Université du Québec INRS-Eau Terre Environnement

Suivi de la nappe, de la recharge et de l'écoulement à l'aide de méthodes *in situ* afin de comprendre la dynamique de tourbières ombrotrophes de la région de la Baie de James.

par

Clément Clerc

Mémoire pour l'obtention du grade de Maître es sciences (M.Sc.) en Sciences de l'eau

Président du Jury Examinateur interne

Examinateur externe

Yves Michaud CGC-Québec

Jonathan S. Price Département de Géographie Université de Waterloo, ON

Directeur de recherche

Codirecteur de recherche

Alain N. Rousseau INRS-ETE

Sylvain Jutras INRS-ETE

© Clément Clerc, 2009

RÉSUMÉ

Afin d'améliorer le modèle hydrologique HYDROTEL à la problématique de l'abondance de milieux humides rencontrés dans la région de la Baie de James, nous avons cherché à améliorer la compréhension et la quantification de l'écoulement des tourbières à l'aide de méthodes *in situ*. Dans ce contexte, un protocole a été développé sur deux micro-bassins versants (97 ha et 160 ha) occupés par des tourbières majoritairement ombrotrophes et ne possédant qu'un seul exutoire : la tourbière de la Nécopastic et celle de l'Aéroport.

Afin de mesurer efficacement le débit à l'exutoire de chacun des sites sélectionnés, des canaux trapézoïdaux ont été utilisés. Le débit est ainsi estimé en fonction de la hauteur d'eau, mesurée à l'aide d'un capteur de pression submersible installé dans un puits de tranquillisation, en amont d'une constriction exercée par le canal. Ce type d'instrument est très conservateur car il ne modifie ni la forme, ni la dynamique d'écoulement du cours d'eau. En parallèle, des puits, équipés eux aussi avec des capteurs de pression submersibles, ont été disposés sur chacune des tourbières afin de suivre les fluctuations de la nappe phréatique. La tourbière de la Nécopastic a en outre été instrumentée plus intensivement, notamment avec le déploiement de nids de piézomètres, permettant d'estimer la recharge et de tester une méthode de mesure de conductivité hydraulique. Les mesures de niveaux d'eau dans les puits et dans le canal permettent alors d'estimer de façon précise la quantité d'eau qui s'écoule et qui est stockée en fonction des précipitations et selon les conditions initiales du système (sèches ou humides). D'autres méthodes alternatives de suivi de la nappe ont par ailleurs été explorées. Les données obtenues ont permis d'établir une relation fiable entre le niveau de la nappe phréatique et le débit à l'exutoire. Nous proposons de résumer cette relation selon deux équations logarithmiques, départagées par un point d'inflexion qui représente le niveau limite

iii

que la nappe doit atteindre pour qu'un écoulement significatif se produise. Ces équations ont été établies pour différents types de végétation et de profil de tourbe à l'intérieur d'une même tourbière, permettant ainsi de discuter de l'hétérogénéité des réponses selon le type de tourbe. Par la suite, l'intérêt d'intégration d'un modèle propre à l'écoulement dans les tourbières (PHIM) à HYDROTEL a été évalué.

Les données complémentaires récoltées sur la tourbière de la Nécopastic ont permis d'analyser plus en détails les phénomènes internes qui gouvernent la génération de l'écoulement et les interactions existant entre des zones aux propriétés structurales et écologiques différentes. Ces mesures ont également montré l'existence d'un phénomène d'hystérèse entre les fluctuations de la nappe et la génération du débit à l'échelle de la tourbière, de même que l'existence de fluctuations journalières de la nappe en été, directement liées à l'évapotranspiration. Enfin, une méthode alternative de suivi de nappe, la méthode de l'aimant a été testée sur ce site. Son potentiel d'utilisation a été démontré lorsqu'il s'agit de comparer les fluctuations de la nappe phréatique à l'occupation écologique d'une tourbière.

Ces travaux permettent d'établir un nouveau portrait, essentiellement hydrologique, de tourbières ombrotrophes du moyen nord Québécois. Outre la compréhension générale des paramètres gouvernant le bilan hydrologique d'une tourbière ombrotrophe, les mesures obtenues directement sur le terrain nous ont amenés à établir des équations pouvant expliquer efficacement la relation hauteur de nappe-débit.

iv

- D'abord et surtout, un merci spécial à Alain et Sylvain pour la confiance et pour tous les supports et les aides qu'implique une telle maitrise.

- Merci à Gregor, Marc-André, Gwenaël, Patrick et de nombreux autres pour les petits (et les grands) coups de main sur le terrain et ailleurs.

- Merci aussi aux étudiants et stagiaires de l'UQAR, l'INRS, l'UQAM et l'Université Laval, rencontrés ici et là à un carrefour nordique.

- Merci également à la communauté Cri de Chisasibi de nous avoir permis de réaliser ce projet sur leur territoire. En particulier à Matthew Chishkamish et la famille Sam

- Merci aussi à Hydro-Québec pour le support technique et logistique

- Merci encore à André St-Hilaire, Claude Fortin et Yves Gratton pour m'avoir fait confiance sur d'autres projets.

- Enfin un grand merci à tous les étudiants du centre ETE, à l'exécutif de l'AECETE et à tous les collègues de bureau pour les belles années.

v

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	Ili
Remerciements	v
Liste des Figures	xix
Liste des Tableaux	xix
Liste des annexes	xxi
1 Introduction	1
1.1 Contexte	1
1.2 Définitions	5
1.3 Problématique	7
1.4 But et Objectifs	8
1.5 Travaux antérieurs	9
1.5.1 Bilan hydrologique	10
1.5.2 Les Sphaignes et le concept d'acrotelme-catotelme	11
1.5.3 Les patrons de circulation d'eau à l'intérieur des tourbières	13
1.5.4 La génération de l'écoulement	15
1.5.5 Mesure du débit à l'exutoire	
1.5.6 Les tourbières en modélisation hydrologique	19
2 Matériel et Méthodes	23
2.1 Sites d'études	23
2.2 Caractérisation écologique et morphologique	28
2.3 Mesure du débit à l'exutoire	30
2.4 Mesure des fluctuations de la nappe phréatique	34

	2.4.1	Site de l'Aéroport
	2.4.2	Site de la Nécopastic
	2.4.2.1	Capteurs de pression submersibles
	2.4.2.2	2 Mesures manuelles et méthode de l'aimant
2	2.5 Dor	nnées climatiques41
	2.5.1	Compensation barométrique41
	2.5.2	Précipitations
2	2.6 Car	actérisation hydrologique complémentaire43
	2.6.1	Suivi piézométrique43
	2.6.2	Mesure de la conductivité hydraulique47
3	Résulta	ts51
2	3.1 Des	cription écologique et morphologique des sites d'études
	3.1.1	La tourbière de la Nécopastic51
	3.1.2	La tourbière de l'Aéroport62
3	3.2 Suiv	vi du niveau de la nappe phréatique et du débit65
	3.2.1	Suivi de l'année 2007
	3.2.2	Suivi de l'année 200871
	3.2.3	Examens d'évènements importants74
	3.2.3.2	1 Tourbière de la Nécopastic74
	3.2.3.2	2 Tourbière de l'Aéroport76
	3.2.4	Relation Hauteur de nappe-Débit77
	3.2.5	Comportement hivernal et débâcle printanière
3	3.3 Aut	res observations hydrologiques pour la tourbière de la Nécopastic

	3.3.1	Bilan hydrologique	
	3.3.2	Comparaisons des différents puits pour l'été 2008	86
	3.3.2.1	Variations du niveau de la nappe phréatique	86
	3.3.2.2	2 Description hydrologique de la tourbière	
	3.3.2.3	Relation Hauteur de nappe-Débit	91
	3.3.3	Hystérèse	93
	3.3.4	Données piézométriques	
	3.3.5	Fluctuations journalières de la nappe phréatique (Figure 3.33)	
	3.3.6	Mesure de la conductivité hydraulique	100
	3.3.7	Méthode d'enregistrement du niveau maximal de la nappe	102
4	Hydrolo	gie de tourbières ombrotrophes	
	4.1 Cla	ssification des sites d'études	109
	4.1.1	Tourbière de la Nécopastic	
	4.1.2	Tourbière de l'Aéroport	112
	4.2 Flue	ctuation de la nappe et génération du débit	114
	4.3 Acr	otelme-catotelme et couches hydrologiquement actives	117
	4.4 Infl	uence du couvert végétal et du profil de tourbe	119
	4.4.1	Tourbière de la Nécopastic	119
	4.4.2	Tourbière de l'Aéroport (cf. Figure 4.2)	124
	4.5 Cor	nportement hivernal et fonte printanière	
	4.5.1	Tourbière de la Nécopastic	
	4.5.2	Tourbière de l'Aéroport	
	4.6 Aut	res particularités hydrologiques	

	4.6.	i	Niveaux piézométriques	
	4.	6.1.1	Recharge et décharge	
	4.	6.1.2	Cas particuliers d'autres nids de piézomètres	130
	4.6.2	2	Hystérèse	
	4.6.3	3	Fluctuations journalières de la nappe.	138
5	Мос	délisa	tion de l'écoulement	141
5	.1	HYD	ROTEL	141
5	.2	PHIN	1	142
5	5.3	Simu	lation et applications avec PHIM (Jutras et al., in press)	144
5	5.4	Force	es et faiblesses des simulations	146
5	5.5	Influ	ence des paramètres des équations logarithmiques	147
6	Criti	ique c	les méthodes et du matériel utilisés	
6	5.1	Les c	apteurs de pression submersibles	151
6	5.2	Mesu	re du débit à l'exutoire	153
6	5.3	Suivi	de la nappe avec la méthode de l'aimant	155
6	5.4	Piézo	omètres et conductivité hydraulique	
	6.4.	1	Suivi piézométrique	157
	6.4.2	2	Mesure de la conductivité hydraulique	
7	Cor	nclusio	on et Perspectives	
Ré	féren	ces		
An	nexes	S		

X

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1:	Schéma simplifié de la structure d'une sphaigne
Figure 1.2 :	Croquis d'une tourbière ombrotrophe bombée avec un schéma simple
	d'écoulement de l'eau : horizontal vers les marges13
Figure 1.3 :	Processus d'écoulement d'eau dans une tourbière ombrotrophe. En bas, en
	conditions humides, écoulement horizontal et en haut : en conditions
	sèches, écoulement horizontal et vertical (traduit de Devito et al., 1997) 16
Figure 1.4 :	Relation entre la profondeur de la nappe en fonction du débit pour le
	bassin versant Trout Beck (Traduit d'Evans et al., 1999)
Figure 1.5 :	Comparaison d'une tourbière à un réservoir pour l'élaboration de PHIM 20
Figure 2.1 :	Localisation du bassin de la rivière Nécopastic et des deux sites d'étude 23
Figure 2.2 :	Occupation écologique grossière de la tourbière de la Nécopastic26
Figure 2.3 :	Occupation écologique de la tourbière de l'Aéroport27
Figure 2.4 :	Exemple de végétation dominant les sites Nécopastic (a) et Aéroport (b)
·	avant l'installation des canaux
Figure 2.5 :	Description des différentes composantes du canal trapézoïdal SRCRC 12"31
Figure 2.6 :	Schéma simplifié résumant le fonctionnement du canal trapézoïdal32
Figure 2.7 :	Installation du puits de tranquillisation et du capteur de pression
Figure 2.8 :	Canaux trapézoïdaux installés : Site de la Nécopastic (a) (53°40.553' N,
	78°11.031' O) et site de l'Aéroport (b) (53° 35.513' N, 78° 41.248' O)
Figure 2.9 :	Localisation des puits pour la tourbière de la Nécopastic
Figure 2.10 :	Utilisation d'un bulleur sur le site de la Nécopastic (Juillet 2007)

xi

Figure 2.11 :	Schéma simplifié et photo du dispositif d'enregistrement du niveau
	maximum de la nappe (a) et (c). Installation des puits d'observation (b) 38
Figure 2.12 :	Schéma illustrant la différence entre les puits et les piézomètres
Figure 2.13 :	(a) Fabrication des piézomètres et (b) Cônes pour insertion45
Figure 3.1 :	Délimitation du bassin versant de la tourbière de la Nécopastic. La ligne
	jaune représente le bassin-versant délimité par photo-interprétation et la
	ligne rouge, celui délimité après avoir mesurer la variation de l'altitude sur
	le terrain
Figure 3.2 :	Représentation de l'altitude interpolée pour la tourbière de la Nécopastic.
	Les courbes de niveau sont représentées en mètres par rapport à un niveau
	arbitraire $z_0=100m$ d'altitude. Les flèches rouges représentent la direction
	préférentielle de l'écoulement qui suit la pente de la tourbière53
Figure 3.3 :	Profils transversaux de la Tourbière de la Nécopastic,54
Figure 3.4 :	Comparaison de la répartition des occupations du sol majeures et des
	associations de puits pour la tourbière de la Nécopastic
Figure 3.5 : N	1-N3-N4. Profil de tourbe (a) et végétation dominante (b)
Figure 3.6 :	N11-N12. Profil de tourbe (a) et végétation dominante (b) 57
Figure 3.7 :	N16-N17. Profil de tourbe (a) et végétation dominante (b)
Figure 3.8 :	N6-N8-N10-N13-N15. Profil de tourbe (a) et végétation dominante (b) 59
Figure 3.9 :	N18-N19-N20. Profil de tourbe (a) et végétation dominante (b)60
Figure 3.10 :	N9. Profil de tourbe (a) et végétation dominante (b)61
Figure 3.11 :	Délimitation du bassin versant de la tourbière de l'Aéroport
Figure 3.12 :	A1. Profil de tourbe (a) et végétation dominante (b)64

Figure 3.13 : Zone marécageuse dont le niveau de nappe a été suivi avec le puits A2. 65

- Figure 3.15: Nappe, débit et précipitations du 13 juin au 31 octobre 2007. Tourbière de la Nécopastic : (a) précipitations journalières, (b) débits mesurés à l'exutoire, (c) profondeurs de la nappe phréatique enregistrées dans NPU et profondeurs d'eau mesurées dans le piézomètre avec une ouverture à 1,50 m (NPI). Tourbière de l'Aéroport : (d) débits mesurés à l'exutoire, (e) profondeurs de la nappe phréatique enregistrées dans les puits A1 et A2.......67

	Nécopastic. Pour les précipitations, il s'agit de du cumul pour chaque jour
	exprimé en équivalent en eau
Figure 3.23 :	Profondeurs de la nappe phréatique en fonction du débit à l'exutoire
Figure 3.24 :	Profondeurs de la nappe phréatique en fonction du débit à l'exutoire pour
	le site de l'Aéroport du 22 avril au 14 octobre 2008
Figure 3.25 :	Comparaison de la profondeur de la nappe phréatique dans les puis N5,
	N8, N9, N13, N16 et NPU entre le 17 juin et le 28 juillet 2008
Figure 3.26 :	Comparaison de la profondeur de la nappe phréatique dans les puis N10,
	N14, N21 et NPU entre le 17 juin et le 24 septembre 2008
Figure 3.27 :	Description hydrologique de la tourbière de la Nécopastic
Figure 3.28 :	Toposéquence schématique d'une coupe transversale sud-nord de la
	tourbière de la Nécopastic91
Figure 3.29 :	Courbes logarithmiques représentant les couples Hauteur de nappe-Débit
	pour tous les puits instrumentés pendant l'été 2008 : (a) juin-juillet et (b)
	juin à septembre
Figure 3.30 :	Effet hystérétique pour trois évènements pluvieux enregistrés au centre de
	la tourbière
Figure 3.31 :	Graphiques illustrant le gradient hydraulique vertical dans les neuf nids de
	piézomètres sur la tourbière de la Nécopastic, le 30-07-2007. Le niveau de
	la nappe phréatique est représenté par une ligne mauve discontinue alors
	que le niveau pour chaque profondeur de piézomètre est figuré en bleu 96
Figure 3.32 :	Représentation journalière de la charge hydraulique dans NPI relativement
	au niveau de la nappe phréatique dans NPU, en fonction des précipitations.

xiv

	Zone ombrotrophe centrale de la tourbière de la Nécopastic du 23 juin
	2007 au 24 septembre 2008
Figure 3.33 :	Fluctuations de la nappe dans différents puits en fonction de la température
	extérieure, enregistrés sur la tourbière de la Nécopastic entre le 14 et le 24
	juillet 2008
Figure 3.34 :	Test de conductivité hydraulique effectué sur le piézomètre à 50 cm du
	N16100
Figure 3.35 :	Données de profondeur de nappe phréatique obtenues avec et sans le
	dispositif des aimants, mesurées au puits N12 entre le 10 juin et le 20 août
	2007
Figure 3.36 :	Comparaison des fluctuations enregistrées dans NPU et estimées dans N12.106
Figure 3.37 :	Comparaison des fluctuations enregistrées dans NPU et estimées dans
	d'autres puits entre le 10/06 et le 16/10 2007 sur le site de la Nécopastic 106
Figure 4.1 :	Description hydrologique et sens d'écoulements principaux aux limites et
	au sein de la tourbière de la Nécopastic (L'orientation des flèches est
	fonction de la pente, de l'occupation du sol et des connections entre les
	différentes zones de la tourbière)111
Figure 4.2 :	Sens d'écoulements principaux aux limites et au sein de la tourbière de
	l'Aéroport (L'orientation des flèches est fonction de la pente, de
	l'occupation du sol et des connections entre les différentes zones de la
	tourbière)113

xv

Figure 4.3 :	Intensité de la remontée de la nappe phréatique après 19 évènements
	pluvieux survenus entre juin et octobre 2007 sur la tourbière de la
	Nécopastic116
Figure 4.4 :	Réponses de la nappe phréatique à un apport d'eau par des précipitations
	pour les puits N9, N16, N10, N14, N21 et NPU : (a) entre le 4 et le 5 juillet
	2008 pour un évènement de faible intensité étalé dans le temps (8,7 mm en
	11 h) et (b) entre le 25 et le 26 juillet 2008 pour un évènement intense et
	rapide (17,9 mm en 1 h) 120
Figure 4.5 :	Niveaux piézométriques mesurés au nid N14 (a) et N16 (b) le 20 août
·	2007
Figure 4.6 :	Effet d'hystérèse observé sur la tourbière de la Nécopastic entre le 13 et le
	17 juin 2008. (1) Remontée de la nappe avec faible augmentation du débit,
	(2) hausse du débit avec stagnation du niveau de la nappe et (3)
	rabattement de la nappe et diminution du débit de manière linéaire
Figure 5.1 :	Relation liant la capacité de stockage à la hauteur de la nappe phréatique
	pour la tourbière de la Nécopastic (Traduit et modifié de Jutras et al., in
	<i>press</i>)143
Figure 5.2 :	Débit observé à l'exutoire de la tourbière de la Nécopastic, comparé aux
	débits simulés pour l'été et le début de l'automne 2008 avec les versions
	originale (BV3C) et mise à jour (PHIM) de HYDROTEL. (Traduit et
	modifié de Jutras et al., in press)145
Figure 5.3 :	Débit observé à l'exutoire de la tourbière de la Nécopastic, comparé aux

xvi

débits simulés directement avec PHIM avec les paramètres des équations

Figure 6.1 :

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 :	Proportion des perturbations sur les tourbières au Québec
Tableau 2.1 :	Caractéristiques comparées des tourbières de la Nécopastic et de
	l'Aéroport25
Tableau 2.2 :	Récapitulatif des différents systèmes d'enregistrement des données
	utilisés dans les puits de la tourbière de la Nécopastic pour la campagne
	2007-2008
Tableau 2.3 :	Récapitulatif du nombre de piézomètres installés et leurs puits associés 46
Tableau 3.1 :	Estimation du bilan hydrologique sur la tourbière de la Nécopastic pour
	différentes périodes des étés 2007 et 2008
Tableau 3.2 :	Valeurs des points de rupture et des coefficients des équations liant la
	hauteur de nappe et le débit pour tous les puits de la tourbière de la
	Nécopastic
Tableau 3.3 :	Conductivité hydraulique mesurée aux mois d'août 2007 et de juin 2008
	pour chaque piézomètre du site de la Nécopastic et taux d'humification
	associé selon l'échelle de Von Post102
Tableau 5.1 :	Analyse comparée estivale (du 01/06 au 01/10) de la simulation du débit
	pour le site de la Nécopastic (Traduit et modifié de Jutras et al., in press) 145
Tableau 5.2 :	Rappel des paramètres des équations logarithmiques pour les puits N10,
	N14, N21 et NPU de Juin à Octobre 2008 (a et b lorsque la nappe est en
	dessous du point de rupture et c et d lorsqu'elle est au dessus)

LISTE DES ANNEXES

Annexe A :	Table de conversion de la hauteur d'eau dans le canal en débit
Annexe B :	Schéma du déploiement d'un nid de piézomètres tel qu'effectué sur la
	tourbière de la Nécopastic
Annexe C :	Graphiques illustrant le gradient hydraulique vertical dans les neuf nids de
	piézomètres sur la tourbière de la Nécopastic, pour six dates différentes 187
Annexe D :	Test de conductivité hydraulique effectué sur différents piézomètres aux
	mois d'août et de juin 2008195
Annexe E :	Rapport d'installation d'un canal trapézoïdal à l'exutoire d'une tourbière
	nordique (Rapport interne I-237)

1 INTRODUCTION

1.1 Contexte

La superficie globale occupée par les tourbières sur la planète avoisinerait les 4 millions de km² dont environ 85 % seraient situés dans les zones boréales et subarctiques en Russie, en Scandinavie, au Nord-Ouest de l'Europe et au Canada (Joosten et Clarke, 2002).

Souvent reconnu pour la densité de ses lacs, le Canada est un pays important pour ses milieux humides tant par la surface totale qu'ils occupent que par leur proportion à l'échelle du territoire. On estime que 14 % du pays est occupé par les milieux humides dont 90 % sont des tourbières, soit environ 1,15 millions de km² (Price *et al.*, 2005). Au Québec, on parle plutôt de 9 à 12 % des terres occupées par les tourbières, dont la majorité se situe dans les régions des Baies de James et d'Hudson (Payette et Rochefort, 2001). Dans certaines régions de la Baie de James, la concentration des tourbières peut atteindre plus de 50 % du territoire (Warren et Rubec, 1997).

Lieux de légendes, endroits mystérieux ou malsains car vecteurs de maladies, les tourbières ont de tous temps été présentes dans les croyances populaires, en particulier en Europe du Nord et de l'Ouest avec la religion celtique. Plusieurs cadavres sacrifiés et en parfait état de conservation témoignent de ces croyances antiques comme l'Homme de Tollund au Danemark ou l'Homme de Lindow en Angleterre (Coles, 1988). Pourtant il faudra attendre le moyen-âge avant que l'homme ne commence à drainer les tourbières à des fins d'exploitation et bien plus tard le XIXe siècle pour que le développement domiciliaire et industriel se fasse sur ces milieux humides (Léveillé, 2007). Comme la plupart des écosystèmes, les tourbières

sont aujourd'hui exploitées de différentes façons au point d'être menacées par les activités humaines. Une de ces formes d'exploitation est l'extraction de la tourbe. Celle-ci avait autrefois pour objectif de chauffer et d'isoler les maisons tandis qu'aujourd'hui on l'utilise plutôt comme substrat et amendement pour l'agriculture ou l'horticulture et comme sujet de recherche pour les propriétés absorbante et filtrante de la tourbe (Charman, 2002; Joosten et Clarke, 2002). L'ennoiement pour la pisciculture, le développement de barrages hydroélectriques et les développements urbain et industriel contribuent également à perturber ou détruire de grandes superficies de tourbières (Rydin et Jeglum, 2006). Enfin le drainage forestier provoque aussi des perturbations sur les tourbières, mais n'implique pas nécessairement la destruction de l'écosystème. De nos jours, on estime que la superficie globale des tourbières décroit de 0,1 % par an totalisant jusqu'à présent 0,5 millions de km² de milieux humides détruis par les activités humaines (Joosten et Clarke, 2002).

Quoiqu'abondantes dans l'ensemble, les tourbières du Canada et du Québec sont restées jusqu'à récemment peu affectées par les activités humaines du fait essentiellement de leur situation géographique éloignée des grands centres d'activités économiques. Dans le Sud du Québec toutefois, les activités anthropiques du dernier siècle ont largement réduit la superficie totale de tourbières. La surface occupée par les tourbières aurait diminuée de 60 % dans la région de Rivière-du-Loup au Bas-Saint-Laurent (Pellerin, 2003), principalement à cause de l'extraction de la tourbe pour l'industrie horticole. Une grande proportion a également été défrichée et drainée pour l'agriculture (Poulin *et al.*, 2004). La production de canneberges dont l'industrie est florissante depuis quelques années contribue également à cette destruction par l'ennoiement direct des tourbières (Poulin *et al.*, 2004). Au niveau du drainage forestier, le Québec reste cependant un de ceux qui ont le moins utilisés cette

technique par rapport aux pays européens avec environ 700 km² de tourbières partiellement drainées (Poulin *et al.*, 2004).

Perturbations	Km ²	% (total)	Effets permanents ou temporaires
Hydro-électricité	1 200	1	permanent
Drainage forestier	697	0,6	temporaire
Agriculture	102	0,09	permanent
Extraction de la tourbe	60	0,05	perm/temp
Autres (étalement, route, etc)	20	0,02	permanent
Cumul des perturbations	2 079	1,8	·····
Superficie Totale	118 263	100	

Tableau 1.1 : Proportion des perturbations sur les tourbières au Québec (d'après Poulin et al., 2004)

Dans le Nord du Québec, c'est essentiellement l'ennoiement lié à la construction des grands réservoirs qui a contribué à diminuer la superficie totale de tourbières. On estime que sur les 20 000 km2 occupés par les grands réservoirs au Canada, 7500 km2 de tourbières et autres milieux humides auraient été ennoyés (Roulet, 2000 in Joosten et Clarke, 2002). Au Québec, on évalue que 1 200 km2 de tourbières ont été inondées lors de la construction des barrages ou des zones de dérivation, liés essentiellement au complexe de la rivière La Grande dans la région de la Baie de James (Poulin et al, 2004). La construction des barrages est donc la cause principale de disparition des tourbières au Québec pour les dernières décennies représentant 1% de la superficie totale et plus de la moitié des zones perturbées dans la province (Tableau 1.1).

De plus en plus affectées par les activités anthropiques, les tourbières sont donc devenues de plus en plus étudiées pour circonscrire leur importance écologique.

On sait que les tourbières, grâce à leur impressionnant taux d'accumulation de la matière organique (1 mm.an-1 et jusqu'à 3 mm.an-1 pour certaines tourbières ombrotrophes boréales, Charman, 2002), sont des grands réservoirs de carbone séquestré. Elles contiendraient entre un tiers et la moitié du carbone total stocké dans les sols terrestres (Holden, 2005) ou encore l'équivalent de tout le carbone atmosphérique (Charman, 2002). En ce sens, les tourbières non perturbées sont des écosystèmes accumulateurs de CO2. Toutefois, les tourbières relargueraient dans l'atmosphère une quantité importante de méthane (Rosenberry et al., 2006), un gaz à effet de serre produit par la décomposition anaérobique de la tourbe, dans des proportions comparables à celles produites par les activités anthropiques -bétails et rizières-(Charman, 2002). Lorsque drainées, exploitées ou inondées, les tourbières deviennent alors des sources de carbone et de méthane non négligeables à l'échelle globale (Joosten et Clarke, 2002). Avec le drainage, même s'il semble que la production de CH4 pourrait diminuer, l'abaissement du niveau de la nappe semble augmenter la décomposition aérobie et donc le relargage de CO2 dans l'atmosphère (Rydin et Jeglum, 2006). De plus, la récolte de la tourbe en détruisant le milieu, limiterait fortement les capacités du système à accumuler de la matière organique. Il en est de même, lorsque les tourbières sont inondées, le taux d'accumulation de matière organique devient quasiment nul (Joosten et Clarke, 2002). En résumé, les changements climatiques qui engendreraient l'augmentation des précipitations ou la fonte du pergélisol contribueraient à limiter la séquestration globale de carbone dans les tourbières et à augmenter son relargage, et celui du méthane, dans l'atmosphère (Holden, 2005). De ce fait et parce que la majorité est située proche du cercle arctique, les milieux humides et les tourbières en particulier sont au cœur des préoccupations et des débats politiques liés aux changements climatiques (Bullock et Acreman, 2003).

Enfin notons que les tourbières sont aussi des écosystèmes avec une grande diversité floristique et faunistique (principalement aviaire) en même tant que des archives paléoécologiques très recherchées à des fins de reconstitution historique de l'écologie, du climat et de l'hydrologie (Quinty et Rochefort, 2003).

1.2 <u>Définitions</u>

Plusieurs définitions des tourbières existent mais du point de vue hydrologique, il est considéré qu'une tourbière est un milieu humide, généralement acide, où la nappe phréatique est généralement proche ou au dessus de la surface et où l'accumulation de matière organique permet la formation de tourbe (d'après Payette et Rochefort, 2001 ; Joosten et Clarke, 2002 ; Price et al., 2005). Cette accumulation de matière organique est possible puisque la production de biomasse végétale dépasse sa décomposition (Payette et Rochefort, 2001). Les tourbières se forment généralement dans les zones planes, mal drainées et sous des climats caractérisés par des précipitations abondantes (Price et al., 2005). Au Canada, pour qu'un écosystème soit classifié comme étant une tourbière, l'épaisseur de tourbe doit dépasser 40 cm (Warren et Rubec, 1997) alors que les classifications européennes prennent généralement en compte une hauteur de tourbe de 30 cm (Joosten et Clarke, 2002).

L'accumulation de matière organique provenant des débris végétaux et principalement des sphaignes forment ce que l'on appelle de la tourbe (Quinty et Rochefort, 2003). La proportion de matière organique dans la tourbe (poids sec) peut varier selon les définitions de 5% à 65 % mais on estime généralement qu'elle doit être constituée d'au moins 30 % de matière organique pour être considérée comme telle (Joosten et Clarke, 2002). Les mousses du genre

Sphagnum (Famille Sphagnaceae), plus communément appelées sphaignes, sont la végétation dominante des tourbières ombrotrophes (Figure 1.1). Elles possèdent des caractéristiques particulières qui leur permettent de jouer un rôle central dans le développement et le fonctionnement des tourbières (Quinty et Rochefort, 2003). Les sphaignes se dessèchent rapidement à cause de l'absence de stomates sur les feuilles qui les empêchent de contrôler leurs pertes en eau par évaporation (Sagot et Rochefort, 1996). En revanche, ce sont des organismes capables d'emmagasiner une grande quantité d'eau (10 à 15 fois leur poids sec) grâce à un réseau de transport capillaire formé par des espaces entres les cellules des feuilles, de la tige et des rameaux (Rydin et Jeglum, 2006). Les sphaignes ont aussi la capacité d'acidifier elles-mêmes leur milieu ce qui ralentis leur dégradation et favorise leur croissance

provoquant ainsi une accumulation accrue de tourbe (Quinty et Rochefort, 2003). Les propriétés autogènes de la sphaigne sont donc responsables du comportement hydrique particulier des tourbières ombrotrophes.



Figure 1.1: Schéma simplifié de la structure d'une sphaigne

Il existe une grande diversité de tourbières et conséquemment une grande diversité de classifications (Rydin et Jeglum, 2006). L'atelier de travail organisé en 1998 par le Groupe de Conservation International des Milieux Humides reflète bien ce débat qui subsiste encore (IMCG, 1998). Les critères pris en compte sont généralement la morphologie de surface, la connectivité au réseau hydrographique régional, la végétation et parfois la composition

chimique de l'eau ou l'approvisionnement en nutriments. On remarque que toutes ces caractéristiques ont un lien direct ou indirect avec les processus hydrologiques. C'est pourquoi on peut souvent simplifier la classification suivant deux patrons de circulation d'eau (Charman, 2002). D'une part, les tourbières dites ombrotrophes (ou bog) dont les apports en eau et en nutriments proviennent essentiellement des précipitations. D'autre part, les tourbières minérotrophes (ou fen) qui sont connectées au réseau hydrographique régional ce qui leur fournit un apport en eau et en nutriments discontinus au cours de l'année. L'eau peut provenir de milieux situés en amont, soit des sols minéraux, des rivières, des lacs ou d'autres tourbières. A l'intérieur de ces deux grandes classes, plusieurs divisions peuvent être ajoutées selon la morphologie de surface ou la composition botanique. On note également que dans la réalité, les tourbières ne sont pas toujours bien définies et que la distinction entre tourbières ombrotrophes et minérotrophes n'est pas toujours très claire (Charman, 2002).

1.3 **Problématique**

Au Québec, la production d'hydroélectricité est une des ressources les plus importantes avec 94 % de la production totale d'électricité (Ressources Naturelles et Faune Québec, 2007). Plus de la moitié de celle-ci est produite sur le territoire de la Baie de James, caractérisé par une abondance de milieux humides dont la majorité sont des tourbières ombrotrophes. Cette caractéristique confère donc à la région une hydrologie particulière avec une grande variabilité spatio-temporelle.

L'INRS-ETE et Hydro-Québec travaillent actuellement à adapter le modèle hydrologique distribué HYDROTEL (Fortin *et al.*, 2001a et b) au contexte particulier du Haut-boréal.

Toutefois, bien que ce modèle ait prouvé son efficacité pour différents types de sols dans le sud du Québec, il ne semble pas posséder les algorithmes nécessaires pour tenir compte de l'écoulement différé des tourbières ombrotrophes en milieu boréal. En effet, les écoulements générés par les sols organiques varient fortement selon les saisons et les conditions initiales. Par exemple, lorsqu'une forte pluie survient après une période sèche, certaines tourbières semblent ne pas contribuer à l'écoulement dans le réseau hydrographique.

Des scénarios de changements climatiques suggérant une augmentation de la température et des précipitations pourraient donc avoir un impact majeur sur la capacité de stockage et le patron d'écoulement des ces écosystèmes. Il convient donc de modifier le logiciel pour prendre en considération les propriétés particulières des tourbières. Mais pour cela, il est nécessaire avant tout de pouvoir quantifier ces processus avant de les modéliser. En d'autres termes, notre étude vise à répondre à la question suivante :

• Quand, dans quelles conditions et à quelle intensité l'eau s'écoule-t-elle d'une tourbière ombrotrophe représentative du Moyen-Nord Québécois ?

1.4 But et Objectifs

Bien que la finalité de cette étude soit de modéliser correctement la réponse des tourbières aux précipitations, le but principal reste de permettre une meilleure compréhension et une meilleure estimation du cycle hydrologique global de ces écosystèmes, notamment en fournissant un suivi pluriannuel et des données précises de stockage et d'écoulement. Ainsi nous chercherons à établir une mesure quantitative précise du suivi de la nappe, de l'écoulement et de la recharge des tourbières ombrotrophes. Pour ce faire, nous proposons de

mettre l'emphase sur le développement de méthodes de terrain efficaces, précises et économiques. Les objectifs de l'étude peuvent être récapitulés de la façon suivante :

- installer un système permettant de quantifier précisément le débit à l'exutoire d'une tourbière ombrotrophe du Moyen-nord québécois ;
- suivre les fluctuations de la nappe, le bilan hydrologique et l'état de la recharge de cette tourbière au cours du temps;
- établir des relations liant le débit à la hauteur de la nappe phréatique et à la recharge ;
- mettre de l'avant les possibilités de modélisation d'écoulement des tourbières ombrotrophes et par conséquent contribuer à l'amélioration d'HYDROTEL ;
- analyser et comprendre les comportements hydrologiques particuliers d'une tourbière ombrotrophe, et ;
- tester, développer et discuter des méthodes de suivi hydrologique efficaces sur le terrain.

1.5 <u>Travaux antérieurs</u>

Les recherches actuelles en lien avec l'hydrologie des tourbières portent principalement sur les échanges de gaz avec l'atmosphère (Holden, 2005) et sur les processus qui gouvernent le rétablissement de la nappe et des interactions biologiques après une exploitation du milieu (Price *et al.*, 2005). Néanmoins, beaucoup d'hypothèses restent à confirmer quant au fonctionnement hydrologique des tourbières ombrotrophes et en particulier les mécanismes qui gouvernent les mouvements d'eau (i.e. entrées et sorties).

