



Institut national
de la recherche
scientifique

Rapport d'étude - Le touladi du lac Témiscouata

Par
Victor Duchesne
André St-Hilaire
Anne-Marie Pelletier
Yves Gratton

En date du
20 novembre 2019

Référence à citer :

Duchesne V, St-Hilaire A, Pelletier AM, Gratton Y, (2019), *Rapport d'étude - Le touladi du lac Témiscouata*, Québec : Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau Terre Environnement ; x+62 pages. (INRS - Centre Eau Terre Environnement, rapport de recherche ; 1893).

© INRS, Centre - Eau Terre Environnement, 2019
Tous droits réservés

ISBN : 978-2-89146-927-2 (version électronique)

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2019
Dépôt légal - Bibliothèque et Archives Canada, 2019

Remerciements

Ce rapport est la synthèse de plus d'un an de travail commun entre plusieurs personnes que j'aimerais ici remercier. D'abord, merci à mon directeur André de m'avoir fait confiance en acceptant de diriger ces travaux de recherches. Merci aussi à mon codirecteur Yves, qui m'a guidé pour l'analyse des spectres et de l'hydrodynamique. J'ai aussi eu la chance de travailler avec la superbe équipe de faune aquatique du MFFP de Rivière-du-Loup. Merci beaucoup à Anne-Marie, Patrick et David pour m'avoir fait profiter de votre riche expérience.

Ensuite, j'aimerais remercié tous les gens qui de près ou de loin ont participé aux efforts sur le terrain. Je pense ici à Alice Leguern-Lepage, Audrée Morin, Anthony Bellavance, Rosie Morissette, Philippe Lagueux, Justin Moreault, Maxime Morel, Christophe Dumoulin, Yann Bouchez, Marco Morin, Samuel Moreau, Denis Ouellet, François Hazel et bien d'autres.

Finalement, ce projet n'aurait pas été possible sans le regroupement d'acteurs du Témiscouata qui ont à coeur la santé de leur lac et qui ont démarré ce projet. Je parle de l'Association des chasseurs pêcheurs du Témiscouata, de la fondation Héritage Faune, des municipalités de Dégelis, Témiscouata-sur-le-Lac, Saint-Cyprien et de Saint-Juste-du-lac, de Cascades, de l'organisme du bassin versant du fleuve Saint-Jean, de la fondation de la faune du Québec, de la MRC de Témiscouata, de la Fondation canadienne de la faune, de l'Éco-site de la tête du lac Témiscouata, de la SADC du Témiscouata, de tourisme Bas-Saint-Laurent et du parc national du Lac-Témiscouata. Tous ces acteurs et bien d'autres ont financé le projet en compagnie de Mitacs, l'organisme boursier qui m'a supporté pour la durée du projet.

Merci à tous !

Résumé

Ce rapport présente les résultats du projet de recherche sur le touladi du lac Témiscouata. Sommes toutes, les conditions abiotiques sont adéquates pour la fraie du touladi et l'incubation des oeufs. Les mouvements des touladis matures lors de la fraie sont similaires à ce qui a été observé pour cette espèce. Ils consistent en des agglomérations sur les sites à la tombée du jour lors de l'automne durant des périodes de forts vents et de tempêtes. Il a été noté que les poissons restent généralement sous les 10 mètres de profondeur lors de la période de reproduction, alors que l'habitat optimal du touladi pendant la période estivale est situé sous les 15 mètres. Un colmatage partiel des interstices apparaît évident. Cependant, le taux normal de sédimentation pendant la période estivale, ainsi que la présence de fort courant, semble indiquer que le colmatage n'est pas due à des conditions particulières puisque les taux estimés bouchent les interstices au plus en 68,29 ans. La population de touladi mature dans le lac a été estimée à 6566 individus ce qui a permis de démontrer qu'environ 83,6% des oeufs ne restent pas sur les sites de fraie.

Table des matières

1	Introduction	1
2	Méthodologie	3
2.1	Situation du lac Témiscouata	3
2.2	La dynamique des courants	3
2.3	Le régime thermique	4
2.4	Station météorologique	6
2.5	Le suivi télémétrique	6
2.6	Profils physico-chimiques	7
2.7	Sédimentation et trappes	7
2.8	Bathymétrie	9
3	Conditions abiotiques des frayères	10
3.1	Thermie	10
3.2	Concentration en oxygène dissous	13
3.3	Fraie et vents	14
4	Mouvements du touladi pendant la fraie	18
4.1	Conditions physiques lors des agrégations	19
5	Taux de sédimentation, transport et colmatage	21
5.1	Transport des sédiments	21
5.1.1	Éléments de théorie sur la distribution sédimentaire en lac : les vagues et la PDD	22
5.1.2	Éléments de théorie sur la distribution sédimentaire en lac : les courants internes	23
5.2	Taux de sédimentation	25
5.2.1	Sédimentologie sur les sites de fraies	25
5.2.2	Causes potentielles du colmatage	29
6	Transport des oeufs	31
6.1	Transport des oeufs	31
6.2	Densité d'oeufs sur les frayères	33

6.2.1	Estimation de la densité d'oeufs	33
6.2.2	Hypothèse sur la faible densité et la survie des oeufs	37
7	Conclusion	39
A	Tableaux de données et figures	47
B	Exemple de calcul de colmatage interstitiel au lac Témiscouata	57
B.1	Commentaires sur le calcul	60
C	Complément d'analyse spectrale	61

