

SAMUEL BOURGAULT

**ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE LIÉES À
L'AMÉNAGEMENT DES TOURBIÈRES, RIVIÈRE-
DU-LOUP, BAS SAINT-LAURENT**

Essai présenté
à Mme. Line Rochefort,
dans le cadre du programme de maîtrise professionnelle en biogéosciences de l'environnement
pour l'obtention du grade de maître ès sciences (M.Sc.)

DÉPARTEMENT DE PHYTOLOGIE
FACULTÉ DES SCIENCES DE L'AGRICULTURE ET DE L'ALIMENTATION,
UNIVERSITÉ LAVAL, VILLE DE QUÉBEC,
QUÉBEC

2023

© Bourgault, 2023

Résumé

Les tourbières représentent un réservoir important de carbone et contribuent à réduire la quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. La perturbation des tourbières, suite aux changements d'affectation des terres ou d'extraction de la tourbe, est également une source d'émissions de GES. Ainsi, le rétablissement des fonctions naturelles des tourbières, suite à l'exploitation de la tourbe, peut permettre de réduire considérablement les émissions, de restaurer la fonction de séquestration du carbone et de préserver le stock de carbone restant dans la tourbière. Le site d'étude est l'un des plus grands complexes de tourbière du Québec dans la région de Rivière-du-Loup. L'objectif de cette étude était d'estimer les émissions de gaz à effet de serre liées à la décomposition de la matière organique de la tourbe qui sont estimées en CO₂, CH₄ et N₂O, pour l'année 2022. L'estimation a été faite en utilisant un calculateur d'émissions de gaz à effet de serre pour l'industrie de la production de tourbe horticole. Les données nécessaires pour estimer les émissions de GES et la séquestration du carbone étaient la superficie de territoire et le nombre d'années suivant l'aménagement de divers secteurs de la tourbière.

En 2022, les émissions provenant de la tourbière d'une superficie de 301 hectares, étaient d'environ 2500 tonnes de CO₂ (t CO₂) et de 225 tonnes équivalentes (t CO₂ éq) pour le CH₄. Les principales sources de dioxyde de carbone provenaient de l'aménagement en phase de récolte et de drainage. Les types d'aménagement qui émettaient le plus de méthane par année sont l'état naturel (123 t CO₂ éq), la récolte (49 t CO₂ éq) et le remouillage (29 t CO₂ éq). Le plan d'aménagement mis en place par l'entreprise vise à limiter le plus possible les périodes de drainage profond en dotant un plan de restauration pour chacun des sites de récolte afin de faciliter le retour d'un écosystème humide. L'importance de l'étude était de mieux connaître les émissions provenant du territoire de la tourbière, afin d'identifier des avenues possibles de réduction de GES.

Remerciements

Je tiens à remercier plusieurs personnes qui m'ont supporté dans la dernière étape de mon cheminement à la maîtrise. Je débute en remerciant particulièrement mon superviseur Talal Asif, étudiant au doctorat du Groupe de recherche en écologie des tourbières (GRET), qui m'a aidé à établir un cadre de travail, a répondu à mes questions et m'a fait découvrir son travail sur le terrain. Merci énormément à Mélina Guéné-Nanchen, pour avoir répondu à mes questions, ainsi que pour ses précieux commentaires lors de la rédaction de l'essai. Je remercie Line Rochefort, ma directrice de l'essai, pour la proposition de ce travail dans le cadre de ma maîtrise et de m'avoir accueilli au sein du GRET. Je souhaite également remercier Danielle Cloutier pour son encadrement et son support durant tout le long de ma maîtrise en Biogéosciences de l'environnement.

Je remercie le personnel de chez Berger dont Pierre-Olivier Sauvageau et Stéphane Bourgault qui se sont mis à ma disposition et ont répondu à mes questions. Il a été très motivant pour moi de travailler avec une entreprise située dans ma région et que j'admire beaucoup. Berger est engagé auprès de la communauté de la région de Rivière-du-Loup, s'implique dans la recherche scientifique et attache une importance au respect de l'environnement. Le fondement familial de l'entreprise s'accorde beaucoup avec mes valeurs, donc ce fût un grand plaisir pour moi de travailler en collaboration avec eux.

Table des matières

Résumé.....	1
Remerciements.....	2
Table des matières	i
Liste des tableaux.....	ii
Liste des figures	ii
Liste des équations.....	iii
1.0 Introduction	1
Objectifs de l'essai.....	6
1.2 Objectifs spécifiques	6
2.0 Région d'étude	8
2.1 Milieu biologique.....	9
2.1.1 Climat et végétation.....	9
2.1.2 Perturbations	9
2.2 Milieu physique.....	11
2.2.1 Occupation du territoire	11
2.2.3 Aménagement du site.....	12
2.3 Milieu humain	13
2.3.1 Utilisation du territoire.....	13
2.3.2 Secteurs économiques de l'industrie de tourbe Nord-Américaine	14
3.0 Méthodologie.....	16
3.1 Les types d'aménagement.....	16
3.1.1 Phase d'ouverture (décapage de la végétation et drainage).....	17
3.1.2 Phase de récolte	19
3.1.3 État naturel.....	19
3.1.4 Post production	20
3.1.5 Entreposage.....	21
3.2 Les facteurs d'émissions	22
3.3 Calcul des gaz à effet de serre émis annuellement par les tourbières	23
4.0 Résultats	26
4.1 Cartographie des types d'aménagement.....	26
4.2 Les émissions des types d'aménagement.....	27
4.3 Dioxyde de carbone (CO ₂).....	27
4.4 Méthane (CH ₄)	32
4.5 Oxyde d'azote (N ₂ O).....	33

5.0	Discussion	34
5.1	Cartographie de l'aménagement de la tourbière	34
5.2	Bilan des émissions de GES.....	36
6.0	Conclusion.....	43
	Références.....	44
	Annexe 1: Figures de la configuration des équipements pour mesurer les émissions de méthane	50
	Annexe 2: Équation pour estimer les émissions de GES.....	51
	Annexe 3: Tableau de conversion de facteur d'émission du CO ₂	53

Liste des tableaux

Tableau 1: Les facteurs d'émissions des principaux gaz à effet de serre émis par les tourbières selon la base du gaz, la masse du gaz et la superficie (Dessureault et collab., 2020)	25
Tableau 2: Bilan annuel des émissions de CO ₂ en fonction de l'état de la tourbière et de la superficie d'aménagement en 2022.....	27
Tableau 3: Bilan annuel des émissions de gaz à effet de serre selon l'état de la tourbière en 2022.	29
Tableau 4: Émissions de CO ₂ en tonne par année en fonction de la superficie et du nombre d'années de l'état de la tourbière pour chacune des phases avec un facteur de décroissance existant.	31
Tableau 5: Bilan annuel des émissions de méthane (CH ₄) en fonction de l'état de la tourbière et de la superficie d'aménagement en 2022.....	32
Tableau 6: (N ₂ O) émis en tonne par année selon le type d'aménagement de la tourbière en 2022	33
Tableau 7: Conversion de facteur d'émission du CO ₂ , selon la base du gaz, la masse du gaz et la superficie, pour les émissions de la tourbière, le facteur de décroissance et les émissions par le COD (bassin versant).....	53

Liste des figures

Figure 1: Cycle biogéochimique détaillé d'un bog (Adapté de Francez, 2000).....	3
Figure 2: Schéma indiquant les puits et sources des GES dans une tourbière conceptuellement, adapté du chapitre 2 de Strack et al., 2008.	5
Figure 3: Localisation du site d'étude à Rivière-du-Loup, au Bas-Saint-Laurent.	8
Figure 4: Emplacement du site dans le complexe de tourbière de Rivière-du-Loup, accompagné des perturbations par le feu délimité par les entités en rouge avec un contour simplifié.	10
Figure 5: Tracteur équipé d'un aspirateur servant à extraire la tourbe (Berger, 2022).	11
Figure 6: L'emplacement des différentes phases d'aménagement dans la tourbière.	12

Figure 7: Profil de tourbe classé à l'aide de l'échelle de von Post (schéma tiré de Chen Lopez, 2022).	13
Figure 8: Bassins de culture de sphaigne présent sur le site d'étude (Bourgault, 2022).	15
Figure 9: Carte des types d'aménagement retrouvés dans la tourbière étudiée.	18
Figure 10: Exemple de zones d'entreposage avec un sol minéral et un substrat de tourbe. .	21
Figure 11: Proportion de chacun des types d'aménagements sur la tourbière.....	26
Figure 12: Pourcentage pour les émissions des gaz de CO ₂ (excluant le CH ₄ et le N ₂ O) par type d'aménagement dans la tourbière	32
Figure 13: Pourcentage pour les émissions des gaz de CH ₄ (excluant le CO ₂ et le N ₂ O) par type d'aménagement.....	33
Figure 14: Proportion des principaux types d'aménagements de la tourbière à l'étude en 2022	35
Figure 15: Types d'aménagement de la tourbière touchés par le feu de 2014.	37
Figure 16: Imagerie satellitaire de la tourbière à l'état naturel 8 ans après feu.	38
Figure 17: Chambre opaque pour mesurer des émissions de méthane avec un cylindre pour mesurer le niveau de la nappe phréatique.	50

Liste des équations

Équation 1: Conversion de facteurs d'émissions du CO ₂ , selon la base du gaz, la masse du gaz et la superficie	51
Équation 2: Conversion de facteurs d'émissions du CH ₄ , selon la base du gaz, la masse du gaz et la superficie	51
Équation 3: Conversion en tonne d'équivalent CO ₂	51
Équation 4: Dioxyde de carbone émis par la tourbière en tonne par année.....	51
Équation 5: Méthane émis par la tourbière en tonne par année.....	52
Équation 6: Oxyde d'azote émis par la tourbière en tonne par année	52

1.0 Introduction

Une tourbière est un type de milieu humide qui se définit comme un milieu mal drainé, où le processus d'accumulation organique prévaut sur les processus de décomposition et d'humidification, où il y a formation de tourbe, peu importe la composition botanique des restes végétaux (Payette et Rochefort, 2001). Les tourbières fournissent de nombreux services écosystémiques, comme le stockage de carbone, la contribution à la biodiversité terrestre et la conservation d'archives paléoécologiques et archéologiques (Cubizolle, 2019). Ce type d'habitat fait l'objet d'extraction de la tourbe comme matière première dans l'industrie horticole, et l'intérêt économique de cette activité est bien établi depuis bien longtemps. Une tourbière récoltée peut être utilisée jusqu'à 100 ans pour certaines tourbières de grande superficie et son utilisation se termine lorsque la tourbe n'a plus les conditions requises pour l'horticulture. À ce moment, la restauration est pratiquée afin de restaurer la fonction d'accumulation du carbone.

Au Québec, l'extraction de tourbe à des fins horticoles touche surtout les régions du Bas-Saint-Laurent de la Côte-Nord et du Lac-Saint-Jean (Pellerin et Poulin, 2013). Cette activité est pratiquée sur les tourbières ombrotrophes ouvertes, composées principalement de tourbe de sphaignes (Payette et Rochefort, 2001). Les bogs (tourbières ombrotrophes) sont des types de tourbières qui sont alimentés exclusivement par des eaux de précipitation (Bazoge et al., 2021). Elles sont visées par l'exploitation surtout à cause de la grande quantité de tourbe accumulée et de leur dominance par les sphaignes (Zoltai et Vitt, 1995). De plus en plus de pays s'opposent à l'utilisation de la tourbe comme substrat horticole. En effet, la rareté des tourbières à sphaignes en Europe a donné naissance à un mouvement « Peat-free » dans l'idée de conserver celles qui restent (Sherriffs, 2018).

Suite à l'augmentation des émissions de GES d'origine anthropique depuis le début de la révolution industrielle en 1850, la concentration de méthane (CH₄) dans l'atmosphère est passée de 722 ppb pendant la période préindustrielle (Ciais et al., 2014) à 1907.2 ppb en février 2022 (NOAA, 2022). Le méthane est le deuxième gaz à effet de serre (GES) le plus important après le dioxyde de carbone (CO₂) et constitue environ 20% du forçage radiatif mondial (IPCC, 2013, p.14). Les tourbières naturelles sont des écosystèmes considérés comme des puits nets de carbone à long terme (Clymo et al., 1998), mais le drainage des

tourbières et l'extraction de la tourbe les transforment en sources importantes de CO₂ (Waddington et al., 2002). Dans une tourbière, le CO₂ est fixé par les plantes via le processus de photosynthèse, puis il est alloué à la biomasse végétale par la respiration autotrophe des plantes, renvoyant une partie du CO₂ dans l'atmosphère (Strack et al., 2008).

L'autre perte de CO₂ dans les tourbières provient de la respiration hétérotrophe des microbes tels que les bactéries et les champignons résultant de la décomposition de la matière organique (Strack et al., 2008). Sheperd (2009) suggère que la séquestration du carbone dans les tourbières est due aux effets inhibiteurs des composés phénoliques qui créent un « verrou enzymatique » sur la décomposition. D'ailleurs, Freeman et al. (2012) ont manipulé l'efficacité du verrou enzymatique (enzymic latch) comme outil de capture du carbone. Pour les écosystèmes en aval, les tourbières sont également des sources localement importantes de carbone organique dissous (COD) (Schiff et al., 1998). Provenant de la tourbière, le COD s'écoulant dans l'eau du bassin versant compte également pour des émissions de C.

En ce qui concerne les mécanismes d'émission du méthane, le niveau de la nappe phréatique est souvent le meilleur prédicteur du flux de CH₄ (Wilson et al., 2016). Pour comprendre comment les tourbières produisent des émissions de méthane, il faut connaître leur profil de tourbe. La formation des tourbières conduit à une structure de sol à deux niveaux dans le profil de tourbe, appelés acrotelme et catotelme (Strack et al., 2008). La Figure 1 montre le cycle du carbone dans le profil de tourbe d'une tourbière. La catotelme est la couche inférieure et profonde qui est saturée en eau en permanence et qui contient de la matière organique hautement décomposée (Strack et al., 2008). Dans des tourbières ombrotrophes, le méthane est produit dans des conditions de forte réduction par des bactéries méthanogènes (Zinder, 1993). La catotelme est la partie de la tourbière en condition anoxique, où il y a des microbes anaérobies qui produisent du CH₄ (Strack et al., 2008). La méthanogenèse est un processus par lequel les microbes se nourrissent de la matière organique. Le méthane est donc produit dans la zone saturée du sol tourbeux et s'échappe de trois manières vers l'atmosphère : le transport par les plantes (quenouilles, scirpes, *Carex* spp.), où 89% sont transportés par les aérochymes des plantes vasculaires, 10% par ébullition au niveau des mares (bulles) et 1% par diffusion directe dans l'atmosphère (Schutz, 1991).

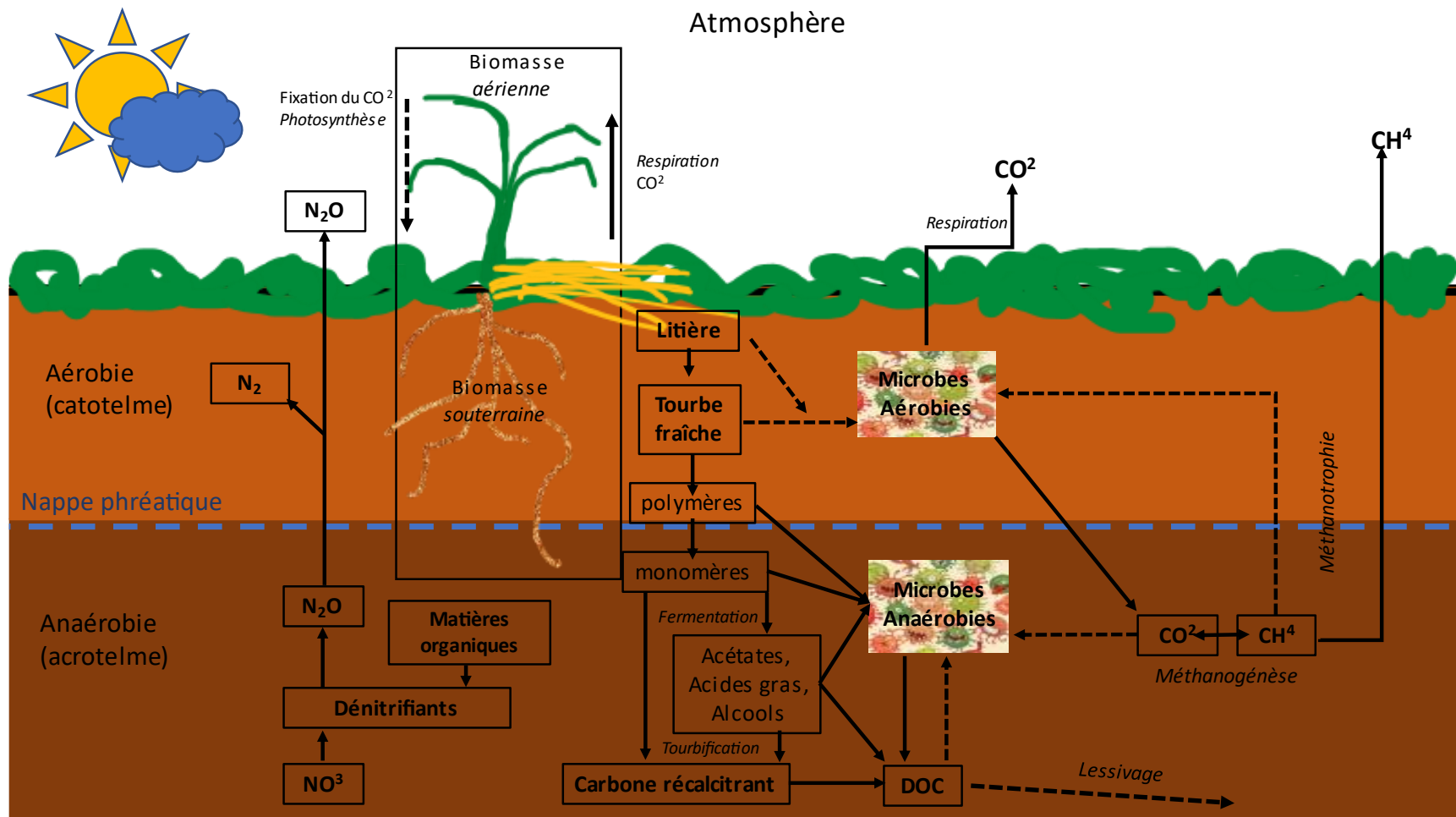


Figure 1: Cycle biogéochimique détaillé d'un bog (Adapté de Francez, 2000).