1.5.1 Bilan hydrologique

Depuis des années, les écologistes et les hydrologues discutent des différentes façons de classifier les tourbières. Bien que les paramètres chimiques et écologiques aient leur importance (Fraser et al., 2001; Mouser et al., 2005), ils restent souvent la conséquence du fonctionnement hydrologique particulier de ces milieux. Les tourbières ombrotrophes ne reçoivent par définition que de l'eau en provenance des précipitations. Elles sont généralement considérées comme pouvant être déconnectées des réseaux hydrographiques régionaux, au contraire des tourbières minérotrophes qui sont en permanence connectées (Payette et Rochefort, 2001). Pour les tourbières ombrotrophes, l'évapotranspiration est considérée comme le mécanisme principal de sortie d'eau (Price, Chapitre 5 dans Payette et Rochefort, 2001). Néanmoins, dans la nature, ces écosystèmes sont rarement totalement isolés. Ils présentent généralement un ou plusieurs exutoires, qui peuvent être diffus ou convergents, dépendamment de la topographie locale (Todd et al, 2006). Les tourbières peuvent aussi relâcher de l'eau par saturation, notamment après les évènements pluvieux importants ou lors de la fonte printanière (Quinton et al., 2003). Comme pour la plupart des écosystèmes, le régime hydrologique d'une tourbière peut s'écrire (d'après Price, Chapitre 5 dans Payette et Rochefort, 2001 et Charman, 2002) :

VARIATION DU STOCKAGE (
$$\Delta Em$$
) = ENTRÉES (E) – SORTIES (S) (1.1)

où : E = Précipitations (P) + Eau souterraine (SO_E) + Eau superficielle (SU_E)

 $S = \text{Évapotranspiration}(Ev) + \text{Eau souterraine}(SO_S) + \text{Eau superficielle}(SU_S)$

 ΔEm : Variation de l'emmagasinage d'eau dans la tourbière

Pour une tourbière ombrotrophe, puisqu'on fait l'hypothèse que les seuls apports d'eau sont les précipitations, l'équation peut être simplifiée de la façon suivante (d'après Rydin et Jeglum, 2006) :

$$\Delta Em = P - EV - SO_S - SU_S \tag{1.2}$$

Dans les tourbières ombrotrophes les pertes d'eau par infiltration souterraine (SO_S) et par le ruissellement de surface (SU_S) sont généralement négligeables par rapport au volume total d'eau évaporée (Quinty et Rochefort, 2003).

1.5.2 Les Sphaignes et le concept d'acrotelme-catotelme

Les propriétés particulières des sols organiques formés par les sphaignes confèrent aux tourbières ombrotrophes un fonctionnement ressemblant à celui d'une éponge (Bay, 1969; Ingram, 1983, Devito *et al.*, 1997 et Kellner et Halldin, 2002). En effet lorsqu'il pleut, l'eau est stockée et le niveau de la nappe phréatique monte en même temps qu'on observe un gonflement de la surface du sol (Kellner et Halldin, 2002). Lorsque la tourbière arrive à saturation, l'eau commence à ruisseler et à sortir du système. Comme une éponge, ce fonctionnement dépend beaucoup des conditions initiales : sèches ou humides (Branfireun et Roulet, 1998; Evans *et al.*, 1999). On parle de conditions sèches lorsque le niveau de la nappe phréatique est bas et de conditions humides lorsque la nappe est proche ou au dessous de la surface. Dans les tourbières ombrotrophes, le niveau de la nappe diminue rapidement en l'absence de précipitations à cause de l'évaporation. Et pourtant après une sécheresse

prolongée, les sphaignes tentent de maintenir le niveau d'eau prêt de la surface par tension superficielle (Mouser et al., 2005). Cela signifie que les sphaignes en surface sont maintenues humides par l'eau qui est amenée par capillarité le long des fibres de tourbes (Quinty et Rochefort, 2003). Ceci permet à la couche vivante de surface de survivre même si le niveau de la nappe diminue dans la tourbière. Les pertes d'eau deviennent alors de plus en plus limitées puisque la perméabilité et la conductivité hydraulique des couches de tourbe diminuent rapidement avec la profondeur. On peut passer de l'ordre de 10⁻¹ m.s⁻¹ pour la tourbe peu décomposée de surface à 10^{-7} m.s⁻¹ pour la tourbe très décomposée en profondeur (Charman, 2002). La position de la nappe phréatique contrôle donc l'amplitude de la réponse d'une tourbière après des précipitations (Branfireun et Roulet, 1998). De ce fait, lorsque la nappe est très basse, il n'est pas rare qu'un épisode de pluie ne provoque aucun ruissellement et que la tourbière soit partiellement ou totalement déconnectée du réseau hydrographique (Fraser et al., 2001). Notons alors que le rôle de régulateur de crue qu'on attribue en général aux tourbières n'est pas si correct, du moins pour les tourbières ombrotrophes. Par exemple au printemps lorsqu'une tourbière ombrotrophe est déjà gorgée d'eau, il ne peut logiquement pas y avoir d'atténuation de crue (Price dans Payette et Rochefort, 2001).

Les tourbières ombrotrophes sont composées de deux couches de tourbe aux propriétés distinctes (Figure 1.2) : l'acrotelme et le catotelme (Ivanov, 1981 ; Ingram, 1983). Par définition le catotelme est la couche inférieure de tourbe qui se trouve en permanence sous la nappe phréatique alors que l'acrotelme est la couche supérieure située dans la zone où fluctue la nappe phréatique (Quinty et Rochefort, 2003). La limite entre ces deux couches est en théorie marquée par la profondeur maximale à laquelle la nappe peut descendre dans une année (Ingram, 1983). Pourtant il n'existe pas de définition précise applicable dans toutes les

situations (Charman, 2002). Le concept d'acrotelme-catotelme a par ailleurs été développé pour des tourbières ombrotrophes bombées et est aujourd'hui remis en cause pour sa représentativité, la position minimale de la nappe phréatique pouvant grandement différer entre les années sèches et humides (Rydin et Jeglum, 2006).



Figure 1.2 : Croquis d'une tourbière ombrotrophe bombée avec un schéma simple d'écoulement de l'eau : horizontal vers les marges (traduit et adapté de Reeve *et al.*, 2000).

1.5.3 Les patrons de circulation d'eau à l'intérieur des tourbières

Depuis l'apparition du concept d'acrotelme-catotelme, l'écoulement horizontal est considéré comme le mécanisme principal de mouvement d'eau dans les tourbières (Ingram, 1983), conséquence de la plus faible conductivité hydraulique des couches de tourbe profondes. Siegel et Glaser (1987) ont été les premiers à mettre en avant les patrons d'écoulement complexes dans les tourbières, combinaison de mouvements verticaux et latéraux. D'abord durant les périodes de précipitations, l'apport d'eau implique un écoulement vertical descendant (Glaser *et al.*, 1997). Lors d'un déficit en eau à la surface (i.e. évaporation), la

pression hydrostatique des couches inférieures de tourbe devient supérieure à celle des couches de surface et on peut observer une inversion du flux vertical (Figure 1.3 dans Devito et al., 1997). On parle de recharge lorsque la charge hydraulique est plus forte dans les couches supérieures et que l'écoulement est descendant (conditions humides) et de décharge lorsque la charge hydraulique devient inférieure dans les couches proche de la surface et que l'écoulement est ascendant (conditions sèches) (Fraser et al., 2001). Dans une tourbière ombrotrophe il a fallu 21 jours pendant lesquels l'évaporation a été supérieure aux précipitations pour observer une inversion de l'écoulement vertical de l'eau (Fraser et al., 2001). Ces patrons d'écoulement verticaux et latéraux semblent également pouvoir être la conséquence de la formation des bulles de méthane dans les couches de tourbe profondes (Waddington et Roulet, 1997; Fraser et al., 2001; Kellner et al., 2004, Rosenberry et al., 2006). En effet, les bulles de méthane produites par l'activité microbienne amèneraient une pression additionnelle qui peut induire des déplacements d'eau en profondeur et proche des mares (Waddington et Roulet, 1997). Que les patrons d'écoulement verticaux soient le résultat des conditions climatiques locales ou de la production de méthane, il semble que les flux horizontaux prédominent en conditions humides et les flux verticaux prédominent en conditions sèches (Glaser et al., 1997; Waddington et Roulet, 1997). L'étude de ces processus a par ailleurs montré que des tourbières ombrotrophes que l'on croyait isolées, étaient en fait partiellement connectées à des nappes régionales (Glaser et al., 1997 ; Drexler et al., 1999; Reeve et al., 2000).
1.5.4 La génération de l'écoulement

Pour les tourbières ombrotrophes, on estime que la composante verticale est faible et que l'écoulement dominant est horizontal, proche de la surface et en direction des marges (Lapen, 2005 ; Rydin et Jeglum, 2006).

Parmi les mouvements d'eau horizontaux, le ruissellement sous la surface (i.e. dans l'acrotelme) et le ruissellement en surface lorsqu'il y a saturation dominent la génération du débit sortant (Evans, 1999). Holden et Burt (2003) font en plus la distinction entre deux types d'écoulement de surface :

- le ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration lorsque l'intensité des précipitations dépasse le taux d'infiltration de la couche de surface ; l'eau qui s'écoule est uniquement de l'eau de pluie qui n'a pas eu le temps de s'infiltrer ; ce phénomène reste rare et a lieu plutôt au printemps lorsque la tourbe est encore gelée ; et
- le ruissellement par saturation lorsque la tourbe est déjà saturée en eau et que l'eau qui s'écoule est un mélange d'eau de la tourbière et d'eau de pluie.



Figure 1.3 : Processus d'écoulement d'eau dans une tourbière ombrotrophe. En bas, en conditions humides, écoulement horizontal et en haut : en conditions sèches, écoulement horizontal et vertical (traduit de Devito *et al.*, 1997)

Evans *et al.* (1999) ont d'ailleurs suggéré que l'écoulement latéral est plus contrôlé par la saturation du catotelme que par le dépassement de la capacité d'infiltration puisque la majorité du temps l'écoulement se produit lorsque la nappe est dans l'acrotelme (i.e. dans les 5 premiers centimètres dans leur cas, Figure 1.4). Verry *et al.* (1988) avaient eux noté que le débit à l'exutoire cessait lorsque la nappe était en dessous de 14,5 cm de profondeur. Là encore on peut faire une différence entre deux types de conditions initiales (Branfireun et Roulet, 1998) :

 conditions sèches : la nappe est profonde (i.e. dans le catotelme) et des précipitations provoquent une remontée rapide du niveau sans qu'un débit soit généré ; et conditions humides : la nappe est proche de la surface (i.e. dans l'acrotelme) et des précipitations provoquent une montée de la nappe plus lente alors qu'un débit est enregistré.



Figure 1.4 : Relation entre la profondeur de la nappe en fonction du débit pour le bassin versant Trout Beck (Traduit d'Evans *et al.*, 1999).

En outre, en saison sèche Evans *et al.*, 1999 remarquent que même si la nappe est très basse, de faibles précipitations permettent quand même de récupérer rapidement un niveau proche de la surface. À l'intérieur d'une tourbière, des écoulements peuvent aussi être générés le long de voies préférentielles, comme des fissures ou des micro-canaux naturels (Holden et Burt, 2003b). En résumé, les processus d'écoulement à l'intérieur des tourbières gouvernent les pertes d'eau en conditions saturées ou non. Aussi, l'intensité et l'amplitude de l'écoulement sont fonction (Bay, 1969, Branfireun et Roulet, 1998) :

- de l'intensité et de la quantité des précipitations
- des conditions initiales (sèche ou humide), i.e. de la position de la nappe phréatique
- de la nature du profil de tourbe
- de la topographie de la tourbière

1.5.5 Mesure du débit à l'exutoire

Si on s'intéresse maintenant uniquement au débit à l'exutoire, on remarque que beaucoup de méthodes de mesure et d'estimation existent dans la littérature. Cependant on trouve peu de travaux qui ont essayés de quantifier clairement le débit d'une tourbière ombrotrophe. Par exemple, Hayashi et al. (2004) ont tenté de différencier la contribution de chaque type de milieux en séparant les hydrogrammes obtenus à l'exutoire de leur site d'étude. Toutefois, le site considéré est un mélange de tourbières ombrotrophes, minérotrophes et de plateaux tourbeux, dont la contribution est évaluée à partir de leurs signatures isotopique et chimique, comme pour l'étude de Brassard et al. (2000). Souvent, c'est par l'estimation du bilan hydrologique global que la connectivité des tourbières ombrotrophes est évaluée. C'est à dire que l'écoulement par saturation de la tourbière est estimé à partir des données de précipitations et d'évaporation (Kellner et Halldin, 2002). Mais le plus souvent les publications cherchent à mettre en avant l'effet de rétention des tourbières en considérant des bassins versant mixtes à grande échelle (Branfireun et al., 1998; Evans et al., 1999; Holden et Burt, 2003; Quinton et al., 2003; Mouser et al., 2005; Todd et al., 2006). Dans ces cas de figure, la mesure de débit est prise à l'exutoire de bassins versants de grande taille. Les conclusions confirment dans tous les cas le fonctionnement particulier des tourbières. C'est à dire que dans les bassins versants où la tourbe domine, la réponse du débit aux précipitations est différée. Bay (1969) a été le premier à essayer de quantifier clairement le débit à la sortie de tourbières en installant des canaux de type H et des déversoirs en V. Cette étude prouvait déjà que la capacité de stockage et l'écoulement dépendent grandement de la position initiale de la nappe phréatique. Depuis, seuls Verry et al. (1988) ont essayé de mesurer ce phénomène en jaugeant le débit dans un déversoir en V afin de comparer le fonctionnement d'une tourbière à celui d'un réservoir d'eau.

1.5.6 Les tourbières en modélisation hydrologique

Alors qu'aujourd'hui la modélisation hydrologique commence à être relativement efficace dans les régions agricoles, forestières ou mixtes, les premiers tests réalisés dans les régions nordiques sont moins concluants. Dans les Territoires du Nord-Ouest au Canada, le modèle WATFLOOD est testé depuis quelques années. Pietroniro et al. (1996) ont montré qu'il subsistait des problèmes de validation du modèle parce que le stockage et le débit différé des tourbières étaient mal considérés. En même temps, le manque de données de terrain représentatives était mis en avant. Notons cependant que les capacités de ce modèle ont été améliorées récemment avec l'aide des traceurs isotopiques afin d'établir la proportion de milieux humides connectés (Stadnyk et al., 2005). Il apparaît aussi que modéliser la réponse des milieux humides aux précipitations s'avère inappropriée lorsqu'on utilise des algorithmes développés pour des sols minéraux (Letts et al., 2000). La première question à se poser est donc de se demander si on doit considérer une tourbière ombrotrophe comme étant une seule entité ou comme étant un assemblage de différents écosystèmes et reliefs. Kellner et Halldin (2002) ont montré que les fluctuations de la nappe le long d'un gradient de surface (i.e., buttes, creux et mares) sont suffisamment homogènes pour que la tourbière soit considérée comme une seule unité à des fins de modélisation. Pour le schéma CLASS - Canadian Land Surface Scheme- (Verseghy, 1991), la profondeur de la nappe phréatique et la température de la tourbe ont pu être correctement modélisées en développant des paramètres représentatifs de l'humidité du sol pour trois types de tourbe distincts par leur taux de fibres : fibrique (>40%), mésique (entre 10% et 40%) et saprique (<10%) (Letts *et al.*, 2000). Le modèle PHIM (Peatland Hydrologique Impact Model) a quant à lui été spécifiquement développé pour simuler l'écoulement et le niveau de la nappe dans les tourbières (Guertin *et al.*, 1987). Ce modèle reprend l'idée de comparer une tourbière à un réservoir d'eau à seuil régulier (Figure 1.5).



Figure 1.5 : Comparaison d'une tourbière à un réservoir pour l'élaboration de PHIM (Guertin *et al.*, 1987).

Dans ce contexte les auteurs ont déterminé trois cas de figures reliant la hauteur de la nappe au débit de la tourbière (Figure 1.5) :

- (1) la nappe est très proche de la surface et le moindre apport d'eau provoque un écoulement ;
- (2) la nappe est un peu plus profonde et la réponse aux précipitations est plus faible, et
- (3) la nappe est si profonde qu'il n'y a plus d'écoulement.

PHIM nécessite uniquement comme entrée des données climatiques et descriptives. Il suffit auparavant d'établir une équation représentative de la profondeur de la nappe en fonction du débit et une autre représentative de la profondeur de la nappe en fonction de la capacité de stockage. Bien qu'ancien ce modèle semble avoir un potentiel de modélisation très intéressant.

En résumé, la position de la nappe phréatique détermine l'amplitude et le temps de réponse d'une tourbière ombrotrophe après un évènement pluvieux. Mais cette relation dépend ellemême de la position initiale de la nappe et de l'intensité des précipitations. Par ailleurs on observe un gros manque de données de terrain représentatives de ces conditions. Hors cellesci sont nécessaires pour développer, tester et caler des modèles hydrologiques comme PHIM.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 Sites d'études

Le bassin versant pilote de la rivière Nécopastic (244 km²) été identifié en 2003 par Hydro-Québec afin de tester le modèle HYDROTEL en milieu boréal. Ce bassin est situé dans la région hydrographique des Baies de James et d'Hudson et est localisé plus précisément sur la rive sud de la rivière La Grande entre les centrales LG1 et LG2 (latitude : 53°43'36"N et longitude : 78°13'59"O). Puisqu'il est question de mieux connaître les particularités hydrologiques des tourbières de ce bassin versant, la recherche de sites d'étude s'est donc focalisée dans cette région (Figure 2.1).



Figure 2.1 : Localisation du bassin pilote de la rivière Nécopastic et des deux sites d'étude.

23

Le but du projet étant de quantifier efficacement le régime d'écoulement d'une tourbière à dominance ombrotrophe, le choix du site d'étude a été orienté selon les critères suivants :

- Il doit être un petit bassin versant dominé par une tourbière ombrotrophe représentative des milieux humides retrouvés dans le bassin pilote de la Nécopastic.
- Il ne doit posséder qu'un seul exutoire, celui-ci devant être suffisamment bien défini, pour y permettre l'installation d'un appareil de mesure du débit.
- Il doit offrir un accès relativement aisé pour faciliter le transport et l'installation du matériel de mesure.

La décision a par ailleurs été prise de choisir deux sites afin de pouvoir comparer les données obtenues et ainsi de s'assurer d'une bonne généralisation des résultats. En combinant photointerprétations et visites de terrain, deux bassins versants qui répondent aux critères précédents ont été retenus, le site de la Nécopastic et le site de l'Aéroport (Figure 2.1). Les limites théoriques des bassins versants ont ensuite été déterminées par photo-interprétation (Société d'Exploitation de la Baie de James, Ligne 63 et 68 DesCantons/Radisson 1 : 20000 12 Septembre 1984) avant d'être confirmées sur le terrain à l'aide d'un GPS RTK 5800 de Trimble®.

Les caractéristiques morphologiques et géographiques des deux bassins versants sélectionnées sont résumées dans le tableau ci-dessous (Tableau 2.1) :

Sites	Nécopastic	Aéroport	
Localisation	Route de Chisasibi km 60	Route de la Baie James 3 km au sud de l'aéroport de La Grande Rivière A	
Coordonnées	53°40.6' N 78°11.2' O	53°35.5' N 78°41.0' O	
Superficie du bassin versant	97 ha	157 ha	
Proportion occupée par la tourbière	63%	62%	
Altitude moyenne	95 m	170 m	

Tableau 2.1 : Caractéristiques comparées des tourbières de la Nécopastic et de l'Aéroport

La tourbière du site de la Nécopastic est à dominance ombrotrophe avec des zones plus forestières proches des marges (Figure 2.2). Une petite proportion est occupée par des mares. Deux fossés apparaissent au centre de la tourbière et ils drainent l'eau vers un exutoire bien défini au nord-ouest de la tourbière, proche de la route de Chisasibi. Ce fossé concentre l'écoulement d'eau vers un autre ruisseau qui se jette dans la rivière Nécopastic une centaine de mètre en aval, au nord de la route. La tourbe accumulée sur ce site atteint une épaisseur maximale de 190 cm au centre de la tourbière.



Figure 2.2 : Occupation écologique grossière de la tourbière de la Nécopastic (Photo aérienne 234, Ligne 68, SEBJ 1984)

La tourbière du site de l'Aéroport est majoritairement occupée par une zone ombrotrophe (Figure 2.3). Au centre, où le relief forme un rétrécissement, une partie arbustive cohabite avec des zones minérotrophes et marécageuses de plus faibles profondeurs (30 à 40 cm de tourbe). La hauteur de tourbe maximale est de 140 cm au centre de la tourbière. Ici aussi un ruisseau prend sa source au centre de la partie ombrotrophe et concentre les pertes par écoulement vers un exutoire situé à proximité de la route de la Baie James au sud-est de la tourbière.

Pour les deux sites, les exutoires sont peu profonds (20 cm) et généralement larges (> 1 m). Parfois mal définis ou diffus (écoulement de surface sur une large surface herbacée), ils sont par endroits suffisamment circonscris (< 60 cm) et rectilignes sur une longueur de quelques mètres. La pente de ces exutoires est extrêmement faible et les berges sont recouvertes de tourbe et d'aulnes (Figure 2.4). L'horizon de surface caractérisant les berges et surtout le lit de ces exutoires est formé de tourbe fortement décomposée, mélangée à du limon apporté par l'eau. Cette couche à une épaisseur de 30 à 60 cm. En dessous, on retrouve un horizon minéral d'une épaisseur indéterminée de sable limoneux à faible pierrosité.







Figure 2.4 : Exemple de végétation dominant les sites Nécopastic (a) et Aéroport (b) avant l'installation des canaux.

2.2 <u>Caractérisation écologique et morphologique</u>

C'est d'abord par photo-interprétation et lors des premières visites de terrain que chacune des deux tourbières a été divisée en différentes zones d'intérêt écologique (Figure 2.2 et 2.3). Et c'est aussi après ces premières visites qu'il a été décidé de concentrer certains efforts sur la tourbière de la Nécopastic. Les raisons de ce choix seront détaillées plus loin dans la partie Résultats (Chapitre 3). En ce qui concerne la caractérisation écologique, l'étude de la stratigraphie et de la morphologie, seule la tourbière de la Nécopastic a donc été prospectée. D'un point de vue écologique, les différentes strates ligneuses et non ligneuses ont été inventoriées : arborescentes, arbustives, herbacées, graminées, mousses et sphaignes. Sans nécessairement être très précis, ces inventaires ont pour but d'établir des grands ensembles écologiques et de discuter des liens entre les communautés végétales et le comportement hydrologique des différentes zones de la tourbière.

La topographie de la surface et du fond de la tourbière de la Nécopastic ont été établies lors des travaux de terrain de l'été 2007. Le GPS RTK 5800 de Trimble® a permis de déterminer l'altitude et la pente de la tourbière. En même temps, la hauteur de chaque puits et de chaque piézomètre a été mesurée pour confirmer les mesures manuelles prises lors de leur déploiement. Afin de déterminer la topographie du fond de la tourbière, des profondeurs de tourbe ont été mesurées sur 85 points répartis aléatoirement sur toute la tourbière. Chacun de ces points a été positionné à l'aide d'un appareil GPS plus simple puisque l'utilisation du GPS RTK devenait difficile, voire impossible en milieu forestier. Les profondeurs de tourbe ont été mesurées à l'aide de tiges de ramonage télescopiques insérées directement dans le sol. L'extrémité creuse des tiges permet de remonter à la surface une petite quantité de minéral qui confirme que le fond de la tourbe a bien été atteint. Un profil transversal de la topographie proche du canal trapézoïdal a été obtenu au théodolite. Cette représentation permet de pouvoir estimer le débit qui s'est écoulé si jamais la hauteur d'eau venait à dépasser la hauteur maximale que le canal peut enregistrer (i.e. 42 cm d'eau dans le canal).

En parallèle, des profils de tourbe ont été prélevés en différents endroits de la tourbière de la Nécopastic au cours des étés 2007 et 2008. Le but est de connaître la stratigraphie et l'état de décomposition de la tourbe à chaque puits et à la grandeur de la tourbière. Les prélèvements ont été effectués à l'aide d'un carottier russe (propriété de l'Université Laval) avec un échantillonneur de tourbe Macaulay large (4 cm de diamètre par 50 cm de long). Pour chaque couche, le degré d'humification a été évalué d'après l'échelle de Von Post en même temps que la couleur et le type de tourbe (i.e. tourbe de sphaigne, de carex, présence de racines, etc.). De cette manière, 26 profils de tourbe ont été réalisés sur la tourbière de la Nécopastic

afin d'essayer d'établir un lien entre la circulation d'eau, la composition écologique et le type de tourbe.

2.3 Mesure du débit à l'exutoire

Plusieurs méthodes ont été envisagées afin de mesurer le débit des exutoires des deux sites. D'abord, l'utilisation d'un seuil déversoir ne s'avérait pas une solution adéquate à cause de la faible pente qui rendrait difficile l'interception de tout l'écoulement derrière une paroi imperméable ; des fuites non négligeables pouvant survenir à travers le sol organique notamment en raison de la faible capacité de soutien de ce type de matrice de sol. L'utilisation d'un canal directement dans le lit du ruisseau s'avérait donc une option plus appropriée. Les plus fréquemment utilisés sont les canaux de type Parshal et H, mais tous deux nécessitent la construction d'un seuil de quelques centimètre de hauteur à la sortie du canal. Puisque la pente des exutoires identifiés est très faible, ces types de canaux ont été rejetés.

Le canal trapézoïdal s'est avéré être celui dont les critères étaient les mieux adaptés aux situations des sites de la Nécopastic et de l'Aéroport. Il ne nécessite pas la construction d'un bassin d'accumulation, ni de seuil à sa sortie, il peut supporter de très grandes variations de débits, de 1,5.10⁻³ m³/s (1,5 l/s) à 2,2.10⁻¹ m³/s (220 l/s) et il s'installe sur des sites ayant de très faibles pentes. C'est donc un canal trapézoïdal de type SRCRC 12'' (Accura-FloTM, Tempe, AZ, USA) qui a été choisi, puisqu'il a l'avantage de minimiser les pertes et de ne pas changer la forme, ni la dynamique d'écoulement du cours d'eau. Ses dimensions sont les suivantes : 170 cm (67po) de long, 112 cm (44 po) de large et 41 cm (16 po) de haut (Figure 2.5). A noter qu'il comporte également un port d'attache de 2,5 cm de diamètre (1 po), situé proche de l'amont, à gauche en regardant vers l'aval (Figure 2.5).



Figure 2.5 : Description des différentes composantes du canal trapézoïdal SRCRC 12"

Ce port d'attache permet de connecter le canal à un tuyau ABS 1½" (diamètre interne de 4 cm) que l'on appelle puits de tranquillisation (Figure 2.6). De cette manière, le niveau dans le puits de tranquillisation est le même que dans le canal, si on s'assure que le tuyau horizontal reliant le puits et le canal est bien à niveau lors de l'installation. Le niveau d'eau dans le puits de tranquillisation est ensuite mesuré à l'aide d'un capteur de pression submersible (LeveloggerTM M5 Gold 0-5m, Solinst, Georgetown, ON, Canada). Un pas de temps de 15 minutes a été employé pour chacun de ces appareils sur les sites à l'étude. La figure 2.6 résume le fonctionnement d'un canal trapézoïdal de type SRCRC 12''.



Figure 2.6 : Schéma simplifié résumant le fonctionnement du canal trapézoïdal

Un simple fil de pêche tressé de longueur connue suffit à maintenir le capteur dans le puits de tranquillisation (Figure 2.7). Il doit être installé dans un puits assez profond pour que celui-ci se retrouve plus bas que le fond du canal. Ainsi, de très faibles débits ou même l'assèchement du ruisseau pourront être enregistrés. Une fois le niveau d'eau connu à l'endroit précis où se situe le puits de tranquillisation, on peut obtenir le débit dans le canal grâce à une table de conversion fournie par le manufacturier (Annexe A). On convertit la hauteur d'eau dans le canal (en m) en débit (en m³/s) avec l'équation suivante :

$$Q = 0.0283168 \times \left(3.23 \times \left(\frac{h}{0.3048}\right)^{2.5} + 0.63 \times \left(\frac{h}{0.3048}\right)^{1.5} + 0.05\right)$$
(2.1)

Avec :

Q: le débit dans le canal en [m³/s]

h : la hauteur d'eau dans le canal en [m]



Figure 2.7 : Installation du puits de tranquillisation et du capteur de pression

Le canal a été solidement ancré dans l'horizon minéral, à l'aide de quatre pieux vissés. Le canal a été installé de manière à ce que son fond se situe exactement au même niveau que le fond naturel du ruisseau. Les abords et les côtés du canal ont été imperméabilisés à l'aide de sable, de gravier et de tourbe. L'installation du canal requiert également que les sections en amont et en aval du canal soient rectilignes sur environ une dizaine de mètres afin d'éviter l'accumulation de débris en amont ou la formation d'un reflux d'eau en aval. De grosses pierres ont ainsi été posées le long de ces sections afin de limiter l'érosion. La Figure 2.8 montre les deux canaux trapézoïdaux installés. L'Annexe E explique dans le détail les différentes étapes à suivre pour installer un canal trapézoïdal correctement. Enfin, notons que des mesures manuelles du niveau d'eau ont été prises périodiquement, dans le puits de tranquillisation et dans le canal, afin d'être comparées aux données des capteurs de pression.



Figure 2.8 : Canaux trapézoïdaux installés : Site de la Nécopastic (a) (53°40.553' N, 78°11.031' O) et site de l'Aéroport (b) (53° 35.513' N, 78° 41.248' O).

2.4 Mesure des fluctuations de la nappe phréatique

Les fluctuations de la nappe phréatique sur les deux sites d'études ont été enregistrées de juin 2007 à octobre 2008. Afin de pouvoir représenter la capacité de stockage d'une tourbière en fonction du débit à l'exutoire, plusieurs méthodes de mesures à l'aide de puits d'observation ont été combinées. Les puits sont constitués d'un tuyau d'ABS noir 1½" (diamètre intérieur = 4 cm et diamètre extérieur = 4,8 cm) de 122 cm de long dans lequel de nombreuses fentes de 2 mm de large et de 10 à 15 cm de long ont été faites au banc de scie. Chaque puits a été fermé à sa base par un bouchon percé et a été inséré dans un bas de nylon afin de prévenir l'accumulation de débris à l'intérieur du tuyau. Les puits ont ensuite été enfoncés à la main dans la tourbe préalablement creusée à l'aide d'une tarière (Figure 2.11b).

2.4.1 Site de l'Aéroport

Pour le site de la tourbière de l'Aéroport, deux capteurs de pression submersibles (LeveloggerTM M5 Gold 0-5m, Solinst, Georgetown, ON, Canada) ont été installés dans deux zones différentes. Un dans une zone ombrotrophe entourée de mares (A1). L'autre dans un environnement plus marécageux occupé par des herbacées et avec une bonne circulation d'eau (A2). (cf. Figure 2.3). Les profondeurs de la nappe phréatique pour cette tourbière ont alors été enregistrées toutes les 15 minutes de juin 2007 à octobre 2008. En même temps des mesures manuelles ont été prises à plusieurs reprises. De cette manière, on peut vérifier que les données obtenues avec les capteurs de pression sont bien exactes et réalistes.

2.4.2 Site de la Nécopastic

Pour la tourbière du site de la Nécopastic, les puits ont été installés selon deux lignes perpendiculaires, cumulant au total 21 emplacements numérotés de N1 à N21 (Figure 2.9). À partir de ceux-ci, une méthode de mesure en continu, à l'aide de capteurs de pression submersibles, a été combinée à une méthode manuelle.



Figure 2.9 : Localisation des puits pour la tourbière de la Nécopastic.

2.4.2.1 Capteurs de pression submersibles

Le puits N12 est le centre de la croix formée par les deux lignes de puits et est situé au centre de la tourbière, dans la zone la plus ombrotrophe et la plus épaisse (190 cm de tourbe). À cet endroit, un puits supplémentaire (NPU) avec un capteur de pression a été installé pour mesurer le niveau de la nappe en continu (i.e. aux 15 minutes) de juin 2007 à octobre 2008. Pour la seconde partie de la campagne de terrain, c'est à dire de juin à octobre 2008, plusieurs autres capteurs de pression ont été déployés dans les puits N5, N8, N9, N10, N14, N13, N16 et N21 (Tableau 2.2).

2.4.2.2 Mesures manuelles et méthode de l'aimant

De juin à octobre 2007, la mesure de la profondeur de la nappe phréatique a été prise dans tous les puits toutes les deux semaines, en utilisant un bulleur. Un bulleur est constitué d'un tuyau flexible de 90 cm de long prolongé par un tube d'aluminium rigide et creux d'environ 150 cm, bouché au bout, sur lequel a été collé un ruban gradué. Le zéro de ce ruban se trouve au niveau d'un trou fait à la base du tube d'aluminium. Il suffit ensuite de souffler dans le

tuyau flexible en insérant le tube dans le puits à mesurer. Lorsqu'on entend des bulles, cela signifie que le zéro est au niveau de l'eau et il ne reste plus qu'à lire la mesure de profondeur de nappe sur le ruban gradué (Figure 2.10).



Figure 2.10 : Utilisation d'un bulleur sur le site de la Nécopastic (Juillet 2007)

En même temps, un système complémentaire et économique a été installé dans les puits N1 à N21 afin d'obtenir une mesure supplémentaire de hauteur de nappe. Le principe est, entre chaque visite de terrain, de pouvoir mesurer le niveau maximum que la nappe phréatique a atteint. Ce système est inspiré de la méthode de Morgan et Stolt (2004). Le schéma ci-après (Figure 2.11a) résume le procédé utilisé. Dans chaque puits est introduite une tige de métal de ¹/₄ pouce (0,65 cm), sur laquelle est placé un bouchon de liège, préalablement percé pour qu'il puisse glisser sans résistance le long de la tige. Un aimant de type « micro-spin bar »

d'environ 10 mm x 3 mm est ensuite posé au dessus du bouchon sur la tige. À noter que la tige a été au préalable peinte avec de la peinture antirouille de bonne qualité afin de prévenir tout risque de colmatage dû à la rouille. Pour que la tige se maintienne droite dans le puits, une rondelle en acier inoxydable est fixée à sa base et une autre rondelle de plastique est installée au dessus du bouchon en liège pour s'assurer que l'aimant glisse correctement ou ne se coince dans le bouchon de liège. La tige est maintenue en haut du puits par un bouchon en PVC 2''. Avec ce dispositif, lorsque le niveau d'eau monte, le bouchon de liège monte aussi et pousse l'aimant. Ensuite le bouchon redescend avec l'eau alors que l'aimant reste au niveau maximum atteint par la nappe. On bénéficie donc d'une mesure supplémentaire à chaque visite sur le terrain. Le but de cette méthode, adaptée de Morgan et Stolt (2004) est d'établir les fluctuations en continu de la nappe phréatique pour chaque puits, à partir d'observations ponctuelles et de puits NPU instrumenté avec un capteur de pression submersible.



Figure 2.11 : Schéma simplifié et photo du dispositif d'enregistrement du niveau maximum de la nappe (a) et (c). Installation des puits d'observation (b).

Une autre méthode, consistant à observer la décoloration de rubans de PVC (Belyea, 1999 ; Booth *et al.*, 2005, Navràtilovà et Hàjek, 2005), aurait pu également être utilisée. Initiée par Gauthier (2006) sur une tourbière ombrotrophe voisine du site de la Nécopastic, les résultats ont montré qu'il était très difficile d'obtenir des mesures probantes avec cette méthode. La limite maximale obtenue était rarement assez précise, à cause de la difficulté à déterminer la limite entre la partie du ruban décolorée et celle normale. En effet il faut que le ruban passe un certains temps sous l'eau pour que la décoloration soit visible.

