

**ÉCOHYDROLOGIE DE LA GRANDE TOURBIÈRE
DE VILLEROY**

Rapport d'activités

Marie Larocque (UQAM)

Julien Colpron-Tremblay (Université Laval, CEN)

Martin Lavoie (Université Laval, CEN)

Lysandre Tremblay (UQAM)

Août 2013

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION.....	5
2	METHODOLOGIE	6
2.1	Relevés pour l'établissement d'un modèle 3D	6
2.2	Hydrologie.....	8
2.2.1	Instrumentation.....	8
2.2.2	Carte piézométrique.....	10
2.2.3	Bilan hydrique	10
2.3	Paléocéologie.....	12
2.3.1	Échantillonnage des carottes de tourbe.....	12
2.3.2	Analyses paléocéologiques.....	13
3	RESULTATS ET DISCUSSION	16
3.1	Modèle 3D de la tourbière	16
3.1.1	Topographie.....	16
3.1.2	Épaisseur des dépôts organiques.....	17
3.1.3	Topographie du substrat minéral	18
3.1.4	Carte piézométrique.....	23
3.2	Bilan hydrique de la tourbière	24
3.3	Dates basales de la matière organique.....	29
3.4	Analyses macrofossiles des carottes basales.....	33
3.5	Modèle d'évolution spatiale de la tourbière dans le temps	38
4	CONCLUSION.....	42
5	RÉFÉRENCES.....	43
	ANNEXE 1 - CALCUL DES ÉCHANGES AQUIFÈRE-TOURBIÈRE.....	46
	ANNEXE 2 – DIAGRAMMES MACROFOSSILES DES BASES DE TOURBE	50

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Localisation de toutes les stations d'échantillonnage.....	8
Figure 2. Carottier russe employé pour l'extraction des sédiments. La chambre d'échantillonnage est d'une longueur de 50 cm. La base du carottier (pointe blanche) est à gauche.....	12
Figure 3. Topographie de surface de la tourbière	16
Figure 4. Limites des bassins versants alimentés par la Grande tourbière de Villeroy	17
Figure 5. Épaisseur estimée en mètres du dépôt organique	18
Figure 6. Modèle en trois dimensions de la topographie sous-jacente à la tourbière	19
Figure 7. Localisation des coupes topographiques illustrées aux figures 8 à 13.	20
Figure 8. Coupe longitudinale (A) de la tourbière	20
Figure 9. Coupe B	21
Figure 10. Coupe C	21
Figure 11. Coupe D.....	21
Figure 12. Coupe E	22
Figure 13. Coupe F.....	22
Figure 14. Coupe G.....	22
Figure 15 : Carte piézométrique de la Grande tourbière de Villeroy.....	23
Figure 16 : Précipitation, évapotranspiration et température d'avril à novembre 2012	24
Figure 17 : Débits mesurés aux sept exutoires.....	25
Figure 18 : Variation de niveau moyenne aux piézomètres dans la tourbe	26
Figure 19 : Bilan hydrique de la Grande tourbière de Villeroy entre juin et novembre 2012	28
Figure 20. Distribution temporelle des dates basales (en considérant l'amorce de l'accumulation à Vbase 20 à 1430 ans A.A.).	32
Figure 21. Modèle spatio-temporel du développement de la tourbière par traçage de polygones	Erreur ! Signet non défini.
Figure 22. Modèle spatio-temporel du développement de la tourbière par régression (relation âge-profondeur).....	40
Figure 23: Schéma pour le calcul des flux souterrains (tirée de Rosenberry et al., 2008).....	47
Figure 24: Traçage des segments pour le calcul des flux souterrains.....	48
Figure 25. Diagramme macrofossiles de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase1	50
Figure 26. Diagramme macrofossiles de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase2	50
Figure 27. Diagramme macrofossiles de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase3	51
Figure 28. Diagramme macrofossiles de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase4	51
Figure 29. Diagramme macrofossiles de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase5	52
Figure 30. Diagramme macrofossiles de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase6	52
Figure 31. Diagramme macrofossiles de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase7	52
Figure 32. Diagramme macrofossiles de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase8	53
Figure 33. Diagramme macrofossiles de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase9	53
Figure 34. Diagramme macrofossiles de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase10	54
Figure 35. Diagramme macrofossiles de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase11	54
Figure 36. Diagramme macrofossiles de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase12	55
Figure 37. Diagramme macrofossiles de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase13	55
Figure 38. Diagramme macrofossile de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase14.....	55
Figure 39. Diagramme macrofossile de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase15.....	56
Figure 40. Diagramme macrofossiles de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase16	56
Figure 41. Diagramme macrofossile de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase17.....	57

Figure 42. Diagramme macrofossiles de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase18	57
Figure 43. Diagramme macrofossiles de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase19	58
Figure 44. Diagramme macrofossiles de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase20	58
Figure 45. Diagramme macrofossiles de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase21	59
Figure 47. Diagramme macrofossiles de la base de tourbe pour l'échantillon Vmono	60

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Stratigraphie des piézomètres mis en place dans la tourbière et dans le minéral	9
Tableau 2: Sommaire des flux souterrains pour chacun des segments de la tourbière	27
Tableau 3. Datations radiochronologiques des carottes sédimentaires.....	31
Tableau 4. Estimation de l'entourbement initial de la tourbière (superficies et pourcentages) par période temporelle (excluant la superficie non estimée).	38
Tableau 5. Développement de la tourbière (pourcentages) par période temporelle obtenu par régression (relation âge-profondeur)	41

INTRODUCTION

La Grande tourbière de Villerooy occupe un vaste territoire au sud de l'autoroute 20, à la limite des régions Centre-du-Québec et Chaudière-Appalaches. Cette tourbière a fait l'objet de plusieurs initiatives pour mieux comprendre différents aspects de son fonctionnement, notamment le contexte géologique local et régional (Larocque et al., 2013), la paléoécologie (Lavoie et Colpron-Tremblay, 2013), la dynamique récente de la tourbière (Payette et al., 2013) et les échanges aquifère-tourbière locaux (Ferlatte, 2013).

Il est maintenant connu que les dépôts organiques ont commencé à s'accumuler à la faveur de dépressions humides situées entre des dunes paraboliques (Filion, 1987), contribuant ainsi à stabiliser les dunes. L'humidité de ces dépressions était probablement maintenue par la présence d'un till compact à la base du sable d'origine éolienne (Larocque et al., 2013). Ce till a probablement contribué à la mise en place de nombreuses tourbières dans la région. Le développement spatial de la Grande tourbière de Villerooy au cours du temps est toutefois encore méconnu. La perméabilité importante du sable des dunes favorise sans doute les échanges aquifère-tourbière (Avard, 2013; Ferlatte, 2013), mais ceux-ci n'avaient pas jusqu'ici été quantifiés pour l'ensemble de la tourbière avec des charges mesurées. Le présent projet visait à combler en partie les lacunes dans ces connaissances, dans le but d'apporter des informations nouvelles qui seront utiles à la gestion de la future réserve écologique de la Grande-Tourbière-de-Villerooy. Les objectifs spécifiques du projet étaient 1) de définir la géométrie actuelle de la tourbière, 2) d'estimer son bilan hydrique et 3) d'étudier l'évolution du développement spatial des dépôts tourbeux.

Le projet a été réalisé par une équipe formée de Marie Larocque, hydrogéologue et professeure au département des sciences de la Terre et de l'atmosphère à l'UQAM, de Martin Lavoie, géographe et professeur au département de Géographie de l'Université Laval et de Julien Colpron-Tremblay, étudiant au doctorat en géographie de l'Université Laval (sous la direction de Martin Lavoie et Louise Filion). Lysandre Tremblay (agent de recherche à l'UQAM), Nicolas Bourgeois (stagiaire 1er cycle de l'Université de Montpellier) et Marie-Hélène Graveline (agente de recherche à l'UQAM) ont également été impliqués dans le projet.

METHODOLOGIE

1.1 Relevés pour l'établissement d'un modèle 3D

Topographie de la surface de la tourbière et épaisseurs de la matière organique

Une première campagne de terrain a eu lieu au courant de l'automne 2011. À l'aide d'une station totale Leica T1010 d'une précision de ± 1 mm, le dénivelé de surface de la tourbière a été mesuré en 558 points distribués à 25 m d'équidistance le long de divers profils. En raison de l'importante superficie de la tourbière et de la présence de nombreux arbres et arbustes (ces derniers bloquant le signal laser), l'utilisation de la station totale ne fut pas possible pour l'ensemble de la tourbière. Ainsi, au printemps 2012, l'altitude de la surface a été relevée en des points aléatoires à l'aide d'un GPS différentiel dans les secteurs non couverts par la station totale. Les données d'autres projets réalisés récemment sur la Grande tourbière de Villeroy ont également été utilisées (Avard, 2013; Ferlatte, 2013). Au total, 970 points ont été géolocalisés (Figure 1). Pour chacun d'eux, l'épaisseur du dépôt de matière organique a été mesurée jusqu'au substrat minéral sous-jacent à l'aide d'une tige. La densité du réseau de points est très élevée dans les secteurs nord et nord-ouest (au sud de la petite ligne) de la tourbière où les mesures furent prises le long de profils à l'aide de la station totale. Les points de mesure sont moins denses dans les autres secteurs où le travail a été fait à l'aide du GPS différentiel en des points répartis aléatoirement.

Le modèle de surface a été construit à l'aide du Modèle numérique de surface (MNS) de l'Agence de Géomatique du Centre-du-Québec (précision verticale < 1 m, mailles de $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$). Il s'agit d'un modèle qui représente l'élévation au-dessus de la végétation. Un traitement a donc été nécessaire afin de minimiser l'impact des pixels ayant comme valeur l'altitude d'un arbre ou d'un arbuste. Pour ce faire, l'image a été transformée en un fichier de points vectoriels. Un premier classement a été fait afin d'enlever les points ayant les valeurs les plus élevées. Dans un deuxième temps, en relation avec des orthophotos infrarouges, les points résiduels représentant des arbres et des arbustes ont été enlevés. Enfin, une interpolation (IDW) a été effectuée à partir des points conservés afin de créer une image matricielle représentant l'altitude de la surface de la tourbière. Le modèle a aussi été validé grâce au dénivelé de surface obtenu à l'aide de la station totale. Des données topographiques du Modèle numérique d'élévation (MNE) des cartes topographiques au 1:20 000 disponibles à l'UQAM (précision verticale de 5 m, mailles de $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$) ont également été utilisées.

La Grande tourbière de Villeroy contribue à l'alimentation de trois cours d'eau, soit la rivière du Chêne, la rivière Petite du Chêne et la rivière Bécancour. La délimitation de ces bassins versants dans le secteur de la tourbière est toutefois imprécise. Les limites de bassins versants ont donc été corrigées de manière à ce qu'elles correspondent aux hauts topographiques connus à partir des données du MNS corrigées pour les arbres, et aux réseaux de drainage identifiés.

L'épaisseur de la matière organique mesurée pour les 970 points a été utilisée afin de créer une couche matricielle représentant l'épaisseur de la matière organique. De plus, une série de points représentant le contour de la tourbière dont la valeur d'altitude est de 0 cm a été ajoutée afin de créer un effet de bassin. L'algorithme nn (Fan et al., 2005) a été utilisé pour interpoler les points de profondeurs. Un modèle d'altitude du substrat minéral (contact organo-minéral) a ensuite été créée en soustrayant l'épaisseur de tourbe interpolée du modèle de surface. La cartographie ainsi que les traitements géospatiaux (e.g. interpolation) ont été réalisés à l'aide des logiciels GRASS GIS et QGIS.

Des tests ont été réalisés au moyen d'un appareil géoradar dans le but de définir l'épaisseur des matériaux meubles sous la tourbe. Ces tests n'ont pas permis d'identifier de manière continue la stratigraphie du substratum et les essais furent interrompus. Des forages à la foreuse manuelle pionjar ont été réalisés à cinq stations, dans le but d'identifier l'épaisseur des dépôts sous-jacents à la tourbe. Des informations sur la nature du minéral recueillies au moment des sondages d'épaisseur de tourbe sont également disponibles à plusieurs stations. Les données du Système d'informations hydrogéologiques (MDDEFP, 2012), de même que la stratigraphie des deux forages réalisés à proximité de la tourbière (Larocque et al., 2013) ont été utilisées pour contraindre la position du till et l'épaisseur des dépôts sableux. L'interface sable-till a été interpolée dans ArcGIS.

La superficie totale de la tourbière a été délimitée grâce aux orthophotos et à des observations sur le terrain. En raison du manque de précision des données de surface résultant d'un couvert arborescent trop dense et d'un manque de données concernant les épaisseurs de matière organique dans certaines zones en périphérie de la tourbière, celles-ci non pas été incluses dans le modèle. L'interpolation de la profondeur et/ou de la surface dans ces zones était trop incertaine, il a été jugé préférable de ne pas les inclure. La superficie totale de la tourbière est de 10,37 km².

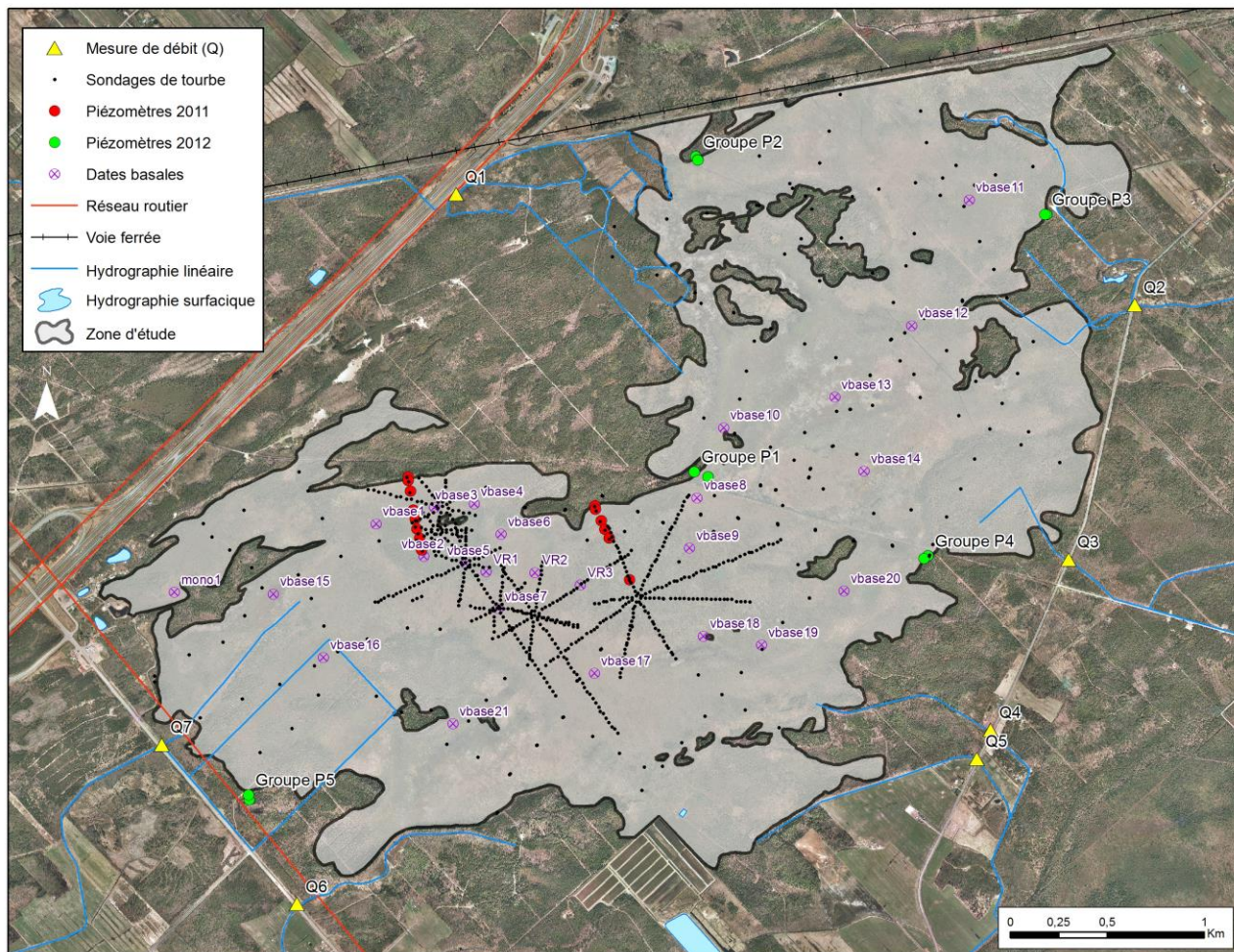


Figure 1. Localisation de toutes les stations d'échantillonnage

1.2 Hydrologie

1.2.1 Instrumentation

La tourbière a été instrumentée au printemps 2012 de 16 piézomètres de 2,54 cm (1") installés en cinq groupes de trois ou quatre piézomètres en périphérie de la tourbière (Figure 1). Dans chaque groupe, le premier piézomètre a été installé dans l'aquifère à l'extérieur de la tourbière, à moins de 10 m de la limite de la tourbière en utilisant la foreuse pionjar de l'UQAM (nommé par exemple 1.1). À l'exception de la station 2 où quatre piézomètres ont été installés, un couple de piézomètres a été mis en place dans la tourbière à moins de 50 m du premier piézomètre, le premier dans le minéral sous-jacent aux dépôts organiques et le deuxième dans la tourbe. Les données stratigraphiques montrent que le sable sous-jacent peut avoir une épaisseur de 0,2 à 2,3 m au-dessus du till (Tableau 1). Il est probable que cette épaisseur soit très variable au sein même de la tourbière.

Tableau 1. Stratigraphie des piézomètres mis en place dans la tourbière et dans le minéral

Piézomètre	x	y	z (m)	Stratigraphie (m)
1.1	-71,816127	46,381907	129,4	Sol: 0-0,3 m Sable moyen: 0,3-2,6 m Till: 2,6-3,7 m Sable: 3,7-4,8 m
1.2	-71,815175	46,381652	128,2	Dépôts organiques: 0,0-0,9 m Sable: 0,9-2,2 m
1.3	-71,815168	46,381653	128,2	Dépôts organiques: 0,0-1,0 m
2.1	-71,816422	46,396634	124,8	Sol: 0,0-0,7 m Sable: 0,7-1,2 m Till: 1,2-2,9 m
2.2	-71,816294	46,396497	126,7	Sable moyen: 0-3,0 m Till: 3,0-4,0 m
2.3	-71,816167	46,396352	125,9	Dépôts organiques: 0,0-1,6 m Sable: 1,6-1,9 m
2.4	-71,816165	46,396347	125,9	Dépôts organiques: 0,0-1,2 m
3.1	-71,792724	46,39408	127,4	Sol : 0,0-0,3 m Sable moyen: 0,3-1,0 m Sable fin: 1,0-1,5 m Till: 1,5-2,1 m
3.2	-71,792831	46,394087	126,8	Dépôts organiques: 0-0,8 m Sable moyen: 0,8-1,8 m
3.3	-71,792839	46,394092	126,9	Dépôts organiques: 0,0-0,9 m
4.1	-71,800037	46,37798	128,3	Sol: 0-0,4 m Sable moyen: 0,4-2,1 m Till: 2,1-2,7 m
4.2	-71,800581	46,378037	127,5	Dépôts organiques 0-0,7 m Sable moyen: 0,7-2,3 m
4.3	-71,800572	46,378038	127,5	Dépôts organiques: 0,0-0,7 m
5.1	-71,845493	46,366331	128,3	Sol: 0,0-0,5 m Sable moyen: 0,5-2,2 m Till: 2,2-2,7 m
5.2	-71,84555	46,366547	127,5	Dépôts organiques: 0,0-0,4 m Sable grossier: 0,4-0,6 m Till: 0,6-1,7 m
5.3	-71,845546	46,366552	127,4	Dépôts organiques: 0,0-0,5 m

Les niveaux d'eau ont été mesurés dans tous les nouveaux piézomètres à sept reprises entre juin et novembre 2012. À ces données, s'ajoutent celles recueillies dans le cadre d'un autre projet (financement FRQNT-Partenariats actions concertées sur les eaux souterraines; Ferlatte, 2013) où un suivi mensuel des niveaux d'eau a été réalisé de mai à novembre 2011. De plus, 24 élévations de niveaux d'eau ont été mesurées en juin 2012 dans des fossés, des ruisseaux et des étangs situés à proximité de la tourbière.

1.2.2 Carte piézométrique

La carte piézométrique de la tourbière a été construite à l'aide de tous les niveaux piézométriques disponibles pour les mois de juin 2011 et 2012. Cette carte est donc représentative de la piézométrie du début de l'été seulement, mais donne néanmoins une idée générale du sens des écoulements souterrains. Des points de contrôle complémentaires (38) ont été utilisés à l'endroit des fossés et rivières dont les élévations ont été déterminées à l'aide du MNS. Ces données permettent d'interpoler les niveaux au-delà de la limite de la tourbière, dans l'aquifère superficiel environnant. La méthode d'interpolation par co-krigeage a été utilisée, de manière à contraindre l'interpolation à la topographie. L'information topographique d'élévation devient complémentaire aux données de niveaux d'eau dans les endroits où il y a peu de mesures de niveau d'eau. Le co-krigeage a été effectué à l'aide de l'outil Geostatistical analyst Wizard dans le logiciel ArcGIS. Les isopièzes interpolées ont ensuite été corrigées manuellement de manière à respecter à la fois l'ensemble des données piézométriques disponibles et les grandes directions d'écoulement identifiées par l'interpolation, tout en respectant les niveaux d'eau disponibles.

1.2.3 Bilan hydrique

Le bilan hydrique de la Grande tourbière de Villeroy a été calculé entre mai et novembre 2012. Le bilan hydrique mensuel a été réalisé à l'aide de l'équation suivante, avec un pas de temps mensuel :

$$\Delta S = (P + ES_E) - (ETP + Q_S + ES_S) \quad \text{Équation (1)}$$

où

ΔS = Variation de l'emmagasinement dans la tourbière (mm);

P = Précipitations (mm);

ES_E = flux d'eau souterraine entrant dans la tourbière (mm);

ES_S = flux d'eau souterraine sortant de la tourbière (mm);

ETP = Évapotranspiration potentielle (mm);

Q = Débits sortant de la tourbière via les exutoires (mm);

La tourbière est drainée par sept ruisseaux et fossés principaux. À ces endroits (Figure 1), le débit a été mesuré entre avril et novembre 2012. Les débits étant parfois très faibles, ils ont été mesurés à l'aide de la méthode du flotteur, avec une bouteille de plastique de 500 ml remplie d'eau. Le temps requis pour franchir une distance donnée, généralement de 1 à 5 m selon la configuration de l'exutoire, a été chronométré trois fois et la moyenne des trois mesures divisées par la distance parcourue correspond à la vitesse. À chaque station et lors de chaque prise de mesure de débit, la tranche d'eau moyenne et la largeur de l'exutoire ont été mesurées. Le débit a été calculé en multipliant la section d'écoulement par la vitesse. Aucun cours d'eau ne contribue à l'alimentation de la tourbière.

Les données de précipitations proviennent de la station de Lemieux située dans la MRC de Bécancour, à 25 km à l'ouest de la tourbière (Environnement Canada, 2013). La méthode d'Oudin et al. (2005) a été utilisée pour calculer l'évapotranspiration potentielle de la tourbière. Les températures moyennes journalières requises pour les calculs proviennent également de la station Lemieux. Les flux souterrains latéraux entrants et sortants de la tourbière ont été calculés à l'aide de la méthode de Rosenberry et al. (2008) qui est basée sur la loi de Darcy (Annexe 1). Les échanges verticaux avec les dépôts minéraux sous-jacents n'ont pas été pris en compte dans les calculs. Ces échanges peuvent exister localement, mais en raison de l'épaisseur relativement faible et de la non-continuité spatiale des dépôts sableux sous la tourbière (voir section 2.1.3), il est probable qu'ils ne soient pas importants à l'échelle de la tourbière.

