

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

CARACTERISATION DU POTENTIEL DES PLANTATIONS DE PEUPLIER HYBRIDE  
SUR MONTICULE À CRÉER DES MILIEUX HUMIDES

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAITRISE EN BIOLOGIE  
EXTENSIONNÉE

DE  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

PAR

THÉO GICQUEL DE MENOÛ

JUIN 2025

## REMERCIEMENTS

Je voudrais remercier Katrine TURGEON, ma directrice, qui m'a donné la chance de participer à ce projet de recherche et qui m'a accompagné du début à la fin de ce projet. Merci pour tes conseils qui m'ont permis de faire de superbes poster et présentations, ton soutien dans les moments difficiles et ta patience surtout pour la fin! Je remercie aussi Angélique DUPUCH, ma co-directrice, pour sa rigueur, de m'avoir guidé dans le chaos des plantations sur monticule et pour ses cours de statistiques qui m'ont permis de voir la lumière.

Merci à l'ISFORT et l'UQO de m'avoir permis de faire ma maîtrise dans de bonnes conditions. Merci à Domtar de m'avoir laissé parcourir ses terres pour collecter mes données.

Merci Émilie et Sam qui ont pris sur leur temps perso pour m'accompagner, chacun leur tour, les premières semaines de terrain. Ces deux semaines n'ont pas été de tout repos mais grâce à vous j'ai pu appréhender sereinement le reste de la campagne. Je remercie aussi Louis-Mathis, stagiaire botaniste et colocataire de tente roulotte, qui m'a accompagné pour les semaines de terrain qui ont suivi et a tenu bon dans cet enfer vert qu'est une jeune plantation de peuplier sur monticule sous un déluge de pluie. Merci à Jean-François pour l'aide en QGIS et R, les longues discussions au bureau et le gossage de bois! Merci Régis pour les conseils bricolage. Merci Audrey-Anne d'avoir fait une aussi bonne maîtrise avant moi en développant des tutoriels pour tous les logiciels que j'ai utilisés après toi! Merci Romain J. pour les discussions et les soirées à la maison. Merci Baptiste et Pierrick pour ces sorties pêches ! Je me souviendrai du monstre du Lac Viceroy que Pierrick a attrapé. Merci à Mathieu, Thibaud et Zoé, anciens colocs et partenaires de confinement mais toujours copains... votre présence a rendu mes premiers mois au Québec mémorables. Merci Fred, Romain T., Jonathan, Thibaud, Émilie, Sam et surtout Daphnée pour ces après-midis de jeux qui resteront parmi mes moments les plus précieux.

Enfin merci Emmanuelle de m'avoir supporté du début à la fin, avant et après, quand je n'avais plus de motivation et quand j'en avais trop au point de ne plus être disponible. Merci d'avoir assuré dans mes moments de paniques de travaux de dernières minutes. Je te rendrai la pareil dans les mois qui viennent !

## DÉDICACE

*Je dédie ce mémoire à mère, Guylaine, qui a su me transmettre sa passion pour la science et la biologie particulièrement. Je n'aurais pas couru toute ces années après des bestioles et dans les bois sans ses encouragements à poursuivre dans cette étrange voie qu'est la recherche.*



Photo d'un plant de peuplier hybride (*Populus x canadensis*) dans la plantation de Watopeka

(Crédit photo : Katrine Turgeon)



Photo d'un *Carex lurida* près d'une dépression remplie d'eau dans la plantation de Watopeka.

(Crédit photo : Katrine Turgeon)

## AVANT-PROPOS

Ce mémoire présente le travail de deux années d'études sur une conséquence écologique de la sylviculture sur monticule (plantation de peupliers hybrides sur monticule) : la création potentielle de milieux humides. Ce type de sylviculture provoque l'accumulation d'eau dans des dépressions au pied de monticules sur lesquels des plants d'arbres sont plantés. Lors de précédentes études au sein de ces plantations, une étude réalisée dans le laboratoire du Prof. Angélique Dupuch a constaté la présence d'amphibiens dans ces dépressions et d'oiseaux aquatiques dans les plantations sur monticules. **Nous avons donc cherché à déterminer si nous pouvions considérer ces dépressions comme des milieux humides.** Pour ce faire, nous avons suivi l'hydrologie et inventorié la végétation et les espèces d'amphibiens de ces dépressions. Dans ce mémoire nous ne présenterons que les résultats de l'hydrologie, mais des projets sont en cours sur la végétation et sur les communautés d'amphibiens dans ces dépressions.

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS .....	ii
DÉDICACE.....	iii
AVANT-PROPOS .....	iv
TABLE DES MATIÈRES .....	v
LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES .....	ix
RÉSUMÉ.....	x
ABSTRACT .....	xi
CHAPITRE 1 INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	12
1.1 Foresterie et utilisation des plantations.....	12
1.1.1 Demande en bois et changement d’occupation des sols .....	12
1.1.2 Sylviculture intensive.....	13
1.1.3 Territoires, essences d'arbres et techniques de la compagnie DOMTAR .....	15
1.2 Milieux humides dans les plantations.....	16
1.2.1 Disparition globale des milieux humides.....	16
1.2.2 Définir, caractériser et protéger les milieux humides .....	17
1.2.3 Succession et dynamique transitoire des milieux humides .....	20
1.3 Les plantations sur monticules, un « piège écologique » ?.....	21
1.4 Objectif et hypothèses de travail.....	22
CHAPITRE 2 : OCCURRENCE AND HYDROPERIOD OF WETLANDS IN HYBRID POPLAR PLANTATIONS: ARE THEY ECOLOGICAL TRAPS? .....	24
2.1 Introduction.....	25
2.2 Methodology.....	28
2.2.1 Study sites .....	28
2.2.2 Occurrence of depression and their hydroperiod .....	30
2.2.3 Statistical analysis .....	31
2.2.3.1 Occurrence of depressions over time .....	31
2.2.3.2 Hydroperiod in the depressions.....	31
2.3 RESULTS .....	32
2.3.1 Change in the number of depressions flooded over time.....	32

2.3.2 Hydroperiod in the depressions (survival analysis) .....	33
2.4 DISCUSSION .....	34
2.4.1 Occurrence of depressions with water in the spring and summer.....	34
2.4.2 Hydroperiod in the plantations' depressions: Age matters .....	35
2.4.3 Hydroperiod in the plantations' depressions: Region matters .....	35
2.4.4 Are depressions ecological traps for amphibians?.....	36
CHAPITRE 3 CONCLUSION .....	39
ANNEXE A : Cartes détaillées des sites inventoriés dans les deux régions. Les polygones en rouge représentent les érablières (ER) et les polygones en jaune représente les plantations de peupliers hybrides (PEH) .....	41
ANNEXE B : Comparaison de la quantité d'eau dans une dépression d'une plantation de Watopeka (site WATOPH15) âgée de 7 ans en a) avril et b) en mai. Photos prises par les pièges photographiques. Les encoches sur la barre blanche sont espacées de 20 cm. ....	42
ANNEXE C : Photo prise par une caméra - piège photographique pour démontrer la présence d'espèces végétales OBL et FACH autour et dans la dépression qui est remplie d'eau à la mi-juin (plantation de PEH à Watopeka, âgée de 12 ans).....	43
ANNEXE D : Photo d'une plantation de peupliers hybrides âgée d'un an dans la région de Dorset (Chaudière-Appalaches). Noter les monticules apparents avec les plantules et les dépressions remplies d'eau. <i>Credit photo : Théo Gicquel de Menou.</i> .....	44
RÉFÉRENCES.....	45

## LISTE DES FIGURES

- Figure 1.1.** Photo d'une plantation de peuplier hybride de Domtar (plantation âgée de 12 ans) sur le site d'étude de Dorset (Chaudière-Appalaches). *Photo crédit : Théo Gicquel de Menou*.12
- Figure 2.1.** Photo of a tree frog (*Dryophytes versicolor*) in a Domtar plantation (Watopeka) during the summer of 2022. *Photo crédit : Théo Gicquel de Menou* .....25
- Figure 2.2.** Map of the location of the 40 sites in the two regions (Watopeka, close to the city of Sherbrooke and Dorset, close to the city of Thetford Mines in Québec). The red dots represent HMS and the yellow dots represent HPP. ....30
- Figure 2.3.** Change in the number of depressions with water in Hybrid poplar plantation (HPP) and harvested maple stand (HMS) over time in a) young HPP and HMS (1 to 5 years old), in 6 to 11 years HPP and HMS and older HPP and HMS (older than 11 years).....33
- Figure 2.4.** a) Probability of the survival of water in the depressions over time (proxy of the hydroperiod) by age category of plantations (1 to 5 years, 6 to 10 years, and older than 11 years), b) Probability of the survival of water in the depressions over time over time by region (Dorset or Watopeka) .....34
- Figure 2.5.** Variation in the volume of water in depressions within hybrid poplar plantations from April to August 2022 according to the year of planting. The egg-laying periods of 4 species of anurans are shown at the top of the figure. ....37

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Table 2.1.</b> Best glmm to predict the number of depressions in HPP and HMS over time .....	32
<b>Table 2.2.</b> Survival analysis model output to predict the hydroperiod in Hybrid poplar plantation (HPP) depressions over time in relation to the age of the plantation and site (Concordance = 0.738, Wald test = 165, n= 404, number of events 315). .....	33

## LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

<b>AIC :</b>	Aikaike Information Criteria
<b>ET :</b>	Ecological trap
<b>FACH :</b>	Facultative (en parlant des plantes des milieux humides)
<b>GLMM :</b>	Generalized linear mixed effects models
<b>HPP :</b>	Hybrid poplar plantations
<b>HMS :</b>	harvested maple stands
<b>MRNF :</b>	Ministère des Ressources Naturelles et des Forêts
<b>MSP :</b>	Mechanical Site Preparation
<b>OBL :</b>	Obligate ou obligée (en parlant des plantes des milieux humides)
<b>PEH :</b>	Peuplier Hybride
<b>PMS :</b>	Préparation mécanique des sols
<b>TE :</b>	Trappe écologique

## RÉSUMÉ

Les milieux humides remplissent de nombreux services écosystémiques et abritent une grande partie de la diversité mondiale. Cependant, ils font partie des milieux naturels les plus modifiés ou détruits par les activités humaines depuis plusieurs siècles, dont l'exploitation forestière. Pour contrebalancer cette destruction et assurer un apport régulier de bois, la foresterie développe des méthodes de cultures de plus en plus performantes. L'une de ces méthodes est la plantation sur monticule, utilisée en particulier pour prévenir la compétition à la lumière des plants entourant les arbrisseaux. Ce type de plantation crée un paysage de monticules et de dépressions de plusieurs mètres de diamètre. Ces dépressions se remplissent de neige en hiver au Québec et restent inondées au printemps parfois jusqu'au cœur de l'été. Ces dépressions semblent présenter une hydrologie d'étang vernaux. Dans ce projet, nous avons cherché à quantifier le nombre de dépressions et l'hydropériode des dépressions dans des plantations de Peuplier hybride (*Populus x canadensis*) afin de les comparer aux dépressions rencontrées en forêts non plantées, telles que des érablières aménagées (peuplements avec coupe de jardinage). Nous avons ensuite comparé le nombre de dépressions et l'hydropériode entre des plantations de différents âges incluant des plantations dites jeunes (1 à 5 ans), d'âge intermédiaire (5 à 10 ans) et plus proche de la récolte (10 à 15 ans) afin de déterminer leur dynamique. Nous avons constaté que le nombre de dépression remplies d'eau est plus important dans les plantations comparativement aux érablières, et que les dépressions dans les plantations restent inondées plus longtemps au cours de la saison. Ces deux tendances sont d'autant plus importantes dans les jeunes plantations.

