoulements qui se faisaient initialement à ce niveau (et dans les pertes). L'interface entre les galets et le sol est riche en charbons, témoignant vraisemblablement d'une intense activité de défrichement à cette époque. Ces charbons ont été analysés (échantillon nommé Moraine Tab 1).

Archive	Prof. (cm)	Nature	Age ¹⁴ C BP	Age calibré BP	Age calibré calendaire	Maximum de probabilité	
EMP01	143-153	Matière végétale	7325 ± 45	8291 à 8016	6341 à 6066 BC	6259 à 6066 BC	92,5%
EMP01	290-300	Matière végétale	9900 ± 50	11601 à 11209	9651 à 9259 BC	9461 à 9259 BC	88,8%
EMP02	190-200	Matière végétale	8055 ± 45	9093 à 8767	7143 à 6817 BC	7143 à 6817 BC	95,4%
EMP02	215-220	Matière végétale	8080 ± 45	9131 à 8778	7181 à 6828 BC	7181 à 6908 BC	86,2%
EMP02	250-270	Coquille	9670 ± 50	11212 à 10790	9262 à 8840 BC	9262 à 9114 BC	56,6%
EMG02	220-230	Matière végétale	8125 ± 45	9252 à 8992	7302 à 7042 BC	7195 à 7042 BC	85,3%
EMG02	476-480	Matière végétale	12190 ± 60	14266 à 13846	12316 à 11896 BC	12316 à 11896 BC	95,4%
EMG03	240-245	Matière végétale	8490 ± 45	9541 à 9446	7591 à 7496 BC	7591 à 7496 BC	95,4%
EMG04	263-273	Matière végétale	8375 ± 45	9491 à 9287	7541 à 7337 BC	7541 à 7337 BC	95,4%
Moraine	45-50	Charbon	1595 ± 30	1549 à 1410	401 à 540 AC	401 à 540 AC	95,4%