La variation de l'emmagasinement résultant du bilan hydrique indique s'il y a eu une augmentation ou une diminution du stock d'eau dans la tourbière au cours d'un mois donné. Une variation positive signifie qu'il y a un emmagasinement d'eau dans les dépôts organiques, tandis qu'une variation négative signifie qu'il y a eu perte d'eau de la tourbière à l'environnement (via ETP, ES_s ou Q_s). Cette variation d'emmagasinement calculée par le bilan hydrique peut être comparée à celle mesurée à partir des piézomètres en divisant le terme ΔS par la porosité effective de la tourbe. Une valeur de porosité effective de 40 % est utilisée ici, ce qui est représentatif des valeurs rapportées dans la littérature (Levison et al., 2013; Rosa et Larocque, 2008).

1.3 Paléoécologie

1.3.1 Échantillonnage des carottes de tourbe

Afin d'établir un modèle du développement spatial de la tourbière au cours du temps depuis son origine, nous avons procédé à l'échantillonnage de la base du dépôt organique en 22 points. Les points d'échantillonnage ont été nommés Vbase 1 à Vbase 21 (carottes sédimentaires), en plus d'un point nommé Vmono (monolithe). Dans la mesure du possible, le contact organo-minéral a été récolté, mais ce ne fut toutefois pas toujours possible. En effet, en certains endroits, le caractère compact du matériel minéral empêchait l'enfoncement de la pointe du carottier dans celui-ci (la pointe qui mesure 10 cm, voir Figure 2, est responsable de ce refus à l'enfoncement). Puisque la pointe touchait quand même chaque fois le minéral, dans ces cas spécifiques il manque tout au plus 10 cm d'accumulation sédimentaire pour obtenir la séquence organique complète. L'échantillonnage des carottes a été réalisé à l'aide d'un carottier russe (Jowsey, 1966) doté d'une chambre de 50 cm de longueur (Figure 2). Seuls les 50 cm à la base du dépôt furent récoltés. Des doublons ont aussi été échantillonnés afin de s'assurer d'avoir suffisamment de matériel pour les analyses paléoécologiques et radiochronologiques. Le choix des points d'échantillonnage a été déterminé en fonction des données d'épaisseurs de tourbe et afin d'avoir un réseau représentatif de l'ensemble de la tourbière. Les carottes ont été emballées dans une pellicule de papier cellophane et dans du papier d'aluminium et les profondeurs (cm) de chacun des segments ont été soigneusement notées. Elles ont ensuite été placées en position horizontale dans des gouttières pour leur transport au laboratoire où elles ont été entreposées au réfrigérateur à une température de 4°C pour éviter le développement de moisissures et leur dessèchement.

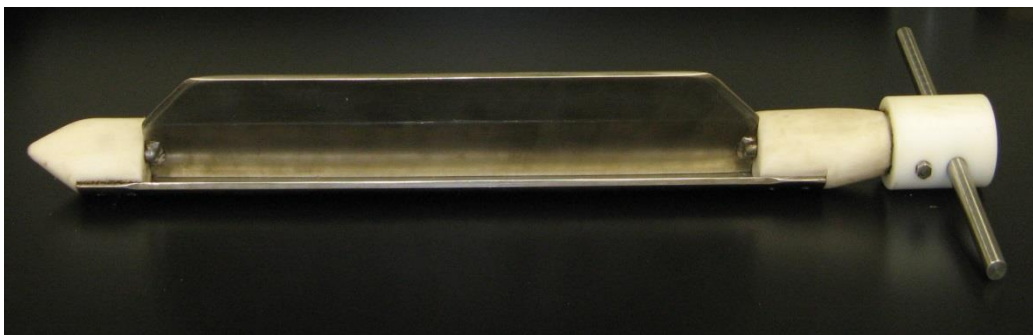


Figure 2. Carottier russe employé pour l'extraction des sédiments. La chambre d'échantillonnage est d'une longueur de 50 cm. La base du carottier (pointe blanche) est à gauche.

1.3.2 Analyses paléoécologiques

Les travaux en laboratoire ont été réalisés au Laboratoire de paléoécologie terrestre du Centre d'études nordiques (CEN) de l'Université Laval. Les carottes ont d'abord été nettoyées (élimination d'une couche de matière organique superficielle d'environ 1-2 mm d'épaisseur) afin d'éliminer les possibles contaminations qui auraient pu survenir lors de l'échantillonnage. Elles ont ensuite été coupées en tranches contiguës de 1 cm d'épaisseur. Chaque tranche fut placée dans un sac numéroté et entreposé au réfrigérateur jusqu'au moment des analyses.

Analyses macrofossiles

Pour chacune des carottes, les analyses macrofossiles ont été réalisées sur des tranches de 1 cm d'épaisseur à un intervalle régulier de 4 cm, à l'exception du point d'échantillonnage Vmono dont l'intervalle fut de 2 cm. Au total, 287 échantillons ont été analysés pour l'ensemble des points d'échantillonnage. Les échantillons ont été préparés selon la méthode de Bhiry et Fillion (2001). Ils ont été bouillis pendant quelques minutes dans une solution d'eau et d'hydroxyde de potassium 10 % afin de désagréger la matière organique. Ils furent ensuite tamisés à travers une série de deux tamis superposés de maille 425 et 180 µm. Les pièces macrofossiles (feuilles, graines, charbons de bois, etc.) ont été dénombrées et identifiées à la loupe binoculaire à un grossissement de 40× à l'aide guides de références (Montgomery, 1977; Lévesque et al., 1988) et de la collection de référence de pièces macrofossiles (pièces fossiles et actuelles) du Laboratoire de paléoécologie terrestre de l'Université Laval.

Pour chacun des échantillons, les analyses macrofossiles ont consisté :

- à l'évaluation, en pourcentage de volume, des principales composantes de la matrice des sédiments organiques (sphaignes, mousses brunes, fragments ligneux, herbacées, indéterminables) ;
- à l'identification et au dénombrement des pièces macrofossiles provenant des plantes vasculaires (arbres, arbustes, herbes) ;
- à l'identification et au dénombrement ou à l'estimation de l'abondance des particules des charbons de bois et de pièces macrofossiles autres que celles des plantes vasculaires (cladocères, bryozoaires, sclérotés de champignon).

Pour chacun des points d'échantillonnage, les résultats des analyses macrofossiles sont présentés sur la forme d'un diagramme macrofossile contenant les informations suivantes : la ou les datations radiochronologiques (en années étalonnées A.A.), les profondeurs (cm), la composition de la matrice de la tourbe (en pourcentage), les dénombrements des pièces macrofossiles, ainsi que le contenu en matière minérale (en pourcentage). Les dénombrements ont été standardisés pour un volume de 5 cm³ (nombre de macrorestes par volume sédimentaire de 5 cm³ mesuré par déplacement d'eau). Cette standardisation est nécessaire afin de pouvoir comparer les résultats des dénombrements d'un niveau à l'autre au sein d'un même point d'échantillonnage. Les diagrammes ont été construits à l'aide du logiciel *Palaeo Data Plotter* version 1.0 (Juggins, 2002). Les diagrammes macrofossiles des 22 bases de tourbe sont présentés à l'Annexe 2.

Détermination du contenu en matière organique

Des analyses des contenus respectifs en matière organique et en matière minérale des carottes sédimentaires ont été réalisées à l'aide de la méthode de la perte au feu afin, entre autres, d'identifier la transition organo-minérale au sein des carottes. Les analyses ont été effectuées au Laboratoire de pédologie forestière de la Faculté de Foresterie, de géographie et de géomatique de l'Université Laval. Elles ont été réalisées à un intervalle stratigraphique de 4 cm aux profondeurs où du matériel minéral était visible dans les tamis lors du tamisage en prévision des analyses macrofossiles. À cette fin, un sous-échantillon de volume de 1 cm³ a été traité selon le protocole de Heiri et al. (2001). Les résultats sont exprimés sous la forme de pourcentages.

Datations radiochronologiques

Des datations radiochronologiques (¹⁴C) par spectrométrie de masse par accélérateur (SMA) ont été réalisées pour chacune des bases de tourbe. Les datations ont porté sur des échantillons de volume d'environ 1 cm³ et de poids sec de quelques milligrammes. Il n'a pas été possible de dater spécifiquement des pièces macrofossiles au contact organo-minéral car elles n'étaient pas présentes en quantité suffisante. D'autres datations ont aussi été effectuées en quelques points d'échantillonnage (en raison de la présence de charbons de bois, de la composition stratigraphique, etc.) et celles-ci furent réalisées sur des macrorestes terricoles. Les datations ont été effectuées au Laboratoire de

radiochronologie du CEN (préparation des échantillons) et au Keck Laboratory de l'Université de Californie à Irvine (datation). Les âges obtenus du laboratoire en années conventionnelles (années ^{14}C) ont été transformés en années étalonnées avant aujourd'hui (années A.A.) à l'aide du logiciel CALIB 6.0 (Stuiver et Reimer, 1993; Reimer et al., 2009) et arrondis à la décennie près. Pour la présente étude, les dates basales des carottes sédimentaires VR-1, VR-2 et VR-3 de l'étude paléoécologique de Lavoie et Colpron-Tremblay (2013) ont également été utilisées.

2 RESULTATS ET DISCUSSION

2.1 Modèle 3D de la tourbière

2.1.1 Topographie

Topographie de la surface de la tourbière

Les altitudes les plus élevées se trouvent dans la partie nord-ouest au sud de la Petite ligne qui correspond notamment au secteur de l'actuel belvédère (Figure 3). On distingue nettement à cet endroit un bombement typique des tourbières ombrotrophes. La portion sud-est de la tourbière présente aussi une structure bombée. Le cortège floristique des secteurs ombrotrophes est notamment dominé par l'arbuste *Chamaedaphne calyculata*, une éricacée typique des tourbières ombrotrophes. De façon générale, l'altitude de la surface diminue de part et d'autre des bombements. D'autres secteurs ombrotrophes de moins grande ampleur sont aussi présents. Les altitudes sont beaucoup moins élevées dans la section centrale de part et d'autre de la petite ligne où prévalent des conditions minérotrophes plus humides caractérisées par un couvert végétal herbacée. La différence d'altitude entre le secteur le plus bombé (altitude : 131 m) et les endroits les moins élevés en bordure (altitude : 125 m) est de près de 6 m. Il est possible que la Petite ligne ait eu un léger effet sur l'altitude (compaction de la tourbe), mais des données paléocéologiques à cet endroit seraient nécessaires pour vérifier ce possible effet.

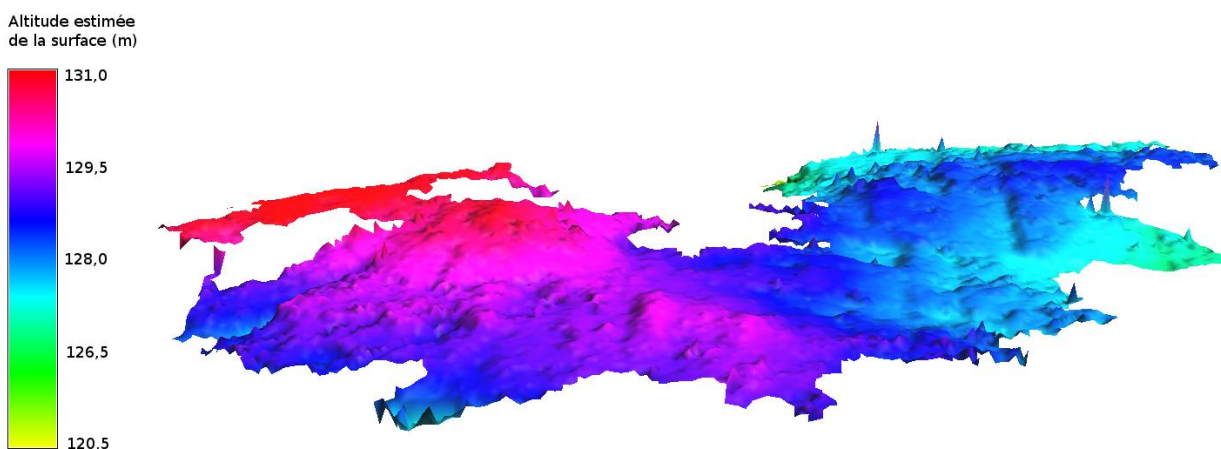


Figure 3. Topographie de surface de la tourbière

Limites des bassins versants

Les limites des bassins versants alimentés par la Grande tourbière de Villeroy séparent la superficie totale de la tourbière en trois territoires (Figure 4). La plus grande partie de la tourbière est incluse dans le bassin de la rivière du Chêne, avec 5,9 km² représentant 57,2 % de la totalité de la tourbière. La tourbière est en partie comprise dans les bassins versants de la Petite rivière du Chêne (36,3 % de sa superficie) et dans une moindre mesure de la rivière Bécancour (6,5 % de sa superficie). L'écoulement principal à l'intérieur de la tourbière est donc principalement dirigé vers l'est et le nord-est, soit vers le bassin versant de la rivière du Chêne.

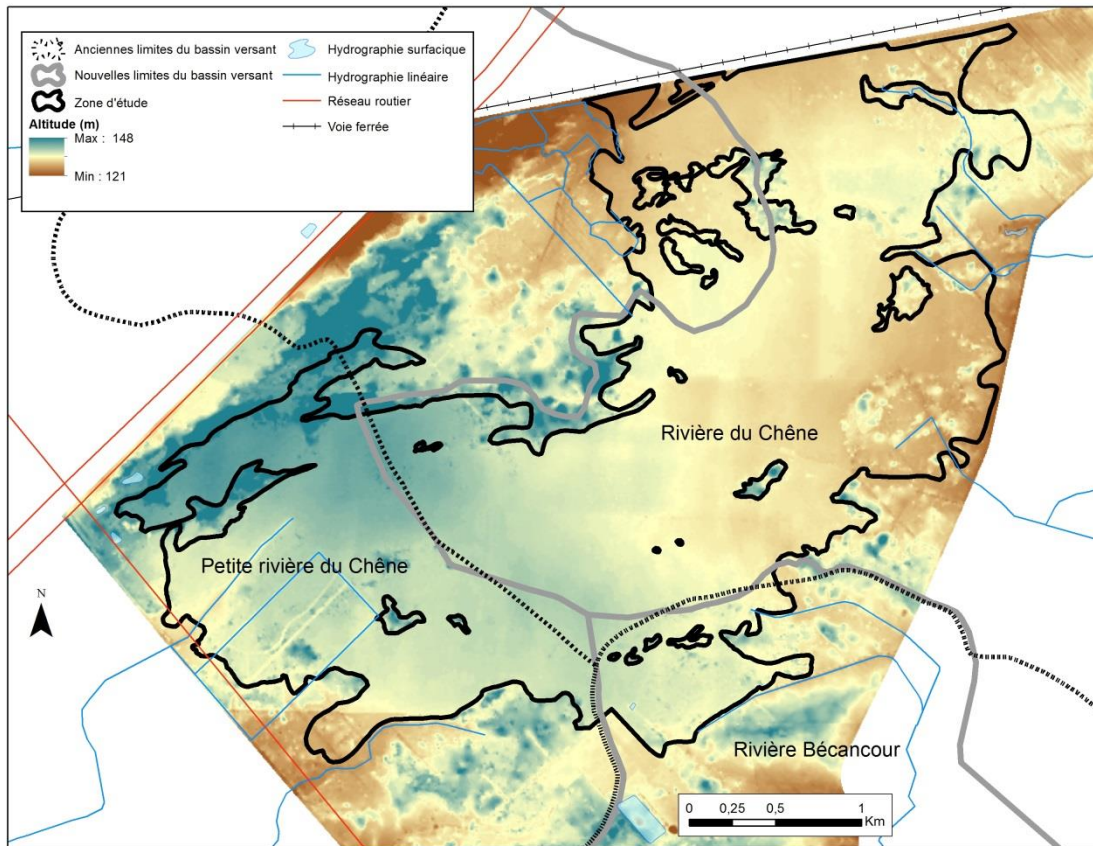


Figure 4. Limites des bassins versants alimentés par la Grande tourbière de Villeroy

2.1.2 Épaisseur des dépôts organiques

Pour l'ensemble de la tourbière, l'épaisseur moyenne de la matière organique est de 130 cm (Figure 5). Les épaisseurs les plus importantes sont de l'ordre de 400 cm et plus, l'épaisseur maximale mesurée

étant de 488 cm. Les épaisseurs les plus importantes se trouvent essentiellement dans le secteur bombé, de même que dans une petite zone du côté nord longeant la bordure de la tourbière près de la dune forestière. Les secteurs caractérisés par des épaisseurs de tourbe supérieures à 400 cm représentent 2.1% (~20 ha) de l'actuelle superficie de la tourbière, tandis que les endroits caractérisés par des épaisseurs variant de 300 à 400 cm couvrent 44 ha, c'est-à-dire 4,2 % de la superficie. Pour la majeure partie de la tourbière, les épaisseurs sont généralement inférieures à 250 cm et sont de l'ordre de 100 cm ou moins en périphérie, notamment pour une vaste zone du côté nord (au nord de la petite ligne) où la tourbe est très peu épaisse. Quelques portions non situées en périphérie présentent aussi des épaisseurs inférieures à 100 cm en raison d'une altitude élevée de la topographie accidentée du substrat minéral à ces endroits (voir plus bas). Il est à noter qu'aucune argile ni gyttja (sédiment lacustre) n'a été observée sous la tourbe, même aux endroits ayant les plus grandes épaisseurs de matière organique qui sont susceptibles d'être ceux les plus anciens de la tourbière.

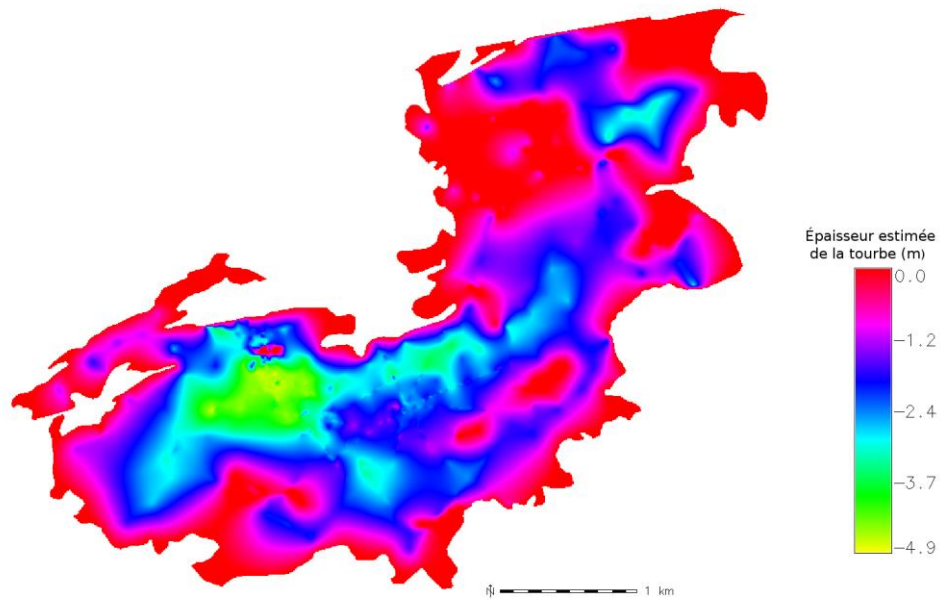


Figure 5. Épaisseur estimée en mètres du dépôt organique

2.1.3 Topographie du substrat minéral

La topographie du substrat minéral sur lequel repose la tourbe a été obtenue à partir de la détermination de la topographie de surface et des mesures d'épaisseur de la matière organique. Grâce au modèle en trois dimensions de la topographie sous-jacente à la tourbière (Figure 6), il est possible de distinguer

nettement qu'une majeure portion du site repose au sein d'une importante dépression ayant la forme d'un chenal orienté dans le sens de la longueur de la tourbière, du sud-ouest vers le nord-est. Cette orientation est la même que celle des dunes. La dépression topographique est d'une profondeur de 4 à 5 m par rapport aux secteurs adjacents plus élevés et présente des bordures très abruptes. Une seconde dépression de grande ampleur se trouve à l'extrémité de la tourbière du côté nord-est. Elle est isolée du chenal principal par une crête, mais présente une profondeur similaire. La superficie minimale représentée par les deux dépressions est de 107 ha, ce qui représente 10,5 % de la superficie de la tourbière. Ces deux dépressions pourraient témoigner, à priori, de deux systèmes tourbeux ayant évolué séparément au départ pour ensuite coalescer. D'autres dépressions de taille plus modeste sont aussi présentes.

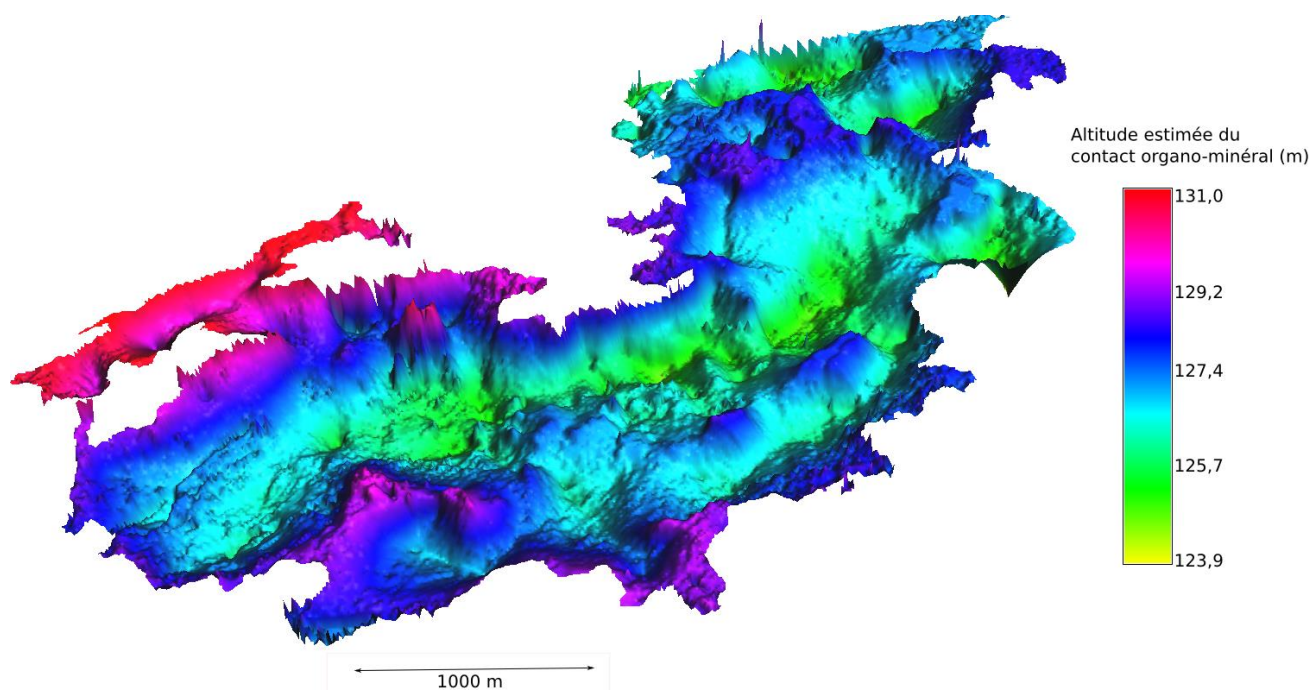


Figure 6. Modèle en trois dimensions de la topographie sous-jacente à la tourbière

Une seconde caractéristique particulière de la topographie du substrat minéral consiste en la présence de crêtes surélevées associées à un ancien système de dunes fossilisées (alternance de crêtes et d'interdunes), comme le système de dunes stabilisé par la végétation forestière en périphérie de la tourbière et, de façon plus générale, dans les régions de Villeroy et Lotbinière par exemples. Quelques crêtes fossiles atteignent une hauteur très élevée par rapports aux creux (ou interdunes) adjacents, soit plus de 7 m dans certains cas. Encore une fois, l'orientation des crêtes fossilisées est similaire à celle des autres dunes de la région (Filion, 1987; David, 1988).