**Mots clés :** Milieux humide; Dépression, Foresterie; Hydrologie; Peuplier hybride, hydropériode, Domtar

## ABSTRACT

Wetlands provide numerous ecosystem services and are home to a large proportion of the world's biodiversity. However, wetlands are among the natural environments most altered or destroyed by human activities over the last few centuries, including forest harvesting. Forestry is developing more efficient cultivation methods to counterbalance this destruction and ensure a steady wood supply. One such method is mound planting, mainly to prevent light competition from plants surrounding the planted trees. This type of planting creates a landscape of mounds and depressions of several metres in diameter. These depressions fill with snow during winter and remain flooded in spring, sometimes well into summer. These depressions appear to have a hydrology similar to that of vernal ponds. In this project, we sought to quantify the number and the hydroperiod of depressions in hybrid poplar (*Populus x canadensis*) plantations and harvested maple stands (stands with selection cuts). We then sought to estimate the duration during which water remains in these depressions over time by comparing young plantations (1 to 5 years) with older plantations (5 to 10 years) and almost mature plantations (10 to 15 years or more). The number of water-filled depressions was greater in *hybrid poplar* plantations than in maple stands. Hydroperiod was longer in plantations' depressions. This tendency was even more visible as the age of the plantation was young.

**Keywords:** Wetlands; Depression, Forestry; Hydrology; Hybrid Poplar, Hydroperiod, Domtar

## CHAPITRE 1 INTRODUCTION GÉNÉRALE

*“As long as wetlands remain more difficult to stroll through than a forest, and more difficult to cross by boat than a lake, they will remain misunderstood by the general public unless a continued effort of education takes place.”*

*Mitsch et Gosselink 2015*



**Figure 1.1.** Photo d’une plantation de peuplier hybride de Domtar (plantation âgée de 12 ans) sur le site d’étude de Dorset (Chaudière-Appalaches). *Photo crédit : Théo Gicquel de Menou*

### 1.1 Foresterie et utilisation des plantations

#### 1.1.1 Demande en bois et changement d’occupation des sols

Malgré une décélération de la déforestation mondiale et une stabilisation en Amérique du Nord de la surface forestière, la surface forestière mondiale a perdu près de 178 millions d’hectares entre 1990 et 2020, une superficie légèrement plus grande que le Québec (FAO 2020). La demande en bois augmente pour répondre à de nombreux besoins industriels et civils. Le bois est de plus en

plus réintégré aux matériaux de construction pour ses intérêts écologiques, thermiques et son accessibilité. Des pays possédant d'importantes ressources en bois comme le Canada, incluant le Québec qui compte 2% des forêts mondiales (Thiffault et al. 2020), ont fortement encouragé son utilisation pour la construction. De plus, face à l'augmentation du prix de l'énergie due à la raréfaction des ressources et plusieurs événements géopolitiques, le bois est de plus en plus recherché pour le chauffage. Cette augmentation de l'utilisation entraîne une exploitation d'habitats forestiers qui étaient très peu perturbés par l'Humain, et provoque une érosion de la biodiversité et la disparition de plus en plus de milieux naturels. Ainsi pour ralentir la coupe dans les peuplements naturels et pour répondre à une demande de six milliards de m<sup>3</sup> de bois rond prédite en 2050, la sylviculture intensive (*i.e.*, l'utilisation des plantations) semble être une solution adaptée aux besoins de nos sociétés.

### 1.1.2 *Sylviculture intensive*

Au début du millénaire, 35% du bois rond produit mondialement était issu de forêts plantées qui ne représentaient que 5% de la surface forestière mondiale (McEwan et al. 2020). Avec 123 millions d'hectares supplémentaires depuis 1990, les forêts plantées représentent aujourd'hui environ 7% de la superficie forestière mondiale (FAO 2020). Les plantations sont des écosystèmes cultivés par les humains, généralement sur d'anciennes friches agricoles ou forêts coupées, et sont réalisées à partir de graines ou plus généralement de plants d'arbres. Les plantations destinées à subvenir aux besoins humains en bois sont souvent monospécifiques, équiennes et plantées selon un patron régulier. Elles représentent 45% des forêts plantées mondialement. Les autres forêts plantées sont utilisées pour briser le vent, empêcher l'érosion des sols, augmenter le stockage d'eau sur le territoire et faire de la restauration écologique (Carnus et al. 2006; FAO 2020) Les principales utilisations commerciales du bois provenant des plantations au Québec sont pour les pâtes et papiers, l'imprimerie, l'ameublement et la construction. Les plantations ont pour but de fournir du bois standardisé et à moindre coût pour ces industries (McEwan et al. 2020). Bien que le bois de chauffage représente un volume conséquent dans la part de forêt exploitée, il n'est pas soumis aux mêmes problématiques que nous aborderons durant cette étude, car il provient majoritairement de micro-exploitations.

Une culture intensive d'arbres, tout comme l'agriculture intensive, peut avoir des impacts négatifs sur l'environnement et sur la biodiversité (Paquette and Messier 2010) par le drainage, la préparation mécanique des sols (**PMS**) et l'arrivée d'espèces exotiques et envahissantes. Si la sylviculture entraîne un changement d'occupation des sols, elle peut entraîner une disparition directe des milieux humides. En effet, 65 millions d'hectares de tourbières ont disparu après leur drainage pour être remplacés par des plantations forestières et agricoles (Joosten et al. 2016). La PMS avant de procéder à la plantation des arbres peut fortement perturber l'écosystème. Cette opération sert à préparer les sols, supprimer temporairement les plantes pouvant entrer en compétition avec les arbres, faciliter la plantation et diminuer les risques d'incendie. Les horizons du sol sont mélangés ce qui modifie sa granulométrie, son aération et sa force. Par la compaction dû aux passages répétés des engins, la densité du sol est augmentée, réduisant sa porosité ainsi que la pénétration d'eau dans le sol, la disponibilité des nutriments et l'établissement des racines (Demarais et al. 2017). Ces opérations peuvent provoquer la mort de près de la moitié des populations de micromammifères présentes sur site (Escobar et al. 2015) et au-delà, provoque une perturbation extrêmement brutale de l'environnement des autres animaux utilisant la plantation comme habitat. Les plantations forestières tendent aussi à augmenter la richesse spécifique d'espèces exotiques et diminuent la richesse des espèces natives (Carnus et al. 2006; Bremer and Farley 2010). L'arrivée de plantes invasives résulte souvent d'une perturbation du milieu, humaine ou non, volontaire ou involontaire. Ces perturbations stressent, affaiblissent ou détruisent les espèces indigènes facilitant l'installation d'espèces exotiques. Ces espèces exotiques qui bénéficient alors d'une plus faible compétition tout en ayant moins de chances de rencontrer un prédateur (Galatowitsch et al. 1999) naturel peuvent devenir envahissantes. La PMS mettant à nu le sol peut favoriser notamment l'installation de plantes pionnières invasives (Demarais et al. 2017). Ces plantes peuvent pénétrer ainsi encore plus profondément dans des écosystèmes moins anthropisés et moins visités par l'Humain entre des peuplements forestiers naturels. Elles pénètrent d'autant plus rapidement, car elles peuvent coloniser par l'anthropochorie des opérateurs forestiers qui voyagent sur des centaines de kilomètres chaque semaine en traversant potentiellement une multitude de milieux différents.

### 1.1.3 Territoires, essences d'arbres et techniques de la compagnie DOMTAR

Domtar est une entreprise nord-américaine spécialisée dans la production de produits à base de pulpe de bois comme les papiers d'imprimerie, de bureau, d'emballage et d'hygiène, mais aussi de la pâte à papier utilisée par d'autres industries. Ses 11 usines de pâtes à papier et neuf centres de fabrication de papier produisent 3,8 million de tonnes de pâtes et 2,7 millions de tonnes de papier par an et font d'elle la plus grande productrice d'Amérique du Nord (DOMTAR 2024). Domtar possède 160 000 hectares de forêts et peut en exploiter 5 millions d'hectares supplémentaires sur les terres de la Couronne au Québec.

Pour optimiser sa production de bois, Domtar utilise plusieurs méthodes d'agroforesterie. Outre l'utilisation d'intrants tels que des produits phytosanitaires ou des fertilisants comme les cendres de bois et boues issues de sa papeterie de Windsor (Roy 2018), Domtar réalise des aménagements sur ces parcelles. Ces dernières années, la PMS par le scarifiage par monticules (ou sur buttes ; Figure 1.1, ANNEXE D) a été privilégié par Domtar au Québec. Cet aménagement consiste en l'excavation de terre de la parcelle pour faire des monticules mesurant de 0,5 à 1 mètre de haut sur lesquels seront plantés les jeunes arbres. Le but principal de cette technique est d'éviter la compétition végétale pour la lumière en donnant un avantage de hauteur aux plants. L'aération et le drainage des sols sont également améliorés (Thiffault et al. 2020). Cette reforestation est principalement réalisée avec du Peuplier hybride (*Populus x canadensis* ; ci-après appelé **PEH**) dont la productivité est fortement augmentée grâce à ce type de préparation mécanique des sols (McCarthy et al. 2017; Thiffault et al. 2020). C'est l'essence dont Domtar tire le plus gros volume de matière pour fabriquer la pâte à papier au Québec.

Les PEH sont obtenus par croisement de quatre autres espèces de peupliers *P. deltoides*, *P. trichocarpa*, *P. nigra*, *P. maximovici*. Ils présentent une croissance rapide, un rendement à l'hectare important et sont très prisés dans les plantations forestières intensives (Thiffault et al. 2020). Ils sont d'autant plus appréciés, car leur croissance rapide permet de compenser la saison de pousse plus courte dans les régions sub-boréales comme le Québec méridional (Grenke et al. 2016). Domtar qui travaille sur l'optimisation de leur culture depuis la fin des années 90 arrive à obtenir des arbres de 15 mètres avec un diamètre à hauteur de poitrine de 45 cm en 15 ans. La plupart de ces arbres sont des clones issus de boutures d'arbres mères standardisant les tiges cultivées, ils

obtiennent ainsi une quantité équivalente de biomasse sept fois plus vite que sur un peuplement naturel (Roy 2018).

## 1.2 Milieux humides dans les plantations

### 1.2.1 *Disparition globale des milieux humides*

Diversifiées par leurs tailles et leurs caractéristiques, les zones humides naturelles ont vu leur surface diminuer de 35 % dans le monde entre 1970 et 2015 (Courouble et al. 2021). Ces milieux ont longtemps été épargnés par l'humain, car ils ne présentaient pas suffisamment de qualités pour l'agriculture ou la construction. Cependant, depuis le développement du génie civil, la diminution des coûts de machinerie et de main-d'œuvre, ces zones aux reliefs plats sont de plus en plus accessibles aux activités humaines, notamment par le drainage qui permet d'assécher les sols. Il est prévu que les populations humaines installées près des côtes et des cours d'eau se densifient encore davantage dans les prochaines décennies, attirées par des intérêts économiques, particulièrement en Asie (Neumann et al. 2015). Cette densification s'accompagne avec un besoin de logements, d'infrastructures et de ressources pour l'accueil de ces populations, ce qui entraîne un étalement urbain nécessitant de plus en plus de surfaces cultivables et propices au développement. Il se trouve que beaucoup de milieux humides se trouvent près de ces zones (ex. marais littoraux et marais riverains) et sont directement menacés par la densification humaine. La progression de l'étalement urbain, le changement d'affectation des sols et leur artificialisation sont les principales causes de perte et dégradation des milieux humides (Finlayson et al. 2005; Courouble et al. 2021).