TAB. 1 : RESULTATS DES DATATIONS RADIOCARBONES ET DES CALIBRATIONS

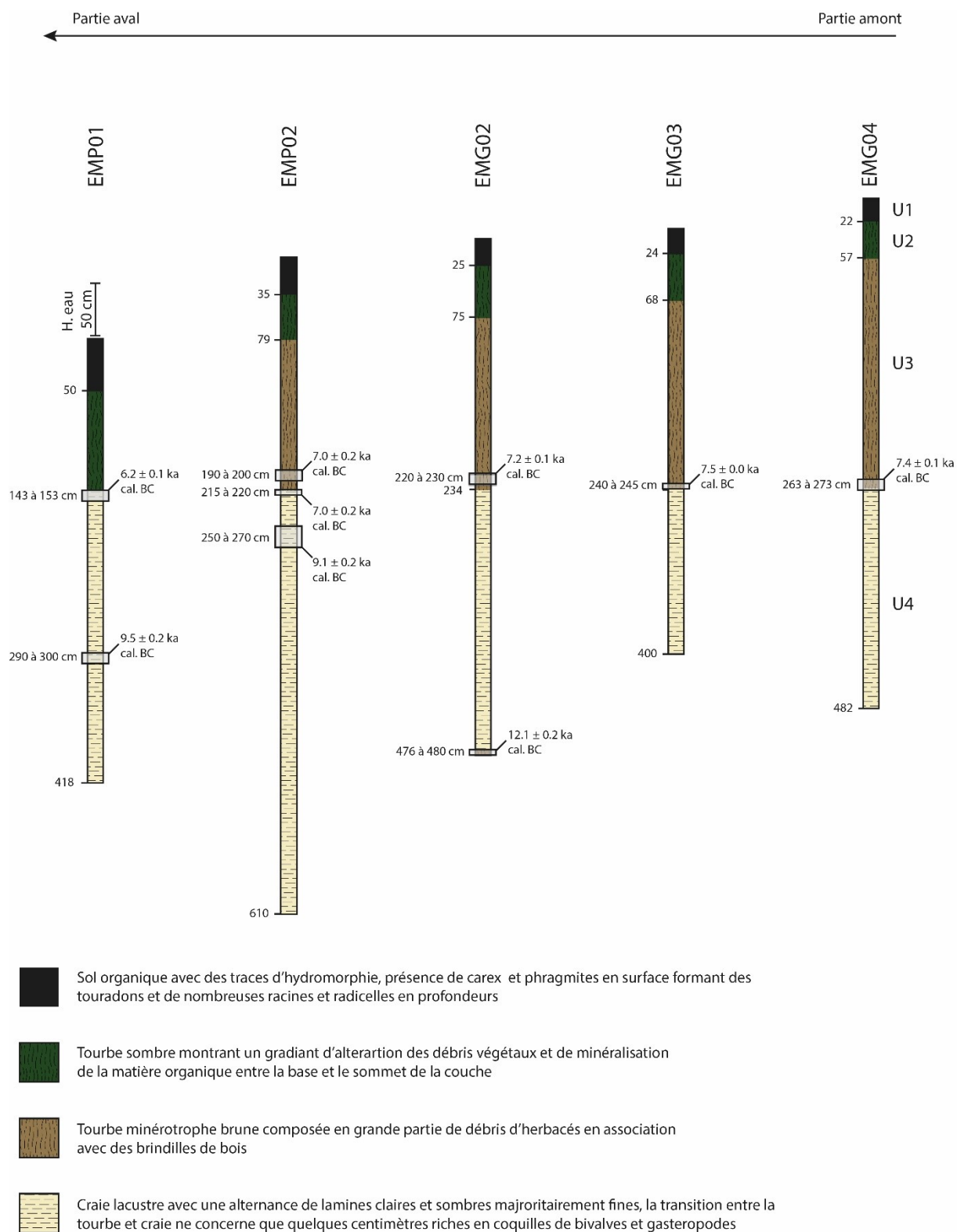


FIG. 5 : POSITIONNEMENT DES DATATIONS DANS LES LOGS SEDIMENTAIRES

L'interprétation des datations permet de reconstituer la chronologie des événements (Fig. 6).

Environnement lacustre (Tardiglaciaire – 6.2 Ka BC) :

La séquence sédimentaire la plus ancienne, prélevée à la base de l'archive EMG02, date de 12.1 ± 0.2 ka cal BC. L'âge de la base de la carotte EMP01 peut également être calculé en extrapolant le taux de sédimentation défini à partir des deux échantillons analysés dans l'unité U4 (4.5 mm/an ; Fig. 5). Un âge similaire d'environ 12.1 ka BC est ainsi calculé. Ce résultat atteste d'une **mise en place de l'environnement lacustre au cours du Tardiglaciaire, plus précisément le Bølling**. Le milieu aquatique fonctionne alors comme **un lac à beine durant environ 4.6 à 5.9 ka**.

Période de transition (7.5 – 6.2 ka BC)

En effet, entre environ 7.5 et 6.2 ± 0.1 ka cal BC une **période de transition est enregistrée passant d'une sédimentation à dominante carbonatée à une tourbe minérotrophe**. A cette période, on observe dans les enregistrements sédimentaires du lac St Point une phase caractérisée par une diminution des apports détritiques, **une augmentation de la production de craie lacustre, ainsi que du taux de sédimentation** (Leroux et al, 2008, Magny et al, 2013). Au cours de cette première partie de l'Holocène **un climat plus sec** a été mis en évidence (surtout au Préboréal et à l'Atlantique ; Bichet et al, 1999 ; Magny, 2001). Pour certains lacs, comme le lac Chailloux, **une transition rapide vers des degrés trophiques plus élevés** a eu lieu au Boréal, associé **une augmentation de la précipitation des carbonates authigènes** (Bichet et al, 1999).