Le système d'enregistrement du niveau maximal de la nappe phréatique avec les aimants, a donc été testé sur la tourbière de la Nécopastic en utilisant un protocole de raffinement des données bien précis. Ces règles peuvent être établies à partir des données de terrain et des enregistrements en continu de profondeur de nappe au puits NPU. Afin de pouvoir appliquer correctement cette méthode, une hypothèse de base importante doit être posée :

 Entre deux visites sur le terrain, la valeur obtenue avec l'aimant est ajustée dans le temps pour chaque puits au moment où le niveau a atteint un maximum dans le puits NPU situé au centre de la tourbière. On admet donc que le rythme des fluctuations d'eau dans les puits N1 à N21 est le même que dans le puits NPU.

Par la suite pour raffiner les données ponctuelles en une courbe de niveau de nappe en fonction du temps, une équation a été mise au point. Celle-ci tient compte des pertes et des gains en eau de la tourbière qui peuvent être résumées avec l'équation 2.2. Le détail de cette équation pour chacun des puits sera développé dans la partie Résultats (Chapitre 3) afin d'évaluer la pertinence et la représentativité de cette méthode.

$$Y = Vp + Tr + Rp \tag{2.2}$$

Où :

Y est la courbe de niveau de nappe obtenue

Vp sont les valeurs ponctuelles obtenues à l'aide du bulleur à chaque visite

Tr est le Taux de rabattement de la nappe en l'absence de précipitations. Intrinsèquement cette équation tient compte de l'évapotranspiration.

Rp est la Réaction aux précipitations c'est à dire l'élévation de la nappe phréatique après un évènement pluvieux.

 Tableau 2.2 : Récapitulatif des différents systèmes d'enregistrement des données utilisés dans les puits de la tourbière de la Nécopastic pour la campagne 2007-2008.

				2007	2008
Puits	Latitude	Longitude	Altitude (m)	MJJASONDJFM	AMJJASOND
N1	53°40.367' N	78°10.972' O	105.5		
N2	53°40.374' N	78°10.948' O	105.9		
N3	53°40.375' N	78°10.883' O	106.1		
N4	53°40.387' N	78°10.832' O	106.3		
N5	53°40.386' N	78°10.761' O	106.2		
N6	53°40.251' N	78°10.789' O	107.1		
N7	53°40.258' N	78°10.770' O	107.3		
N8	53°40.284' N	78°10.747' O	107.4		
N9	53°40.233' N	78°10.581' O	108.9		
N10	53°40.518' N	78°10.428' O	108.1		
N11	53°40.434' N	78°10.467' O	108.3		
N12	53°40.392' N	78°10.495' O	108.3		
N13	53°40.346' N	78°10.503' O	108.4		
N14	53°40.394' N	78°10.608' O	107.2		
N15	53°40.437' N	78°10.338' O	109.0		
N16	53°40.487' N	78°10.120' O	110.0	and the second	
N17	53°40.497' N	78°10.018' O	110.3		
N18	53°40.513' N	78°09.951' O	110.2		
N19	53°40.516' N	78°09.908. O	109.8		
N20	53°40.598' N	78°10.500' O	107.8		
N21	53°40.554' N	78°10.445' O	107.9		
NPU	53°40.392' N	78°10.495' O	108.3		

Tige + aimant

— Capteurs de pression

2.5 Données climatiques

2.5.1 Compensation barométrique

L'utilisation de capteurs de pression nécessite toutefois la correction des données par la pression barométrique prise à une distance maximale de 25 km. Les données de pression barométrique pour les deux tourbières ont été prises sur le site internet du ministère de l'Environnement du Canada pour les mois de juin 2007 à octobre 2008. Ce sont les données horaires de la station météorologique située à l'aéroport La Grande Rivière A (LGRA, Identification Climat 7093715, Latitude : 53° 37.800' N, Longitude : 77° 42.000' O, situé à 32 km au Sud de Radisson). Étant donné que les capteurs de pression installés sur les deux tourbières prennent des mesures aux 15 minutes, les données de la station LGRA ont été interpolées aux 15 minutes. Les mesures obtenues à cette station en kPa ont éte converties en hauteur d'eau avec l'équation suivante (Manuel d'utilisateur pour Levelogger Gold de Solinst, 02-2007) :

$$P(m) = P(kPa) \times 0.1022 - \left(9.5 - \frac{Altitude}{826}\right)$$
(2.3)

Avec :

P(m): pression barométrique en équivalent hauteur d'eau [en m]

P(kPa): pression barométrique en [kPa]

Altitude : pour la station LGRA, i.e. 195 m

Ces données, en équivalent hauteur d'eau sont donc soustraites telles quelles aux mesures des capteurs de pression pour la tourbière de l'Aéroport, étant donné que la tourbière et la station sont très proches. Pour la tourbière de la Nécopastic, il faut cependant compenser la mesure de pression puisque le site est situé une centaine de mètres plus bas que la station LGRA. Un barologger a été utilisé sur la tourbière de la Nécopastic aux mois de Juin 2007, Août 2007 et de Juin à Octobre 2008. Les données obtenues à ces périodes, mises en relation avec les données de pression atmosphérique de LGRA pour les mêmes dates permettent de corriger le biais, dû à l'altitude, avec l'équation suivante :

$$y = 0.9988x - 0.0397 \tag{2.4}$$

Avec :

y : Pression barométrique à la tourbière de la Nécopastic [en m]

x : Pression barométrique à la station LGRA

2.5.2 Précipitations

Les données de précipitations ont été obtenues à la station Nécopastic (53° 40.744' N/ 78° 09.480' O) installée et gérée par Hydro-Québec. Elle est situé près du pont de la Nécopastic à environ une centaine de mètres de la tourbière de la Nécopastic. Ces données ont été utilisées de juin 2007 à octobre 2008 sauf pour la période du 10 octobre au 22 décembre 2007 à cause d'un problème technique. Pour ce laps de temps, les données de précipitations proviennent d'une autre station météorologique installée sur la tourbière à Yves (53° 41.999' N/77° 55.289' O) au sud-est de la tourbière Nécopastic. Cette station, gérée par Simon Tardif (étudiant de l'INRS) fournit des données horaires. Plutôt que d'interpoler les précipitations

aux quarts d'heures, pour cette période, les enregistrements aux heures des canaux trapézoïdaux ont été conservés.

2.6 Caractérisation hydrologique complémentaire

Afin d'étudier plus en particulier le fonctionnement hydrologique du site de la Nécopastic, plusieurs autres dispositifs y ont été déployés.

2.6.1 Suivi piézométrique

Chercher à connaître la direction et l'intensité des mouvements d'eau dans une tourbière revient à vouloir mesurer la charge hydraulique à différentes profondeurs, c'est à dire pour différents types de tourbe. Pour connaître la pression hydraulique à une certaine profondeur, on utilise généralement des piézomètres.

À la différence des puits d'observation, les piézomètres ne sont percés qu'à une profondeur connue pour ne permettre la circulation de l'eau que dans la couche de substrat souhaitée (Figure 2.12). Leur fabrication est adaptée de Baird *et al.* (2004).



Figure 2.12 : Schéma illustrant la différence entre les puits d'observation et les piézomètres.

Les piézomètres ont été fabriqués à partir de tube ABS noir 1½". Les tuyaux ont été découpés à l'aide d'un banc de scie, à différentes longueurs. Étant donné que la structure du profil de tourbe n'était pas encore connue, il a été décidé de mesurer la charge hydraulique à des profondeurs arbitraires, soit 50 cm, 100 cm, 150 cm et 200 cm. Les piézomètres construits ont donc les dimensions suivantes :

- 7,7' (231,14 cm) pour 200 cm ;
- 6' (182,88 cm) pour 150 cm ;
- 4,5' (134,62 cm) pour 100 cm ;
- 3' (91,44 cm) pour 50 cm.

La section où se fait l'entrée d'eau peut ensuite être réalisée à l'aide d'une perceuse ou d'une toupie plongeante (Figure 2.13a). L'ouverture est percée sur une hauteur de 10 cm en faisant des stries verticales d'environ 1cm de large avec entre 0,5 et 1 cm d'espacement entre chaque strie. Si l'espacement est plus petit, le tuyau finit la plupart du temps par se briser. De cette façon, à cette endroit, environ 65 % de la surface du cylindre est ouverte. Lors de l'installation sur le terrain, le centre de la prise d'eau est positionné à la profondeur désirée. Cela signifie que si le piézomètre est installé à 50 cm, la zone d'entrée d'eau est entre 45 et 55 cm de profondeur.



Figure 2.13 : (a) Fabrication des piézomètres et (b) Cônes pour insertion.

Aussi lors du déploiement des piézomètres, un système a été développé pour minimiser l'accumulation de débris dans le fond du trou et l'obturation du tube. Des cônes ont été fabriqués en utilisant des gobelets coniques de fontaine d'eau dans lesquels a été introduite de la mousse expansive et un bouchon de liège (#22 dans notre cas) (Figure 2.13b). Ils peuvent également être fabriqué avec du bois, du polystyrène ou d'autres matériaux rigides. Ces cônes sont insérés à la base du piézomètre et facilitent son insertion tout en évitant l'accumulation de débris dans le fond et donc la formation d'une couche de conductivité hétérogène. Le tuyau est fermé à la surface avec des bouchons en PVC 2", mais n'importe quel autre type de fermeture peut être utilisé. Cela sert à limiter les apports d'eau des précipitations et l'évapotranspiration.

Lors de l'installation des piézomètres, on souhaitait aussi minimiser les pertes et l'érosion des différentes couches du substrat. À l'aide d'un carottier russe avec échantillonneur de 4 cm de diamètre, un trou à peine plus petit que le diamètre extérieur des piézomètres (4,8 cm) a pu

être creusé pour faciliter l'insertion. Les piézomètres ont été installés en nids proche de certains puits stratégiques (Tableau 2.3) : un tous les 50 cm jusqu'au fond de la tourbière (Annexe B). Une journée ou deux après leur installation les piézomètres ont été vidés à l'aide d'une pompe à kayak et d'un boyau d'arrosage, une boue peu épaisse s'étant formée malgré tout lors du déploiement. Bien vider l'eau des puits permet de s'assurer que le matériel fin, résultant de l'érosion, ne formera pas une couche de faible conductivité au niveau de l'entrée d'eau. Notons que seule la tourbière de la Nécopastic a été instrumentée avec des piézomètres.

Les mesures de hauteur dans les piézomètres ont été prises manuellement, avec un bulleur, sept fois pendant la campagne : le 11-06-2007, le 30-07-2007, le 20-08-2007, le 15-10-2007, le 13-06-2008, le 17-06-2008 et le 26-07-2008. Enfin, un capteur de pression a été installé dans le piézomètre à 150 cm au centre de la tourbière, proche du puits N12 afin d'enregistrer en continu (i.e., aux 15 min) les fluctuations de la charge hydraulique à cette profondeur. Ce piézomètre a été nommé NPI.

the second s		
Puits à proximité	Profondeurs (cm)	
N21	50-100-150	
N10	50-100-120	
N12	50-100-150-180	
N13	50-100-150-180	
N9	50-	
N5	50-100	
N14	50-100-134	
N15	50-100-114	
N16	50-100-140	
	Puits à proximité N21 N10 N12 N13 N9 N5 N14 N15 N16	

Tableau 2.3 : Récapitulatif du nombre de piézomètres installés par nid et leurs puits associés.

46

2.6.2 Mesure de la conductivité hydraulique

La méthode utilisée pour estimer la conductivité hydraulique à différentes profondeurs a été développée à partir de la méthode de Baird *et al.* (2004). Le principe est de minimiser la détérioration de la tourbe pendant le déploiement du dispositif et de s'assurer d'enregistrer une mesure fidèle à la réalité. Les piézomètres dont l'installation a été décrite plus haut ont été utilisés pour estimer la conductivité hydraulique à différentes profondeurs sur la tourbière de la Nécopastic.

Après leur déploiement initial, il a fallu quelques jours avant que le niveau de la nappe se stabilise dans les piézomètres, particulièrement dans les zones de faibles conductivités. Bien que les piézomètres aient été installés au mois de juin 2007, les tests de conductivité n'ont donc pu être effectués qu'au mois d'août 2007 et de juin 2008.

Lorsqu'on effectue des tests de conductivité sur un nid de piézomètres, il est recommandé de débuter par les piézomètres les moins profonds. Cependant, il semblerait préférable de commencer d'abord par les zones moins conductrices, souvent les plus profondes, à cause du temps mis par la nappe pour récupérer son niveau initial. Un test de conductivité se déroule alors de la façon suivante :

- insertion d'un capteur de pression sous le niveau d'eau et d'un capteur de pression barométrique autonome proche de la surface du puits pour enregistrer la pression atmosphérique en simultanée ;
- attendre que la nappe récupère son niveau initial. Les variations du niveau peuvent être contrôlées au bulleur ;

- augmenter le niveau d'eau, en insérant par exemple un objet, ou simplement en rajoutant un volume d'eau connu ;
- attendre que la nappe ait récupéré son niveau initial ; et
- télécharger les données du Levelogger et du Barologger.

Notons qu'il est préférable d'insérer un objet dont l'équivalent en volume d'eau est connu. En effet, par rapport à l'ajout d'eau, le volume ajouté est instantané et la qualité de l'eau n'est pas modifiée (Surridge *et al.*, 2005). À chaque fois, le dispositif est resté en place au minimum une demi-journée mais souvent une journée complète voire même deux jours pour les zones de plus faibles conductivités afin d'être sûr de ne pas manquer le rabattement complet de la nappe. La conductivité peut ensuite être calculée d'après l'équation de Hvorslev (1951) ci-dessous, tirée de Baird *et al.* (2004) :

$$K = -\frac{A}{F^*t} Ln\left(\frac{h}{h_0}\right)$$
(2.5)

Avec :

K : Conductivité hydraulique [en cm/s]

A : Surface d'un disque de même rayon interne que le piézomètre (r= 2 cm) [en cm²]

 $A = 12.6 \text{ cm}^2$ pour ces piézomètres

F : Facteur de forme de la prise d'eau du piézomètre [en cm]

t: Temps que la nappe prend pour récupérer son niveau initial (i.e. niveau avant l'insertion) [en s]

 h_0 : Différence de la hauteur d'eau par rapport au niveau initial à t = 0 [en cm]

h : Différence de la hauteur d'eau par rapport au niveau initial à t [en cm]

Le facteur de forme de l'ouverture F, pour des piézomètres comme ceux utilisés dans cette étude, peut être calculé à partir de la formule empirique de Hvorslev (1951 dans Baird *et al.*, 2004) :

$$F = \frac{2.4\pi l}{Ln(1.2l/d + \sqrt{1 + (1.2l/d)^2})}$$
(2.6)

Avec :

l: longueur des stries de la prise d'eau (9.8 cm)

d: diamètre extérieur du tube ABS (4.8 cm)

F est donc égal à 116,5 cm pour tous les piézomètres utilisés. La conductivité a été calculée à toutes les profondeurs répertoriées dans le Tableau 2.3, afin de comparer ces valeurs à celles déjà présentes dans la littérature et selon les caractéristiques des différents types de tourbe. Le but est également de tester et discuter la méthode développée par Baird *et al.* (2004) appliquée à des tourbières ombrotrophes.


3 RÉSULTATS

La pertinence de chacun des sites d'études sera d'abord montrée à partir de leur description écologique et morphologique. Puis les fluctuations de nappes et de débits, ainsi que la relation les liants seront présentées en fonction du temps, afin de faire sortir le comportement particulier de chaque tourbière. Ensuite, à partir des mesures complémentaires acquises sur la tourbière de la Nécopastic, notamment au cours de l'été 2008, quelques caractéristiques particulières des tourbières ombrotrophes pourront être mises de l'avant. Pour terminer, les mesures de conductivité hydraulique et de fluctuations de la nappe obtenues avec la méthode de l'aimant seront présentées.

3.1 Description écologique et morphologique des sites d'études

3.1.1 La tourbière de la Nécopastic

Le bassin versant de la tourbière de la Nécopastic a été dans un premier temps délimité par photo-interprétation en considérant seulement l'information topographique délimitant la ligne naturelle de partage des eaux (figure 3.1). Les lignes de puits N1, N3, N4, N5 et N6, N7, N8 ont été déployées de part et d'autres de cette limite afin de vérifier le sens de l'écoulement et la connectivité des deux zones tourbeuses à l'ouest et au sud-ouest du bassin versant. Sur la ligne N6 vers N14, les relevés GPS indiquent que l'altitude maximum est entre N7 et N8. La pente descendante de chaque côté semble donc indiquer la ligne de séparation des eaux. De

même, sur la ligne de puits N1 à N5, au point N4 on trouve l'altitude maximale en même tant qu'une forte diminution de la profondeur de tourbe.

Sur la figure 3.1, la ligne jaune représente donc le bassin versant tel que délimité après photointerprétation, et la ligne rouge, la frontière du bassin corrigée avec les altitudes sur la tourbière. La ligne noire délimite la tourbière de la Nécopastic proprement dite. Utiliser la ligne rouge plutôt que la jaune ne diminue la superficie du bassin versant que de 4%. Dans ce cas la tourbière occupe 63 % du bassin versant. Comme l'ont confirmé les relevés topographiques à l'ouest de la tourbière, l'eau semble donc couler par gravité de N3 vers N1 en direction d'un exutoire diffus. De même, l'eau semble se déplacer préférentiellement de N7 vers N6 pour ensuite s'écouler dans un exutoire également diffus le long d'un ruisseau. Notons néanmoins que la nappe phréatique de la tourbière reste étroitement connectée avec ces zones de tourbe. L'influence de ces connections semble toutefois minime par rapport aux patrons généraux de circulation d'eau dans la tourbière. Ceux-ci suivent le dénivelé du site, de l'altitude la plus élevée au sud et à l'est vers l'exutoire au nord-ouest (figure 3.2).



Figure 3.1 : Délimitation du bassin versant de la tourbière de la Nécopastic. La ligne jaune représente le bassin-versant délimité par photo-interprétation et la ligne rouge, celui délimité après avoir mesurer la variation de l'altitude sur le terrain.





La tourbière de la Nécopastic, d'une superficie de 97 ha, présente une profondeur de tourbe moyenne de 120 cm avec des maximums de 190 cm mesurés au centre de la tourbière, soit à proximité des puits N12 et N13.

Par interpolation, à partir de profondeurs relevées aléatoirement sur toute la surface de la tourbière, la topographie du fond de la tourbière a pu être établie. Deux profils transversaux ont pu être extraits : du nord au sud (figure 3.3a) et d'ouest en est (figure 3.3b). Le référentiel considéré z = 0 m est la surface de la tourbière, simplifiée comme étant une surface plane. Un dénivelé de 8 m existe de l'extrémité sud-est à l'extrémité nord-ouest de la tourbière.





Il existe plusieurs types d'écosystèmes différents et plusieurs types de profils de tourbe au sein de cette tourbière. Des prélèvements de tourbe, appuyés par des relevés de végétation, permettent de regrouper certains puits d'après différents types d'environnement (figure 3.4). Le degré de décomposition de la tourbe est représenté, d'après l'échelle de Von Post, par les valeurs H1 à H10, de la tourbe la moins à la plus décomposée. Cette échelle est basée sur des appréciations tactiles et visuelles (compaction, humidité, élasticité) de la tourbe, faites directement sur le terrain.



Figure 3.4 : Comparaison de la répartition des occupations du sol majeures et des associations de puits pour la tourbière de la Nécopastic.

• Zone ombrotrophe peu profonde arbustive (N1-N3-N4) : La profondeur moyenne de tourbe est d'environ 70 cm avec une alternance de buttes et de dépressions. Le profil de tourbe (figure 3.5a) est assez hétérogène avec un empilement de couches bien et moins bien décomposées (H2 à H6) pour terminer en profondeur avec un taux de décomposition très élevé (H7). L'épinette noire (*Picea mariana*) et le mélèze (*Laryx laricina*) dominent la strate arborescente alors qu'on retrouve essentiellement *Rhododendron* groenlandicum (thé du Labrador) et Kalmia angustifolia pour les arbustes. Les herbacées, bien que peu abondantes, sont représentées sur les buttes par Eriophorum spissum et dans les creux par Carex perciflora et Carex paupercula. Les mousses présentes sont Polytrichum strichum et Pleurozium schreberi. Enfin, pour les sphaignes, Sphagnum fuscum colonise les buttes et *Sphagnum russowii* les dépressions. De manière générale, c'est un écosystème tourbeux peu profond moyennement boisé avec une strate arbustive moins dense et une recrudescence de lichen (*Cladonia sp.*). à mesure que l'on se rapproche de N4 (i.e en direction de la tourbière).



Figure 3.5 : N1-N3-N4. Profil de tourbe (a) et végétation dominante (b)

• Partie ombrotrophe centrale \square (N11-N12): On y retrouve l'épaisseur de tourbe maximale de tout le site (190 cm à N12), en zone ombrotrophe. Le profil de tourbe est plutôt homogène dans le premier mètre avec une alternance de couches peu décomposées H2 et H3. Les arbres sont très espacés, avec une majorité de petites épinettes noires (*Picea mariana*) et quelques mélèzes (*Laryx laricina*) et pins gris éparses (*Pinus banksiana*). *Rhododendron groenlandicum* et *Kalmia angustifolia* dominent la strate arbustive où l'on retrouve également quelques spécimens de *Vaccinium oxycoccos*. Les herbacées, peu nombreuses dans les dépressions, sont principalement *Eriophorum spissum* et *Carex pauciflora*. On note une forte abondance de lichen (*Cladonia sp.*) et de *Polytrichum strichum* sur les buttes alors que *Pleurozium schreberi* est presque absente. Les espèces de sphaignes dominantes sont

Sphagnum fuscum, Sphagnum capillifolium et *Sphagnum cuspidatum*. Cette zone semble être le centre de la tourbière, la partie la plus profonde et donc probablement la plus ancienne.



Figure 3.6 : N11-N12. Profil de tourbe (a) et végétation dominante (b)

• Zone très humide avec de la tourbe d'herbacées (N16-N17) : Plus à l'est de la tourbière, ces deux puits ont été déployés entre un environnement plus humide (N10-N15) et le bord de la tourbière plus sec (N18-N19). Il y existe une alternance de petites buttes et de creux transformés en mares intermittentes lorsque la tourbière est fortement saturée. On y retrouve quelques mélèzes et petites épinettes noires peu denses alors que *Kalmia polifolia* et *Rhododendron groenlandicum* occupent une grande partie de l'espace. *Vaccinium macrocarpon* et *Chamaedaphne calyculata* sont présents en plus faible abondance. Quelques espèces d'herbacées poussent dans les dépressions. Du lichen, *Mylia anomala* et *Aulacomnium palustre* colonisent les buttes avec les espèces de sphaignes *Sphagum fuscum* et *Sphagnum capillifolium. Sphagnum fallax* est bien présente dans les mares intermittentes. Le profil de tourbe est plutôt gradué avec la profondeur, de peu décomposé proche de la surface à fortement décomposé dans le fond. Il n'y a pas de rupture brutale entre deux horizons. La

particularité de ce profil est qu'il présente beaucoup de fibres et de racines d'herbacées à presque toutes les profondeurs, ce qui laisse supposer un environnement très humide et peutêtre la présence de mares dans le passé.



Figure 3.7 : N16-N17. Profil de tourbe (a) et végétation dominante (b)

• Mares • (N6-N8-N10-N13-N15) : La tourbe est très uniforme sur tout le profil et généralement peu décomposée (H2 à H4) avec la présence de beaucoup de fibres d'herbacées. La profondeur maximale peut varier entre 120 et 150 cm. Quelques petites épinettes noires apparaissent sur les buttes et dans les zones les moins humides mais c'est *Laryx laricina*, généralement de petite taille qui dominent les arbustes. Ce type d'environnement est surtout peuplé d'herbacées et de quelques plantes carnivores comme *Drosera rotundifolia* et *Sarracenia purpurea* (Sarracénie pourpre). On retrouve *Carex limosa*, *Carex pauciflora*, *Carex exilis*, *Carex oligosperma* et *Carex lasiocarpa* mais aussi *Eriophorum spissum*. Les éricacées sont presque absents mis à part quelques *Vaccinium oxycoccos* ou *Kalmia angustifolia*. Le thé du labrador est plutôt rare. Les espèces de sphaignes aquatiques sont abondantes comme le prouve la présence de *Sphagnum fallax* dans les zones les plus humides. Mais *Sphagnum fuscum* et *Sphagnum rubellum* sont également présentes. Ce type de profil de

tourbe et de végétation, très uniformes, correspondent à un environnement très humide peu décomposé, et très herbacé proche de mares.



Figure 3.8 : N6-N8-N10-N13-N15. Profil de tourbe (a) et végétation dominante (b).

• Milieu de transition \diamondsuit (N5-N7-N14) : Ces trois puits sont à des interfaces entre des mares et des zones plus ombrotrophes. Le profil de tourbe est très semblable à celui décris plus-haut (figure 3.8a), c'est à dire assez homogène sur toute la hauteur, peu décomposé (H2 à H4 pouvant aller jusqu'au H5 dans le fond) et constitué principalement de fibres et de racines de carex. La seule différence notable est en surface où les sphaignes sont la végétation dominante et où les espèces arbustives et arborescentes prennent le dessus sur les herbacées. Ces puits sont situés dans des milieux de transition.

• Partie marginale (N18-N19-N20) : La particularité de ces trois puits est la proximité avec le lag en bordure de la tourbière. La profondeur de tourbe varie entre 70 cm et 120 cm et atteint seulement 30 cm proche de N19. On remarque généralement un horizon

uniforme peu décomposé entre 15 et 80 cm de profondeur au dessus d'un horizon très foncé et très décomposé. La coupure entre les deux horizons est nette. Les arbres de taille moyenne dominent la végétation. On retrouve *Picea mariana* en abondance et quelques éricacées, particulièrement *Kalmia angustifolia* et *Chamaedphanae calyculata*. Quelques herbacées sont présents dont des buttes d'*Eriophorum spissum* et des pieds de chicouté (*Rubus chamaemorus*). Ce type d'environnement est surtout dominé par *Pleurozium schreberi* et différentes espèces de lichens (*Cladonia sp.*). On y retrouve aussi *Sphagnum capillifolium*, *Sphagnum fuscum* et *Sphagnum rubellum*. En résumé c'est un milieu assez forestier, ouvert, et généralement mieux drainé que le reste de la tourbière.



Figure 3.9 : N18-N19-N20. Profil de tourbe (a) et végétation dominante (b)

Deux puits ne peuvent être classés parmi les groupes précédents à cause de leurs trop grandes différences :

• Zone ombrotrophe forestière ouverte ● (N21) : Les relevés écologiques proches de N21 sont très semblables à ceux voisins de N18, N19 et N20, à cause de la proximité avec la bordure de la tourbière. Le profil de tourbe est cependant beaucoup plus semblable à ceux du

centre de la tourbière (proche de N12), avec une évolution croissante et graduée de l'état de décomposition de la tourbe avec la profondeur.

• Zone ombrotrophe forestière fermée • (N9) : En même temps qu'une faible épaisseur de tourbe, cette zone au sud de la tourbière est certainement la plus forestière avec une abondance d'épinettes noires de bonnes dimensions (7 à 8 m de haut) et quelques mélèzes. *Rhododendron groenlandicum* est le principal éricacées bien que *Kalmia polifolia* et *Kalmia angustifolia* soient aussi présents. *Eriophorum spissum* et *Carex pauciflora* domine les herbacées. *Pleurozium schreberi* est la mousse la plus abondante. Chez les sphaignes on note la présence de *Sphagnum fuscum*, *Sphagnum angustifolium* et quelques *Sphagnum fallax* dans les mares intermittentes formés par les chutes d'arbres.



Figure 3.10 : N9. Profil de tourbe (a) et végétation dominante (b)

3.1.2 La tourbière de l'Aéroport

La tourbière de l'aéroport a été moins inventoriée que celle de la Nécopastic. Elle fut initialement instrumentée parce qu'elle ne semblait posséder qu'un seul exutoire. Finalement, les travaux de terrain ont mis en évidence, au sud-ouest, une zone où le sens d'écoulement est plus difficile à déterminer (figure 3.11). Par conséquent, l'exutoire instrumenté ne draine peut-être pas uniquement le bassin versant initialement délimité (en rouge sur la figure 3.11). De plus, l'écoulement dans cette zone n'a pas pu être confirmé avec une ligne de puits comme sur la tourbière de la Nécopastic. En outre, le lac, bien qu'il soit à proximité, ne semble pas s'écouler vers la tourbière mais plutôt par son exutoire au sud-ouest. Dans ce cas, même s'il n'est pas clair que toute l'eau contenue dans la partie sud de la tourbière s'écoule en direction du canal trapézoïdal, il semble très peu probable que le lac contribue à l'écoulement. Les mesures de nappes et de débits peuvent alors servir à montrer et confirmer le comportement particulier des milieux humides. En effet, comme nous le verrons par la suite, l'écoulement enregistré à l'exutoire semble quand même typique d'une tourbière majoritairement ombrotrophe.



Figure 3.11 : Délimitation du bassin versant de la tourbière de l'Aéroport

Le canal trapézoïdal est installé au sud-est de la tourbière dans un petit ruisseau qui traverse quelques buttes de sphaignes établies dans un rétrécissement entre deux forêts de pins gris sur lichen. Le puits A1, proche de la zone mal définie du bassin versant est placé dans une région plus ombrotrophe avec alternance de buttes et de dépressions à l'est de grandes mares. La profondeur de tourbe est d'environ 70 cm avec un profil très homogène sur toute la hauteur, peu décomposé (de H2 à H4) avec une abondance de fibres de carex (figure 3.12a). Quelques petites épinettes et mélèzes colonisent ont colonisés les buttes mais la végétation dominante reste les herbacées à cause de la proximité avec les mares.



Figure 3.12 : A1. Profil de tourbe (a) et végétation dominante (b)

A2 est quant à lui installé au milieu d'une zone plus marécageuse peuplée d'herbacée, par laquelle semble se drainer une bonne proportion de la partie ombrotrophe au nord de la tourbière. Avec 40 cm de profondeur de profondeur presque pas décomposée, cet environnement est peuplé d'herbacées et d'espèces de sphaignes aquatiques non identifiées. Il n'y a aucun arbres ni éricacées dans cette zone (figure 3.13).



Figure 3.13 : Zone marécageuse dont le niveau de nappe a été suivi avec le puits A2.

3.2 Suivi du niveau de la nappe phréatique et du débit

Pour les deux tourbières, les profondeurs des nappes phréatiques, les débits à l'exutoire et les précipitations ont été représentés en fonction du temps (2007 : Figure 3.15 et 2008 : Figure 3.16). Notons avant tout que pour les deux canaux trapézoïdaux, lorsque la hauteur d'eau dépasse la hauteur maximale du canal (i.e., 41 cm ou 16 po soit 0,221 m³/s), les données ont été ignorées (ligne en pointillés rouges sur les figures 3.15b et 3.16b). En effet, les canaux ont été installés dans des zones avec peu de relief et estimer le débit lorsque l'eau passe par dessus le canal est assez aléatoire et peu précis. La coupe transversale réalisée au canal de la tourbière de la Nécopastic illustre bien cette difficulté (Figure 3.14).



Figure 3.14 : Schéma en coupe de la hauteur d'eau maximale enregistrée dans le canal trapézoïdal de la tourbière de la Nécopastic.

Les résultats seront dans un premier temps présentés pour chacune des deux années de suivi pendant la saison hors-gel, d'abord du 13 juin au 27 octobre 2007, puis du 22 avril au 23 septembre 2008. Ensuite, deux évènements seront comparés pour chacune des tourbières afin de mettre en avant leur comportement particulier de rétention d'eau.

3.2.1 Suivi de l'année 2007

Notons d'abord que 2007 a été une année extrêmement pluvieuse pour la région de La Grande Rivière, en fait la 6^{ème} en abondance depuis 1976, tel qu'enregistré à l'Aéroport La Grande Rivière A (CRIACC, 2009). En effet, il n'y a quasiment pas eu de précipitations avant le 9 juillet alors que pour le reste de l'été et l'automne, il a plut presque en permanence avec des évènements de fortes intensités. Il est tombé 522 mm d'eau du 13 juin au 31 octobre dont 513 mm après le 9 juillet.



Figure 3.15: Nappe, débit et précipitations du 13 juin au 31 octobre 2007. Tourbière de la Nécopastic : (a) précipitations journalières, (b) débits mesurés à l'exutoire, (c) profondeurs de la nappe phréatique enregistrées dans NPU et profondeurs d'eau mesurées dans le piézomètre avec une ouverture à 1,50 m (NPI). Tourbière de l'Aéroport : (d) débits mesurés à l'exutoire, (e) profondeurs de la nappe phréatique enregistrées dans les puits A1 et A2.

Du 13 juin au 9 juillet 2007, il n'y a pas d'augmentation significative du débit à l'exutoire de la tourbière de la Nécopastic. En même temps le niveau de la nappe dans NPU diminue. Une remontée d'environ 5 cm survient toutefois le 28 juin après que 5,9 mm de pluie soient tombés dans la nuit du 27 au 28. Le niveau d'eau dans le piézomètre ouvert à 1,50 m reste assez stable pendant cette période. Notons que pendant quelques heures, le 9 juillet, le niveau dans le puits NPU est le même que dans le piézomètre NPI. Pour la tourbière de l'Aéroport, les observations sont similaires, le débit reste négligeable pendant toute cette période. Il semble même que parfois il n'y ait pas d'eau dans le canal. Les niveaux d'eau dans les puits A1 et A2 diminuent doucement, à peine affectés par quelques précipitations. Entre le 29 juin et le 9 juillet, le niveau d'eau dans A2 serait même descendu en dessous du capteur de pression submersible puisque les données enregistrées correspondent aux pressions barométriques extérieures.

Le premier évènement de pluie d'importance a lieu le 9 juillet (12 mm de pluie en 8 heures) et l'augmentation du débit dans le canal reste négligeable. Le niveau de la nappe phréatique remonte par contre de presque 15 cm. Ce n'est que l'évènement survenu du 11 au 13 juillet (plus de 40 mm en 2 jours) qui génère la première hausse de débit sur la Nécopastic, qui reste toutefois faible (0,016 m³/s). Ces précipitations provoquent aussi la remontée de la nappe proche de la surface au centre de la tourbière. Le niveau d'eau dans le piézomètre augmente beaucoup plus tranquillement, environ 5 cm pour ensuite rester assez stable jusqu'à la fin du mois de juillet. Le débit redevient alors négligeable et la nappe phréatique redescend en dessous de 10 cm de profondeur. Le débit à la tourbière de l'Aéroport reste négligeable alors que le niveau de la nappe dans A1 remonte d'un coup de 35 cm le 11 juillet. Dans A2, le niveau augmente en deux temps pour arriver à 10 cm de la surface le 13 juillet seulement.

Le 23 juillet un orage apporte plus de 20 mm d'eau en moins de 3 heures ce qui provoque une remontée de la nappe d'une dizaine de centimètres sur la tourbière de la Nécopastic et la génération d'un faible débit. À partir de cette date, la nappe phréatique ne redescendra jamais en dessous de 10 cm de profondeur jusqu'à la fin de l'année 2007. Toujours aucun débit n'est enregistré sur le site de l'Aéroport. Le niveau d'eau dans A1 était redescendu en profondeur et subit une nouvelle augmentation de 20 cm alors qu'en A2, la nappe qui n'avait presque pas bougée, remonte de seulement quelques centimètres.