L'intensification des pratiques sylvicoles augmente la pression sur de nombreux milieux naturels. Les milieux humides font partie des écosystèmes les plus sensibles aux perturbations anthropiques. Malgré ce constat alarmant, il est possible de restaurer des zones perturbées en milieux humides si certaines conditions sont respectées comme l'ont montré Mitsch et al. (2014) à travers un projet sur plusieurs décennies. Le design de la PMS des plantations sur monticule ressemble au design utilisé dans certaines expériences de restauration et création de milieux humides. En effet le design « **monticules et dépressions** » est utilisé comme première étape de préparation du sol d'un terrain pour créer un relief favorisant l'accumulation d'eau, les dimensions de ces structures sont en

revanche plus grandes pour ces expériences (Moser et al. 2007). Une étude réalisée au Québec dans des plantations de peuplier hybride sur monticule a montré que des espèces d'oiseaux habituellement retrouvées en milieux humides comme la Bécassine de Wilson (*Gallinago delicata*) et le Bruant des marais (*Melospiza georgiana*) ont pu être observées dans les plantations de PEH (Côté-Bourgoin 2019), suggérant que ces plantations pourraient avoir les caractéristiques d'un milieu humide et jouer un rôle écologique intéressant.

### 1.2.2 Définir, caractériser et protéger les milieux humides

Une prise de conscience mondiale des pouvoirs publics avec la convention de RAMSAR en 1971 a accentué le besoin d'identifier les milieux humides et les délimiter pour mieux les protéger. Cependant la définition des milieux humides est complexe, varie selon les gouvernements et évolue avec l'apport de connaissances sur ces écosystèmes. Dans le langage commun, on retrouve de nombreux termes pour définir un milieu humide. Certains termes peuvent désigner plusieurs écosystèmes à la fois comme le terme « tourbière » qui regroupe des écosystèmes que l'on classe selon leur pH ou l'origine de l'eau qui les alimente. D'autres termes sont des synonymes au sein d'une même langue, mais utilisés par des locuteurs vivants sur des continents différents comme les termes « oxbow » et « billabong » en anglais qui désigne un bras mort d'une rivière. Il en existe également pour décrire des milieux que l'on retrouve dans des zones géographiques restreintes comme les « hummocks » dans les Everglades (Mitsch and Gosselink 2015).

Toutes ces particularités linguistiques ont rendu et rendent encore difficile la caractérisation des milieux humides. Il est essentiel pour les scientifiques, les gestionnaires et législateurs de pouvoir les reconnaître, les nommer et les délimiter afin de les comprendre et les protéger quand cela est nécessaire. Les milieux humides sont un ensemble d'écosystèmes variés tant par leurs positions géographiques et topographiques que leurs caractéristiques intrinsèques. Ils se situent souvent entre des étendues d'eau libres et des terres émergées bien définies. Leur point commun étant une saturation d'eau prolongée de leur sol au cours de la saison de croissance des plantes (Bazoge et al. 2014). Mitsch et Gosselink (2015) ajoutent que leurs sols présentent des aspects uniques en leur genre et qu'ils abritent tous de nombreuses espèces spécialistes de ces milieux, en particulier des organismes végétaux. Au Canada, les milieux humides sont définis tels que « Des terres qui sont

*saturées d'eau assez longtemps pour permettre la mise en place de processus typiques de milieu humide ou aquatique confirmé par la présence de sols hydromorphes, de plantes hydrophytes et de diverses activités biologiques adaptées à un environnement humide* » (Mitsch and Gosselink 2015). Cette présence d'eau prolongée au cours de l'année varie grandement selon les types milieux humides. Là où certains sont inondés quelques mois dans l'année (ex. étang vernal), d'autres le sont continuellement (ex. marais).

Cette diversité de caractéristiques et de positions leur donne la capacité de rendre des services écosystémiques bénéficiant à notre société, de la filtration et stockage des eaux de ruissellement au nourrissage des humains via la culture et l'élevage en leur sein (Mitsch and Gosselink 2015). La plupart du temps on retrouve les milieux humides entre des milieux terrestres et des milieux aquatiques. Par le passé ils ont souvent été considérés comme de simples zones de transitions (i.e., écotones) entre ces milieux avant que leur étude ne permette de définir ce qui les différencie et les rendent uniques. Aujourd'hui on utilise trois aspects pour caractériser un milieu humide : l'hydrologie, les sols et les communautés végétales. Ces aspects sont en interactions constantes durant la formation et le maintien de ces milieux.

L'**hydrologie** est l'aspect qui est à l'origine de la création et du maintien des milieux humides. L'hydrologie d'un lieu est dépendante du climat et de la morphologie du bassin versant. On tend à trouver des milieux humides sur des terrains plats là où l'écoulement gravitaire est lent comme des cassures de pentes, des goulets en fond de vallées, des plaines riveraines ou des zones de très faibles altitudes près de la mer. Ils sont d'autant plus fréquents sous les climats froids où l'évapotranspiration est faible et/ou sous des climats humides qui reçoivent de plus grands volumes de précipitations (Mitsch and Gosselink 2015). L'hydrologie est un important vecteur de nutriments vers les milieux humides. Avec l'érosion des milieux terrestres, le lessivage d'autres milieux humides en amont ou des incursions marines, elle apporte la matière organique, les oligoéléments, minéraux de base à l'installation de producteur primaire, ainsi qu'une grande quantité de sédiments plus ou moins fins (Brooks et al. 2017). Les incursions d'eau, qu'elles viennent des précipitations ou de résurgence phréatique, au sein de ces milieux permettent aussi un apport d'oxygène tout en évacuant des métabolites produits par les organismes locaux et le trop-plein de sédiments qui s'y accumule. Ces apports de sédiments modifient les conditions physiques

et chimiques des milieux humides. La chimie est modifiée par le contenu des sédiments, qui peuvent contenir aussi bien de la matière organique que des éléments toxiques. La physique du milieu est modifiée par l'accumulation de sédiments qui peut changer l'écoulement de l'eau ou sa microtopographie (Mitsch and Gosselink 2015).

Ces apports de matières minérales et organiques participent au développement des **sols des milieux humides**. Par leur accumulation sous des conditions anoxiques due à leur saturation et/ou inondation en eau, ils acquièrent la caractéristique hydromorphe. Ces caractéristiques sont mesurables par l'examen de la texture, de la couleur et la capacité de drainage des horizons du sol. Tant que la variation interannuelle du régime hydrologique est faible, un milieu humide tend à conserver sa structure avec ses caractéristiques biotiques et abiotiques dans le temps (Mitsch and Gosselink 2015). Ceci laisse à penser que l'hydrologie, et donc une **hydropériode** longue (i.e., durée des variations en intensité et en fréquence du niveau d'eau dans un système) seraient les facteurs déterminants pour maintenir un milieu humide dans un état stable. Ces caractéristiques physiques uniques les distinguent des autres écosystèmes et permettent l'établissement de communautés végétales, animales et microbiennes spécialisées des milieux humides.

Au sein des milieux humides, il est courant de rencontrer un minimum de cent espèces végétales vascularisées dont la moitié sont considérées comme **plantes de milieux humides** (Mitsch and Gosselink 2015). Ces plantes sont divisées en deux catégories dites obligatoires (**OBL**) et facultatives des milieux humides (**FACH**). Les plantes OBL sont presque uniquement rencontrées en milieux humides et les FACH tendent à être restreintes à ces milieux (Bazoge et al. 2014). Si des espèces appartenant à ces deux classes dominent les différentes strates d'un écosystème, ce dernier pourra être considéré comme un milieu humide. Ces plantes sont considérées comme étant hydrophytes, c'est-à-dire qu'elles se développent sur un substrat en condition anaérobie au moins une partie de l'année (Bazoge et al. 2014). Les végétaux hydrophytes étant caractéristiques des milieux humides, leur présence au sein des plantations sur monticules pourrait indiquer la présence de milieux humides (voir ANNEXE C).

Dans le cas des plantations de PEH sur monticule, elles pourraient jouer un rôle de piège écologique dans certaines situations, notamment par son hydrologie. La forte présence de points d'eau pourrait

attirer des espèces biphasiques qui ont un besoin obligatoire d'eau libre pour réaliser leur cycle de vie, dont les amphibiens (Russell et al. 2005), les odonates et certains diptères qui pondent dans l'eau et dont les larves s'y développent jusqu'à l'âge adulte. Ce choix leur serait délétère si l'eau n'est pas présente suffisamment longtemps pour que les jeunes finissent leur développement. Cela est d'autant plus problématique pour certaines espèces d'amphibiens philopatriques ou qui présentent une faible capacité de dispersion (Smith and Green 2005), car la rapide succession que devraient subir ces plantations avec la croissance des arbres et la fermeture de la canopée devrait modifier grandement la qualité de leurs sites de ponte.

### *1.2.3 Succession et dynamique transitoire des milieux humides*

Le phénomène de succession fait référence à une modification d'assemblage et de diversité des communautés végétales suite à la maturation des espèces, ou à une perturbation naturelle ou anthropique (Middleton 2018). Deux théories coexistent pour expliquer ce phénomène. Selon la théorie Clementsienne (ou chronoséquence), la succession végétale devrait mener à un état de climax stable et pérenne (*i.e.*, forêt mature). Cette succession serait la résultante de processus autogéniques et secondairement allogéniques. La théorie de Gleason, qui tend à être de plus en plus acceptée (Young et al. 2001; Mitsch and Gosselink 2015; Middleton 2018; Johnson and Miyanishi 2021) insiste sur le fait que cette succession est principalement issue de l'interaction indépendante et abiotique des espèces végétales avec leur environnement (interactions allogéniques), autrement dit en réponse à des dérangements et perturbations (Middleton 2018). Dans le cas de milieux humides et de la structuration de leurs communautés végétales particulières, c'est la théorie Clementsienne qui a longtemps été utilisée pour les décrire. Considérés comme des états transitoires entre les milieux terrestres et aquatiques, les milieux humides ne devraient résulter que d'un comblement progressif d'une étendue d'eau, par l'apport de matière organique végétale, avant que suffisamment de sol ne soit accumulé pour permettre l'établissement d'arbres et atteindre un état stable et définitif qu'est la forêt mature terrestre (Mitsch and Gosselink 2015). De plus, puisqu'on les retrouve à la croisée des milieux terrestres et aquatiques ils ont longtemps été considérés comme des écotones de ces milieux. Ainsi, par leur nature « instable » dans les temps géologiques et leur positionnement géographique, les milieux humides sont considérés comme spatio-temporellement transitoires (Mitsch and Gosselink 2015).

Cette vision est aujourd'hui critiquée par de plus en plus de travaux (Niering 2005; Johnson and Miyanishi 2008). L'étude des pollens dans les sédiments de plusieurs milieux humides (palynologie) n'a pas montré de successions végétales correspondantes à la théorie de Clements. L'origine, l'évolution et le maintien des milieux humides sont principalement dus à des phénomènes géomorphologiques comme la variation des apports d'eau externes et la dynamique sédimentaire ou biologique comme la compétition inter-espèces et la prédation par herbivorie (Middleton 2018).