L'extraction de la tourbe implique d'enlever la végétation et d'abaisser le niveau de la nappe phréatique, ce qui entraîne une diminution du flux de CH_4 provenant des tourbières en extraction (Waddington et Day, 2007). Il existe deux principales méthodes d'extraction de la tourbe qui sont présents dans tout l'est du Canada: la coupe manuelle par blocs et l'extraction par aspiration (Poulin et al., 2005). Ces deux méthodes ont conduit à des surfaces abandonnées très différentes, ce qui a entraîné des modèles de recolonisation différents. Le Groupe de recherche en écologie des tourbières (GRET) a mis au point une méthode de restauration des tourbières dominées par les sphaignes. Cette dernière est la méthode de transfert de la couche muscinale (MTCM) qui vise à rétablir un couvert végétal typique des tourbières à sphaignes, et par le fait même, la fonction de séquestration de carbone. Cette méthode comprend huit étapes : la planification, la préparation du site, la récolte des plantes, l'épandage des plantes, l'épandage d'un paillis, la fertilisation, le remouillage et le suivi de la restauration (Quinty et Rochefort, 2003). La MTCM consiste à bloquer les fossés de drainage en les remplissant de matériau, et à collecter de la sphaigne dans une tourbière à l'état naturel (site donneur) pour l'étaler sur la tourbière qui doit être restaurée en y ajoutant du paillis de paille (Ferland et Rochefort, 1997). Le tout est ensuite fertilisé avec du phosphate naturel et les canaux de drainage qui avaient été creusés sont bloqués (Quinty et Rochefort, 2003). Cette pratique permet le retour de la biodiversité et de la séquestration de carbone en moins de 15 ans (González et Rochefort, 2014; Hugron et al., 2020; Nugent et al., 2018).

De plus, les tourbières sont également une source potentielle d'oxyde nitreux (N_2O), puisqu'ils sont des zones humides acides couvertes de plantes vasculaires adaptées à l'eau et de mousses du genre *Sphagnum*. Le potentiel de réchauffement globale (PRG) du N_2O est 265 fois plus élevé que celui du CO_2 sur une période de 100 ans (IPCC, 2014). Des estimations suggèrent que 0,6 % des émissions annuelles mondiales de N_2O pourraient provenir de ces zones humides acides (Repo et al., 2009). La principale source de N_2O est constituée par les dénitrifiants dans les habitats anoxiques (Kolb et Horn, 2012). La Figure 2 montre un schéma conceptuel des puits et des sources de CO_2 dans les écosystèmes de tourbière. Le stockage du carbone repose sur un équilibre entre la photosynthèse et la décomposition de la matière organique.

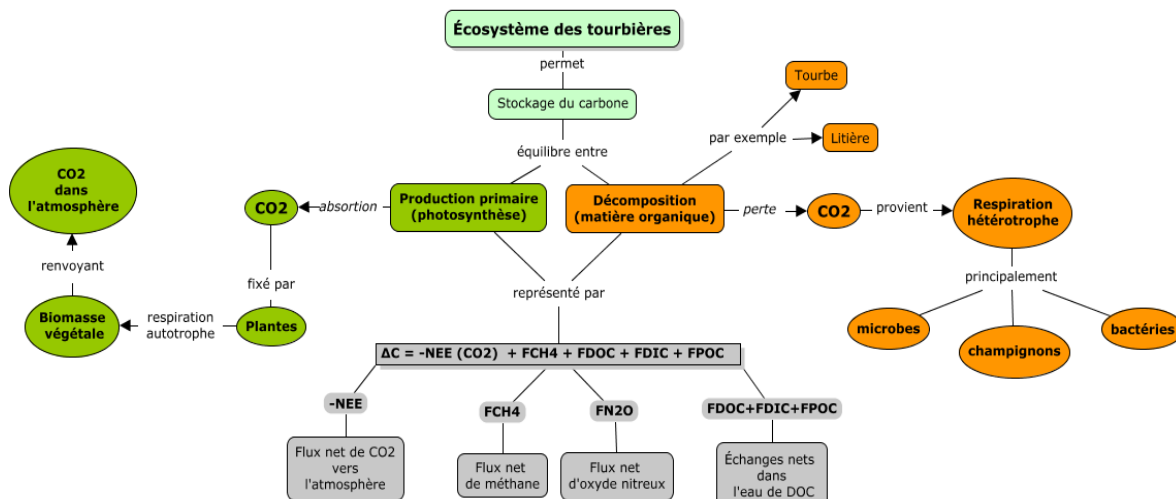


Figure 2: Schéma indiquant les puits et sources des GES dans une tourbière conceptuellement, adapté du chapitre 2 de Strack et al., 2008.

En gérant efficacement les émissions de GES dans l'industrie de l'extraction de la tourbe, il est possible de réduire l'empreinte carbone de cette industrie et de contribuer à la lutte contre le changement climatique tout en assurant la durabilité à long terme de l'industrie de la tourbe. D'ailleurs, afin de gérer de manière responsable leur ressource, les producteurs de tourbe ont décidé de réaliser des bilans de leurs émissions de GES dans le cadre de la certification « Responsibly Managed Peatlands » (SCS global Services 2017). La gestion des GES vise donc la mesure des émissions mécaniques et non-mécaniques provenant des activités d'exploitation de la tourbe. Les émissions mécaniques sont les émissions liées à la machinerie ainsi qu'aux émissions fugitives de réfrigération et de climatisation. Les sources non-mécaniques représentent des émissions de GES et des séquestrations du carbone liées à l'aménagement des tourbières. Ce travail se penchera uniquement sur les émissions non-mécaniques. Ce type de source se définit comme étant des émissions de GES et des séquestrations du carbone liées à l'aménagement des tourbières (Dessureault et collab., 2020).

À ce jour, beaucoup d'étude sur les émissions de GES en milieu de tourbière restaurée à la suite de changements d'affectation des terres ou de l'exploitation de la tourbe ont été réalisé (Nugent et al., 2018, 2019; Rankin et al., 2018; M Strack et Zuback, 2013; Waddington et

Day, 2007; Wilson et al., 2016). Les connaissances sur les émissions de GES dispersées dans les articles scientifiques ont été synthétisé dans un calculateur d'émissions de GES pour l'industrie de la tourbe horticole (Dessureault et collab., 2020). C'est avec cet outil scientifique, qu'un bilan de carbone de toutes les activités et types d'aménagement dans une tourbière peut être présenté.

Cet essai, réalisé sur un site qui est en partie à Rivière-du-Loup et à Saint-Modeste, vise à acquérir des connaissances sur les émissions de GES liées au type d'aménagement des tourbières. Il vise aussi à mieux comprendre le plan d'aménagement mis en place pour faire de la restauration de tourbière dans un contexte d'exploitation de la tourbe. Les données nécessaires pour estimer les émissions de GES et la séquestration du carbone sont la superficie de territoire, ainsi que le nombre d'années d'aménagement de la tourbière pour les phases de post-production. Une cartographie d'imagerie satellitaire a été utilisée pour délimiter, illustrer et mesurer la superficie des différents types d'aménagement de la tourbière étudié.

Objectifs de l'essai

La présente étude avait pour objectif principal de documenter les émissions de GES provenant de la tourbière du site situé à Saint-Modeste et Rivière-du-Loup. Plus précisément, il s'agissait de réaliser une analyse cartographique dans le but d'estimer les émissions de GES provenant de chacun des types d'aménagement de la tourbière. Ces estimations ont été calculées à l'aide du guide d'utilisation du calculateur d'émissions de gaz à effet de serre pour l'industrie de la production de tourbe horticole (Dessureault et collab., 2020). Les informations servant à estimer les émissions de GES étaient les facteurs d'émissions liées aux types d'aménagement et leur superficie. Le nombre d'années d'aménagement a également été nécessaire pour le calcul des émissions dans les aménagements en phase de post-production. Les estimations obtenues serviront à évaluer les possibilités de réduction des émissions de GES non-mécanique pour le site à l'étude.

1.2 Objectifs spécifiques

L'essai consistait à répondre à trois objectifs spécifiques qui permettront de rassembler plus d'informations sur les émissions de GES du site d'étude.

- Cartographier les différents types d'aménagement de la tourbière;
- Estimer les émissions de GES pour les différents types d'aménagement de la tourbière et les différentes phases des aménagements (état naturel, phase d'ouverture, phase de récolte et post production);
- Évaluer les possibilités de réduction d'émissions de GES dans le plan de restauration mis en place pour le site de récolte.

2.0 Région d'étude

Le site à l'étude est une tourbière en extraction située dans la région administrative du Bas-Saint-Laurent (01), dans la province du Québec au Canada (Figure 3). Il fait partie du territoire de la municipalité régionale de comté (MRC) de Rivière-du-Loup. La localisation de la tourbière étudiée est dans une plaine agricole entre la rive sud du fleuve Saint-Laurent et le piémont appalachien (47°50'19" N, 69°26'30" W). Cette plaine est une bande étroite d'environ 16 kilomètres, en basse altitude (0-250 m) constituée de dépôts de surfaces de sable, de limon et d'argile (Fulton, 1995). La déglaciation de cette région s'est déroulée il y a environ 12 000 ans et celle-ci a ensuite été submergée par la mer de Goldthwait (Dionne, 1977). Au Bas-Saint-Laurent, les tourbières les plus importantes occupent des dépressions mal drainées, situées dans le piémont appalachien (Martineau, 1977).

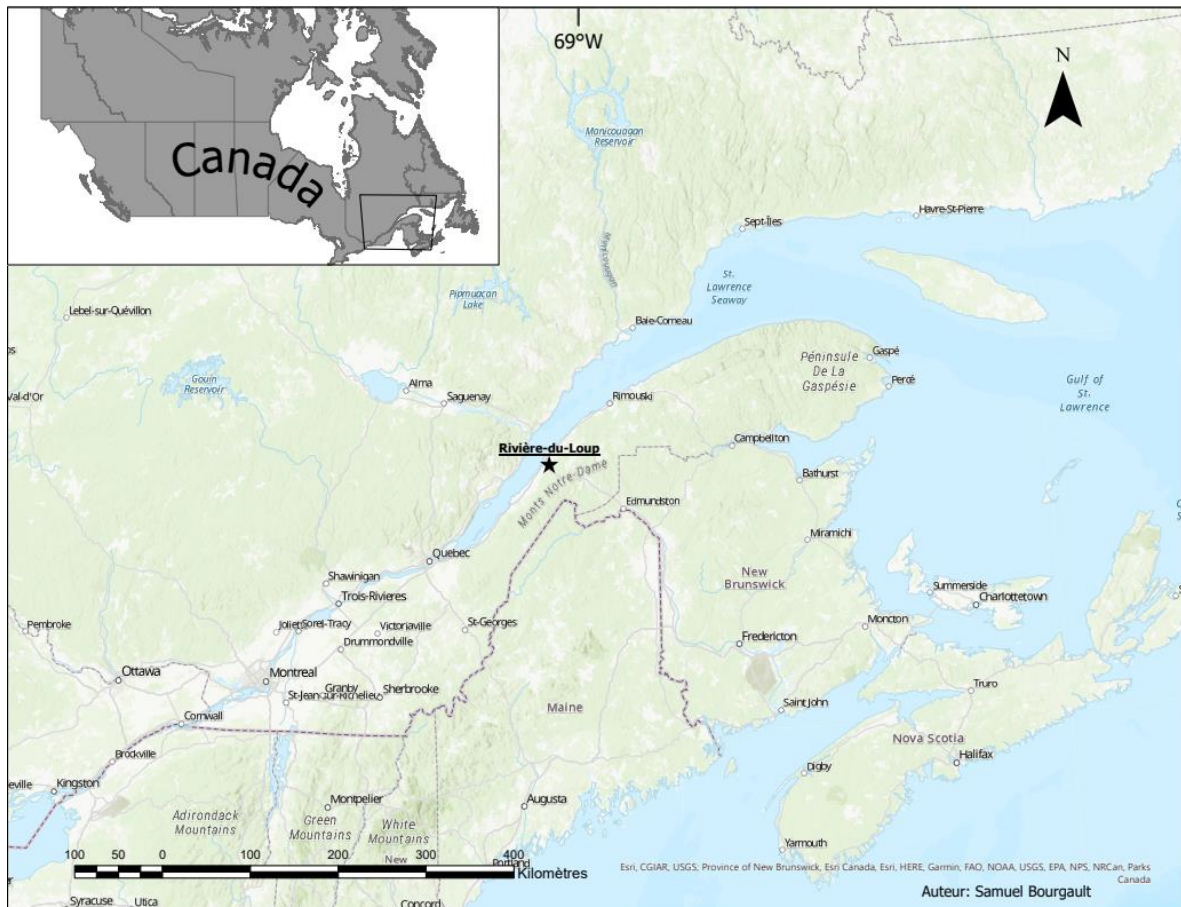


Figure 3: Localisation du site d'étude à Rivière-du-Loup, au Bas-Saint-Laurent.

2.1 Milieu biologique

Les grandes tourbières ombrotrophes sont communes dans les dépressions humides de la région. Au Québec, les tourbières ombrotrophes sont également connues sous le nom de tourbières à sphaigne. La sphaigne est un groupe de mousse répandue dans les tourbières humides et acides, où elles forment des tapis denses (Payette et Rochefort, 2001). Les tourbières boréales sont non seulement dominées par les sphaignes, mais aussi créées par elles, puisque la matière végétale morte, principalement de la sphaigne, s'accumule au cours de la maturation de la tourbière, entraînant l'élévation de cette dernière au-dessus de la nappe phréatique (Van Breemen, 1995). La tourbière étudiée est dans un des plus grands complexes de tourbières du Québec situés au sud-est de la ville de Rivière-du-Loup (Couillard et al., 1986). Cette tourbière est classifiée comme une tourbière boréale atlantique (Canada Committee on Ecological (Biophysical) Land Classification et al., 1997). Le complexe de tourbière couvre une superficie de 3 150 hectares, avec un volume total des dépôts de tourbe de $82,6 \text{ m}^3 \times 10^6$ (Buteau, 1989).

2.1.1 Climat et végétation

Le site fait partie de la zone tempérée nordique du domaine de la sapinière à bouleau jaune. Des données de macrofossiles et de pollens indiquent que la végétation moderne s'est développée il y a 8 000 ans AA (Richard et al., 1992). Les tourbières ombrotrophes sont dominées par des épinettes noires (*Picea mariana*), des arbustes éricacées et des espèces de *Sphagnum* (Gauthier, 1975). La température moyenne annuelle est 3,5 °C (Environnement Canada, 2020) et la moyenne de précipitation annuelle est 965 mm. Les statistiques mensuelles d'Environnement Canada (2020) démontrent que le mois de juillet a les températures plus élevées, avec une moyenne quotidienne de 17,6 °C, et celles étant les plus basses sont au mois de janvier, avec une moyenne quotidienne de -12,4 °C. Le territoire reçoit annuellement en moyenne 696 mm de chute de pluie et 269 cm de chute de neige (Environnement Canada, 2020).