Dans la nuit du 26 au 27 juillet, 43 mm de pluie tombent dans la zone d'étude et provoquent une première sortie d'eau importante sur le site de la Nécopastic avec un débit de pointe de 0,121 m³/s enregistré le 27 juillet à 12:45. En même temps la nappe phréatique remonte au dessus de la surface. NPU étant installé dans une dépression, cela ne signifie pas nécessairement que toute la tourbière est sous l'eau mais plutôt que les dépressions se retrouvent inondées pendant ce laps de temps. L'intensité de cette pluie provoque même la remontée rapide de 5 cm du niveau d'eau dans le piézomètre. C'est cet évènement qui amène aussi la première augmentation de débit, somme toute encore négligeable, sur la tourbière de l'Aéroport. Cette fois-ci encore, la nappe dans A1 qui était redescendue rapidement jusqu'à 25 cm de profondeur subit une bonne augmentation pour atteindre le même niveau d'eau qu'en A2 proche de la surface de la tourbe.

À partir de cette date, les précipitations vont être assez soutenues tout au long de l'été et de l'automne. Par conséquent, le niveau de la nappe phréatique sur la tourbière de la Nécopastic restera élevé jusqu'à la fin du mois d'octobre, c'est à dire au dessus de 10 cm de profondeur. À partir de début septembre, elle sera même en permanence entre 5 cm de profondeur et 5 cm au dessus de la surface. En même temps, le niveau d'eau dans le piézomètre augmente tranquillement tout au long de l'été avant de se stabiliser autour de 10 cm à partir de début septembre. Notons que l'absence de données entre le 30 juillet et le 10 août est due au temps que le niveau d'eau a mis à se rétablir suite à la vidange du piézomètre. Pendant toute cette période, le débit dans l'exutoire va être beaucoup plus sensible, réagissant par des bonnes hausses de débit presque à tous les évènements d'importance. Les précipitations plus faibles vont même maintenir un débit de base qui ne descendra plus en dessous de 0,015 m³/s. Pour l'Aéroport, ce n'est que les précipitations du 12 et du 13 août (38 mm), qui vont amener la première génération importante du débit jusqu'à 0,17 m³/s, entretenue par une vingtaine de millimètres de pluie tombés jusqu'au 17. En même temps les niveaux d'eau dans A1 et A2, qui dorénavant fluctuent de manière identique, vont augmenter de 10 cm. Dès lors, ils ne redescendront plus significativement en dessous de cette profondeur d'ici à la fin de l'année. L'écoulement au canal diminue rapidement après ces évènements jusqu'à devenir presque nul.

Le mois de septembre 2007 est assez particulier de part la quantité et l'intensité des précipitations : il est tombé 210 mm d'eau au cours du mois. D'abord, les 2 et 3 septembre, 50 mm de pluie génèrent de fort débits sur les deux tourbières en même temps qu'une remontée de la nappe instantanée. Ces conditions humides sont par la suite entretenues durant tous le mois de septembre par l'apport régulier de précipitations. C'est pourquoi lorsqu'il tombe 20 mm d'eau le 19 septembre, puis 50 mm les 22 et 23 et encore 23 mm le 25 septembre, les deux tourbières se retrouvent sursaturées et on enregistre des hausses de débit assez spectaculaires. Sur la tourbière de la Nécopastic, l'eau serait passée 4 cm au dessus du canal et 10 cm sur le site de l'Aéroport. Le débit sur les deux sites finit ensuite par rediminuer

jusqu'à la fin du mois d'octobre alors que les niveaux de nappe restent élevés, près de la surface des tourbières.

3.2.2 Suivi de l'année 2008

Pour l'année 2008, il est important d'observer tout de suite que les données de débit pour la tourbière de la Nécopastic ne sont représentées qu'à partir du 17 Mai. Un dysfonctionnement du capteur de pression installé dans le canal, probablement dû au gel, entre le 7 février et le 16 mai 2008, a empêché d'obtenir des mesures exactes avant cette date. La débâcle printanière pour ce site ne figure donc pas sur le graphique. Pour le puits A2, à l'Aéroport, un animal a endommagé le dispositif au cours de l'hiver. Puisqu'il n'a pas été possible de déterminer le moment exact du bris, nous avons préféré ne pas accorder de crédibilité aux mesures enregistrées.

De manière générale, on remarque dans un premier temps que l'année 2008 a été une année moins pluvieuse que 2007, avec seulement 369 mm de pluie enregistrés entre le 22 avril et le 24 septembre. Il n'y a pas eu de précipitations très importantes avant la période du 13 au 20 juin. Avec 60 mm de pluie tombés en une semaine, cette période reste une des plus humides de l'année 2008, avec le milieu de l'été lorsqu'il s'est accumulé 55 mm d'eau entre le 25 et le 28 juillet. Par comparaison, ces deux périodes cumulées représentent presque un tiers des précipitations estivales de 2008.



Figure 3.16: Nappe, débit et précipitations du 22 avril au 24 septembre 2008. Tourbière de la Nécopastic : (a) précipitations journalières, (b) débits mesurés à l'exutoire, (c) profondeurs de la nappe phréatique enregistrées dans NPU et profondeurs d'eau mesurées dans le piézomètre avec une ouverture à 1,50 m (NPI). Tourbière de l'Aéroport : (d) débits mesurés à l'exutoire. (e) profondeurs de la nappe phréatique enregistrées dans le puits A1.

Les données de profondeur de nappe phréatique sur la tourbière de la Nécopastic montrent d'abord que le niveau d'eau aurait été au moins 10 cm au dessus de la surface au moment de la fonte printanière, alors que le niveau d'eau dans le piézomètre est à sont plus bas (environ 25 cm de profondeur). À l'Aéroport, le niveau de la nappe, bien que très élevé ne semble pas avoir atteint de tels extrêmes. Pour ce qui est de la débâcle, le débit enregistré au site de l'Aéroport montre une augmentation fulgurante le 22 avril. Le débit passe de 0 à 0,22 m³/s en 24 heures avec vraisemblablement une hauteur d'eau de plus de 30 cm au dessus du canal enregistrée le 28 avril. Par la suite la profondeur de la nappe reste assez élevée, entretenue par les faibles précipitations, mais constantes, de la fin du mois d'avril à la mi-mai. Par ailleurs, après la débâcle une autre augmentation importante du débit a lieu les 4 et 5 mai à la suite de précipitations de faible intensité (11 mm en 2 jours). Pour la tourbière de la Nécopastic, le niveau de la nappe phréatique redescend pendant les mois de mai et juin alors que le niveau d'eau dans le piézomètre remonte jusqu'à se stabiliser entre 15 et 20 cm de profondeur.

Ensuite, les niveaux d'eau dans NPU et NPI sont affectés par les précipitations du mois de juin en particulier par celles de la semaine du 13 au 20. Cela provoque une remontée d'une dizaine de centimètres dans les deux puits. En même temps, une bonne augmentation du débit est enregistrée à l'exutoire de la tourbière de la Nécopastic. Le débit de pointe est de 0,077 m³/s et correspond également au débit maximum mesuré en 2008. Pour la tourbière de l'Aéroport le niveau dans A1 ne semble que faiblement affecté, de même que le débit à l'exutoire.

Pour le reste de l'été et le début de l'automne sur les deux sites d'études, le débit ne fluctue presque plus jamais à part une petite hausse enregistrée fin septembre dans le canal de la Nécopastic. Il semble même qu'il n'y ait pas eu d'eau dans l'exutoire de la tourbière de

l'Aéroport de la fin du mois de juin jusqu'à la fin du mois de septembre. En outre, un épisode de sécheresse intense semble être survenu entre le 14 et le 25 juillet. Cette dizaine de jours de sécheresse est associée à des températures relativement élevées : moyenne de 16,4°C entre le 14 et le 25 juillet et 20,3°C de moyenne entre le 21 et le 25 juillet. À cette période, le niveau de la nappe sur la tourbière de la Nécopastic redescend jusqu'à devenir inférieur au niveau d'eau dans le piézomètre à 1,50 m. De même à l'Aéroport, la nappe descend en dessous de 40 cm de profondeur. Même si les précipitations importantes du 25 au 28 juillet 2008 contribuent à remonter le niveau de la nappe sur les deux tourbières, celle-ci restera généralement basse jusqu'à la fin de l'été : entre 5 cm et 15 cm de profondeur pour la tourbière de la Nécopastic et généralement entre 10 cm et 25 cm pour l'Aéroport.

À partir de ces données, nous pouvons ensuite comparer pour chacune des tourbières, des évènements précis où pour une même intensité de précipitations, les milieux ont réagi de façons différentes.

3.2.3 Examens d'évènements importants

3.2.3.1 Tourbière de la Nécopastic

Entre le 1^{er} et le 3 septembre 2007, le site de la Nécopastic a reçu 51,7 mm d'eau (Figure 3.17). Avant cet évènement, la nappe était à 5,3 cm de profondeur. Les précipitations ont provoqué une remontée d'environ 9 cm jusqu'à 4 cm au dessus de la surface. Dans le même temps, mais avec un petit décalage, le débit a augmenté de façon linéaire jusqu'à 0,17 m³/s. Dans le piézomètre ouvert à 1,50 m, le niveau d'eau a monté moins brusquement pour

enregistrer au final une augmentation d'environ 3 cm seulement 4 jours après le début des précipitations.



Figure 3.17 : Comparaison de deux évènements sur la tourbière de la Nécopastic. à gauche, en conditions humides (2007) et à droite, en conditions sèches (2008).

Lors d'un évènement de même ampleur (52,5 mm) arrivé en deux temps entre le 25 et le 28 juillet 2008, la nappe phréatique était initialement à 23 cm de profondeur et est remontée jusqu'à 4 cm sous la surface. La première partie de cet évènement n'a pas influencé le débit à l'exutoire et la seconde ne l'a augmenté que de 0,010 m³/s. Il en est de même pour le niveau d'eau dans le piézomètre qui a remonté de 2 cm le 27 juillet. Avant et après cet évènement, le niveau d'eau dans celui-ci est resté assez stable.

3.2.3.2 Tourbière de l'Aéroport



Figure 3.18 : Comparaison de deux évènements sur la tourbière de l'Aéroport. à gauche, en conditions humides (2007) et à droite, en conditions sèches (2008).

Les deux évènements comparés sur la tourbière de l'Aéroport sont les mêmes que pour l'autre site d'étude. Ici, la nappe dans le puits A1 est à 9,5 cm de profondeur et les précipitations du début du mois de septembre 2007 la font remonter jusqu'à la surface. Le débit augmente très rapidement pour remplir presque le canal au complet avec un débit de pointe de 0,205 m³/s. Fin juillet 2008, alors que le niveau de la nappe est au plus bas à plus de 40 cm de profondeur, 52,5 mm de pluie le font remonter de plus de 30 cm. En même temps on n'observe aucune augmentation significative du débit.

3.2.4 Relation Hauteur de nappe-Débit

À partir de ces données, une relation liant directement la profondeur de la nappe phréatique au débit à l'exutoire peut être établie pour chacune des tourbières. La figure 3.19a présente, les données du 8 juin au 31 octobre 2007 et du 20 mai au 14 octobre 2008 pour le site de la Nécopastic. En 2008, les données semblent suivre le même patron qu'en 2007 avec des valeurs beaucoup moins élevées de débits. Un point de rupture aux alentours de 10 cm de profondeur se dessine dans ce nuage de points. En dessous de cette profondeur, il n'y a pas ou très peu d'écoulement d'eau. La même observation peut être faite pour la tourbière de l'Aéroport. Pour ce site les données représentées sont les mesures enregistrées dans A1 du 20 juin au 31 octobre 2007 et du 5 mai au 14 octobre 2008, donc sans la débâcle printanière (Figure 3.19b). De manière générale, les valeurs de 2007 et de 2008 se superposent, sauf lorsque le débit dépasse 0,10 m³/s. En effet, en 2008, pour un même débit la nappe était plus haute dans A1 qu'en 2007. Le point de rupture du nuage de points est à 11 cm de profondeur et l'étalement des points est moins grand que pour la tourbière de la Nécopastic.



Figure 3.19 : Profondeur de la nappe phréatique en fonction du débit à l'exutoire (a) Site de la Nécopastic, et (b) Site de l'Aéroport

Les couples de données hauteur de nappe-débit peuvent ensuite être représentés de manière logarithmique pour faire ressortir les tendances en dessous et au dessus du point de rupture. La figure 3.20 représente donc pour chaque site le logarithme (base 10) du débit en fonction du logarithme (base 10) de l'élévation. Pour chaque mesure de profondeur, on exprime la hauteur de la nappe au dessus d'un référentiel situé à 50 cm de profondeur. Celui-ci correspond à la profondeur maximale théorique de la nappe phréatique pouvant être atteinte sur les deux tourbières. La transformation des données de profondeur de nappe en hauteur par rapport à une valeur fixe permet, entre autre, d'éliminer les valeurs négatives ou nulles lorsque le niveau de la nappe est égal ou au dessus de la surface.



Figure 3.20 : Logarithme de l'élévation de la nappe en fonction du logarithme du débit (a) Site de la Nécopastic, et (b) Site de l'Aéroport

Les nuages de points représentés dans les figures 3.20 a et b montrent clairement qu'il y a deux tendances en-dessous et au-dessus d'un point de rupture. Celui-ci peut-être facilement déterminé comme c'est le cas pour la tourbière de l'Aéroport. Néanmoins, dans le cas du site de la Nécopastic, il est utile d'utiliser une méthode mathématique qui détermine le point de rupture en calculant la profondeur à laquelle l'angle est maximum entre les régressions des deux nuages de points. À partir du point de rupture on peut alors séparer les valeurs en deux groupes et tracer une droite pour chaque nuage de points. On obtient alors des équations pour chacune des droites selon le modèle suivant :

$$\log(q) = a \cdot \log(h) - b \tag{3.1}$$

Avec :

q: le débit (en m³/s)

h : la hauteur de la nappe par rapport à un référentiel à 50 cm de profondeur. Soit h=50-p, p étant la profondeur de la nappe (en cm).

Ces équations peuvent ensuite être représentées sous forme de courbes logarithmiques directement superposées aux valeurs moyennes journalières de débit et de niveau de nappe (figure 3.21).



Figure 3.21 : Représentation graphique des courbes logarithmiques liant l'élévation au débit. Les valeurs ponctuelles sont les moyennes journalières des couples hauteur de nappe-débit pour la tourbière de la Nécopastic

3.2.5 Comportement hivernal et débâcle printanière

Après avoir comparé les fluctuations de la nappe phréatique et le débit à l'exutoire du printemps jusqu'au début de l'automne pour les deux années, il est intéressant d'observer le comportement hivernal. Le débit dans les canaux trapézoïdaux sur les deux sites d'études diminue après le 31 octobre 2007 pour atteindre une valeur presque nulle durant tout l'hiver.



Figure 3.22 : Représentations de la nappe, du débit, de la température de l'air et des précipitations du 23 juin 2007 au 24 septembre 2008. Les données représentées sont les moyennes journalières pour la tourbière de la Nécopastic. Pour les précipitations, il s'agit de du cumul pour chaque jour exprimé en équivalent en eau.

La hauteur d'eau enregistrée dans le canal de l'Aéroport est d'ailleurs égale à 0 du 20 novembre 2007 au 22 avril 2008. Les profondeurs de nappe dans A1 et A2 ne peuvent être correctement interprétées parce que tout indique que le gel a atteint les capteurs de pression submersibles. Bien que ces derniers aient été protégés pour cette période, la mesure de pression dans ce cas ne représente pas seulement la hauteur d'eau mais aussi la pression exercée par la formation de glace. Au contraire, sur la tourbière de la Nécopastic, les capteurs de pression dans NPU et NPI ont été déployés à environ 1 m de profondeur, en dessous de la limite maximale de gel. Pour ce site, le débit diminue tranquillement jusqu'au 15 décembre environ (figure 3.22). À partir de cette date et jusqu'au 5 février les faibles valeurs de débit enregistrées ne dépassent pas 0.005 m³/s. Les données varient donc légèrement autour de la hauteur d'eau qui est restée gelée dans le canal. Deux derniers évènements de pluie survenus les 2 et 15 novembre en même temps que des températures au dessus de 0°C ont permis d'enregistrer des augmentations de débits dans le canal, respectivement les 4 et 17 novembre. On peut alors représenter la relation hauteur de nappe-débit du 1^{er} novembre 2007 au 30 janvier 2008 (figure 3.23). On remarque qu'après avoir réagi aux derniers événements pluvieux du début du mois de novembre, le niveau de la nappe phréatique redescend tranquillement jusqu'à la fin de l'hiver alors que le débit dans le canal cesse, conséquence probable de quelques pertes par écoulement souterrain. Notons que l'hiver 2007-2008 a été très sec dans la région de la Baie de James (170 mm entre le 15 octobre et le 15 avril).



Figure 3.23 : Profondeurs de la nappe phréatique en fonction du débit à l'exutoire pour le site de la Nécopastic du 1er novembre 2007 au 30 janvier 2008 comparées aux valeurs enregistrées aux étés 2007 et 2008.

Les 6 et 30 janvier 2008, la température est remontée au dessus de 0°C (respectivement à 1°C et 1,5°C), ce qui a entrainé une faible augmentation de la nappe et du niveau d'eau dans le piézomètre à 1,50 m, conséquence probable de la fonte de la neige et de la diminution de l'épaisseur de la couche de gel. Il semble que ce soit après cet évènement que le capteur de pression submersible du canal de la Nécopastic se soit mis à dysfonctionner et n'ai pas permis l'enregistrement de la débâcle printanière. Probablement qu'après plusieurs semaines de froid intense, le fait d'exposer le puits de tranquillisation pendant quelques jours au soleil et à des températures plus élevées aurait créé un choc au capteur de pression. La remontée linéaire de la nappe entre le 16 et le 23 avril 2008 indique cependant le moment et la durée de cette fonte, soit une remontée de la nappe de 28 cm en 7 jours. L'augmentation du niveau d'eau dans le piézomètre à 1,50 m est beaucoup plus graduelle, jusqu'au 29 mai.



Figure 3.24 : Profondeurs de la nappe phréatique en fonction du débit à l'exutoire pour le site de l'Aéroport du 22 avril au 14 octobre 2008.

Pour le site de l'Aéroport, la débâcle printanière a été enregistrée et peut être incluse dans la représentation de la profondeur de la nappe phréatique en fonction du débit à l'exutoire (figure 3.24). Ces données se trouvent nettement détachées du nuage de points des autres valeurs pour le reste de l'année 2008. En fait deux évènements se distinguent. D'abord les données propres à la débâcle printanière du 22 au 31 avril, représentées par des ronds bleus sur la figure 3.24 et qui illustrent l'augmentation fulgurante du débit alors que le niveau d'eau reste toujours au dessus de la surface du sol. Pendant cette période, l'eau à l'exutoire est d'ailleurs passée par dessus le canal pendant une semaine, du 22 au 29 avril. Cela signifie que seulement une petite proportion de la débâcle est représentée sur la figure 3.24. Dans ce casci, le phénomène d'hystérèse n'est pas vraiment observable puisque lorsque le débit diminue, la nappe reste très élevée. Alors que le débit augmente, le niveau de la nappe reste constant. Le point de rupture est situé à environ 2 cm au dessus de la surface du sol. Ensuite, la hausse

du débit représentée par les triangles verts est la conséquence d'un apport d'eau par des précipitations, alors que la nappe était encore au dessus de la surface (9 mm dans la nuit du 31/04 au 01/05). Après cette remontée du débit, la relation hauteur de nappe-débit retrouve un comportement plus représentatif des autres périodes à l'étude alors que la nappe redescend en dessous de la surface.

3.3 Autres observations hydrologiques pour la tourbière de la Nécopastic

3.3.1 Bilan hydrologique

Pour certaine période des deux années de récolte, il est possible de faire une certaine estimation du bilan hydrologique sur la tourbière de la Nécopastic. Pour ce faire, on calcule la somme des sorties d'eau à l'exutoire (Q) et la somme des précipitations (P) lors d'une période où la variation de l'emmagasinement est nulle (Δ S=0). On peut alors facilement estimer l'évapotranspiration réelle pour la tourbière de la Nécopastic au début, pendant et à la fin de chaque été (Tableau 3.1). Pour chacune des périodes, une estimation de l'évapotranspiration moyenne journalière (ETR/jour) ainsi que du débit moyen journalier (Q/jour) a été faite, en même temps que le calcul de la proportion que représentent l'écoulement et l'évapotranspiration dans les sorties d'eau de la tourbière (respectivement ETR/P et Q/P).

Du	Au	Prec(mm)	Q(mm)	Q/jour	$\Delta S(mm)$	ETR(mm)	ETR/jour	ETR/P	Q/P
12/06/2007	09/07/2007	20	9.6	0.3	0	10.4	0.36	52%	48%
09/07/2007	23/07/2007	49.4	15.4	1.1	0.0	34.0	2.43	69%	31%
26/07/2007	11/08/2007	75.7	47.1	2.9	0.0	28.6	1.79	38%	62%
11/08/2007	27/08/2007	73.0	61.2	3.8	0.0	11.8	0.74	16%	84%
22/08/2007	02/09/2007	16.2	13.4	1.2	0.0	2.8	0.26	17%	83%
02/06/2008	13/06/2008	22.2	13.7	1.2	0.0	8.5	0.77	38%	62%
04/07/2008	03/09/2008	138.5	36.0	0.6	0.0	102.5	1.68	74%	26%
04/07/2008	12/07/2008	14.2	4.0	0.5	0.0	10.2	1.27	72%	28%
22/08/2008	11/09/2008	28.8	8.5	0.4	0.0	20.3	1.02	70%	30%

Tableau 3.1 : Estimation du bilan hydrologique sur la tourbière de la Nécopastic pour différentes périodes des étés 2007 et 2008.

3.3.2 Comparaisons des différents puits pour l'été 2008

3.3.2.1 Variations du niveau de la nappe phréatique

Pendant la campagne d'été 2008, des capteurs de pression submersibles ont été installés dans des puits supplémentaires sur la tourbière de la Nécopastic. Du 17 juin au 28 juillet dans les puits N5, N8, N9, N13 et N16 (Figure 3.25) et du 17 juin au 14 octobre dans les puits N10, N14 et N21 (Figure 3.26).

De manière générale, tous les puits réagissent aux précipitations. Rappelons que NPU est le puits au centre de la tourbière où est installé le capteur de pression submersible depuis le lancement du projet. Le niveau de la nappe dans le puits N5 suit le même patron de fluctuations que dans NPU. Malgré qu'en N5 la nappe soit toujours 6 cm en dessous du niveau de NPU, les deux courbes restent assez parallèles. Dans N16, au début entre le 17 et le 25 juin, la nappe était à la même profondeur que dans N5 et N8 et pourtant le 25 juillet, elle est 11 cm plus basse qu'en N8 et 6 cm que dans N5. N16 semble aussi fluctuer de la même
façon que NPU mais montre toutefois la plus grande amplitude de fluctuations de tous les puits instrumentés (30 cm entre le niveau le plus élevé et le plus bas). Dans le puits N8, le niveau d'eau diminue moins fortement que dans N5 et N16. Dans les puits N9 et N13, la nappe phréatique est toujours plus haute que dans NPU et n'est jamais descendue en dessous de 20 cm. Après un apport de pluie, lorsque que la nappe remonte, en N13 le niveau est capable de se maintenir pendant quelques jours alors que dans N9, le niveau redescend rapidement. Finalement les courbes de N9 et N8 sont relativement parallèles pendant les mois de juin et juillet 2008.



Figure 3.25 : Comparaison de la profondeur de la nappe phréatique dans les puis N5, N8, N9, N13, N16 et NPU entre le 17 juin et le 28 juillet 2008.



Figure 3.26 : Comparaison de la profondeur de la nappe phréatique dans les puis N10, N14, N21 et NPU entre le 17 juin et le 24 septembre 2008.

Au début de l'été, les niveaux dans N21 et NPU sont semblables, puis l'écart se creuse pour atteindre son maximum le 10 septembre lorsque la nappe dans N21 est plus basse de 11 cm. Somme toute, dans ces deux puits, les fluctuations de la nappe sont assez semblables. Le rabattement de la nappe dans N21 est cependant beaucoup plus rapide que dans les autres puits. Dans N14, le niveau est presque toujours le plus bas et inférieur à 10 cm. L'amplitude des fluctuations est ici d'une vingtaine de centimètres. Au contraire N10 semble réagir plus facilement aux facteurs environnementaux. Par exemple, pour une même pluie, lorsque la nappe remonte de 3 cm dans N14, elle augmente de 6 cm dans N10. Notons que la nappe en N10 se retrouve presque tout le temps entre 10 cm en-dessous et 5 cm au-dessus de la surface malgré le peu de précipitations de l'année 2008. Comme pour le puits N13 plus haut après des

précipitations, le niveau d'eau dans N10 peut rester élevé un moment alors qu'il a tendance à redescendre plus rapidement dans les autres puits.

3.3.2.2 Description hydrologique de la tourbière

En intégrant les informations ci-dessus à la description de chaque type d'environnement écologique (cf. Résultats partie 3.1.1), on peut simplifier et définir la tourbière de la Nécopastic d'après une description plus hydrologique. On simplifie les différents types d'environnement en trois écosystèmes dominants (Figures 3.27 et 3.28) :

- la zone minérotrophe : puits N5, N10, N13, N14, N16 et N17 (épaisseur moyenne d'environ 100 cm);
- la zone ombrotrophe centrale : puits N11, NPU (ou N12) et N15 (épaisseur moyenne d'environ 190 cm) ; et
- la zone ombrotrophe forestière : N4, N8, N9, N18, N20 et N21 (épaisseur moyenne d'environ 80 cm).

Les puits N1, N3, N6, N7 et N19 sont exclus de cette représentation cartographique, étant situés en dehors de la zone d'étude. Grâce aux suivis de niveaux de nappe de l'été 2008, on constate d'abord que les parties ombrotrophes forestières, situées en périphéries sont les plus sensibles aux facteurs environnementaux (évapotranspiration et précipitations). Au sud et à l'est, l'écoulement latéral est plus rapide probablement à cause de la pente (cf. Figure 3.2). Au nord, bien que la pente soit plus faible, elle semble aussi influencer le sens d'écoulement. La majorité du temps, les parties minérotrophes ont un niveau d'eau élevé. La tourbe dans ces zones est peu décomposée et essentiellement constitué d'herbacées, ce qui traduit bien un

ennoiement régulier et en même temps une bonne circulation de l'eau. La partie ombrotrophe centrale semble tamponner l'eau qu'elle reçoit des zones forestières périphériques et la relarguer tranquillement vers les zones minérotrophes qui génèrent majoritairement l'écoulement de surface. Celui-ci semble être possible suite à la saturation des couches de surface moins conductrices et semble supporter le débit à l'exutoire. Ces hypothèses sur le fonctionnement de la tourbière de la Nécopastic seront discutées plus en détails dans le Chapitre 4, Hydrologie de tourbières ombrotrophes.



Figure 3.27 : Description hydrologique de la tourbière de la Nécopastic



Figure 3.28 : Toposéquence schématique d'une coupe transversale sud-nord de la tourbière de la Nécopastic

3.3.2.3 Relation Hauteur de nappe-Débit

Si on représente pour chacun des puits la profondeur de la nappe en fonction du débit à l'exutoire, on peut appliquer la même méthode que précédemment et déterminer le point de rupture pour chaque puits de même que les coefficients des équations : a, b, c et d. Lorsque h est la hauteur de la nappe et q le débit, on obtient les équations avec les coefficients suivants :

- Si la nappe est en dessous du point de rupture, $\log(q) = a \cdot \log(h) b$
- Si la nappe est au dessus du point de rupture, $\log(q) = c \cdot \log(h) d$



Figure 3.29 : Courbes logarithmiques représentant les couples Hauteur de nappe-Débit pour tous les puits instrumentés pendant l'été 2008 : (a) juin-juillet et (b) juin à septembre

Sur la figure 3.29, la courbe logarithmique de NPU a été représentée aux mêmes dates que les puits auxquels elle est comparée pour tenir compte des conditions environnementales. Ceci implique que la valeur du point de rupture pour NPU est déplacée vers le bas pour les mois de juin et juillet 2008 (Tableau 3.2). Si on trace la courbe jusqu'au mois d'octobre, la valeur du point de rupture diminue encore plus. Lorsque la nappe est sous le point de rupture, il n'y a pas de différence significative des valeurs des coefficients *a* et *b* de l'équation (Tableau 3.2). Si elle est au-dessus du point de rupture, l'équation est plus différente si on trace juste les mois de juin et juillet 2008 que si on considère les données jusqu'au mois d'octobre.

Il existe une grande amplitude de valeurs de points de rupture pour tous les autres puits. Si pour N10, il ne se produit pas d'écoulement significatif avant que la nappe soit montée audessus de 2,9 cm de profondeur, pour N14, un débit peut être enregistré lorsque la nappe est encore à 20 cm de la surface. Les coefficients c et d qui représentent le comportement des puits lorsqu'un écoulement significatif commence à être observé présentent le plus de différences. En effet, lorsque la nappe est en dessous du point de rupture, l'équation reste assez similaire pour tous les puits (coefficient a et b). On remarque alors que N5, N8 et N16 sont très semblables au niveau des coefficients et de la valeur du point de rupture. Leurs courbes sont relativement parallèles à celle de NPU. En N13, le point de rupture est plus proche de la surface et lorsqu'il est dépassé le débit augmente très vite. Pour N9, bien que la profondeur limite pour qu'un écoulement se produise soit la même que celle de NPU, la réponse de l'écoulement est ensuite assez différente. Il faut que le niveau de la nappe continue de monter dans N9 avant qu'un bon débit soit enregistré. N21 et N14 présentent plutôt le même comportement que NPU mais avec des profondeurs de nappe beaucoup plus basses. Le puits N10 semble réagir de façon très semblable au puits N13.

Tablea	au 3.2 : Valeu	irs des poin	ts de rupture e	t des coefficients	des équations	liant la hauteur	de nappe et le
débit p	oour tous les	puits de la	tourbière de la	Nécopastic			

Puits	Point de rupture (cm)	а	b	С	d
NPU (2007-2008)	10.0	1.6695	4.954	10.926	19.793
NPU (Juin-Juillet 08)	10.6	1.5056	4.709	14.441	25.398
NPU (Juin->Octobre 08)	11.6	1.6981	5.0167	9.2137	17.004
N5	15.5	1.1857	4.11	10.873	19.008
N8	15.2	1.8176	5.1041	11.85	20.565
N9	9.2	1.9989	5.5436	10.025	18.458
N13	5.2	1.8464	5.3499	18.351	32.597
N16	16.6	0.8117	3.5217	10.746	18.658
N10	2.9	1.0453	4.0958	16.684	30.267
N14	21.4	1.0934	3.9759	9.8403	16.847
N21	14.1	1.3246	4.3077	7.6544	14.021

3.3.3 Hystérèse

Lorsqu'on considère de plus près la profondeur de la nappe phréatique en fonction du débit à l'exutoire, un effet hystérétique est observé, c'est à dire que pour une même profondeur de

nappe, deux valeurs différentes de débit ont été mesurées. Mais aussi une même valeur de débit peut correspondre à deux profondeurs de nappe différentes. La figure 3.30 illustre cet effet pour trois évènements pluvieux d'environ 50 mm, enregistrés sur la tourbière de la Nécopastic dans la partie ombrotrophe centrale (NPU). Dans les trois cas le niveau de la nappe remonte d'abord sans que le débit n'augmente beaucoup. Puis l'écoulement s'accroît fortement alors que la nappe stagne proche ou au dessus de la surface. Enfin la nappe et le débit redescendent de façon linéaire.

Lors de faibles précipitations, ce phénomène est observé à chaque fois qu'il y a une hausse significative du débit. L'intensité et la forme de cette hystérèse sont fonction de la position initiale de la nappe et de l'intensité des précipitations. Pour les évènements d'août 2007 et de juin 2008, le niveau d'eau est proche de 10 cm de profondeur lorsque la pluie se met à tomber et le débit de pointe ne dépasse pas 0,10 m³/s. Alors que pour l'évènement de septembre 2007, la nappe est à 6 cm de la surface et le débit de pointe est enregistré à 0,17 m³/s. Pour la tourbière de l'Aéroport, l'effet hystérétique n'est observable que si le débit ne dépasse pas 0,06 m³/s.

94



Figure 3.30 : Effet hystérétique pour trois évènements pluvieux enregistrés au centre de la tourbière de la Nécopastic (NPU).

3.3.4 Données piézométriques

Les niveaux d'eau ont été relevés ponctuellement à sept reprises en 2007 et 2008 dans les neuf nids de piézomètres installés sur la tourbière de la Nécopastic à proximité de neuf puits (Annexe C). Pour la suite du texte, afin de limiter la confusion, nous utiliserons les numéros de puits plutôt que les numéros de nid de piézomètres. La figure 3.31 présente les mesures de charge hydraulique relevées le 30 juillet 2007. Lorsque le niveau d'eau mesuré dans le piézomètre est supérieur au niveau de la nappe, on parle de décharge. Si la mesure est sous le niveau de la nappe phréatique, on parle de recharge (Fraser *et al.*, 2001).



Figure 3.31_: Graphiques illustrant le gradient hydraulique vertical dans les neuf nids de piézomètres sur la tourbière de la Nécopastic, le 30-07-2007. Le niveau de la nappe phréatique est représenté par une ligne mauve discontinue alors que le niveau pour chaque profondeur de piézomètre est figuré en bleu.

De manière générale les sites instrumentés représentent des zones de la tourbière où le gradient hydraulique est descendant, c'est à dire avec une charge hydraulique plus grande en surface qu'en profondeur. Pour les sites N21 (zone ombrotrophe forestière), N13 (zone minérotrophe), N12 et N15 (zone ombrotrophe centrale), le niveau d'eau dans le piézomètre à 50 cm de profondeur est plus élevé que le niveau de la nappe phréatique. En N16 (zone minérotrophe), la charge hydraulique à 1 m est toutefois plus élevée que celle à 50 cm, mais les niveaux d'eau dans les trois piézomètres sont inférieurs au niveau de la nappe. Seul N14

présente un comportement différent où le gradient hydraulique vertical est inversé. La charge hydraulique s'accroît avec la profondeur. La pression semble de plus en plus forte à mesure qu'on descend dans les horizons de tourbes. Pour ce site comme pour tous les autres, les niveaux d'eau mesurés dans les différents piézomètres sont identiques pour les neuf relevés (cf. Annexe C). Aucune inversion de gradient hydraulique n'a donc pu être observée au cours des années 2007 et 2008, à partir de ces relevés ponctuels.

Le piézomètre à 1,50 m situé au centre de la tourbière (NPI) a, quant à lui, été instrumenté avec un capteur de pression submersible. Ces donnés peuvent être représentées au cours du temps en fonction des précipitations et des fluctuations de la nappe enregistrées à NPU (Figure 3.32). On calcule la différence entre le niveau d'eau dans NPI et la profondeur de la nappe dans NPU. Lorsque le résultat est positif, on considère que la zone centrale ombrotrophe, où sont implantés ces instruments, est en recharge et lorsqu'il est négatif, elle est en décharge.

Pendant les deux années de l'étude, la partie centrale de la tourbière de la Nécopastic a été presque tout le temps en recharge. Cet état a bien été entretenu en 2007 par l'apport constant de précipitations. Durant cette année, une seule fois, des conditions de décharge ont été approchées, du 8 au 9 juillet alors que les niveaux d'eau dans NPU et NPI ont été égaux pendant presque 24 heures. En 2008, l'absence de précipitations additionnée à des températures élevées pendant une semaine a contribué à mettre la zone ombrotrophe centrale en état de décharge du 22 au 25 juillet. Au maximum, le niveau d'eau dans le piézomètre à 1,50 m a dépassé de 2,7 cm le niveau de la nappe phréatique à cet endroit. Dans ces conditions de sécheresse, c'est donc le fond de la tourbière qui semble contribuer à l'hydratation des couches supérieures de tourbes.



Figure 3.32_: Représentation journalière de la charge hydraulique dans NPI relativement au niveau de la nappe phréatique dans NPU, en fonction des précipitations. Zone ombrotrophe centrale de la tourbière de la Nécopastic du 23 juin 2007 au 24 septembre 2008.