Environnement de bas marais (7.5 ka BC – nos jours)

Dans le paléolac du Marais Marquis, la transition entre un système lacustre à beine et un environnement de bas marais se fait **progressivement de l'amont vers l'aval, corroborant l'hypothèse du comblement par avancé de la zone littorale** (cf partie 2). Pour autant, **trois étapes successives se dessinent** à partir des résultats des datations. Au niveau de la partie amont, la mise en place de la sédimentation organique se fait aux alentours de 7.5 ka BC. Quelques siècles plus tard, vers 7.0 ka BC c'est le cas de la partie centrale. La partie aval, quant à elle montre une transition vers 6.0 ka BC. Cette évolution plus tardive peut s'expliquer possiblement par **la persistance d'un lac résiduel** à ce niveau et également par l'avènement d'une anomalie climatique aux alentours de 6.2 ka BC ayant entraîné un refroidissement rapide durant 2 à 4 siècles. L'environnement **de bas marais a été conservé jusqu'à nos jours** du fait du mauvais drainage des eaux dans la cuvette lacustre

Modification de l'exutoire

Entre de **V et VIème s. de notre ère on identifie une modification des écoulements** dans le talweg historique vraisemblablement vers une brèche percée dans la moraine. A cette époque, de nouvelles populations viennent s'installer dans la région (peuples germaniques) et les premiers moines chrétiens s'implantent également. Selon les études palynologiques effectuées dans la région, bien qu'un impact anthropique régulier soit attesté depuis le

Néolithique, **l'anthropisation du milieu connaît un essor considérable à cette époque** (Gauthier 2004, Magny et al, 2013). Il s'agit d'une phase d'intense défrichement comme en témoigne l'importante quantité de charbon retrouvé au niveau des sols à l'interface avec la moraine. Il est probable que ces premiers travaux aient eu pour but de libérer des pâtures. L'utilisation de la zone comme étang a été plus tardive et très probablement sur de brèves périodes étant donné que l'on ne relève pas de trace sédimentaire de cette occupation du milieu. **La mise en place de l'unité U2 associée à un battement de nappe important est vraisemblablement la conséquence de l'ouverture de cette brèche dans la moraine.** Le drainage de la zone pour des fins sylvicole est venu accentuer le phénomène.