2.1.2 Perturbations

L'imagerie satellitaire utilisée dans le cadre de cette étude illustre que la majorité du complexe de tourbière a été exploitée par l'industrie de la tourbe (Figure 4). Les patrons

d'extraction dans le complexe de tourbière peuvent être observées à l'intérieur du cercle rouge sur la Figure 4. Les marques brunâtres sur la surface du sol sont causées par extraction de la tourbe qui enlève la végétation et abaisse le niveau de la nappe phréatique, grâce à des canaux de drainage. Ce processus permet de récolter la tourbe par l'utilisation d'aspirateurs tirés par des tracteurs (Figure 5). Sur la Figure 4, le passage d'un feu, ayant causé un brulis total d'environ 188 hectares en 2014, peut y être observé grâce au polygone délimité en rouge. Ce feu a touché la partie nord-ouest de la tourbière à l'étude (MFFP, 2021). Une autre perturbation par le feu est survenue à proximité du site en 2009 (Figure 4), mais elle n'a pas brûlé la section de la tourbière sur le site d'étude (MFFP, 2021).

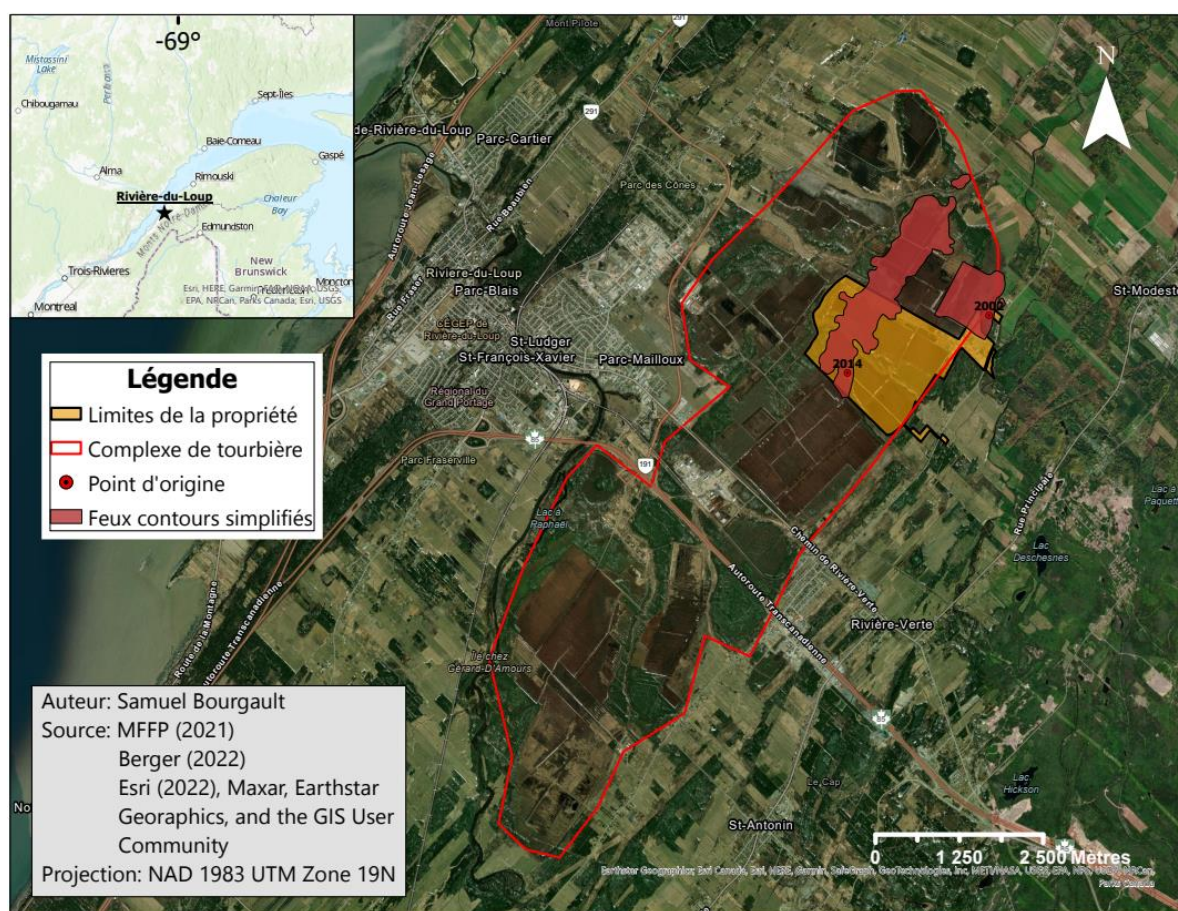


Figure 4: Emplacement du site dans le complexe de tourbière de Rivière-du-Loup, accompagné des perturbations par le feu délimité par les entités en rouge avec un contour simplifié.



Figure 5: Tracteur équipé d'un aspirateur servant à extraire la tourbe (Berger, 2022).

Le feu de 2014 a touché un secteur restauré depuis 10 ans. Une étude sur ce secteur montre que la mousse de sphaigne (sous-genres *Acutifolia* and *Sphagnum*) est résiliente au feu (Blier-Langdeau et al., 2022). La végétation de la zone à l'état naturel qui a été touchée par le feu était très sèche et le tapis de mousse ne se régénère pas. La compagnie compte faire l'ouverture pour la récolte de cette zone d'ici 2023. D'autre part, les zones en phase de récolte ont une surface de tourbe de densité plus importante et plus sèche, puisque la tourbe acrotelme et une partie de la tourbe catotelme peu profonde sont enlevées (Malloy et Price, 2014), ce qui augmente la probabilité de s'enflammer (Benscoter et al., 2011). Les équipes de terrain de l'entreprise ont rapidement éteint les feux sur les planches de récolte. La tourbe a continué d'être extraite l'année suivant le feu. Étant hautement inflammables, les andains de tourbes touchés par le feu ont été totalement brûlés.

2.2 Milieu physique

2.2.1 Occupation du territoire

Une partie des champs de tourbe se situe sur le territoire de Rivière-du-Loup et l'autre partie appartient à Saint-Modeste. Sur la Figure 6, la plupart des sections de la tourbière sont situées à Rivière-du-Loup, sauf pour la section Nord et Sud qui est sur le territoire de Saint-Modeste. Les limites de la propriété en jaune sur Figure 6 montrent la partie des tourbières appartenant au site d'étude.

2.2.3 Aménagement du site

Le site de tourbière à l'étude a une superficie de 301 hectares et est divisé en différentes sections sur la Figure 6. Les activités de récolte de la tourbe ont débuté en 1963 pour la section A, B et C soit dans la partie est du site d'étude (Figure 6). Pour la majorité de ces sections, la récolte de la tourbe est terminée et la majorité des sections sont en phase post-production.

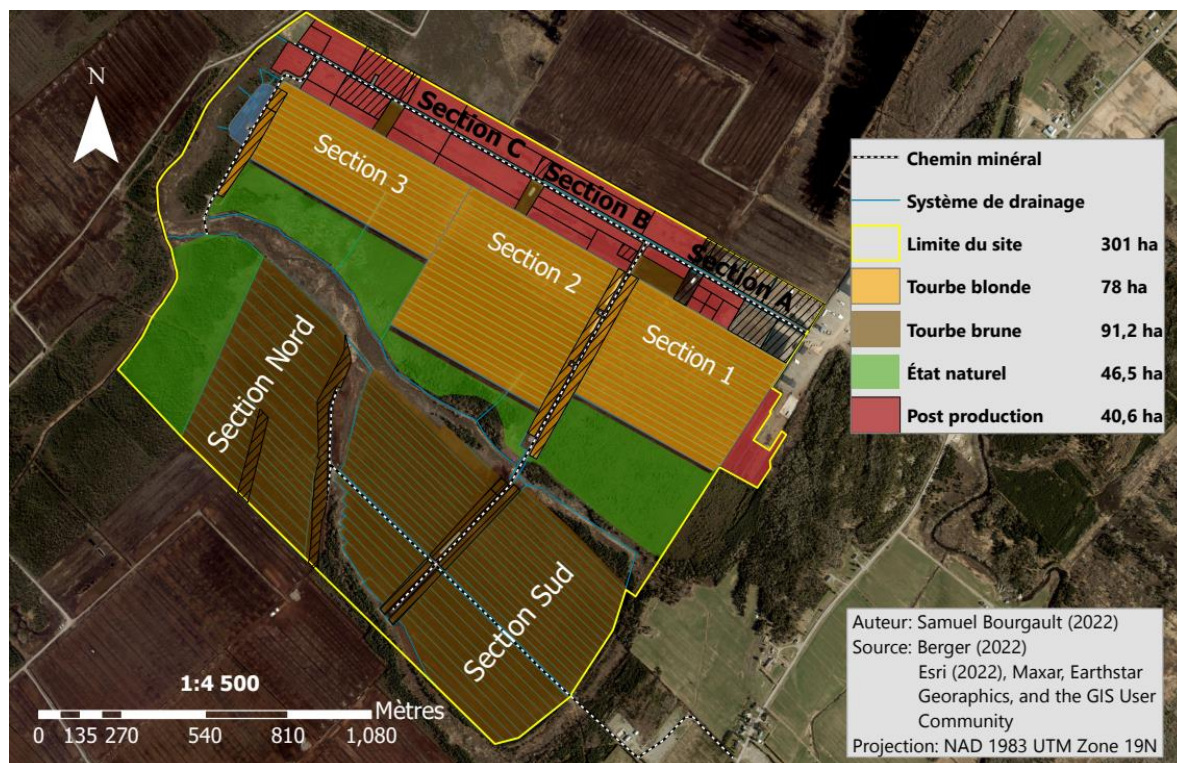


Figure 6: L'emplacement des différentes phases d'aménagement dans la tourbière.

L'ensemble de la superficie (301 ha) du site se divise en 169,2 hectares sur lesquels y sont consacrées les activités de récolte (incluant le drainage), 40,6 hectares qui sont en phase de post production et 46,5 hectares sont encore à l'état naturel. Un pourcentage d'environ 15 % du reste du territoire (44,7 hectares) n'est pas considéré comme étant une tourbière où il est possible de récolter la tourbe. Ce territoire est constitué en partie de forêt dominée par l'épinette noire (tourbière boisée pauvre) ou d'autres types de milieux humides longeant des ruisseaux, comme de l'eau peu profonde ou des bordures de ruisseaux (MFFP, 2021). Le profil de tourbe est classé selon l'échelle de von Post qui indique la classe de décomposition (Gouvernement du Canada, 2013). La Figure 7 illustre le profil de tourbe correspondant à la

tourbe blonde et brune. La tourbe blonde est moins décomposée et se trouve surtout sur les sites récemment ouverts pour la récolte. La tourbe brune est présente seulement dans les vieilles tourbières, puisque le matériel végétal a atteint un stade de décomposition où les branches, feuilles et tiges commencent à se désagréger (Gouvernement du Canada, 2013). L'épaisseur de la tourbe varie selon la position dans la tourbière et le nombre d'années de récolte. Un bog surélevé possède une plus grande épaisseur dans le centre de la tourbière que sur les extrémités (Glaser et Janssens, 1986).

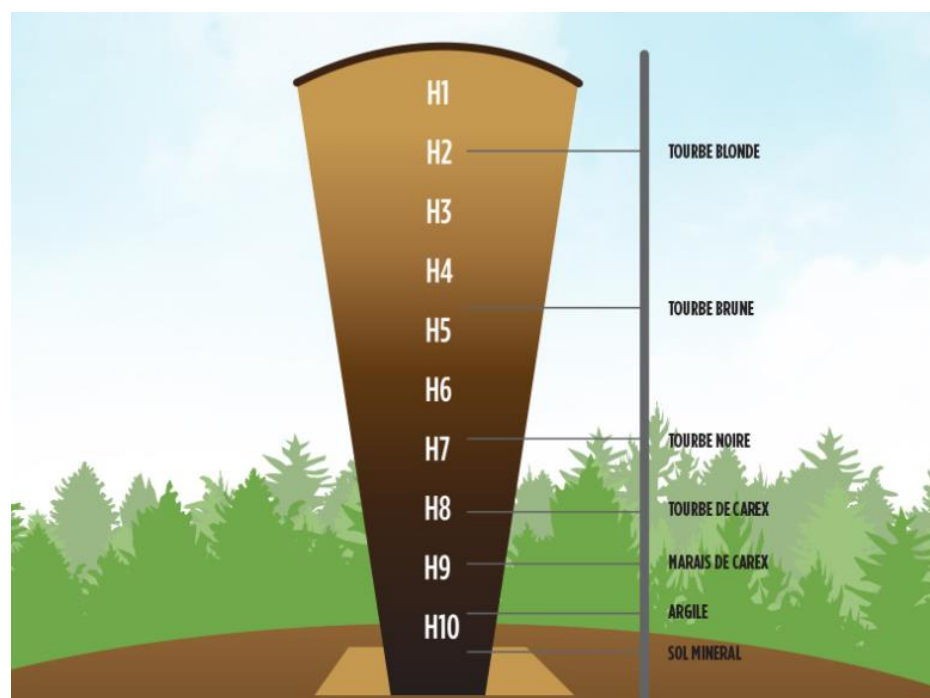


Figure 7: Profil de tourbe classé à l'aide de l'échelle de von Post (schéma tiré de Chen Lopez, 2022).

2.3 Milieu humain

2.3.1 Utilisation du territoire

La population de la ville de Rivière-du-Loup compte 19 507 habitants (Statistique Canada, 2017). Le bassin versant (BV) de la rivière du Loup a une superficie de 1100 km² (OBAKIR, 2021). L'utilisation du territoire est principalement fondée sur l'exploitation et la transformation des ressources naturelles, comme les forêts et les tourbières. Le milieu forestier couvre 77 % du territoire et l'agriculture en couvre 13% (OBAKIR, 2021). La

longue vallée agricole qui longe le fleuve Saint-Laurent est parsemée de tourbières en exploitation.

2.3.2 Secteurs économiques de l'industrie de tourbe Nord-Américaine

L'industrie est spécialisée dans l'horticulture et exploite une partie des tourbières longeant le fleuve. Elle pratique l'extraction de la tourbe de sphaigne sur les tourbières ombrotrophes d'Amérique du Nord, ce qui consiste en une extraction des ressources naturelles (secteur primaire) pour les substrats de croissance, ce qui est bien différent de l'extraction de la tourbe de fen (minérotrophe) en Europe utilisé pour le chauffage ou la production d'électricité. La tourbe est ensuite apportée à l'usine pour y introduire des produits à valeur ajoutée, ce qui consiste à transformer la matière première en produits finis (secteur secondaire). Les produits de mélanges horticoles serviront aux producteurs pour la propagation de plantes ou la production en serre ou en pépinière de fruits, de légumes, de petits fruits et de légumes-feuilles (Berger, 2022).

La plupart des producteurs de tourbe horticole du Québec investissent dans la recherche scientifique en lien avec les pratiques de récolte et la restauration. Chacun des sites de récolte de l'entreprise est doté d'un plan de restauration pour faciliter le retour d'un écosystème humide (Berger, 2022). Le Groupe de recherche en écologie des tourbières (GRET) de l'Université Laval a installé un bassin de culture de sphaigne. La culture de sphaignes vise la production de fibres de sphaignes non décomposées sur une base cyclique et renouvelable (GRET, 2022). Ce bassin permet de contrôler le niveau de la nappe phréatique du sol. La Figure 8 montre des bassins rectangulaires de drainage dans une zone jaune d'une superficie de 1,14 hectare, où l'on expérimente la culture de sphaigne.



Figure 8: Bassins de culture de sphaigne présent sur le site d'étude (Bourgault, 2022).