En résumé, la naissance et l'évolution d'une communauté végétale est caractérisée par les conditions physico-chimiques du site d'implantation, la présence ou l'arrivage de graines et propagules adaptées à ces conditions, le maintien de ces conditions avant le remplacement intra- ou interspécifiques des individus mourants suivant les variations biotiques et abiotiques du milieu (Mitsch and Gosselink 2015). On peut s'interroger alors sur la capacité des plantations de PEH à maintenir les caractéristiques des milieux humides. La succession provoquée par la pousse des peupliers et la fermeture de leur canopée pourrait fortement changer l'hydrologie et les communautés végétales que l'on y rencontre.

### 1.3 Les plantations sur monticules, un « piège écologique » ?

Au cours de leur vie, les signaux que les animaux perçoivent (*e.g.*, présence de prédateur, nourriture, ensoleillement) représentent des options qui les poussent à faire des choix d'habitat. Ces choix sont le résultat de la sélection naturelle des individus qui étaient les plus à même d'interpréter correctement les signaux émis par leur environnement. Cependant les organismes ne sont pas toujours en mesure de prédire les conséquences de leur choix. Cette incertitude du futur, couplée à une spécialisation des organismes, peut les rendre d'autant plus sensibles à des variations soudaines de leur milieu. C'est le cas notamment lorsque les aspects attrayants d'un milieu sont indépendants de ces qualités écologiques et que celles-ci sont bouleversées. L'organisme est toujours en capacité de faire les bons choix, de par son histoire évolutive et par les attraits qu'il perçoit, mais les effets bénéfiques associés ont diminué voire disparu (Robertson and Hutto 2006). L'organisme est attiré dans un milieu au détriment de ses besoins biologiques, on parle alors de **piège écologique (PÉ)**.

Un piège écologique est un concept utilisé pour décrire un écosystème dont la qualité en termes d'habitat est faible, mais est plus attrayant comparé à des écosystèmes de meilleure qualité disponible (Battin 2004). Il existe ainsi trois types de PE, le premier type est un écosystème dont les attraits sont renforcés sans que ces qualités soient altérées. Le deuxième est un maintien de l'attrait avec une perte de qualité écologique. Le troisième est un renforcement de l'attrait couplé à une diminution des qualités nécessaires à la survie des organismes concernés. Il existe plusieurs proxys pour déterminer si un écosystème perturbé est un piège écologique comme la vitesse d'installation d'animaux migrateurs, la colonisation par des individus dominants ou non dans une population, la fidélité au site de certains individus pour les sites concernés ou encore des variations démographiques significatives des populations installées. Les dépressions qui se remplissent d'eau dans les plantations pourraient représenter des pièges écologiques pour certaines populations d'amphibiens si l'hydropériode des dépressions est courte et que les espèces ne peuvent pas compléter leur cycle de vie.

#### 1.4 Objectif et hypothèses de travail

De part ces multiples impacts, les plantations forestières sont encore très mal perçues auprès du grand public (Paquette and Messier 2010). Une entreprise comme Domtar cherche à certifier sa gestion de ses forêts et ses exploitations comme durable et respectueuse de l'environnement pour réduire son empreinte écologique. L'étude de l'hydrologie et des communautés végétales dans ces plantations sur monticules pourrait permettre de déterminer leur potentiel de création d'habitats pour les espèces de milieux humides. Ainsi nous espérons pouvoir poser les bases de futures réflexions quant à l'effet de la PMS sur la création de milieux humides et déterminer si ce type de pratique peut présenter des avantages de compensation pour la biodiversité tout en alliant une production de matière première pour nos sociétés.

Ce projet de maîtrise a pour but de déterminer s'il existe un potentiel de création de milieux humides dans les plantations de PEH sur monticule, et d'examiner si les milieux humides créés sont un phénomène transitoire ou non. Nous avons voulu atteindre cet objectif en i) évaluant l'impact de la PMS sur la prévalence de milieux humides définis comme étant des dépressions remplies d'eau au sein des plantations de PEH, et en ii) comparant le nombre de dépressions entre ces plantations et des peuplements ayant subi des coupes de jardinage (érablières adjacentes aux

plantations). Ensuite nous avons suivis l'hydropériode de plusieurs de ces dépressions au cours du printemps et de l'été 2022 selon l'âge des plantations ou de la dernière coupe de jardinage dans les peuplements pour caractériser leur dynamique le long d'une chronoséquence.

## CHAPITRE 2 : OCCURRENCE AND HYDROPERIOD OF WETLANDS IN HYBRID POPLAR PLANTATIONS: ARE THEY ECOLOGICAL TRAPS?

**Dans ce chapitre** nous quantifions le nombre et l'hydropériode dans les dépressions créées par le travail mécanique des sols dans les plantations de peupliers hybrides (**PEH**). Domtar, une compagnie de pâte et papier utilise la méthode de plantation sur monticules pour augmenter la croissance des plants de PEH. En hiver, ces dépressions se remplissent de neige et restent inondées au printemps. Nous avons comparé le nombre et l'hydropériode des dépressions dans les plantations de PEH au nombre et hydropériode des étangs vernaux dans des érablières (peuplements avec coupe de jardinage). Nous avons estimé le nombre et la pérennité de l'eau dans ces dépressions durant le printemps-été dans des plantations jeunes (1 à 5 ans) d'âge intermédiaire (5 à 10 ans) et des plantations presque matures (10 à 15 ans). Le nombre de dépressions remplies d'eau était plus important dans les plantations que dans les peuplements d'érablières. Les dépressions qui restent remplies durant une partie de l'été sont plus nombreuses dans les jeunes plantations que celles plus âgées.

**In this chapter**, we quantify the hydroperiod in depressions created by the mechanical tillage in hybrid poplar plantations (**HPP**). Domtar, a pulp and paper company, employs the mound planting method to enhance shrub growth. In winter, these depressions fill with snow and remain flooded in the spring. In this study, we compared the number and hydroperiod of the depressions in plantations with that of vernal ponds in maple stands (stands with selection cuts). We also estimated the permanence of water in these depressions over time by comparing young plantations (1 to 5 years) with intermediate plantations (5 to 10 years) and almost mature plantations (10 to 15 years and more). We found that the number of water-filled depressions was greater in plantations than in maple stands, and that depressions in plantations remained flooded for longer periods of the season. These two trends are particularly important in young plantations.



**Figure 2.1.** Photo of a tree frog (*Dryophytes versicolor*) in a Domtar plantation (Watopeka) during the summer of 2022. *Photo crédit : Théo Gicquel de Menou*

## 2.1 Introduction

Of the five major causes of global biodiversity loss worldwide, four are directly linked to forestry. Although we observed a slowdown in global deforestation and a stabilization of forest cover in North America, the world's forest cover lost nearly 178 million hectares between 1990 and 2020 (FAO 2020). Wood is being increasingly reintegrated into building materials for its ecological, thermal, and accessibility benefits. Countries with substantial wood resources, such as Canada, which accounts for 2% of the world's forests (Thiffault et al. 2020), have strongly encouraged their use in construction. Despite accumulating scientific evidence that some improved forestry practices can be sustainable (McEwan et al. 2020), forestry continues to have major impacts, notably on biodiversity (Paquette and Messier 2010). To avoid the cutting of natural stands and meet the demand for six billion m<sup>3</sup> of roundwood predicted for 2050, intensive forestry and the use of plantations are suggested as options to fulfill the wood demands of our societies.

Planted forests (or plantations) now account for approximately 7% of the world's forest area (FAO 2020) and are used for wood and food supply, pulp and paper, windbreaks, soil erosion control,

water storage and ecological restoration (Carnus et al. 2006; FAO, 2020). Plantations are ecosystems that humans cultivate, generally on former agricultural lands or cut forests, and start from seeds or tree seedlings. Plantations used for wood supply are often monospecific, even-aged, and planted in a regular pattern, accounting for 45% of the world's planted forests. Plantations are intended to provide standardized, lower-cost wood for these industries (McEwan et al. 2020).

Before planting trees, many forestry operators carry out mechanical soil preparation (**MSP**). This operation prepares the soil, temporarily removes plants that could compete with the trees, facilitates planting and reduces the risk of fire. Soil horizons are mixed, modifying granulometry and aeration. Compaction caused by repeated machine passages increases soil density, reducing its porosity, soil water penetration, nutrient availability, and root establishment (Demarais et al. 2017). These operations can cause the death of almost half of the small mammal populations present on site (Escobar et al. 2015) and beyond, causing a fierce disruption to the environment of other animals using the plantation as a habitat.

**Domtar** is a North American company specializing in the production of wood pulp-based products, including printing, packaging, hygiene papers, and pulp used by other industries. Domtar produce 1.5 million tonnes of pulp and 2.7 million tonnes of paper per year, making it the largest producer in North America. Domtar owns 160,000 hectares of forest and has the potential to harvest an additional 5 million hectares on Crown land in Quebec (Domtar 2024). To optimize its wood production, Domtar uses a MSP by mound scarification in hybrid Poplar plantations (*Populus x canadensis*; hereafter referred to as **HPP**). This MSP involves excavating the soil on the plot to create mounds 0.5 to 1 metre in height, on which young trees are planted. The technique reduces plant competition for light by giving the seedlings a height advantage (Thiffault et al. 2020).

Wetland restoration and creation are increasingly being implemented to compensate for past losses (restoration) and mitigate future losses (compensation) to habitats. Many attempts have been unsuccessful (Campbell et al. 2002). Interestingly, several features of the mound scarification technique are consistent with wetland restoration projects. The MSP that creates depressions and mounds resembles experimental wetland creation designs (Tweedy et al. 2001; Moser et al. 2007; Simmons et al. 2011; Kangas et al. 2016; Sleeper and Ficklin 2016). These studies demonstrated that the artificial "mound and depression" microtopography can modify hydrological gradients,

notably through the prolonged flooding of depressions during warmer months (Simmons et al. 2011). This design also makes the soil characteristics more heterogeneous, facilitating the establishment of more diverse plant communities than on flat land (Simmons et al. 2011). It has been demonstrated that the creation of wetlands in an agricultural landscape can benefit invertebrate populations on both local and regional scales (Thiere et al. 2009). However, it is not known whether Domtar' MSP allows the flooding of depressions in HPP plantations, leading to the formation of "wetlands", and whether this flooding is prolonged throughout the growing season or if the occurrence of those wetlands is transient and disappear when the plantation gets older with larger trees, a closing of the canopy and the organic matter filling of depressions. Hybrid poplars are fast-growing hybrid trees (Stanturf and Oosten 2014). Fast-growing trees tend to require more water than slower-growing species (Carnus et al. 2006). A sharp drop in water levels is observed in vernal ponds where tree density is very high (Mitsch and Gosselink 2015). Knowing this, the growth of the tree could be considered as the main factor of the transient dynamics we attribute to these wetlands.

We can therefore question the transient nature of wetlands in plantations and the possibility that their dynamic, by changing the hydroperiod, may turn good breeding sites into ecological traps for amphibians (Figure 2.1). The signals that animals perceive (e.g., the presence of predators, food, sunlight) represent options that lead them to select a specific habitat over another. This selection is the result of natural selection of individuals best able to interpret the signals. However, organisms are not always able to predict the consequences of their choices. This uncertainty about the future, coupled with the specialization of organisms, can make them more sensitive to variations in their environment. This is particularly true when the attractive aspects of an environment are independent of its ecological qualities. The organism is still able to make the right choices because of its evolutionary history and the attractions it perceives, but the associated beneficial effects have diminished or even disappeared (Robertson and Hutto 2006). The organism is attracted to an environment that is detrimental to its biological needs, and this is referred to as an ecological trap. An ecological trap is a concept used to describe an ecosystem whose quality in terms of habitat is low but is more attractive compared to ecosystems of better quality (Battin 2004). In the HPP plantations, some amphibians are attracted to young ponds to lay their eggs. Their descendants may be kin to reproduce in the same pond where they were born (philopatry). As the years passed and

the plantation aged, ponds in which descendants were born can lose habitat suitability to host amphibian eggs and tadpoles.