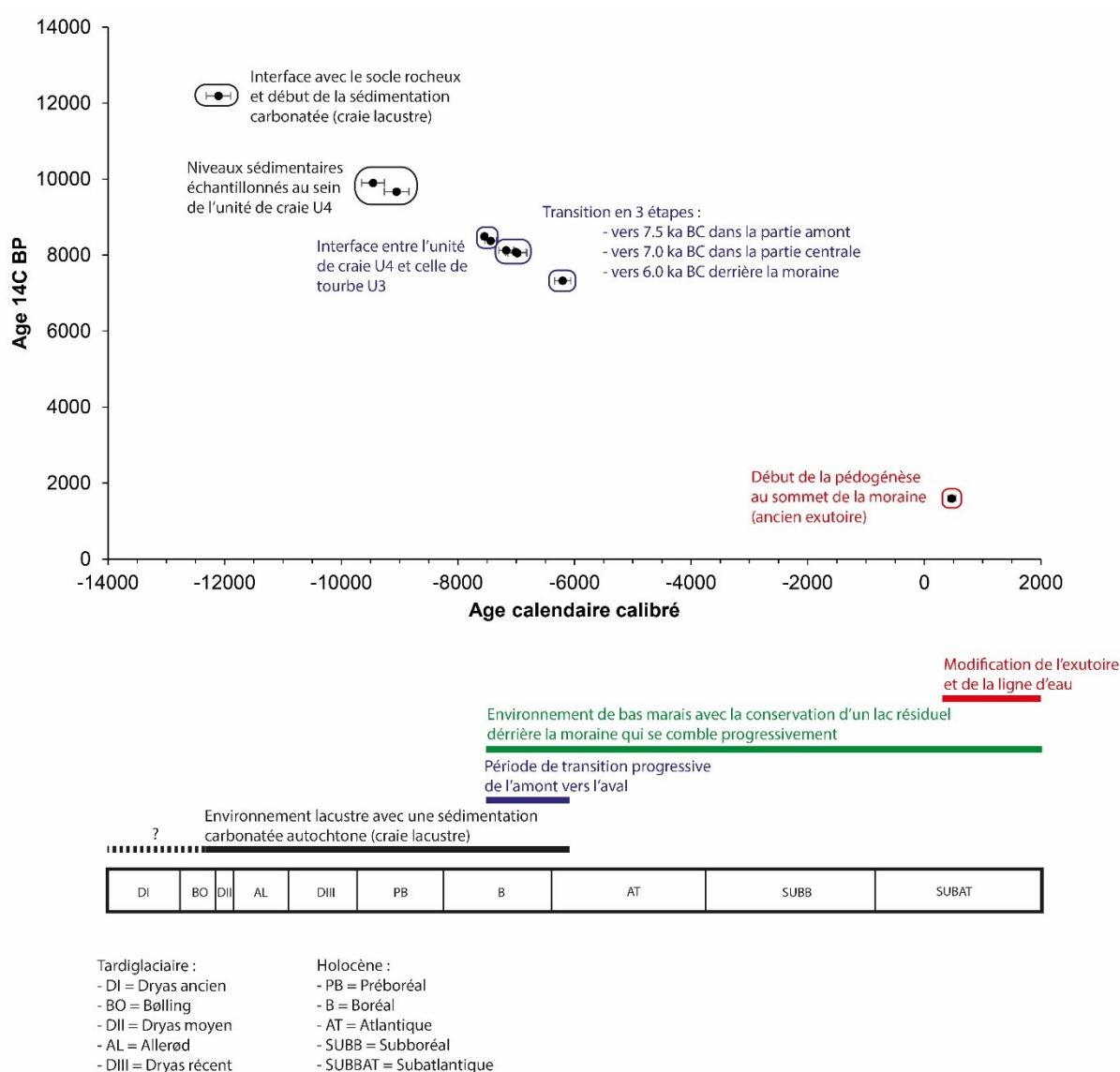


FIG. 6 : CHRONOLOGIE DE L'EVOLUTION DE L'ENVIRONNEMENT DU MARAIS MARQUIS

5. CONCLUSION

Synthèse des résultats

Dans l'objectif d'analyse la dynamique de remplissage du Marais Marquis, 6 carottes sédimentaires ont été prélevées le long d'un transect longitudinal.

Ces archives mettent en évidence l'existence d'une **importante accumulation de craie attestant d'un passé lacustre** débutant au Tardiglaciaire et se terminant à l'Atlantique (12.1 à 6.2 ka BC). L'analyse des fossiles de mollusques présents dans cette unité crayeuse révèle une augmentation du degré trophique du milieu ou/et une diminution de la hauteur d'eau au cours de cette période.

Entre 7.5 et 6.2 ka BC une transition sédimentaire opère dans chaque archive vers une tourbière minérotrophe. Cette transition se fait progressivement de l'amont vers l'aval, attestant d'une **progression de la zone littorale** dans un contexte hydroclimatique favorisant ce processus. L'unité organique déposée sur les craies est relativement bien préservée et fait apparaître des restes de *Carex sp* et *Phragmites sp.* témoignant de l'existence **d'une végétation de bas marais** depuis cette époque. Dans la carotte la plus en amont cette unité organique est composée de restes d'une végétation moins résistante à l'enneigement.

Entre le V et VIème s. de notre ère, les écoulements ont été modifiés au niveau de la moraine afin de favoriser le drainage de la zone humide. Il s'agit des premières traces visibles de l'anthropisation du milieu. Plus tard, une digue a été construite en amont de la moraine afin de transformer la zone en étang. Récemment, le marais a changé d'usage et tout un réseau de drains a été aménagé afin de planter des épicéas. La route départementale a été implantée sur un seuil naturel séparant la cuvette en un petit et un grand réservoir. **Toutes ces modifications de l'environnement aquatique ont induit un important battement de la nappe qui a pour conséquence de favoriser la dégradation de la tourbe.** En surface, on observe un horizon de matière organique minéralisée. Ces faciès attestent de **l'altération du fonctionnement du milieu et d'un processus de dégradation pluriséculaire de l'environnement aquatique.**

Préconisations techniques

Compte tenu des résultats de cette étude, des préconisations techniques peuvent être formulées pour le projet de restauration de la zone humide.