3.0 Méthodologie

La méthodologie qui a été utilisée afin de calculer les estimations des émissions de GES repose sur le guide d'utilisation du calculateur d'émissions gaz à effet de serre pour l'industrie de la production de tourbe horticole (Dessureault et collab., 2020). Cet outil numérique permet la comptabilisation des émissions de gaz à effet de serre (GES) lié à la production de tourbe. Il aide aussi à définir les cibles de réduction des émissions de GES chez le producteur. Cette méthode permet de calculer les émissions de gaz à effet de serre non mécaniques provenant d'un aménagement spécifique dans une tourbière en identifiant le type d'aménagement (état de la tourbière). Les estimations des émissions comprennent les émissions de CO₂, CH₄ et N₂O. Pour le CO₂, les exportations de carbone organique dissous (COD) et le facteur de décroissance sont ajoutées dans le calcul. Le Tableau 7 situé dans l'Annexe 3: Tableau de conversion de facteur d'émission du CO₂ montre la conversion du facteur d'émissions du CO₂, pour les émissions de la tourbière, le facteur de décroissance, les émissions par le COD. La Figure 2 montre la représentation du calcul des flux net de CO₂ dans l'atmosphère. Les données nécessaires pour l'estimation sont la superficie de territoire et le nombre d'années depuis qu'un type d'aménagement a été effectué, ou laisser à l'état naturel. Le nombre d'années d'aménagement est nécessaire pour le calcul des émissions puisque le facteur de décroissance (t CO₂ ha⁻¹) est multiplié par le nombre d'années d'une phase et de son aménagement. Pour les émissions de CO₂, le facteur de décroissance est calculé lorsqu'un tel facteur existe et peut être utilisé pour un type d'aménagement (remouillage, reboisement et sans intervention, non régénéré-moins de 15 ans).

3.1 Les types d'aménagement

La superficie en hectare des différents types d'aménagements a été cartographiée à l'aide du logiciel ArcGIS Pro (version 2.9.2). La plupart des données du site ont été fournies sous forme de fichier Shapefile par l'entreprise. Ces fichiers possèdent une table attributaire contenant les informations concernant l'historique d'aménagement de la plupart des sections en lien avec l'extraction de la tourbe.

3.1.1 Phase d'ouverture (décapage de la végétation et drainage)

Les superficies en phase de drainage sont en vue d'être récoltées pour extraire la tourbe. Un système de drainage sous forme de canaux est creusé dans la tourbe pour drainer l'eau de la tourbière. Pour récolter la tourbe, la tourbière est divisée par des fossés qui forment des planches rectangulaires. Les canaux permettent de diminuer le niveau de la nappe phréatique ce qui permet d'extraire la tourbe avec des machineries comme sur la Figure 5. La tourbe récoltée a pour objectif d'atteindre un certain taux d'humidité pour faciliter le transport et la vente. L'entreprise récolte la tourbe avec un taux d'humidité qui varie entre 30 et 45%, à cause de l'aspect qualité de la tourbe et du rendement de leurs aspirateurs. Les fossés de drainage ont été cartographiés comme des entités linéaires. Ils ont été tracés à l'aide d'image satellitaire Maxar (Esri, 2022).

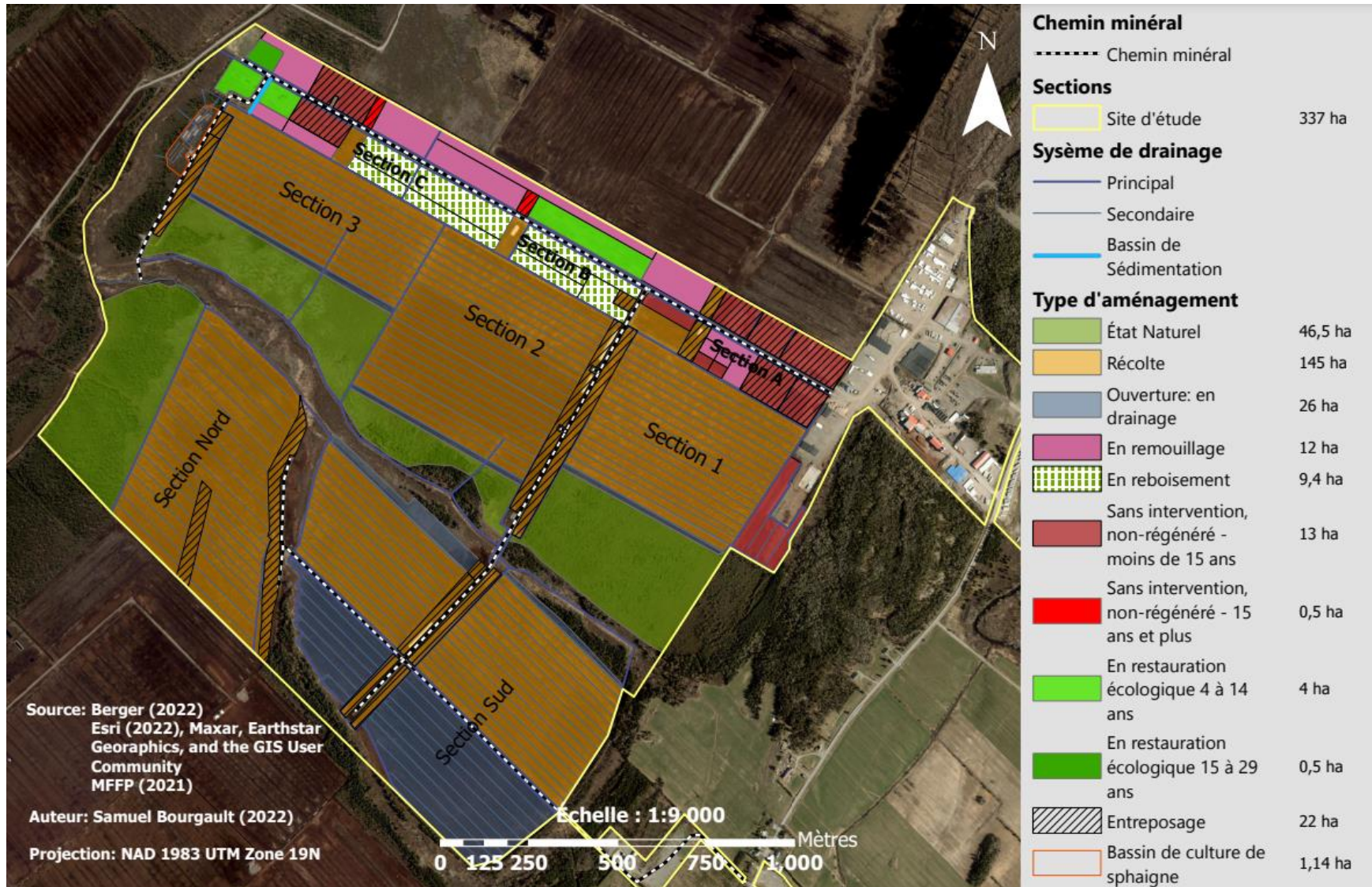


Figure 9: Carte des types d'aménagement retrouvés dans la tourbière étudiée.

Les systèmes de drainage (fossés) comprennent trois types de canaux : principal, secondaire et bassin de sédimentation (Figure 9. Un bassin de sédimentation a été identifié lors d'une visite terrain au bassin de culture de sphaigne. Cette installation est aménagée dans le chenal d'un fossé. Tous les canaux de drainage de la tourbière s'écoulent vers le bassin de sédimentation afin de contrôler les particules de tourbe qui sortent par les ruisseaux. On se sert de ce dernier pour également approvisionner la ferme de culture de sphaigne en eau.

3.1.2 Phase de récolte

Ces types d'aménagement sont les superficies dans lesquelles il y a extraction de la tourbe. Il existe deux types de tourbe extraite pour la production : soit la tourbe blonde (classée de H2 à H4) et la tourbe humide ou brune (classée de H5-H9) (Dessureault et collab., 2020). Ces classifications sont selon l'échelle de von Post qui indique la classe de décomposition de la tourbe (Gouvernement du Canada, 2013). La couche H2 sur cette échelle correspond à la couche où le matériel végétal est mort près de la surface de la tourbière (Gouvernement du Canada, 2013). Il est possible d'observer l'emplacement des deux types de tourbes récoltés sur la Figure 6. Dans le cadre de cet essai, les facteurs d'émissions ont été considérés comme étant les mêmes pour ces deux types de tourbes. La tourbe blonde ou brune a été classifiée sous la même catégorie pour calculer les émissions, c'est-à-dire l'entité « Récolte » sur la Figure 9.

3.1.3 État naturel

Ce type d'aménagement correspond aux tourbières à l'état naturel qui n'ont pas encore été ouvertes pour la récolte, ou ayant une grande valeur écologique sur le territoire de l'entreprise. Ces tourbières sont à l'intérieur de la propriété du site, donc ils sont calculés dans les émissions de GES. L'entreprise conserve un pourcentage de tourbière à l'état naturel pour prolonger ses activités d'extraction de la tourbe dans le futur, car les tourbières récemment ouvertes pour la récolte sont souvent composées de tourbe blonde. De plus, les tourbières à l'état naturel permettent de récolter du matériel végétal sur une tourbière intacte, qui est appelée site donneur ou zone d'emprunt, afin de le réintroduire dans le site à restaurer. En général, les 10 cm supérieurs de la couche de mousse sont récoltés (Quinty et Rochefort, 2003) pour être transféré sur d'autres sections de la tourbière en restauration.

3.1.4 Post production

Les zones en phase post production se définissent comme étant des tourbières qui ne sont plus utilisées pour la récolte de tourbe. La réhabilitation du milieu humide, considérée comme étant une bonne pratique d'aménagement durable, est réalisée en fonction des conditions dans laquelle la tourbière est laissée lorsqu'on atteint cette phase. Il existe plusieurs types de catégories de tourbière en post production :

- **Sans intervention – non-régénéré** : « ce sont des sites non restaurés et non régénérés où il n'y a pas de couvert végétal permettant l'accumulation de tourbe ou soit que le statut de régénération est inconnu. Ce type convient aux tourbières abandonnées » (Dessureault et collab., 2020).
- **Sans intervention – régénération naturelle** : « ce sont des sites non restaurés, mais qui se sont régénérés sans intervention humaine. Ce type de site peut convenir aux vieilles tourbières utilisées pour la coupe par blocs (block cut) » (Dessureault et collab., 2020).
- **Restauration écologique** : « site restauré par le transfert d'un couvert de sphaigne et de mousse d'une zone d'emprunt, suivi d'un remouillage » (Dessureault et collab., 2020).
- **Remouillage**: « Le remouillage se définit par le blocage des canaux de drainage uniquement et sans introduction de plantes. L'opération résulte en une augmentation du niveau de la nappe phréatique, mais sans formation d'une étendue d'eau » (Dessureault et collab., 2020). Les sections en phase de remouillage ont été identifiées à l'aide de *shapefile* fourni par l'entreprise. Ces sections étaient identifiées comme étant dans la catégorie « Réhabilitation » qui inclut tous les types de réclamation autre que le transfert du tapis muscinal (restauration en sphaigne). L'entreprise associe la phase de réhabilitation à trois types d'aménagement, c'est-à-dire remouillage, étang et reboisement. Les zones appartenant à la catégorie réhabilitation qui ne possédaient pas une étendue d'eau ou des plantations forestières ont été sélectionnées comme une zone de remouillage.
- **Étang** : « un site où il y a eu remouillage à un point où la nappe phréatique est suffisamment élevée pour former une étendue d'eau sur plus de 50% du secteur (mare, étang, marais, petit lac) » (Dessureault et collab., 2020).
- **Reboisement** : « ce sont les sites où il y a eu des plantations forestières pour des fins économiques ou écologiques » (Dessureault et collab., 2020). Les tourbières en phase de reboisement ont été identifiées à l'aide de photo aérienne, puisque dans la table attributaire du *shapefile* fourni par l'entreprise on associait ses zones à des phases de « Réhabilitation ».
- **Culture de sphaigne** : « ce sont les sites sur lesquels il y a culture de sphaigne. Les opérations sont similaires à celles de la restauration écologique » (Dessureault et

collab., 2020). Les facteurs utilisés sont les mêmes que pour la restauration écologique.

3.1.5 Entreposage

L'entreprise utilise des zones d'entreposage pour entreposer la tourbe qui a été récoltée. Lors de l'étape de la récolte de tourbe, une fois que le champ a été hersé et que la tourbe est devenue sèche au soleil, les aspirateurs de récolte viennent vider leur contenu en andains aux extrémités des planches. Un andain de tourbe est formé pour faciliter le stockage de la tourbe et ils sont placés à proximité du chemin minéral pour le transport. On doit prendre en compte les zones d'entreposage pour la compilation des émissions, car ces zones occupent une surface de 22 hectares sur le site. Certaines zones d'entreposage sont sur un sol minéral et d'autres sur un substrat de tourbe. Afin de calculer les émissions de GES, l'entreposage a été classé selon deux catégories d'aménagement différentes. Sur la Figure 10, les sections rectangulaires en jaune marquées par des rayures noires sont des exemples de zone d'entreposage dans la tourbière.



Figure 10: Exemple de zones d'entreposage avec un sol minéral et un substrat de tourbe.

La plupart des zones d'entreposage sont très similaires aux aménagements en « phase de récolte », à l'exception de la présence d'andains de tourbe, alors ils ont été classés dans la même catégorie pour calculer les émissions de GES. Les zones d'entreposage avec un sol minéral ont été classées dans les types d'aménagement « Sans intervention – non-régénéré ». Ces zones sont des anciennes tourbières où la récolte de tourbe a été achevée, et qui ont

permis de répondre à un besoin d'espace d'entreposage. Au lieu de faire la restauration de la tourbière, une zone d'entreposage recouverte d'un sol minéral a été aménagée. Des racines de bois provenant de la tourbière ont été récupéré pour constituer une couche solide sur l'ancienne tourbière, puis du gravier a été répandue par-dessus.

3.2 Les facteurs d'émissions

Les facteurs d'émission ont été calculés à partir des mesures de flux publiées par plusieurs études de recherche. Les sources de chaque gaz pour chaque type d'aménagement sont citées dans l'Annexe 1 : Facteurs d'émissions du guide d'utilisation du calculateur d'émissions gaz à effet de serre pour l'industrie de la production de tourbe horticole (Dessureault et collab., 2020). La méthode utilisée pour prendre ces données consiste à installer des chambres opaques, 60 x 60 x 30 cm, équipées de ventilateurs fonctionnant sur batterie pour faire circuler l'air dans l'espace de tête de la chambre (Figure 17). Par exemple, pour les mesures de méthane, les chambres sont placées sur un collier en acier inoxydable (60 x 60 x 20 cm) installé en permanence dans chaque placette d'échantillonnage. Dans l'Annexe 1: Figures de la configuration des équipements pour mesurer les émissions de méthane, une photo est disponible pour avoir un aperçue de la configuration des chambres pour le méthane. Les chambres sont placées sur la rainure du col rempli d'eau pour créer un joint. Des échantillons de gaz de 20 ml sont prélevés à 5, 10, 15 et 25 minutes après la fermeture de la chambre (Strack et al., 2016). L'échantillon est stocké dans des flacons pré-évacués, à l'aide de seringues. Par ailleurs, une bonne partie des données mesurés proviennent de tours de type Eddy covariance pour mesurer les flux de carbone à une plus grande échelle (10 à 20 ha) (Nugent et al., 2019). Les tours de mesure utilisées dans cette technique mesurent les flux de gaz, comme le CO₂, en utilisant des capteurs et des instruments de mesure de la vitesse et de la direction des vents (Aubinet et al., 2012).

La validation des facteurs d'émissions de GES de sources non-mécaniques du guide utilisé (Dessureault et collab., 2020) a été réalisé par les laboratoires des professeurs Maria Strack (University of Waterloo), Dr. Nigel Roulet (McGill University) et Dr. Ian Srachan (McGill University). Dans la littérature, les facteurs d'émissions de GES des tourbières sont souvent en g CO₂-C m⁻², g CH₄-C m⁻² et g N₂O-N m⁻². Une conversion a été faite pour utiliser les facteurs d'émissions en t CO₂ ha⁻¹, t CH₄ ha⁻¹ et t N₂O ha⁻¹. La conversion en tonne de CO₂

équivalents (t CO₂ éq) multiplie la quantité de GES par son potentiel de réchauffement global (PRG). Le PRG est un indice développé par le GIEC, qui prend en compte la durée de vie du gaz. L'Équation 3: Conversion en tonne d'équivalent CO₂ peut s'appliquer aussi au CH₄ et au N₂O, en changeant le PRG à l'aide du Tableau 1.

Le Tableau 1 contient les résultats des facteurs de conversion, ainsi que le potentiel de réchauffement global pour chaque GES sur 100 ans. La fonction de décroissance et les émissions par le COD sont aussi prises en compte dans ce même tableau. Les facteurs d'émissions de N₂O et les émissions par le COD ayant des valeurs de non défini (ND) sont des types d'aménagement n'ayant pas d'information disponible pour le moment. Concernant les facteurs d'émissions du CH₄ de la phase de récolte et de drainage (Tableau 1), il est important de savoir que l'estimation du facteur a été faite en calculant les émissions provenant de l'aire de surface et de l'aire des canaux de drainage (Dessureault et collab., 2020). Par exemple pour la phase de récolte, le calculateur multiplie les émissions de surfaces récoltées 0,2 g CO₂-C m⁻² an⁻¹ par 96,5% (aire de surface), et additionne avec les émissions des canaux de drainage 20,3 g CO₂-C m⁻² an⁻¹ multiplié par 3,5% (aire des canaux de drainage). Les proportions de l'aire des canaux de drainage proviennent de la moyenne des données canadiennes de IPCC (2014).