La matière organique repose très souvent sur du sable dont la texture (fine, moyenne, grossière) est variable d'un endroit à l'autre. Ailleurs, la tourbe se trouve directement sur le till. La Figure 7 présente la localisation des sept coupes correspondant aux Figures 8 à 14. Ces coupes, qui illustrent des tranches du modèle 3D de la tourbière, illustrent bien la variation de l'épaisseur des dépôts sableux sous les dépôts organiques de même que les zones de contact tourbe-till.

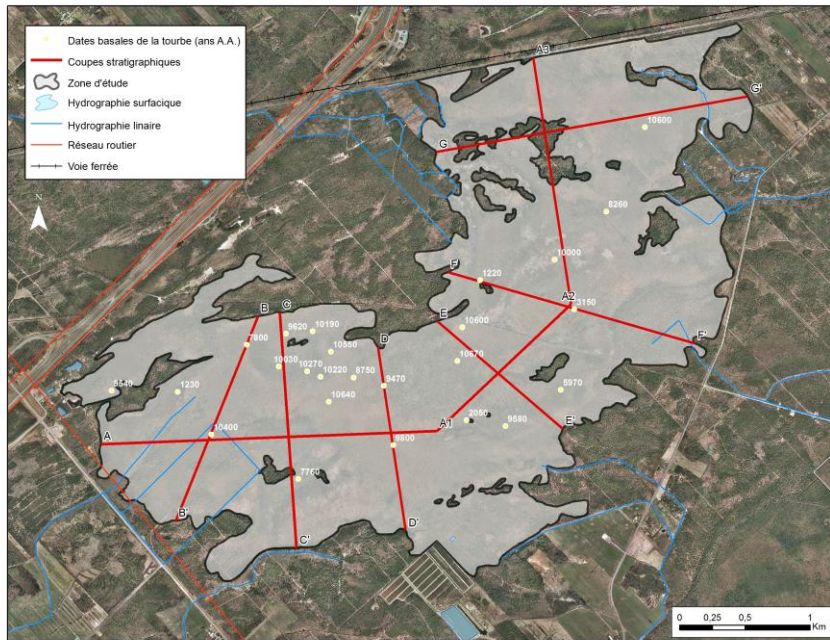


Figure 7. Localisation des coupes topographiques illustrées aux figures 8 à 14.

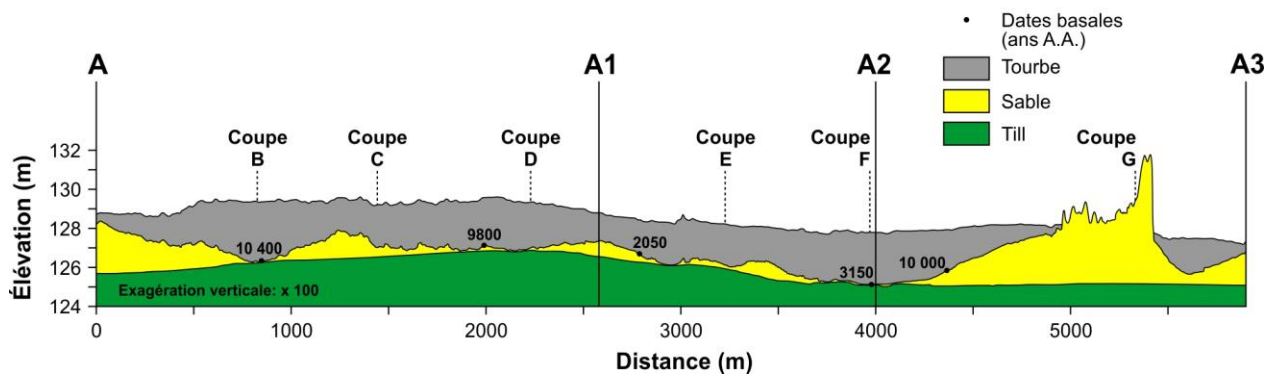


Figure 8. Coupe longitudinale (A) de la tourbière

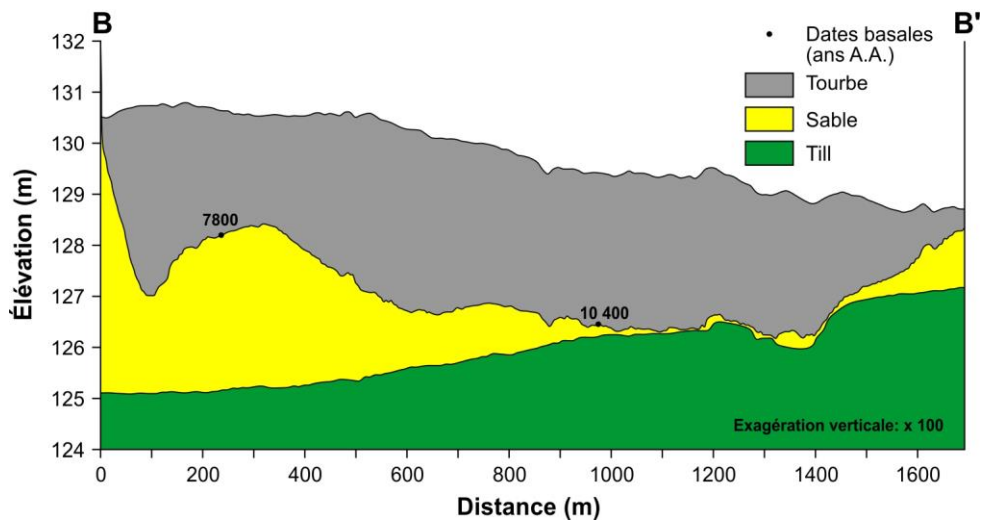


Figure 9. Coupe B

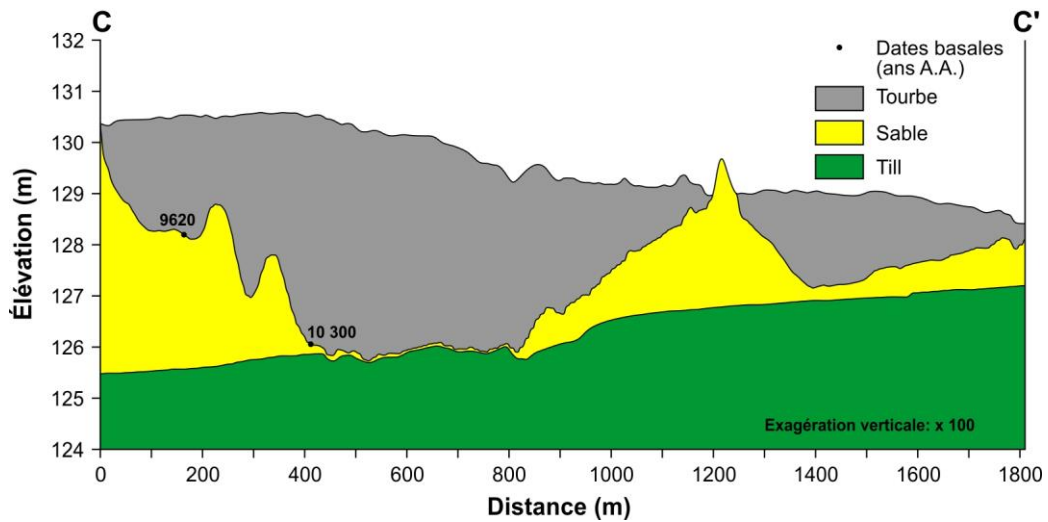


Figure 10. Coupe C

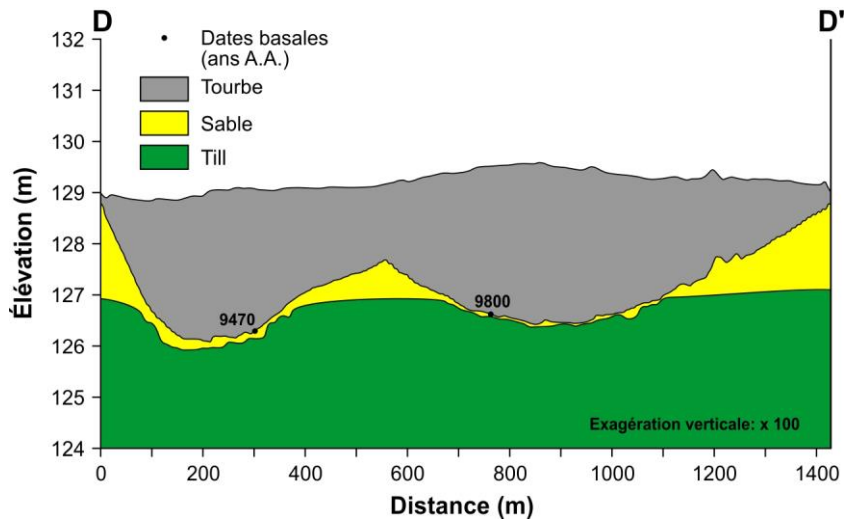


Figure 11. Coupe D

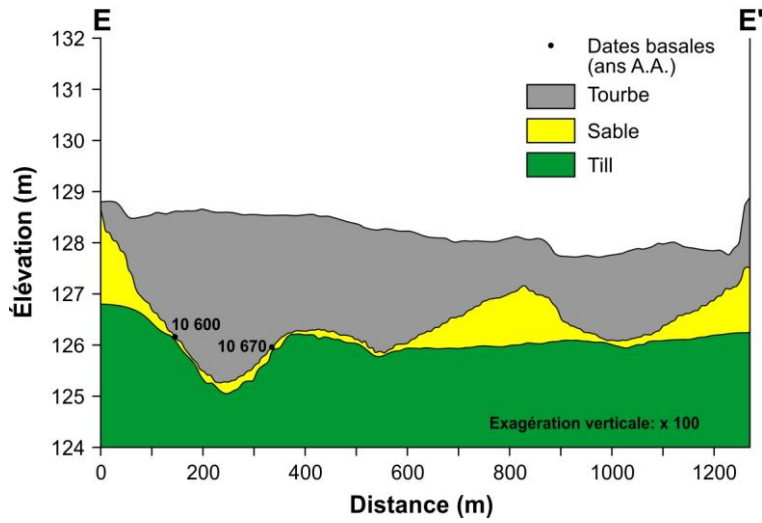


Figure 12. Coupe E

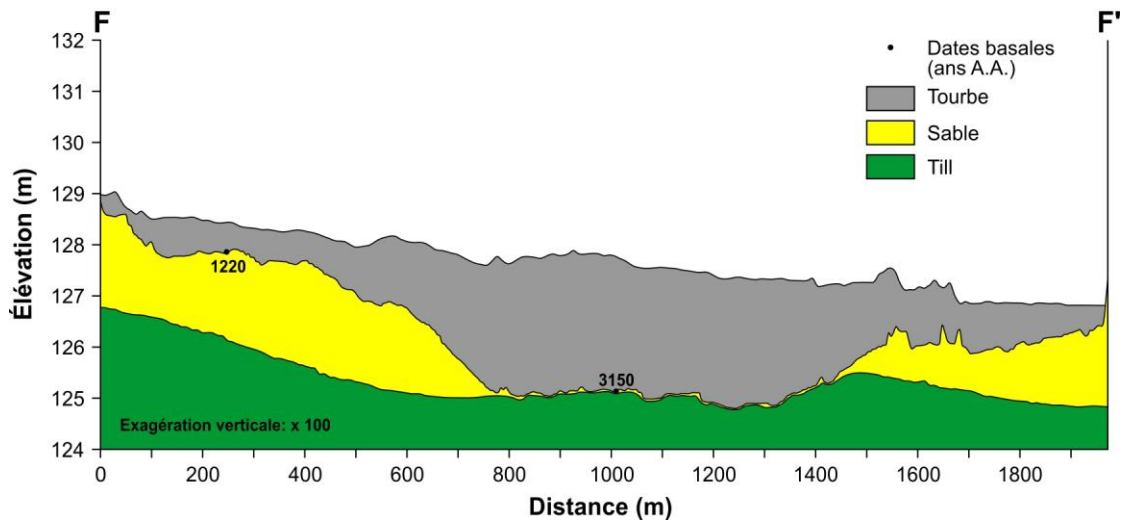


Figure 13. Coupe F

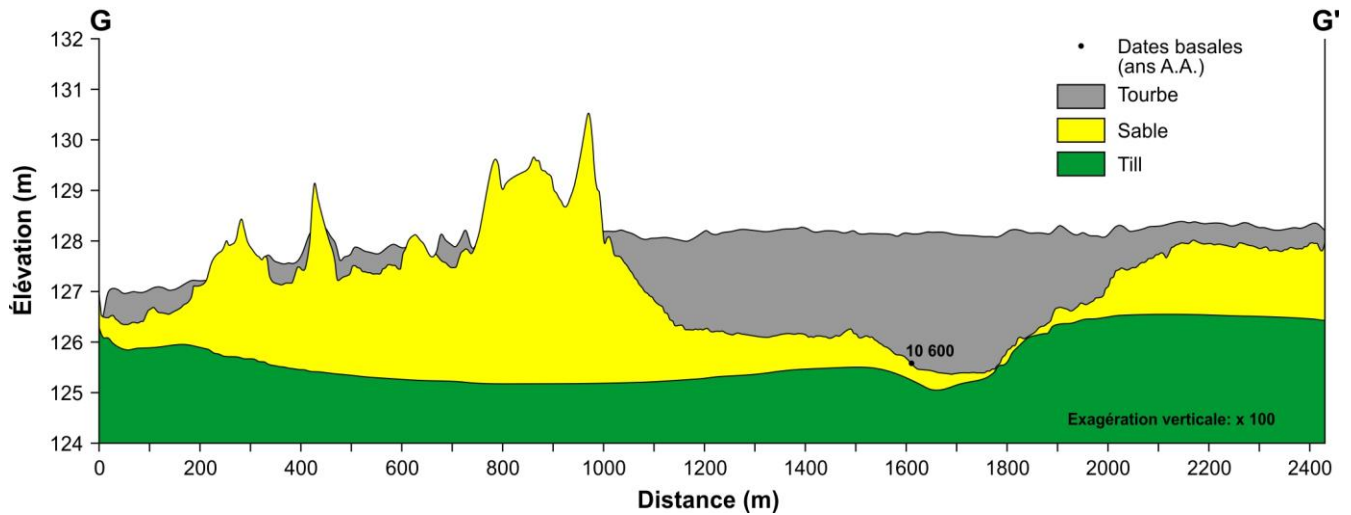


Figure 14. Coupe G

2.1.4 Carte piézométrique

Les niveaux piézométriques dans la tourbière (Figure 15) sont les plus élevés (maximum 129,5 m) dans la portion ombrotrophe située à l'ouest de la tourbière. Les niveaux piézométriques diminuent rapidement au nord-est de la tourbière, soit à la jonction du chemin de fer et de l'autoroute 20 (minimum 125,5 m). Ceci concorde avec la dépression topographique visible sur le MNS. L'eau souterraine s'écoule en partie vers le sud-ouest (cf. flèches sur la Figure 15) en direction du bassin de la rivière Petite rivière du Chêne, et vers le nord-est en direction du bassin de la rivière du Chêne. Le gradient hydraulique vers le nord-est est faible de l'ordre de 0,063 %. Les gradients hydrauliques sont élevés dans certains secteurs de la périphérie de la tourbière, notamment à l'ouest en raison des coteaux sableux situés en bordure à cet endroit.

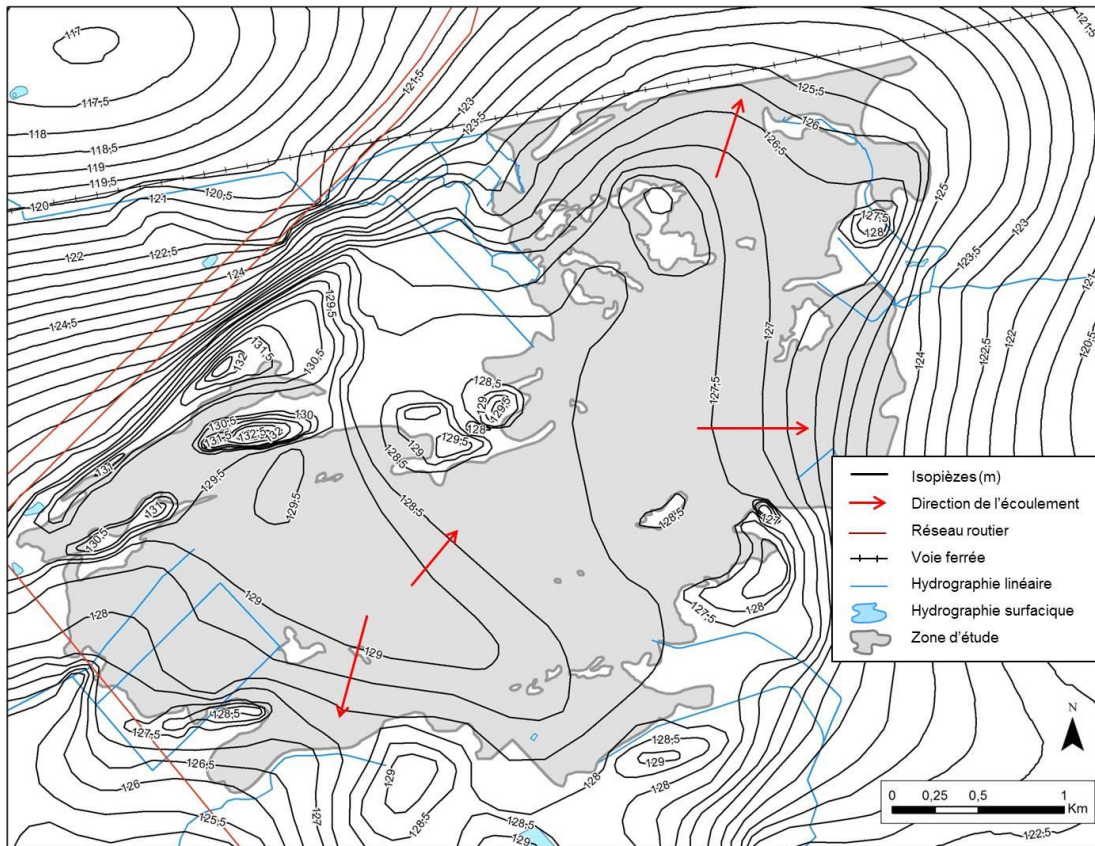


Figure 15 : Carte piézométrique de la Grande tourbière de Villeroy

Il est possible que la compaction et le remplissage liés à la construction de l'ancien chemin de fer de la Petite Ligne influencent l'écoulement au sein des dépôts organiques. Les données mesurées n'ont

toutefois pas permis de mettre ceci en évidence. Aucune influence des trottoirs de bois sur l'écoulement de l'eau dans la tourbe n'a été mise en évidence. Il est cependant peu probable que ceux-ci perturbent l'écoulement souterrain puisqu'ils ne perturbent pas de manière significative les dépôts organiques.

2.2 Bilan hydrique de la tourbière

Précipitation, évapotranspiration et température

Au cours de l'année 2012, la station de Lemieux a mesuré 943 mm de précipitations. Cette quantité est inférieure à la moyenne annuelle de 1085 mm enregistrée entre 1971-2000 pour la MRC de Bécancour où est située la station de Lemieux (Environnement Canada, 2013). Les mois d'avril à novembre 2012 ont reçu 65,1 % des précipitations de l'année (Figure 16). La moyenne des températures mensuelle de l'année 2012 a été de 3,7°C, ce qui est inférieur à la température moyenne annuelle de période 1971-2000 (4,1°C). Le mois le plus chaud pendant la période étudiée a été celui d'août (16,1 °C) et le plus froid celui de novembre (-2,4 °C). Entre avril et novembre 2012, l'évapotranspiration calculée avec la formule d'Oudin et al. (2005) est estimée à 504 mm. Ceci représente 95,6 % de l'évapotranspiration annuelle (526 mm). L'évapotranspiration atteint un maximum en juillet, soit 107 mm, ce qui concorde avec le maximum annuel de température. Cette forte évapotranspiration est plus du double des précipitations de juillet qui est de 46 mm.

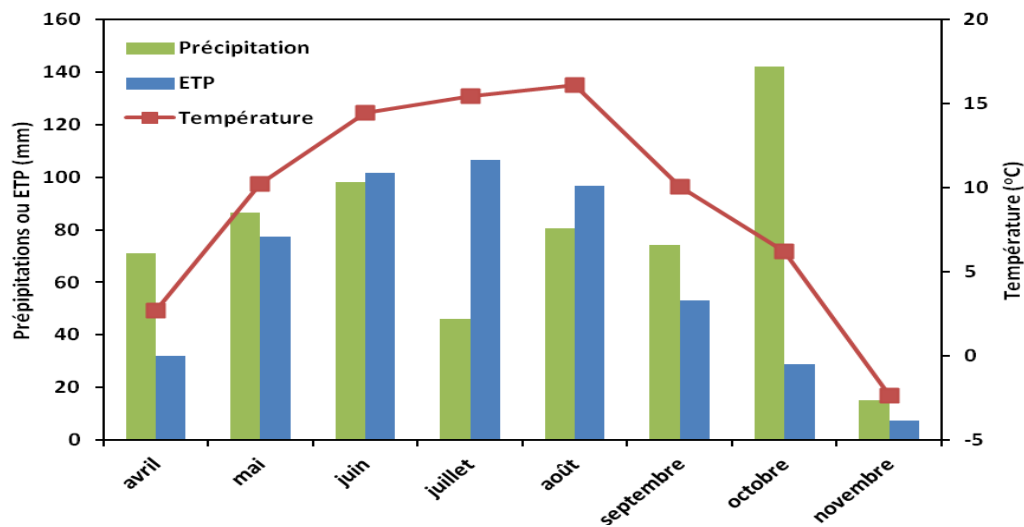


Figure 16 : Précipitation, évapotranspiration et température d'avril à novembre 2012

Débits aux exutoires

Les débits aux exutoires (Figure 17) montrent une variation bimodale entre avril et novembre, à l'exception de l'exutoire Q1 (situé non loin de l'autoroute 20 dans le bassin de la Petite rivière du Chêne) où les débits les plus grands ont été mesurés en avril. Les débits importants aux autres exutoires ont été mesurés au début juin et à la fin octobre. À tous les exutoires, les débits de début août et fin septembre ont été à peu près nuls. L'exutoire Q1 est celui qui draine les volumes d'eau les plus importants au printemps et à l'automne. L'exutoire Q2, qui s'écoule vers la rivière du Chêne, a aussi des débits importants en juin et juillet. Les exutoires 4 et 5 qui drainent la tourbière vers la rivière Bécancour ont les débits les plus faibles d'avril à novembre.