Le comblement de la cuvette lacustre et sa transformation en bas marais est la conséquence de l'évolution naturelle du milieu il y a 9 à 8 ka. **Il n'y a donc pas lieu de rechercher à restaurer le fonctionnement du lac à beine, comme il était à son origine,** ce qui aurait nécessité d'excaver la tourbe au moins en partie.

La tourbière minérotrophe qui a succédé au paléolac a pour caractéristique de se développer dans un milieu **où la nappe est proche de la surface avec des périodes d'enneigement plus ou moins longues en fonction de la topographie** (les hauteurs d'eau sont limitées). **Ces conditions ont été perturbées par les aménagements humains** et les conditions de conservation de la tourbe sont altérées dans la zone de battement de nappe. **Restaurer ce processus de**

tourbification est une étape cruciale pour garantir la fonctionnalité de l'environnement à très long terme. Pour ce faire, il est important de **limiter au maximum ce battement de nappe et la maintenir en surface / subsurface.** La partie amont de la zone humide (à proximité de la carotte EMP04) correspond à une zone plus sèche, et cela bien avant la première phase d'anthropisation.

L'enjeu des travaux à réaliser n'est donc pas ici de mettre en place un plan d'eau permanent, mais de réparer les écoulements ayant abouti au développement d'une tourbière minérotrophe plurimillénaire, même si les dépressions vestiges des lacs résiduels peuvent être ennoyées une partie de l'année.

Il est ainsi envisageable de mettre en place une série d'actions correctrices, en évaluant à chaque stade l'efficacité des travaux réalisées. En premier lieu il est nécessaire de limiter le drainage à l'intérieur de la zone humide en **comblant les réseaux de drains.** En parallèle ou de manière différée, une **restauration de la cote initiale de l'exutoire** serait à étudier (après déduction de la hauteur de sol mis en place depuis les premières modifications). Des **pertes karstiques** existent dans la partie aval de la cuvette lacustre. Lors de la **période d'étiage, le volume transitant dans les pertes est négligeable** (6 % du volume entrant sur la période juillet à décembre 2018) et les assècs sont fréquents. **En période de hautes eaux le volume de perte est bien plus important,** (41% du volume entrant sur la période janvier à juillet 2019). Les débits de pertes sont ainsi de 14 l/s sur l'année 2018-2019 et ont atteint jusqu'à 178 l/s (36% du débit entrant). Ces écoulements souterrains ont pu évoluer au cours du temps, potentiellement avec des épisodes d'excavation des sédiments pour faciliter le drainage de la zone humide. Des travaux peuvent être envisagés si nécessaire pour **limiter les débits de pertes lors des périodes de hautes eaux** (reméandrement du lit du cours d'eau dans cette zone en l'éloignant des pertes, mise en place d'une surverse en retravaillant la topographie autour des pertes, ...)

Les prévisions pour XXIème s. tendent vers **d'importantes modifications hydroclimatiques** avec une exacerbation des extrêmes en matière de sécheresses et fortes précipitations. La restauration de la fonctionnalité de la zone humide comme elle a été décrite précédemment doit également tenir compte d'une dimension d'**adaptation à ces changements climatiques, permettant de garantir sa pérennité, mais aussi à l'échelle du bassin versant agir comme un tampon aux variations hydrologiques.**