3.3.5 Fluctuations journalières de la nappe phréatique (Figure 3.33)

La période la plus sèche de la campagne de mesures a eu lieu du 14 au 25 juillet 2008. Pendant 11 jours, il n'a pas plu sur la tourbière de la Nécopastic et la température moyenne a été de 16,4°C entre le 14 et le 25 juillet et de 20,3°C entre le 21 et le 25 juillet. Cela permet de mettre en avant l'existence de fluctuations journalières du niveau de la nappe, dépendantes en grande partie de l'évapotranspiration. Lorsqu'il fait chaud dans la journée, le niveau d'eau baisse et la nuit, il reste plutôt stable. Alors que ce phénomène est facilement observable pour tous les puits où le niveau de la nappe est proche de la surface (N13, N10 et N9), il est moins évident pour les autres. N9, situé au sud de la tourbière dans la zone forestière, montre les plus grandes amplitudes avec un maximum de 3 cm de rabattement enregistré dans la journée du 23 juillet. Pour N13, N10 (zone minérotrophe), le niveau de la nappe diminue en moyenne de 1,5 cm par jour. Les fluctuations journalières sont présentes mais plus faibles en N5 et N14 (proche de mares en zone minérotrophe), ainsi qu'en N8 et N21 (zone ombrotrophe forestière) et difficile à observer dans NPU. Pour N16 (minérotrophe), il y a un rabattement net de la nappe à chaque journée. Toutefois, il n'est plus observable après que la nappe soit descendue en-dessous de 30 cm de profondeur. De plus, pour la même période, le rabattement cumulé de la nappe le plus important est en N10, suivi de près par N16 (les deux en zone minérotrophe). Le niveau d'eau diminue le moins vite en N8, N9 (ombrotrophe forestière) et N14 (minérotrophe) alors qu'il suit la même pente dans NPU (zone centrale ombrotrophe), N5, N13 (zone minérotrophe) et N21 (zone forestière).





99

Les tests de conductivité hydraulique horizontale à saturation ont été réalisés dans la majorité des piézomètres au mois d'août 2007 et de juin 2008. Sur vingt-six piézomètres, onze ont fournis des résultats exploitables. Pour la majorité des autres, le système n'est pas resté déployé assez longtemps pour enregistrer une valeur correcte de conductivité.



Figure 3.34_: Test de conductivité hydraulique effectué sur le piézomètre à 50 cm du N16 entre le 22 et le 23 août 2007.

Lors des tests de 2007, les capteurs de pression sont restés installé plusieurs jours dans les piézomètres, permettant à chaque fois d'enregistrer le rabattement complet de la nappe. Dans la plupart des cas, le rabattement de la nappe suit une courbe logarithmique (Figure 3.34 et Annexe D). Toutefois, pour N10 à 120 cm et N5 à 50 cm, le rabattement de la nappe suit une courbe linéaire. La conductivité hydraulique ne peut donc pas être calculée avec la méthode de Baird *et al.* (2004) pour ces deux derniers piézomètres. À noter qu'entre le 22 et le 23 août 2007, il y a eu une légère augmentation du niveau de la nappe dans la tourbière, ce qui

explique que le niveau d'eau dans le piézomètre N16 à 50 cm se stabilise mais ne récupère pas complètement son niveau initial (Figure 3.34).

En juin 2008, des contraintes de temps n'ont pas permis de pouvoir attendre le rabattement complet de la nappe dans les piézomètres où la conductivité est plus faible. En même temps des pluies abondantes la nuit pourraient avoir biaisé la plupart des tests, et en particulier ceux réalisés dans les piézomètres proches de la surface. La conductivité hydraulique n'a donc pas pu être mesurée au site N10 à 50 cm et 100 cm, en N12 à 150 cm (NPI) et 180 cm, en N13 à 100 cm, 150 cm et 180 cm, en N9 à 50 cm et en N15 à toutes les profondeurs. Pour les autres piézomètres, les valeurs de conductivité hydraulique varient de 3,76.10⁻⁴ cm/s à 3,04.10⁻⁶ cm/s et sont présentées dans le tableau 3.2. Pour le nid N21, la conductivité diminue avec la profondeur. En N13, avec un profil de tourbe moyennement décomposée et dans un environnement très humide, seule la conductivité à 50 cm, a pu être obtenue $(1,18.10^{-5} \text{ cm/s})$, les autres piézomètres n'ayant pas eu le temps de récupérer leur niveau initial. Pour la partie centrale la plus ombrotrophe de la tourbière (N12), la conductivité hydraulique semble diminuer avec la profondeur. Elle est si faible à 1,50 m et 1,80 m que le dispositif de mesure n'est pas resté déployé assez longtemps pour pouvoir la mesurer. Comme pour N5, N14 a été déployé proche des grandes mares et présente un profil de tourbe identique. Les valeurs de conductivité en N14 sont du même ordre de grandeur qu'en N5 et varient peu avec la profondeur. En N16, une conductivité hydraulique de 1,28.10⁻⁵ cm/s a été mesurée à 50 cm de profondeur.

101

		Von Post	Date	Conductivité Hydraulique (cm/s)
N21	50	3	Juin 2008	3.764E-04
	100	4	Juin 2008	1.046E-05
	150	5	Août 2007	9.120E-06
N10	50	4	Juin 2008	Х
	100	4	Juin 2008	Х
	120	4	Juin 2008	Х
N12	50	3	Juin 2008	1.517E-05
	100	4	Juin 2008	3.433E-06
	150	6	Juin 2008	Х
	180	7	Juin 2008	Х
N13	50	3	Juin 2008	1.183E-05
	100	4	Juin 2008	Х
	150	4	Juin 2008	Х
	180	4	Juin 2008	Х
N9	50	4	Juin 2008	Х
N5	50	3	Juin 2008	Х
	100	4	Août 2007	9.100E-06
N14	50	4	Juin 2008	4.155E-06
	100	4	Juin 2008	3.042E-06
	134	5	Juin 2008	3.369E-06
N15	50	3	Juin 2008	Х
	100	4	Juin 2008	Х
	114	4	Juin 2008	Х
N16	50	3	Août 2007	1.278E-05

Tableau 3.3 : Conductivité hydraulique mesurée aux mois d'août 2007 et de juin 2008 pour chaque piézomètre du site de la Nécopastic et taux d'humification associé selon l'échelle de Von Post.

3.3.7 Méthode d'enregistrement du niveau maximal de la nappe

Durant l'été et le début de l'automne 2007, tous les puits de la tourbière de la Nécopastic ont été instrumentés avec le système d'enregistrement du niveau maximal de la nappe phréatique (voir Chapitre 2 Matériel et Méthodes). Rappelons que ce système consiste à pouvoir obtenir le niveau maximal que la nappe a atteint entre deux visites sur le terrain, à l'aide d'une tige de métal placée à l'intérieur du puits sur laquelle se trouve un aimant et un bouchon de liège. Dans un premier temps, on obtient à chaque fois une donnée de fluctuations de nappe supplémentaire. Pour chaque puits la valeur obtenue avec l'aimant est ajustée entre deux visites avec le moment où le niveau a été maximal dans le puits NPU, instrumenté avec un capteur de pression.



Figure 3.35 <u>:</u> Données de profondeur de nappe phréatique obtenues avec et sans le dispositif des aimants, mesurées au puits N12 entre le 10 juin et le 20 août 2007.

On peut ensuite raffiner ces données avec l'équation (2.2) qui tient compte des pertes et des gains en eau de la tourbière :

$$Y = Vp + Tr + Rp$$

Y est la courbe de niveau de nappe obtenue. Vp sont les valeurs ponctuelles obtenues à l'aide du bulleur à chaque visite ainsi que les mesures de nappe obtenues avec les aimants.

Notons d'abord qu'il a été décidé de travailler avec des valeurs aux demi-journées pour alléger les calculs. La somme des précipitations et le niveau moyen de la nappe ont été calculés pour chaque tranche de 12 heures. *Tr* est alors le Taux de rabattement de la nappe en l'absence de précipitations. On représente l'intensité du rabattement en fonction du niveau de la nappe enregistré dans NPU. On peut alors représenter le taux de rabattement par l'équation exponentielle 3.2

$$v_{11} = 0.6612e^{-0.0063y}$$

Avec :

 y_{+1} : la diminution du niveau de la nappe à t+1

y: le niveau de la nappe à t

Rp est la Réaction aux précipitations c'est à dire l'élévation de la nappe phréatique après un évènement pluvieux. Il n'est pas aisé d'établir une équation générale de remontée de la nappe après des précipitations. En effet celle-ci dépend beaucoup de la position initiale de la nappe phréatique. On propose alors d'utiliser l'équation de remontée de nappe (3.3) qui sera utilisée plus tard dans le logiciel PHIM (Guertin *et al.*, 1987) :

$$y_{+1} = -(3p - 0.02p^2) \tag{3.3}$$

Avec :

 y_{+1} : l'augmentation du niveau de la nappe à t+1

p: les précipitations en cm d'eau

Toutes ces formules peuvent être résumées sous l'équation suivante :

$$y_{+1} = y + 0,6612e^{-0,0063y} - (3p - 0,02p^2)$$
(3.4)

Où :

 y_{+1} : le niveau de la nappe phréatique au temps t+1

y : le niveau de la nappe au temps t

p: les précipitations en cm d'eau au temps t

Il suffit alors d'appliquer cette équation pour les données ponctuelles relevées avec le bulleur et la méthode des aimants. La profondeur de la nappe phréatique enregistrée en continu dans NPU peut ensuite être comparée directement aux fluctuations de la nappe dans le puits voisin N12, interpolées à partir de l'équation 3.4 (Figure 3.36). Au départ entre le 10 et le 24 juin 2007, le rabattement de la nappe est trop rapide et sous-estime le niveau de la nappe en absence de précipitations. Du 8 au 13 juillet, alors que la nappe dans NPU remonte fortement, l'équation ne traduit pas efficacement cette augmentation du niveau dans N12. Ce n'est qu'à partir du 27 juillet que la valeur maximale enregistrée avec l'aimant permet de réajuster les deux courbes. Pour le reste de l'été et le début de l'automne, les fluctuations interpolées dans N12 sont plutôt proches des fluctuations réelles enregistrées dans NPU. De manière générale, lorsque la nappe descend en dessus de 10 cm de profondeur, l'équation diminue trop le niveau de la nappe en l'absence de pluie et ne peut représenter efficacement la remontée du niveau après des précipitations. Au dessous de 10 cm de profondeur, l'équation est beaucoup plus efficace. Notons aussi qu'aucune mesure manuelle n'a été prélevée entre le 7 et le 30 juillet alors que deux remontées de la nappe ont eu lieu (le 13 et le 27 juillet). La valeur obtenue avec l'aimant a donc été collée à la valeur maximale enregistrée dans NPU, le 27 juillet. Si une mesure avait été prise entre le 13 et le 27 juillet, le niveau dans NPU aurait été correctement réajusté.



Figure 3.36 : Comparaison des fluctuations enregistrées dans NPU et estimées dans N12 entre le 10/06 et le 16/10 2007 sur le site de la Nécopastic.



Figure 3.37 : Comparaison des fluctuations enregistrées dans NPU et estimées dans d'autres puits entre le 10/06 et le 16/10 2007 sur le site de la Nécopastic. (a) N9, N8 et (b) N14, N10.

La même comparaison peut être faite pour la plupart des puits instrumentés. Pour tous les puits, le même problème de représentativité est observé au début de l'été, pour les raisons énoncées plus haut. Le puits N9 a un niveau de nappe généralement plus élevé que dans NPU et montre des grandes amplitudes de variations du niveau de la nappe. En N8, la nappe est plus basse ou égale au niveau dans NPU et montre des fluctuations moins grandes durant les

mois d'août et de septembre. Le niveau dans le puits N14 est toujours plus bas que dans NPU alors que dans N10, il est toujours plus haut si on fait abstraction de la période du 25 juin au 25 juillet. Au moins une mesure supplémentaire prise aux alentours du 15 juillet aurait probablement confirmé le niveau plus élevé dans N10. Notons enfin que la trop grande quantité de précipitations tombées entre le 22 et le 25 septembre a obligé à enlever la partie précipitation de l'équation 3.4, pour la plupart des puits. En effet, celle-ci ne fait pas la distinction lorsque la nappe est au dessus ou en dessous de la surface. En conservant cet élément de l'équation avec des précipitations aussi extrêmes, des niveaux de nappe trop peu réalistes étaient estimés (de l'ordre de 30 à 40 cm d'eau au dessus de la surface pour N10). Pour les fluctuations dans N12, cette partie de l'équation a néanmoins été conservée.



4.1 Classification des sites d'études

4.1.1 Tourbière de la Nécopastic

Malgré le caractère ombrotrophe dominant, la tourbière de la Nécopastic présente des particularités qui diffèrent d'un écosystème de ce type. Elle enregistre une profondeur moyenne de 120 cm avec un maximum au centre de 190 cm, alors que des tourbières ombrotrophes âgées peuvent atteindre plusieurs mètres de profondeurs (Payette et Rochefort, 2001). Cette tourbière s'est développée dans une cuvette où l'écoulement de l'eau semble difficile mais ne présente pas de dôme proéminent en son centre. On y observe une différence d'altitude de presque 10 m entre le point le plus élevé au sud-est et l'exutoire au nord-ouest. Ainsi d'après la Classification Canadienne des Milieux Humides (Warren et Rubec, 1997), la tourbière de la Nécopastic se rapproche plus de la définition d'une tourbière ombrotrophe inclinée. La pente est toutefois très douce (environ 0,01% sur 1 km), mais suffisante pour maintenir un faible débit de base (de l'ordre de 0,003 à 0,005 m³/s) même en l'absence prolongée de précipitations comme ce fut le cas en juin et juillet 2008, une saison estivale relativement sèche. Par ailleurs, les endroits où on retrouve la pente la plus forte semblent concorder avec des voies d'écoulements préférentielles qui convergent vers l'exutoire (Figure 4.1).

Malgré que cette tourbière se soit développée en pente, la petite taille de son bassin versant limite les apports d'eau par ruissellement à partir des terrains adjacents. En ce sens, la tourbière de la Nécopastic peut être considérée comme une tourbière ombrotrophe. Les relevés topographiques de terrains ont par ailleurs confirmé que la détermination initiale du bassin versant par photo-interprétation était correcte. Bien qu'une partie des pluies qui tombent aux environs des puits N6, N7 et N8 puissent ne pas s'écouler par l'exutoire de la tourbière, les volumes d'eau qui pourraient se déverser ou non dans le bassin-versant de la tourbière sont minimes. Les patrons majeurs de circulation d'eau dans la tourbière de la Nécopastic semblent donc logiquement être dirigés dans le sens de la pente, orientée du sudest vers le nord-ouest (Figure 4.1). Enfin l'importance des fluctuations journalières a été montrée au cours de l'été 2008 (voir Résultats section 3.3.4). Ce comportement révèle également un caractère typique des tourbières ombrotrophes où l'évapotranspiration joue un rôle important dans le taux de rabattement de la nappe (Rydin et Jeglum, 2006). Ces conclusions sont en accord avec les estimations du bilan hydrologique qui ont été faites (Tableau 3.1 Partie Résultats). Lorsqu'il fait chaud et sec (comme à l'été 2008), l'évapotranspiration est la voie principale de sortie d'eau au cours de l'été. La tourbière de la Nécopastic est alors une tourbière ombrotrophe typique. Toutefois, lorsque la saison estivale est plus humide (comme à l'été 2007), l'écoulement à l'exutoire devient la principale voie de sortie d'eau, conséquence de la saturation du système et de l'inclinaison de la tourbière.



Figure 4.1 : Description hydrologique et sens d'écoulements principaux aux limites et au sein de la tourbière de la Nécopastic (L'orientation des flèches est fonction de la pente, de l'occupation du sol et des connections entre les différentes zones de la tourbière).

En outre, la dominance des sphaignes ainsi que le faible nombre d'espèces (*Sphagnum fuscum, capillifolium cuspidatum, rubellum*, et *fallax* dans les zones les plus humides) confirment le caractère essentiellement ombrotrophe de la tourbière de la Nécopastic (Payette et Rochefort, 2001 ; Rydin et Jeglum, 2006). L'abondance d'éricacées, de *Picea mariana* et de *Laryx laricina* pour les arbres, associée à l'alternance de buttes et de dépressions sur l'essentiel de la surface de la tourbière, appuie ce constat.

Pour la tourbière de la Nécopastic, la hauteur piézométrique de la nappe suit l'altitude de la tourbière. C'est donc l'écoulement horizontal de surface qui semble soutenir le débit à l'exutoire. Sans la saturation des horizons de tourbe proche de la surface, il n'y a pas d'écoulement. Ce dernier se produit dans le sens de la pente et dans l'horizon de surface de végétaux vivants où la conductivité hydraulique est la plus élevée. Ces résultats sont en accord avec les hypothèses développées par Evans *et al.* (1999) puis Holden et Burt (2003a et

b) en milieu ombrotrophe et par Kvaerner et Klove (2008) pour une tourbière minérotrophe. Aussi, les données piézométriques ont montré que la majorité du temps, au cours des années 2007 et 2008, le site de la Nécopastic est en recharge. Notons tout de même qu'un débit de base est maintenu même en conditions de sécheresse. Celui-ci est probablement dû à l'existence de voies d'écoulement préférentielles assez profondes qui, à l'image de drains, permettent l'écoulement d'une partie de l'eau même lorsque la nappe est en profondeur (Holden et Burt, 2002). Seulement la faible conductivité de ces horizons profonds limite beaucoup l'intensité de l'écoulement.

4.1.2 Tourbière de l'Aéroport

Tout d'abord, il existe une incertitude sur la direction d'écoulement de l'eau dans la partie sud de la tourbière de l'Aéroport. Il n'est pas clair que toute l'eau contenue dans cette zone s'écoule en direction de l'exutoire instrumenté. Toutefois il semble très peu probable que le lac situé à proximité contribue à l'écoulement, mais plutôt que par gravité, une partie de l'eau de cette zone s'écoule en direction du lac et une autre partie vers l'exutoire. La classe de la tourbière de l'Aéroport est par ailleurs plus difficile à déterminer d'après la classification canadienne des milieux humides. L'hétérogénéité des milieux rencontrés laisse plutôt penser à un petit complexe de tourbières ombrotrophes en formation, reliées entre elles par des zones marécageuses. C'est pourquoi dès le départ, le puits A1 a été déployé dans une zone plus ombrotrophe alors que A2 a été installé au milieu d'une zone herbacée marécageuse. Bien que la tourbière de l'Aéroport ne puisse pas être considérée comme une tourbière ombrotrophe, les mesures de nappes et de débits semblent quand même refléter le comportement particulier

de rétention d'eau des milieux humides. Par exemple, fin juillet 2008, un fort évènement pluvieux (50 mm en moins de 3 jours) n'a généré aucune augmentation du débit dans le canal trapézoïdal de ce site. À cause d'un manque de données et de caractérisation du milieu pour les deux puits, les mesures obtenues sur la tourbière de l'Aéroport ne seront que peu discutées, comme cela a été le cas jusqu'à maintenant.





4.2 Fluctuation de la nappe et génération du débit

Il est important de constater d'abord que 2007 a été une année particulièrement pluvieuse alors que 2008 a été généralement sèche dans la région de La Grande Rivière (CRIACC, 2009). Bien que sur la globalité de l'année il n'est tombé que 70 mm de moins en 2008, de beaucoup plus larges différences ont été enregistrées en été. Par comparaison entre le 13 juin et le 24 septembre, il est tombé 436 mm de pluie en 2007 et seulement 275 mm en 2008. En outre en 2008 il n'y a presque pas eu d'évènements extrêmes de précipitations, c'est à dire 40 ou 50 mm d'eau tombés en quelques heures ou quelques jours, ce qui est arrivé à plusieurs reprises en 2007. Ces données climatiques permettent donc de comparer plusieurs types de réponses des tourbières aux précipitations, de conditions très sèches à des conditions très humides.

Le comportement de rétention d'eau des tourbières est confirmé par notre étude. Deux évènements de pluie de même intensité ne provoquent pas nécessairement une remontée de la nappe phréatique équivalente, ni la génération d'un débit de même intensité (cf. Figures 3.17 et 3.18 Chapitre 3 Résultats). En fait, comme les figures 3.19 et 3.20 (cf. Chapitre 3 Résultats) l'ont montré, le critère principal déterminant l'intensité de l'écoulement est la position initiale de la nappe phréatique. Ces résultats appuient ceux de Branfireun et Roulet (1998) et confirment l'importance de l'état initial de la tourbière. Si la nappe est basse, on parle de conditions sèches et si la nappe est proche de la surface la tourbière est en conditions humides. Seulement, cette limite entre conditions sèches et humides ne semble pas être directement liée à la limite entre le catotelme et l'acrotelme, comme nous le discuterons plus tard.

Sur la tourbière de la Nécopastic la limite pour qu'un écoulement significatif se produise est à 10 cm de la surface dans un puits situé au centre du site (NPU). Toutefois, la profondeur maximale que la nappe a atteinte au cours de la campagne de mesure est de 25 cm de profondeur. L'écoulement cesserait donc au moins 15 cm au dessus de la limite théorique entre l'acrotelme et le catotelme. Qui plus est, cette limite pourrait être encore plus basse si nous avions dix ou vingt ans de données. Des observations similaires ont été faites sur la tourbière de l'Aéroport. Alors qu'on n'enregistre pas de débit avant que la nappe soit à 11 cm de la surface en A1, la profondeur maximale observée a été de 47 cm. La définition d'acrotelme-catotelme telle que développée par Ivanov (1981) et Ingram (1983) ne semble donc pas évidente à appliquer pour ces sites d'études. Rappelons que par définition le catotelme est la couche inférieure de tourbe qui se trouve en permanence sous la nappe phréatique (Quinty et Rochefort, 2003). Celle-ci peut toutefois être redéfinie en considérant la limite entre l'acrotelme et le catotelme au niveau du point d'inflexion à partir duquel l'écoulement se produit, comme l'ont fait Evans *et al.* (1999).

Par ailleurs, lorsque la nappe phréatique est très basse, de faibles précipitations peuvent provoquer une forte remontée de la nappe phréatique comme cela s'est produit au mois de juin 2007 (Figure 3.15 Chapitre 3 Résultats). De manière générale on remarque que plus la nappe descend dans les horizons bien décomposés et peu conducteurs, plus la réactivité du système sera grande à un apport de pluie. En d'autres termes, lorsque la nappe est plus basse que 10 cm, la remontée est plutôt rapide mais ne dépend pas pour autant de l'intensité des précipitations (Figure 4.3). Evans *et al.* (1999) avaient déjà noté qu'en saison sèche même si la nappe était très basse, de faibles précipitations permettaient quand même de récupérer rapidement un niveau proche de la surface, conséquence directe de la diminution de la porosité avec la profondeur. En effet, il ne semble pas y avoir de relations simples entre le niveau de la nappe et la teneur en eau des couches de tourbe, puisque la porosité, la perméabilité et la conductivité hydraulique peuvent varier dans le temps (Price, 2003 ; Rosenberry *et al.*, 2006 ; Fritz *et al.*, 2008). Ces changements temporels des propriétés hydrauliques de la tourbe, associés à la tension superficielle exercée par les sphaignes, pourraient expliquer que la force des précipitations ne détermine pas nécessairement l'intensité de la remontée de la nappe phréatique lorsqu'elle est en profondeur.



Figure 4.3 : Intensité de la remontée de la nappe phréatique après 19 évènements pluvieux survenus entre juin et octobre 2007 sur la tourbière de la Nécopastic et mesurés dans NPU. (Nappe basse : en dessous de 10 cm de profondeur, Nappe intermédiaire : entre 5 cm et 10 cm, Nappe haute : au dessus de 5 cm de profondeur).

Mais encore, comme plusieurs études l'ont déjà remarqué (Bay, 1969, Branfireun et Roulet, 1998), la topographie et l'inclinaison du système sont des conditions importantes pour l'intensité et le délai de réaction du milieu. C'est pourquoi la tourbière de la Nécopastic est beaucoup plus rapide à réagir que la tourbière de l'Aéroport. Par contre la superficie du site

de l'Aéroport est beaucoup plus importante. Donc évidemment, lorsqu'un écoulement est enregistré à son exutoire, le volume d'eau et le débit de pointe sont beaucoup plus importants que sur la tourbière de la Nécopastic.

En résumé, la génération et le délai de l'écoulement pour une tourbière ombrotrophe dépendent d'abord du niveau initial de la nappe et de la pente du système. Cependant si la nappe phréatique ne dépasse pas une certaine profondeur, aucune réponse à l'apport d'eau n'est enregistrée. Ensuite l'intensité des précipitations et la taille de la tourbière définissent l'intensité du débit et le volume d'eau qui y est associé. Notons que l'absence de réponse d'une tourbière ne signifie pas nécessairement l'absence de débit puisqu'un écoulement de base peut-être quand même enregistré.

4.3 Acrotelme-catotelme et couches hydrologiquement actives

D'après le concept développé par Ivanov (1981) et Ingram (1983), le profil de tourbe des tourbières ombrotrophes bombées peut être divisé en deux couches, distinctes par leurs propriétés hydrauliques. Le catotelme, qui représente l'ensemble des horizons inférieurs anoxiques et l'acrotelme, défini par l'amplitude maximale de la nappe phréatique, où l'écoulement principal est généré. Si on s'en tient à la définition de base, l'acrotelme au centre de la tourbière de la Nécopastic serait de 25 cm de profondeur alors que le profil de tourbe semble assez uniforme sur les 90 premiers centimètres. Pour le site de la Nécopastic, l'épaisseur de l'acrotelme varie entre 20 et 35 cm si on se fit aux fluctuations de la nappe dans les différents puits. L'acrotelme est généralement plus mince dans les zones herbacées et plus épais proche des bordures de la tourbière et dans les zones plus boisées. Au sein d'une même

tourbière il existe donc des acrotelmes de différentes épaisseurs aux propriétés hydrauliques différentes (Rydin et Jeglum, 2006). Ces dernières dépendent du taux de décomposition de la tourbe, du couvert végétal et de la topographie locale. Par ailleurs, lors des périodes de fortes sécheresses, la nappe semble pouvoir descendre jusque dans les horizons très profonds et dépasser la limite théorique entre acrotelme et catotelme (Verry, 1988 ; Holden et Burt, 2003a).

Le concept d'acrotelme-catotelme ne semble donc pas s'appliquer dans toutes les situations (Charman, 2002). De même, la limite entre l'acrotelme et le catotelme peut être assez hétérogène au sein d'une même tourbière, mis à part peut-être pour les tourbières ombrotrophe bombées relativement uniformes. En outre les campagnes de mesures effectuées sur la tourbière de la Nécopastic confirment que seule une petite partie de l'acrotelme, proche de la surface, participe à l'écoulement (Verry, 1988 ; Evans et al., 1999 ; Holden et Burt, 2003a ; Clymo, 2004). La partie hydrologiquement active de l'acrotelme est donc plutôt mince et se situe juste sous la surface du sol (Holden et Burt, 2003a). Afin de modéliser simplement et correctement la génération du débit d'une tourbière ombrotrophe en fonction de la profondeur de la nappe phréatique, nous préférerons donc définir le profil de tourbe comme un modèle à deux couches dont la limite est la profondeur de la nappe à partir de laquelle se produit l'écoulement. Les puits sur la tourbière de la Nécopastic montrent cependant une certaine variabilité pour cette limite, entre 3 cm et 20 cm sous la surface. Si on ne tient pas compte des zones très humides et proches des mares (i.e. N10, N13 et N14), cette profondeur devient plus proche de 10 ou 15 cm de la surface. Par ailleurs, dans le puits NPU, qui représente le comportement moyen de l'écosystème, la profondeur limite peut varier au cours des saisons et selon l'intensité des sécheresses. Pourtant, fixer la limite entre la couche hydrologiquement active et celle inactive à 10 cm de profondeur, apparaît être réaliste et représentatif pour la tourbière de la Nécopastic. De manière générale, on illustre de cette façon le comportement des tourbières ombrotrophes selon les conditions initiales. Après des conditions sèches (i.e. quand la nappe est sous 10 cm de profondeur), la capacité de stockage est bonne. Lorsque cette limite est dépassée, on passe en conditions dites humides et le débit augmente rapidement avec la remontée de la nappe.

4.4 Influence du couvert végétal et du profil de tourbe

4.4.1 Tourbière de la Nécopastic

Le site de la Nécopastic comporte plusieurs zones où les relations entre l'hydrologie, le profil de tourbe et le couvert végétal diffèrent. Les caractéristiques de ces écosystèmes mises en relation avec le suivi hydrologique de certains puits pour l'été 2008 a permis de mettre en évidence trois grandes types de zones éco-hydrologiques : une zone aux propriétés minérotrophes, une zone ombrotrophe centrale et une zone ombrotrophe forestière située en périphérie de la tourbière (cf. Figures 3.27 et 3.28 Chapitre 3 Résultats).



Figure 4.4 : Réponses de la nappe phréatique à un apport d'eau par des précipitations pour les puits N9, N16, N10, N14, N21 et NPU : (a) entre le 4 et le 5 juillet 2008 pour un évènement de faible intensité étalé dans le temps (8,7 mm en 11 h) et (b) entre le 25 et le 26 juillet 2008 pour un évènement intense et rapide (17,9 mm en 1 h).

Les zones plus minérotrophes, établies en périphérie de la zone ombrotrophe centrale, sont occupées par des petites mares, en phase de comblement ou déjà occupées par des espèces de sphaignes aquatiques (essentiellement *S. fallax*). Les mares se sont généralement développées perpendiculairement à la pente, i.e. au sens d'écoulement de l'eau. Le niveau de la nappe

remonte rapidement et fortement après des précipitations (Figure 4.4). En même temps, en conditions sèches, le rabattement de la nappe est moins rapide que dans les autres puits, puisque l'influence de l'évapotranspiration est moins importante sur ces zones peu protégées par le couvert forestier. Dans des écosystèmes similaires, dominés par les espèces de Carex, il a déjà été observé que la surface de la tourbe se compresse facilement pendant les sécheresses, limitant ainsi la différence de niveau entre la surface et la nappe et permettant une meilleure hydratation des horizons supérieurs de tourbe (Whittington et al., 2007). Or les puits que nous avons installés ne sont pas ancrés dans le substrat sous l'accumulation de tourbe. Les fluctuations de la surface du sol n'ont donc pas pu être enregistrées. Cette hypothèse reste néanmoins très plausible. D'un autre point de vue, le niveau de la nappe phréatique pourrait être maintenu proche de la surface grâce à un apport d'eau des zones plus ombrotrophes situées en amont. Cet apport d'eau serait logiquement dépendant de la profondeur de la nappe dans ces zones, le niveau de la nappe déterminant l'intensité de l'écoulement latéral. Dans tous les cas la nappe phréatique est presque tout le temps proche de la surface dans ces zones minérotrophes qui semblent jouer un rôle important dans la génération de l'écoulement.

Les zones ombrotrophes forestières sont situées en périphérie de la tourbière. Le suivi de la nappe de l'été 2008 montre que ce type d'environnement est plus sensible aux changements météorologiques. Après même de faibles précipitations, alors que le niveau de la nappe ne varie presque pas dans les autres puits, il peut ici augmenter rapidement de quelques centimètres. Pourtant l'interception par le couvert végétal doit être plus importante ici que partout ailleurs sur la tourbière. Le taux d'infiltration est donc probablement très élevé. Pour cette zone, plusieurs profils ont d'ailleurs montré des couches en profondeur avec des débris

de bois, ce qui pourrait contribuer à l'augmentation de l'infiltration. C'est aussi ici qu'on observe les plus fortes fluctuations journalières, liées à l'évapotranspiration. La forte densité de la végétation, dominée par les arbres et les arbustes semble donc avoir une grande influence sur le bilan hydrologique local. Et inversement c'est aussi parce que cette zone de la tourbière est relativement bien drainée qu'un tel couvert végétal a pu continuer à s'établir. Toutefois, au nord de la tourbière (i.e. proche de N21), ces zones semblent se drainer directement en direction de l'exutoire, puisque la pente augmente faiblement dans ce sens. Au sud et à l'est, la pente est plus forte. Par conséquent, ces zones forestières se drainent plus rapidement que celles au nord. Le profil de tourbe confirme ces observations puisque la tourbe est bien décomposée sur les trois quarts de la hauteur. En même temps, l'écoulement se fait vers le centre de la tourbière, une partie en direction d'une zone minérotrophe qui doit pouvoir amener l'eau en direction de l'exutoire, et l'autre partie en direction de la partie centrale de la tourbière où l'eau est probablement stockée un certains temps.

La partie centrale de la tourbière de la Nécopastic est typiquement ombrotrophe, légèrement bombée et avec l'épaisseur de tourbe maximale (190 cm). Le couvert végétal, dominé par les sphaignes confère à cet écosystème un comportement hydrologique particulier dépendant directement du taux d'infiltration, de l'intensité des précipitations et de la position initiale de la nappe. Après de faibles précipitations étalées dans le temps, si la nappe est proche de 10 cm de profondeur, la remontée est lente puisqu'une partie de l'eau semble avoir le temps de s'écouler en même temps. Si les précipitations sont fortes, le niveau de la nappe remonte d'abord et peut dépasser la surface de la tourbe avant que l'écoulement latéral draine les couches supérieures de tourbe. Lorsque la nappe est plus basse que 10 cm, peu importe l'intensité des précipitations, la remontée de la nappe est plutôt rapide mais ne dépend pas
pour autant de l'intensité des précipitations. Enfin les fluctuations journalières de la nappe phréatique sont moins évidentes dans NPU laissant supposer que la partie ombrotrophe est moins affectée par l'évapotranspiration. Lors de sécheresse, entre autres parce qu'elles n'ont pas de stomates, les sphaignes sont généralement moins sensibles à la dessiccation que les herbacées (Holden et Burt, 2003b), ce qui pourrait expliquer cette résistance à l'évaporation.

En résumé, les observations faites sur la tourbière de la Nécopastic montrent que la réaction de la nappe phréatique aux facteurs environnementaux (i.e. entrées d'eau par les précipitations et sorties par évapotranspiration) varie selon le couvert végétal, le profil de tourbe, la situation au sein de la tourbière et la topographie du milieu. La génération de l'écoulement à l'exutoire dépend donc aussi de l'écoulement entre les différentes zones. Certaines parties comme la zone plus forestière en amont et au sud de la tourbière semblent se drainer assez rapidement alors que le centre de la tourbière sert de stockage pour l'écoulement provenant de ces zones. En même temps, la partie centrale ombrotrophe semble maintenir un faible écoulement vers les zones plus minérotrophes plus en aval où la nappe reste presque tout le temps élevée. Et c'est à proximité de ces zones, dominées par les herbacées, que des voies d'écoulement préférentielles se sont formées pour mener à la création d'un exutoire. Lors de sécheresse, ces voies d'écoulement sont d'ailleurs plus susceptibles de se former dans les milieux dominés par les herbacées (Holden et Burt, 2003b ; Worall *et al.*, 2007).

D'autre part, les variations du niveau de la nappe après des précipitations semblent être la conséquence directe du taux d'infiltration et de la position initiale de la nappe. Ce taux d'infiltration dépend de la composition des horizons de tourbe. La tourbe avec des débris de bois permet une meilleure infiltration que celle constituée essentiellement de fibres de Carex,

elle même présentant une meilleure infiltration que de la tourbe de sphaigne (Rydin et Jeglum, 2006). Par contre en conditions sèches, les fluctuations sont directement la conséquence de l'évapotranspiration qui augmente avec la densité du couvert végétal et varie selon le type de couvert. L'évapotranspiration est plus forte dans les zones herbacées que dans celles de sphaignes. Notons que cela semble aussi dépendre de la capacité du milieu à faire fluctuer le niveau de la surface qui dépend lui même de la végétation, de l'épaisseur et de la composition du profil de tourbe.

En définitive, malgré les différences observées, le puits NPU représente correctement le comportement hydrologique moyen de la tourbière, typique d'une tourbière ombrotrophe. L'utiliser pour tenter d'expliquer la relation qui lie la profondeur de la nappe à la génération du débit semble donc réaliste.