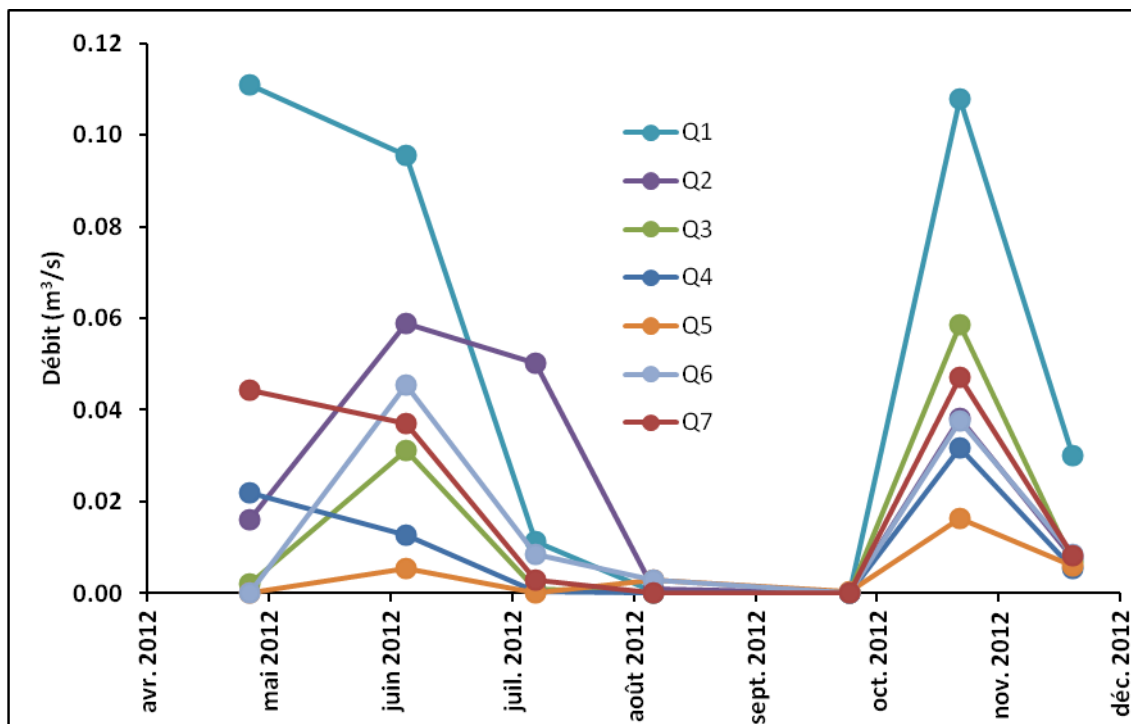


Figure 17 : Débits mesurés aux sept exutoires

Variations de niveaux piézométriques

Le niveau de la nappe est le plus élevé au piézomètre 1 (au milieu du côté nord de la tourbière) et le plus bas au piézomètre 2 (situé au nord de la tourbière). Le piézomètre 5 a été à sec à quatre reprises pendant l'été 2012, sans doute en raison de sa faible profondeur (0,5 m). À l'exception du piézomètre 5, les niveaux les plus élevés ont été mesurés au début juin. De manière générale, les niveaux ont ensuite baissé jusqu'à la fin septembre, pour remonter ensuite jusqu'à la fin novembre. Les variations moyennes de niveaux dans les piézomètres situés dans la tourbe d'une mesure à l'autre sont négatives (i.e. les niveaux baissent) jusqu'à la fin septembre avec une baisse de niveau maximale de 0,10 m entre juin et juillet. Les changements de niveaux sont variables d'une station à l'autre, mais à l'exception du piézomètre 4.3 entre juillet et août, ils suivent tous des tendances similaires (il n'a pas été possible d'expliquer ce comportement particulier de la nappe au piézomètre 4.3). De manière générale, les variations sont négatives (baisse de la nappe) de juin à septembre avec une baisse moyenne maximale de 0,10 m entre le début juin et le début juillet. Les variations de niveau sont ensuite positives (remontée des niveaux) en octobre et novembre, avec une augmentation du niveau maximale de 0,12 m entre la fin septembre et la fin octobre (Figure 18).

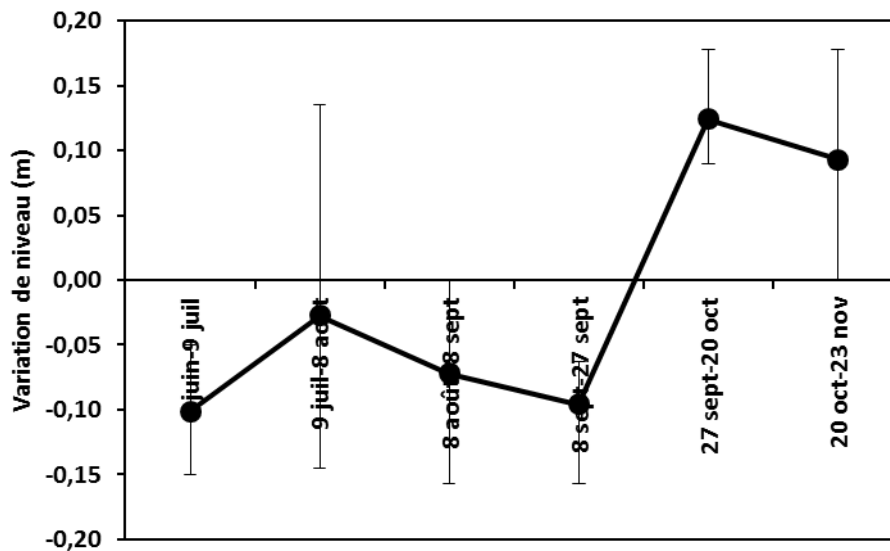


Figure 18 : Variation moyenne de niveaux aux piézomètres dans la tourbe (les barres d'erreurs représentent les valeurs minimales maximales observées aux cinq stations)

Flux d'eau souterraine

La Grande tourbière de Villeroy reçoit beaucoup plus d'eau souterraine des dépôts meubles qu'elle n'en libère (voir Tableau 2 pour les résultats et Annexe 1 pour les calculs). Six segments fournissent de l'eau à la tourbière tandis que la tourbière s'écoule vers l'aquifère dans cinq segments, pour un débit total de 6912 m³/j qui entre dans la tourbière. Les segments qui ont un débit positif sont ceux pour lesquels les gradients hydrauliques (les directions d'écoulement souterrain) sont orientés de l'aquifère sableux vers la tourbière. À l'inverse, les segments où la tourbière qui ont un débit négatif sont ceux pour lesquels les gradients hydrauliques sont orientés de la tourbière vers l'aquifère. L'importance du débit échangé (en valeur absolue) dépend principalement de la longueur du segment et de la valeur du gradient hydraulique. Les volumes échangés varient probablement pendant l'année et d'une année à l'autre, mais ceci n'a pu être estimé puisque les calculs sont basés sur la carte piézométrique de juin.

Tableau 2: Sommaire des flux souterrains pour chacun des segments de la tourbière

Segments	Q (m ³ /j)
1	4455
2	2733
3	-875
4	188
5	-105
6	230
7	-24
8	386
9	-29
10	66
11	-113
TOTAL	6912

Bilan hydrique mensuel

La Figure 19 présente la variation temporelle des différentes composantes du bilan hydrique entre juin et novembre 2012. Les précipitations représentent le principal apport d'eau à la tourbière. Cependant, les dépôts meubles en périphérie de la tourbière jouent un rôle important dans son alimentation en eau. Selon les flux calculés, la contribution de l'aquifère superficiel correspond à 26,5 % des précipitations. Ce volume d'eau est non négligeable dans le bilan hydrique de la tourbière et la proportion est similaire à celle rapportée pour d'autres tourbières (e.g. Fournier et al., 2007). Cette information est très importante pour la gestion du territoire autour de la tourbière elle-même et pourrait être utilisée pour

délimiter certains secteurs qui doivent être protégés dans le but d'assurer l'alimentation en eau souterraine de la tourbière et le maintien de la diversité végétale qui s'y trouve.

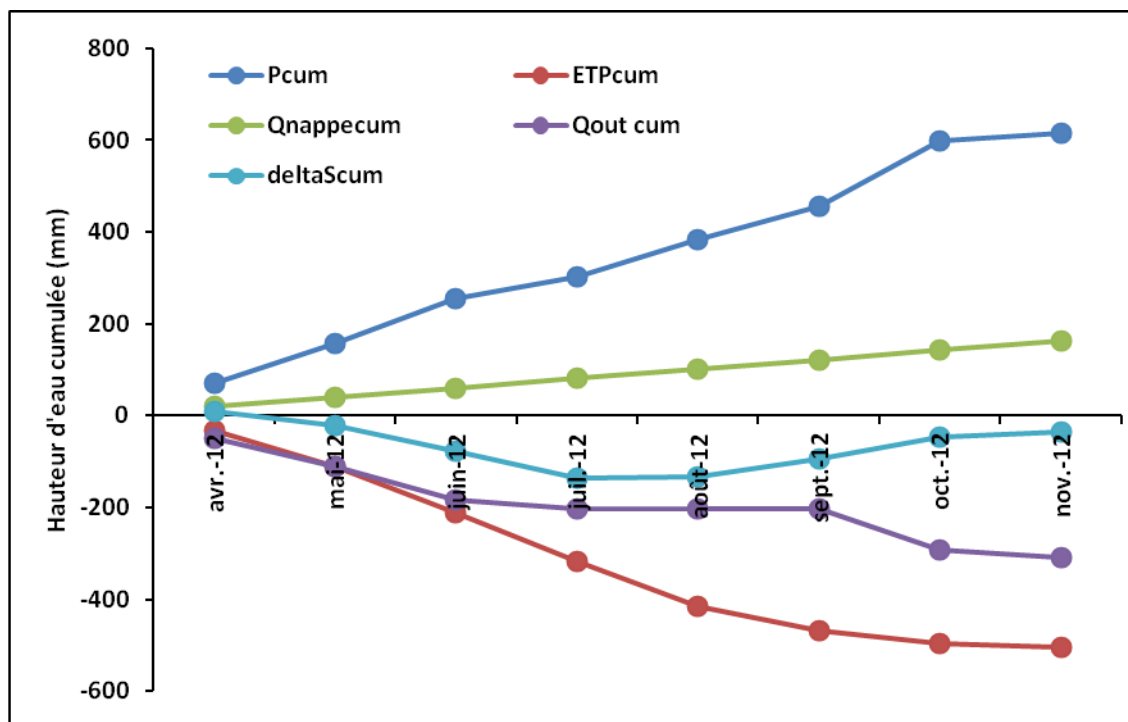


Figure 19 : Bilan hydrique de la Grande tourbière de Villeroy entre juin et novembre 2012

Le principal flux sortant de la tourbière est l'évapotranspiration (82 % des précipitations). Les débits aux exutoires représentent 50,4 % des précipitations, ce qui en fait un flux sortant important, notamment aux exutoires Q1 et Q2. Ces débits contribuent à l'alimentation en eau des bassins versants de la Petite rivière du Chêne et de la rivière du Chêne. Ils apportent un volume d'eau important aux cours d'eau au printemps et à l'automne. Leur contribution en période d'étiage est toutefois très limitée. Ces exutoires doivent être surveillés afin de limiter une augmentation du drainage au sein de la tourbière. Une augmentation de l'évacuation de l'eau emmagasinée dans la tourbière pourrait avoir un impact sur sa diversité végétale et sur les taux d'accumulation de la matière organique.

Le terme résultant du bilan hydrique est considéré égal à la variation de l'emmagasinement. Celle-ci est à peu près nulle en avril et redevient pratiquement nulle en novembre. Les variations d'emmagasinement dans la tourbière auraient donc principalement lieu pendant la période hors gel. Les calculs indiquent un niveau à la baisse d'avril à juillet, suivi d'une remontée d'août à novembre. Cette dynamique est similaire à celle découlant des variations de niveaux mesurées aux piézomètres (Figure 18), mais la remontée des niveaux résultant du calcul de bilan hydrique est devancée de deux

mois comparativement aux mesures. Il est important de souligner ici que le terme ΔS du bilan hydrique intègre à la fois les erreurs réalisées sur les différentes composantes du bilan hydrique et la variation réelle de l'emmagasinement, ce qui pourrait expliquer la différence observée ici avec les données de terrain. L'équation suivante peut être utilisée pour transformer le terme ΔS en variation du niveau de la nappe dans la tourbe:

$$\Delta S = \Delta h \times n_e \quad \text{Équation (2)}$$

où

Δh = variation du niveau de nappe entre deux mesures (m)

n_e = porosité effective de la tourbe (m^3/m^3)

En utilisant une porosité effective de la tourbe de 40 %, l'amplitude moyenne des variations de niveaux mesurés (-0,10 à 0,12 m) est similaire à celle résultant du calcul de bilan hydrique (-0,14 à 0,12 m).

2.3 Dates basales de la matière organique

L'âge ^{14}C basal du début de l'accumulation de la matière organique a été obtenu en 25 points d'échantillonnage (Tableau 3). Comme il ne fut pas possible de récolter le contact organo-minéral pour six d'entre-eux (Vbase 8, Vbase 10, Vbase 11, Vbase 16, Vbase 18 et Vbase 19; voir la section des méthodes), la date obtenue en ces points d'échantillonnage représente un âge minimal pour le début de l'accumulation de la matière organique.

La distribution temporelle des 25 dates basales est illustrée à la Figure 20. La période entre 11 000 et 10 000 ans A.A. est celle où le nombre de dates est le plus élevé (13). Ainsi, 52 % des datations basales issues des carottes de tourbe dont l'épaisseur varie entre 225 et 436 cm selon les cas sont issues de cette période. Elles proviennent de points d'échantillonnage situés en majorité au sein des deux importantes dépressions du substrat minéral ou en bordure de celles-ci. Les dates les plus anciennes sont de 10 670 ans A.A. (Vbase 9, 330 cm), 10 640 ans A.A. (Vbase 7, 342 cm), 10 610 ans A.A. (Vbase 8, 269 cm) et 10 600 ans A.A. (Vbase 11, 310 cm). Compte tenu du fait que le contact organo-minéral n'a pu être récolté pour les points Vbase 8 et Vbase 11, l'âge réel de l'amorce de l'entourbement à ces deux

endroits pourrait se situer entre 11 000 et 10 600 ans A.A. Dans le cas du point d'échantillonnage Vbase 9, un âge de 10 770 ans A.A. a aussi été obtenu à partir d'un fragment ligneux de la même carotte, mais à une moins grande profondeur (305 cm) que celle de la tourbe basale (330 cm). On remarque toutefois que ce point d'échantillonnage se trouve à proximité de la bordure de la dépression principale; ce fragment ligneux est nécessairement issu d'une végétation ligneuse (arbre ou arbuste) qui était présente à l'époque aux altitudes plus élevées en bordure de la dépression. Dans le cas d'autres points d'échantillonnage (Vbase 4, Vbase 16, Vmono), des macrorestes végétaux datés à la même profondeur que la matière organique en vrac ont livré des âges de quelques décennies à quelques siècles plus vieux que ceux de la matière organique.

Sept autres dates basales (28 %) se situent dans la période entre 10 000 et 7000 ans A.A. Cinq d'entre elles (Vbase 1, Vbase 12, Vbase 13, Vbase 19, Vbase 21) proviennent de points d'échantillonnage situés plus près de l'actuelle bordure de la tourbière et/ou sur les flancs d'anciennes dunes.

Une seule date basale a été obtenue pour la période s'échelonnant entre 7000 et 4000 ans A.A., soit celle de 5970 ans A.A. au point Vbase 20. Toutefois, cette date réalisée à partir de matière organique en vrac semble trop vieille considérant la faible épaisseur de tourbe (70 cm) accumulée à cet endroit de la tourbière et en fonction de la composition des assemblages macrofossiles de la carotte (voir plus bas) qui suggère une végétation forestière plutôt que tourbicole. La date de 1430 ans A.A. obtenue à partir d'un charbon de bois à la profondeur 61 cm de la même carotte, soit au niveau où le contenu en matière organique augmente significativement, pourrait refléter l'époque de l'amorce de l'accumulation de la tourbe à cet endroit. De plus, cette interprétation semble être corroborée par d'autres dates ¹⁴C relativement jeunes (1220 ans A.A. à Vbase 10; 1230 ans A.A. à Vbase 15) qui suggèrent qu'une phase de paludification récente ait eu lieu en périphérie de la tourbière. La date de 9540 ans A.A. au point Vmono semble aussi anormalement vieille pour l'épaisseur de tourbe correspondante (83 cm) et, tout comme pour Vbase 20, cette date pourrait témoigner davantage d'un épisode forestier ayant précédé l'entourbement.

Tableau 3. Datations radiochronologiques des carottes sédimentaires

Carotte et profondeur (cm)	Numéros de laboratoire	Matériel daté	Âge ¹⁴ C Années A.A.	Âge Années étalonnées
Vbase 1 - 250	UGAMS-12458, ULA-3612	Tourbe	6980 ± 25	7800
Vbase 2 - 434	UGAMS-12456, ULA-3610	Tourbe	8870 ± 30	10 030
Vbase 3 - 283	UCIAMS-123805, ULA-4057	Plantes herbacées	9230 ± 40	10 390
Vbase 3 - 300	UGAMS-12448, ULA-3602	Tourbe	8670 ± 30	9620
Vbase 4 - 225	UGAMS-12451, ULA-3605	Tourbe	8990 ± 30	10 190
Vbase 4 - 225	UCIAMS-123791, ULA-4043	Mousses brunes	9215 ± 35	10 350
Vbase 5 - 423	UGAMS-12460, ULA-3614	Tourbe	9150 ± 30	10 270
Vbase 6 - 382	UGAMS-12459, ULA-3613	Tourbe	9340 ± 30	10 550
Vbase 7 - 342	UGAMS-12455, ULA-3609	Tourbe	9410 ± 30	10 640
Vbase 8 - 269	UGAMS-12454, ULA-3608	Tourbe	9380 ± 30	10 610
Vbase 9 - 305	UCIAMS-123792, ULA-4044	Fragment ligneux	9510 ± 40	10 770
Vbase 9 - 330	UGAMS-12452, ULA-3606	Tourbe	9450 ± 30	10 670
Vbase 10 - 100	UGAMS-12453, ULA-3607	Tourbe	1260 ± 20	1220
Vbase 11 - 310	UGAMS-12458, ULA-3612	Tourbe	9370 ± 30	10 600
Vbase 12 - 155	UGAMS-12450, ULA-3604	Tourbe	7470 ± 30	8260
Vbase 13 - 202	UCIAMS-123795, ULA-4046	Mousses brunes	8355 ± 40	9380
Vbase 13 - 225	UGAMS-12449, ULA-3603	Tourbe	8530 ± 25	9515
Vbase 13 - 225	UCIAMS-120631, ULA-3863	Tourbe	8905 ± 30	10 000
Vbase 14 - 183	UCIAMS-120632, ULA-3864	Tourbe	2970 ± 20	3150
Vbase 15 - 118	UCIAMS-123803, ULA-4046	Fragment ligneux	980 ± 30	835
Vbase 15 - 120	UCIAMS-120633, ULA-3865	Tourbe	1240 ± 15	1230
Vbase 16 - 260	UCIAMS-123789, ULA-4041	Aiguilles <i>Picea</i>	9280 ± 35	10 470
Vbase 16 - 261	UCIAMS-120634, ULA-3866	Tourbe	9255 ± 35	10 400
Vbase 17 - 275	UCIAMS-123804, ULA-4056	Plante herbacée	9205 ± 40	10 350
Vbase 17 - 288	UCIAMS-120635, ULA-3867	Tourbe	8805 ± 30	9800
Vbase 18 - 119	UCIAMS-123793, ULA-4045	Charbon	3495 ± 35	3780
Vbase 18 - 120	UCIAMS-120636, ULA-3868	Tourbe	2065 ± 20	2050
Vbase 19 - 170	UCIAMS-120637, ULA-3869	Tourbe	8630 ± 30	9580
Vbase 20 - 61	UCIAMS-123790, ULA-4042	Charbon	1525 ± 35	1430
Vbase 20 - 70	UCIAMS-120639, ULA-3870	Tourbe	5240 ± 20	5970
Vbase 21 - 130	UCIAMS-120641, ULA-3872	Tourbe	6935 ± 25	7760
Vmono - 82	UCIAMS-123796, ULA-4048	Charbon	9125 ± 35	10 260
Vmono - 83	UCIAMS-120640, ULA-3871	Tourbe	8585 ± 30	9540
VR1 - 436	UCIAMS-90860, ULA-2266	Tourbe	9045 ± 25	10 220
VR2 - 238	UCIAMS-117203, ULA-3672	Tourbe	7945 ± 20	8750
VR3 - 240	UCIAMS-117212, ULA-3681	Tourbe	8430 ± 25	9470
VR3 - 240	UCIAMS-123794, ULA-4046	Charbon	8115 ± 35	9060

La période entre 4000 ans A.A. et l'actuel, plus particulièrement les 2000 dernières années, est marquée par une reprise de l'entourbement et d'une extension spatiale plus récente de la tourbière en périphérie. Les points d'échantillonnage correspondant à cette reprise sont Vbase 10, Vbase 14, Vbase 15, Vbase 18 et Vbase 20. La date de 3150 ans A.A. à Vbase 14 semble toutefois plutôt jeune pour l'épaisseur de tourbe (180 cm) et pourrait être inexacte. L'époque de l'Holocène supérieur semblent donc avoir présenté des conditions propices à l'entourbement comme le démontrent aussi les taux d'accumulation verticaux de la tourbe très élevés obtenus pour les carottes VR-1, VR-2 et VR-3 (Lavoie et Colpron-Tremblay, 2013).

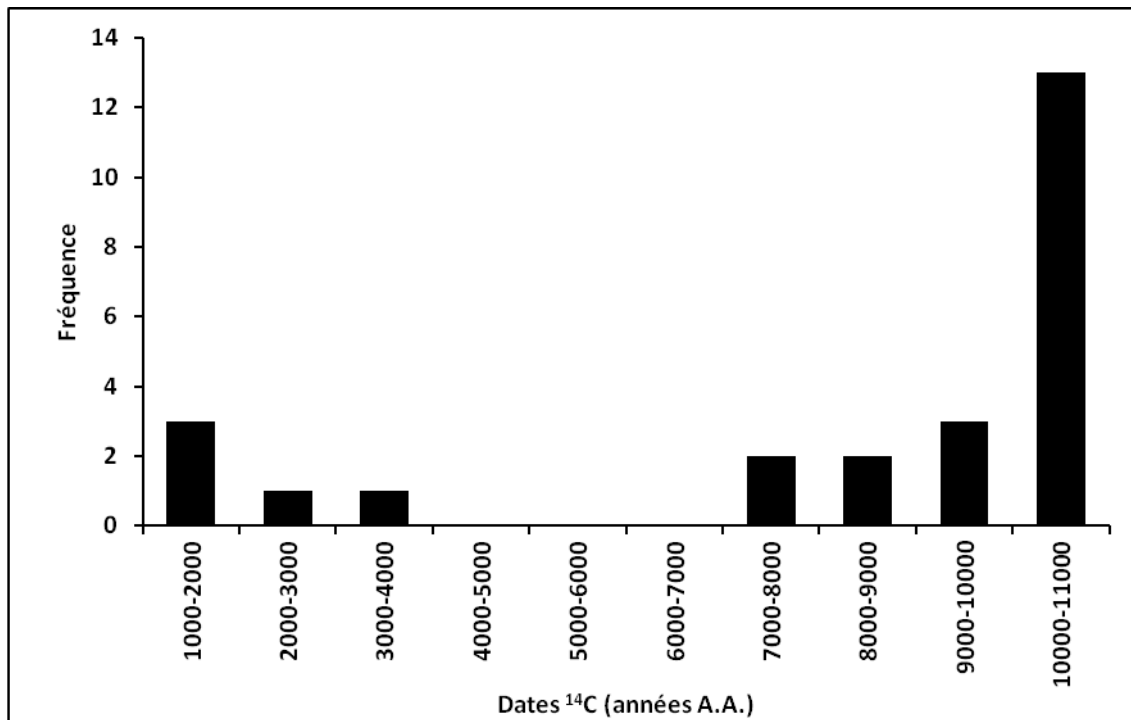


Figure 20. Distribution temporelle des dates basales (en considérant l'amorce de l'accumulation à Vbase 20 à 1430 ans A.A.)

2.4 Analyses macrofossiles des carottes basales

Les diagrammes macrofossiles des 22 carottes basales sont présentés à l'Annexe 2. Les résultats des analyses macrofossiles des points d'échantillonnage VR-1, VR-2 et VR-3 sont, pour leur part, présentés dans Lavoie et Colpron-Tremblay (2013). Les diagrammes macrofossiles livrent un aperçu des différents régimes trophiques et de la composition du cortège floristique ayant prévalu avant et/ou au début de la formation de la tourbière aux points d'échantillonnage. Trois principaux régimes trophiques ont été identifiés: 1) régime semi-lacustre/étang caractérisé par la présence de plantes hygrophiles, 2) régime minérotrophe caractérisé par des plantes herbacées et/ou des mousses brunes, et 3) régime forestier ayant précédé l'amorce de l'entourbement.