6. REFERENCES

- Bichet, V., Campy, M., Buoncristiani, J. F., Digiovanni, C., Meybeck, M., & Richard, H. (1999). Variations in sediment yield from the Upper Doubs River carbonate watershed (Jura, France) since the Late-Glacial Period. *Quaternary Research*, 51(3), 267-279.
- Crassous, C., & Karas, F. (2007). *Guide de gestion des tourbières et marais alcalins des vallées alluviales de France septentrionale*. Pôle-relais tourbières.
- Gauthier, E. (2004). *Forêts et agriculteurs du Jura: les quatre derniers millénaires* (Vol. 765). Presses Univ. Franche-Comté.
- Leroux, A., Bichet, V., Walter-Simonnet, A. V., Magny, M., Adatte, T., Gauthier, É., ... & Baltzer, A. (2008). Late Glacial-Holocene sequence of Lake Saint-Point (Jura Mountains, France): Detrital inputs as records of climate change and anthropic impact. *Comptes Rendus Geoscience*, 340(12), 883-892.
- Magny, M. (1991). Une approche paléoclimatique de l'Holocène: les fluctuations des lacs du Jura et des Alpes du Nord françaises. *These de doctorat de l'Université de Franche-Comté*.
- Magny, M. (1992). Sédimentation et dynamique de comblement dans les lacs du Jura au cours des 15 derniers millénaires. *ArchéoSciences, revue d'Archéométrie*, 16(1), 27-49.
- Magny, M., Leroux, A., Bichet, V., Gauthier, E., Richard, H., & Walter-Simonnet, A. V. (2013). Climate, vegetation and land use as drivers of Holocene sedimentation: a case study from Lake Saint-Point (Jura Mountains, eastern France). *The Holocene*, 23(1), 137-147.
- Manneville O. (2006). *Le monde des tourbières et Marais*. Delachaux et Niestlé (320 p.)
- Mauquoy, D., & Van Geel, B. (2007). Plant macrofossil methods and studies: mire and peat macros. In *Encyclopedia of quaternary science* (pp. 2315-2336). Elsevier Science.
- Mouthon, J. (1992) Peuplements malacologiques lacustres en relation avec la physico-chimie de l'eau et des sédiments. II. Les espèces." *Annales de Limnologie-International Journal of Limnology*. Vol. 28. No. 2. EDP Sciences
- Tachet, H., Richoux, P., Bournard, M., & Usseglio-Polatera, P. (2010). *Invertébrés d'eau douce: systématique, biologie, écologie* Paris: CNRS éditions.
- Wall, A. A., Magny, M., Millet, L., & Gilbert, D. (2010). Changements climatiques et variations d'assemblages de thécamoebiens au cours de la transition Tardiglaciaire-Holocène au lac du Lautrey (Jura, France). *Quaternaire. Revue de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*, 21(3), 295-304.

7. ANNEXES

7.1 FICHES DESCRIPTIVE DES CAROTTAGES

Code : EMP01

Date de carottage : 20/05/2019

Coordonnées L93 : X925574.32 – Y6631921.22

Profondeur du substratum : 428 cm

Description des faciès sédimentaires:

- U1 0-50 cm = sol organique très noire et humide, la séquence 30-50 présente des traces d'hydromorphie.
- U2 50-143 cm = tourbe sombre, la matière organique y est plus fine et altérée comparées aux autres archives sédimentaires. La séquence 110-143 comporte de nombreuses coquilles.
- U3 = la séquence n'est pas visible dans l'enregistrement.
- U4 143-418 cm = craie lacustre avec des lamines fines. Des couches bleutées d'environ 1 cm sont visibles en dessous de 255 cm correspondant vraisemblablement à des apports détritiques massifs (crues importantes). Les lamines sont plus épaisses entre 310 et 340 cm.

Code : EMP02

Date de carottage : 03/05/2019

Coordonnées L93 : X925640.07 – Y6631776.88

Profondeur du substratum : 620 cm

Description des faciès sédimentaires:

- U1 0-35 cm = sol organique avec des de nombreuses radicelles de carex. Les radicelles de carex sont visibles jusqu'à 50 cm de profondeur.
- U2 35-79 cm = tourbe fibreuse sombre avec un gradient d'altération de la matière organique entre la base et le sommet. La séquence 59-79 présente une transition progressive entre la tourbe sombre et brune.
- U3 79-215 cm = tourbe brune fibreuse avec des débris végétaux assez fins mais bien conservés.
- U4 215-610 cm = craie lacustre avec des lamines fines. Les coquilles de bivalves et mollusques paraissent plus abondants et mieux répartis dans cet enregistrement comparé aux autres carottes. Des couches bleutées d'environ 1 cm sont visibles en dessous de 400 cm correspondant vraisemblablement à des apports détritiques massifs (crues importantes).