Table des figures

2.1	Axes principaux et sites d'intérêts du lac Témiscouata	4
2.2	Trappes avec sédiments fins sur le gravier	8
2.3	Trappes à sédiments déployées sur les frayères	8
3.1	Profils moyens de la température à Dégelis.	11
3.2	Profils moyens de la température à la Pointe-aux-trembles.	11
3.3	Profils moyens de la température à la montagne du Fourneau.	11
3.4	Profils moyens de la température à l'île Notre-Dame.	11
3.5	Oxygène dissous dans la colonne d'eau aux différents sites de fraies du lac Témiscouata	12
3.6	Conditions physiques à la Montagne du Fourneau le 22 septembre 2018. . .	14
3.7	Spectre des variations de pression atmosphérique pendant la période estivale	16
3.8	Spectre des variations de pression atmosphérique pendant la période de fraie	16
3.9	Spectre des variations de vents parallèle à l'axe principal du lac pendant la période estivale	16
3.10	Spectre des variations de vents parallèle à l'axe principal du lac pendant la période de fraie	16
4.1	Bathymétrie, position des poissons et pente de la frayère de Dégelis, regroupées en une représentation graphique de <i>ArcMap</i> (version 10.6)	20
5.1	Exemples de forts courants susceptible de déplacer les sédiments sur toute la colonne d'eau.	25
5.2	Granulométrie des sédiments capturés sur les sites de fraie du touladi, au lac Témiscouata. Du haut vers le bas, la granulométrie de la <i>Montagne-du-Fourneau</i> , de la <i>Pointes-aux-trembles</i> et de <i>Dégelis</i>	27
A.1	Provenance des vents dominant et sites d'intérêts, tel que les trois frayères (<i>Montagne-du-Fourneau</i> , <i>Pointe-aux-trembles</i> , <i>Dégelis</i>) et les sites d'échantillonnage du Vieux-Quai et de l'Île Notre-Dame	49
A.2	Conditions physiques (courants, vents, température) lors de l'anomalie en oxygène du 18 octobre 2018 à la Pointe-aux-termbles.	50
A.3	Conditions physiques (courants, vents, température) lors de l'agglomération du 23 octobre à Dégelis.	51
A.4	Conditions physiques (courants, vents, température) lors de l'agglomération du 31 octobre à Dégelis.	52
A.5	Conditions physiques (courants, vents, température) lors de l'agglomération du 5 novembre à Dégelis.	53

A.6	Conditions physiques (courants, vents, température) lors de l'agglomération du 23 octobre à la Montagne.	54
A.7	Coefficient de traînée d'une sphère en fonction du nombre de Reynolds . . .	55
A.8	Vitesse d'entraînement des oeufs selon le coefficient de traînée d'une sphère de 5 mm de diamètre	56
C.1	Le chant d'un oiseau et sa transformée de Fourier	62

Liste des tableaux

2.1	Regroupement d'informations générales sur le lac Témiscouata.	5
2.2	Tamis utilisés lors de l'analyse granulométrique.	9
3.1	Statistiques des vents au Vieux-Quai	14
4.1	Agglomérations de touladis lors de la fraie de 2018	18
5.1	Taux de sédimentation, Fetch, PDD, pente et profondeur des trappes des frayères à touladi du lac Témiscouata	26
6.1	Statistiques de l'inventaire ichtyologique de 2018 du lac Témiscouata . . .	33
A.1	Statistiques de la température à la Montagne-du-Fourneau	47
A.2	Statistiques de la température à la l'île Notre-Dame	47
A.3	Statistiques de la température à la Pointe-aux-trembles	48
A.4	Statistiques de la température à Dégelis	48

Glossaire

- *Abiotique* : Caractère de ce qui n'est pas biologique.
- *ADCP* : Acoustic Doppler Current Profiler. Appareil mesurant la vitesse et la direction des courants à plusieurs profondeurs à la fois.
- *Anémomètre* : Appareil constitué d'une hélice fixée sur un axe pivotant. Mesure la vitesse et la direction du vent.
- *Bathymétrie* : Caractère de ce qui renseigne sur le relief sous-marin d'une zone géographique.
- *Cisaillement* : Différences de vitesse entre deux ou plusieurs profondeurs.
- *Colonne d'eau* : Ensemble des eaux au-dessus du fond marin se retrouvant à un point spatial de même latitude et longitude.
- *Contrainte de cisaillement* : Une force appliquée sur la surface d'un matériau.
- *Courant* : Mouvement d'un volume d'eau. Caractérisé par une vitesse et une direction.
- *CPUE* : Capture Par Unité d'Effort. Correspond au nombre de poissons capturés par un effort de pêche. L'effort de pêche est variable, mais est généralement défini par un filet déployé pendant une période de temps donnée.
- *Fetch* : La longueur effective sur laquelle le vent peut souffler pour transmettre son énergie aux vagues. Dépend de l'angle entre les vents et la surface du lac.
- *Fraie* : Ce qui est associé à la reproduction d'une espèce de poisson.
- *Granulométrie* : Étude de la distribution statistique des tailles d'un ensemble d'éléments tel que les sédiments.
- *Ichtyologique* : Qui concerne l'étude des poissons.
- *Lac dimictique* : Ce dit d'un lac dont la stratification thermique est brisée deux fois par année.
- *MFFP* : Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs.
- *Nombre de Reynolds* : Nombre adimensionnel issu des équations de Navier-Stokes. Défini par $V \cdot L \cdot \nu^{-1}$ où V est une vitesse caractéristique, L un longueur caractéristique et ν la viscosité cinématique ; caractérise le régime hydraulique.
- *PDD* : Profondeur de démarcation des dépôts. Profondeur qui délimite la zone où les remous, issus du passage des vagues, sont suffisamment forts pour empêcher le dépôts des sédiments fins.