3.3 Calcul des gaz à effet de serre émis annuellement par les tourbières

Les calculs utilisés pour les émissions de la tourbière en tonne par année proviennent des exemples d'explication du guide d'utilisation du calculateur d'émission de GES pour l'industrie de la production de tourbe horticole (Dessureault et collab., 2020). Les calculs des émissions ont été faits dans Microsoft Excel (2016) et les formules de chacune des équations sont disponibles dans l'Annexe 2: Équation pour estimer les émissions de GES, à la fin du document. Le dioxyde de carbone émis par la tourbière en tonne par année est calculé en fonction d'un facteur d'émission qui dépend du type d'aménagement. Le facteur d'émission est soustrait au facteur de décroissance en fonction du nombre d'années d'une phase et de son aménagement. Dans la même équation, le facteur d'émission du CO₂ du type d'aménagement en tonne par année est additionné au facteur provenant du bassin versant et est lié au COD en t CO₂ ha⁻¹ (Équation 4). La superficie de la tourbière en hectare est ensuite multipliée par le facteur d'émission provenant de la tourbière en t CO₂ ha⁻¹. Évidemment, le

facteur de décroissance et l'émission par le COD ne sont pas inclus pour l'équation du CH₄ et du N₂O. Pour les autres gaz, l'équation multiplie le facteur d'émission du CH₄ ou du N₂O provenant de la tourbière en tonne par hectare par la superficie de l'aménagement.

Tableau 1: Les facteurs d'émissions des principaux gaz à effet de serre émis par les tourbières selon la base du gaz, la masse du gaz et la superficie (Dessureault et collab., 2020)

Source non-mécaniques	Tourbière			Fct décroissance	COD- Bassin versant	Commentaires
	t CO ₂ ha ⁻¹	t CH ₄ ha ⁻¹	t N ₂ O ha ⁻¹	t CO ₂ ha ⁻¹	t CO ₂ ha ⁻¹	
Phase d'ouverture (Drainage)	11,3997	0,0133	ND	0,0000	0,6013	Annexe 2 ou Voir le guide d'utilisation
Phase de récolte (tourbe blonde et brune)	12,1073	0,0120	ND	0,0000	0,6013	Annexe 2 ou Voir le guide d'utilisation
Phase post production						
Sans intervention, non régénérée <15 ans	16,3167	0,0067	ND	-0,5500	1,1550	Annexe 2 ou Voir le guide d'utilisation
Sans intervention, non régénérée = >15 ans	7,9200	0,0067	ND	0,0000	1,1550	Annexe 2 ou Voir le guide d'utilisation
Sans intervention, régénération naturelle 1 à 9 ans	11,0000	0,1333	ND	0,0000	ND	Annexe 2 ou Voir le guide d'utilisation
Sans intervention, régénération naturelle 10 à 39 ans	0,0000	0,1333	ND	0,0000	ND	Annexe 2 ou Voir le guide d'utilisation
Sans intervention, régénération naturelle = > 40 ans	-2,9333	0,1333	ND	0,0000	ND	Annexe 2 ou Voir le guide d'utilisation
En restauration écologique 1 à 3 ans	18,4800	0,0147	ND	0,0000	0,2640	Annexe 2 ou Voir le guide d'utilisation
En restauration écologique 4 à 14 ans	5,3167	0,0573	ND	0,0000	0,2640	Annexe 2 ou Voir le guide d'utilisation
En restauration écologique 15 à 29 ans	-3,3000	0,0587	ND	0,0000	0,2640	Annexe 2 ou Voir le guide d'utilisation
En restauration écologique = > 30 ans	-2,6767	0,0800	ND	0,0000	0,5610	Annexe 2 ou Voir le guide d'utilisation
En remouillage et étang	19,4663	0,0887	0,0001	-0,9093	0,5867	Annexe 2 ou Voir le guide d'utilisation
En reboisement	11,3410	0,0147	ND	-0,3667	0,6013	Annexe 2 ou Voir le guide d'utilisation
Culture en bassin de sphaigne	-	-	-	-	-	Restauration écologique
En culture de petits fruits	11,3410	0,0120	ND	-0,1503	0,6013	Annexe 2 ou Voir le guide d'utilisation
État naturel	-1,4740	0,0947	ND	0,0000	0,4913	"

4.0 Résultats

4.1 Cartographie des types d'aménagement

Pour la cartographie du site, on retrouve 10 types d'aménagement différents sur la tourbière où on peut estimer les émissions de GES avec un facteur d'émission. La superficie totale de chacun de ses aménagements sur le territoire de la tourbière est de 258 hectares (Figure 11). Les sections en phase de récolte (H2-H9) comptent pour la majorité de la tourbière étudiée, ce qui équivaut à une superficie totale de 145 hectares. La tourbière à l'état naturel représente 18% de la surface étudiée. De plus, 10% de la tourbière est présentement en phase de drainage, ce qui équivaut à 26 hectares. Les tourbières en phase de post production comptent pour une proportion de 17% de la tourbière et ils possèdent 7 types d'aménagement observables sur le graphique en secteur de secteur de la Figure 11, en comptant la restauration écologique 15 à 29 ans. La tourbière compte 13 hectares (5%) sans intervention, non-régénéré depuis moins de 15 ans et 1/2 hectare depuis plus de 15 ans. L'entreprise possède une plus grande superficie accordée au reboisement (4%) et au remouillage (5%) qu'à la restauration écologique (2%).

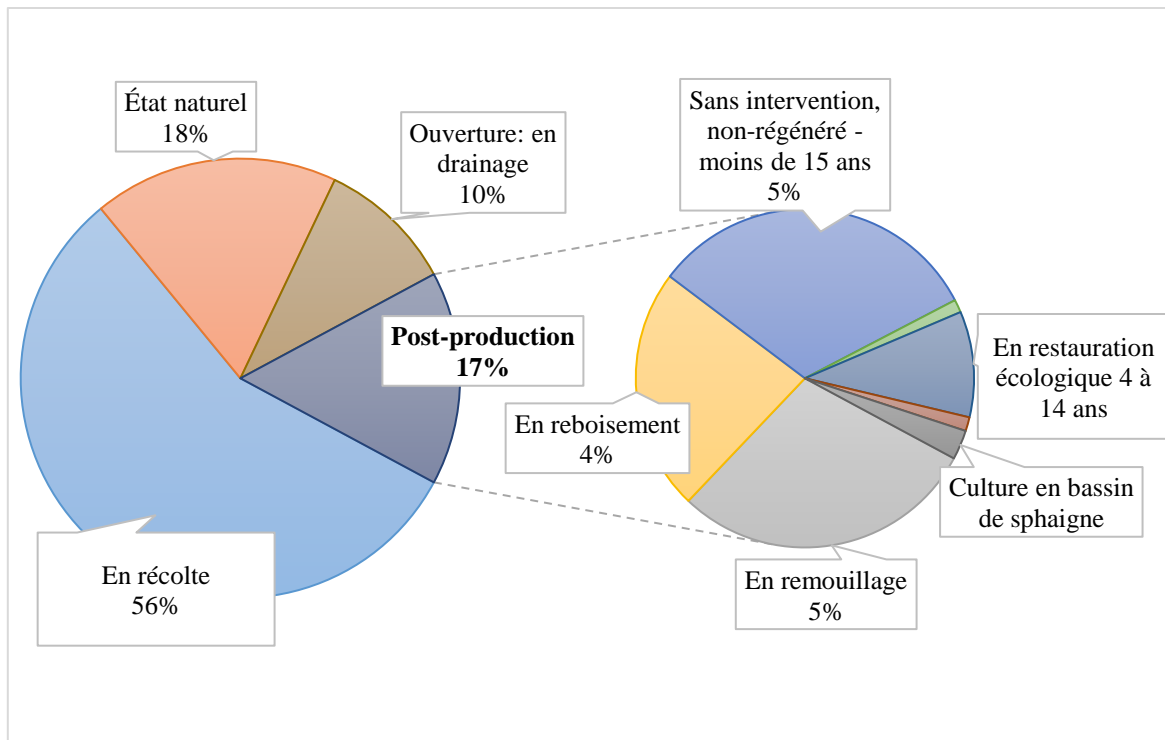


Figure 11: Proportion de chacun des types d'aménagements sur la tourbière

4.2 Les émissions des types d'aménagement

Les émissions sont classées selon trois principaux gaz à effet de serre : le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et l'oxyde d'azote (N₂O). Les émissions de GES ont seulement été calculées pour l'année 2022, puisque les types d'aménagement n'ont pratiquement pas changé au cours des dernières années. De plus, les comparaisons sur le long terme (10 à 20 ans) ne sont pas vraiment pertinentes, puisque la superficie du site a grandement changé depuis les dix dernières années.

4.3 Dioxyde de carbone (CO₂)

Le Tableau 2 montre les résultats des émissions de CO₂ pour chacun des types d'aménagement, ainsi que leur superficie en hectare. Le Tableau 4 montre les émissions de CO₂ pour les types d'aménagement avec un facteur de décroissance disponible. Les tourbières en phase de récolte émettent plus d'émission que tous les autres types d'aménagement réunis, avec 1842,8 t CO₂ par année. Le second aménagement avec le plus d'émission de CO₂ provient de la phase de drainage qui émet 312,03 t CO₂ an⁻¹. Deux autres types d'aménagement ont des émissions de carbone négatives provenant de la tourbière, c'est-à-dire celle à l'état naturel qui séquestre 52,7 t CO₂ an⁻¹ et celle en restauration écologique 15 à 29 ans qui séquestre 1,6 t CO₂ an⁻¹.

Tableau 2: Bilan annuel des émissions de CO₂ en fonction de l'état de la tourbière et de la superficie d'aménagement en 2022

État de la tourbière (<i>i</i>)	Superficie en hectare (S _{<i>i</i>})	CO ₂ émis par la tourbière (t CO ₂)
En récolte	145,0	1842,8
État naturel	46,5	-45,7
En remouillage	11,9	144,9
En reboisement	9,4	88,7
Sans intervention, non-régénéré - moins de 15 ans	13,0	179,7
Sans intervention, non-régénéré - 15 ans et plus	0,5	4,5
En restauration écologique 4 à 14 ans	4,1	22,9
En restauration écologique 15 à 29 ans	0,5	-1,6

Culture en bassin de sphaigne	1,1	21,4
Ouverture: en drainage	26,0	312,0
Total	258,1	2569,5

L'analyse réalisée révèle en comparant les différents gaz à effet de serre, que le gaz produisant le plus d'émissions totales dans la tourbière est le CO₂, avec 2569,5 tonnes de CO₂ équivalentes par année (t CO₂ éq an⁻¹). Le second gaz à effet de serre le plus émetteur est le CH₄, qui émet 225,5 t CO₂ éq an⁻¹. Le N₂O émet 0,3 t CO₂ éq an⁻¹ provenant uniquement des sections de la tourbière en phase de remouillage. Par la suite, le Tableau 3 présente le bilan annuel des émissions de GES selon l'état de la tourbière pour chacun des gaz étudiés. Les données de CH₄ et de N₂O sont converties en tonnes de CO₂ équivalent pour calculer les émissions totales. Les trois aménagements émettant le plus de tonnes de CO₂ équivalent sont les tourbières en récolte, en drainage et sans intervention, non-régénéré, moins de 15 ans, dans cet ordre. Il est à noter que les émissions provenant des tourbières à l'état naturel sont positives (77,6 t CO₂ éq an⁻¹) et que les émissions provenant de l'aménagement en restauration écologique 15 à 29 ans sont négative (0,7 t CO₂ éq an⁻¹).

Tableau 3: Bilan annuel des émissions de gaz à effet de serre selon l'état de la tourbière en 2022.

	GES	Facteur de décroissance	COD	Dioxyde de carbone (CO₂)	Méthane (CH₄)	Protoxyde d'azote (N₂O)	Total
Fifth Assessment Report (AR5)	PRG	1	1	1	28	265	
Annexe 2 ou Voir le guide d'utilisation	Facteur d'émission	CO ₂ - C	CO ₂ - C	CO ₂ - C	CH ₄ - C	N ₂ O - C	
Système de référence: Tourbière en récolte							
	g m ⁻² an ⁻¹	0,0	16,4	330,2	0,9	0,0	
	t CO ₂ ha ⁻¹	0,0	0,6	12,1	0,0	0,0	
	t CO ₂ eq an ⁻¹			1842,8	48,7	0,0	1891,5
État naturel							
	g m ⁻² an ⁻¹	-4,1	13,4	-40,2	7,1	0,0	
	t CO ₂ ha ⁻¹	0,2	0,5	-1,5	0,1	0,0	
	t CO ₂ eq an ⁻¹			-45,7	123,3	0,0	77,6
En remouillage							
	g m ⁻² an ⁻¹	-24,8	16,0	530,9	6,7	0,0	
	t CO ₂ ha ⁻¹	0,9	0,6	19,5	0,1	0,0	
	t CO ₂ eq an ⁻¹			144,9	29,4	0,3	174,6
En reboisement							
	g m ⁻² an ⁻¹	-10,0	16,4	309,3	1,1	0,0	
	t CO ₂ ha ⁻¹	0,2	0,6	11,3	0,0	0,0	
	t CO ₂ eq an ⁻¹			88,7	3,9	0,0	92,6
Sans intervention, non-régénéré - moins de 15 ans							
	g m ⁻² an ⁻¹	-15,0	31,5	445,0	0,5	0,0	
	t CO ₂ ha ⁻¹	0,6	1,2	16,3	0,0	0,0	
	t CO ₂ eq an ⁻¹			179,7	2,4	0,0	182,1

Sans intervention, non-régénéré - 15 ans et plus							
	g m ⁻² an ⁻¹	0,0	31,5	216,0	0,5	0,0	
	t CO2 ha ⁻¹	0,0	1,2	7,9	0,0	0,0	
	t CO ₂ eq an ⁻¹			4,5	0,1	0,0	4,6
En restauration écologique 4 à 14 ans							
	g m ⁻² an ⁻¹	0,0	7,2	145,0	4,3	0,0	
	t CO2 ha ⁻¹	0,0	0,3	5,3	0,1	0,0	
	t CO ₂ eq an ⁻¹			22,9	6,6	0,0	29,5
En restauration écologique 15 à 29 ans							
	g m ⁻² an ⁻¹	0,0	7,2	-90,0	4,4	0,0	
	t CO2 ha ⁻¹	0,0	0,3	-3,3	0,1	0,0	
	t CO ₂ eq an ⁻¹			-1,6	0,9	0,0	-0,7
Culture en bassin de sphaigne							
	g m ⁻² an ⁻¹	0,0	7,2	504,0	1,1	0,0	
	t CO2 ha ⁻¹	0,0	0,3	18,5	0,0	0,0	
	t CO ₂ eq an ⁻¹			21,4	0,5	0,0	21,8
Ouverture: en drainage							
	g m ⁻² an ⁻¹	0,0	16,4	310,9	1,0	0,0	
	t CO2 ha ⁻¹	0,0	0,6	11,4	0,0	0,0	
	t CO ₂ eq an ⁻¹			312,0	9,7	0,0	321,7
						Total	2795,3

Tableau 4: Émissions de CO₂ en tonne par année en fonction de la superficie et du nombre d'années de l'état de la tourbière pour chacune des phases avec un facteur de décroissance existant.

État de la tourbière	Nombre d'années	Superficie (ha)	CO ₂ émis par la tourbière (t CO ₂)	Total
Reboisement				
	12	1,3	9,7	
	7	4,6	42,7	
	5	3,6	36,3	88,7
Remouillage				
	24	1,4	-2,5	
	7	8,4	115,0	
	5	1,6	25,3	
	3	0,4	7,1	144,9
Sans intervention, non-régénéré - moins de 15 ans				
	12	4,6	50,3	
	5	2,8	40,5	
	4	3,5	52,8	
	3	0,2	2,9	
	2	0,6	10,0	
	1	1,4	23,2	179,7

Afin de mieux visualiser les résultats des émissions pour chaque type de gaz à effet de serre, la proportion des émissions par chaque type d'aménagement a été représentée dans un graphique à barres (Figure 12). Les quantités d'émissions de CO₂ sont plus élevées pour les aménagements en phase de récolte et comptent pour 69% des émissions totales en tonnes de CO₂ par année. Le second plus grand émetteur est la phase de drainage qui compte 11% des émissions de CO₂.