In this study, our objective was to determine whether there is a potential for wetland creation in HPP plantations due to the MSP (depressions and mounds), and to examine whether the wetlands created are a transient phenomenon or not over time. To do so, we 1) assessed and measured the prevalence and occurrence of water-filled depressions in HPP plantations and compared it to the number of vernal pools in maple stands that had undergone selection cutting (stands adjacent to plantations). We then, 2) monitored the hydroperiod of several of these depressions during the spring and summer of 2022 according to the age of the plantations or the last cut in the maple stands, to characterize their dynamics over time. In this study, we choose to exclude ruts in depressions created by forestry machines as they had a different hydrological dynamic than the depressions created through MSP.

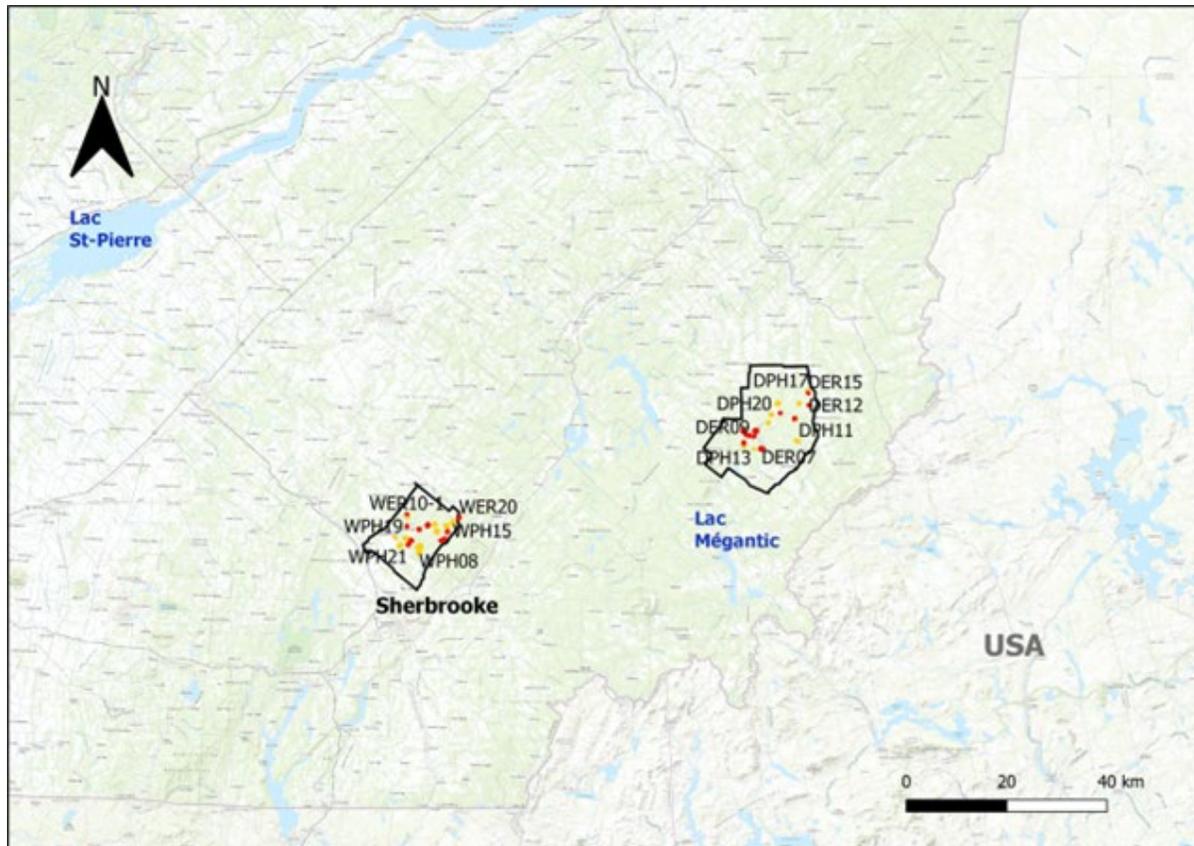
## 2.2 Methodology

### 2.2.1 *Study sites*

The study was conducted in two managed forest properties belonging to Domtar company (private tenure). The two properties (hereafter called REGION) were in two administrative areas of Québec (Figure 2.2, Annexe A); one in Estrie named Watopeka and one in Chaudière-Appalaches named Dorset. Watopeka (150 km<sup>2</sup>) is in the Maple - linden ecological region, while Dorset (250 km<sup>2</sup>) is in the Maple - yellow birch ecological region. Both regions are located on the geological formation of the Appalachian Mountains. Watopeka lays on a mudslate base with centimetric sandstone interbeds, grey siltstone, mudslate, siltstone and sandstone rhythmites dated from Middle Ordovician (Tremblay et al. 2013), while Dorset lays on solid blackish arkosic wacke with black mudslate interlayers, black mudslate from Silurian to Devonian (Tremblay and De Souza 2012). In all sites selected surface deposits are similar, those are glacial deposits with no particular morphology (MRNF 2022). These regions are characterized by a cold continental climate with no distinct dry season and a temperate summer, according to the Köppen-Geiger classification.

In each region, we selected 40 SITES (Figure 2.2, Annexe A); 20 hybrid Poplar plantations (*Populus x canadensis*; **HPP**) and 20 deciduous forested stands dominated by maple trees in which foresters did selective harvesting as controls (~25% of mature trees; harvested maple stands; **HMS**) as these kind of forest is the most common in the ecoregion we worked. We also chose these stands because they have undergone human intervention with heavy machinery, such as HPP. Plantations are dominated by hybrid Poplar (*Populus x canadensis*), whose productivity is greatly increased by this type of mechanical soil preparation (McCarthy et al. 2017; Thiffault et al. 2020). HPP are obtained by crossing four poplar species: *P. deltoides*, *P. trichocarpa*, *P. nigra* and *P. maximovici*. These species are fast-growing, with high yields per hectare, and are highly prized in intensive forest plantations (Thiffault et al. 2020). They are appreciated because their rapid growth helps compensate for the shorter growing season in sub-boreal regions such as southern Quebec (Grenke et al. 2016). Domtar, which has been working on optimizing its cultivation since the late 1990s, has successfully grown 15-meter trees with a diameter at breast height of 45 cm in just 15 years. Most of these trees are clones derived from cuttings taken from mother trees, which standardizes the cultivated stems, allowing them to obtain an equivalent amount of biomass seven times faster than in a natural stand (Roy 2018). SITES were selected to be in a gradient of the age of the plantation or time since the last treatment in managed deciduous forest. The oldest plantations were 15 years old (planted in 2008) and youngest were 1 year old (planted in 2021). Similarly, selective

cutting occurred between 2006 and 2020. Selected sites had a gentle slope (slope of category B or less).



**Figure 2.2.** Map of the location of the 40 sites in the two regions (Watopeka, close to the city of Sherbrooke and Dorset, close to the city of Thetford Mines in Québec). The red dots represent HMS and the yellow dots represent HPP (Zoomed map in ANNEXE A).

### 2.2.2 Occurrence of depression and their hydroperiod

To verify if the MSP (*i.e.*, holes and mounts formation) in HPP plantations is linked to the formation temporal wetlands, we started by comparing the occurrence of depression in HPP and HMS. To do so, we deployed two transects of 100 m long by 4 m wide in each site, and we counted the total number of depressions with a minimum of 10 cm of water in depth. Transects were distant of 100 meter minimum to avoid edge effects (Murcia 1995). We counted the number of depressions with water during six visits from April (after the snow melt in most of our sites) to August 2022.

To evaluate the hydroperiod of the depressions, we half-hazardously selected ten depressions in each transect and we measured their length (cm), their width (cm) and depth (cm) to calculate an average volume. These measurements were taking during our six visits from April to August 2022. Water levels were measured in every depression found in both HMS and HPP. We followed a total of 400 depressions in HPP, while in HMS, all depressions had dried out on the second visit (in May) and were too few to pursue analysis on them. We then focused our work on plantation depressions. To facilitate interpretation, we also installed 20 camera traps (Bushnell camera traps, model 119774) at 10 HPPsites and 10 HMS sites, each facing a ruler positioned in the deepest spot of one of the deepest depressions along the transect. Cameras have been oriented North and/or East and programmed to take a picture every day at 15:00 to avoid sun reflection on water in the spring. We used cameras to know if the measures we were going to do each visit were in the same direction or biased by weather events.

### 2.2.3 *Statistical analysis*

#### 2.2.3.1 Occurrence of depressions over time

To determine the variables influencing the occurrence of depression in HPP and HMS, we used generalized linear mixed models (**GLMM**), and the best model was selected based on the Akaike information criterion (**AIC**). We use age of the plantation or of the least cut in HMS as a predictive variable to test an age effect on the occurrence. Instead of using the age of the site as a numerical variable, we created three categories of AGE of the HPP or HMS: 1 to 5 years (6 HPP & 6 HMS), 6 to 10 years (8 HPP & 6 HMS) and 11 to 15 years (6 HPP & 6 HMS) to give the model greater stability. We also added the sampling date as a predictive variable to the model to test the effect of seasonal evolution. We added the random effects of site nested in region in the model (1 | region/site), as our sites were selected randomly and grouped in two different regions in Quebec. We used a negative binomial distribution of the number of depressions, which is the most appropriate for our data, and we used the *glmmTMB* package (v. 1.1.8; Brooks et al. 2017) to build our models. The occurrence predictions were illustrated using the *ggeffects* package in R (v. 1.4.0).

#### 2.2.3.2 Hydroperiod in the depressions

As wetlands must be flooded for a sufficient period to support life, we assessed the hydroperiod in the depressions and identified the variables that influence it using a survival

analysis. The survival analysis complements the analysis of the number of depressions and highlights the effect of the plantation age on the “survival” of water in the depression (i.e., length of the hydroperiod). Depressions were grouped by age categories, and each event corresponds to a visit on-site. A survival analysis is a comparison of the probability of an event occurring at a given point in time. We decided to take the date at which the depression dried up as the survival failure event. This analysis was performed using the *coxme* package (v. 2.2-18; Therneau 2024). All statistical analyses were performed in R 4.2.2.