Code : EMG01

Date de carottage : 02/05/2019

Coordonnées L93 : X925776.34 – 6631575.43

Profondeur du substratum : 470 cm

Description des faciès sédimentaires:

- U1 0-19 cm = sol organique avec des racines.
- U2 19-45 cm = tourbe fibreuse sombre composée de matière organique plus altérée que la séquence sous-jacente.
- U3 45-225 cm = tourbe brune fibreuse avec des débris végétaux mais bien conservés.
- U4 225-460 cm = craie lacustre avec des lamines majoritairement fines. Entre 225 et 245 on observe une transition entre la tourbe et la craie avec de nombreuses coquilles de bivalves et mollusques. Entre 378 et 450 la craie est plus fine est les lamines sont plus larges.

Code : EMG02

Date de carottage : 02/05/2019

Coordonnées L93 : X925815.58– Y6631502.07

Profondeur du substratum : 490cm

Description des faciès sédimentaires:

- U1 0-25cm = sol organique avec des radicelles de carex. Entre 10 et 18 cm on retrouve des traces d'hydromorphies.
- U2 25-75 cm = tourbe fibreuse sombre composée de matière organique plus altérée que la séquence sous-jacente.
- U3 75-234 cm = tourbe brune fibreuse avec des débris végétaux mais bien conservés. La séquence 215-234 cm est légèrement plus sombre
- U4 234-480 cm = craie lacustre avec des lamines majoritairement fines. La transition entre la tourbe et la craie ne représente seulement que quelques centimètres. Entre 365 et 385 cm la craie est plus fine est les lamines sont plus larges. Un mélange organominérale liquide est enregistré entre 420et 428 cm.

Code : EMG03

Date de carottage : 02/05/2019

Coordonnées L93 : X925846.33– Y6631413.85

Profondeur du substratum : 410 cm

Description des faciès sédimentaires:

- U1 0-24cm = sol organique avec des radicelles de carex. Entre 13 et 24 cm on retrouve des traces d'hydromorphies.

- U2 24-68 cm = tourbe fibreuse sombre composée de matière organique plus altérée que la séquence sous-jacente.
- U3 68-245 cm = tourbe brune fibreuse avec des débris végétaux mais bien conservés. La séquence 200-234 cm est légèrement plus sombre
- U4 245-400 cm = craie lacustre avec des lamines majoritairement fines. La transition entre la tourbe et la craie ne représente seulement que quelques centimètres. Entre 343 et 368 cm la craie est plus fine est les lamines sont plus larges.

Code : EMG04

Date de carottage : 03/05/2019

Coordonnées L93 : X925755.35– Y6631281.16

Profondeur du substratum : 490cm

Description des faciès sédimentaires:

- U1 0-22cm = sol organique avec des radicelles de carex. Entre 14 et 22 cm on retrouve des traces d'hydromorphies.
- U2 22-57 cm = tourbe fibreuse sombre composée de matière organique plus altérée que la séquence sous-jacente.
- U3 57-273 cm = tourbe brune fibreuse avec des débris végétaux mais bien conservés.
- U4 273-482 cm = craie lacustre avec des lamines majoritairement fines. La transition entre la tourbe et la craie ne représente seulement que quelques centimètres. Entre 380 et 415 cm la craie est plus fine est les lamines sont plus larges.