Environnement semi-lacustre

Onze points d'échantillonnage (Vbase 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 12, 13, 17 et VR1) témoignent de la présence d'un plan d'eau, sans doute sous la forme d'étangs peu profonds, avant et/ou pendant la formation de la tourbière. Ces étangs se sont formés dans la dépression principale ayant la forme d'un chenal ou dans certaines interdunes. Une estimation de la superficie qu'ils occupaient est présentée à la Figure 21. Dans les assemblages macrofossiles, on note, entre autres, la présence d'espèces telles que *Najas flexilis*, *Potamogeton* sp., *Hippuris vulgaris*, *Ranunculus aquatilis* et *Nymphaceae* sp. L'algue verte *Chara* sp. était aussi présente en compagnie de crustacés (*Daphnia* sp.) et de bryozoaires (*Cristatella mucedo*). Curieusement, le point Vbase 11 dans la seconde dépression de grande ampleur ne présente pas d'indice d'étang. Bien qu'aucune gyttja n'a été trouvée au contact organo-minéral, le contenu en matière minérale (surtout du sable très fin) est important à la base des carottes, probablement en raison des apports de matière minérale par les eaux de ruissellement en provenance des anciennes dunes. La matrice organique se compose, selon les points d'échantillonnage, de plantes herbacées (en majorité des racines et rhizomes), de fragments ligneux ou d'un mélange des deux.

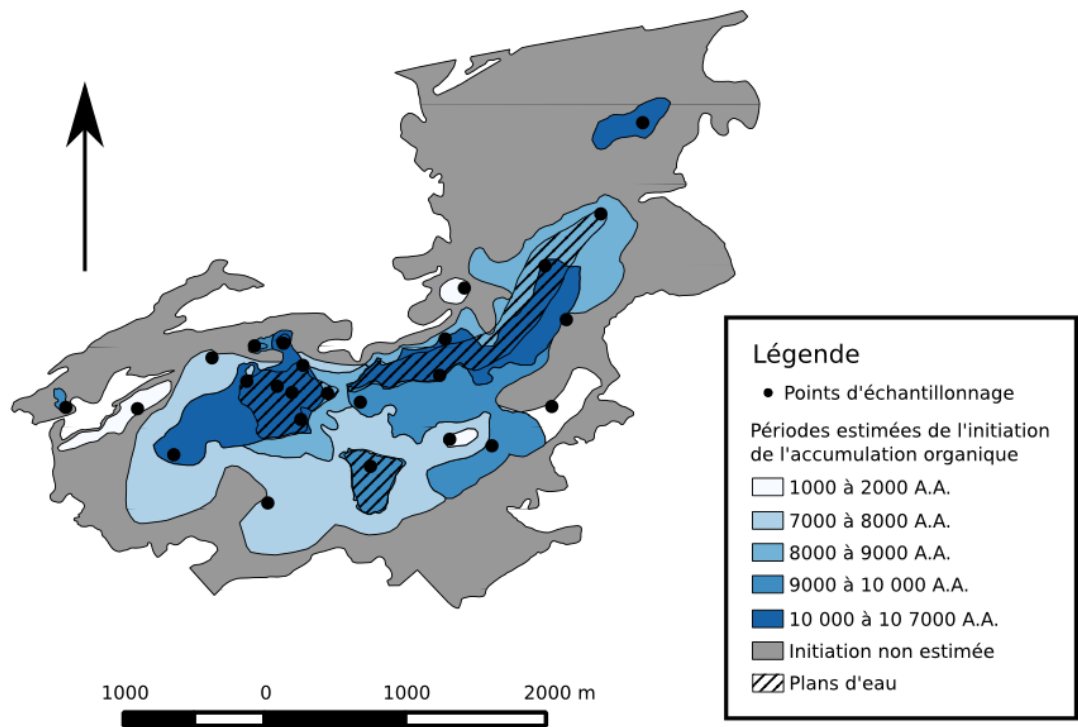


Figure 21. Modèle spatio-temporel du développement de la tourbière par traçage de polygones

Transition étang – tourbière minérotrophe

Chacune des carottes témoignant de la présence initiale d'un étang montre aussi une transition vers des conditions de tourbière minérotrophe. Ce changement est marqué dans tous les cas par la disparition des espèces hygrophiles et une diminution marquée du contenu en matière minérale. Les assemblages macrofossiles montrent, pour la plupart, la présence de plantes herbacées telles que des cypéracées ou des mousses brunes. À la carotte VR-1, cette transition a été à 9330 ans A.A. (Lavoie et Colpron-Tremblay, 2013). Nous avons aussi tenté de dater cette transition à l'aide de macrorestes de plantes terricoles aux points Vbase 3, Vbase 9, Vbase 13 et Vbase 17. À Vbase 3, la transition a été datée à 10 390 ans A.A. (283 cm de profondeur) à partir d'un collet de plante herbacée alors que la datation à partir de 1 cm³ de matière organique à 300 cm de profondeur a livré un âge de 9620 ans A.A. Cette inversion a pu être provoquée par la contamination de la base par des racines et radicelles plus jeunes

ou encore par une perturbation des sédiments à la base du dépôt. En effet, le point Vbase 3 se situe en bordure d'une crête dunaire et de l'érosion en provenance de celle-ci a peut-être eu lieu. Un phénomène similaire pourrait aussi s'appliquer au point Vbase 17 où la transition est datée à 10 350 ans A.A. (275 cm) et la base à 9800 ans A.A. (288 cm). Au point Vbase 9, la datation ^{14}C de la transition (305 cm) a livré un âge de 10 770 ans A.A. qui est similaire à celui de la base (10 610 ans A.A.) qui se trouve 25 cm plus bas. Dans ce cas-ci, la transition a été datée à partir d'un fragment ligneux qui pouvait provenir d'un arbre ou d'un arbuste situé en périphérie. Enfin, la transition au point Vbase 13, datée à partir de mousses brunes, a donné un âge de 9380 ans A.A., ce qui correspond à la même période que la carotte VR1 située à plus de 2 km de distance. Il est donc prudent de supposer que les plans d'eau initiaux (ou étangs) ont pu se maintenir selon les endroits de 10 700 à 9300 ans A.A. pour ensuite laisser place à la formation d'une tourbière minérotrophe, à l'exception du point Vbase 12 où les conditions d'étang ont perduré plus longtemps, jusque vers 8260 ans A.A.

Quelques hypothèses peuvent être proposées pour expliquer la disparition (comblement ou terrestrialisation) de ces plans d'eau :

- dans un premier temps, il est possible qu'ils se soient simplement comblés de matière organique en raison d'une forte productivité végétale;
- le processus de comblement pourrait être aussi le résultat d'une diminution du niveau d'eau causé en raison du climat plus sec de l'Holocène inférieur;
- enfin, le relèvement isostatique peut aussi avoir joué un rôle.

Dans le cas de la Grande tourbière de Villeroy, le comblement des étangs résulte probablement d'une combinaison de ces trois facteurs. Ces étangs furent certainement associés à la Mer de Champlain, la dépression topographique en forme de chenal pouvant représenter un petit exutoire de la mer. D'ailleurs, les plantes aquatiques identifiées à la base des carottes présentent toutes une certaine tolérance à la salinité.

Tourbière minérotrophe

La présence de macrorestes typiques des tourbières minérotrophes (e.g., cyperacées, mousses brunes, *Menyanthes trifoliata*) ont été trouvés à la base de plusieurs carottes (Vbase 8, 11, 16, 19). Ceux-ci

témoignent de conditions locales très humides, d'une nappe d'eau près de la surface de la tourbe et d'apports d'éléments minéraux via les eaux de ruissellement. Les points d'échantillonnage où ce type d'environnement a été trouvé sont tous très vieux, les datations ^{14}C basales variant entre 10 610 (Vbase 8) et 9580 ans A.A. (Vbase 19). Ce type de végétation a ainsi côtoyé la végétation aquatique et semi-aquatique pour ensuite la remplacer.

Végétation forestière

Pour l'ensemble des 25 points d'échantillonnage, il n'y a aucun assemblage macrofossile qui témoigne hors de tout doute de la présence d'une végétation purement forestière qui aurait pu précéder l'amorce de l'entourbement aux endroits où les carottes furent prélevées, contrairement par exemple à la tourbière de la Grande-plée-Bleue où une sapinière à bouleau blanc était initialement présente (Lavoie et Robert, 2009). Par contre, certains points (Vbase 1, 10, 14, 15, 18, 20, 21 et Vmono) pourraient indiquer la présence d'anciennes forêts plus ou moins denses situées en milieu hydrique ou mésique. En effet, quelques assemblages macrofossiles (e.g. Vbase 15) comportent des restes traduisant la présence locale d'arbres comme le mélèze et l'épinette (espèces croissant sur les tourbières), d'aulne et/ou de bouleau. On note aussi qu'à certains endroits (Vbase 1, 10, 20, 21, Vmono), la matière organique est fortement décomposée et les macrorestes pratiquement absents, ce qui pourrait témoigner d'un ancien épisode forestier où la décomposition de la matière organique était très importante en raison des conditions oxygénées des humus forestiers. Dans l'hypothèse que la base de ces carottes représente une phase forestière, l'accumulation organique qui est ensuite survenue témoigne de l'entourbement (paludification) du site. D'après les datations obtenues sur ces carottes, deux périodes ont été propices à la paludification, soit vers 7800 ans A.A. (Vbase 1 et 20) et entre 3200 et 1200 ans A.A. (Vbase 10, 14, 15, 18, 20). Le cas du point Vmono est particulier car il se situe dans un secteur peu profond et peu connecté à la tourbière. La date basale de 9540 ans A.A. à cet endroit témoigne probablement d'une phase forestière durant laquelle la végétation colonisait le substrat sableux des dunes. L'entourbement est survenu 15 à 20 cm plus haut dans la carotte, mais ce niveau n'a pas été daté.

Forêts périphériques et perturbations par le feu

Dans plusieurs assemblages macrofossiles, notamment ceux témoignant d'un étang initial, des restes de plantes terricoles témoignent de la présence d'une végétation ligneuse en périphérie. On note, entre autres, le mélèze, l'épinette (dont une aiguille d'épinette blanche identifiée au point Vbase 16), le bouleau et le thuya. Cette dernière espèce a été trouvée aux points Vbase 6, 7 et 9 parmi les restes de plantes aquatiques. Ces mêmes assemblages sont parfois marqués par la présence d'une quantité importante de restes très décomposés de feuilles de plantes vasculaires comme des éricacées et/ou des bétulacées.

Une autre caractéristique importante des assemblages macrofossiles est la quantité importante de charbons de bois. Ces derniers sont toutefois plus abondants dans la période de l'Holocène inférieure antérieure à 9000 ans A.A., une période réputée plus sèche et pendant laquelle les feux étaient fréquents (e.g., Carcaillet et Richard, 2000; Talon et al., 2005). Quatre charbons ont été datés (Tableau 3). Parmi ceux-ci, deux ont livré des âges de 10 260 ans A.A. (Vmono) et 9060 ans A.A. (VR-3). Il est ainsi possible que les feux aient contribué au développement de la tourbière pendant l'Holocène inférieur via le processus de paludification. Le rôle du feu dans la paludification n'a encore été que très peu examiné dans la littérature scientifique et mérite certainement des travaux supplémentaires.

2.5 Modèle d'évolution spatiale de la tourbière dans le temps

Modèle spatio-temporel par traçage de polygones

Une estimation de la superficie qu'occupait la tourbière par période temporelle a été réalisée en fonction de la répartition des dates ^{14}C basales et de la topographie du substrat minéral (Figure 21 et Tableau 4). En raison de l'absence de dates dans certains secteurs, une grande partie de la tourbière n'a pu être incluse dans cette estimation. La surface qui a été estimée représente environ 40 % de la surface totale de la tourbière (419 ha).

Selon ce modèle, plus de 25 % de la surface estimée (107,9 ha) s'est initialement formée il y a plus de 10 000 ans. La période entre 8000 et 7000 ans A.A. témoignerait d'une extension spatiale importante de la tourbière durant laquelle 33,5 % de la superficie estimée actuelle du dépôt organique se serait formée. Ainsi, 94 % de la superficie estimée de la tourbière était déjà formée il y a 7000 ans. Le développement spatial récent de la tourbière (depuis 2000 ans A.A.) représente 6 % de la superficie estimée. Ces estimations constituent un portrait prudent du développement spatio-temporel de la tourbière. Il pourrait s'avérer que le développement récent de la tourbière soit en réalité plus important si la totalité de la superficie de la tourbière avait été incluse dans ce modèle car d'importants secteurs où l'épaisseur de tourbe est mince (< 100 cm) et qui sont sans doute jeunes ne sont pas pris en compte dans l'estimation.

Tableau 4. Estimation de l'entourbement initial de la tourbière (superficies et pourcentages) par période temporelle (excluant la superficie non estimée).

Périodes temporelles	Superficies (ha)	Pourcentages
10 000 à 10 700 ans A.A.	107,9	25,7
9000 à 10 000 ans A.A.	72,1	17,2
8000 à 9000 ans A.A.	74,2	17,7
7000 à 8000 ans A.A.	140,3	33,5
1000 à 2000 ans A.A.	24,8	5,9
Total	419,3	100

Modèle spatio-temporel par régression

Un autre modèle a été produit dans le but de calculer, par une régression, un âge à chaque pixel du modèle des profondeurs interpolées. En premier lieu, le coefficient de corrélation a été calculé entre les variables âge-profondeur et âge-altitude estimées. La relation âge-profondeur s'est révélée plus forte (0,68) que celle âge-altitude (-0,17). Afin que la relation soit plus significative (0,75), deux données incongrues (dates basales des points Vbase 14 et Vmono1, voir plus haut) ont été enlevées. Une régression (B-Spline linéaire) a ensuite été appliquée à partir de la relation entre les bases datées et la couche raster de l'épaisseur de tourbe à l'aide du logiciel Saga Gis. Ainsi, un âge a été attribué à chaque profondeur.

Les résultats sont présentés à la Figure 22 et au Tableau 5. Une date variant de 13 670 à 2490 ans A.A. a été attribuée à chaque cellule. Ce modèle montre un développement plutôt linéaire de la tourbière où 24 % du dépôt aurait commencé à se former il y a moins de 3000 ans. Uniquement 4,5 % aurait été formé il y a plus de 10 000 ans. Notons que les dates au-delà de 10 700 ans ont été attribuées aux endroits les plus profonds de la tourbière mais elles ne sont pas plausibles et sont associées à la classe de 10 000 ans A.A. et plus. Bien que nous n'avons pas de dates ¹⁴C témoignant de la formation de la tourbière entre 7000 et 4000 ans A.A., ce modèle attribue la formation de plus de 38 % de la superficie à cette tranche d'âge. Ces dates sont toutefois associées aux pentes créées par l'effet de bassin des dépressions qui couvrent une importante superficie au sein du modèle des épaisseurs interpolées. La principale critique de cette estimation par régression vient du fait que la relation entre l'âge et la profondeur ne reflète pas nécessairement la réalité observée. Ce modèle doit donc être considéré avec prudence. Il a toutefois l'avantage d'estimer l'âge de secteurs où nous n'avons pas de datations. Il appuie également l'hypothèse qu'une partie importante de la tourbière s'est formée il y a moins de 3000 ans.

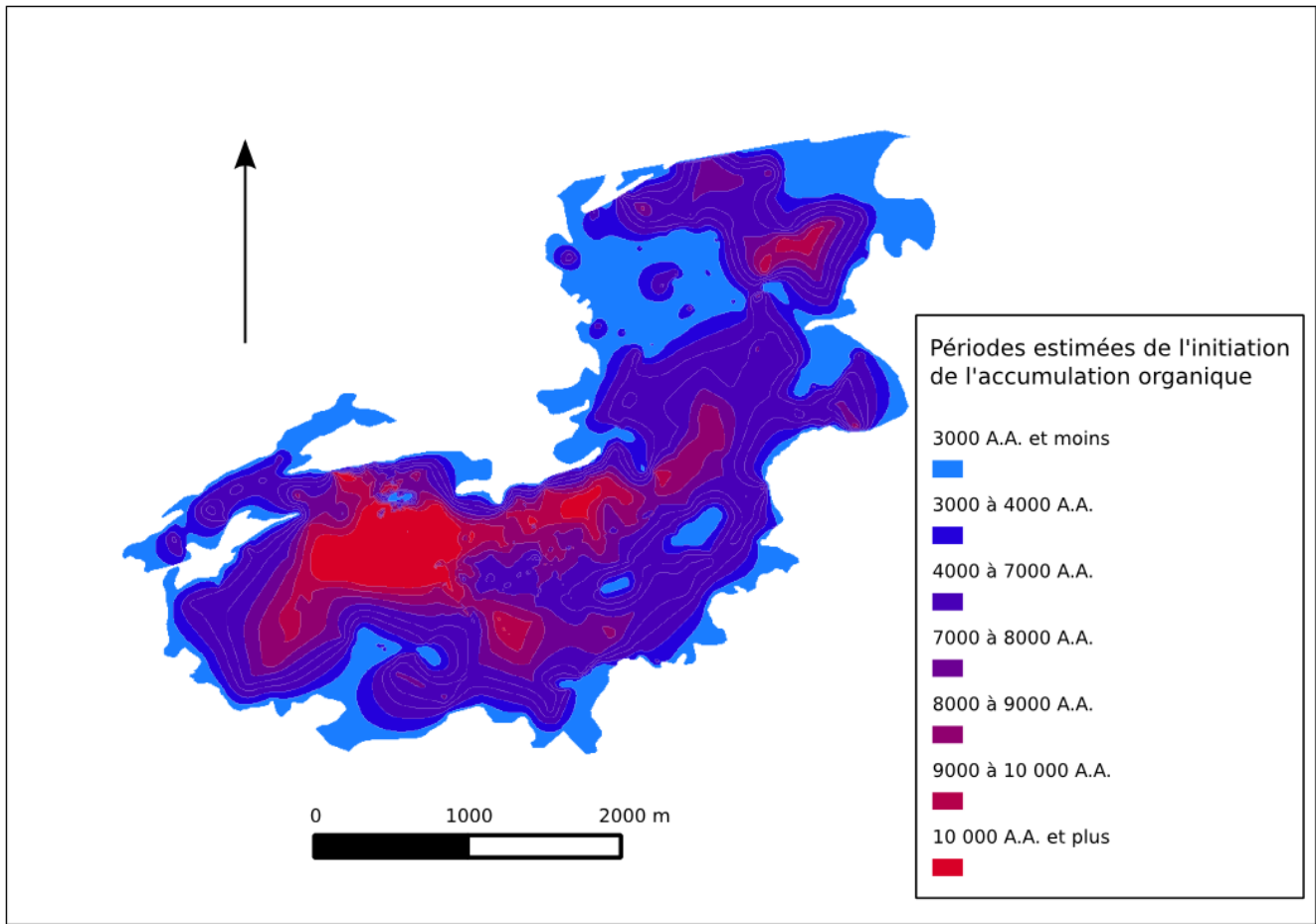


Figure 22. Modèle spatio-temporel du développement de la tourbière par régression (relation âge-profondeur)

Tableau 5. Développement de la tourbière (pourcentages) par période temporelle obtenu par régression (relation âge-profondeur)

Période temporelle	Pourcentage
10 000 ans A.A. et plus	4,5
9000 à 10 000	4,2
8000 à 9000	7,4
7000 à 8000	9,6
6000 à 7000	13,7
5000 à 6000	13,0
4000 à 5000	11,6
3000 à 4000	12,3
3000 et moins	23,7

3 CONCLUSION

Le bilan hydrique de la tourbière montre que celle-ci reçoit un apport significatif d'eau souterraine des dépôts meubles voisins dans certains secteurs. Certains cours d'eau contribuent également significativement à drainer la tourbière. Ces informations sont cruciales pour identifier les secteurs à protéger autour de la tourbière, dans une vision à long terme pour la préservation de la diversité végétale et des taux d'accumulation de la matière organique.

Les résultats du volet paléoécologie montrent le rôle important de la topographie du substrat minéral dans le cadre de l'initiation et du développement spatial de la tourbière. La phase de développement récent (Holocène supérieur) suggère que le processus de paludification peut se poursuivre tant et aussi longtemps qu'il n'y a pas de barrières topographiques pour freiner cette expansion. On observe d'ailleurs aujourd'hui, en contexte forestier en périphérie de la tourbière (secteur du trottoir menant à la tourbière), une accumulation de tourbe relativement épaisse dans les interdunes. Ceci signifie que la paludification est actuellement active et que la tourbière pourrait éventuellement s'étendre au-delà de ses limites actuelles. Une éventuelle croissance à long terme de la tourbière pourrait donc être un facteur à prendre en considération dans le cadre des mesures de conservation et des limites de la future réserve écologique.

Les nouvelles données acquises dans ce projet seront utiles au MDDEFP dans le contexte du futur développement d'une réserve écologique à la Grande tourbière de Villeroy. Des travaux similaires pourraient être entrepris dans d'autres sites considérés pour la mise en place d'une réserve écologique. Ce type de caractérisation serait également utile dans des réserves écologiques existantes, dans le but d'identifier les pressions hydrologiques environnantes qui pourraient modifier le rythme d'accumulation des dépôts organiques.

4 RÉFÉRENCES

- Avard, K. 2013. Rôle régional des tourbières sur les eaux souterraines de la partie basse de la zone Bécancour. Mémoire de maîtrise, dép. Sciences de la Terre et de l'atmosphère, UQAM, 129 p.
- Bhiry, N. et Filion, L., 2001. Analyse des macrorestes végétaux. *Dans* S. Payette et L. Rochefort (éditeurs). *Écologie des tourbières du Québec-Labrador*. Les Presses de l'Université Laval, Québec, pp. 259-273.
- Carcaillet, C. et Richard, P.J.H. 2000. Holocene changes in seasonal precipitation highlighted by fire incidence in eastern Canada. *Climate Dynamics*, 16:549-559.
- David, P.P. 1988. The coeval eolian environment of the Champlain Sea episode. Pages 291-305 *in* N.R. Gadd (ed.). *The Late Quaternary Development of the Champlain Sea Basin*. Association géologique du Canada, Special Paper 35, 312 p.
- Environnement Canada. 2013. Normales climatiques entre 1971-2000. Ressource électronique : http://climat.meteo.gc.ca/climate_normals/index_f.html.
- Fan, Q., Efrat, A., Koltun, V., Krishnan, S. et Venkatasubramanian, S. 2005. Hardware-assisted Natural Neighbor Interpolation. In Proc. 7th Workshop on Algorithm Engineering and Experiments (ALENEX).
- Ferlatte, M. 2013. Hydrogéochimie des systèmes aquifère-tourbière et traceurs des processus d'échanges dans deux contextes géo-climatiques du Québec méridional. Mémoire de maîtrise, dép. Sciences de la Terre et de l'atmosphère, UQAM, 77 p.
- Filion, L. 1987. Holocene development of parabolic dunes in the central St. Lawrence Lowland, Québec. *Quaternary Research*, 28: 196-209.
- Fournier, V., Larocque, M. et Pellerin, S. 2007. Water budget of the Covey Hill peatland. Compte-rendu de conférence, présenté à la conférence annuelle de la section nationale canadienne de l'Association internationale des hydrogéologues, octobre 2007, Ottawa, 8 p.
- Heiri, O., Lotter, A.F. et Lemcke, G. 2001. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *Journal of Paleolimnology*, 25:101-110.
- Jowsey, P.C. 1966. An improved peat sampler. *New Phytologist*, 65:245-248.
- Juggins, S. 2002. *Palaeo Data Plotter*, Beta test version 1.0. University of Newcastle, Newcastle upon Tyne.
- Larocque, M., Gagné, S., Tremblay, L. et Meyzonnat, G. 2013. *Projet de connaissance des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Bécancour et de la MRC de Bécancour - Rapport*

- scientifique. Rapport déposé au ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs. 213 p.
- Lavoie, M. et Colpron-Tremblay, J. 2013. Étude paléoécologique de la Grande-Tourbière-de-Villeroy. Rapport présenté au ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec, 37 p.
- Lavoie, M. et Robert, É.C. 2009. Étude paléoécologique de la tourbière de la Grande-plée-Bleue. Rapport présenté au du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, Direction du patrimoine écologique et des parcs, Québec, 27 p.
- Lévesque, P.E.M., Dinel, H. et Larouche, A., 1988. Guide illustré des macrofossiles végétaux des tourbières du Canada, Agriculture Canada, Publication No. 1817.
- Levison, J., Larocque, M., Fournier, V., Gagné, S., Pellerin, S. et Ouellet, M.A. 2013. Dynamics of a headwater system and peatland under current conditions and with climate change. Accepté pour publication dans la revue *Hydrological Processes*.
- Ministère du Développement Durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP), 2013. Ressource électronique : <http://www.mddep.gouv.qc.ca/>.
- Montgomery, F.H., 1977. *Seeds and Fruits of Plant of Eastern Canada and Northeastern United States*. University of Toronto Press, Toronto, 232 p.
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F. et Loumagne, C. 2005. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model? Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling. *Journal of Hydrology*, 303:290-306.
- Payette, S., Delwaide, A. et St-Amour, F., 2013. Structure et dynamique récente de la tourbière de Villeroy et de ses alentours. Rapport présenté au Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec, 48 p.
- Reimer, P.J., Baillie, M.G.L., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Blackwell, P.G., Bronk Ramsey, C., Buck, C.E., Burr, G.S., Edwards, R.L., Friedrich, M., Groote, P.M., Guilderson, T.P., Hajdas, I., Heaton, T.J., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kaiser, K.F., Kromer, B., McCormac, F.G., Manning, S.W., Reimer, R.W., Richards, D.A., Southon, J.R., Talamo, S., Turney, C.S.M., van der Plicht, J. et Weyhenmeyer, C.E. 2009. IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0-50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, 51:1111-1150.
- Rosa, É. et Larocque, M. 2008. Investigating peat hydraulic properties using field and laboratory methods: application to the Lanoraie peatland complex (southern Quebec, Canada). *Hydrological Processes*, 22:1866-1875.
- Rosenberry, D.O., LaBaugh, J.W. et Hunt, R.J. 2008. Use of Monitoring Wells, Portable Piezometers, and Seepage Meters to Quantify Flow Between Surface Water and Ground Water Field techniques for estimating water fluxes between surface water and ground water: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 4–D2, Virginia: USGS, 128 p.