4.4.2 Tourbière de l'Aéroport (cf. Figure 4.2)

L'effort de caractérisation des différents écosystèmes ayant été moins important sur la tourbière de l'Aéroport, il est plus difficile de tirer des conclusions aussi précises que sur le site de la Nécopastic. Toutefois, quelques observations succinctes peuvent être faites. Al présente des grandes amplitudes de niveau de nappe. Cette partie de la tourbière, alternance de mares et de buttes de sphaignes, semble être plus sensible aux variations de température et donc à l'évapotranspiration. Le puits est installé sur une butte de sphaignes mais le niveau de la nappe doit être principalement régulé par les mares adjacentes. On peut imaginer que dans ces buttes, le niveau de la nappe descend rapidement puisque l'eau est drainée vers les mares pour maintenir l'humidité nécessaire aux espèces de sphaignes

aquatiques, l'évaporation y étant plus importante. Dans le puits A2, le niveau d'eau diminue beaucoup moins rapidement que dans A1. On pourrait alors penser qu'il existe un approvisionnement par des eaux souterraines. Or, au début de l'été 2007 cette partie de la tourbière a été à sec pendant plusieurs jours. Le rabattement de la nappe semble donc limité par un écoulement d'eau provenant des parties ombrotrophes au nord de la tourbière. Le débit à l'exutoire est alors essentiellement régulé par ces zones marécageuses, qui elles-mêmes dépendent du degré de saturation des parties ombrotrophes au nord de la tourbière. Et c'est pourquoi le temps de réponse est si lent et la capacité globale de stockage si grande. Quand il pleut, il faut d'abord que le nord de la tourbière se recharge et ensuite que les petites plaines herbacées accumulent à leur tour une certaine quantité d'eau avant qu'un débit soit enregistré dans le canal. Par contre, une fois que le système est plein, les volumes d'eau qui sortent à l'exutoire peuvent être très importants. La capacité de rétention du système devient alors quasiment nulle et le débit à l'exutoire est fonction directement de l'intensité de précipitations et de la superficie du bassin versant.

4.5 <u>Comportement hivernal et fonte printanière.</u>

Le suivi du débit et du niveau de la nappe a dans un premier temps été comparé pendant la saison de croissance de la végétation, i.e. de la fin du printemps au début de l'automne pour 2007 et 2008. Toutefois, quelques observations intéressantes peuvent être faites pendant l'hiver et au moment de la débâcle printanière. Les données dans le puits NPU et le piézomètre à 1,50 m (NPI) sur le site de la Nécopastic ont pu être enregistrées tout au long de l'hiver, permettant de discuter des fluctuations du niveau de la nappe. Par contre, un

dysfonctionnement du capteur de pression dans le puits de tranquillisation du canal n'a pas permis d'enregistrer le débit de la fonte printanière. Pour la tourbière de l'Aéroport, c'est l'inverse qui s'est produit, les capteurs de pression dans A1 et A2 ont eu des problèmes au cours de l'hiver, alors que celui dans le canal a réussi à enregistrer la débâcle printanière. Notons toutefois que pour les deux tourbières, la fonte printanière a été l'évènement hydrologique majeur de l'année 2008, comme c'est généralement le cas pour les tourbières ombrotrophes (Payette et Rochefort, 2001 ; Rydin et Jeglum, 2006).

4.5.1 Tourbière de la Nécopastic

Pour la tourbière de la Nécopastic, à partir du début du mois de décembre, plus aucun écoulement n'est observé dans le canal. L'eau semble donc gelée dans l'exutoire pendant tout l'hiver. En même temps le niveau de la nappe phréatique diminue tout au long de l'hiver. Ce rabattement est toutefois beaucoup plus faible que pendant la saison de croissance. En fait, ce rabattement pourrait être lié au gel des horizons supérieurs de tourbe (Price et FitzGibbon, 1987). À deux reprises au mois de janvier, de faibles remontées de la nappe et du niveau dans NPI ont été enregistrées, conséquence possible de la diminution de l'épaisseur de la couche gelée suite à l'augmentation soudaine de la température extérieure.

Au moment de la fonte printanière, le niveau d'eau dans le piézomètre met un mois de plus à remonter que le niveau de la nappe phréatique. Le ruissellement de l'eau vers les couches plus profondes semblent donc limité. Ce phénomène pourrait être dû à la persistance du gel dans les horizons intermédiaires de tourbe. Lors de l'installation des puits et des piézomètres au début du mois de juin 2007, des zones encore gelées ont d'ailleurs été observées à environ 40

cm de profondeur dans certaines buttes de sphaignes. En même temps, au moment de la fonte, la quantité d'eau ajoutée dans le système dépasse largement la capacité d'infiltration des horizons intermédiaires de tourbe, celle-ci diminuant graduellement avec l'augmentation du taux de décomposition et la compaction de la tourbe. La fonte printanière résulterait essentiellement d'un écoulement de surface abondant et rapide. Nous avons montré auparavant que l'écoulement latéral pendant la saison de croissance était généré suite à la saturation des couches moins conductrices de tourbe. Ces nouveaux résultats semblent maintenant indiquer qu'au moment de la fonte printanière, l'écoulement se produit suite au dépassement de la capacité d'infiltration de la tourbe. Malheureusement, l'absence de données au canal rend impossible pour la tourbière de la Nécopastic la mise en relation des valeurs de profondeur de nappe avec le débit pour les saisons hivernales et printanières.

4.5.2 Tourbière de l'Aéroport

Les données de nappe dans le puits A1 de la tourbière de l'Aéroport peuvent être représentées en fonction du débit au moment de la fonte printanière. Au moment de la débâcle printanière le niveau de la nappe est à son maximum et dépasse largement la surface de la tourbe lorsque l'écoulement se produit. La fonte se produirait alors en deux temps. D'abord la fonte de la neige augmente le niveau de la nappe avant que le débit soit généré. Le délai est d'environ une semaine et peut être dû au temps que la glace dans l'exutoire a mis à se dissocier. En effet, après ce laps de temps, l'augmentation du débit est fulgurante et on peut parler réellement de débâcle printanière. Pour le site de l'Aéroport, il est plutôt difficile de savoir quel mécanisme génère l'écoulement au moment de la fonte printanière. D'autant plus que certains doutes subsistent sur l'efficacité du canal trapézoïdal lorsque le débit est très élevé. En effet il est possible qu'un certain reflux apparaisse dans le canal lors de gros coup d'eau, à cause de la faible pente dans la zone où il a été installé. Néanmoins, la faible épaisseur de tourbe proche de A1 laisse supposer que c'est après saturation de toutes les couches de tourbe que l'écoulement se produit. On notera que pour cette tourbière, la débâcle printanière a été presque l'unique évènement qui ait généré un débit significatif à l'exutoire en 2008.

4.6 Autres particularités hydrologiques

À partir des suivis piézométriques et de la quantité de puits installés sur la tourbière de la Nécopastic, quelques phénomènes hydrologiques particuliers des tourbières ombrotrophes ont pu être mis de l'avant.

4.6.1 Niveaux piézométriques

4.6.1.1 Recharge et décharge

Bien que les flux horizontaux de surface dominent la génération de l'écoulement pour la tourbière de la Nécopastic, cela n'empêche pas l'existence de certains flux verticaux. Dans la partie ombrotrophe centrale, deux capteurs de pression installés dans NPU et dans un NPI ont permis de suivre en simultané, respectivement la profondeur de la nappe phréatique et la charge hydraulique à 1,50 m de profondeur. L'état de recharge ou de décharge a alors pu être

établi au cours du temps pour toute la campagne de mesure (Figure 3.32 Chapitre 3 Résultats). La majorité du temps, la tourbière est en recharge, c'est à dire que la pression hydraulique est exercée de la surface vers le fond de la tourbière, ce qui est typique des tourbières ombrotrophes (Fraser et al., 2001). Pourtant, à deux reprises, des conditions météorologiques extrêmement sèches sont survenues, entre le 29 juin et 4 juillet 2007 et entre le 14 et 25 juillet 2008. Au début du mois de juillet 2007, un état de décharge a été approché. Mais c'est surtout à la fin du mois de juillet 2008, que celui-ci a pu être réellement observé. Pendant quatre jours, la charge hydraulique dans NPI a été supérieure à celle de NPU. La cause principale de cette inversion de flux est la forte hausse de l'évapotranspiration durant cette période. Lorsqu'il fait sec, les couches de tourbe plus profondes sont les dernières affectées, ce qui fait que la charge hydraulique devient supérieur et on observe un inversement du flux vertical (Devito et al., 1997). Étant donné que la tourbière de la Nécopastic ne semble pas recevoir d'apport d'eaux souterraines, le passage de recharge à décharge est gouverné par des mécanismes internes à la tourbière (Waddington et Roulet, 1997 ; Devito et al., 1997). Les épisodes de relargage de méthane (Waddington et Roulet, 1997, Rosenberry et al., 2003), la modification de la géométrie des pores de la tourbe (Fraser et al., 2001) ou encore la variation temporelle de la conductivité hydraulique (Rosenberry et al., 2006) pourraient faire parti ou être couplé à ces mécanismes. Ces derniers contribueraient donc, comme pour une éponge, à aider les colonies de sphaignes à lutter contre la dessiccation en surface en maintenant un taux d'humidité élevé. Les résultats montrent en plus que ce phénomène peut se produire dans une tourbière ombrotrophe malgré l'inclinaison qui favorise l'écoulement latéral. Durant ces conditions sèches, l'écoulement à l'exutoire est presque négligeable. Le niveau de la nappe est si bas, que les flux horizontaux dans la tourbière, malgré la pente, deviennent négligeables par rapport au flux verticaux.

4.6.1.2 Cas particuliers d'autres nids de piézomètres.

Des relevés ont été effectués à neuf reprises pour tous les autres nids de piézomètres, au cours des étés 2007 et 2008. Les niveaux d'eau dans les piézomètres sont assez identiques pour les neufs dates, indiquant que la tourbière était en état de recharge à chaque fois, hormis pour N14. La charge hydraulique diminue généralement avec la profondeur et l'état de dégradation de la tourbe. Pour les nids N21, N12, N13 et N15, la charge hydraulique dans le piézomètre à 50 cm de profondeur est plus élevée que le niveau de la nappe phréatique. Pourtant à cette profondeur, le type de tourbe et son taux de décomposition diffèrent entre les sites. Cette différence de pression ne semble donc pas être liée à une meilleure conductivité à 50 cm (Fraser *et al.*, 2001). La présence de bulles de gaz dans un horizon intermédiaire à 50 cm pourrait expliquer ce phénomène (Rosenberry *et al.*, 2003).

En N14, les données piézométriques relevées font ressortir l'existence d'un comportement hydrologique particulier et permanent (Figure 4.5(a)). Alors que la conductivité hydraulique décroit avec la profondeur et l'état de décomposition de la tourbe, la charge hydraulique dans les piézomètres augmente avec la profondeur. Une pression additionnelle est donc appliquée à mesure que l'on descend dans les horizons de tourbe. La charge hydraulique à 130 cm de profondeur est presque toujours 20 cm plus élevée que le niveau de la nappe. La singularité du site est accentuée par la proximité avec les grandes mares où le niveau de la nappe phréatique semble affecté par le niveau des celles-ci. Au site N16 également, à 100 cm de

profondeur, la charge hydraulique est souvent 10 cm au dessus de celle à 50 cm bien qu'elle ne dépasse jamais le niveau de la nappe (Figure 4.5(b)). Dans un piézomètre à 1 m de profondeur, installé dans la tourbe proche d'une mare, Mouser *et al.* (2005) ont observé à la fin de l'été et à l'automne que des évènements pluvieux provoquent une remontée du niveau d'eau supérieur au niveau de la nappe phréatique. Ils ne fournissent pas pour autant d'explications sur le phénomène.



Figure 4.5 : Niveaux piézométriques mesurés au nid N14 (a) et N16 (b) le 20 août 2007. La ligne pointillée marron représente le niveau de la nappe phréatique.

Ces variations de pression pourraient être liées à la dynamique des bulles de méthane, influençant les mouvements d'eau verticaux à l'intérieur de la tourbière (Waddington et Roulet, 1997 ; Fraser *et al.*, 2001 ; Rosenberry *et al.*, 2003). Des phénomènes de surpression dans des piézomètres ont déjà été observés à plusieurs reprises. Kellner *et al.* (2004) ont enregistré que la charge hydraulique pouvait dépasser de 50 cm le niveau de la nappe à 25 cm de profondeur, alors que Rosenberry *et al.* (2003) ont mesurés des charges hydrauliques dépassant de 35 cm la charge de la nappe phréatique à 2 m de profondeur. Ces phénomènes sont plus facilement observables dans des piézomètres scellés dans le sol puisqu'ils limitent les échanges avec l'atmosphère (Kellner *et al.*, 2004). Sur la tourbière de la Nécopastic, les piézomètres n'ont pas été scellés mais sont fermés à la surface et leur déploiement ne devrait pas avoir formé d'espaces le long du tube. Pour nos installations, les échanges avec l'atmosphère sont donc limités. Les pressions plus élevées enregistrés dans les horizons inférieurs de tourbe, et notamment proche des mares, pourraient alors être expliqués par la formation et l'emmagasinement de bulles de méthane. Celles-ci pourraient s'être formées dans cette zone à cause de la présence de débris de bois entre 50 cm et 130 cm relevés en N14 (Kellner et al., 2004). Pour les neufs relevés, le patron de répartition de la charge hydraulique ne change jamais pour ce site. La pression exercée est toujours du fond vers la surface de la tourbière. Il ne semble donc pas y avoir eu d'épisodes de relargage de méthane (Rosenberry et al., 2006) au site N14 en 2007 et 2008, ni à 100 cm pour N16. Alors que pour N16, la production de bulles de méthane semble l'explication la plus réaliste, pour N14, une incursion d'eau par voies souterraines aurait pu expliquer ce gradient de pression. Or la constance du phénomène ajoutée au fait que la conductivité hydraulique diminue légèrement avec la profondeur ne semble pas appuyer cette hypothèse. En définitive, ce phénomène reste localisé pour un site sur la tourbière, n'affectant pas les patrons généraux de circulation décris précédemment.

En résumé, le piézomètre NPI, installé dans la partie centrale ombrotrophe, semble refléter correctement le comportement moyen de la tourbière de la Nécopastic. Bien que les flux horizontaux en surface restent la voie d'écoulement principale, on note l'existence de flux verticaux. Ce système de circulation dépend donc des conditions environnementales, une hausse de l'évapotranspiration pouvant faire passer la tourbière d'état de recharge à décharge. Une tourbière ombrotrophe reste toutefois la majorité du temps un écosystème hydrologique en recharge.

En définitive, notons qu'il semble y avoir une certaine incertitude sur les mesures piézométriques. Plusieurs faits peuvent en être la cause, à commencer par le faible nombre de mesures effectuées pour chaque nid de piézomètres et toujours de façon ponctuelle. Par ailleurs, il se peut que les piézomètres aient fluctués avec le niveau de la tourbe, ce qui fausse les données de profondeur prises à partir de la surface de la tourbe et non d'un référentiel commun. Enfin, il semble que le design des piézomètres ne soit pas exactement adapté à de la tourbe ombrotrophe aux propriétés conductrices faibles. En effet le trop grand diamètre des tubes ABS et la faible dimension de l'ouverture permettant l'entrée d'eau ont probablement diminué le temps de réponse des piézomètres après un apport d'eau. Il est également possible que lors du déploiement des piézomètres, une couche moins conductrice se soit formée proche de l'entrée d'eau, augmentant le temps de réponse.

4.6.2 Hystérèse.

Pour la plupart des sols non saturés, un effet d'hystérèse apparaît lorsqu'on représente la teneur en eau du sol en fonction de la pression hydrostatique (Hillel, 1998). Ce phénomène existe à cause de la différence de comportement des sols entre l'assèchement et l'humectation de la zone insaturée, conséquence de la variabilité de la géométrie des pores. On parle d'effet de « bouteille d'encre » pour illustrer le fait que lors de la réhumectation, une goutte d'eau à besoin d'une pression plus grande pour remplir un pore de plus grande taille que lors du drainage. Des études de séchage et de remouillage, effectuées sur de la tourbe en laboratoire, ont montré qu'un effet hystérétique prononcé existe pour ce type de substrat (Naasz *et al.*, 2008). Le phénomène, qui varie selon l'état de décomposition de la tourbe, pourrait être

expliqué en partie par le passage d'un état hydrophile de la tourbe à un état hydrophobe après dessiccation, et être accentué par les capacités de gonflement et de compression de la tourbe (Naasz *et al.*, 2008).

Lorsqu'on représente la profondeur de la nappe en fonction du débit pour la tourbière de la Nécopastic, on remarque l'existence d'un double effet hystérétique. Pour une même profondeur de nappe on peut observer deux valeurs de débit différentes. Et pour un débit identique, deux niveaux de nappe peuvent exister. Ces données montrent donc clairement une différence de comportement de la tourbe entre la montée et la descente de la nappe. La figure 4.6 illustre ce phénomène pour un évènement de pluie de forte intensité. Concrètement, lorsqu'il pleut, le niveau de la nappe augmente d'abord rapidement jusqu'à arriver dans la zone de forte conductivité proche de la surface. En même temps le débit à l'exutoire augmente doucement. Ensuite, c'est le débit qui s'accroît fortement alors que la nappe reste plus ou moins au même niveau. Enfin, la nappe phréatique se rabat à un taux constant en même temps que l'écoulement diminue. Ce phénomène illustre donc le délai qui existe entre la remontée rapide du niveau de la nappe dans une tourbière ombrotrophe et l'augmentation plus lente du débit à l'exutoire.



Figure 4.6 : Effet d'hystérèse observé sur la tourbière de la Nécopastic entre le 13 et le 17 juin 2008. (1) Remontée de la nappe avec faible augmentation du débit, (2) hausse du débit avec stagnation du niveau de la nappe et (3) rabattement de la nappe et diminution du débit de manière linéaire.

L'effet hystérétique apparaît lorsque la nappe est dans la zone insaturée, i.e. entre la surface et 10 cm de profondeur. Plus accentué lors de fortes pluies, il est néanmoins observable peu importe la force des précipitations. L'intensité du phénomène dépend donc de la profondeur initiale de la nappe ainsi que de la quantité et la durée des précipitations. Alors que ces conditions dirigent l'allure de la courbe ascendante, lors de la redescente, le rabattement de la nappe et la diminution du débit semblent suivre généralement la même courbe linéaire. Pour la tourbière de la Nécopastic, l'existence de l'hystérèse illustre le délai et la capacité de stockage des tourbières ombrotrophes après des précipitations. Mais en même temps, le phénomène dépend des propriétés particulières du profil de tourbe et reflète un effet hystérétique qui existe à une plus petite échelle.

En effet, un tel phénomène a déjà été remarqué à d'autres niveaux. Un décalage existe entre la capacité de stockage d'une tourbière et les fluctuations de la nappe (Kellner et Halldin, 2002). Celui-ci serait expliqué en partie par l'effet hystérétique qui existe entre la teneur en eau de la

tourbe et les variations du niveau de la nappe phréatique. Autrement dit la teneur en eau varie peu lorsque la nappe se rabat et que les horizons supérieurs s'assèchent. Ceci est possible grâce aux variations de la densité apparente au cours du temps et à la capacité de compression des horizons insaturés proche de la surface (Kellner et Halldin, 2002). Par ailleurs, les causes de l'hystérèse peuvent varier dépendamment de la saison et dans ce cas, le gonflement et la compression des horizons supérieurs de tourbe semblent être une meilleure explication (Kellner et Halldin, 2002 ; Schwärzel *et al.*, 2002 ; Fritz *et al.*, 2008). Lors d'une remontée, même après que la nappe est atteint son niveau maximal, la surface de tourbe continuerait à gonfler grâce aux propriétés d'emmagasinement des sphaignes (Fritz *et al.*, 2008). L'hystérèse qui existe entre les variations du niveau de la nappe et les fluctuations des horizons de tourbe de surface serait donc plus marquée après des périodes sèches (Fritz *et al.*, 2008). L'effet hystérétique qui existe entre la génération du débit pourrait alors être expliqué en partie par les variations de la capacité de stockage de la tourbe suivant la profondeur de la nappe phréatique, qui dépend elle-même de la capacité de gonflement/compression de la tourbe.

En clair, pour la tourbière de la Nécopastic, si la nappe se trouve entre 10 cm de profondeur et la surface, lorsqu'il pleut, le niveau de la nappe augmente mais la génération de l'écoulement latéral est d'abord ralentie. En effet, l'eau est d'abord utilisée pour hydrater les couches de sphaignes vivantes, qui provoquent, grâce à leur grande capacité d'emmagasinement un gonflement de la surface de tourbe. Lorsque ces horizons sont saturés, le débit commence à augmenter et le niveau de la nappe phréatique atteint un maximum alors que la surface de la tourbière peut continuer à gonfler. Enfin après avoir atteint un pic, le débit diminue et la nappe commence à se rabattre en même temps que les horizons de surface se compressent avec le retrait de l'eau. Cette phase de rabattement est synchronisée avec la diminution du débit. L'hystérèse qui existe entre le débit et le niveau de la nappe phréatique à l'échelle d'une tourbière ombrotrophe reflète l'importance d'un effet hystérétique observable à l'échelle de la tourbe. L'intensité de l'hystérèse dépend donc en partie de l'état d'hydratation des horizons supérieurs de tourbe (i.e. 10 cm sous la surface) qui dépend des conditions initiales (température et occurrence des précipitations). Notons enfin que le gonflement/compression de la tourbe, aussi appelé respiration de la tourbe semble découler de la nature du profil de tourbe (i.e. la conductivité hydraulique), des variations de température, du couvert végétal et de la dynamique des bulles de méthane (Price, 2003 ; Kellner et Waddington., 2005 ; Fritz *et al.*, 2008).

Enfin, il est quand même important de souligner que si on compare la tourbière de l'Aéroport, aucun effet hystérétique n'est observé. Il se pourrait donc que l'hystérèse qui existe entre le débit et la profondeur de la nappe pour la tourbière de la Nécopastic ne soit en réalité que la traduction d'un système de circulation d'eau local et propre à ce site. En d'autres termes, celle-ci pourrait simplement refléter le temps que l'eau prend à parcourir la distance de la tourbière, conséquence du pouvoir tampon de la tourbière qui occupe 63 % du bassin versant. C'est à dire, que d'abord les zones minérotrophes contribuent à l'augmentation du débit avant que l'écoulement soit soutenu par l'eau stockée entre autres dans la partie ombrotrophe centrale. Le cheminement de l'eau dans tout le bassin-versant et la position centrale du puits NPU pourrait donc causer un effet semblable à celui d'hystérèse. Cet effet hystérétique serait alors plus expliqué par la forme, la dimension du bassin versant et par la proportion qu'occupe la tourbière dans celui-ci que par les propriétés particulières de la tourbe. Quoi qu'il en soit, on ne tient pas compte de cet effet hystérétique lors de l'étape de modélisation. Il serait donc intéressant dans l'avenir de vérifier si ce phénomène indique un comportement typique des tourbières ombrotrophes ou reflète seulement une spécificité locale de certains sites.

4.6.3 Fluctuations journalières de la nappe.

L'évapotranspiration joue un rôle important dans le bilan hydrologique des tourbières ombrotrophe (Payette et Rochefort, 2001). Les fluctuations journalières de la nappe phréatique, accrues le jour et ralenties la nuit en sont un bon exemple (Bay, 1969 ; Charman, 2002). Ces patrons journaliers ont été observés du début du mois de juin jusqu'à la fin du mois d'août presque tous les jours sur la tourbière de la Nécopastic. À mesure que la température moyenne de l'air diminue avec l'arrivée de l'automne, l'influence de l'évapotranspiration se fait moins forte. Evans *et al.* (1999) ont remarqué de telles fluctuations sur un couvert de sphaigne, d'une amplitude d'environ 1,5 cm par jour pour les mois de l'été 1996 allant jusqu'à 2,26 cm/jour pour le mois de juin.

Pour le site de la Nécopastic, la période du 14 au 25 juillet 2008 est la plus chaude des deux années de campagne. À chaque jour, le rabattement de la nappe est maximal entre 12:00 et 20:30. Si on s'intéresse au cycle journalier de chaque puits instrumenté avec un capteur de pression à cette époque, des différences sont observées selon le type de milieu. Les puits dont le niveau de la nappe phréatique est le plus proche de la surface sont les plus influencés par l'évapotranspiration avec un maximum de 3 cm/jour enregistré en N9 le 23 juillet et une valeur moyenne de rabattement d'environ 1,5 cm/jour pour cette période. La profondeur de la nappe influence donc logiquement l'intensité de l'évapotranspiration. Et pourtant certains

puits où la nappe est en profondeur montre des fluctuations non négligeables, en particulier N16 où l'amplitude maximale a été de 2 cm, enregistrée le 20 juillet. Cependant, en dessous de 30 cm de profondeur, on n'observe plus de fluctuations journalières. Malgré que sur plusieurs jours, le niveau de la nappe phréatique à tendance à diminuer, on remarque qu'une baisse importante de la nappe le jour est généralement suivie par une petite remontée la nuit, plutôt que de stagner à la même profondeur. Ce phénomène se produit probablement après que l'eau contenue dans les horizons de surface insaturés percole la nuit pour rejoindre la nappe phréatique. Cette singularité permet donc à certaines parties de la tourbière de mieux résister à l'évapotranspiration sur une longue période même si à l'échelle journalière les pertes sont importantes.

Il semble donc que l'intensité de l'évapotranspiration et du rabattement de la nappe soit gouvernée par deux facteurs principaux :

- la profondeur de la nappe. Plus la nappe est proche de la surface, plus l'évapotranspiration sera importante;
- le couvert végétal et la capacité de rétention des premiers horizons de tourbe. Par exemple les sphaignes résistent mieux puisqu'elles ont une meilleure capacité d'emmagasinement que les herbacées.

En définitive, les suivis hydrologiques et les observations écologiques faites sur deux tourbières a dominance ombrotrophe, ont permis de confirmer le comportement hydrologique particulier de ce type d'écosystème. Par conséquent, quelques conclusions générales ont pu être mises en avant. En outre certaines autres particularités ont été observées sur la tourbière de la Nécopastic. Celles-ci demandent à être confirmées afin de savoir s'il s'agit de phénomène locaux ou de caractéristiques hydrologiques générales des tourbières ombrotrophes.

En termes de modélisation, la tourbière de la Nécopastic peut être considérée comme une tourbière ombrotrophe uniforme malgré l'hétérogénéité spatiale. Après avoir expliqué le fonctionnement de base du modèle hydrologique HYDROTEL et du sous-modèle PHIM, spécifique aux tourbières, les versions ancienne et mise à jour de HYDROTEL (i.e. sans et avec PHIM) seront comparées et discutées.

5.1 HYDROTEL

HYDROTEL (Fortin *et al.*, 2001a et b ; Turcotte *et al.*, 2003) est un modèle hydrologique distribué qui a montré son efficacité à petite et grande échelles sur les bassins-versants québécois au sud du 50^{ème} parallèle (Lavigne, 2007 ; Ricard, 2008 ; Rousseau *et al.*, 2008), ainsi que dans les Maritimes, en Ontario et en Colombie-Britannique (Rousseau *et al.*, 2008). Pour ce modèle, le bassin-versant étudié est divisé en UHRH (Unité Hydrologique Relativement Homogène), correspondant à des petits sous-bassins versants et défini par télédétection selon l'occupation du sol et à l'aide de PHYSITEL, un SIG distribué spécialisé pour la modélisation hydrologique distribuée (Turcotte *et al.*, 2001 ; Royer *et al.*, 2006). Autrement dit, si la majorité d'un UHRH est composé de sols organiques, celui-ci sera considéré comme étant constitué de ces sols et des différentes occupations du sol. Les différents processus hydrologiques sont établis et un bilan hydrologique est calculé pour chaque UHRH. BV3C (Bilan Vertical Trois Couches) est le sous-modèle qui, par défaut,

prend en compte les propriétés physiques du sol dominant et simule les transferts d'eau des différentes couches de sol. Hors les premières simulations effectuées sur le bassin versant de la rivière Nécopastic ont mis de l'avant les difficultés à décrire et à représenter les mouvements d'eau dans les sols organiques à partir de paramètres hydrodynamiques développés pour les sols, minéraux, comme c'est le cas avec le BV3C (Jutras *et al., in press*). De tels paramètres, estimés précisément pour la tourbe, n'existent pas, conséquence de la variabilité spatiale des propriétés hydriques entre la zone saturée et insaturée. L'utilisation d'un sous-modèle plus simple liant directement le débit à la profondeur de la nappe phréatique semble donc être un choix plus judicieux (Jutras *et al., in press*). C'est pourquoi, PHIM (Peatland Hydrologic Impact Model : Guertin *et al., 1987*; Brooks *et al., 1995*) a été sélectionné pour tester les relations obtenues sur la tourbière de la Nécopastic.

5.2 <u>PHIM</u>

Les flux d'eau le long du profil de tourbe sont modélisés dans PHIM à l'aide de deux équations établies à partir des données de terrain. L'une représente la variation de l'emmagasinement d'eau (ou capacité de stockage) en fonction de la profondeur de la nappe phréatique et l'autre lie le débit à la profondeur de la nappe. Rappelons que, comme l'exige PHIM (Brooks *et al.*, 1995), la profondeur est transformée en élévation (ou hauteur) de nappe phréatique, calculée par rapport à un niveau arbitraire pris à 50 cm de profondeur. D'un point de vue théorique, ce niveau pourrait correspondre à la limite maximale de l'acrotelme (Jutras *et al., in press*).



Figure 5.1 : Relation liant la capacité de stockage à la hauteur de la nappe phréatique pour la tourbière de la Nécopastic (Traduit et modifié de Jutras *et al., in press*).

La capacité de stockage correspond à la porosité totale estimée à partir de la différence entre la teneur en eau de la tourbe à saturation et le point de flétrissement. En s'appuyant sur différents profils de tourbe décrits sur la tourbière de la Nécopastic, plusieurs équations quadratiques ont été mises en place pour illustrer la relation entre l'altitude de la nappe phréatique et la capacité de stockage de l'eau (Figure 5.1). À partir de cette relation, PHIM est capable de simuler les variations de profondeur de la nappe en fonction de l'intensité et de la répartition temporelle des précipitations. Il reste à l'utilisateur de choisir l'équation correspondant au profil de tourbe adéquate.

PHIM peut ensuite simuler le débit sortant de la tourbière à partir de la profondeur de la nappe phréatique. Deux régressions logarithmiques simples, obtenues directement à partir des données enregistrées sur la tourbière de la Nécopastic, permettent ce calcul (Figure 3.21 Chapitre 3 Résultats). Comme nous l'avons montré auparavant, la limite de la couche hydrologiquement active pour la génération du débit a été fixée à 10 cm sous la surface.

• Si la nappe est en dessous de 10 cm de profondeur :

$$\log(q) = 1.67 \cdot \log(h) - 4.95 \tag{4.1}$$

• Si la nappe est au dessus de 10 cm de profondeur :

$$\log(q) = 10.93 \log(h) - 19.79$$
(4.2)

5.3 Simulation et applications avec PHIM (Jutras et al., in press)

À partir de là, PHIM a été incorporé dans HYDROTEL, sans pour autant supprimer le sousmodèle BV3C. En d'autres termes, lorsqu'une UHRH est assimilé à une tourbière, le sousmodèle utilisé sera PHIM, alors que pour les autres types de milieux ce sera le BV3C.

Dans un premier temps on simule dans HYDROTEL le débit pour un seul UHRH de la taille de la tourbière de la Nécopastic (0,9 km²). La figure 5.2 présente un exemple de calage effectué pour l'été 2008. Le tableau 5.1 compare quant à lui les résultats obtenus pour le calage des débits simulés avec PHIM et BV3C, comparés aux valeurs observées pour les étés 2007 et 2008 sur la tourbière de la Nécopastic. La version mise à jour avec PHIM présente des meilleurs résultats que celle avec le BV3C, bien que cette ancienne version ne montre pas de simulations vraiment mauvaises (Tableau 5.1). Seules quelques différences persistent. La profondeur de la nappe et le débit simulés diffèrent des données observées après de fortes sécheresses. Ce problème pourrait être lié à la relation établie entre la capacité de stockage et la profondeur de la nappe, relation trop simple pour illustrer ce qui se passe réellement le long du profil de tourbe. Par ailleurs, à l'automne à partir du mois d'octobre 2007 le débit simulé à la relations pourraient être attribuées à la

modification des propriétés hydrauliques de la tourbe engendrées suite au commencement de la période de gel (Jutras *et al., in press*).



Figure 5.2 : Débit observé à l'exutoire de la tourbière de la Nécopastic, comparé aux débits simulés pour l'été et le début de l'automne 2008 avec les versions originale (BV3C) et mise à jour (PHIM) de HYDROTEL. (Traduit et modifié de Jutras *et al., in press*).

	2007		2008	
Débit estival moyen observé (m ³ /s)	0.0302		0.0104	
Sous-modèle utilisé	BV3C	PHIM	BV3C	PHIM
Débit estival moyen prédit (m ³ /s)	0.0251	0.0301	0.011	0.0102
Erreur relative moyenne (%)	-17.1	-0.6	3.5	-2.1
Coefficient de corrélation	0.94	0.89	0.83	0.9
Coefficient de Nash-Sutcliffe	0.82	0.8	0.69	0.79

Tableau 5.1 : Analyse comparée estivale (du 01/06 au 01/10) de la simulation du débit pour le site de la Nécopastic (Traduit et modifié de Jutras *et al., in press*).

Ensuite, des simulations ont été effectuées pour l'ensemble du bassin versant de la Nécopastic, comptant 203 UHRH, majoritairement occupés par des tourbières (Jutras *et al., in*

press). La version d'HYDROTEL avec le BV3C et celle mise à jour avec PHIM présentent des simulations relativement identiques pour toutes les années testées. Même si PHIM simule mieux la réponse pour une tourbière, les améliorations apportées par ce sous-modèle ne se font pas sentir sur le débit global à l'échelle d'un plus grand bassin versant. Et pourtant, d'un point de vue théorique, PHIM adopte une approche plus réaliste pour représenter les transferts d'eau et l'écoulement dans les sols organiques. En même temps le paramétrage de PHIM est plus simple que celui de BV3C. Seule l'obtention de la courbe hauteur de nappe-débit demande plus de temps et le déploiement de certains types de matériel.

5.4 Forces et faiblesses des simulations

Tout d'abord, la force principale de PHIM est son approche théorique. Comparer les tourbières à un réservoir d'eau à seuil régulier est conceptuellement juste et efficace. Un autre avantage est la facilité d'utilisation du modèle et le faible nombre de paramètres requis pour la simulation. L'estimation de la majorité de ces paramètres est en plus facilitée par l'abondance d'études disponibles sur les milieux humides. En même temps toutes ces publications révèlent la grande diversité au sein des milieux humides et par conséquent la grande variabilité des paramètres. Si PHIM se distingue moins du BV3C lorsque testé à plus grande échelle, c'est peut-être aussi parce que toutes les tourbières sont considérées ombrotrophes. Cette simplification vient du fait que la relation logarithmique entre la profondeur de nappe et le débit n'ait été mise en avant que pour les tourbières ombrotrophes. À partir des différents puits de la tourbière de la Nécopastic, nous essaierons plus loin de voir si les paramètres des deux équations logarithmiques influencent les résultats des simulations.

Par ailleurs, une des difficultés principales de PHIM se trouve dans la simulation de la remontée de la nappe après une période de sécheresse. La représentation de la variation de la capacité de stockage à l'aide d'une simple équation quadratique pourrait en être la cause. Nous avons déjà vu que même si la nappe est très basse, de faibles précipitations peuvent permettre une remontée rapide du niveau proche de la surface. On ne tient donc pas compte de la variation temporelle et spatiale de la porosité, de la perméabilité, de la conductivité hydraulique, mais aussi de la compression et des variations du volume de la tourbe. Toutes ces variabilités sont prises en compte intrinsèquement dans la relation entre la profondeur de la nappe et le débit, ce qui ne peut pas être le cas pour l'équation entre la capacité de stockage et la profondeur de la nappe. On n'en revient alors, comme c'est souvent le cas en modélisation, à être tiraillé entre l'envie et la nécessité de garder cette représentation simple et quand même efficace du phénomène, et le besoin de trouver un moyen plus réaliste de le représenter.