7.2 PLAN D'ECHANTILLONNAGE DES ARCHIVES SEDIMENTAIRES

	EMP01	EMP02	EMG01	EMG02	EMG03	EMG04
U1	40-50 cm			0-18 cm	0-13 cm 13-24 cm	14-22 cm
U2	90-100 cm 110-115 cm 115-120 cm 120-125 cm 125-130 cm 130-135 cm 135-140 cm 140-143 cm	45-50 cm 60-70 cm		45-50 cm	24-35 cm 35-44 cm	40-48 cm
U3		90-100 cm 121-126 cm 140-150 cm 154-160 cm 190-200 cm	45-50 cm 90-100 cm 130-140 cm 168-172 cm 189-195 cm	90-100 cm 105-125 cm 182-192 cm 220-234 cm	68-100 cm 80-84 cm 100-150 cm 145-150 cm 150-200 cm 190-200 cm 200-230 cm 218-224 cm 240-245 cm	90-100 cm 145-150 cm 166-175 cm 222-230 cm 235-245 cm 263-273 cm
U4	143-150 cm 190-200 cm 232-234 cm 240-250 cm 290-300 cm 340-350 cm 365-367 cm 390-400 cm 405-418 cm	215-220 cm 250-270 cm 290-300 cm 340-350 cm 380-390 cm 440-450 cm 490-500 cm 540-550 cm 575-580 cm 590-600 cm	225-245 cm 290-300 cm 308-322 cm 370-380 cm 435-445 cm	235-250 cm 264-276 cm 320-330 cm 420-428 cm 476-480 cm	250-300 cm 275-280 cm 321-326 cm 350-368 cm 368-400 cm	325-335 cm 360-380 cm 380-400 cm 415-425 cm 471-482 cm

7.3. INVENTAIRE DES COQUILLES DE MOLLUSQUES DETERMINES DANS L'UNITE U4

Archive	Prof. (cm)	<i>Lymnae</i>		<i>Valvata</i>		<i>Planorbis</i>		<i>Anisus</i>		<i>Gyraulus</i>		<i>Pisidium</i>	
		N	AR	N	AR	N	AR	N	AR	N	AR	N	AR
EMP01	-5	1	1%	88	56%	1	1%	0	0%	0	0%	66	42%
	-17	1	1%	75	54%	1	1%	0	0%	1	1%	60	43%
	-52	0	0%	171	59%	0	0%	0	0%	0	0%	118	41%
	-102	0	0%	55	87%	0	0%	0	0%	0	0%	8	13%
	-152	0	0%	147	94%	0	0%	0	0%	1	1%	8	5%
	-202	0	0%	28	93%	0	0%	0	0%	0	0%	2	7%
	-241	1	1%	61	69%	0	0%	0	0%	0	0%	27	30%
EMP02	-2,5	1	1%	34	37%	1	1%	1	1%	2	2%	54	58%
	-45	0	0%	231	53%	0	0%	1	0%	1	0%	199	46%
	-80	1	0%	94	39%	0	0%	0	0%	0	0%	146	61%
	-130	14	6%	151	66%	1	0%	0	0%	0	0%	64	28%
	-230	3	1%	182	71%	0	0%	0	0%	0	0%	70	27%
	-280	3	5%	54	82%	0	0%	0	0%	1	2%	8	12%
	-330	2	3%	70	90%	0	0%	0	0%	0	0%	6	8%
	-362,5	0	0%	8	100%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
-380	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	
EMG01	-10	2	1%	127	54%	0	0%	0	0%	1	0%	104	44%
	-70	0	0%	9	60%	0	0%	0	0%	0	0%	6	40%
	-90	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
	-215	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
EMG02	9	1	5%	11	52%	1	5%	1	5%	1	5%	6	29%
	-8	13	4%	170	51%	4	1%	3	1%	1	0%	145	43%
	-36	5	4%	105	87%	0	0%	0	0%	0	0%	11	9%
	-141	0	0%	16	62%	0	0%	0	0%	1	4%	9	35%
	-151	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
	-181	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
	-239	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
EMG03	-2,5	4	2%	142	61%	0	0%	0	0%	0	0%	87	37%
	-30	1	5%	13	68%	0	0%	0	0%	0	0%	5	26%
	-114	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
	-139	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
EMG04	5	0	0%	3	50%	0	0%	0	0%	0	0%	3	50%
	-57	0	0%	147	86%	0	0%	0	0%	0	0%	24	14%
	-97	1	1%	107	88%	0	0%	0	0%	0	0%	13	11%
	-117	1	20%	3	60%	0	0%	0	0%	0	0%	1	20%
	-147	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
	-203,5	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%

Effectif (N) et abondance relative (AR) des différents taxons composant la malacofaune fossile dans l'unité U4 des archives sédimentaires de l'Etang Marquis (fraction > 1 mm)