Stuiver, M. et Reimer, P.J. 1993. Extended ^{14}C database and revised CALIB radiocarbon calibration program. *Radiocarbon*, 35:315-330.

Talon, B., Payette, S., Filion, L. et Delwaide, A. 2005. Reconstruction of the long-term fire history of an old-growth deciduous forest in Southern Québec, Canada, from charred wood in mineral soils. *Quaternary Research*, 64:36-43.

ANNEXE 1 - CALCUL DES ÉCHANGES AQUIFÈRE-TOURBIÈRE

Pour quantifier les échanges d'eau entre la tourbière et les aquifères minérales autour de la Grande tourbière de Villeroy, la méthode de Rosenberry et al. (2008) semblait la plus adéquate en raison de sa simplicité et sa rapidité d'exécution. Cette méthode est une application directe de l'équation de Darcy pour mesurer les débits souterrains dans un milieu naturel. La loi de Darcy stipule que le débit souterrain est proportionnel au gradient hydraulique et à la perméabilité, laquelle est la capacité du sol à laisser écouler l'eau :

$$Q = KA \frac{(h_1 - h_2)}{L} \quad \text{Équation (3)}$$

où

Q= débit sortant ou entrant (m³/j)

K=Conductivité hydraulique horizontale (m/j)

A= Aire au rivage du plan d'échange des eaux (m²)

h₁=charge hydraulique éloignée de la tourbière (m)

h₂= charge hydraulique en bordure de la tourbière (m)

L = Distance séparant le puits et la masse d'eau de surface (m)

Initialement, cette méthode a été développée pour connaître les interactions entre un plan d'eau de surface et les aquifères en périphérie de ce plan d'eau. La méthode consiste à segmenter le bord de la tourbière en plusieurs corridors, pour lesquels on assume qu'une valeur de perméabilité et un gradient hydraulique sont applicables à l'entièreté du segment (Figure 23). La méthode est basée sur l'hypothèse d'échanges latéraux seulement.

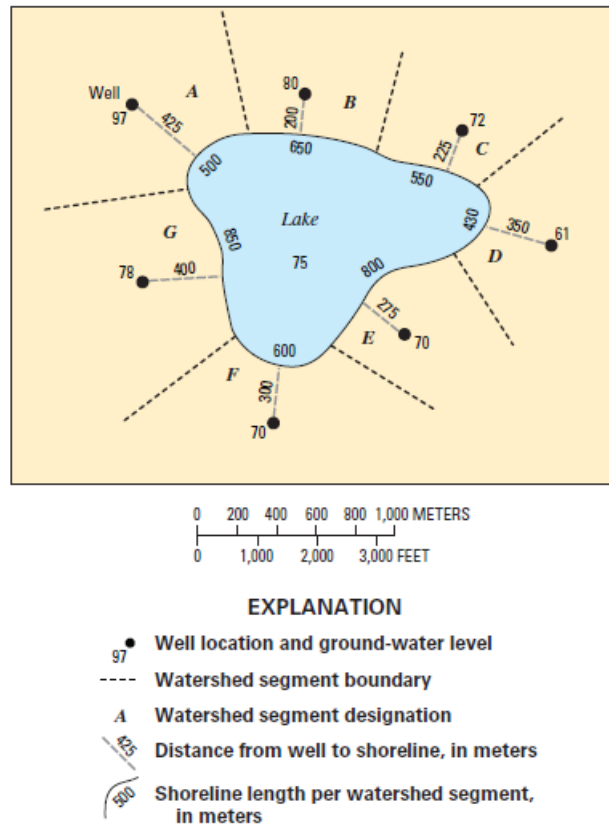


Figure 23: Schéma pour le calcul des flux souterrains (tirée de Rosenberry et al., 2008)

La longueur du segment le long du plan d'eau et l'épaisseur effective de l'échange en eau (b) permettent de déterminer l'aire du plan vertical au bord de la tourbière dans laquelle prennent place les échanges d'eau souterraine. Les segments ont été définis à l'aide du logiciel ArcGIS. Chaque segment a été défini de manière à isoler une zone de même gradient hydraulique telle que visible sur la carte piézométrique (Figure 15). La méthode de Rosenberry et al. (2008) assume que la direction d'écoulement est perpendiculaire au bord de la tourbière. À l'aide de la carte piézométrique, la bordure de la tourbière a donc été divisée en 11 segments de même gradient hydraulique (Figure 24).

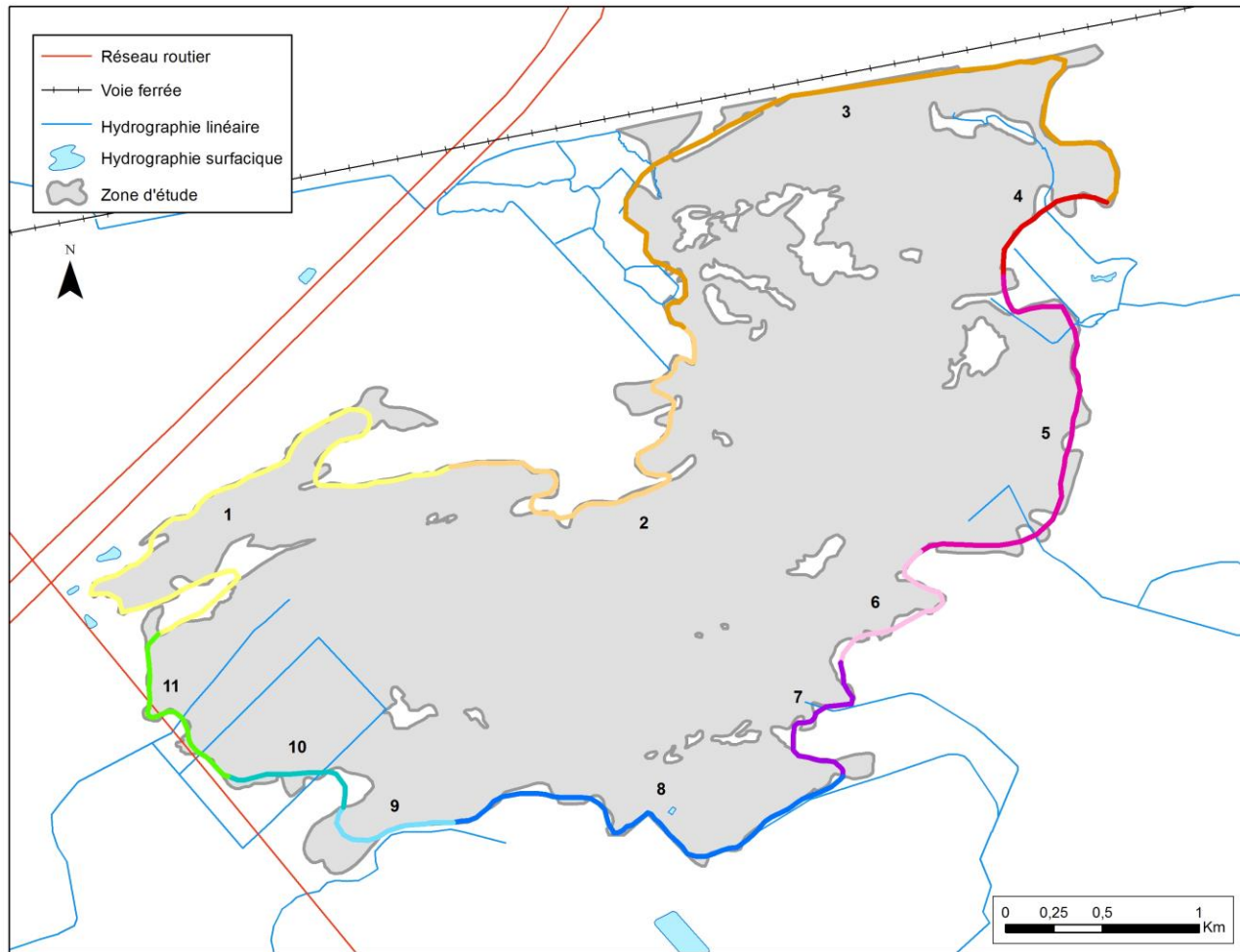


Figure 24: Traçage des segments pour le calcul des flux souterrains

Les niveaux d'eau ont été mesurés directement dans les piézomètres d'un segment et ce, dans un intervalle de temps suffisamment court pour qu'il n'y ait pas de variation temporelle du gradient hydraulique. Le petit nombre de piézomètres installés ne permet pas une bonne définition des interactions entre la tourbe et l'aquifère voisin. De ce fait, les isopièzes ont été utilisés pour mesurer des gradients hydrauliques pour les segments n'ayant pas été instrumentés.

Dans un milieu poreux stratifié, si la perméabilité d'une couche est nettement plus élevée que celle des couches adjacentes, l'écoulement de l'eau souterraine se produit entièrement dans la couche de grande perméabilité. Ainsi, la majorité des écoulements à l'intérieur d'une tourbière prendra place dans l'acrotelme et l'écoulement dans le catotelme est négligé dans le calcul des échanges souterrains. L'épaisseur de l'acrotelme est donc l'épaisseur (b) à considérer dans le calcul des flux souterrains. Il est

considéré ici égal aux premiers 50 cm de dépôts organiques. Diverses mesures en laboratoires ont permises de mieux définir la perméabilité de l'acrotelme : 0,1 à 10 cm/s (Rosa et Larocque, 2008) et 10^{-3} à 10^{-1} cm/s (Fournier et al., 2007). Une valeur moyenne de 1cm/s a été utilisée ici.

La conductivité hydraulique de l'aquifère a été déterminée à l'aide des données rapportées dans Larocque et al. (2013), en fonction des dépôts meubles observés dans chacune des sections de la périphérie de la tourbière. La moyenne géométrique des conductivités hydrauliques de la tourbe et des dépôts meubles est utilisée pour le calcul des flux dans chaque section. La somme des écoulements entrants ou sortants permet de quantifier les échanges d'eau entre la tourbière et l'aquifère.

ANNEXE 2 – DIAGRAMMES MACROFOSSILES DES BASES DE TOURBE

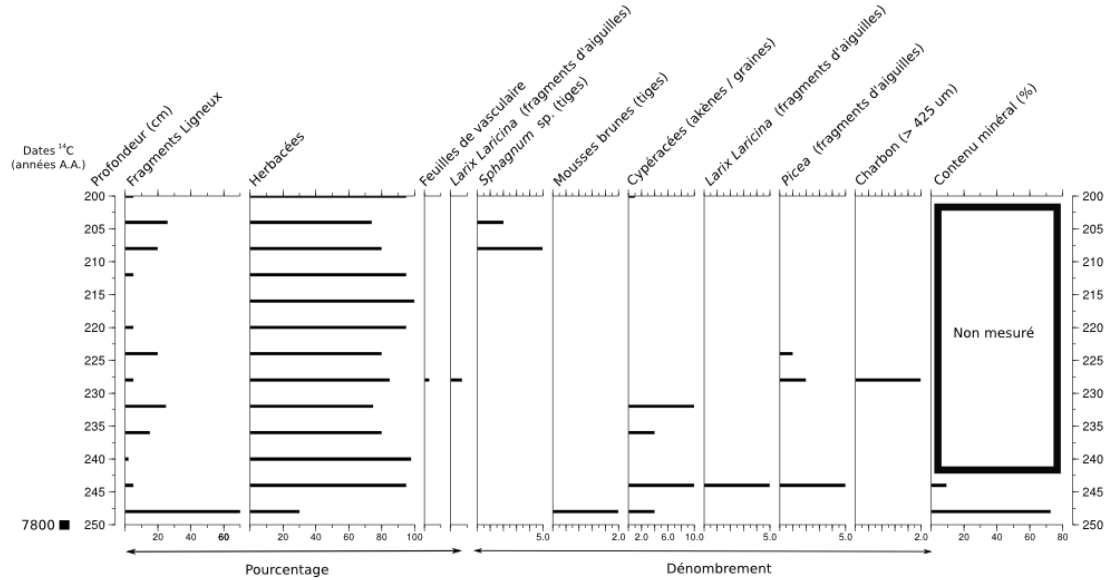


Figure 25. Diagramme macrofossiles de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase1

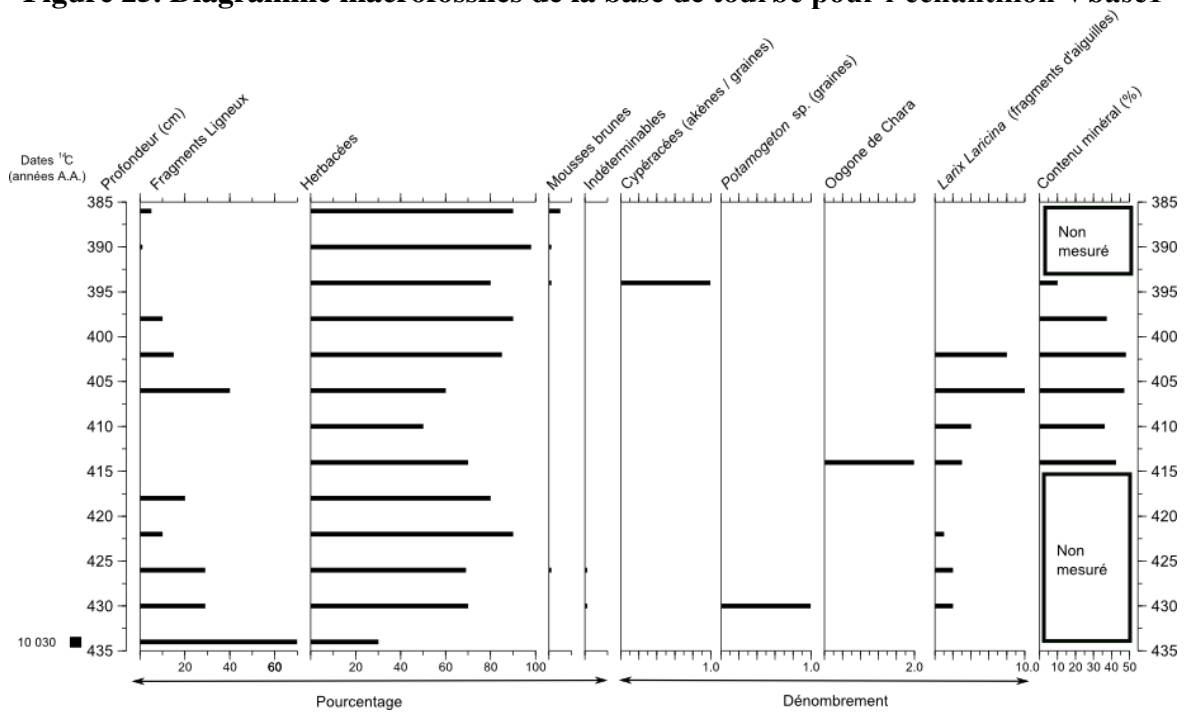


Figure 26. Diagramme macrofossiles de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase2

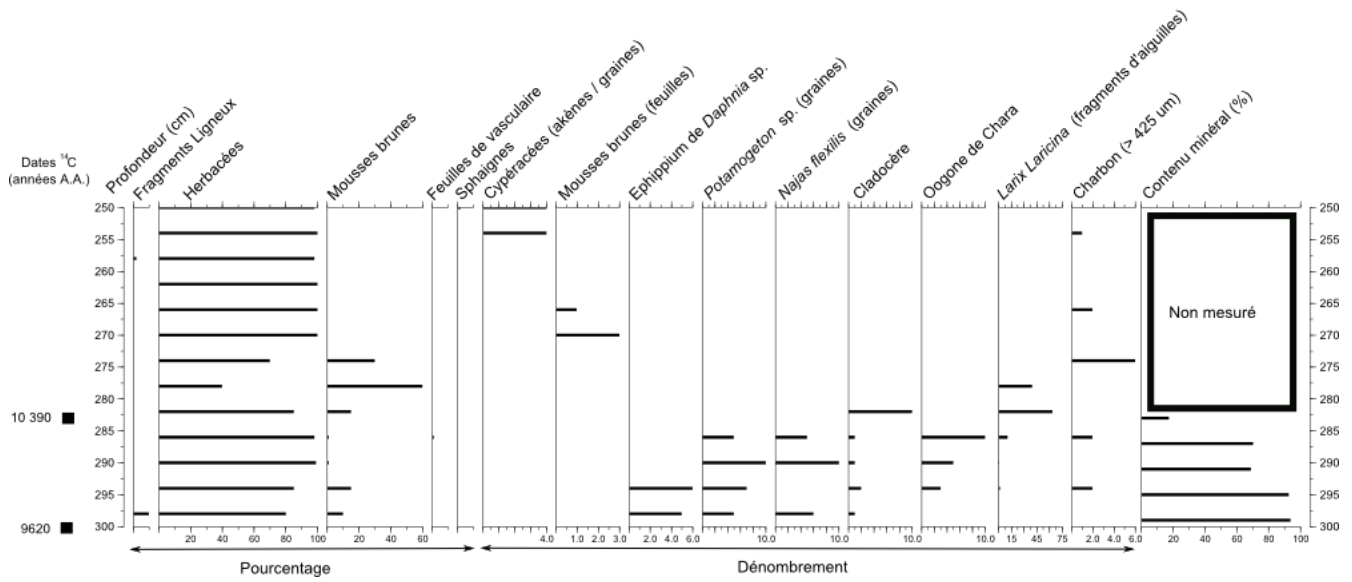


Figure 27. Diagramme macrofossiles de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase3

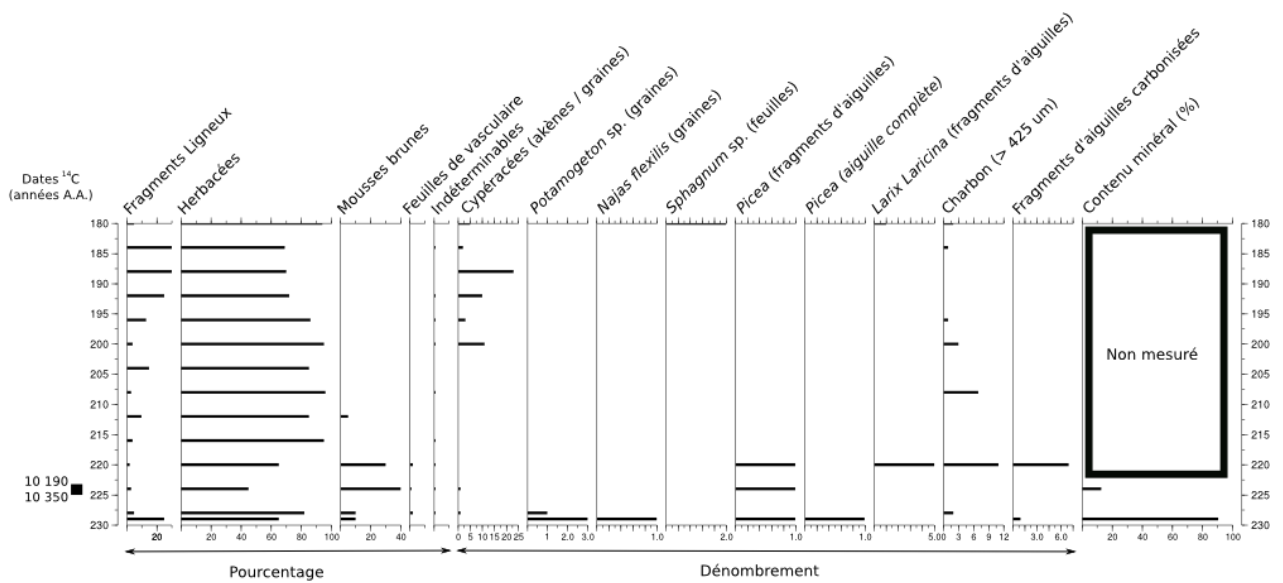


Figure 28. Diagramme macrofossiles de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase4

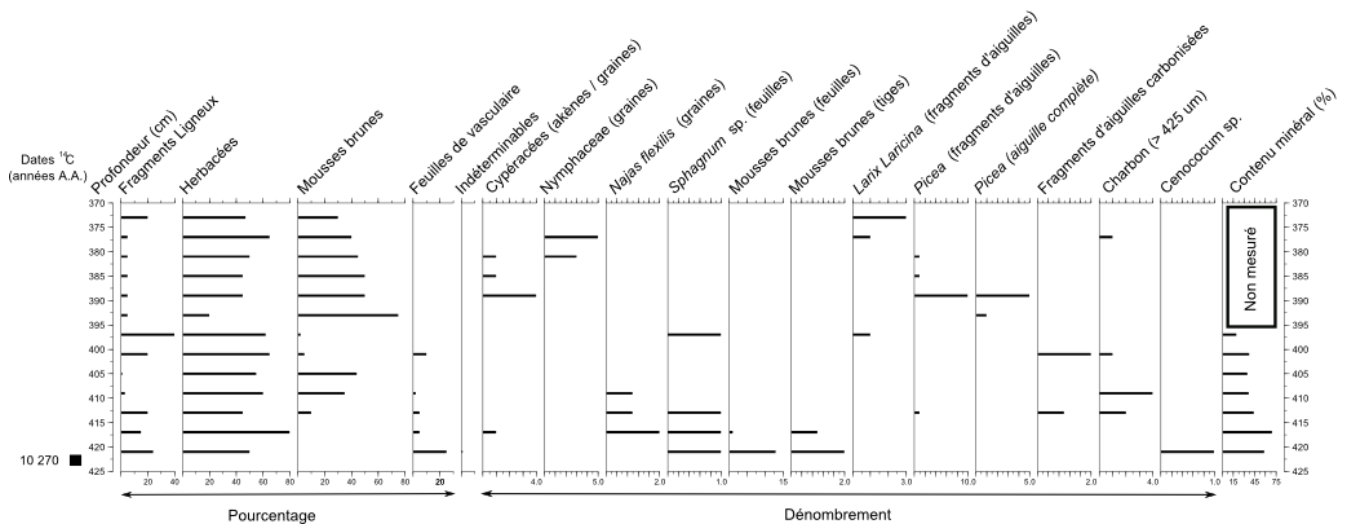


Figure 29. Diagramme macrofossiles de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase5