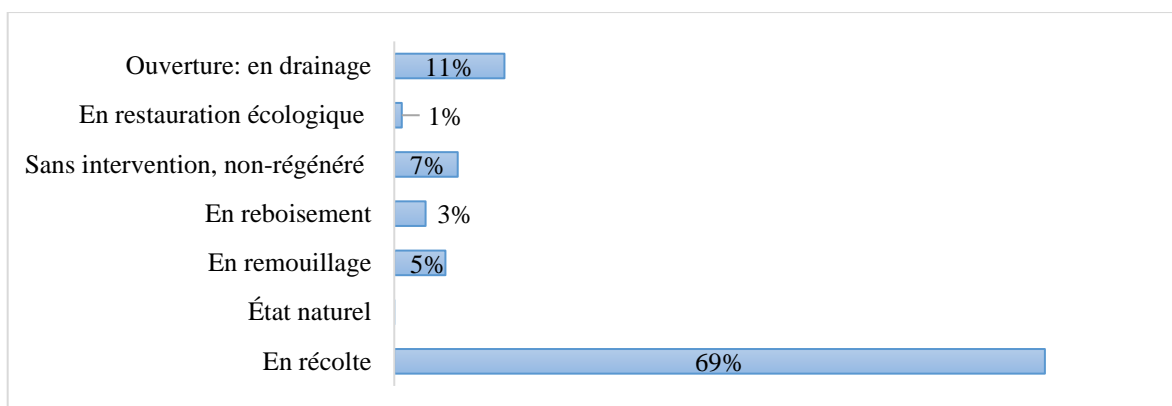


Figure 12: Pourcentage pour les émissions des gaz de CO₂ (excluant le CH₄ et N₂O) par type d'aménagement dans la tourbière

4.4 Méthane (CH₄)

Lorsque les émissions de méthane sont en tonne équivalente, on retrouve deux catégories d'aménagements émettant plus de CH₄ que de CO₂, c'est-à-dire la tourbière à l'état naturel (123,3 t CO₂ éq an⁻¹) et la restauration écologique - 15 à 29 ans (0,9 t CO₂ éq an⁻¹). En ce qui concerne les quantités d'émissions de méthane, l'aménagement avec le plus d'émissions est la tourbière à l'état naturel, qui compte pour 44,91% des émissions totales de CH₄ de la tourbière étudiée et émet 123,3 t CO₂ éq an⁻¹.

Tableau 5: Bilan annuel des émissions de méthane (CH₄) en fonction de l'état de la tourbière et de la superficie d'aménagement en 2022

État de la tourbière (<i>i</i>)	Superficie en hectare (<i>S_i</i>)	t CH ₄	t CO ₂ éq.
En récolte	145,0	1,7	48,7
État naturel	46,5	4,4	123,3
En remouillage	11,9	1,1	29,4
En reboisement	9,4	0,1	3,9
Sans intervention, non-régénéré - moins de 15 ans	13,0	0,1	2,4
Sans intervention, non-régénéré - 15 ans et plus	0,5	0,0	0,1
En restauration écologique 4 à 14 ans	4,1	0,2	6,6
En restauration écologique 15 à 29 ans	0,5	0,0	0,9
Culture en bassin de sphaigne	1,1	0,0	0,5
Ouverture: en drainage	26,0	0,4	9,7
Total	258,1	8,1	225,5

Les superficies en phase de récolte émettent 48,7 t CO₂ éq an⁻¹, ce qui compte pour une proportion de 22% des émissions de méthane du territoire étudié. Le type d'aménagement qui émet le moins de méthane est l'aménagement sans intervention, non-régénéré qui compte pour seulement 1% des émissions de ce gaz de la tourbière. La phase de drainage compte pour 5,16% des émissions de méthane de la tourbière et la phase en remouillage comptent pour 13%.

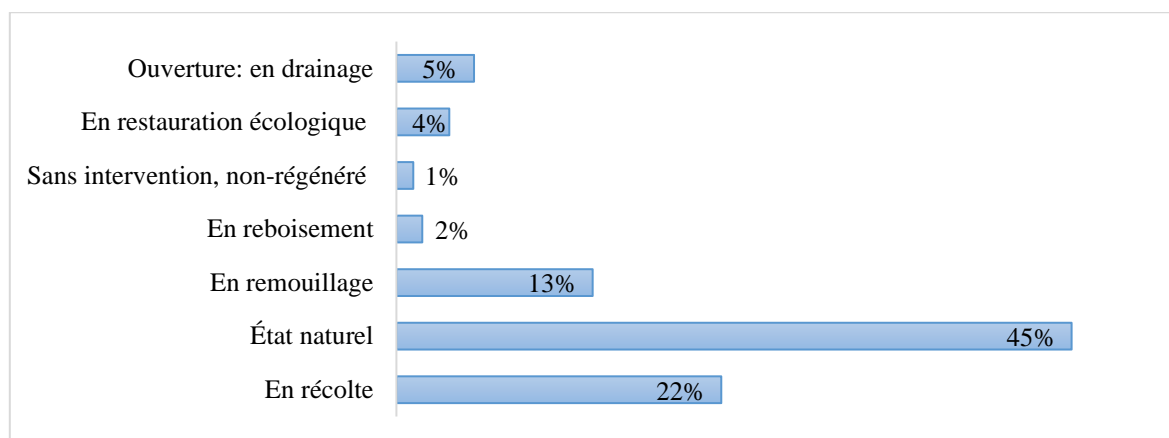


Figure 13: Pourcentage pour les émissions des gaz de CH₄ (excluant le CO₂ et le N₂O) par type d'aménagement

4.5 Oxyde d'azote (N₂O)

Finalement, pour les émissions de N₂O, seulement l'aménagement en phase de remouillage peut être estimé avec un facteur d'émission. Pour les 11,9 hectares de ce site, 0,0012 tonne de N₂O est émis par année, ce qui est égal à 0,3 t CO₂ éq an⁻¹.

Tableau 6: (N₂O) émis en tonne par année selon le type d'aménagement de la tourbière en 2022

État de la tourbière (<i>i</i>)	Superficie en hectare (<i>S_i</i>)	Émission (t N ₂ O)	t CO ₂ éq.
En remouillage	11,9	0,0012	0,3

5.0 Discussion

5.1 Cartographie de l'aménagement de la tourbière

Le but de cet essai était d'évaluer l'empreinte carbone de la production de tourbe d'une tourbière pour identifier les moyens de réduire l'empreinte carbone par la gestion des GES. Étant donné que le type d'aménagement dans la tourbière permet d'estimer les émissions de GES grâce à un calculateur élaboré par l'Association des producteurs de tourbe du Québec, il a été entrepris de cartographier les différentes sections du site de Rivière-du-Loup. Nos résultats cartographiques indiquent les différents types d'aménagement qui sont présents dans la tourbière et montrent la superficie occupée par chacun d'entre eux. La cartographie de la Figure 9 permet de mieux comprendre le plan d'aménagement que l'entreprise a mis en place pour maximiser l'extraction de la tourbe, parce qu'il s'assure que le rapport entre tourbe blonde et tourbe brune soit adéquat pour approvisionner l'usine de mélanges horticoles.

De plus, ce plan utilise une approche qui consiste à faire l'ouverture de nouvelles zones pour l'extraction de la tourbe tout en restaurant simultanément les zones qui sont épuisées en épaisseur de tourbe. Cela signifie que le processus d'extraction de la tourbe est opéré chaque année de façon active sur la nouvelle zone ouverte. De cette façon, l'entreprise évite de laisser certaines zones qui sont ouvertes pour l'extraction inactive. Cela accélère le début du processus de restauration des tourbières, ce qui diminue l'impact du Potentiel de Réchauffement Global (PRG), puisqu'une restauration active et rapide des tourbières réduit considérablement l'impact climatique (Nugent et al., 2019), parce que les émissions de gaz à effet de serre qui seraient libérées lors de la dégradation de la tourbe (facteur de décroissance) peuvent être évitées. PRG est un indicateur qui mesure l'impact sur le climat d'une émission de gaz à effet de serre par rapport à un référentiel, comme le CO₂. Plus le PRG est élevé, plus l'impact sur le climat est considéré comme important (Harvey, 1993). L'entreprise se préserve des tourbières à l'état naturel, car elles servent de zone d'emprunt pour les activités de restauration. En outre, l'entreprise récupère la sphaigne des tourbières qui sont en phase d'ouverture pour les donner aux nouveaux sites en restauration (Berger, 2022).

Le rapport entre la tourbe blonde et brune est important, puisque la tourbière doit être récemment ouverte pour être classée comme tourbe blonde. Après plusieurs années de

récolte, la tourbière s'abaisse en épaisseur et atteint la couche de tourbe brune avec un taux de décomposition sur l'échelle de Von Post de H5-H9. L'épaisseur de la tourbe dépend du temps passé à la phase de récolte, l'âge du bog et l'emplacement dans la tourbière. Les sections sur les limites de la tourbière possèdent moins d'épaisseur que les sections dans le centre du bog. Lorsque les tourbières en récolte de tourbe brune atteignent le stade de la post production, l'entreprise entame graduellement l'ouverture de nouvelles sections de tourbe blonde pour la récolte et récupère aussi la sphaigne pour la restauration. Le cycle d'aménagement est schématisé sur la Figure 14.

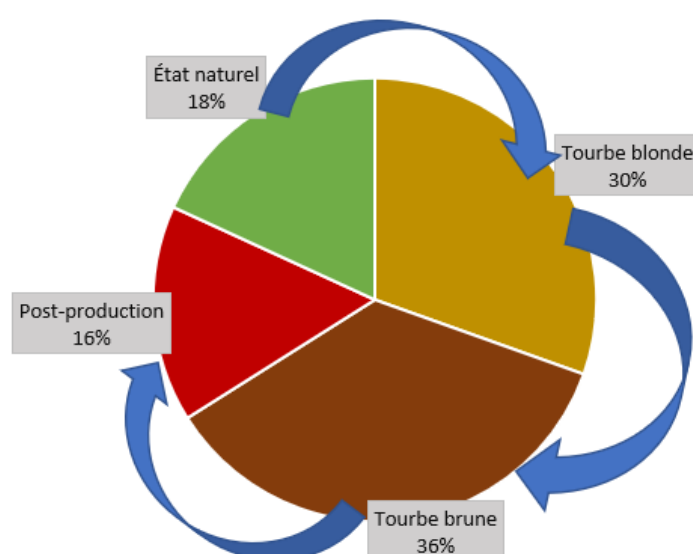


Figure 14: Proportion des principaux types d'aménagements de la tourbière à l'étude en 2022

Ce plan d'aménagement est basé sur deux concepts. Un plan directeur de la ressource (PDR) qui permet l'autosuffisance à long terme pour fournir en tourbe l'usine à mélange horticole. Une planification de l'ouverture et fermeture des terrains, qui consiste à ouvrir des nouvelles tourbières pour la récolte, lorsque des sections doivent être restaurées. Le PDR et la planification de la restauration permettent à l'entreprise de ne pas se retrouver avec des tourbières abandonnées en phase de récolte de tourbe brune. Cette pratique est importante puisque nos résultats montrent que les tourbières en phase de récolte émettent beaucoup plus d'émissions de CO₂ en tonnes par année comparativement aux autres types d'aménagement.

La planification du plan de restauration commence par une gestion optimisée des activités de récolte. Dès que l'extraction se termine, il faut restaurer sans trop tarder. Il serait également

socialement et écologiquement responsable de mettre un site de post-production sur une trajectoire pour devenir une tourbière saine (Joosten et al., 2012). La moyenne de temps entre la fin de la phase de récolte et la restauration écologique, dans l'industrie canadienne, est maintenant d'environ trois ans (Nugent et al., 2019). L'entreprise pratique la restauration de leurs tourbières avant un maximum de 3 ans. Lorsque c'est possible, leur gestion leur permet de pratiquer la restauration l'année suivant la fermeture de la récolte, ce qui est avant-gardiste par rapport à l'industrie canadienne.

Par ailleurs, les résultats cartographiques démontrent que la phase en drainage compte pour 10% de la tourbière. Cette proportion est plutôt grande pour l'année 2022. La majeure partie de ce pourcentage appartient à la section Sud de la Figure 6. L'entreprise a modifié, durant l'été 2021-2022, les canaux de drainage de ces sections afin de les rendre conformes à leur modèle de division de leurs planches. Les émissions de ses sections de la tourbière ont été estimées comme un type d'aménagement en drainage, mais ils ne sont pas des tourbières qui étaient à l'état naturel. Pour cette raison, la proportion de tourbières en phase de drainage n'est pas un indicateur du taux d'ouverture pour l'exploitation des tourbières à l'état naturel.

5.2 Bilan des émissions de GES

Étant donné que les données ont été estimées à l'aide d'un outil pour calculer les émissions de GES, les résultats découlent des facteurs d'émissions basés sur la récente recherche dans le domaine. La quantité d'émission de GES est corrélée positivement à la superficie de l'activité pour laquelle le territoire est aménagé. Avec les résultats des estimations de GES pour chaque type d'aménagement, il est maintenant possible d'identifier les principales sources et puits de carbone des aménagements de la tourbière.

La valeur négative de $-45.7 \text{ t CO}_2 \text{ an}^{-1}$ pour l'état naturel suggère que le type d'aménagement permet le stockage du carbone. Sur une base de carbone, les tourbières ont une fonction de puits parce qu'elles retirent du carbone de l'atmosphère. Le CO_2 est retiré via la photosynthèse et les processus biogéochimiques menant à plus de production de matière organique que de décomposition (Roulet et al., 2007). Pour le méthane, les tourbières naturelles sont considérées comme des sources de GES (en $\text{t CO}_2 \text{ éq an}^{-1}$) avec leur PRG de 28 sur 100 ans (IPCC, 2013). Nos résultats pour les émissions de méthane étaient de 225,5 t

CO₂ éq an¹. Dans l'atmosphère, le CO₂ a une durée de vie plus longue que le CH₄. À long terme (plus de 100 ans), l'effet refroidissant de la tourbière par le retrait du CO₂ surpasse l'effet réchauffant des émissions de CH₄ (Frolking et al., 2006).

Il serait important de connaître les facteurs émissions de GES de la section à l'état naturel qui a été touché par le feu de 2014, puisque la végétation s'y trouvant a été affectée par un brulis total. Un feu est une perturbation unique qui entraîne une perte instantanée de carbone stocké dans la végétation vivante ou morte, la litière et la matière organique, ce qui entraîne la libération directe dans l'atmosphère (Kasischke et Hoy, 2012). De plus, le facteur d'émission de GES du calculateur ne prend pas en compte l'impact de l'incendie sur les émissions dans les années qui suivent l'événement. Les feux peuvent entraîner une perte ou une réduction temporaire du potentiel de séquestration du carbone par la destruction de la végétation des tourbières (Zoltai et al., 1998). Les sections touchées par le feu de 2014 étaient pour la plupart en phase de récolte lors de l'incendie (section Nord, section 3 et section C), sauf pour la tourbière à l'état naturel et une section de tourbière restaurée depuis 10 ans. L'article de Blier-Langdeau (2022) a étudié ce site restauré qui a été sujet à des conditions de feux spécifiques et parle d'un retour rapide des végétaux après l'incendie.

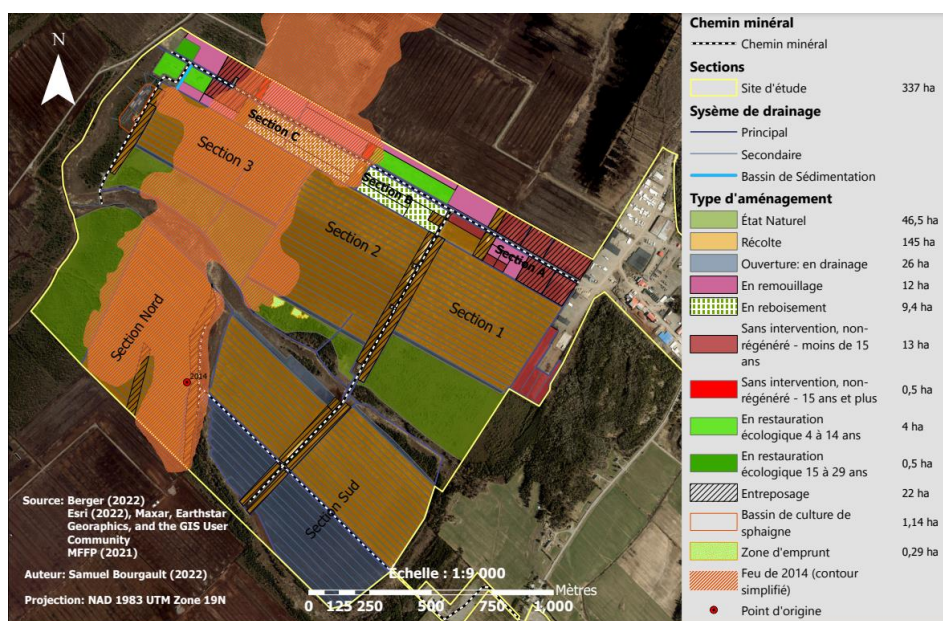


Figure 15: Types d'aménagement de la tourbière touchés par le feu de 2014.