- *SÉPAQ* : Société des Établissements de Plein Air du Québec. Propriétaire du Parc national du Lac-Témiscouata.
- *SLIN* : Méthode standardisée pour la capture de touladis. Développé et utilisée par le Ministère des Richesses naturelles et des Forêts de l'Ontario.
- *Téléométrie* : Action d'obtenir des mesures à distance.
- *Thermocline* : Profondeur où le clivage thermique est le plus important dans un lac.
- *Thermographe* : Senseur enregistrant la température. Peut être programmé pour prendre des mesures à la fréquence désirée.

1 Introduction

En 2013, au lac Témiscouata, le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) procédait à un inventaire ichtyologique de la population de touladi *Salvelinus namaycush*. Cet inventaire bidécennal s'inscrit dans un cadre provincial, et vise à surveiller l'évolution de la population de touladi dans la province. Depuis 1977, l'abondance de cette population est soutenue par ensemencement afin, entres autres, d'en conserver l'attrait pour la pêche sportive, un vecteur économique d'importance pour la région. Or, les résultats apportés par l'inventaire de 2013 montrent que malgré l'abondance d'adultes matures, le recrutement naturel est faible. La population se maintient grâce aux ensemencements biennaux. Cette conclusion vient confirmer les inquiétudes des pêcheurs locaux, qui décident alors, conjointement avec plusieurs autres acteurs, d'investiguer pour tenter de régler le problème. Un comité est formé et les choses se mettent en branle. L'abondance de géniteurs en santé mènent rapidement à la formulation d'une hypothèse : le faible recrutement serait dû à des frayères de mauvaise qualité. Plus particulièrement, une granulométrie substratique inadéquate combinée avec des espaces interstitiels colmatés sur les sites de fraie, ne favorisent pas l'infiltration des oeufs sous le substrat, là où ils sont protégés des prédateurs. Cependant, de multiples facteurs influencent le succès de la reproduction d'une espèce. Ainsi, plusieurs autres éléments peuvent s'avérer problématiques et méritent d'être étudiés.

Le présent rapport fait état des travaux de recherche qui ont été menés dans le but d'examiner cette problématique. Les méthodes employées sont détaillées à la section 2, puis les résultats d'une caractérisation des conditions abiotiques des sites de fraie sont présentés à la section 3. En parallèle, une analyse des mouvements du touladi durant la période de fraie est effectuée à la section 4. Enfin, les sections 5 et 6 traitent de l'hypothèse principale, soit la sédimentation sur les frayères et le possible déplacement des oeufs de touladi. La conclusion résume les faits saillants de l'étude et discute de ce qui reste à faire pour ce projet. L'annexe A contient figures et tableaux d'intérêts et l'annexe B présente

une modélisation du colmatage des espaces interstitiels du substrat. L'annexe C ajoute des précisions sur l'application et l'utilité de l'analyse spectrale.

2 Méthodologie

2.1 Situation du lac Témiscouata

Le lac Témiscouata est le plus grand de la région du Bas-Saint-Laurent, une des régions administratives de la province de Québec, au Canada. Il est situé en tête du bassin versant du fleuve Saint-Jean, fleuve qui se jette dans la baie de Fundy au Nouveau-Brunswick. Ses berges sont habitées par les citoyens de Témiscouata-sur-le-Lac, de Saint-Juste-du-lac et de Dégelis. Le tableau 2.1, tiré de CHARBONNEAU et GRÉGOIRE 2016, présente les caractéristiques principales du lac.

Trois frayères à touladi sont répertoriées dans ce lac. Le premier site d'importance (ci-après appelé *Montagne-du-Fourneau*) est situé au pied de la Montagne du Fourneau, dans le territoire du Parc national du Lac-Témiscouata, vis-à-vis la municipalité de Cabano. Le deuxième site (*Dégelis*) est situé au pied du premier tracelle supportant le sentier national du Bas-Saint-Laurent, près de la municipalité de Dégelis. Le troisième site (*Pointe-aux-Trembles*), de moindre envergure que les deux premiers, est situé vis-à-vis de l'embouchure de la rivière Touladi, au centre du lac. La position des trois frayères est visible à la figure 2.1 ainsi que les axes principaux (l'axe des x est orienté à 125° à l'est du nord) qui servent de référence pour toute les données vectorielles du présent rapport. De manière générale, les frayères sont pentues, possèdent un substrat avec une granulométrie variée, et présentent un colmatage partiel des espaces intersticiels. À certains endroits, la présence de périphyton et autres plantes aquatiques a été observée.

2.2 La dynamique des courants

Afin d'assurer une caractérisation complète, l'hydrodynamique des frayères doit être étudiée. Par conséquent, trois courantomètres profileurs acoustiques, ou ADCP¹, deux de type *WorkHorse Sentinel* de 600 kHz et un modèle *Sentinel V* de 1000 kHz fabriqués par