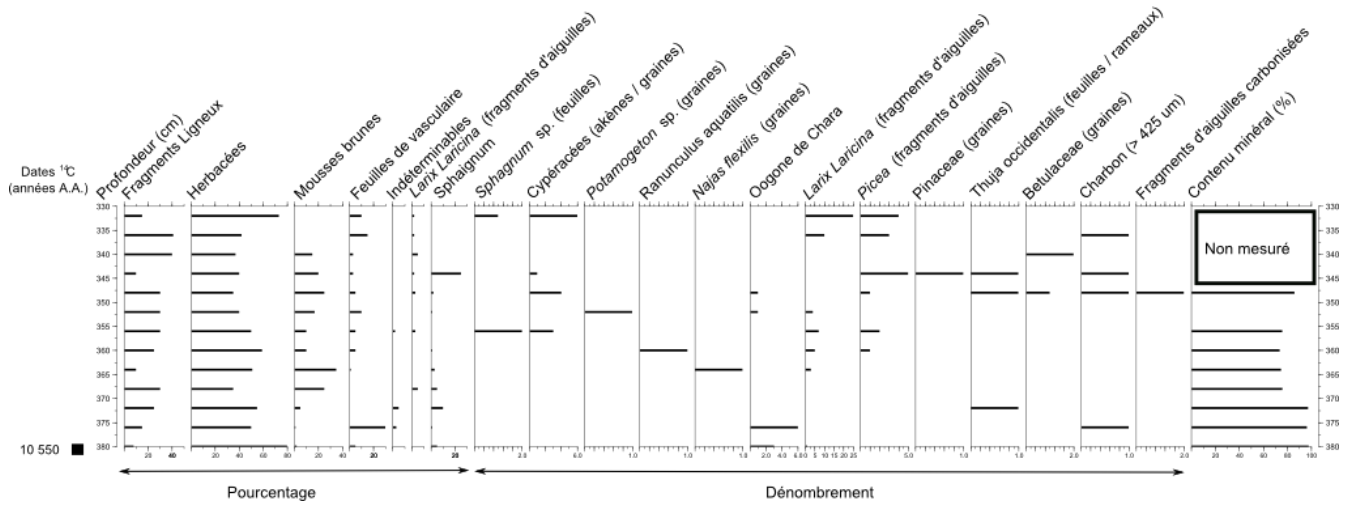


Figure 30. Diagramme macrofossiles de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase6

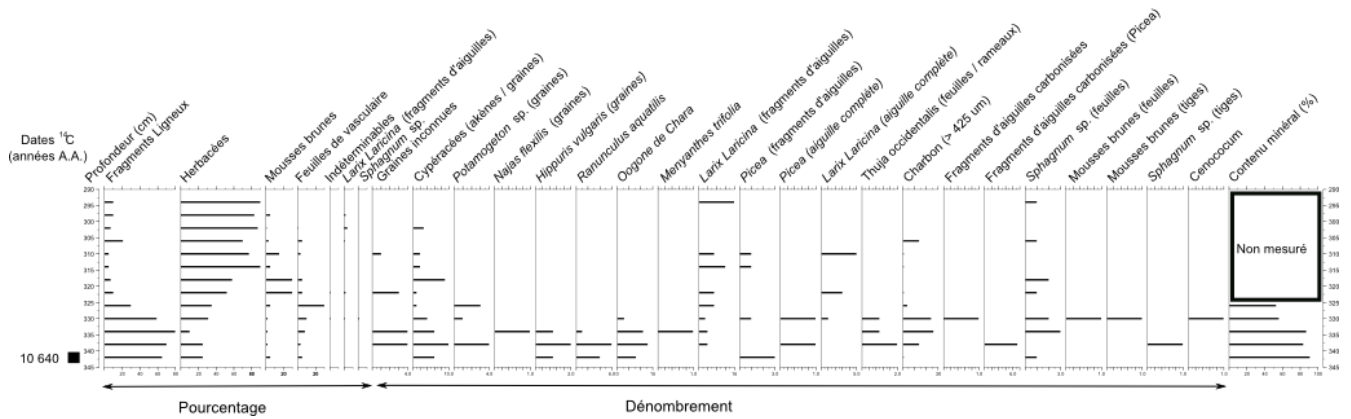


Figure 31. Diagramme macrofossiles de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase7

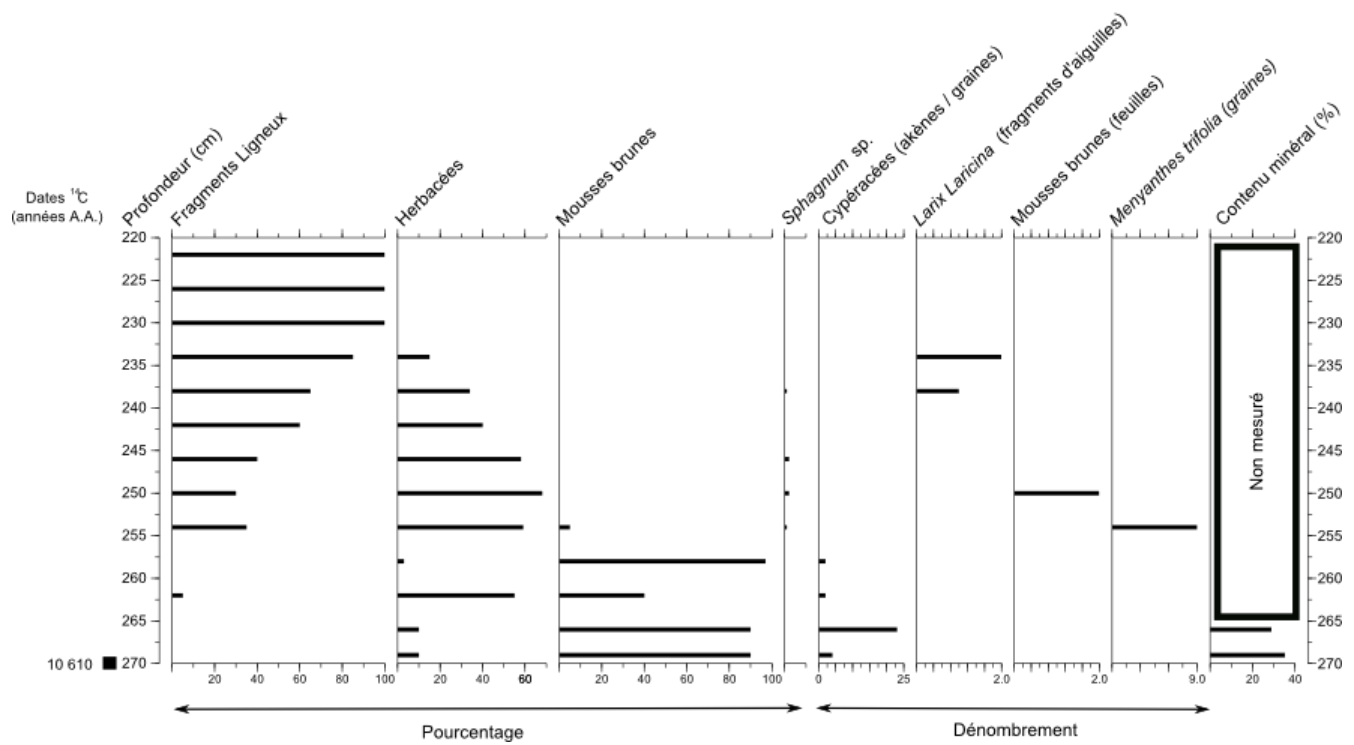


Figure 32. Diagramme macrofossiles de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase8

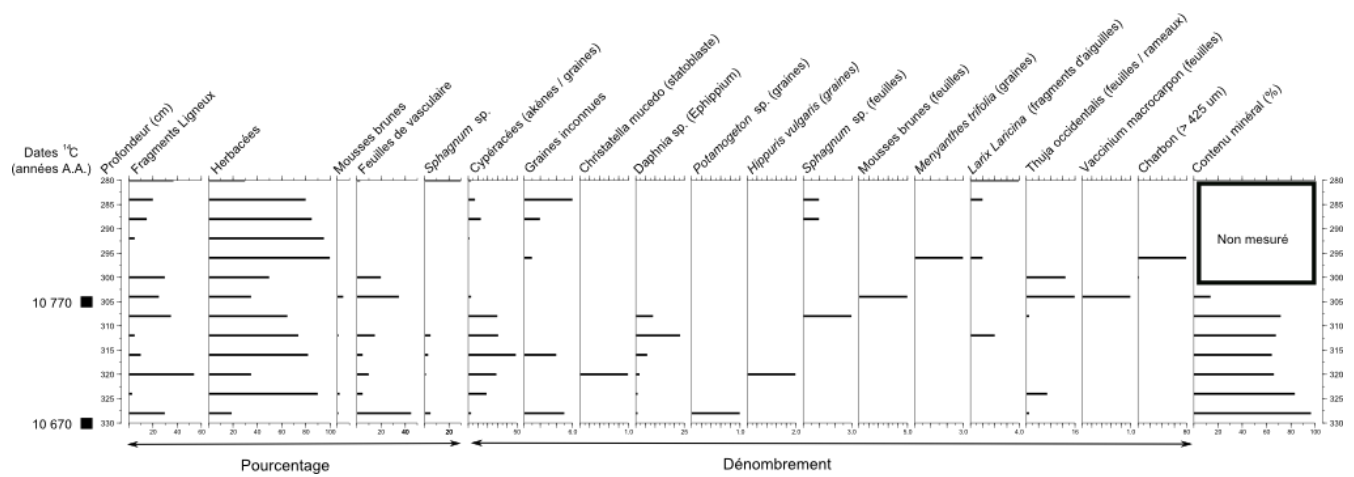


Figure 33. Diagramme macrofossiles de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase9

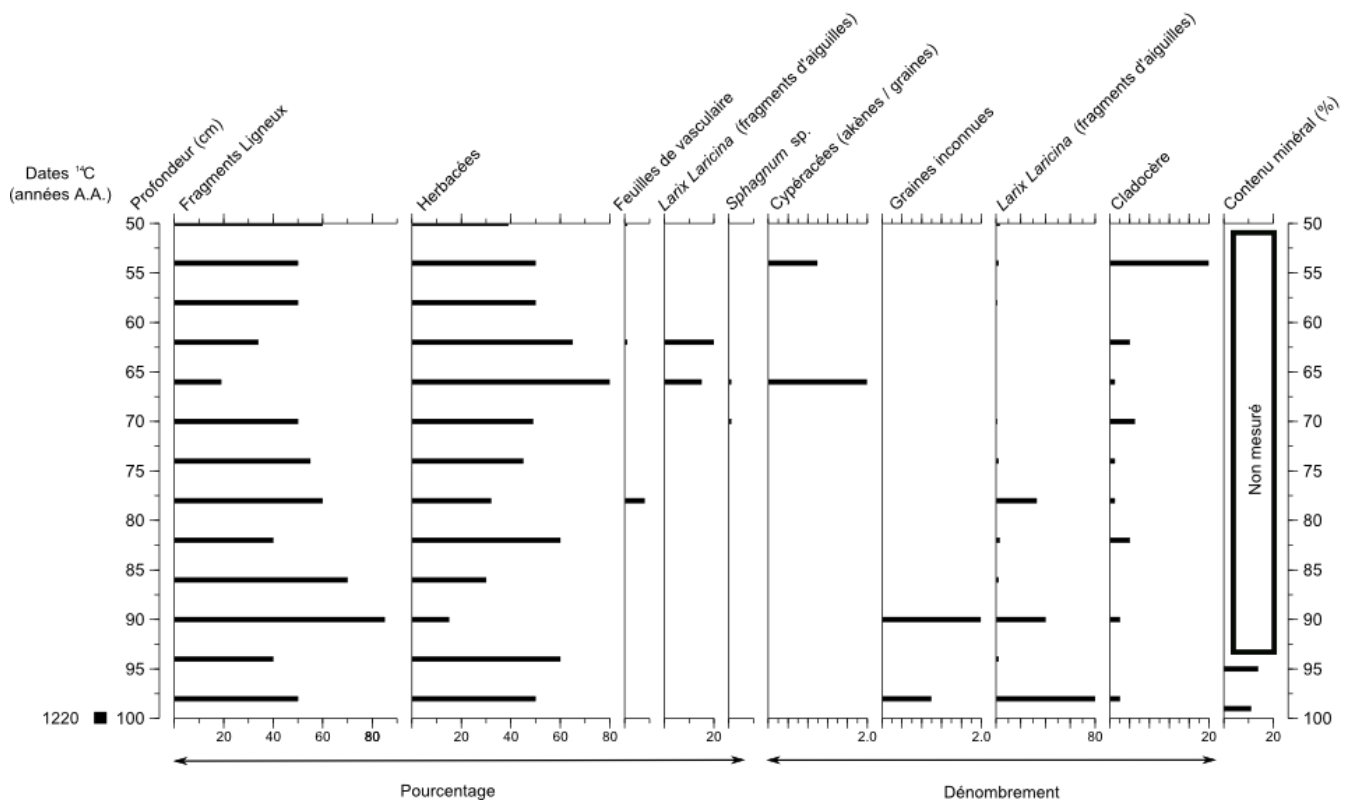


Figure 34. Diagramme macrofossiles de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase10

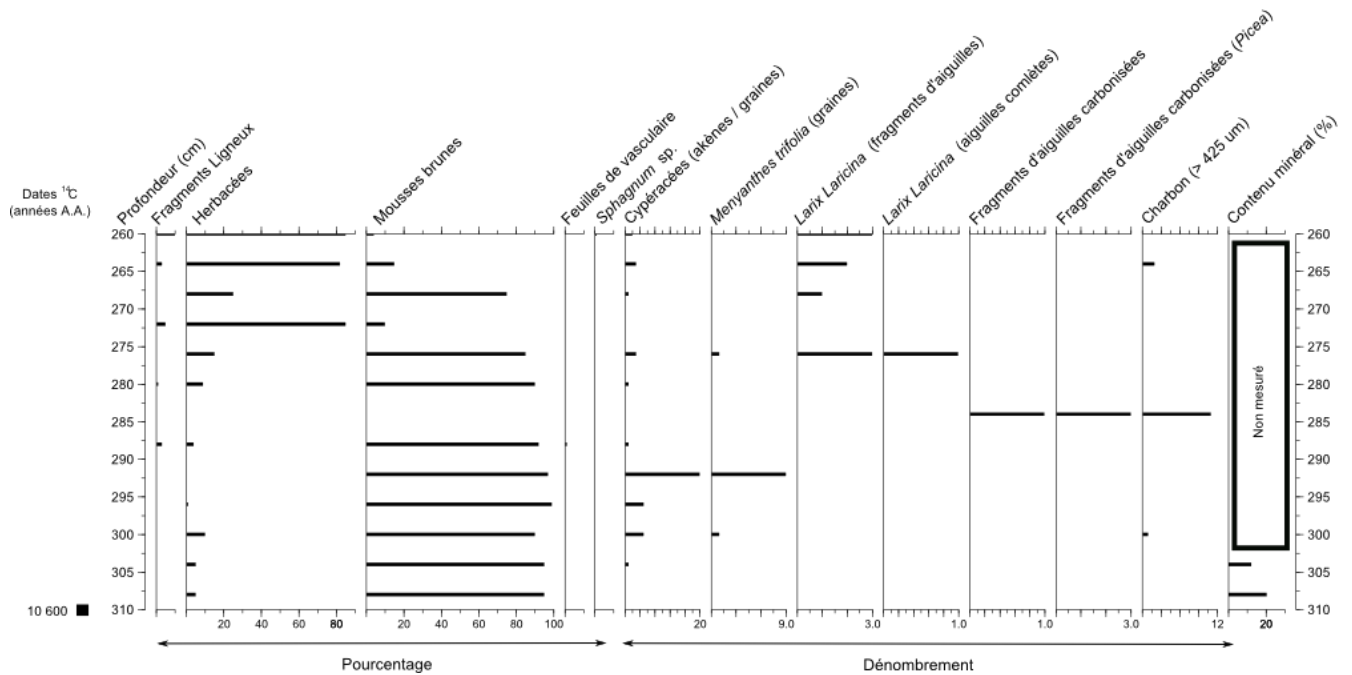


Figure 35. Diagramme macrofossiles de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase11

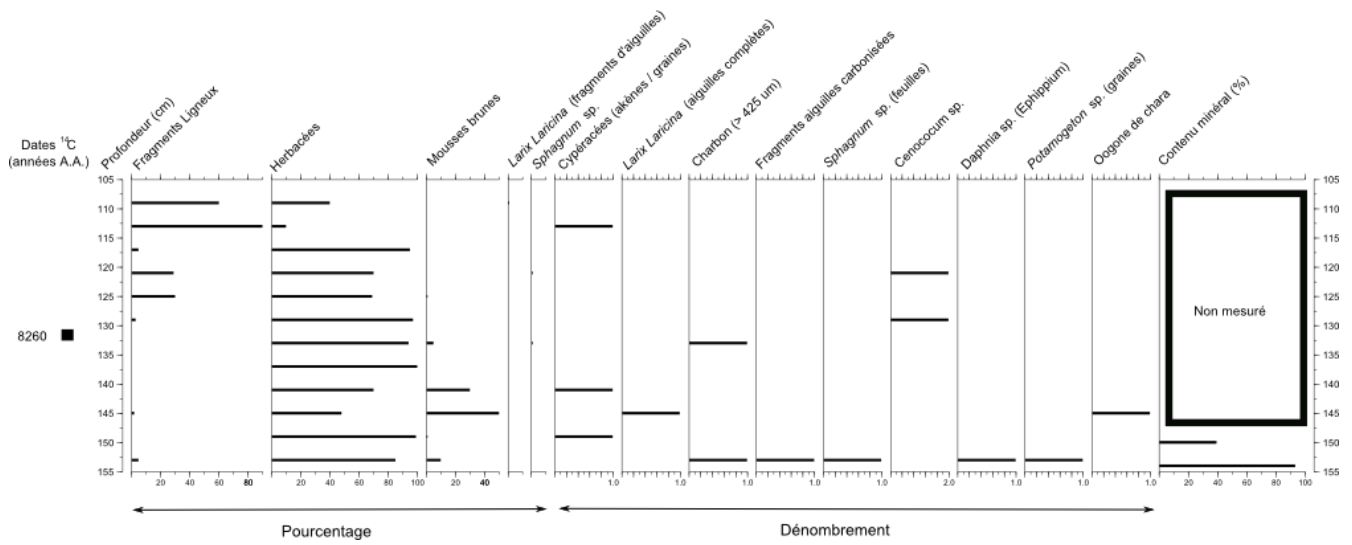


Figure 36. Diagramme macrofossiles de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase12

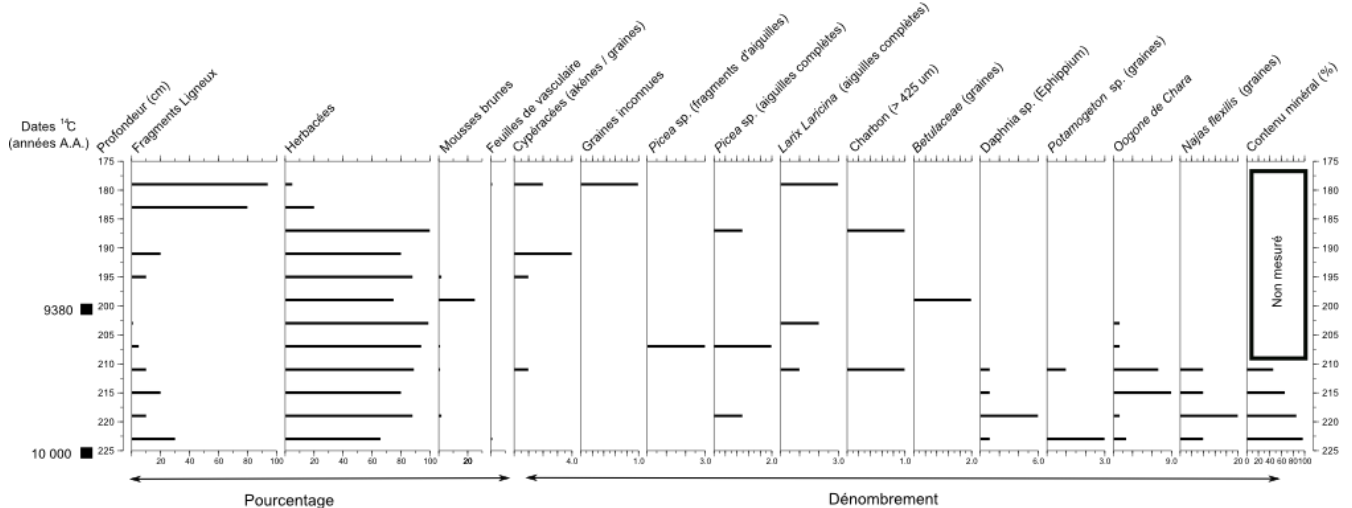


Figure 37. Diagramme macrofossiles de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase13

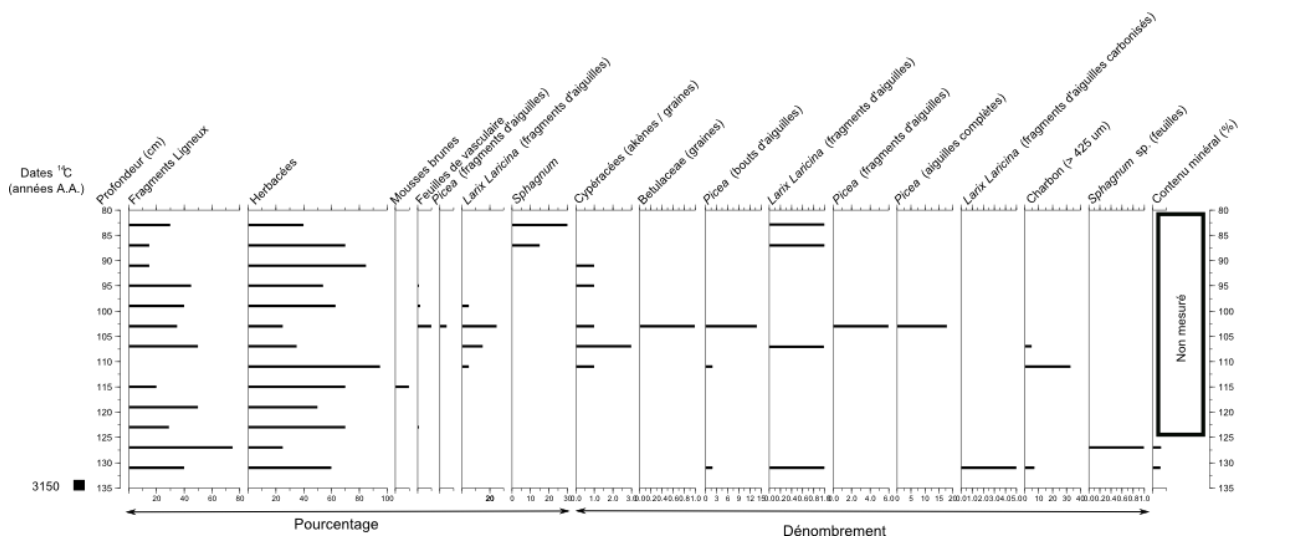


Figure 38. Diagramme macrofossile de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase14