La section affectée par le feu à l'état naturel a une surface de 13,1 hectares, ce qui équivaut à 28,2% de la superficie de l'ensemble des tourbières à l'état naturel. Il est possible de voir beaucoup d'arbres morts sur l'imagerie satellitaire de la Figure 16, ce qui a dû libérer le contenu en CO₂ des arbres dans l'atmosphère. Les incendies dans les tourbières à l'état naturel sont probablement neutres en termes de CO₂, car le carbone libéré par le feu est rapidement reséquestré par la végétation qui se rétablit (Turetsky et al., 2015). Cependant, des visites sur le terrain ont montré que la végétation avait du mal à repousser durant l'été 2022. Il est donc possible de faire l'hypothèse qu'à 28,2% du territoire à l'état naturel serait actuellement une source de CO₂ au lieu d'un puits, due à une activité microbienne accrue dans le sol.

Par ailleurs, il serait d'autant plus intéressant de pousser la réflexion sur la possibilité que la végétation à l'état naturel brûlé ne demeure pas une zone d'emprunt pour les sites en restauration. Sur la Figure 16, la zone d'emprunt de la tourbière à l'état naturel n'est pas dans la zone brûlée en 2014. L'entreprise utilise seulement la zone qui n'a pas été brûlée comme zone d'emprunt, puisque la végétation n'est toujours pas revenue à son état normal après 8 ans.

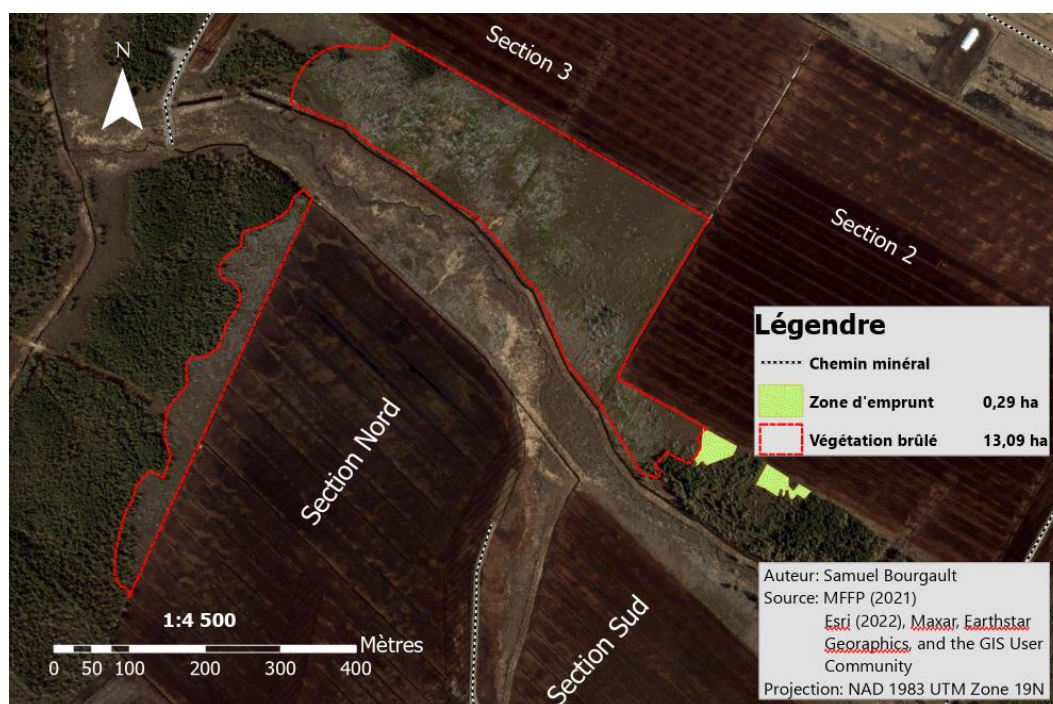


Figure 16: Imagerie satellitaire de la tourbière à l'état naturel 8 ans après feu.

Afin de respecter le plan de restauration, l'entreprise devra choisir entre faire l'ouverture de cette section pour la récolte, sans récupérer le matériel végétal qui est mort, ou attendre que la végétation repousse dans une décennie. Attendre que la végétation repousse, permettrait de réutiliser le couvert de sphaigne pour la restauration, sinon il pourrait avoir un impact sur la disponibilité de matériel donneur potentiel.

Pour le CO₂, le drainage est le second type d'aménagement avec le plus d'émissions par année pour la tourbière à l'étude. Concernant les sections en phase de drainage, les émissions de CO₂ sont beaucoup plus élevées que les émissions de CH₄. Il est observé que le drainage et la récolte réduisent généralement fortement le flux de CH₄. La variation des émissions de CH₄ dans les champs en récolte serait expliquée par la nappe phréatique (Strack et al., 2016). Les émissions de méthane devraient être plus élevées dans les canaux de drainage pour cette même raison (Roulet et al., 1992). Puisque les recherches évoluent chaque année, il serait bénéfique de connaître la différence des émissions de GES entre la tourbe blonde et brune. Une étude publiée en 2022 a montré que les tourbières nouvellement ouvertes sont des sources plus élevées de CO₂ dans l'atmosphère, et les flux diminuent au fil des années pour devenir des sources constantes sur la période restante de l'extraction (Clark et al., 2022). Pour les émissions de CH₄ les données ne présentent pas une différence claire entre les âges des secteurs (Clark et al., 2022). Inclure des facteurs d'émission différents pour la tourbe blonde et brune selon les résultats de CO₂ de cette étude dans le calculateur d'émissions de GES améliora les estimations pour une grande partie du site.

En ce qui concerne les types d'aménagement en phase de post-production, les sites sans-intervention, non-régénéré couvrent 13,5 hectares dans la tourbière. Ils sont les plus répandus parmi les aménagements en post-production et ils sont suivis de près par le remouillage (11,9 ha) et le reboisement (9,4 ha). Cependant, 9,83 hectares des sites sans-intervention, non-régénéré sont affectés des zones d'entreposages. Ils ne sont pas des tourbières abandonnées. Les tourbières abandonnées produisent très peu d'émission de CH₄ (2,5 t CO₂ éq an⁻¹), parce que le niveau de la nappe phréatique est très bas. Cependant, des émissions de CO₂ élevées (184,2 t CO₂) sont émises par les tourbières abandonnées en 2022, et se poursuivront de manière constante à partir de l'année 15 (Nugent et al., 2019). Le changement d'affectation des terres qui a été initié au moment de la phase d'ouverture de la tourbière doit se finir avec une

restauration écologique du milieu. Une petite partie de la tourbière étudiée (3,67 hectares) n'a pas encore eu d'intervention. Ce type d'aménagement est par définition des tourbières abandonnées, et le fait de ne pas restaurer immédiatement après leur extraction entraîne un retard de plusieurs années l'effet de refroidissement qu'aura l'action de restauration (Nugent et al., 2019). Les travaux de Nugent montrent qu'une restauration active dans un court délai est importante pour maximiser la gestion des tourbières comme stratégie d'atténuation du PRG.

Parmi les sources d'incertitudes identifiées lors de ce travail, l'une des plus évidentes est reliée aux valeurs provenant des sections d'entreposage. Les valeurs qui ont été classées dans les sections en phase de récolte devraient bien estimer les émissions, puisque les andains de tourbe sont dans des conditions semblables aux planches qui sont récoltées. En revanche, les sections d'entreposage classées dans la catégorie « Sans intervention – non-régénéré », ne sont pas une bonne estimation des émissions de GES, à cause du changement d'affectation de la terre pour un sol minéral. Ces sections ne sont plus considérées comme étant un milieu humide organique, puisque le couvert du sol est devenu du gravier.

Le remouillage est le second type d'aménagement le plus répandu sur la tourbière pour les sections en phase de post production. Il couvre une superficie de 11,9 hectares. Il est le troisième type d'aménagement émettant le plus de CH₄ (29,4 t CO₂ éq an⁻¹) pour l'ensemble du site d'étude. Cet aménagement compte pour seulement 5% du territoire de la tourbière (Figure 11), mais il équivaut à 13% des émissions totales de CH₄ (Figure 13). Une étude montre que le remouillage de tourbière après la production peut réduire les émissions de CO₂ et de N₂O, mais entraîne également une augmentation des émissions de CH₄ (Wilson et al., 2016).

L'estimation des émissions de CH₄ pourrait être plus élevée pour le remouillage, puisque la tourbière est située dans une zone tempérée nordique. Il n'existe pas de données canadiennes pour les sites remouillés. Le facteur d'émission est adapté selon la moyenne de sites boréaux (41 kg CH₄-C ha⁻¹ an⁻¹) et de sites tempérés pauvres (92 kg CH₄ ha⁻¹ an⁻¹) référant au tableau 3.3 d'IPCC (2014). Par ailleurs, les émissions de N₂O ont été ajoutées à ce travail, mais seulement pour les aménagements en remouillage. Les émissions de N₂O pour ce type d'aménagement étaient très faibles (0,3 t CO₂ éq an⁻¹), puisque la tourbière étudiée est pauvre

en nutriments (bog) (Andersen et al., 2011). Les facteurs utilisés pour calculer les émissions de ce gaz sont appelés à évoluer avec la recherche future, en allant mesurer les émissions de N₂O pour les différents types d'aménagement de tourbière au Canada et même plus précisément au Québec dans les tourbiers tempérés. Selon une étude réalisée sur plusieurs tourbières tempérées en Irlande, les émissions de N₂O sont considérablement réduites après le remouillage de site drainé (Wilson et al., 2016).

Pour les sections en reboisement, les émissions de CO₂ (88,7 t CO₂) sont plus faibles que pour le remouillage et sept fois plus faibles pour le CH₄ (3,9 t CO₂ éq). Les arbres sont des épinettes noires qui ont été plantées entre 2010 et 2017. L'épaisseur de la tourbe résiduelle pour les sections en reboisement est inférieure à 40 cm. L'épaisseur explique le choix du type d'aménagement pour ces sections, puisque le reboisement peut constituer une stratégie d'aménagement appropriée pour les sites qui sont difficiles à réhumidifier (Bravo et al., 2018). Le reboisement est encore plus efficace lorsqu'on réhumidifie le sol pour réduire les pertes de carbone, car le remouillage du sol réduit l'oxydation de la tourbe (IPCC, 2014). Le reboisement émet moins de CH₄, mais il prend 9 ans de plus que le remouillage pour atteindre des émissions nulles de CO₂.

Les surfaces en restauration écologique couvrent 4,6 hectares du territoire de la tourbière à l'étude, ce qui en fait l'aménagement le plus petit parmi ceux en phase de post-production. Il est noté que les émissions de CH₄ sont plus faibles pour les aménagements en restauration par rapport au site à l'état naturel. Cette différence est liée à la position de la nappe phréatique qui est plus profonde pour les sites restaurés que pour les sites naturels (Strack et Zuback, 2013). La restauration écologique émet très peu d'émission de CO₂ et de CH₄, et peut commencer à séquestrer le carbone après environ une décennie. Si la restauration est réussie, le carbone résiduel du dépôt de tourbe est maintenu et la séquestration du carbone met l'écosystème sur la voie de réaccumuler le carbone perdu (Nugent et al., 2019), même si le processus peut prendre des milliers d'années, considérant que les taux moyens d'accumulation de tourbe varient de 1,6 à 5,4 mm par an⁻¹ (Piilo et al., 2019). La restauration permet de maximiser la séquestration du carbone, dépassant même les taux d'absorption de carbone des tourbières à l'état naturel qui sont non drainées, à cause des faibles émissions de CH₄ sur le site et les faibles pertes de COD hors site (0,3 t CO₂ ha⁻¹) (Nugent et al., 2019).

Les résultats cartographiques montrent qu'il y a une plus grande proportion de la tourbière accordée au site en reboisement et en remouillage que pour les sites en restauration écologique. Restaurer immédiatement en utilisant une approche de restauration active plutôt que la réhabilitation par le remouillage réduit le coût climatique de la tourbière de 89% après 20 ans (Nugent et al., 2019). Dans l'ensemble, la restauration des tourbières à l'aide de la technique MTCM est plus souhaitable pour restituer les services écosystémiques des tourbières, mais il peut être difficile d'atteindre cet objectif sur certaines zones sèches dans les tourbières (Bravo et al., 2018). Afin de possiblement réduire ses émissions de GES, l'entreprise pourrait prioriser la restauration écologique au lieu des autres approches de réhabilitations qui ne permettent pas à l'écosystème de réaccumuler la tourbe perdue. Cependant, il est à noter que l'âge de la tourbière influe beaucoup sur le pourcentage de restauration. L'entreprise prévoit restaurer les prochaines parcelles en fermeture en utilisant la méthode MTCM. Pour finir, il convient de souligner que Saint-Modeste est aussi un site pour expérimenter diverses techniques de restauration des tourbières. Le site en question n'est pas représentatif du reste des opérations de l'entreprise menées sur d'autres sites différents.

6.0 Conclusion

Le site d'étude compte 10 types d'aménagement où on peut estimer les émissions de GES provenant de la tourbière. Sur la base de ces résultats, les principales sources de CO₂ proviennent de l'aménagement en phase de récolte et de drainage. Concernant les aménagements en post production, une petite partie du site n'a pas été ramené vers l'état naturel. Une superficie de 3,5 hectares sont encore sans intervention et 9,8 hectares sont utilisés pour l'entreposage avec un couvert de sol minéral. L'entreprise pratique la restauration de leurs tourbières avant un maximum de 3 ans. Lorsque c'est possible, leur gestion de la restauration leur permet de faire la restauration l'année suivant la fermeture de la récolte. La restauration rapide des tourbières permet de réduire l'impact climatique, mais le site de Saint-Modeste n'est pas représentatif des efforts de restauration de l'entreprise à l'échelle canadienne. Certains secteurs du site en phase de post production ont été attribués à des types d'aménagements alternatifs à la restauration écologique tels que le remouillage et le reboisement, en raison de leur âge avancé.

Ce travail a soulevé plusieurs questions pendant l'essai en matière d'émissions de GES. Une avenue d'étude possible serait de mesurer les impacts du feu de 2014 sur les émissions de GES de la tourbière à l'état naturel. La destruction de la végétation par le feu peut certainement influencer les échanges de gaz entre la tourbière et l'atmosphère durant les 20 prochaines années suivant l'incendie. De plus, le calculateur d'émission de GES pourrait inclure le chemin minéral comme type d'aménagement en post production. Un site d'entreposage composé de gravier doit avoir un facteur d'émission différent que les tourbières sans intervention, non-régénéré, puisqu'il s'agit d'un changement d'affectation du sol. Finalement, malgré l'impact négligeable en général des émissions de N₂O par rapport à l'état de la tourbière, il serait avantageux d'établir un facteur d'émission au Québec, afin de mieux surveiller et gérer leur impact sur l'environnement.

Références

- Andersen, R., Rochefort, L. et Landry, J. (2011). La chimie des tourbières du Québec: une synthèse de 30 années de données. *Le naturaliste canadien*, 135(1), 5-14.
- Bazoge, A., Lachance, D., Villeneuve, C., Bérubé, D., Ducruc, J.-P., Lavoie, G (2021). *Identification et délimitation des milieux humides du Québec méridional*. Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction adjointe de la conservation des milieux humides.
<https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/rives/guide-identif-dellimit-milieux-humides.pdf>
- Benscoter, B., Thompson, D., Waddington, J., Flannigan, M., Wotton, B., De Groot, W. et Turetsky, M. (2011). Interactive effects of vegetation, soil moisture and bulk density on depth of burning of thick organic soils. *International Journal of Wildland Fire*, 20(3), 418-429.
- Berger. (2022). *Berger | Mélanges horticoles de haute qualité*. <https://www.berger.ca/>
- Blier-Langdeau, A., Guéné-Nanchen, M., Hugron, S. et Rochefort, L. (2022). The resistance and short-term resilience of a restored extracted peatland ecosystems post-fire: an opportunistic study after a wildfire. *Restoration Ecology*, 30(4), e13545.
- Bravo, T. G., Rochefort, L. et Strack, M. (2018). The impact of a black spruce (*Picea mariana*) plantation on carbon exchange in a cutover peatland in Western Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 48(4), 388-398.
- Buteau, P. (1989). *Atlas des tourbières du Québec méridional*. Direction générale de l'exploration géologique et minérale, Direction de la
- Canada Committee on Ecological (Biophysical) Land Classification, National Wetlands Working Group, Warner, B. G. et Rubec, C. D. A. (1997). *The Canadian wetland classification system*. Wetlands Research Branch, University of Waterloo.
- Chen Lopez, J. (2022). *Différentes grades de tourbe - Premier Tech*.
<https://www.pthorticulture.com/fr/zone-du-savoir/diff%C3%A9rentes-sortes-de-tourbe/>
- Ciais, P., Sabine, C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., Chhabra, A., DeFries, R., Galloway, J. et Heimann, M. (2014). Carbon and other biogeochemical cycles. Dans *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 465-570). Cambridge University Press.