1. *Acoustic Doppler Current Profiler*

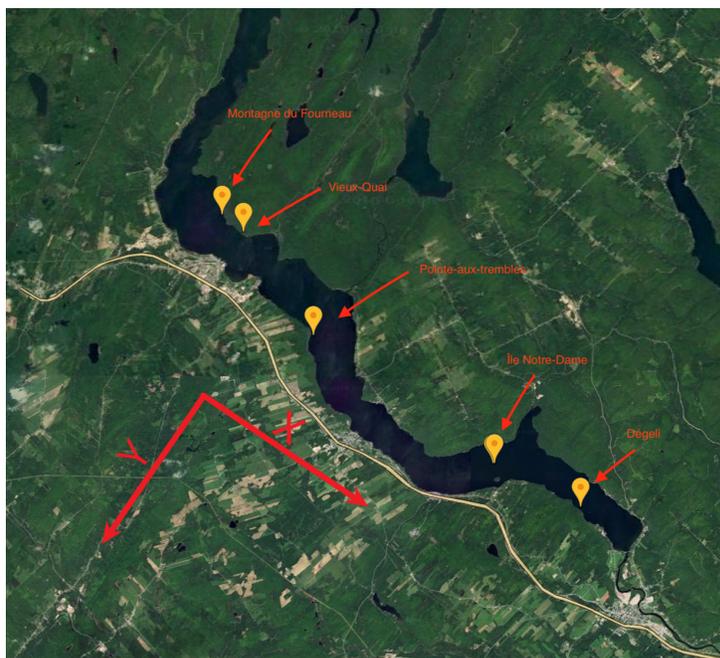


FIGURE 2.1 – Axes principaux et sites d'intérêts du lac Témiscouata

* Le lecteur trouvera un agrandissement en annexe.

la compagnie *Teledyne Marine*, ont été déployés au lac Témiscouata à l'été 2018, pour une période de 18 mois. Ils ont été positionnés verticalement, sur le fond du lac, le plus près possible des frayères connues. Les ADCP sont fixés à des supports en bois, lestés par deux blocs de béton. Un câble, attaché au support, est relié à une bouée située à la surface de l'eau, ce qui correspond à un déploiement en *I* (TALLEY 2011). Cet ensemble forme un *ancrage à ADCP*. Pour l'été 2018, les ADCP ont recueilli des données par couches verticales de 1 m, de leur position jusqu'à la surface, à toutes les heures. Ce document utilise uniquement les données récoltées à l'été et à l'automne 2018.

2.3 Le régime thermique

La température de l'eau est également une variable d'intérêt (WETZEL 2001). Afin d'obtenir des données probantes sur le régime thermique du lac, des *chaînes de thermographes* ont été déployées près des sites de fraie. Le déploiement est identique à celui des ancrages

Altitude	≈ 148 m
Coordonnées	47,669447°N et 068,816926°W
Profondeur maximale	73,3 m
Profondeur moyenne	32 m
Longueur maximale	38,9 km
Largeur maximale	3 km
Périmètre	104 km
Superficie du lac	67 km ²
Superficie du bassin versant (sans le lac)	2630 km ²
Volume d'eau	2 193 500 000 m ³
Régime hydrologique	Artificiel (barrage)
Ratio de drainage (Sup. BV/ sup. lac)	39,3
Régime thermique	Dimictique
Temps de renouvellement	1,45 ans (529 jours)

Tableau 2.1 – Regroupement d'informations générales sur le lac Témiscouata.

à ADCP. Un câble relie un lesté à une bouée de surface. Le long de ce câble, 9 thermographes de type *HOBO temp pro v2* (précis à $\pm 0,2^\circ\text{C}$), *Pendant temp/light* (précis à $\pm 0,53^\circ\text{C}$) et *TidBit v2* (précis à $\pm 0,2^\circ\text{C}$) de la compagnie *Onset* sont fixés à 0, 1, 2, 3, 5, 10, 15, 20 et 25 m ou à 0, 1, 2, 3, 5, 7, 9, 11, 15 m de la surface, selon la profondeur du site. Trois de ces chaînes ont été déployées près des 3 frayères connues du lac en même temps que les 3 ancrages à ADCP. En plus, une chaîne de thermographes appartenant au MFFP a été positionnée au centre du lac au site de *l'île Notre-Dame* (loin des frayères, visible à la figure 2.1) couvrant une profondeur de 50 m suivant le protocole de [DUBÉ et SOULARD 2017](#). Chacun des thermographes a été programmé pour effectuer une mesure à chaque heure. Lors de l'échantillonnage de l'été 2018, trois des neuf thermographes de la chaîne déployée à la Montagne du Fourneau ont été noyés, causant la perte des données.

2.4 Station météorologique

Des données sur les vents ont été récoltées afin d'estimer la longueur effective du lac et de vérifier leur impact sur les courants (POND et PICKARD 2013). Pour ce faire, lors de l'été 2018, une station météorologique a été installée sur la rive du lac, à moins de 10 m de la berge, sur le site du *Vieux-Quai*. Cette station est composée d'un anémomètre *RM Young*, fixé au sommet d'un manche de bois de 3 m de hauteur et d'une sonde thermique de *Campbell Scientific*. L'anémomètre et le thermomètre sont connectés à un capteur de données² *CR1000* de *Campbell Scientific* qui enregistre la température de l'air ainsi que la direction et la vitesse des vents à toutes les heures. Le *CR1000* est lui-même alimenté par une batterie rechargeable de 12 V. Afin d'assurer l'indépendance énergétique de la station, un panneau solaire a été installé. Il a été orienté vers le sud avec un angle de 45° par rapport au sol, à 1 m de hauteur.

2.5 Le suivi télémétrique

Le suivi télémétrique des poissons est une opération qui a débuté en 2016 avec l'implantation de 15 émetteurs acoustiques dans la cavité abdominale d'autant d'individus matures. L'année suivante, en 2017, 15 autres émetteurs furent introduits dans le lac portant le total à 30. Les signaux sonores, de 69 kHz, émis par ceux-ci peuvent alors être captés par un appareil de télémétrie de type *VR100* de la compagnie *Vemco*. Ceci permet de déterminer approximativement la position du poisson. L'objectif de base de cette opération était de localiser les zones de reproduction du touladi lors de la période de fraie. Pour ce faire, une équipe composée de plusieurs bénévoles a effectué des sorties en bateau sur le lac en 2017 et en 2018. Les sorties étaient intermittentes et de durées différentes. Cependant, la plupart d'entre elles ont eu lieu après 16h, car le touladi devient plus actif à la tombée du jour, soit pendant sa période de reproduction (MARTIN et OLVER 1980, DEROCHE 1969). En 2017, un des poissons marqués est décédé, diminuant le total d'individus pouvant être

2. *Data Logger*.

suivis à 29. Le présent rapport utilise seulement les données de télémétrie collectées en 2018 afin de permettre une analyse concomitante avec le reste de l'échantillonnage.