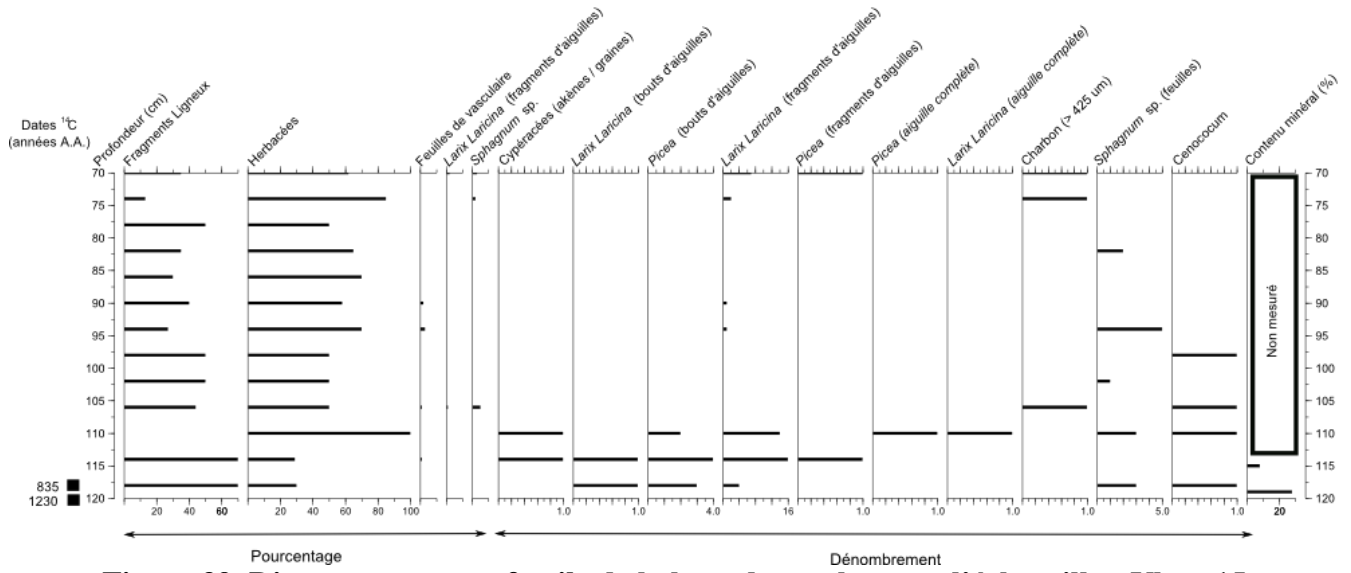


Figure 39. Diagramme macrofossile de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase15

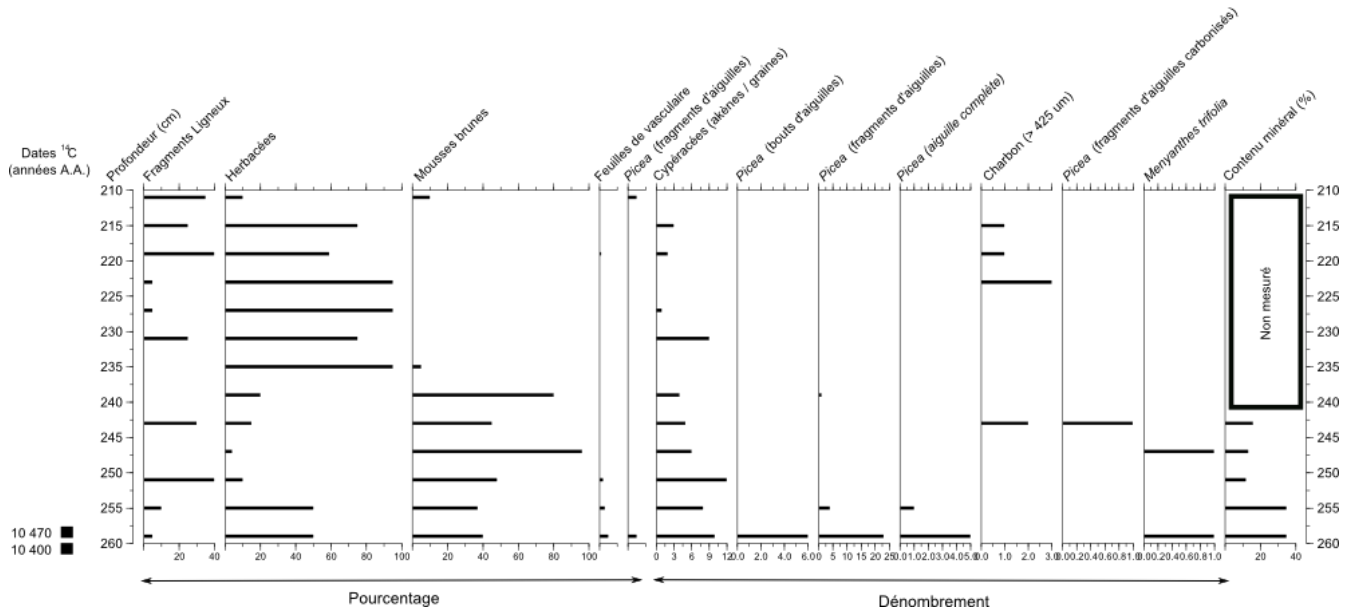


Figure 40. Diagramme macrofossiles de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase16

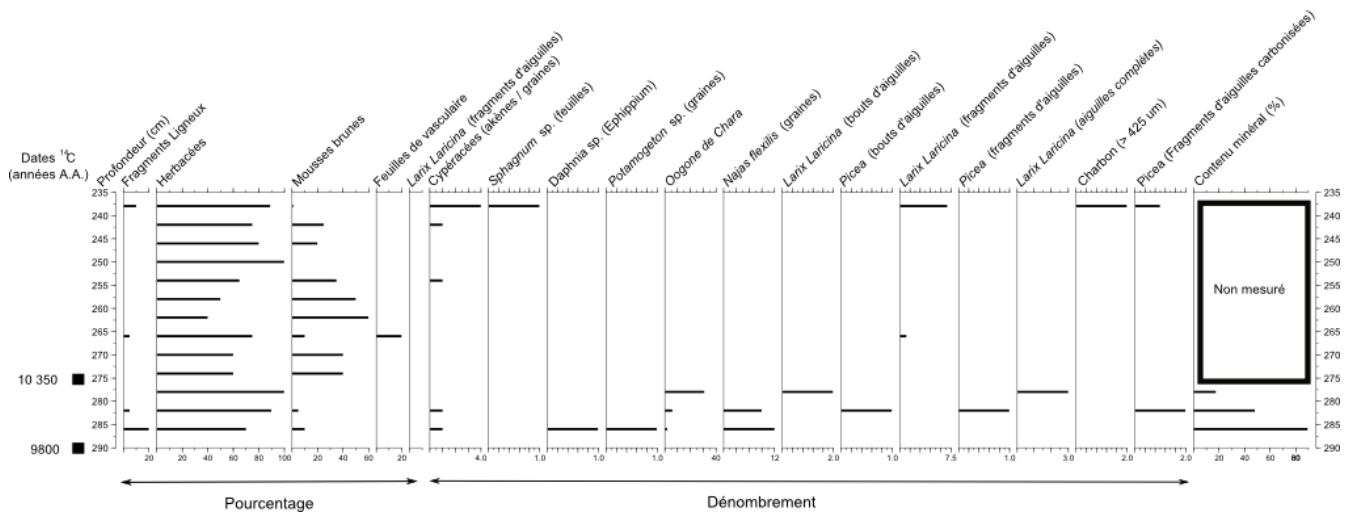


Figure 41. Diagramme macrofossile de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase17

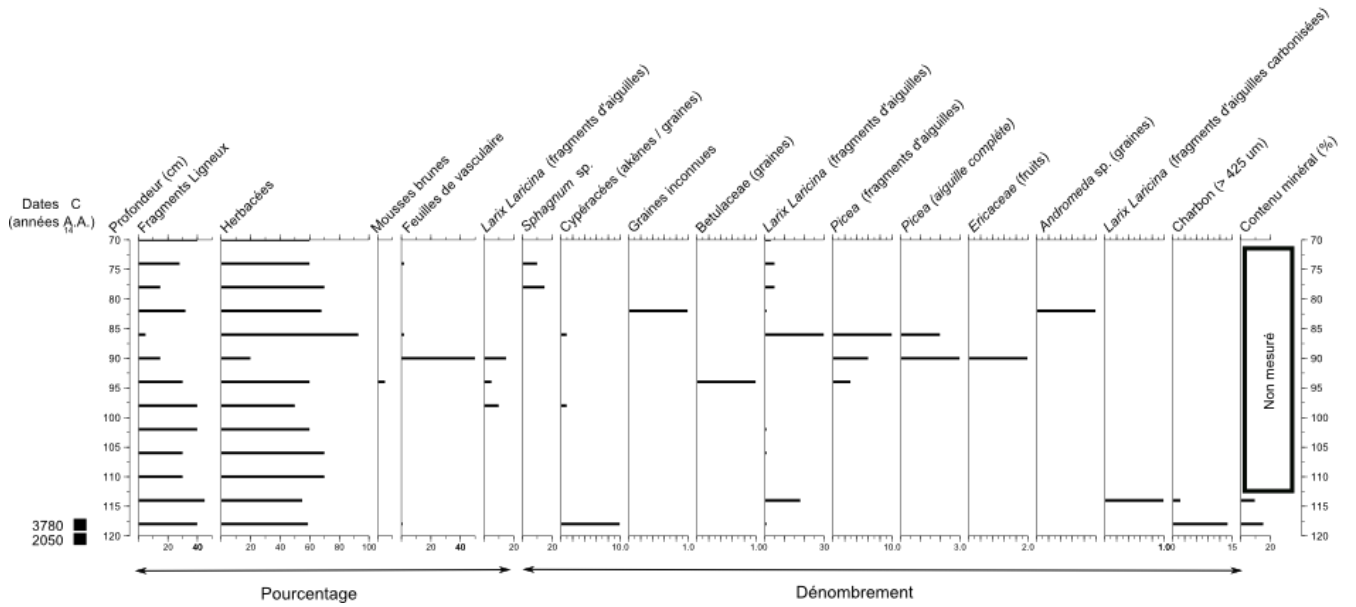


Figure 42. Diagramme macrofossiles de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase18

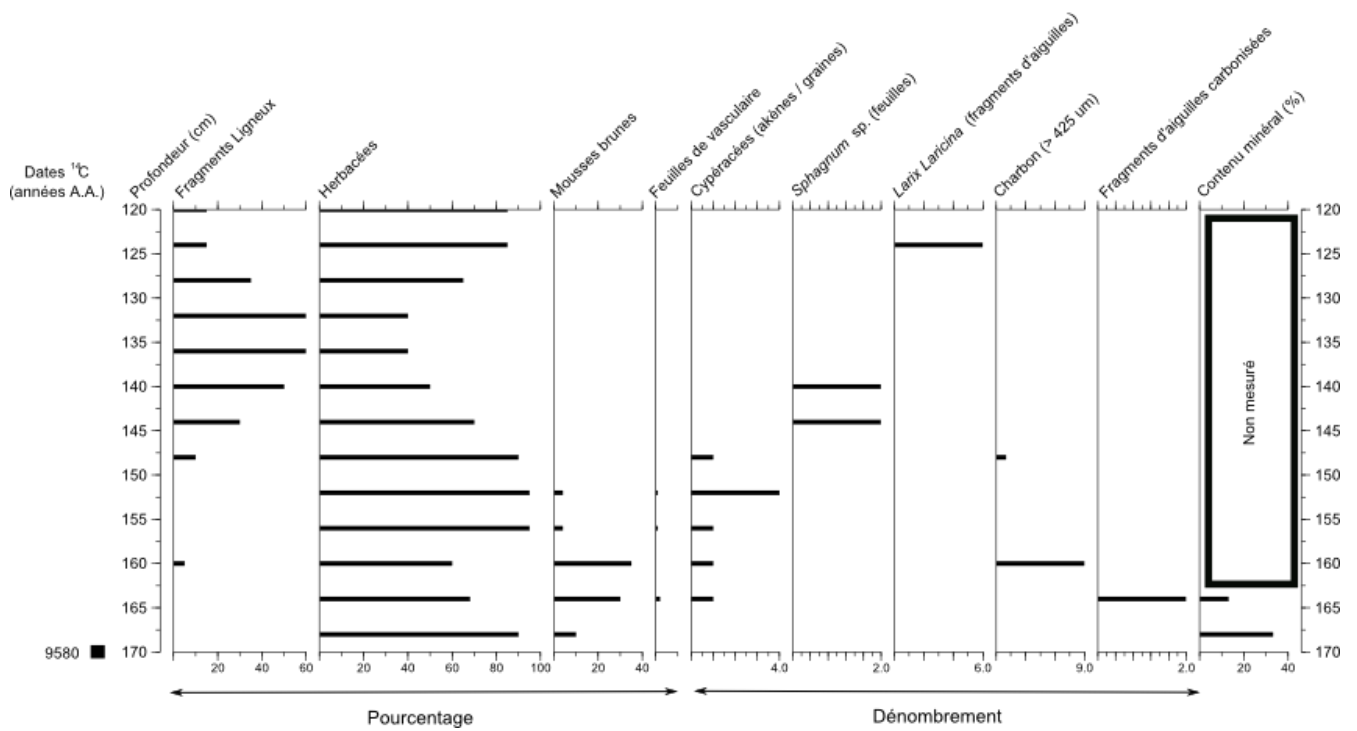


Figure 43. Diagramme macrofossiles de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase19

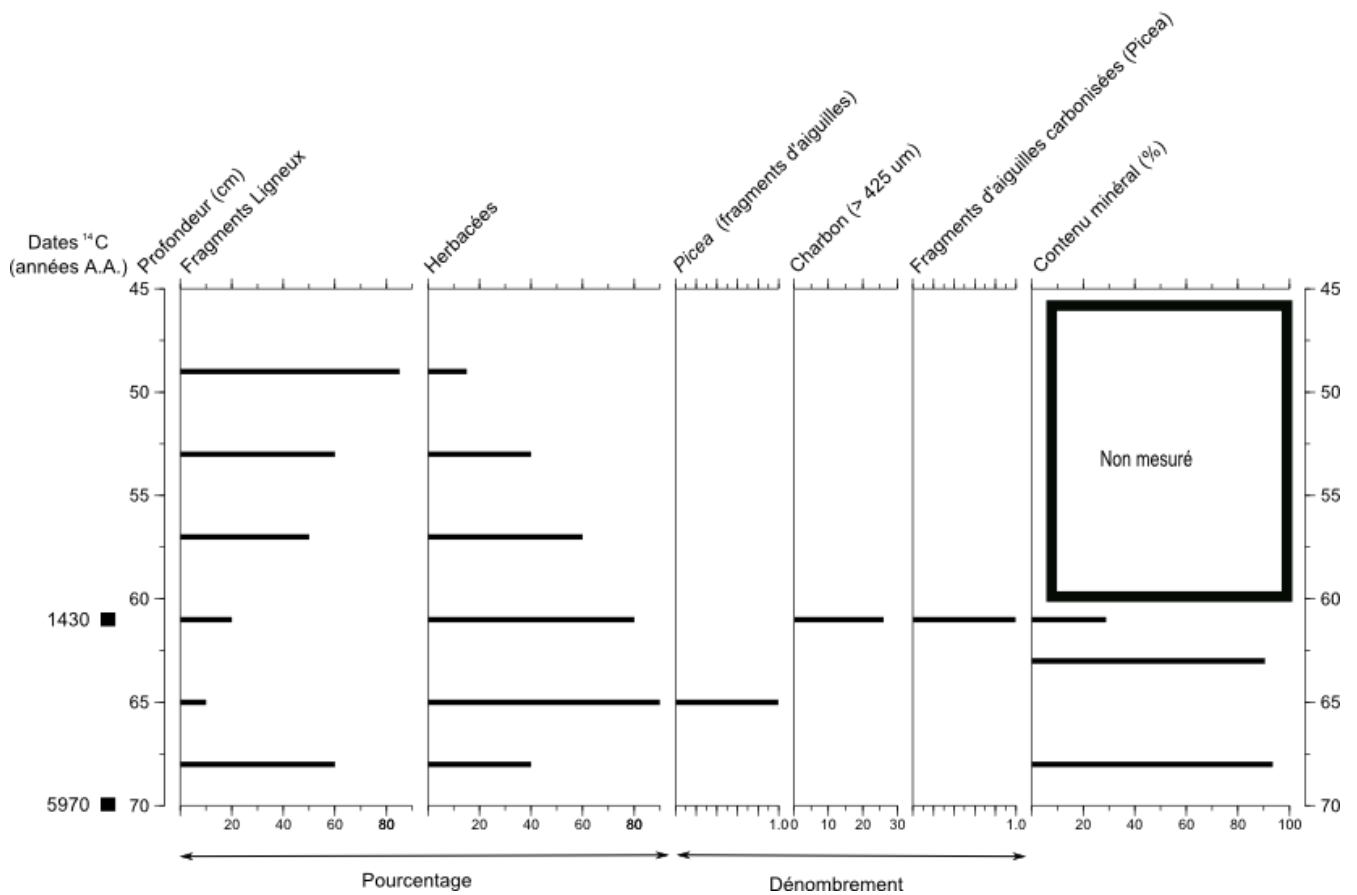


Figure 44. Diagramme macrofossiles de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase20

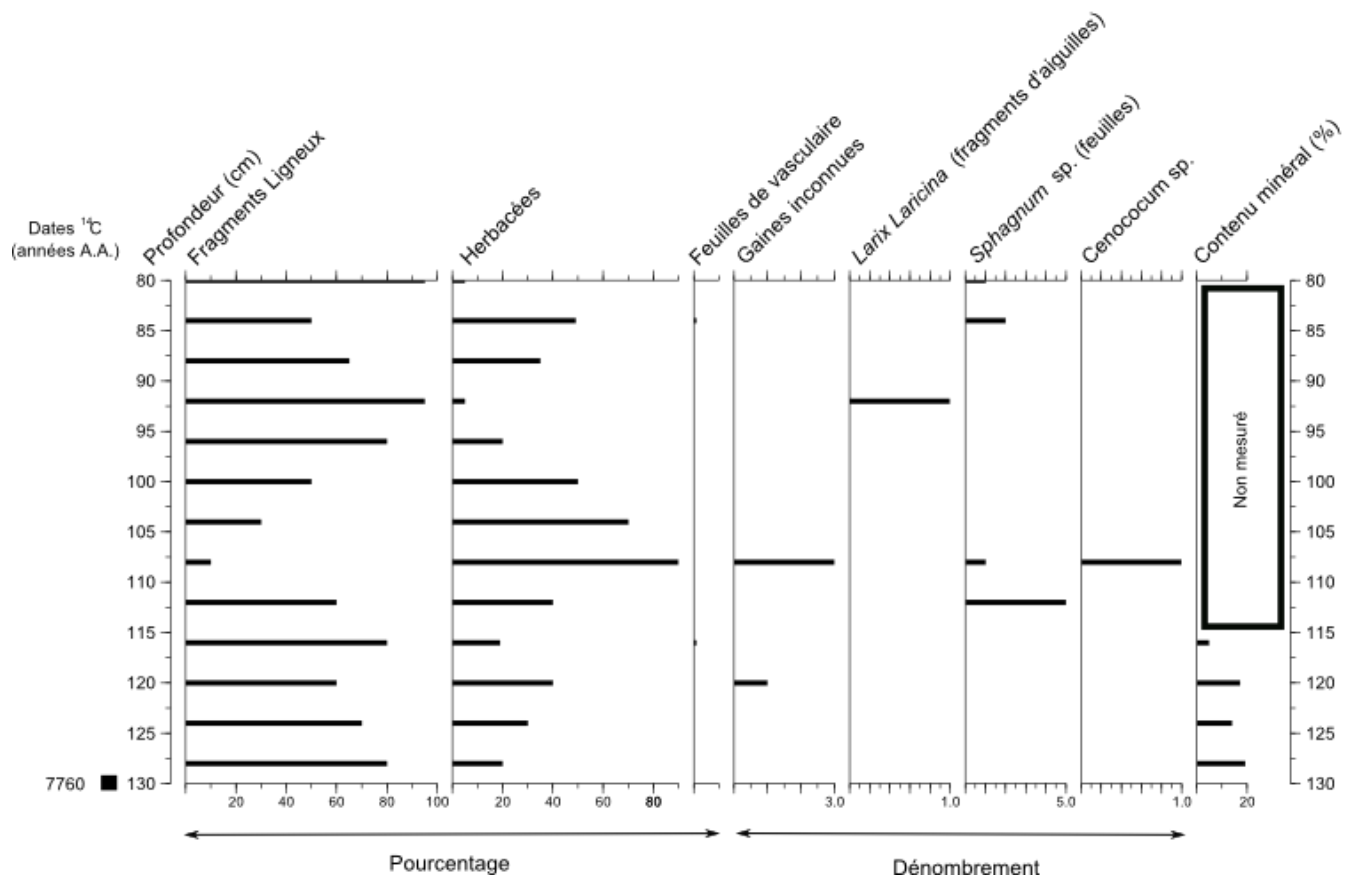


Figure 45. Diagramme macrofossiles de la base de tourbe pour l'échantillon Vbase21

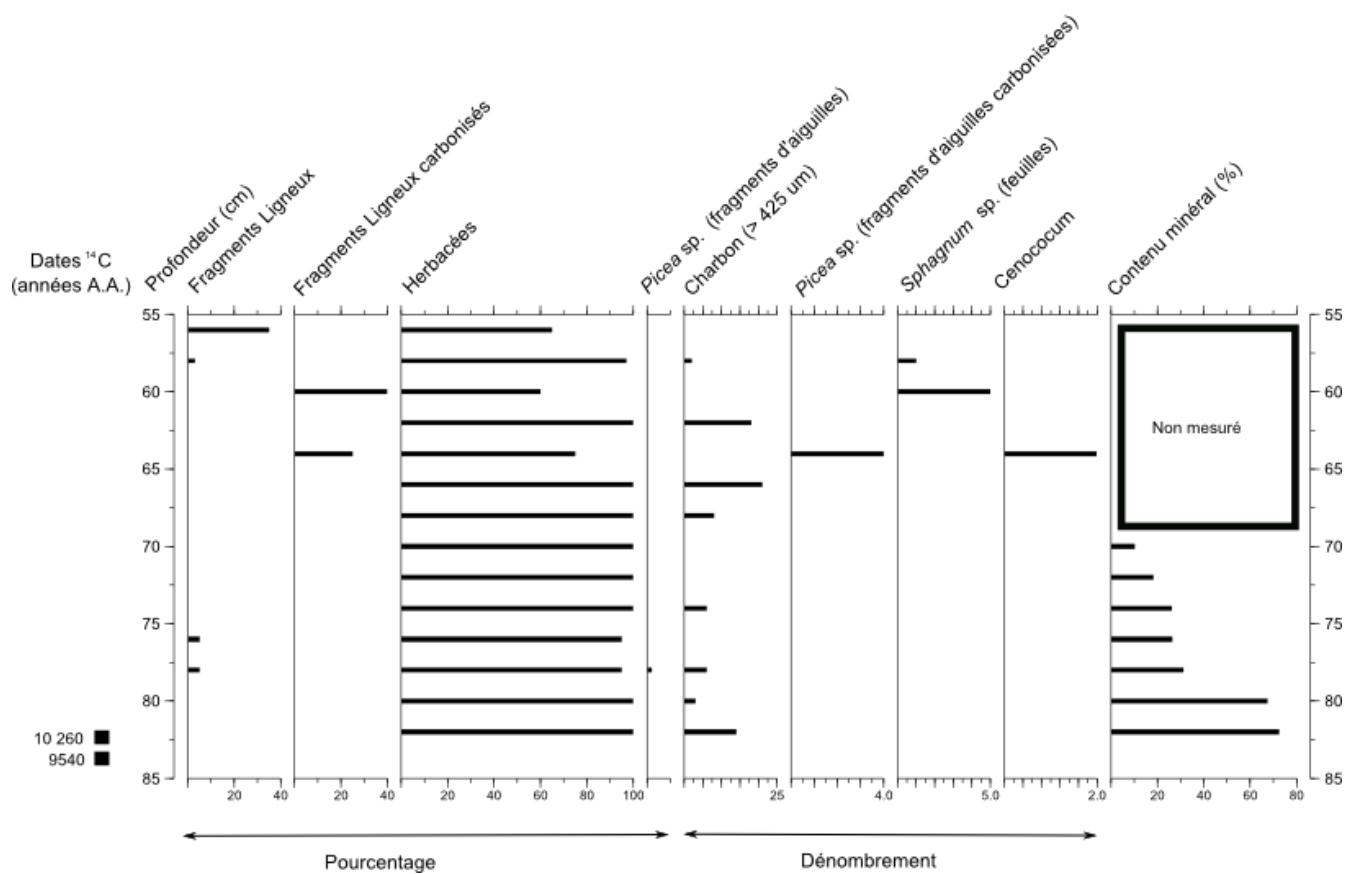


Figure 46. Diagramme macrofossiles de la base de tourbe pour l'échantillon Vmono