5.5 Influence des paramètres des équations logarithmiques

Pour le moment, les courbes logarithmiques utilisées dans PHIM, ont été élaborées à partir des données enregistrées dans NPU, considéré représentatif du système tourbière ombrotrophe. Seulement, PHIM serait plus juste s'il considérait chaque type de tourbière et de milieux humides (i.e. minérotrophe, ombrotrophe ou marécageuse). Chacune des deux équations logarithmiques comportent des paramètres (a, b, c et d) et un point d'inflexion qui varient selon le type d'environnement (Tableau 3.1 Chapitre 3 Résultats). On peut alors se demander si ces paramètres seraient capables d'illustrer le comportement hydrologique d'autres types de milieux. Pour ce faire, en utilisant directement le modèle PHIM, le débit simulé à partir des équations logarithmiques issues de NPU a été calé sur le débit observé à l'exutoire de la tourbière de la Nécopastic. Ensuite, seuls les paramètres a, b, c et d ont été modifiés en se basant sur les relations logarithmiques obtenues aux puits N10, N14 et N21 (Figure 5.3 et Tableau 5.2).

Tout d'abord, les paramètres a et b, correspondant à l'équation en dessous du point de rupture, ne varient pas entre les différents puits. Au contraire, modifier les paramètres c et d amène des changements dans la simulation du débit, principalement en affinant les pentes des courbes en réponse à des précipitations. L'augmentation et la descente du débit sont plus rapides. En même temps alors que le point de rupture est plus proche de la surface pour N10, les débits de pointe simulés sont assez importants. L'augmentation du paramètre d semble alors directement liée à l'intensité du débit alors que c déterminerait plus le délai et la rapidité de la réponse. Pour N14, les valeurs de c et d sont identiques à la simulation avec NPU et pourtant le débit est la plupart du temps largement surestimé. La diminution du point de rupture est le seul paramètre pouvant expliquer ces modifications. À partir de la fin du mois d'août la période où le débit est nul est pourtant difficile à expliquer. Enfin la simulation avec les données de N21 est très semblable à celle de NPU alors que les paramètres diffèrent. Si on abaisse le point de rupture et quand même temps on diminue les valeurs de c et d, les modifications ne se font pas ressentir sur le débit simulé.

Notons tout de même que ces premières observations ne sont pour le moment que des pistes qu'il serait bon d'approfondir. Aucune conclusion générale ne peut être tirée de telles observations. D'une part il est difficile de trop extrapoler les observations pour ces puits, dans la mesure où les types d'environnement qu'ils évoquent sont reliés entre eux et ne représentent pas l'ensemble de la tourbière de la Nécopastic, au contraire de NPU. Pour tirer des conclusions plus approfondies il faudrait d'autre part modifier dans PHIM la propriété du profil de tourbe (i.e. la capacité de stockage), le couvert végétal et d'autres propriétés hydrodynamiques qui varient selon le type de tourbe et de tourbière.



Figure 5.3 : Débit observé à l'exutoire de la tourbière de la Nécopastic, comparé aux débits simulés directement avec PHIM avec les paramètres des équations logarithmiques obtenues aux puits N10, N14, N21 et NPU pour l'été et le début de l'automne 2008.

Puits	Point de rupture (cm)	а	b	с	d
NPU (Juin->Octobre 08)	11.6	1.6981	5.0167	9.2137	17.004
N10	2.9	1.0453	4.0958	16.684	30.267
N14	21.4	1.0934	3.9759	9.8403	16.847
N21	14.1	1.3246	4.3077	7.6544	14.021

Tableau 5.2 : Rappel des paramètres des équations logarithmiques pour les puits N10, N14, N21 et NPU de Juin à Octobre 2008 (a et b lorsque la nappe est en dessous du point de rupture et c et d lorsqu'elle est au dessus).

En définitive, malgré que le sous-modèle PHIM ait montré de bonnes capacités à simuler l'écoulement d'une tourbière ombrotrophe, plusieurs étapes du processus de modélisation restent à affiner. L'idéal serait de pouvoir instrumenter plusieurs autres milieux humides de la même façon que les tourbières de la Nécopastic et de l'Aéroport, dont en priorité une tourbière minérotrophe, une zone marécageuse et pourquoi pas une autre tourbière ombrotrophe, bombée et assez épaisse. Les relations entre la profondeur de la nappe et le débit pourraient alors être comparées avec celle de notre étude et testées avec PHIM. En même temps de nouvelles études devraient approfondir les investigations sur la variabilité de la capacité de stockage afin de trouver une relation simple et réaliste en fonction de l'état de la tourbe et de la profondeur de la nappe phréatique.

6 CRITIQUE DES MÉTHODES ET DU MATÉRIEL UTILISÉS

Dès le commencement de cette étude, l'accent a été mis sur le développement de techniques de mesure simples et efficaces afin de suivre le comportement hydrologique des tourbières. D'abord en essayant de quantifier exactement le débit sortant d'une tourbière ombrotrophe. Ensuite en cherchant une alternative simple et économique pour mesurer les fluctuations de la nappe phréatique en divers endroits d'une même tourbière, au lieu d'utiliser un grand nombre de capteurs de pression submersible. Et enfin en cherchant à tester une méthode simple de mesure *in situ* de la conductivité hydraulique horizontale à saturation.

6.1 Les capteurs de pression submersibles

Avant toute chose, l'utilisation d'une grande quantité de capteurs de pression nous a amené à faire des observations intéressantes et à préconiser certaines recommandations avec ce type de matériel.

En effet avant de déployer des capteurs de pression supplémentaires pour l'été 2008, un test a été effectué en laboratoire sur les nouveaux appareils (Figure 6.1). Alors que tous les capteurs ont été réglés avec les mêmes caractéristiques, une amplitude moyenne de 7 cm entre les données existe pour différents appareils de la même marque. Si cette erreur est acceptable pour faire des suivis de nappe à grande échelle, elle est délicate à négliger à une échelle plus petite (e.g. à l'échelle d'une tourbière de moins de 1 km²). Il est donc important d'effectuer ce genre de test avant de déployer les appareils sur le terrain afin de pouvoir corriger la valeur de la mesure si nécessaire



Figure 6.1 : Test de mesure de pression effectué en laboratoire pour différents capteurs de pression submersibles (LeveloggerTM M5 Gold 0-5m, Solinst), à la même altitude (z=0m) entre le 27 et le 29 mai 2008. Chaque couleur représente un capteur de pression différent. Les tests ont été réalisé en laboratoire où tous les leveloggers étaient placés dans le même récipient dans des conditions d'ennoiement et de température identiques.

En même temps, tout au long de la campagne il est recommandé à chaque visite sur le terrain de prendre une mesure manuelle du niveau de la nappe (par exemple avec un bulleur) afin de comparer avec les données du capteur de pression. De cette manière, on peut vérifier qu'il n'y ait pas eu de biais suite à l'installation du matériel (mauvaise longueur de fil par exemple), et si c'est le cas, vérifier la constance dans le temps de ce biais et le corriger. Par ailleurs, il est important de rentrer l'altitude exacte lors du paramétrage du capteur de pression puisque l'appareil corrige les valeurs selon ce réglage de 0.12 m d'eau tous les 100 m (Levelogger Gold, Guide d'utilisateur 2007). Enfin, pour l'hivernation, les appareils susceptibles d'être affectés par le gel ont été placés dans de l'alcool à l'intérieur de sacs de plastique scellés. Logiquement ce dispositif modifie la valeur donnée par le capteur en jouant légèrement sur la pression exercée. Il est donc nécessaire, là encore, d'effectuer des tests au préalable et de valider les mesures manuellement après la fonte hivernale. Rappelons que cette technique

d'hivernation ne semble pas être sans failles, puisqu'au cours de l'hiver 2007-2008, les capteurs du puits A1 de l'Aéroport et du canal de la Nécopastic ont probablement été affectés par le gel ou du moins la variation de température.

En définitive, ces quelques observations servent à rappeler aux utilisateurs de capteurs de pression submersibles que, bien que ces appareils électroniques soient efficaces et très pratique, quelques précautions de validation des données sont nécessaires, surtout lorsqu'on veut suivre de faibles variations de nappe phréatique.

6.2 Mesure du débit à l'exutoire

La première difficulté à surmonter lorsqu'on cherche à mesurer le débit d'une tourbière ombrotrophe est de trouver un site d'étude adéquat et instrumentable. Malgré que les tourbières de l'Aéroport et de la Nécopastic aient toutes les deux un seul exutoire, nous avons pu aussi remarquer que des zones d'écoulement plus diffuses existaient dans les deux cas. De plus, un canal trapézoïdal est un instrument de mesure assez encombrant. Même s'il est possible de le transporter avec des véhicules motorisés, son installation reste difficile dans des régions très isolées. Trouver un bon site, facile d'accès, est donc le premier élément limitant pour ce genre d'étude.

Le canal trapézoïdal présente somme toute de nombreux avantages. Il ne modifie que très peu la forme du cours d'eau et ne nécessite pas de gros travaux de terrain pour être installé. Il suffit de s'assurer que toute l'eau de l'exutoire passe dans le canal et que le système est bien imperméable ainsi que bien ancré dans le substrat. Par rapport à l'élaboration de courbes de tarage, l'installation d'un canal trapézoïdal est à peine plus complexe mais donne des résultats beaucoup plus précis. De tels résultats auraient probablement pu être obtenus avec l'installation d'un seuil, mais construire ce genre d'équipement nécessite plus de temps, plus de matériel et ne semble pas approprié pour les exutoires de tourbières.

Il existe néanmoins quelques limitations à ce type de matériel. D'abord, le canal doit être installé sans pente puisqu'il en comporte une. Cela implique que lorsque le niveau d'eau approche la hauteur maximale enregistrable dans le canal, il se peut que l'absence de pente provoque un reflux. Dans ce cas, à partir d'une certaine quantité d'eau le débit enregistré n'est plus valide. Bien que le canal doive être installé dans une zone de faible pente, il convient donc de s'assurer de l'existence d'une pente naturelle qui permet un bon écoulement en amont et surtout en aval du canal. Enfin, pour les systèmes hydrologiques comme les tourbières, ce type d'instrument est limité par l'amplitude de l'écoulement, des débits très faibles et ensuite très importants peuvent être enregistrés. La tourbière de l'Aéroport illustre bien ce phénomène puisque la capacité de mesure du canal se trouvait rapidement dépassée après la génération du débit. L'enregistrement de la quantité d'eau exacte s'écoulant au moment de la fonte printanière est donc difficile avec ce genre d'équipement à moins d'être en mesure de calculer exactement le volume d'eau passant au dessus du canal.

En résumé, malgré quelques inconvénients, le canal trapézoïdal est le moyen le plus efficace, le plus précis et le plus facile d'installation pour mesurer le débit à l'exutoire d'une tourbière. Le détail de l'installation d'un canal trapézoïdal ainsi que quelques recommandations sont détaillés dans un rapport interne de l'INRS-ETE (Jutras *et al.*, 2007 Annexe D).

6.3 <u>Suivi de la nappe avec la méthode de l'aimant</u>

Comme nous l'avons montré auparavant, mesurer la hauteur d'eau avec des capteurs de pression ne garantie pas l'infaillibilité des résultats si une validation manuelle n'est pas effectuée en parallèle. Pour cette raison et dans un souci d'économie, une nouvelle méthode de suivi de la nappe phréatique a été testée sur le site de la Nécopastic au cours de l'été 2007. C'est la méthode de l'aimant ou méthode d'enregistrement du niveau maximal de la nappe, inspirée de Morgan et Stolt (2004).

L'inconvénient majeur de cette méthode est qu'il faut raffiner les données alors qu'avec un capteur de pression, un simple téléchargement suivi de quelques ajustements fourni directement les mesures de profondeur de nappe. En effet, il faut d'abord développer deux équations, une pour le rabattement et une pour la remontée de la nappe. Or les propriétés hydrauliques de la tourbe rendent difficiles l'élaboration de relations parfaites. Par exemple, on remarque que le rabattement de la nappe en l'absence de précipitations est trop rapide. Ces relations restent somme toute acceptables. En outre, l'analyse des niveaux de nappe dans différents puits au cours de l'été 2008 a montré qu'il existe des différences de remontée et de rabattement de nappe selon le site considéré, i.e. selon le couvert végétal et le profil de tourbe. Or pour raffiner les données, l'hypothèse est faite dès le départ que tous les puits ont un fonctionnement identique à NPU. Toutefois, si on compare les puits à l'échelle de la tourbière, ces différences pourraient être négligées. Donc d'un point de vue purement hydrologique, cette méthode présente certaines faiblesses. Mais celles-ci pourraient être essentiellement la conséquence de la faible fréquence d'échantillonnage due entre autre à

l'éloignement du site. En augmentant cette fréquence, on obtiendrait probablement de meilleurs résultats. L'idéal serait de pouvoir échantillonner au moins une fois par semaine. Cette méthode présente aussi certains avantages. D'abord, installer un tel dispositif avec tige de métal, aimant et bouchon de liège (cf. Figure 2.11 Chapitre 2 Matériel et Méthodes) a un prix de revient de moins de 10\$ par puits. Par comparaison, un capteur de pression coûte entre 500 et 700\$. Pour un site instrumenté avec vingt puits, on économise donc 8800\$. Évidemment, le temps d'installation est un peu plus long. En outre par rapport à la méthode de décoloration de rubans de PVC (Belyea, 1999), tout aussi économique, la lisibilité des mesures est beaucoup plus facile. Dans une tourbière, la limite maximale atteinte par la nappe est difficile à lire sur des rubans de PVC, entre autre à cause des fluctuations journalières. L'avantage principal de la méthode de l'aimant reste qu'entre chaque mesure prise manuellement, la hauteur de l'aimant fournit une mesure supplémentaire très fiable.

En résumé, les fluctuations de nappe fournies par la méthode de l'aimant sont moins précises que si des capteurs de pression avaient été installés dans tous les puits. Cependant cette méthode permet de faire de bonnes économies. Pour les tourbières, le dispositif est quand même plus efficace que le système de décoloration du PVC. Enfin une bonne amélioration des résultats pourrait être faite en augmentant la fréquence des prises de mesures sur le terrain.

6.4 <u>Piézomètres et conductivité hydraulique</u>

6.4.1 Suivi piézométrique

Des piézomètres ont été déployés sur la tourbière de la Nécopastic suivant les recommandations de la méthode développée par Baird et al. (2004) et Surridge et al. (2005) pour des tourbières minérotrophes. Son efficacité a depuis été démontrée pour les tourbières ombrotrophes (Rosa et Larocque, 2008; Baird et al., 2008). Ces dernières études ont d'ailleurs apporté des modifications lors du déploiement des piézomètres, en ajustant le design des tubes pour le milieu ombrotrophe où la conductivité est plus faible. Dans les deux cas, le diamètre des tubes choisis est plus petit et l'ouverture sur le tube pour l'entrée d'eau est plus grande que dans la méthode initiale de Baird et al. (2004). Dans le cas de l'étude sur la Nécopastic, en 2006, le déploiement a été fait selon la méthode originale et aucune modification n'a été apporté sur les tubes. Du coup, les mesures prises dans les piézomètres sont à prendre avec précaution puisque le temps de réponse de ceux-ci est probablement trop lent. Quoi qu'il en soit, comme nous avons pu le remarquer sur la tourbière de la Nécopastic, cette méthode simple, efficace et peu onéreuse, est idéalement adaptée pour les suivis piézométriques dans les sols organiques et en particulier pour la tourbe. Il convient seulement au départ d'essayer d'évaluer grossièrement les propriétés hydrauliques du sol où les piézomètres vont être déployés afin que leur design soit approprié.

En outre, lors de cette campagne, aucun changement n'a été mesuré dans les nids de piézomètres lors des neufs relevés. Pourtant les capteurs de pression installés dans NPI et

157

NPU ont enregistré à quelques reprises des changements dans les flux verticaux d'eau. Pour de futures études identiques, il serait donc intéressant d'installer des capteurs de pression dans tous les piézomètres d'un nid, et dans le puits qui y est associé. Les zones à privilégier sont les zones proche des mares ou celles dans les milieux de transition, par exemple entre la partie centrale ombrotrophe et les zones adjacentes plus minérotrophes. Ceci permettrait d'estimer la vitesse et l'importance des flux latéraux à différentes profondeurs dans la tourbière.

6.4.2 Mesure de la conductivité hydraulique

Aujourd'hui encore, il n'existe pas de méthode parfaite pour mesurer *in situ* la conductivité hydraulique horizontale à saturation (K) dans les milieux humides. Pour estimer K sur la tourbière de la Nécopastic, c'est la méthode de Baird *et al.* (2004), adaptée des équations de Hvorslev (1951) qui a été utilisée. Bien que théoriquement ces formules aient été développées pour des milieux incompressibles, leur applicabilité a été démontrée pour les tourbières minérotrophes (Baird *et al.*, 2004 ; Surridge *et al.*, 2005) et ombrotrophes (Rosa et Larocque, 2008 ; Baird *et al.*, 2008) et aucune modification n'a été faite pour tenir compte de la compressibilité lors du calcul de la conductivité. En effet, le déploiement du matériel et le calcul de la conductivité sont basés sur les travaux de Baird *et al.* (2004) qui eux-mêmes s'appuient sur ceux de Baird et Gaffney (1994) qui ont montré que prendre en compte la conductivité. Alors que les mesures de K semblent être meilleures lorsque les tests sont effectués en retirant un volume d'eau (Baird *et al.*, 2004), des contraintes de terrain nous ont obligé dès le départ à préférer faire les tests en ajoutant un volume connu d'eau.
Malheureusement sur 26 piézomètres testés, moins de la moitié ont procuré des résultats significatifs.

Sur les 14 piézomètres qui n'ont rien donné, la majorité n'a pas fonctionné parce que le temps de mesure a été trop court. Le volume d'eau ajouté serait donc trop important. Par ailleurs, dans certains cas, il semble que le fait d'avoir d'abord insérer un capteur de pression avant de faire le test de conductivité ait affecté le système. En répétant leur test, Baird et al. (2004) ont noté qu'il pouvait y avoir une différence entre la première insertion et les autres. Une solution pourrait être d'introduire le capteur submersible plusieurs jours à l'avance et ensuite d'ajouter le volume d'eau. Il se peut aussi que malgré les précautions prises, le déploiement de certains piézomètres ne se soit pas bien passé et que la zone ouverte des tubes ait été endommagée ou bouchée. D'autre part, le niveau d'eau initial dans le piézomètre (Surridge et al., 2005 ; Rosa et Larocque, 2008) et la quantité d'eau ajoutée (Baird et al., 2004) semblent pouvoir affecter la mesure de conductivité. De son côté, le protocole n'a pas été nécessairement identique entre tous les piézomètres, ce qui pourrait expliquer que la conductivité ait pu être mesurée dans certains cas et non dans d'autres. Enfin, il semble que les conditions météorologiques aient affecté la qualité des tests de conductivité. En effet tous les tests effectués au mois d'août 2007 ont donné de bons résultats alors qu'il faisait très beau. Au contraire, en juin 2008, des fortes précipitations ont été enregistrées alors que les tests étaient en cours, pouvant peut-être amener des variations de flux et de niveau d'eau, ce qui aurait affecté la qualité des mesures.

Somme toute, dans les piézomètres où les tests ont fonctionné, les valeurs de K sont cohérentes avec celles fournies dans la littérature (Carrier, 2003). De manière générale dans les tourbières, on peut passer de l'ordre de 10^{-1} m/s pour la tourbe peu décomposée de surface

à 10^{-7} m/s pour la tourbe très décomposée en profondeur (Charman, 2002). Les données mesurées sur la tourbière de la Nécopastic varient de 3,76.10⁻⁴ cm/s à 3,04.10⁻⁶ cm/s pour de la tourbe moyennement à bien décomposée entre 50 et 150 cm de profondeur. Fournier (2008) a obtenu des résultats similaires sur une tourbière ombrotrophe entre 50 et 100 cm de profondeur. Les mesures de K pour le catotelme de tourbières ombrotrophes varient entre 1.10^{-5} cm/s et 1.10^{-7} cm/s (Fraser *et al.*, 2001 ; Van der Schaaf *et al.*, 2004 ; Clymo, 2004). De leur côté, Baird *et al.* (2008) ont obtenus sur une tourbière ombrotrophe bombée, des mesures bien plus élevées de conductivité, laissant supposer qu'un flux horizontal existe dans le catotelme. Les valeurs de K de la tourbière de la Nécopastic corroborent ainsi celles déjà observées pour les tourbières ombrotrophes. Bien que la conductivité soit généralement plus élevée à 50 cm (de l'ordre de 1.10^{-4} cm/s à 1.10^{-5} cm/s) elle ne permet pas de conclure quant à l'existence d'un flux horizontal à cette profondeur. Notons toutefois qu'étant donné l'inclinaison du système, il y ait de fortes probabilités qu'un tel flux existe sous certaines conditions.

On savait déjà que pour des degrés de décomposition identiques, la conductivité hydraulique est généralement plus faible pour la tourbe de sphaigne, intermédiaire pour la tourbe de carex et élevée pour la tourbe avec des morceaux de bois (Rydin et Jeglum, 2006). Ces variations ainsi que celles liées au degré de décomposition de la tourbe sont généralement admises. Suivant le principe de relative uniformité du catotelme et de l'acrotelme au sein d'une tourbière, les mesures de conductivité hydraulique ont pendant longtemps été effectuées pour seulement un ou deux profils de tourbe pour une même tourbière et extrapoler à la grandeur du site. Or la conductivité hydraulique horizontale semble pouvoir varier horizontalement et verticalement dans l'espace. Kvaerner et Klove (2008) ont observé dans une tourbière minérotrophe que deux mesures de conductivité effectuées à la même profondeur peuvent varier au sein d'un site. Mais encore, pour une tourbière ombrotrophe bombée, la conductivité hydraulique des zones marginales peut être plus faible que celle de la partie centrale bombée à la même profondeur (Baird *et al.*, 2008). Sur la tourbière de la Nécopastic, les premières données de K permettent d'observer qu'il y'a bien une variation spatiale selon le type de tourbe et son degré de décomposition. Pour ce site les différences entre les valeurs de conductivité pourraient donc être principalement dues à l'hétérogénéité du site et pourtant, la conductivité semble aussi différer pour des profils de tourbe identiques.

La variabilité spatiale de la conductivité horizontale est aussi visible verticalement. Certains auteurs estiment que la conductivité ne décroit pas forcément avec la profondeur mais est plus dépendante des conditions locales des différentes couches (Holden et Burt, 2003 ; Surridge *et al.*, 2005 ; Rosa et Larocque, 2008, Baird *et al.*, 2008). D'autres, comme Clymo (2004) ont observé que dans les tourbières ombrotrophe, la conductivité décroît avec la profondeur. Les mesures du site de la Nécopastic semblent appuyer la première théorie mais sans nécessairement écarter la seconde. La variabilité verticale de K pourrait dépendre en grande partie des conditions locales de chaque horizon et de chaque profil de tourbe. L'ouverture de nos piézomètres peut donc, selon la profondeur, être en contact avec différentes couches aux conductivités différentes. Il semble donc délicat, même si cela est souvent nécessaire (e.g. en modélisation), de définir une valeur de conductivité unique pour le catotelme. Afin d'affiner les mesures de conductivité dans les tourbières une solution pourrait être dans un premier temps de réaliser des profils de tourbe à différents endroits du site d'étude, avant d'ajuster l'ouverture des piézomètres en fonction de l'épaisseur et la profondeur de chaque horizon de tourbe.

En résumé, pour obtenir de bonnes mesures de conductivité hydraulique sur le terrain, il est nécessaire de porter une attention accrue sur les tests. Pour la tourbière de la Nécopastic, les mesures de conductivité ont été réalisées à titre indicatif et donc effectuées en simultané avec d'autres expérimentations. Notons que, comme nous l'avons expliqué plus tôt, il y a probablement eu dès le départ des problèmes lors de la fabrication et du déploiement des piézomètres amenant par exemple la formation d'une couche mois conductrice proche de l'entrée des piézomètres. C'est pour ces raisons, entre autre, que beaucoup de tests de conductivité n'ont pas aboutis à cause du temps de retour trop long des piézomètres. Notons surtout qu'aucune répétition de mesure de K n'a été faite. Malgré que certaines conclusions soient tirées à partir des valeurs de conductivité obtenues, il convient donc de prendre un certain recul par rapport à celles-ci. Même si ces valeurs semblent être en accord avec le reste de la littérature, il se peut qu'elles ne reflètent pas exactement les valeurs exactes de la tourbière de la Nécopastic. L'idéal reste de valider les mesures faites sur le terrain par des études plus précises en laboratoire (Surridge et al., 2005 ; Rosa et Larocque, 2008). Les travaux de Levrel (étudiant au doctorat dans l'équipe de A.N Rousseau) viendront en partie répondre à ce besoin en estimant les paramètres hydriques dont la conductivité hydraulique sur plusieurs colonnes de sols prélevées sur la tourbière de la Nécopastic et proche de celle-ci. La méthode de Baird et al. (2004) présente toutefois des avantages, puisqu'elle est facile à opérer et relativement peu coûteuse. Par ailleurs, les valeurs de K obtenues donnent aussi une idée des variations de conductivité sur la tourbière de la Nécopastic. En outre il semble y avoir des différences en fonction de la profondeur et de la position dans la tourbière. En même temps les variations de K pourraient être très localisées. Enfin la dynamique des bulles de méthane, surtout lors de mesures *in situ* semble être un facteur a ne pas négliger (Kellner *et al.*, 2004 ; Surridge *et al.*, 2005 ; Rosenberry *et al.*, 2006 ; Baird *et al.*, 2008).

7 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ces travaux, menés dans la région de La Grande Rivière entre juin 2007 et octobre 2008 se sont intéressés à comprendre et approfondir le comportement hydrologique de tourbières ombrotrophes. Plus spécifiquement, ce projet cherchait à établir le fonctionnement écohydrologique particulier d'une tourbière ombrotrophe, la tourbière de la Nécopastic. Un des objectifs de l'étude était aussi de lier le débit à l'exutoire de la tourbière et la hauteur de la nappe phréatique, tout en testant et en développant des méthodes efficaces et précises de suivi hydrologique sur le terrain. À partir de ces données le potentiel de modélisation de l'écoulement des tourbières ombrotrophes a pu être mis en avant.

La quantité de données et d'observations fournies par ces travaux permettent donc de répondre à ces objectifs ou, dans la mesure du possible, d'y apporter certaines pistes de réflexions.

- D'abord, l'étude approfondie de la tourbière de la Nécopastic a permis de mettre en évidence certains comportements hydrologiques typiques des tourbières ombrotrophes :
 - le couvert végétal, la profondeur et le profil de tourbe influencent localement les fluctuations de la nappe phréatique, et plus généralement la circulation de l'eau entre les différentes zones de la tourbière,
 - l'écoulement horizontal par saturation des couches de tourbe moins conductrices semble dominer la génération du débit,

- malgré une certaine hétérogénéité du site, la tourbière de la Nécopastic prouve qu'elle peut être considérée comme une entité homogène, apparentée à une tourbière ombrotrophe.
- Les canaux trapézoïdaux ont montré leur pertinence pour quantifier précisément le débit à l'exutoire des tourbières ombrotrophes. L'élément limitant reste de trouver un site d'étude adéquat; la tourbière de l'Aéroport ayant prouvé que tous les sites ne se prêtent pas à l'installation de ce type de matériel.
- Il existe bel et bien un délai lors de la génération du débit à l'exutoire d'une tourbière ombrotrophe, selon la position initiale de la nappe phréatique mais également selon la morphologie et l'occupation écologique de la tourbière.
- Mais encore, le suivi piézométrique confirme qu'une tourbière ombrotrophe est un système hydrologique en recharge la majorité du temps.
- Des relations hauteur de nappe-débit ont été établies et montrent qu'en dessous d'une certaine profondeur, seul un débit de base est observé à l'exutoire de la tourbière.
- Du point de vue purement hydrologique, pour une courte période d'étude comme celle-ci, le concept d'acrotelme-catotelme est délicat à utiliser, bien que cette limite semble exister et refléter les variations de la nappe sur une plus longue échelle temporelle.
- Les relations hauteur de nappe-débit ont permis l'intégration des tourbières en modélisation hydrologique à l'aide notamment du sous-modèle PHIM. La difficulté majeure reste d'évaluer correctement la capacité de stockage de la tourbe, notamment à cause de la grande variabilité de la porosité selon la profondeur.

• Enfin, utiliser la méthode de l'aimant peut procurer certains avantages lorsqu'on cherche à suivre les fluctuations de nappe phréatique en différents endroits d'une tourbière. D'autant plus que les mesures obtenues avec les capteurs de pression doivent être comparées avec une certaine prudence et nécessitent d'être validées manuellement.

De manière générale, cette étude encourage la poursuite de prises de données directement sur le terrain. Elle met par ailleurs en avant la nécessité d'intégrer les différentes disciplines qui étudient les tourbières. Ici, on montre que l'hydrologie et l'écologie sont étroitement connectées dans ce type d'écosystème, l'un expliquant l'autre et vice-versa. Toutefois, de nombreux autres facteurs semblent pouvoir interagir avec les végétaux et en fonction du niveau de la nappe. Par exemple, en ce qui concerne le suivi piézométrique et les variations locales de la nappe phréatique, selon notre connaissance de la littérature il semble que les mouvements de gaz pourraient avoir leur rôle à jouer. Il serait donc intéressant dans de futures études, d'y jumeler un suivi de ces gaz. La clé d'une bonne compréhension écosystémique des bilans hydrologiques des tourbières, passe par l'intégration de toutes ces matières.

Par ailleurs, les liens qui existent entre les fluctuations journalières, les variations de température, les précipitations et la position initiale de la nappe devraient être testés. Néanmoins, afin d'établir clairement l'importance de la pression hydrostatique dans chaque type de tourbe et entre eux, l'idéal serait d'installer des capteurs de pression dans tous les piézomètres à différentes profondeurs. En effet, il est difficile d'évaluer précisément les mouvements d'eau à l'intérieur d'une tourbière seulement à partir de mesures ponctuelles. En outre, il faudrait maintenant valider les relations hauteur de nappe-débit à une plus grande échelle, c'est à dire en réalisant le même type de suivi pour d'autres tourbières ombrotrophes

mais aussi pour d'autres types de milieux humides tels que les tourbières minérotrophes. Utiliser un canal trapézoïdal semble être la façon la plus précise pour enregistrer les grandes amplitudes de débits de ces milieux, la plus grande limite étant encore de trouver des sites adéquats. En même temps et ce à des fins de modélisation, l'idéal serait de pouvoir établir des courbes liant la capacité d'emmagasinement directement à la profondeur de la nappe à partir de méthodes *in situ* et de les comparer aux mesures de porosité effectuées en laboratoire. La difficulté à ce niveau reste de pouvoir représenter simplement la grande variabilité spatiale de ce paramètre, qui pourrait être très locale.

En définitive, grâce à cette étude, le potentiel de modélisation de l'écoulement dans les milieux humides a été testé. Il est possible d'estimer le débit à partir de la profondeur de la nappe phréatique. L'estimation de la capacité de stockage reste l'élément limitant. Et justement, c'est ce paramètre qui risque de changer dans le futur avec la modification des conditions environnementales. Soit les saisons risquent de devenir de plus en plus humides et donc de diminuer la capacité de rétention des tourbières et des milieux humides en général. Soit la recrudescence de conditions sèches contribuerait à augmenter la capacité d'emmagasinement, tout en détériorant le milieu avec l'augmentation de la décomposition, en favorisant la création de voies d'écoulement préférentielles, ou en augmentant le relargage de gaz dans l'atmosphère.

BAIRD, A.J., EADES, P.A. ET SURRIDGE, W.J. (2008) *The hydraulic structure of a raised bog and its implications for ecohydrological modelling of bog development*. Ecoydrology 1 : 289-298.

BAIRD, A.J., GAFFNEY, S.W. (1994) Cylindrical piezometer responses in a humified fen peat. Nordic Hydrology 25 : 167-182

BAIRD, A.J., SURRIDGE, W.J. ET MONEY, R.P. (2004) An assessment of the piezometer method for measuring the hydraulic conductivity of a Cladium mariscus-Phragmites australis root mat in a Nortfolk (UK) fen. Hydrological Processes 18 : 275-291

BAY, R.R. (1969). Runoff from small peatland watershed. J. of Hydrology 9: 90-102.

BELYEA, L. R. (1999) A novel indicator of reducing conditions and water-table depth in mires. Functional Ecology 13 : 431-434.

BOOTH, R. K., HOTCHKISS, S.C. ET WILCOX, D.A. (2005) Discoloration of polyvinyl chloride (PVC) tape as a proxy for water-table depth in peatlands : validation and assessment of seasonal variability. Functional Ecology 19 : 1040-1047.

BRANFIREUN, B.A. ET ROULET, N.T. (1998) The baseflow and storm flow hydrology of a precambrian shield headwater peatland. Hydrological Processes 12:57-72.

BRASSARD, P., WADINGTON, J.M., HILL, A.R, ROULET, N.T. (2000) Modelling groundwatersurface water mixing in a headwater wetland: implications for hydrograph separation. Hydrological Processes 14 : 2697-2710

BROOKS, K.N., LU, S.-Y. AND MCADAMS, T.V.W. (1995). User manual for the Peatland Hydrologic Impact Model (PHIM), Version 4.0. Department of Forest Resources, College of Natural Resources, University of Minnesota. 150 pages.

BULLOCK, A. ET ACREMAN, M. (2003) The role of wetlands in the hydrological cycle. Hydrology and Earth System Sciences 7 (3): 358-389

CARRIER, C. (2003) Étude de l'intéraction entre le système d'écoulement local d'une tourbière ombrotrophe et le système d'écoulement des eaux souterraines régionales dans le sud-est du Nouveau Brunswick : caractérisation et modélisation hydrogéologique. Mémoire de Maîtrise. Département de Géographie. Université Laval. 229 pages

CHARMAN, D. 2002. *Peatlands and environmental change*. John Wiley & Sons Ltd, Chicester, England. 301 p.

CLYMO, R.S. (2004) Hydraulic conductivity of peat at Ellergower Moss, Scotland. Hydrological Processes 18: 261-274.

COLES, J. M. (1988). An assembly of death : Bog bodies of Northern and Western Europe in Wet site Archaelogy (BA Purdy) : University of Florida, 338 p. http://books.google.com/books?id=RqFiYB2KI0YC&dq=Vogelius+Andersen+1958&source =gbs_summary_s&cad=0. Consulté le 13/04/2008

CRIACC : Centre de Ressource en Impact et Adaptation au Climat et à ses Changements http://www.criacc.qc.ca/climat/suivi/byebye07/ygl_f.html. Consulté le 23/02/2009

DEVITO, K.J., WADDINGTON, J.M. ET BRANFIREUN, B.A. (1997) Flow reversals in petalands influenced by local groundwater systems. Hydrological Processes 11 : 103-110.

DREXLER, J.Z., BEDFORD, B.L., SCOGNAMIGLIO, R. ET SIEGEL, D.I. (1999) Fine-scale characteristics of groundwater flow in peatland. Hydrological Processes 13: 1341-1359

DONNÉES CLIMATIQUES ENVIRONNEMENT CANDA. Consulté le 22/12/2008 http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/index.html

EVANS, M.G., BURT, T.P., HOLDEN, J. ET ADAMSON, J.K. (1999) Runoff generation and water table fluctuations in blanket peat : evidence from UK data spanning the dry summer of 1995. Journal of Hydrology 221 : 141-160

FORTIN, J.P., TURCOTTE, R., MASSICOTTE, S., MOUSSA, R., FITZBACK, J. ET VILLENEUVE, J.P. (2001a). *A distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. Part 1: Description of the model.* Journal of Hydrologic Engineering 6 (2): 91–99.