2.6 Profils physico-chimiques

La récolte de données sur la concentration en oxygène dissous a été effectuée par la prise de profils de la colonne d'eau, avec une sonde à oxygène *ProODO* de la compagnie *YSI Inc.* La sonde mesure l'oxygène dissous, une variable essentielle pour le touladi (SLY 1988, GIBSON et FRY 1954) et la température. Pour réaliser un profil, la sonde, qui est connectée au terminal numérique par un câble métré, est descendue le plus verticalement possible jusqu'au fond du lac depuis le bateau. Les données sont notées à la main à tous les mètres, ou enregistrées de manière continue dans l'appareil. Puis, la profondeur est estimée à l'aide du câble métré et d'un rapporteur d'angle. Les profils ont été effectués lorsque les conditions météorologiques et la disponibilité des techniciens rendaient l'opération possible. Tous les profils ont été faits à proximité des trois frayères connues, afin d'assurer une suite chronologique probante. Ces profils donnent un aperçu de l'état d'eutrophisation du lac et renseignent sur la présence d'oxygène dissous en profondeur.

2.7 Sédimentation et trappes

Afin d'estimer le taux de sédimentation sur les frayères, trois trappes à sédiments ont été déployées à chacun des sites de fraie le 10 juillet 2018. Ces trappes sont des boîtes de *Whitlock-Vibert* (visibles aux figures 2.2 et 2.3), de 6 cm de largeur par 13,5 cm de longueur et 8,7 cm de hauteur, remplies de gravier propre (ST-HILAIRE et al. 2005) qui ont été lestées afin de se maintenir en position sur le substrat, à des profondeurs respectives de 4,1 m, 6,8 m et 7,1 m. Le taux d'ensablement est mesuré en pesant les sédiments fins déposés entre les interstices du gravier des trappes pendant la période d'échantillonnage, d'une durée de 120 jours. Ces trappes ont été récupérées par des plongeurs de chez *Enviromer* le 7 novembre 2018.

Afin de récupérer les trappes, les plongeurs ont dû les insérer à l'intérieur de sacs en plastique ou de seaux directement sous l'eau, ce qui a pour conséquence d'emprisonner des volumes importants d'eau à l'intérieur des contenants. Certains sacs en plastique ont percé lors des manipulations. Ils ont été placés le plus rapidement possible dans des seaux fermés afin de limiter au mieux la perte d'eau et donc de sédiments en suspension. Il est difficile d'estimer la quantité de sédiments perdus. De retour au laboratoire, les trappes ont été sorties des seaux puis nettoyées manuellement à l'aide de brosses, afin de récupérer les sédiments coincés ou collés sur le gravier.



FIGURE 2.2 – Trappes avec sédiments fins sur le gravier



FIGURE 2.3 – Trappes à sédiments déployées sur les frayères

La quantité d'eau étant très grande dans certains seaux, le temps requis à l'évaporation aurait été très long. De plus, l'apparente finesse des sédiments décourageait toute tentative de vider manuellement une partie de l'eau, de peur d'en perdre. Le traitement des sédiments a donc été réalisé par filtration, suivie d'un séchage au four permettant l'évaporation de l'eau restante. D'abord, les contenus des seaux provenant du même site ont été combinés afin d'accélérer le traitement. Puis, les volumes d'eau et de sédiment ont été pesés. Ensuite, l'eau excédentaire a été vidée avec précaution afin de minimiser les pertes en sédiments. Puis, le contenu des seaux a été versé, dans une colonne composée, dans l'ordre croissant, des tamis du tableau 2.2. Les tamis sont faits de mailles métalliques dont la taille permet de séparer les sédiments en cinq classes granulométriques. Une fois

les sédiments séparés par les tamis, chaque classe granulométrique a été placée au four à 60 °C pendant au moins 24 heures. Une fois les sédiments secs, ils ont été pesés. Le taux de sédimentation en $[\text{mg} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{jour}^{-1}]$, a été obtenu en sommant la masse de sédiments dans chaque tamis, pour un site donné, puis en divisant la valeur obtenue par la surface de la trappe et le nombre de jours de déploiement. Cette manière de procéder offre l'avantage de récolter l'information sur la granulométrie des sédiments qui se déposent sur les frayères.

2.8 Bathymétrie

Les analyses et modèles présentés ci-dessous ont nécessité l'utilisation d'une carte bathymétrique du lac Témiscouata. Cette carte a été fournie par le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, qui l'a obtenue des auteurs de [LAJEUNESSE et al. 2017](#). La carte a été utilisée notamment pour déterminer la pente moyenne des sites de fraie, leur exposition relative aux vents dominants et réaliser les analyses télémétriques. Les calculs de base ont été faits en utilisant le logiciel *ArcMap* de la compagnie *ESRI*, un logiciel de type SIG ou *GIS*³ en anglais.

	U.S.A Standard Testing Sieve No.18	Canadian Standard Sieve Serie No.35	Canadian Standard Sieve Serie No.40	Fischer Laboratory Test Sieve No.120
Ouverture (μm)	1000	710	425	125

Tableau 2.2 – Tamis utilisés lors de l'analyse granulométrique.