- Clark, L. M., Strachan, I. B., Strack, M., Roulet, N. T., Knorr, K.-H. et Teickner, H. (2022). Years of extraction determines CO₂ and CH₄ emissions from an actively extracted peatland in eastern Québec, Canada. *Biogeosciences Discussions*, 1-38.
- Clymo, R., Turunen, J. et Tolonen, K. (1998). Carbon accumulation in peatland. *Oikos*, 368-388.
- Couillard, Line., Grondin, P. 1952-, Québec (Province). Ministère de l'environnement (1979-1994), Grondin, P. 1952-, et Québec (Province). Ministère de l'environnement. (1986). *La végétation des milieux humides du Québec*. Gouvernement du Québec, Ministère de l'environnement.
- Cubizolle, H. (2019). Les tourbières et la tourbe. *Lavoisier-Tec and Doc, Paris, France*.
- Dessurealt P-L, Côté H, Faubert P. 2020. Guide d'utilisation du calculateur d'émissions gaz à effet de serre pour l'industrie de la production de tourbe horticole. Chaire en éco-conseil, Département des sciences fondamentales, Université du Québec à Chicoutimi, QC, Canada.
- Dionne, J.-C. (1977). La mer de Goldthwait au Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 31(1-2), 61-80.
- Environnement Canada. (2013). *Données des stations pour le calcul des normales climatiques au Canada de 1981 à 2010 - station 7056480*. Gouvernement du Canada. <https://climat.meteo.gc.ca>
- Environnement Canada. (2020). Canadian climate normals 1981-2010. St-Arsène (QC) station. https://climate.weather.gc.ca/climate_normals/.
- Esri. (2022). *Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community*. <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=c03a526d94704bfb839445e80de95495>
- Ferland, C. et Rochefort, L. (1997). Restoration techniques for Sphagnum-dominated peatlands. *Canadian journal of Botany*, 75(7), 1110-1118.
- Francez, A.-J. (2000). La dynamique du carbone dans les tourbières à Sphagnum, de la sphaigne à l'effet de serre. *L'Année biologique*, 39(4), 205-270.
- Frolking, S., Roulet, N. et Fuglestedt, J. (2006). How northern peatlands influence the Earth's radiative budget: Sustained methane emission versus sustained carbon sequestration. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 111(G1).
- Fulton, R. J. (1995). Surficial materials of Canada. Map 1880A. *Geological Survey of Canada*.
- Gauthier, R. (1975). *Étude phytosociologique des tourbières du bas Saint-Laurent, Québec*.

- Glaser, P. H. et Janssens, J. A. (1986). Raised bogs in eastern North America: transitions in landforms and gross stratigraphy. *Canadian Journal of Botany*, 64(2), 395-415.
- González, E. et Rochefort, L. (2014). Drivers of success in 53 cutover bogs restored by a moss layer transfer technique. *Ecological Engineering*, 68, 279-290.
- Gouvernement du Canada. (2013, 13 décembre). *Estimation de Von Post de la décomposition*. <https://sis.agr.gc.ca/siscan/nsdb/soil/v2/slt/vonpost.html>
- GRET. (2022, 22 août). *Restauration des tourbières*. <https://www.gret-perg.ulaval.ca/fr/tourbieres-et-milieus-humides/restauration-des-tourbieres/>
- Harvey, L. D. (1993). A guide to global warming potentials (GWPs). *Energy Policy*, 21(1), 24-34.
- Hugron, S., Guene-Nanchen, M., Roux, N., LeBlanc, M.-C. et Rochefort, L. (2020). Plant reintroduction in restored peatlands: 80% successfully transferred—Does the remaining 20% matter? *Global Ecology and Conservation*, 22, e01000.
- IPCC. (2013). Long-term climate change: projections, commitments and irreversibility. Dans *Climate Change 2013-The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 1535). Cambridge University Press.
- IPCC. (2014). *Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Joosten, H., Tapio-Biström, M.-L. et Tol, S. (2012). *Peatlands: guidance for climate change mitigation through conservation, rehabilitation and sustainable use*. Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome.
- Kasischke, E. S. et Hoy, E. E. (2012). Controls on carbon consumption during Alaskan wildland fires. *Global Change Biology*, 18(2), 685-699.
- Kolb, S. et Horn, M. A. (2012). Microbial CH₄ and N₂O consumption in acidic wetlands. *Frontiers in microbiology*, 3, 78.
- Malloy, S. et Price, J. S. (2014). Fen restoration on a bog harvested down to sedge peat: A hydrological assessment. *Ecological engineering*, 64, 151-160.
- Martineau, G. (1977). *Géologie des dépôts meubles de la région de Kamouraska-Rivière-du-Loup*. Ministère des richesses naturelles, Direction générale des mines, Service de ...
- NOAA, N. (2022). *Recent global monthly mean CH₄*. Global Monitoring Laboratory - Earth System Research Laboratories. https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_ch4/

- Nugent, K. A., Strachan, I. B., Roulet, N. T., Strack, M., Frolking, S. et Helbig, M. (2019). Prompt active restoration of peatlands substantially reduces climate impact. *Environmental Research Letters*, 14(12), 124030. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab56e6>
- Nugent, K. A., Strachan, I. B., Strack, M., Roulet, N. T. et Rochefort, L. (2018). Multi-year net ecosystem carbon balance of a restored peatland reveals a return to carbon sink. *Global Change Biology*, 24(12), 5751-5768.
- OBAKIR. (2021). Bassin versant de la rivière du Loup, problématiques prioritaires - Fiche Synthèse. <https://www.obakir.qc.ca/plan-directeur-de-leau/>
- Payette, S. et Rochefort, L. (2001). *Écologie des tourbières du Québec-Labrador*. Presses Université Laval.
- Pellerin, S. et Poulin, M. (2013). Analyse de la situation des milieux humides au Québec et recommandations à des fins de conservation. *Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs*, 104.
- Piilo, S. R., Zhang, H., Garneau, M., Gallego-Sala, A., Amesbury, M. J. et Väiliranta, M. M. (2019). Recent peat and carbon accumulation following the Little Ice Age in northwestern Québec, Canada. *Environmental Research Letters*, 14(7), 075002.
- Poulin, M., Rochefort, L., Quinty, F. et Lavoie, C. (2005). Spontaneous revegetation of mined peatlands in eastern Canada. *Canadian Journal of Botany*, 83(5), 539-557.
- Quinty, F. et Rochefort, L. (2003). *Guide de restauration des tourbières*. Association canadienne de mousse de sphaigne.
- Rankin, T., Strachan, I. et Strack, M. (2018). Carbon dioxide and methane exchange at a post-extraction, unrestored peatland. *Ecological Engineering*, 122, 241-251.
- Repo, M. E., Susiluoto, S., Lind, S. E., Jokinen, S., Elsakov, V., Biasi, C., Virtanen, T. et Martikainen, P. J. (2009). Large N₂O emissions from cryoturbated peat soil in tundra. *Nature Geoscience*, 2(3), 189-192.
- Richard, P., Larouche, A. et Lortie, G. (1992). Paléophytogéographie et paléoclimats postglaciaires dans l'ouest du Bas-Saint-Laurent, Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 46(2), 151-172.
- Roulet, N., Moore, T., Bubier, J. et Lafleur, P. (1992). Northern fens: methane flux and climatic change. *Tellus B*, 44(2), 100-105.
- Roulet, N. T., Lafleur, P. M., Richard, P. J., Moore, T. R., Humphreys, E. R. et Bubier, J. (2007). Contemporary carbon balance and late Holocene carbon accumulation in a northern peatland. *Global Change Biology*, 13(2), 397-411.

- Schiff, S., Aravena, R., Mewhinney, E., Elgood, R., Warner, B., Dillon, P. et Trumbore, S. (1998). Precambrian shield wetlands: hydrologic control of the sources and export of dissolved organic matter. *Climatic Change*, 40(2), 167-188.
- Schutz, H. (1991). Role of plants in regulating the methane flux to the atmosphere. *Trace Gas Emission by Plants*, 29-63.
- Sherriffs, C. (2018, 20 juin). *Peat-Free Movement Gaining Steam In UK; Other Countries Should Follow Suit*. Garden Culture Magazine.
<http://gardenculturemagazine.com/peat-free-movement-gaining-steam-in-uk-other-countries-should-follow-suit/>
- Statistique Canada. (2017). *Profil du recensement, Recensement de 2016 - [Rivière-du-Loup], [Québec]*. <https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2016/dp-pd/prof/details/page.cfm?Lang=F&Geo1=CSD&Code1=2412072&Geo2=PR&Code2=24&SearchText=Riviere-du-Loup&SearchType=Begins&SearchPR=01&B1=All&GeoLevel=PR&GeoCode=2412072&TABID=1&type=0>
- Strack, M et Zuback, Y. (2013). Annual carbon balance of a peatland 10 yr following restoration. *Biogeosciences*, 10(5), 2885-2896.
- Strack, Maria, Cagampan, J. et Hassanpour Fard, G. (2016). Controls on plot-scale growing season CO₂ and CH₄ fluxes in restored peatlands: Do they differ from unrestored and natural sites?
- Strack, Waddington, J., Turetsky, M., Roulet, N. et Byrne, K. (2008). Northern peatlands, greenhouse gas exchange and climate change. *Peatlands and climate change*, 44-69.
- Turetsky, M. R., Benscoter, B., Page, S., Rein, G., Van Der Werf, G. R. et Watts, A. (2015). Global vulnerability of peatlands to fire and carbon loss. *Nature Geoscience*, 8(1), 11-14.
- Van Breemen, N. (1995). How Sphagnum bogs down other plants. *Trends in ecology & evolution*, 10(7), 270-275.
- Waddington, J. et Day, S. (2007). Methane emissions from a peatland following restoration. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 112(G3).
- Waddington, J., Warner, K. et Kennedy, G. (2002). Cutover peatlands: a persistent source of atmospheric CO₂. *Global biogeochemical cycles*, 16(1), 1-7.
- Wilson, D., Blain, D., Couwenberg, J., Evans, C., Murdiyarso, D., Page, S., Renou-Wilson, F., Rieley, J., Sirin, A. et Strack, M. (2016). Greenhouse gas emission factors associated with rewetting of organic soils. *Mires and Peat*, 17.
- Zinder, S. H. (1993). Physiological ecology of methanogens. Dans *Methanogenesis* (p. 128-206). Springer.

- Zoltai, S., Morrissey, L., Livingston, G. et Groot, W. de. (1998). Effects of fires on carbon cycling in North American boreal peatlands. *Environmental Reviews*, 6(1), 13-24.
- Zoltai, S. et Vitt, D. (1995). Canadian wetlands: environmental gradients and classification. *Vegetatio*, 118(1), 131-137.

Annexe 1: Figures de la configuration des équipements pour mesurer les émissions de méthane



Figure 17: Chambre opaque pour mesurer des émissions de méthane avec un cylindre pour mesurer le niveau de la nappe phréatique.

Annexe 2: Équation pour estimer les émissions de GES

Équation 1: Conversion de facteurs d'émissions du CO₂, selon la base du gaz, la masse du gaz et la superficie

$$t \text{ CO}_2 \text{ ha}^{-1} = g \text{ CO}_2 - C \text{ m}^{-2} \div 1\,000\,000 \text{ g/t} \times 10\,000 \text{ m}^2/\text{ha} \times 44/12$$

t CO₂ ha⁻¹ : CO₂, en tonne par hectare

g CO₂ - C m⁻² : l'unité du facteur d'émission présenté dans la littérature

1 000 000 g/t : pour rapporter les grammes en tonnes, 1 000 000 g = 1 tonne

10 000 m²/ha : pour rapporter les m² en ha. 10 000 m² = 1 ha

44/12 : Facteur de conversion du CO₂ - C en CO₂; rapport moléculaire : CO₂ = 44 g/mol, C dans CO₂ = 12 g/mol

Équation 2: Conversion de facteurs d'émissions du CH₄, selon la base du gaz, la masse du gaz et la superficie

$$t \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1} = \text{CH}_4 - C \text{ m}^{-2} \div 1\,000\,000 \text{ g/t} \times 10\,000 \text{ m}^2/\text{ha} \times 16/12$$

t CH₄ ha⁻¹ : CH₄, en tonne par hectare

g CH₄ - C m⁻² : l'unité du facteur d'émission présenté dans la littérature

1 000 000 g/t : pour rapporter les grammes en tonnes, 1 000 000 g = 1 tonne

10 000 m²/ha : pour rapporter les m² en ha, 10 000 m² = 1 ha

16/12 : Facteur de conversion du CH₄ - C en CH₄; rapport moléculaire : CH₄ = 16 /mol, C dans CH₄ = 16/mol

Équation 3: Conversion en tonne d'équivalent CO₂

$$t \text{ éq. CO}_2 = Q_{\text{GES}} \times \text{PRG}$$

t éq.CO₂ : GES, en tonne d'éq. CO₂

Q_{GES} : Quantité de GES, en tonne

PRG : Potentiel de réchauffement global du GES

Équation 4: Dioxyde de carbone émis par la tourbière en tonne par année

$$t \text{ CO}_2 = S_i \times (F E_{C_i} - (F d_{C_i} * A_n) + C O D_{C_i})$$

t CO₂ : CO₂ émis par la tourbière, en tonne par année

S_i : superficie de la tourbière, en hectare

FE_{ci} : Facteur d'émission provenant de la tourbière en $t\ CO_2\ ha^{-1}$

Fd_{ci} : Facteur de décroissance des émissions de $t\ CO_2\ ha^{-1}$

COD_{ci} : Facteur d'émission provenant du bassin versant et lié au carbone organique dissous, en $t\ CO_2\ ha^{-1}$

I : état de la tourbière (type d'aménagement)

An : nombre d'années d'une phase et de son aménagement

Équation 5: Méthane émis par la tourbière en tonne par année

$$tCH_4 = S_i \times FE_{CH_4} i$$

tCH_4 : CH_4 émis par la tourbière, en tonne par année

S_i : superficie de la tourbière, en hectare

FE_{CH_4} : Facteur d'émission du CH_4 provenant de la tourbière en $t\ CH_4\ ha^{-1}$

i : état de la tourbière (type d'aménagement)

Équation 6: Oxyde d'azote émis par la tourbière en tonne par année

$$tN_2O = S_i \times FE_{N_2O} i$$

tN_2O : N_2O émis par la tourbière, en tonne par année

S_i : superficie de la tourbière, en hectare

FE_{N_2O} : Facteur d'émission de N_2O provenant de la tourbière, en $t\ N_2O\ ha^{-1}$

i : état de la tourbière (type d'aménagement)

Annexe 3: Tableau de conversion de facteur d'émission du CO₂

Tableau 7: Conversion de facteur d'émission du CO₂, selon la base du gaz, la masse du gaz et la superficie, pour les émissions de la tourbière, le facteur de décroissance et les émissions par le COD (bassin versant)

Type d'aménagement (i)	Émission de la tourbière		Facteur de décroissance		Émission par le COD (bassin versant)	
	Facteur d'émission (g CO ₂ - C m ⁻²)	Facteur de conversion du CO ₂ (t CO ₂ ha ⁻¹)	Facteur d'émission (g CO ₂ - C m ⁻²)	Facteur de décroissance (t CO ₂ ha ⁻¹)	Facteur d'émission (COD)	Tonnes de CO ₂ ha ⁻¹
En récolte	330,2	12,1	0	0	16,4	0,6
État naturel	-40,2	-1,5	0	0	13,4	0,5
En remouillage	530,9	19,5	-24,8	-0,9	16	0,6
En reboisement	309,3	11,3	-10	-0,4	16,4	0,6
Sans intervention non-régénéré – moins de 15 ans	445	16,3	-15	-0,6	31,5	1,2
Sans intervention, non-régénéré – 15 ans et plus	216	7,9	0	0	31,5	1,2
En restauration écologique 4 à 14 ans	145	5,3	0	0	7,2	0,3
En restauration écologique 15 à 29 ans	-90	-3,3	0	0	7,2	0,3
Culture en bassin de sphaigne	504	18,5	0	0	7,2	0,3
Ouverture: en drainage	310,9	11,4	0	0	16,4	0,6