FORTIN, J.P., TURCOTTE, R., MASSICOTTE, S., MOUSSA, R. ET FITZBACK, J. (2001b). *A* distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. Part 2: *Application to the Chaudière watershed*. Journal of Hydrologic Engineering 6 (2): 100-108

FOURNIER, V. (2008) Hydrologie de la Tourbière du Mont Covey Hill et Implication pour la conservation. Maîtrise en Sciences de la Terre. Université du Québec à Montréal. 95 pages.

FRASER, C.J.D., ROULET, N.T. ET LAFLEUR, M. (2001) Groundwater flow patterns in a large peatland. Journal of Hydrology 246 : 142-154.

FRITZ, C., CAMPBELL, D.I. ET SCHIPPER, A. (2008) Oscillating peat surface levels in a restiad peatland, New Zealand—magnitude and spatiotemporal variability. Hydrological Processes 22:3264-3274.

GAUTHIER, F. (2006) Connectivité physique des tourbières du bassin versant de la rivière Nécopastic à l'aide d'image Landsat-7 ETM+ et exploration de méthodes in-situ pour évaluer la connectivité hydraulique. LG-2, Baie James, Canada. Rapport de stage INRS-ETE. GLASER, P.H., SIEGEL, D.I., ROMANOWICZ, E.A. ET SHEN, Y.P. (1997) Regional linkages between raised bogs and the climate, groundwater, and landscape of North-western Minnesota. Journal of Ecology 85: 3-16

GUERTIN, D.P, BARTEN, P.K. & BROOKS, K. N. (1987). The Peatland Hydrologic Impact Model : Development and Testing. Nordic Hydrology 18 : 79-100.

GUIDE D'UTILISATEUR « LEVELOGGER GOLD, SOFTWARE VERSION 3.11 ». http://www.solinst.com. Consulté le 08/06/2008

HAYASHI, M., QUINTON, W.L., PIETRONIRO, A. ET GIBSON, J. (2004) Hydrologic functions of wetlands in a discontinuous permafrost basin indicated by isotopic and chemical signatures. Journal of Hydrology, 296 : 81-97.

HILLEL, D. (1998). Environmental Soil Physics. Academic Press, San Diego. USA. 771 pages.

HOLDEN, J. ET BURT, T.P. (2002) Piping and piepflow in a deep peat catchment. Catena 48: 163-199

HOLDEN, J. ET BURT, T.P. (2003) Hydrological studies on blanket peat : the significance of the acrotelm-catotelm model. Journal of Ecology 91 : 86-102.

HOLDEN, J. ET BURT, T.P. (2003) Runoff production in blanket peat covered catchments. Water Resources research 39 (7) : 1191

HOLDEN, J. (2005) Peatland hydrology and carbon release : why small-scale processes matters. Phil. Trans. R. Soc. A 363 : 2891–2913

HVORSLEV, M.J. (1951) *Time Lag and Soil Permeability*. Groundwater Observations, Waterways Experimental Station Bulletin 36. United States Army Corps of Engineers : Vicksburg, MS; 50.

INGRAM, H.A.P. (1983). *Mires : Swamp, Bog, Fen and Moor. General studies*. Ecosystems of the World, vol.4A : 67-158.

INTERNATIONAL MIRE CONSERVATION GROUP (IMCG). (1998). *Meeting and Workshop on Mire* Terminology and Classification issues held at Greifswald (Germany): http://www.imcg.net/docum/greifswa/greifs00.htm. Consulté le 15/09/2008

IVANOV, K.E. (1981). Water movements in mirelands. ACADEMIC, LONDON.

JOOSTEN, H. ET CLARKE, D. (2002). *The Wise use of Mires and Peatlands : a framework for decision making*. International Mire Conservation Group & International Peat Society. En ligne : <u>http://www.mirewiseuse.com/</u> Consulté le 23/04/2007

JUTRAS, S., CLERC, C. AND ROUSSEAU, A.N. 2007. Rapport d'installation d'un canal trapézoïdal à l'exutoire d'une tourbière nordique. Rapport I-237. INRS-ETE. 33 p.

JUTRAS, S., ROUSSEAU, A.N. ET CLERC, C. (In press) Implementation of a peatland-specific water budget algorithm in HYDROTEL.

KELLNER, E. ET HALLDIN, S. (2002) Water budget and surface-layer water storage in a Sphagnum bog in central Sweden. Hydrological Processes 16 : 87-103.

KELLNER, E., PRICE, J.S. ET WADDINGTON, J.M. (2004) Pressure variations in peat as a result of gas bubble dynamics. Hydrological Processes 18 : 2599-2605.

KELLNER, E ET WADDINGTON, J.M. (2005) Dynamics of biogenic gas bubbles in peat : Potential effects on water storage and peat deformation. Water Resources Research 41 : W08417.

KVAERNER, J. ET KLOVE, B. (2008). Generation and regulation of summer runoff in a boreal flat fen. Journal of Hydrology 360 : 15-30.

LAPEN, D.R., PRICE, J.S. ET GILBERT, R. (2005) Modelling two-dimensional steady-state groundwater flow and flow sensitivity to boundary conditions in blanket peat complexes. Hydrological Processes 19 : 371-386.

LAVIGNE, M-P. (2007). Modélisation du régime hydrologique et de l'impact des coupes forestières sur l'écoulement du ruisseau des Eaux-Volées à l'aide d'HYDROTEL, Mémoire de maîtrise, INRS-ETE. 283 pages.

LETTS, M.G., ROULET, N.T., COMER, N.T., SKARUPA, M.R. ET VERSEGHY, D.L. (2000) Parametrization of Peatland Hydraulic propoerties for the Canadian Land Surface Scheme. Atmosphere-Ocean 38 (1) : 141:160.

LÉVEILLÉ, JP. (2007). L'industrie de la tourbe au Bas-Saint-Laurent : une histoire d'image. Mémoire de maîtrise. Facultés d'aménagement, architecture et des arts visuels. Université Laval. 47p.

MORGAN, C.P. ET STOLT, M. H. (2004) A comparison of several approaches to monitor watertable fluctuations. Soil Science Society of America 68 : 562-566

MOUSER, P.J., CULLY HESSION, W., RIZZO, D.M. ET GOTELLI, N.J. (2005) Hydrology and Geostatistics of a Vermont, USA Kettlehole Peatland. Journal of Hydrology 301 : 250-266

NAASZ, R., MICHEL, J-C. ET CHARPENTIER, S. (2008) Water repellency of organic growing media related to hysteretic water retention properties. European Journal of Soil Science 59 : 156-165.

NAVRÁTILOVÁ, J. ET HÁJEK, M. (2005) Recording relative water table depth using PVC tape discolouration : Advantages and constraints in fens. Applied Vegetation Science 8 : 21-26.

PAYETTE, S. ET ROCHEFORT, L. (2001). Écologie des tourbières du Québec-Labrador. Les Presses de l'Université Laval. 621 pages

PELLERIN, S. (2003). La dynamique récente des tourbières du Bas-Saint-Laurent : une analyse historique et paléoécologique. Thése de doctorat. Facultés d'aménagement, architecture et des arts visuels. Université Laval. 166p.

PIETRONIRO, A., PROWSE, T., HAMLIN, N., KOUWEN, N. ET SOULIS, R. (1996) Application of grouped response unit hydrological model to a northern wetland region. Hydrological Processes 10 : 1245-1261.

POULIN, M. ET AL. (2004) Threats and protection for peatland in Eastern Canada. Geocarrefour vol 79 (4): 331-334

PRICE, J.S., FITZGIBBON, J.E. (1987) Groundwater storage-streamflow relationship during winter in a subarctic wetland, Saskatchewan. Canadian Journal Earth Sciences 24 : 2074-2081.

PRICE, J.S. (2003) Role and character of seasonal peat soil deformation on the hydrology of undisturbed and cutover peatlands. Water Resources Research 39 (9) 1241.

PRICE, J.S., BRANFIREUN, B.A., WADDINGTON, J.M. ET DEVITO, K.J. (2005). Advances in Canadian Wetlan hydrology : 1999-2003. Hydrological Processes. 19, 201–214.

QUINTON, W.L., HAYASHI, M. ET PIETRONIRO, A. (2003) Connectivity and storage functions of channel fens and flat bogs in northern basins. Hydrological Processes 17: 3665-3684

QUINTY, F. ET ROCHEFORT, L. (2003). Guide de restoration des tourbières, 2nd ed. Canadian Sphagnum Peat Moss Association et New Brunswick Department of Natural Resources and Energy. Québec, Québec. 106 p.

REEVE, A.S., SIEGEL, D.I. ET GLASER, P.H. (2000) Simulating vertical flow in large peatlands. Journal of Hydrology 227 : 207-217

RESSOURCES NATURELLES ET FAUNE QUÉBEC. Consulté le12/07/2009 http://www.mrnf.gouv.qc.ca/energie/statistiques/statistiques-production-centrales.jsp

RICARD, S. (2008). Évaluation du modèle HYDROTEL à estimer la recharge des aquifères: application sur le bassin versant de la rivière Châteauguay. Mémoire de maîtrise, INRS-ETE. 172 pages. ROSA, E. ET LAROCQUE, M. (2008) Investigating peat hydrological properties using field and laboratory methods: application to the Lanoraie peatland complex (southern Quebec, Canada). Hydrological Processes 22 : 1866-1875.

ROSENBERRY, D.O., GLASER, P.H., SIEGEL, D.I. ET WEEKS, E.P. (2003) Use of hydraulic head to estimate volumetric gas content and ebullition flux in northern peatlands. Water Resources Research 39 (3)

ROSENBERRY, D.O., GLASER, P.H. ET SIEGEL, D.I. (2006) The hydrology of northern peatlands as affected by biogenic gas: current developments and research needs. Hydrological Processes 20: 3601-3610.

ROUSSEAU, A.N., P. LAFRANCE, M-P. LAVIGNE, S. SAVARY, B. KONAN, R. QUILBÉ. (2008). Development of Achievable Agri-Environmental Performance Standards (APS) in Five Canadian Watersheds. National Agri-Environmental Standards Initiative Technical Series Report No. 4-30. 343 p.

ROUSSEAU, A.N., SAVARY, S. B. KONAN. (2008). Implantation du modèle HYDROTEL sur le bassin de la rivière Motmorency afin de simuler les débits observés et de produire des scénarios de crues du printemps 2008. Rapport R-921. Centre Eau, Terre et Environnement, Institut national de la recherche scientifique, INRS-ETE. Québec, PQ 54 pages

ROYER, A., A.N. ROUSSEAU, J.-P. FORTIN, R. TURCOTTE. (2006). PHYSITEL, un SIG pour la mise en place de modèles hydrologiques. Affiche présentée dans le cadre du Deuxième

Symposium Scientifique d'Ouranos sur la Climatologie et adaptation à l'échelle régionale, 2-3 novembre 2006, Montréal, Qc, Canada.

RYDIN, H. ET JEGLUM, J. K. (2006) The Biology of peatlands. Oxford University Press. 343p.

SAGOT, C. ET ROCHEFORT, L. (1996) *Tolérance des sphaignes à la dessiccation*. Cryptogamie, Bryol. Lichénol. 17 (3) : 171-183.

SCHWÄRZEL, K., RENGER, M., SAUERBREY, R. ET WESSOLEK, G. 2002. Soil physical characteristics of peat soil. J. Plant Nutr. Soil Sci 165 : 479-486.

SIEGEL, D.I. ET GLASER, P.H. (1987) Groundwater flow in a bog-fen complex, lost river peatland, Northern Minnesota. Journal of Ecology 75 : 743-754

STADNYK, T., ST AMOUR, N., KOUWEN, N., EDWARDS, T.W.D., PIETRONIRO, A. ET GIBSON, J.J. (2005) *A groundwater separation study in boreal wetland terrain : The WATFLOOD hydrological model compared with stable isotope tracers.* Isotopes in Environmental and Health studies 41 (1) : 49-68

SURRIDGE, W.J., BAIRD, A.J. ET HEATHWAITE, A.L. (2005) Evaluating the quality of hydraulic conductivity estimates from piezometer slug tests in peat. Hydrological Processes 19 : 1227-1244.

TODD, A.K., BUTTLE, J.M. ET TAYLOR, C.H. (2006) Hydrologic dynamics and linkages in wetland-dominates basin. Journal of Hydrology 319: 15-35

TURCOTTE, R., J.-P. FORTIN, A. N. ROUSSEAU, S. MASSICOTTE, J.-P. VILLENEUVE. (2001) Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network. Journal of Hydrology, 240: 225-242

TURCOTTE, R., ROUSSEAU, A.N, FORTIN, J.-P. AND VILLENEUVE, J.-P. (2003) Development of a process-oriented, multiple-objective, hydrological calibration strategy accounting for model structure. In: Duan, Q., Sorooshian, S., Gupta, H., Rousseau, A.N. and Turcotte, R. Advances in Calibration of Watershed Models. Water Science & Application (6). AGU. pp. 153-163.

VAN DER SCHAAF, S. STREEFKERK, J.G., DALY, D. ET JOHNSTON, P. (2004). *Regional hydrology*. in Conservation and Restoration of Raised Bogs : Geological, Hydrological and Ecological Studies, Schouten MGC (ed.). Duchas : Dublin ; 32–53.

VERRY, E.S., BROOKS, K.N. ET BARTEN, P.K. (1988) Streamflow response from an ombrotrophic mire, in Proceedings of the International Symposium on the Hydrology of Wetlands in Temperate and Cold Regions, Volume 11. The Academy of Finland, Helsinki, pp.52-59.

VERSEGHY, D. L. (1991) CLASS-A Canadian Land Surface Scheme for GCMS : I. Soil Model. International Journal of Climatology, vol. p 111-133, p.44.

WADDINGTON, J.M. ET ROULET, N.T. (1997) Groundwater flow and dissolved carbon movement in a boreal peatland. Journal of hydrology 191 : 122-138.

WARNER, B.G. ET RUBEC, C.D.A. (1997). *The Canadian Wetland Classification System* (eds). National Wetland Working Group, University of Waterloo, Wetlands Research Centre; 1–68.

WHITTINGTON, P., STRACK, M., VAN HAARLEM, V., KAUFMAN, S., STOESSER, P., MALTEZ, J., PRICE, J.S, ET STONE, M. (2007) *The influence of peat volume change and vegetation on the hydrology of a kettle-hole wetland in Southern Ontario, Canada.* Mires and Peat 2-09.

WORALL, F., BURT, T.P. ET ADAMSON, J.K. (2007) Change in runoff initiation probability over a severe drought in a peat soil – Implications for flow paths. Journal oh Hydrology 345 : 16-26.

Annexe A : Table de conversion de la hauteur d'eau dans le canal (en m) en débit (en m3/s).

Fournie par le manufacturier (Accura-FloTM, Tempe, AZ, USA) selon l'équation suivante :

$$Q = 0.0283168 \times \left(3.23 \times \left(\frac{h}{0.3048}\right)^{2.5} + 0.63 \times \left(\frac{h}{0.3048}\right)^{1.5} + 0.05\right)$$
(2.1)

Avec :

Q: le débit dans le canal en $[m^3/s]$

h : la hauteur d'eau dans le canal en [m]

	Débit	Hauteur	Débit		Débit
(m)	(m ³ /s)	(m)	(m ³ /s)	dand.	(m ³ /s)
	0.00143	0.1402	0.02011	10.2774	0.08915
0.0061	0.00147	0,1433	0.02102	0.2804	0.09141
0.0091	0.00152	0.1463	0.02195	0.2835	0.09370
0.0122	0.00159	0.1494	0.02291	0.2865	0.09603
0.0152	0.00167	0.1524	0.02389	0.2896.	0.09839
- 2010183	0.00176	0.1554	0.02490	0.2926	0.10079
600213	0.00186	····0.1585	0.02594	0.2957	0.10322
0.0244	0.00199	0.1615	0.02700	0.2987	0.10568
0.0274	0.00212	0.1646	0.02809	0.3018	0.10818
0.0305	0.00227	0.1676	0.02921	0.3048	0.11072
0.0335	0.00243	0,1707	0.03036	0.3078	0.11329
0.0366	0.00261	0.1737	0.03153	0.3100	0.11590
. 10.0396	0.00281	0.1768	0.03273	0.3139	0.11854
0.0427	0.00302	0.1798	0.03396	-0.3170	0.12122
	0.00325	0.1829	0.03521	0.3200	0.12394
	0.00349	0.1859	0.03650	0.3231	0.12669
200018	0.00376	0.1890	0.03781	0.3261	0.12948
00549	0.00404	0.1920	0.03915	0.3292	0.13231
010579	0.00433	0,1951	0.04052	0.3322	0.13517
0.00610	0.00465	0.1981	0.04192	0.3353	0.13807
	0.00498	0:2012	0.04335	0,3363	0.14101
0.00/1	0.00533	0.2042	0.04481	0.3414	0.14398
02/03	0.00570	0.20/3	0.04629	0.3444	0.14699
0.0732	0.00609	0.2103	0.04781	0.34/5	0.15004
0.0762	0.00650	0.2134	0.04936	0.3505	0.15313
0.0792	0.00693	0.2164	0.05094	0.3530	0.15626
0.00020	0.00738	0,0005	0.05255	0.3000	0.15942
0,0000	0.00765	O COTE	0.05419	0.0007	0.10202
Discost.	0.00034	0.2230	0.05566	0.002/	0.10000
0.00046	0.00000	0.2200	0.05750	0.3000	0.10914
	0.00939	0.2310	0.05929	0.2710	0.17240
0.1008	0.00334	0.2377	0.06285	0.0740	0.17022
0 1036	0.01112	0.2408	0.06468	0.3780	0.17322
0.3057	0.01174	0.2438	0.00400	7 3840	0.18613
0.0002	0.01238	0.2469	0.06843	naean	0.18964
A TRACE	0.01305	0 2499	0.07035	03971	0 19320
0.1158	0.01374	0.2530	0.07231	0.3901	0.19679
0.1189	0.01445	0.2560	0.07430	0 3032	0.20042
0/1219	0.01518	0.2591	0.07632	0.3962	0.20410
0.1250	0.01594	0.2621	0.07838	0.3993	0.20781
01200	0.01673	0.2652	0.08046	0.4023	0.21157
0.1311	0.01754	0.2682	0.08259	0.4054	0.21536
0.1341	0.01837	0.2713	0.08474	0.4084	0.21920
0.1372	0.01923	0.9743	0.08693	0.4445	0 22308

Annexe B : Schéma du déploiement d'un nid de piézomètres tel qu'effectué sur la tourbière de la Nécopastic



•

Annexe C : Graphiques illustrant le gradient hydraulique vertical dans les neuf nids de piézomètres sur la tourbière de la Nécopastic, pour six dates différentes. Pour tous les graphiques, le niveau de la nappe phréatique est représenté par une ligne mauve discontinue alors que le niveau pour chaque profondeur de piézomètre est figuré en bleu. Les deux premiers graphiques indiquent les moments où les mesures ont été prises en 2007 et 2008.



→ 1 : le 11-06-2007



→ 2 : le 20-06-2007



189

→ 3 : le 15-10-2007



→ 4 : le 13-06-2008



191

→ 5 : le 17-06-2008



→ 6 : le 28-07-2008



193


Annexe D : Test de conductivité hydraulique effectué sur différents piézomètres aux mois d'août et de juin 2008 (seuls les tests qui ont fonctionnés sont représentés).



195



Annexe E : Rapport d'installation d'un canal trapézoïdal à l'exutoire d'une tourbière nordique (Rapport interne I-237)



Rapport d'installation d'un canal trapézoïdal à l'exutoire une tourbière nordique



Par : Sylvain Jutras Clément Clerc Alain N. Rousseau

Octobre 2007

Institut National de Recherche Scientifique, Centre Eau, Terre et Environnement Québec

Rapport interne I-237

Table des matières

201
210
211
216

1 INTRODUCTION

Mesurer l'écoulement d'un ruisseau est une tâche complexe qui nécessite passablement de préparation et d'adaptation. Un très grand nombre de méthodes et d'instruments sont disponibles afin d'y arriver, mais souvent, les caractéristiques particulières de chacun des ruisseaux ne rendent possible l'utilisation que d'une ou de quelques méthodes en particulier.

Dans le cadre du projet CRSNG-RDC « *Adaptation du modèle hydrologique distribué HYDROTEL au milieu boréal Québécois* », il a été jugé nécessaire d'étudier en détail l'écoulement produit par une tourbière à dominance ombrotrophe. L'objectif poursuivi par ce suivi environnemental est l'étalonnage d'une relation entre la hauteur de la nappe phréatique en fonction du débit à l'exutoire de la tourbière.

2 MATÉRIELS ET MÉTHODES

Dans un premier temps, nous avons identifié par photo-interprétation une série de sites potentiels où des tourbières représentatives du bassin versant de la rivière Nécopastic ne semblent s'écouler que dans une seule direction. Une visite de terrain en octobre 2006 a permis d'identifier deux sites particulièrement intéressants. Le premier site, nommé Nécopastic, est situé au sud-ouest du pont enjambant la rivière Nécopastic et il est constitué d'une tourbière enclavée de 97 ha où l'écoulement se jette à un seul exutoire bien défini et situé à proximité d'une route (Figure 1). Cette tourbière est à dominance ombrotrophe, donc isolée, en théorie, de la nappe phréatique régionale.



Figure 1 : Délimitation préliminaire du bassin versant du site Nécopastic

Le deuxième site identifié, nommé Aéroport, se situe à 5 km au sud de l'aéroport La Grande Rivière. On y retrouve une tourbière peu profonde (max. 70 cm) de 181 ha se déversant elle aussi dans un seul exutoire (Figure 2). Ce site semble être plus hétérogène que le premier, alternant entre des zones minérotrophes, presque marécageuses et des zones plus ombrotrophes.



Figure 2 : Délimitation préliminaire du bassin versant du site Aéroport

Les exutoires devant être jaugés sont peu profonds (20 cm), généralement larges (> 1 m) et mal définis ou diffus (écoulement de surface sur une large surface herbacée), mais aussi parfois suffisamment circonscris (< 60 cm) et rectiligne sur une longueur de quelques mètres. La pente de ces exutoires est extrêmement faible et les berges sont recouvertes de tourbe et

d'aulnes (Figure 3). L'horizon de surface caractérisant les berges et surtout le lit de ces exutoires est formé de tourbe fortement décomposée mélangée à du limon apporté par l'eau. Cette couche à une épaisseur de 30 à 60 cm. En dessous, on retrouve un horizon minéral d'une épaisseur indéterminée de sable limoneux à faible pierrosité.



Figure 3 : Exemple de végétation dominant les sites Nécopastic (a) et Aéroport (b) avant l'installation des canaux.

Pour ces exutoires, l'utilisation d'un seuil ne s'avère pas une solution adéquate puisque la faible pente rendrait très difficile le blocage de tout l'écoulement derrière une paroi imperméable. Des fuites non négligeables pourraient survenir à travers le sol organique notamment en raison de la faible capacité de soutien de ce type de matrice de sol. L'utilisation d'un canal s'avère donc une option valable. Les plus fréquemment utilisés sont les canaux de type Parshal et H, mais tous deux nécessitent la construction d'un seuil de quelques centimètre de hauteur à la sortie du canal. Puisque la pente des exutoires identifiés est très faible, ces types de canaux ont été rejetés. Par ailleurs, le canal trapézoïdal est toutefois celui dont les critères sont les mieux adaptés à notre situation (Figure 4). Il ne nécessite pas de bassin d'accumulation ni de seuil à la sortie, il peut supporter de très grandes variations d'écoulement et il s'installe sur des sites ayant de très faibles pentes. C'est donc un canal trapézoïdal de type 12'' SRCRC que nous avons choisi, puisqu'il l'avantage de minimiser les pertes et de ne pas changer la forme, ni la dynamique d'écoulement du cours d'eau.



Figure 4 : Illustration d'un canal trapézoidal de type 12" SRCRC.

Différents fournisseurs ont été contactés pour l'achat de ce type d'appareil.

- Plasti-fab (www.plasti-fab.com),

- Distribué par Avensys Solution (www.avensys.com)
- Contact : Mathieu Côté
- Prix de détail : 1 830\$ + livraison
- Tracom (www.tracomfrp.com),
 - Distribué par Proviro Instrumentation Inc. (www.proviro.com)
 - Contact : Chris Castravelli
 - Prix de détail : 1 550\$ + livraison (350\$)

- Accura-flo (www.accuraflo.com)

- Distribué par Geneq (www.geneq.com)
- Contact : Luc Falardeau
- Prix de détail : 1 520\$ + livraison (80\$)

Geneq est le distributeur qui a été retenu en raison du prix et du faible coût de livraison. De plus, Geneq est aussi le distributeur autorisé de Solinst, le fabricant des Levelogger (voir description plus loin).

Le canal est livré dans un délai de 3 à 5 semaines après la commande. L'installation d'un port d'attache pour puits de tranquillisation doit être spécifiée (dimension et localisation). Un port

d'attache de 1 po de diamètre, situé proche de l'amont, à gauche en regardant vers l'aval, a été choisi (Figure 5). Le canal en question a les dimensions suivantes : 67 pouces de long, 44 pouces de large et 16 pouces de haut (Figure 6).



Figure 5 : Description des embouts de raccordement du puits de tranquillisation au port



d'attache.

Figure 6 : Description sommaire du canal 12" SRCRC.

Le niveau d'eau dans le canal doit ensuite être mesuré à l'aide d'un instrument électronique autonome. L'appareil le plus simple et le plus abordable s'avère être un capteur de pression

submersible installé dans un puits de tranquillisation (Figure 7). Les appareils Levelogger Gold M5 de Solinst (0-5m) ont été utilisés à cet effet (Achat chez Geneq; 695\$). Un pas de temps de 15 minutes a été employé pour chacun de ces appareils sur les sites à l'étude. Ces appareils nécessitent toutefois la correction de leurs données par la pression barométrique prise à une distance maximale de 25 km. Cette donnée est prise à partir de la station météorologique d'Environnement Canada située à l'aéroport La Grande Rivière (disponible dans internet sur un pas de temps horaire). Un Barologger apparaît sur la Figure 7, mais il n'a été utilisé à cet endroit que pour effectuer des tests préparatoires; aucun Barologger n'a été déployé en permanence à cet endroit.



Figure 7 : Description du puits de tranquillisation et du système de suspension du capteur de pression submersible.

De cette manière, le niveau dans le puits de tranquillisation est le même que dans le canal, si on s'assure que le tuyau PEX, connecté au tuyau ABS est bien à niveau lors de l'installation. Un simple fil de pêche de longueur connue suffit à maintenir le levelogger dans le puits. Le capteur doit être installé dans un puits assez profond pour que celui-ci se retrouve plus bas que le fond du canal. Ainsi, de très faibles débits ou même l'assèchement du ruisseau pourront être mesurés. Une fois le niveau d'eau connu à l'endroit précis où se situe le puits de tranquillisation, on peut obtenir le débit dans le canal grâce à une table de conversion fournie par le constructeur.

3 INSTALLATION

Lors de l'installation, différentes étapes doivent être scrupuleusement respectées afin d'obtenir des mesures de débits fiables à l'aide d'un canal :

 Le canal doit être disposé de façon à ce que son fond se situe exactement au même niveau que le fond naturel du ruisseau. La structure peu compacte du lit du cours d'eau permettait d'enfoncer une botte de plus de 20 cm dans les sédiments. Des grosses pierres et du gravier ont donc été jetés dans le lit du cours d'eau à l'endroit où le canal devait être installé afin de pouvoir le déposer solidement et éviter les fuites sous le canal (Figure 8).



Figure 8 : Stabilisation du lit du cours d'eau du site Nécopastic

2. Le canal doit être installé au niveau dans tous les sens et être solidement ancré au sol. Le type de sol constituant l'horizon minéral a permis l'utilisation de pieux d'ancrage vissés, ce qui s'est avéré un atout de taille pour l'installation des canaux. Les pieux vissés (4 pieds de long, vis de 8 pouces) sont faciles à installer, se vissant à l'aide d'un bout de 2 x 4 servant de levier. Ils offrent un ancrage inégalé et une stabilité structurale dans tous les sens (x, y, et z). Quatre pieux ont été utilisés à chaque puits (Figure 11).



Figure 11 : Description schématique d'un pieu vissé et exemple de structure de support du canal installé sur le site Nécopastic.

3. Le canal doit recueillir toute l'eau passant dans l'exutoire. À cet effet, les sections de ruisseau choisies possèdent des berges bien délimitées qui canalisent naturellement tout l'écoulement à un même endroit. Les berges ont été élargies afin de permettre l'installation du canal. Du gravier ou de la tourbe ont ensuite été utilisés pour remplir et imperméabiliser les espaces creux. De cette manière, après installation, les possibilités de fuites d'eau sous et aux abords du canal sont limitées au maximum et le ruisseau retrouve quasiment sa forme initiale (Figure 9).



Figure 9 : Stabilisation du canal du site Nécopastic

4. Le canal doit aussi posséder une section amont et une section aval la plus rectiligne possible sur une distance de 10 fois la largeur du canal. Une section relativement rectiligne de plus ou moins 10 m a été créée manuellement à l'aide de pelles en amont du canal sur chaque site. Une stabilisation des berges a aussi été faite sur 2 m en amont du canal afin d'éviter leur érosion lors de gros coups d'eau (Figure 10). Notons aussi qu'il est important de limiter les risques d'obstruction de l'écoulement en aval du canal, car un reflux d'eau à cet endroit aurait pour effet de fausser la mesure du débit. Le lit du cours d'eau en aval du ruisseau à donc été nettoyé et redressé sur une distance d'environ 5 m.



Figure 10 : Stabilisation des berges en amont du canal du site Nécopastic

4 MESURE DE LA PROFONDEUR DE LA NAPPE PHRÉATIQUE

Un puits d'observation équipé d'un capteur de pression submersible a été installé au centre de chaque tourbière. Cet appareillage vise à acquérir l'information nécessaire afin de compléter l'étalonnage hydrologique du site. Le puits est constitué d'un tube de PVC noir de 1 ½ pouce de 4 pieds de long dans lequel de nombreuses fentes de 2 mm de large par 10 à 15 cm de long ont été faites à l'aide d'un banc de scie. Chaque puits a été fermé à sa base par un bouchon troué et a été inséré dans un bas de nylon afin de prévenir l'accumulation de débris à l'intérieur du tuyau (Figure 11). Ils ont ensuite été enfoncés à la main dans la tourbe préalablement creusée à l'aide d'une tarière. Un capteur de pression submersible à ensuite été installé dans le puits.



Figure 11 : Puits d'observation et exemple de son insertion dans la tourbe.

5 HIVERNAGE DU SITE

Tous les capteurs de pression submersibles utilisés sur les sites à l'étude sont dédiés à être utilisés à une profondeur maximale de 5 m. Les variations d'hauteur d'eau attendues dans les puits et le canal ne devraient pas dépasser 1 m, alors aucune inquiétude ne subsiste à cet effet. Toutefois, la formation de glace autour du capteur peut causer son bris permanent. Il est donc primordial de tout mettre en œuvre afin d'éviter que le gel n'affecte les capteurs. À cet effet, le guide d'utilisateur du « Levelogger Gold, Software Version 3.11 », disponible sur le site de Solinst (www.solinst.com) ou avec le logiciel de communication fournis avec les capteurs, donne une recommandation en page 50. Il s'agit de mettre le capteur dans un contenant flexible (ballon, sac, etc.) remplis d'éthanol ou de tout autre liquide antigel (Figure 12). Le capteur cessera surement de fonctionner sous la glace, mais il sera protégé des effets néfaste de la pression extrême exercé par le gel. Les capteurs ainsi protégés seront en place au moment du dégel et permettrons la prise de données dès le début de l'écoulement printanier.



Figure 12 : Schématisation de la préparation à l'hivernage d'un capteur de pression submersible et exemple d'hivernage dans un emballage scellé.

6 RECOMMANDATIONS ET CONCLUSION

En définitive, l'utilisation d'un canal trapézoïdal semble être une méthode simple et efficace pour mesurer l'écoulement faible, produit par un petit bassin versant dominé par des sols organiques. Cependant, l'installation de ce type de structure en milieu éloigné nécessite une bonne préparation. Voici donc quelques recommandations importantes :

- Choisir un site proche d'une route pour faciliter le transport du matériel qui est passablement lourd (canal, outils, gravier, etc.)
- Choisir un site possédant une section de son exutoire bien délimité et relativement rectiligne sur 15 à 20 m.
- Examiner attentivement le substrat dans et aux abords du ruisseau. En effet, si le dépôt de surface n'est pas suffisamment profond ou s'il contient une forte proportion de pierres, l'utilisation de pieux d'ancrage métallique sera impossible. D'autres systèmes d'ancrages devront alors être évalués.

- Tenter de modifier au minimum le tracé du cours d'eau.
- Faire attention à ne pas trop fragiliser les berges lors de l'installation du canal afin de ne pas accentuer les risques d'érosion lors des gros coups d'eau.
- Prévoir des sacs de graviers, très efficaces pour étanchéiser l'installation
- S'assurer que le canal est installé très précisément au niveau, en long, en large et en travers. S'assurer aussi que le port d'attache reliant le puits de tranquillisation au canal est lui aussi scrupuleusement au niveau.
- L'utilisation d'un capteur de pression submersible nécessite l'acquisition en simultané de données de pression barométrique. À cet effet, prévoir l'utilisation conjointe d'un Barologger ou s'assurer qu'une station météorologique est située à proximité du site.

7 ANNEXE 1

Explication théorique du fonctionnement des canaux.

Extrait du : "Water Resource Research Laboratory. 1997. Water Measurement Manual, Third Edition. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation. 317 p."

CHAPTER 8 – FLUMES (p. 8-1)

1. General

Flumes are shaped, open-channel flow sections that force flow to accelerate. Acceleration is produced by converging the sidewalls, raising the bottom, or a combination of both. When only the bottom is raised with no side contractions, the flume is commonly called a broad-crested weir. When the downstream depth is shallow and enough convergence exists between the upstream and downstream channels, the flow passes through critical depth. Therefore, flumes are sometimes called critical-depth flumes. When flow passes through critical depth, a unique water surface profile occurs within the flume or broad-crested weir for each discharge. This condition is known as free flow. For this case, upstream heads at one location relative to the control bottom elevation near the region of critical depth can be used to determine a usable head versus discharge relationship for flow measurement.

Flumes range in size from very small-1 inch (in) wide-to large structures over 50 feet (ft) wide that are installed in ditches, laterals, and large canals to measure flow. These flumes cover a corresponding discharge range of 0.03 to over 3,000 cubic feet per second (ft3/s) although no particular upper size limit exists. Commonly, irrigation channels are designed to operate at near bank full to extend delivery coverage and, when the landscape is flat, to minimize earthwork involved in bank height construction. Therefore, some flumes have been calibrated for the condition when the critical depth has been nearly drowned by downstream backwater either purposely or by later increase of downstream flow resistance. To measure

discharge with high levels of submergence, two head measurements are required, which results in significant loss of accuracy compared to free-flow measurements.

Flume head loss is less than about one-fourth of that needed to operate a sharp-crested weir having the same control width, and in some long-throated flumes, may be as low as one-tenth. Another advantage compared to most standard weirs is that for a properly designed and installed flume, the velocity of approach is a part of the calibration equations. Unauthorized altering of the dimensions of constructed flumes to obtain an unfair share of water is difficult and, therefore, not likely. Velocity of flow can usually be designed to minimize sediment deposition within the structure. Gradual convergence sections at the entrance tend to improve velocity distribution of approach flow and the passage of floating debris. Some flumes can be more expensive than sharp-crested weirs or submerged orifices in unlined channels.

8 ANNEXE 2

Photos des canaux en place prises à différents moments



Figure 12 : Site Nécopastic; vue du canal dans le sens de l'écoulement répétée en juin et août 2007.



Figure 13 : Site Aéroport, vue du canal dans le sens de l'écoulement répétée en juin et juillet 2007.