3. Pour *Geographical Information System*.

3 Conditions abiotiques des frayères

L'étude des variables abiotiques des sites de fraie a d'abord pour but de vérifier si les conditions thermiques et en oxygène dissous sont adéquates pour le développement des oeufs et la survie des jeunes touladis. Ce sera l'objet de cette section. De manière générale, les conditions thermiques sont optimales pour la fraie, mais aussi pour le développement des jeunes touladis. La présence d'oxygène dissous est généralement abondante, mais peut être faible en profondeur. Les figures 3.1-3.2-3.3-3.4 présentent les profils thermiques moyens pendant la période estivale et pendant la période de fraie. Les données brutes pour chaque site sont présentées aux tableaux A.1-A.2-A.3-A.4. Les données d'O₂ sont présentées à la figure 3.5. Le tableau 3.1 résume les informations sur la vitesse moyenne, la vitesse maximale moyenne, qui correspond à la moyenne des vitesses maximales enregistrées chaque heure et la direction moyenne des vents. Une représentation visuelle de la direction des vents est donnée à la figure A.1. Les données de thermie et de vents sont divisées en deux périodes distinctes. La période dite *estivale* couvre la durée totale de l'échantillonnage, c'est-à-dire, du 29 juin au 7 novembre 2018. La période dite *de fraie* couvre approximativement la période de reproduction du touladi au lac Témiscouata, soit du 7 octobre au 7 novembre 2018 (Anne-Marie Pelletier, communication personnelle).

3.1 Thermie

Les conditions thermiques sur les sites de fraie et à l'île Notre-Dame présentent des similarités. Les données suggèrent un habitat préférentiel pour le touladi (en deçà de 15 °C selon PLUMB et BLANCHFIELD 2009) sous la barre approximative des 12 m et un habitat optimal sous les 15 m (en deçà de 12 °C selon MARTIN et OLVER 1980, GIBSON et FRY 1954, CHRISTIE et REGIER 1988) en période estivale. Cet habitat thermique est typique des grands lacs stratifiés, qui possèdent généralement une température inférieure à 15 °C sous la thermocline. En période de fraie, le lac n'est plus stratifié et la colonne d'eau présente des températures autour de 11 °C. Cette température est considérée comme

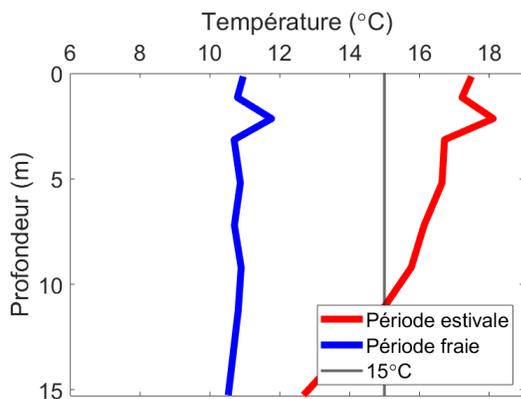


FIGURE 3.1 – Profils moyens de la température à Dégelis.

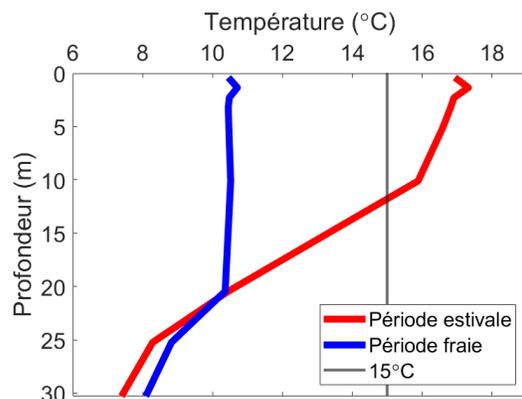


FIGURE 3.2 – Profils moyens de la température à la Pointe-aux-trembles.

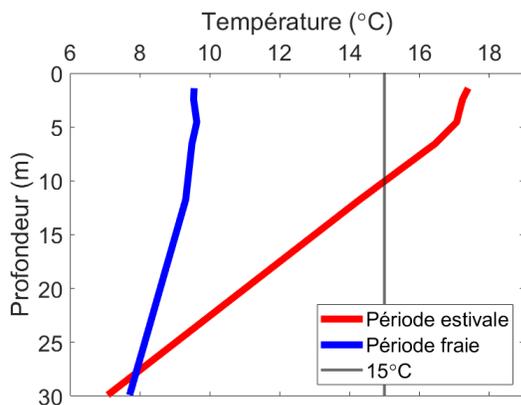


FIGURE 3.3 – Profils moyens de la température à la montagne du Fourneau.

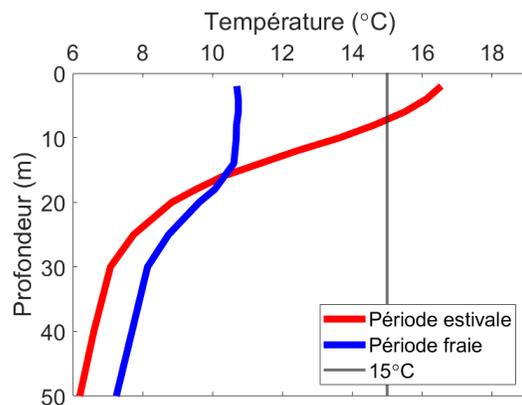


FIGURE 3.4 – Profils moyens de la température à l'île Notre-Dame.