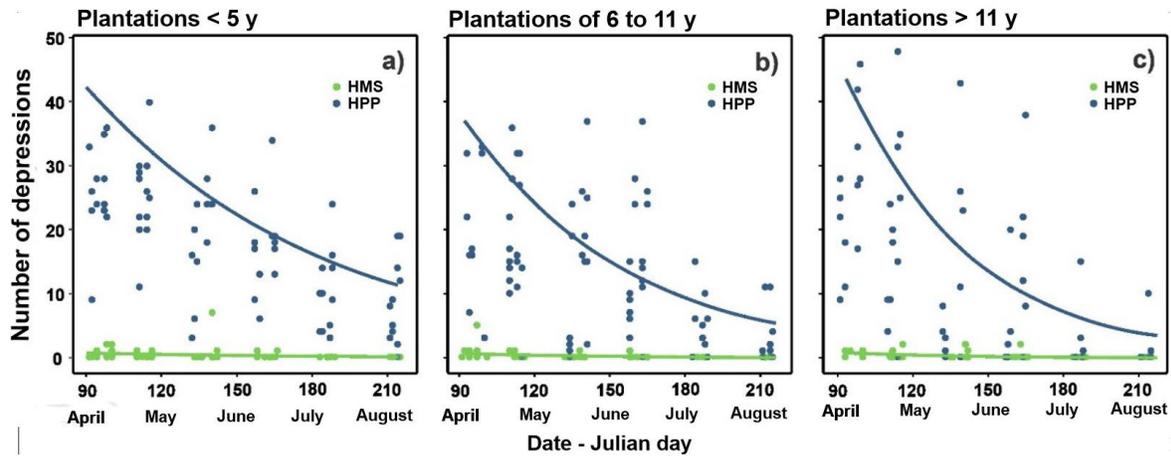
## 2.3 RESULTS

### 2.3.1 Change in the number of depressions flooded over time

Overall, we sampled a total of 931 depressions at Domtar sites in both regions, and we observed 33 times more depressions in HPP than in HMS (904 in HPP and only 27 in HMS; Figure 2.3). As expected, the number of depressions with water in HPP gradually decreased over time during the summer, and they dried up more rapidly in older plantations than in younger ones (Figure 2.3). In young plantations, we still had approximately 10-12 depressions with water at the end of the summer (Figure 2.3a) compared to only 3-4 in older plantations (Figure 2.3c). The best glmm model to predict the number of depressions over time included the age categories (age of the HPP or last intervention in the HMS), the type of site (HPP or HMS) and the interaction between age categories and date of sampling with the site nested in the region as random effects (Site/region intercept: variance = 0.2309, SD = 0.4805, region: variance = 0.1265, SD = 0.3557; Table 2.1). All model variables were significant (Table 2.1).

**Table 2.1.** Best model to predict the number of depressions in HPP and HMS over time

Variables	Estimate	SE	Z value	p value
Intercept	0.221	0.428	0.517	0.605
Age categories 6 to 10	0.520	0.484	1.073	0.283
Age categories 11 to 15	1.487	0.566	2.674	<b>0.007</b>
Sampling date	-0.011	0.001	-6.482	<b>&lt;0.001</b>
Site type (HPP or HMS)	4.214	0.237	17.761	<b>&lt;0.001</b>
Age categories 6 to 10 x Date	-0.006	<0.003	-2.134	<b>&lt;0.033</b>
Age categories 11 to 15 x Date	-0.014	0.004	-3.779	<b>&lt;0.001</b>



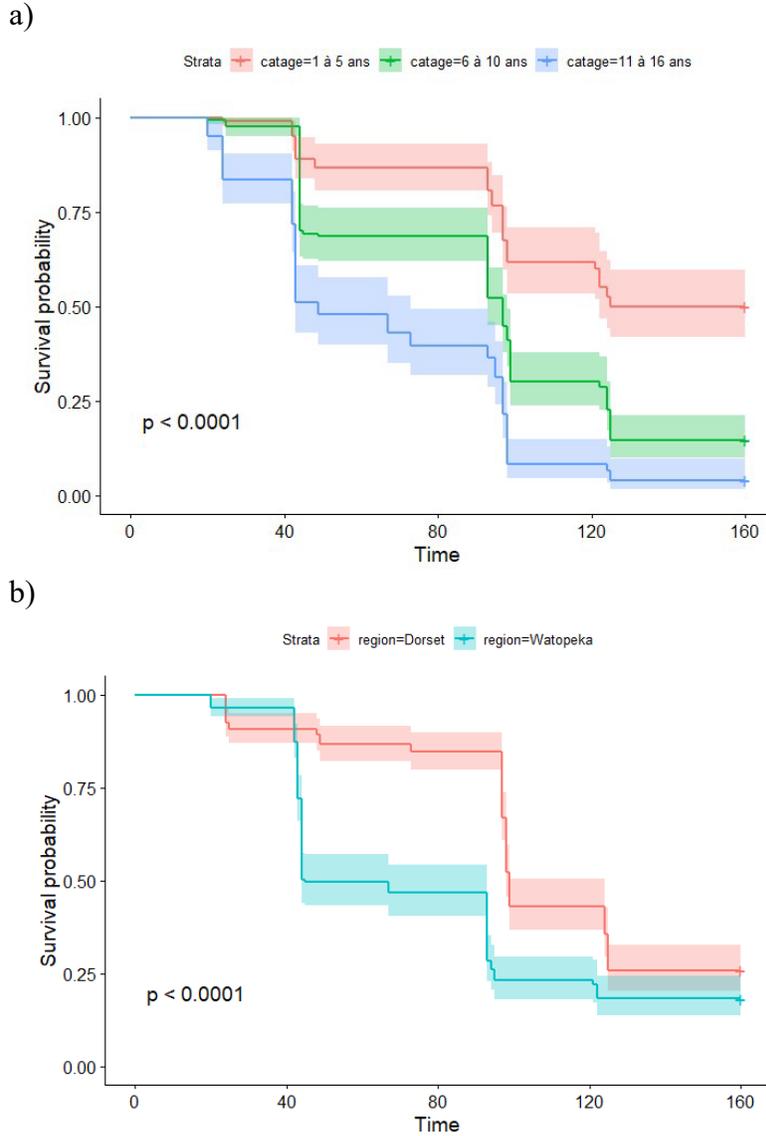
**Figure 2.3.** Change in the number of depressions with water in Hybrid poplar plantation (HPP) and harvested maple stand (HMS) over time in a) young HPP and HMS (1 to 5 years old), in 6 to 11 years HPP and HMS and older HPP and HMS (older than 11 years).

### 2.3.2 Hydroperiod in the depressions (survival analysis)

The duration of the hydroperiod in HPP depressions was predicted by the date and the HPP age category and was also influenced by the region. The hydroperiod is much longer in young plantations compared to older ones (Table 2.2 and Figure 2.4a). In other words, the hazard ratios from the survival analysis (Exp. coef. in Table 2.2) indicate that depressions dry out more quickly in older plantations (Figure 2.4a). The survival analysis also showed that the likelihood of depressions drying out is 2.9 times more likely in plantations in the Watopeka region than in the Dorset region (Table 2.2 and Figure 2.4b).

**Table 2.2.** Survival analysis model output to predict the hydroperiod in Hybrid poplar plantation (HPP) depressions over time in relation to the age of the plantation and site (Concordance = 0.738, Wald test = 165, n= 404, number of events 315).

Variables	Coef	Exp (coef)	Se (coef)	P value
6 to 10 years	1.09	2.97	0.16	<0.001
11 to 16 years	1.99	7.38	0.17	<0.001
Region - Watopeka	1.07	2.93	0.12	<0.001



**Figure 2.4.** a) Probability of the survival of water in the depressions over time (proxy of the hydroperiod) by age category of plantations (1 to 5 years, 6 to 10 years, and older than 11 years), b) Probability of the survival of water in the depressions over time by region (Dorset or Watopeka) the time is the number of days, each drop corresponds to a visit.

## 2.4 DISCUSSION

### 2.4.1 Occurrence of depressions with water in the spring and summer

In this study, we found a very different number of flooded depressions in HPP compared to HMS. On average, there were 33 times more water-filled depressions in the spring in plantations than in maple stands (Figure 2.3). Such a difference is not surprising, given the mechanical soil

preparation that occurs before planting hybrid poplar. Even though the number of flooded depressions was very low in the HMS, we noticed that the ruts left by the passage of machinery during cuts were flooded for longer periods than the vernal pools observed in HMS. Although this anecdotal observation of water in ruts provides food for thought, it was not part of our initial hypotheses, and we have not collected data to test such an effect. However, it is recognized that ruts deeper than 10 cm can accentuate water runoff from a forest site (Zemke 2016; Kastridis 2020).

#### *2.4.2 Hydroperiod in the plantations' depressions: Age matters*

We observed similar trends across regions: the older the plantation, the shorter the hydroperiod (Figure 2.4). Several mechanisms could explain the plantation age effect on the hydroperiod. Firstly, evapotranspiration increases with increasing leaf area (Hoff and Rambal 2003). The older the trees, the more leaves they have, and the more water is drawn from their environment. Another hypothesis is that the soil around depressions is less compacted following freezing and thawing cycles (Unger and Kaspar 1994), thus increasing its porosity. The rapid root growth of nearby poplars (Stanturf and Oosten 2014) could also facilitate water infiltration. Early-season depression volumes in plantations aged 11 to 16 years also appear to be lower than in other age categories. This could be explained by the natural levelling of the mound/depression landscape through erosion and the gradual filling in of the depressions due to the input of leaves from the HPs that fill them as they fall each year.

These photo traps were intended to allow us to monitor water levels in 10 depressions within 10 sites of different ages (see Annexe B). Unfortunately, we were unable to obtain sufficient information and data to integrate them into our models. Nonetheless, our design has enabled us to confirm that the depressions do not dry out permanently in the summer but are sometimes re-flooded after they have dried out, depending on rainfall. These new flood events can persist for several days, suggesting a water retention role for the depressions within HPP.

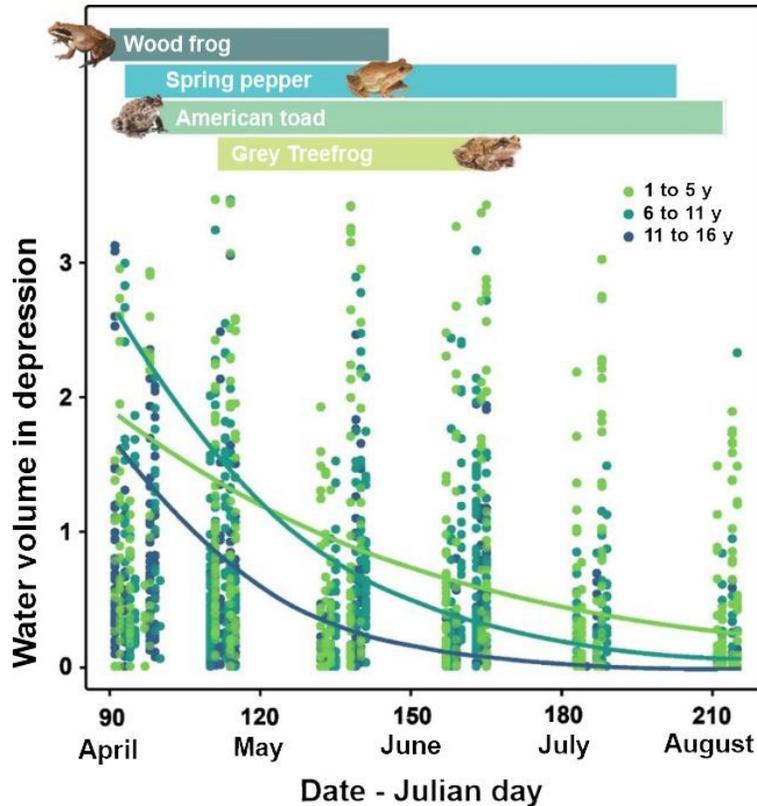
#### *2.4.3 Hydroperiod in the plantations' depressions: Region matters*

Survival analysis also revealed distinct hydroperiods between plantations in the two monitored regions. On the one hand, the hydroperiod appears to be longer in the Dorset region than in the Watopeka region (Figure 2.4b). The curves for each region also show a drastic drop in the

probability of having water in the depression within a month of each other. This drop occurs in May for the Watopeka region, and in June for the Dorset region. This variation could be due to climatic and geographical differences between the two regions. Dorset is located further north and at higher altitudes than Watopeka, and in a different bioclimatic region.