* Les lignes sont plus larges que les intervalles de confiance. La ligne noire correspond à la limite supérieure de la préférence thermique du touladi

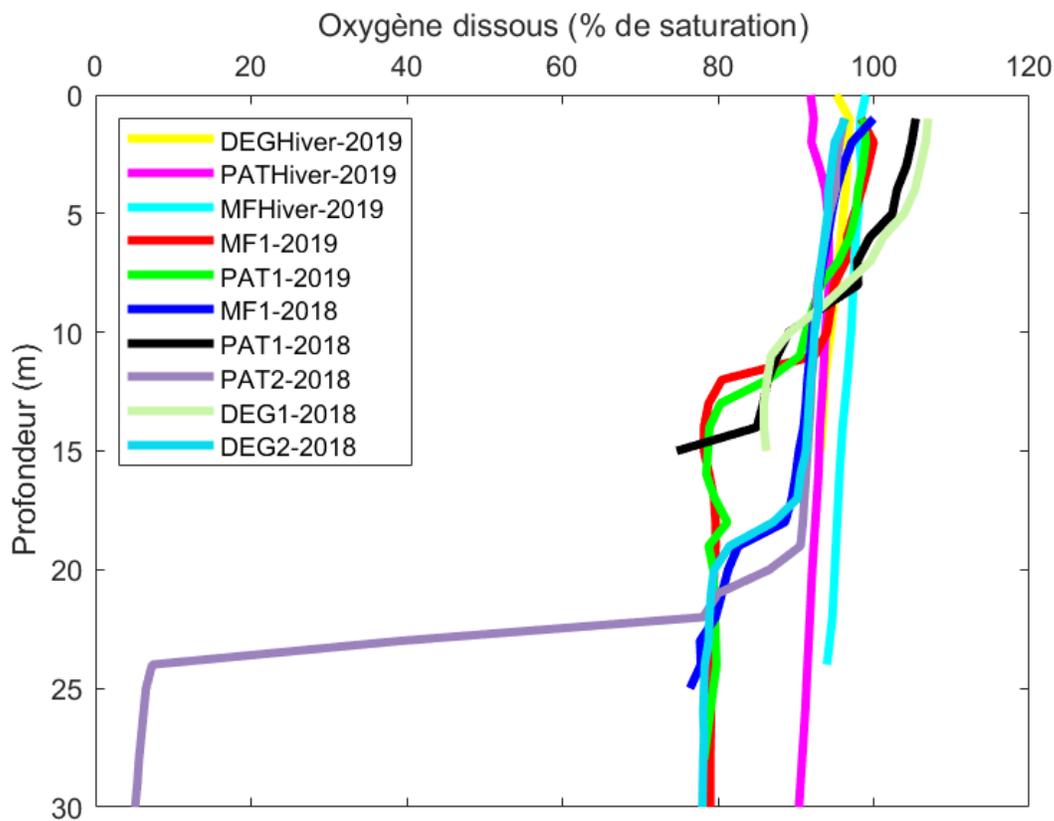


FIGURE 3.5 – Oxygène dissous dans la colonne d'eau aux différents sites de fraies du lac Témiscouata

* Les lignes sont plus larges que les intervalles de confiance.

adéquate pour la survie des oeufs du touladi et leur bon développement (SLY 1988, MUIR et al. 2012).

Les figures 3.1 et 3.2 présentent toutes deux un léger pic sous la surface qui dénote la présence d'une couche d'eau plus chaude qu'en surface.

3.2 Concentration en oxygène dissous

La concentration en oxygène dissous est typique d'un lac oligo-mésotrophe (KALFF 2002) comme le lac Témiscouata (CHARBONNEAU et GRÉGOIRE 2016). Tous les profils, sauf un, présentent un pourcentage de saturation (proportionnel à la concentration et inversement proportionnel à la température de l'eau) entre 80 % et 110 % sur toute la colonne d'eau. Cette concentration est suffisamment élevée pour assurer un apport en oxygène suffisant pour le touladi adulte et aussi pour assurer le bon développement des oeufs (SLY 1988, MARSDEN et AL. 1995, PLUMB et BLANCHFIELD 2009) à toutes les profondeurs échantillonnées. Cependant, le profil effectué à la Pointe-aux-trembles le 18 octobre 2018 marque une chute rapide de la concentration de 80 % à 5-15 % vers les 24 m de profondeur. Ce phénomène, s'il est réel, peut potentiellement causer des problèmes pour les oeufs du touladi s'ils se retrouvent dans cette zone. Sous la barre des $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ⁴, l'apport en oxygène est insuffisant. Cela a pour conséquences d'entraver sérieusement le développement des oeufs et même de les empêcher d'arriver à l'éclosion (SLY 1988). De même, les jeunes touladis ont besoin d'au moins $7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ⁵ pour se développer adéquatement (EVANS 2007). Ainsi une valeur entre 10-15 % pose problème. Par contre, cette diminution importante de la concentration en oxygène peut avoir été causée par l'enfouissement de la sonde dans le substrat fin au fond du lac. Le potentiel d'oxydo-réduction négatif des sédiments au fond d'un lac peut causer une anoxie totale à 1 cm de profondeur dans le substrat (HARGRAVE 1972). Cette cause d'erreur est hautement probable, car la baisse se produit de manière soudaine et autour de 25 m à la Pointe-aux-Trembles, la distance estimée du fond à ce site. La figure A.2 présente les conditions physiques au moment du profil. Les mouvements d'eau ayant eu lieu lors de l'échantillonnage présentent des vitesses autour de $20 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, ce qui auraient bien pu pousser la sonde dans le substrat et l'enterrer sous plus de 1 cm de sédiment.