#### *2.4.4 Are depressions ecological traps for amphibians?*

In modified landscapes, traditional cues for habitat quality may become decoupled from true habitat quality, leading animals to make errors in habitat selection — a phenomenon known as an Ecological Trap (**ET**; Gates and Gysel 1978; Schlaepfer et al. 2002; Kristan 2003). There are three types of ET: the first type is an ecosystem whose attractiveness is enhanced without its qualities being impaired, the second is an ecosystem that maintains its attractiveness but loses ecological quality and the third type is an increase in attractiveness coupled with a decrease in the qualities necessary for the survival of the organisms concerned (Robertson and Hutto 2006). Several proxies exist for determining whether a disturbed ecosystem constitutes an ecological trap, including the rate of settlement of migratory animals, colonization by dominant or non-dominant individuals within a population, site fidelity of certain individuals to the affected sites, or significant demographic variations in settled populations.



**Figure 2.5.** Variation in the volume ( $m^3$ ) of water in depressions within hybrid poplar plantations from April to August 2022 according to the year of planting. The egg-laying periods of 4 species of anurans are shown at the top of the figure.

In natural wetlands, external conditions like light rain can make them less suitable for amphibians (Nagel et al. 2021) and invertebrates larval development (Brooks 2000).

The specific hydrological dynamics of these depressions can impact numerous organisms that rely on an aquatic environment for their life cycle (Figures 2.1 and 2.5). In particular, several amphibian species in Quebec live in aquatic environments from egg to adulthood, and some of these, such as the American Toad, *Anaxyrus americanus* (Waldman et al. 1992), the Wood Frog, *Lithobates sylvaticus* (Waldman et al. 1992) and the Spotted Salamander, *Ambystoma macculatum* (Patrick et al. 2008), are all philopatric to their breeding site. On the one hand, the early draining of depressions in old plantations could turn them into ecological traps if they are chosen to host the egg-laying of adult individuals, and on the other hand, recent depressions that are suitable for amphibian development may no longer be so after a few years.

#### 2.4.5 *Limit of the study*

While exploring the data, we noticed that the depressions occurrence may vary with the transect orientation in the HPP sites. When the transect was parallel to the ruts, we counted more depressions than when the transect was perpendicular or diagonal. Nevertheless, as the transect orientations were almost random, we don't think to have over- or underestimate the depression occurrence in HPP sites. We didn't notice any effect of transect orientations in HMS sites because machinery doesn't work as regularly as in HPP.

### CHAPITRE 3 CONCLUSION

Ce projet de recherche a permis d'explorer une partie du fonctionnement des dépressions au sein des plantations de peuplier hybride (PEH), en les comparant aux peuplements forestiers naturels qui ont subi des coupes de jardinage (érablières, ER).

Dans cette étude, nous avons observé en moyenne 33 fois plus de dépressions inondées au printemps dans les plantations que dans les érablières ayant été soumises à une coupe de jardinage.

Nos analyses de survie des dépressions révèlent une forte variabilité, influencée par l'âge des plantations et la région. Nous avons constaté que les dépressions des plantations plus anciennes présentent une hydropériode réduite, potentiellement en raison d'une combinaison de l'évapotranspiration plus importante des arbres matures, de la porosité accrue des sols par l'enracinement et du comblement progressif des dépressions. La dynamique transitoire de l'hydrologie dans ces dépressions, à travers leur âge, soulève des questions sur leur rôle écologique. Les données sur la végétation, que nous avons collectées et seulement explorées dans le cadre de ce mémoire, suggèrent la présence de communautés végétales hydrophytes dominantes autour de certaines dépressions. Cette dominance est un critère clé pour la classification des milieux humides (Bazoge et al. 2014), ainsi nous pensons que certaines dépressions au sein des plantations pourraient partiellement remplir les fonctions écologiques de milieux humides, notamment via la rétention d'eau. Il reste néanmoins à comparer les communautés végétales avant et après la PMS sur les parcelles. En effet, déterminer si les espèces observées lors de cette étude étaient présentes ou non avant la plantation, pourraient indiquer que les conditions préalables à la formation de milieu humide existaient avant les perturbations des forestiers.

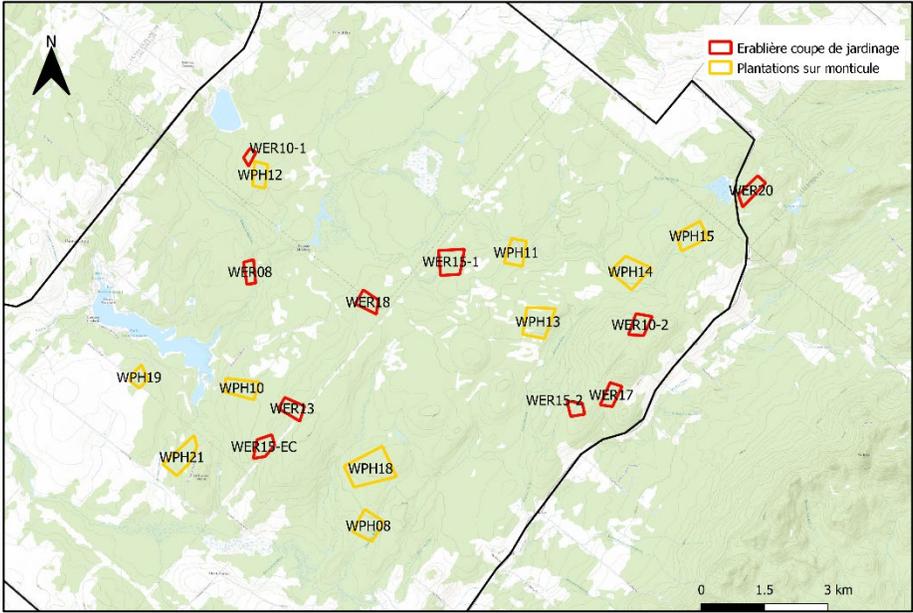
Bien que ces dépressions présentent une hydrologie, et des communauté végétales de milieux humides nous nous interrogeons encore sur les enjeux écologiques qu'elles présentent. D'une part, les dépressions récemment formées peuvent constituer des habitats potentiels pour des espèces dépendant des milieux aquatiques, comme les amphibiens. En effet, nous avons pu constater la présence d'amphibiens et de leurs pontes à plusieurs reprises dans de nombreuses dépressions. D'autre part, leur assèchement précoce au cours de la saison ou leur évolution rapide pourraient en

faire des pièges écologiques. D'abord pour la survie directe des œufs et têtards avec un assèchement trop rapide, ensuite via une modification trop rapide de leur hydrologie au fil des années qui pourrait transformer des sites initialement favorables en piège pour les espèces présentant une philopatrie envers leurs sites de reproduction.

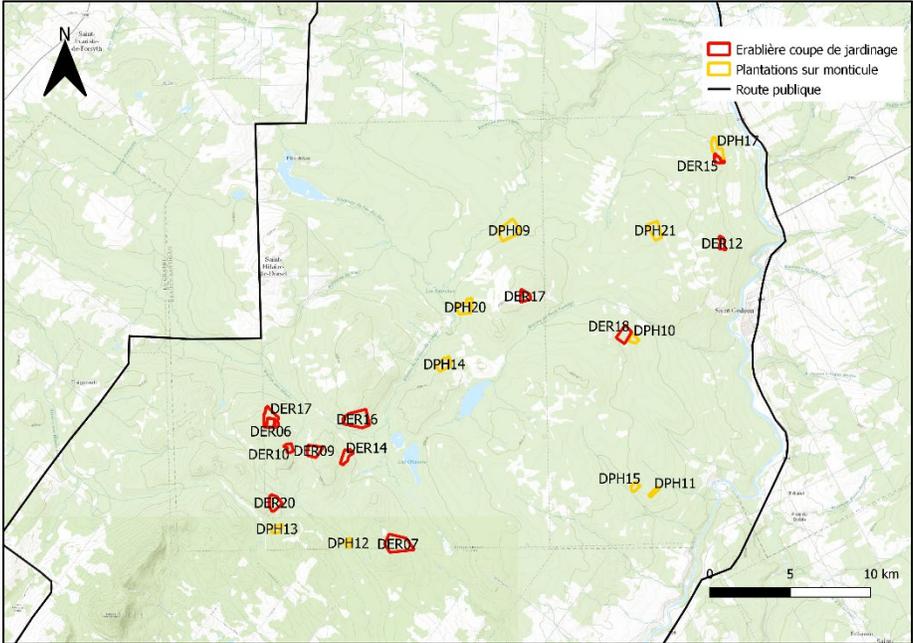
Pour mieux comprendre l'impact et le rôle écologique de ces dépressions il reste plusieurs aspects à approfondir. Premièrement, il serait pertinent de tester plus systématiquement l'effet des ornières sur le nombre et l'évolution des dépressions. En effet, nous avons constaté que les ornières étaient régulièrement inondées et plus longtemps dans les érablières contrairement aux dépressions. Elles pourraient y jouer un rôle hydrologique qu'il faudra approfondir dans une étude ultérieure. Deuxièmement, nous pourrions réaliser une analyse approfondie des sols à proximité et dans les dépressions puisque l'infiltration de l'eau peut dépendre du type de sol. Troisièmement nous devrions approfondir l'étude hydrologique des parcelles, par exemple en cherchant si elles sont connectées au réseau hydrographique local. Quatrièmement, une analyse détaillée des communautés végétales et fauniques associées aux dépressions fournirait des données pour déterminer leur rôle écologique exact et leur statut en tant que milieux humides ou non. Pour finir il faudrait chercher à comprendre comment ces plantations s'intègrent dans le paysage, s'agit-il de « **barrières** » ou de « **ponts** » **écologiques permettant la connexion entre différents milieux écologiques** ? La présence de nombreux points d'eau pourrait faciliter le déplacement et la dispersion des amphibiens qui ont besoin de maintenir une humidité constante (Mazerolle and Desrochers 2005; Mazerolle 2005).

Ainsi cette étude consiste en un premier débroussaillage de la compréhension du rôle écologique, et de l'impact des plantations de PEH sur monticules, et appuie l'intérêt de poursuivre des études le rôle écologique des dépressions dans ces plantations au Québec.

**ANNEXE A : Cartes détaillées des sites inventoriés dans les deux régions. Les polygones en rouge représentent les érablières (ER) et les polygones en jaune représente les plantations de peupliers hybrides (PEH)**



**a) WATOPEKA**



**b) DORSET**

**ANNEXE B :** Comparaison de la quantité d'eau dans une dépression d'une plantation de Watopeka (site WATOPH15) âgée de 7 ans en a) avril et b) en mai. Photos prises par les pièges photographiques. Les encoches sur la barre blanche sont espacées de 20 cm.

a)



b)



ANNEXE C : Photo prise par une caméra - piège photographique pour démontrer la présence d'espèces végétales OBL et FACH autour et dans la dépression qui est remplie d'eau à la mi-juin (plantation de PEH à Watopeka, âgée de 12 ans)



**ANNEXE D :** Photo d'une plantation de peupliers hybrides âgée d'un an dans la région de Dorset (Chaudière-Appalaches). Noter les monticules apparents avec les plants et les dépressions remplies d'eau. *Crédit photo : Théo Gicquel de Menou.*



## RÉFÉRENCES

- Battin J (2004) When Good Animals Love Bad Habitats: Ecological Traps and the Conservation of Animal Populations. *Conservation Biology* 18:1482–1491. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2004.00417.x>
- Bazoge A, Lachance D, Villeneuve C (2014) Identification et délimitation des milieux humides du Québec méridional. Bibliothèque et Archives nationales du Québec
- Bremer LL, Farley KA (2010) Does plantation forestry restore biodiversity or create green deserts? A synthesis of the effects of land-use transitions on plant species richness. *Biodivers Conserv* 19:3893–3915. <https://doi.org/10.1007/s10531-010-9936-4>
- Brooks M E, Kristensen K, Benthem K J ,van, et al (2017) glmmTMB Balances Speed and Flexibility Among Packages for Zero-inflated Generalized Linear Mixed Modeling. *The R Journal* 9:378. <https://doi.org/10.32614/RJ-2017-066>
- Brooks RT (2000) Annual and seasonal variation and the effects of hydroperiod on benthic macroinvertebrates of seasonal forest (“vernal”) ponds in central Massachusetts, USA. *Wetlands* 20:707–715. [https://doi.org/10.1672/0277-5212\(2000\)020\[0707:AASVAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1672/0277-5212(2000)020[0707:AASVAT]2.0.CO;2)
- Campbell DA, Cole CA, Brooks RP (2002) A comparison of created and natural wetlands in Pennsylvania, USA. *Wetlands Ecology and Management* 10:41–49. <https://doi.org/10.1023/A:1014335618914>
- Carnus J-M, Parrotta J, Brockerhoff E, et al (2006) Planted forests and biodiversity. *Journal of forestry* 104:65–77. <https://doi.org/10.1093/jof/104.2.65>
- Côté-Bourgoin S (2019) La simplification structurelle de la végétation dans les plantations de peuplier hybride mène à des différences de communautés d’oiseaux avec les forêts naturelles. Mémoire accepté, Université du Québec à Montréal
- Courouble M, Davidson N, Dinesen L, et al (2021) Perspectives mondiales pour les zones humides | Convention on Wetlands. RAMSAR
- Demarais S, Verschuyt JP, Roloff GJ, et al (2017) Tamm review: Terrestrial vertebrate biodiversity and intensive forest management in the U.S. *Forest Ecology and Management* 385:308–330. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.006>
- DOMTAR Notre entreprise. In: Domtar. <https://www.domtar.com/fr/notre-entreprise/>. Accessed 9 Aug 2024
- Escobar MAH, Uribe SV, Chiappe R, Estades CF (2015) Effect of Clearcutting Operations on the Survival Rate of a Small Mammal | PLOS ONE. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118883>

- FAO (2020) Évaluation des ressources forestières mondiales 2020. In: [www.fao.org](http://www.fao.org).  
<http://www.fao.org/forest-resources-assessment/2020/fr>. Accessed 13 Dec 2022
- Finlayson MC, Cruz RD, Davidson N (2005) Ecosystem services and human well-being: water and wetlands synthesis. Millenium Ecosystem Assesment Board
- Galatowitsch SM, Anderson NO, Ascher PD (1999) Invasiveness in wetland plants in temperate North America. *Wetlands* 19:733–755. <https://doi.org/10.1007/BF03161781>
- Gates JE, Gysel LW (1978) Avian Nest Dispersion and Fledging Success in Field-Forest Ecotones. *Ecology* 59:871–883. <https://doi.org/10.2307/1938540>
- Grenke JSJ, Macdonald SE, Thomas BR, et al (2016) Relationships between understory vegetation and hybrid poplar growth and size in an operational plantation. *The Forestry Chronicle* 92:469–476. <https://doi.org/10.5558/tfc2016-083>
- Hoff C, Rambal S (2003) An examination of the interaction between climate, soil and leaf area index in a *Quercus ilex* ecosystem. *Ann For Sci* 60:153–161.  
<https://doi.org/10.1051/forest:2003008>
- Johnson EA, Miyanishi K (2021) Preface of the first edition. In: Johnson EA, Miyanishi K (eds) *Plant Disturbance Ecology (Second Edition)*. Academic Press, San Diego, pp xv–xvi
- Johnson EA, Miyanishi K (2008) Testing the assumptions of chronosequences in succession. *Ecology Letters* 11:419–431. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01173.x>
- Joosten H, Sirin A, Couwenberg J, et al (2016) The role of peatlands in climate regulation. In: Bonn A, Joosten H, Evans M, et al. (eds) *Peatland Restoration and Ecosystem Services: Science, Policy and Practice*. Cambridge University Press, Cambridge, pp 63–76
- Kangas LC, Schwartz R, Pennington MR, et al (2016) Artificial microtopography and herbivory protection facilitates wetland tree (*Thuja occidentalis* L.) survival and growth in created wetlands. *New Forests* 47:73–86. <https://doi.org/10.1007/s11056-015-9483-7>
- Kastridis A (2020) Impact of Forest Roads on Hydrological Processes. *Forests* 11:1201.  
<https://doi.org/10.3390/f11111201>
- Kristan WB III (2003) The role of habitat selection behavior in population dynamics: source–sink systems and ecological traps. *Oikos* 103:457–468. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2003.12192.x>
- Mazerolle MJ (2005) Drainage Ditches Facilitate Frog Movements in a Hostile Landscape. *Landscape Ecol* 20:579–590. <https://doi.org/10.1007/s10980-004-3977-6>
- Mazerolle MJ, Desrochers A (2005) Landscape resistance to frog movements. *Can J Zool* 83:455–464. <https://doi.org/10.1139/z05-032>

- McCarthy R, Rytter L, Hjelm K (2017) Effects of soil preparation methods and plant types on the establishment of poplars on forest land. *Annals of Forest Science* 74:1–12. <https://doi.org/10.1007/s13595-017-0647-9>
- McEwan A, Marchi E, Spinelli R, Brink M (2020) Past, present and future of industrial plantation forestry and implication on future timber harvesting technology. *J For Res* 31:339–351. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-01019-3>
- Middleton BA (2018) Succession in Wetlands. In: Finlayson CM, Everard M, Irvine K, et al. (eds) *The Wetland Book: I: Structure and Function, Management, and Methods*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp 17–34
- Mitsch WJ, Cronk JK, Zhang L (2014) Creating a living laboratory on a college campus for wetland research—The Olentangy River Wetland Research Park, 1991–2012. *Ecological Engineering* 72:1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.120>
- Mitsch WJ, Gosselink JG (2015) *Wetlands*, Fifth edition. John Wiley and Sons, Inc, Hoboken, NJ
- Moser K, Ahn C, Noe G (2007) Characterization of microtopography and its influence on vegetation patterns in created wetlands. *Wetlands* 27:1081–1097. [https://doi.org/10.1672/0277-5212\(2007\)27\[1081:COMAII\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1672/0277-5212(2007)27[1081:COMAII]2.0.CO;2)
- MRNF MDRNEDF (2022) Carte écoforestière originale et résultats d’inventaire -Cartographie du cinquième inventaire écoforestier du Québec méridional. <https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/dataset/resultats-d-inventaire-et-carte-ecoforestiere>. Accessed 12 Dec 2023
- Murcia C (1995) Edge effects in fragmented forests: implications for conservation. *Trends in Ecology & Evolution* 10:58–62. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(00\)88977-6](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(00)88977-6)
- Nagel LD, McNulty SA, Schlesinger MD, Gibbs JP (2021) Breeding Effort and Hydroperiod Indicate Habitat Quality of Small, Isolated Wetlands for Amphibians Under Climate Extremes. *Wetlands* 41:22. <https://doi.org/10.1007/s13157-021-01404-x>
- Neumann B, Vafeidis AT, Zimmermann J, Nicholls RJ (2015) Future Coastal Population Growth and Exposure to Sea-Level Rise and Coastal Flooding - A Global Assessment. *PLOS ONE* 10:e0118571. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118571>
- Niering W (2005) Vegetation Dynamics (Succession and Climax) in Relation to Plant Community Management. *Conservation Biology* 1:287–295. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.1987.tb00049.x>
- Paquette A, Messier C (2010) The role of plantations in managing the world’s forests in the Anthropocene. *Frontiers in Ecology and the Environment* 8:27–34. <https://doi.org/10.1890/080116>
- Patrick DA, Calhoun AJK, Hunter ML (2008) The importance of understanding spatial population structure when evaluating the effects of silviculture on spotted salamanders

- (*Ambystoma maculatum*). *Biological Conservation* 141:807–814.  
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2007.12.026>
- Robertson BA, Hutto RL (2006) A Framework for Understanding Ecological Traps and an Evaluation of Existing Evidence. *Ecology* 87:1075–1085. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2006\)87\[1075:AFFUET\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2006)87[1075:AFFUET]2.0.CO;2)
- Roy G (2018) Hybrid poplar: Domtar grows mature trees in just 15 years. *Wood Business*
- Russell AP, Bauer AM, Johnson MK (2005) Migration in amphibians and reptiles: An overview of patterns and orientation mechanisms in relation to life history strategies. In: Elewa AMT (ed) *Migration of Organisms: Climate Geography Ecology*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp 151–203
- Schlaepfer MA, Runge MC, Sherman PW (2002) Ecological and evolutionary traps. *Trends in Ecology & Evolution* 17:474–480. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(02\)02580-6](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(02)02580-6)
- Simmons ME, Ben Wu X, Whisenant SG (2011) Plant and Soil Responses to Created Microtopography and Soil Treatments in Bottomland Hardwood Forest Restoration. *Restoration Ecology* 19:136–146. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2009.00524.x>
- Sleeper BE, Ficklin RL (2016) Edaphic and Vegetative Responses to Forested Wetland Restoration with Created Microtopography in Arkansas. *Ecological Rest* 34:117–123. <https://doi.org/10.3368/er.34.2.117>
- Smith AM, Green D (2005) Dispersal and the metapopulation paradigm in amphibian ecology and conservation: are all amphibian populations metapopulations? *Ecography* 28:110–128. <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2005.04042.x>
- Stanturf JA, Oosten C van (2014) Operational poplar and willow culture. In: *Poplars and willows: trees for society and the environment*. pp 200–257
- Therneau TM (2024) *coxme: Mixed Effects Cox Models*
- Thiere G, Milenkovski S, Lindgren P-E, et al (2009) Wetland creation in agricultural landscapes: Biodiversity benefits on local and regional scales. *Biological Conservation* 142:964–973. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.01.006>
- Thiffault N, Elferjani R, Hébert F, et al (2020) Intensive Mechanical Site Preparation to Establish Short Rotation Hybrid Poplar Plantations—A Case-Study in Québec, Canada. *Forests* 11:785. <https://doi.org/10.3390/f11070785>
- Tremblay A, De Souza S (2012) *Compilation géologique - La Guadeloupe*. CG-21E15-2012-01
- Tremblay A, Perrot M, Mercier PE, Soucy-De-Jocas B (2013) *Compilation géologique - Wotton*. CG-21E12-2013-01

Tweedy, Engineer WR, Engineering B, Asae S (2001) Influence of Microtopography on Restored Hydrology and Other Wetland Functions

Unger PW, Kaspar TC (1994) Soil Compaction and Root Growth: A Review. *Agronomy Journal* 86:759–766. <https://doi.org/10.2134/agronj1994.00021962008600050004x>

Waldman B, Rice JE, HONEYCUTT RL (1992) Kin Recognition and Incest Avoidance in Toads1. *American Zoologist* 32:18–30. <https://doi.org/10.1093/icb/32.1.18>

Young TP, Chase JM, Huddleston RT (2001) Community Succession and Assembly Comparing, Contrasting and Combining Paradigms in the Context of Ecological Restoration. *Ecological Rest* 19:5–18. <https://doi.org/10.3368/er.19.1.5>

Zemke JJ (2016) Runoff and Soil Erosion Assessment on Forest Roads Using a Small Scale Rainfall Simulator. *Hydrology* 3:25. <https://doi.org/10.3390/hydrology3030025>