4. Ce qui correspond à des pourcentages de saturation en oxygène dissous de 30 % pour de l'eau à 4 °C.

5. Ce qui correspond à des pourcentages de saturation en oxygène dissous de 55 % pour de l'eau à 4 °C.

Période estivale*			Période de fraie**		
Vitesse moyenne	Vitesse max moyenne	Direction	Vitesse moyenne	Vitesse max moyenne	Direction
m·s ⁻¹	m·s ⁻¹	°	m·s ⁻¹	m·s ⁻¹	°
1,79 ± 0,07***	4,16 ± 0,11	172,77 ± 3,66	2,62 ± 0,19	5,69 ± 0,30	157,01 ± 6,81
Vitesse moyenne > 5 m·s ⁻¹			Vitesse moyenne > 5 m·s ⁻¹		
6,68 ± 0,17	11,74 ± 0,27	163,73 ± 4,62	7,14 ± 0,24	12,42 ± 0,34	169,27 ± 4,45

* Du 29 juin au 7 novembre 2018

** Du 7 octobre au 7 novembre 2018

*** Ces données sont présentées avec un intervalle de confiance à 95%

Tableau 3.1 – Statistiques des vents au Vieux-Quai

3.3 Fraie et vents

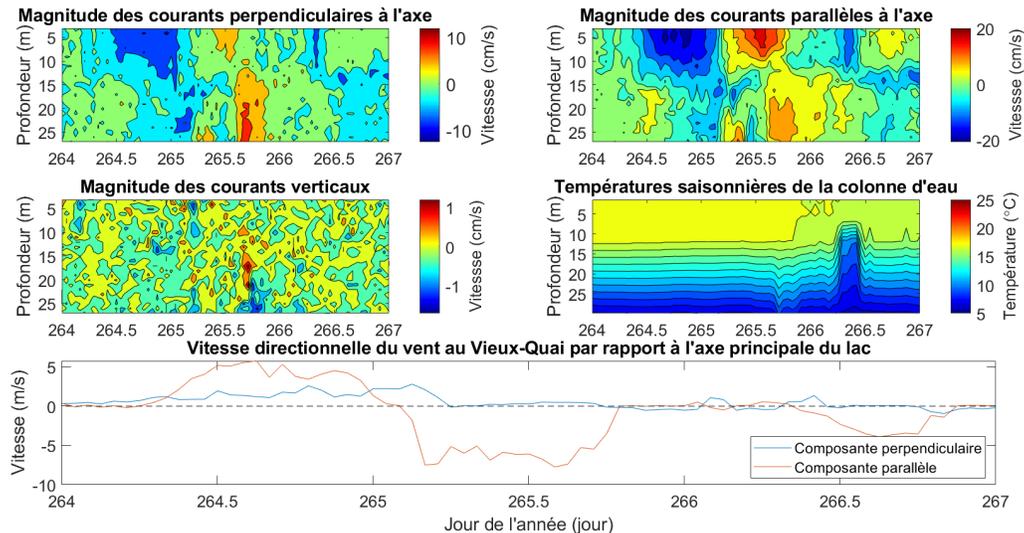


FIGURE 3.6 – Conditions physiques à la Montagne du Fourneau le 22 septembre 2018.

Traditionnellement, la littérature associe la période de fraie du touladi à des épisodes de forts vents et à une fréquence de tempêtes accrues (MARTIN et OLVER 1980, ESTEVE et al. 2008, CALLAGHAN et al. 2016). Cela s’explique, entre autres, par la corrélation entre les forts vents et le mélange de la colonne d’eau, qui vient refroidir la température. Ce type de conditions a été observé à tous les sites de fraie du lac Témiscouata. La figure 3.6 présente les conditions physiques autour du 22 septembre 2018 à la Montagne du Fourneau.

Ces conditions constituent un exemple typique du processus de mélange automnal d'un lac dimictique comme le lac Témiscouata (CHARBONNEAU et GRÉGOIRE 2016). De forts courants (vitesses supérieures à $10 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$) mélangent la colonne d'eau, uniformisant sa température en engendrant des remontées d'eau froide provenant de l'hypolimnion. Les figures 3.7 et 3.8 présentent la distribution énergétique des systèmes dépressionnaires (les variations de pression) en fonction de leur fréquence de passage⁶. Ce type de figure présente une variante de l'énergie (unité²×fréquence) en ordonnée et une variante de la fréquence en abscisse ($\ln[\text{cycles par jour}]$). Cette manière de visualiser le système permet de préserver la variance. La résolution de l'espace des fréquences est de $\pm 0,03 \text{ cycles} \cdot \text{jour}^{-1}$.

La figure 3.7 présente deux pics distincts qui correspondent respectivement à des périodes de 6,55 et 3,96 jours. Ces pics indiquent que pendant l'été 2018, l'énergie fut introduite par les tempêtes dans le lac, principalement à des intervalles de 6,55 et 3,96 jours. Par contre, lors de la période de fraie, l'énergie a été introduite de manière plus continue, comme en témoigne la large bosse de la figure 3.8. Le maximum de la bosse correspond à une période de 3,45 jours, ce qui est plus petit que celle de 3,96 jours de la période estivale. De plus, la largeur de la bosse et son maximum à $0,455 \text{ kPa}^2$ indiquent que les systèmes dépressionnaires étaient plus énergétiques pendant la période de fraie que pendant la période estivale, où la densité spectrale des deux principaux pics atteint respectivement $0,269$ et $0,336 \text{ kPa}^2$.

Cette analyse est soutenue par les figures 3.9 et 3.10 qui présentent la distribution énergétique des vents selon leur fréquence d'apparition. Encore une fois, la période de fraie présente un spectre plus large et plus énergétique que celui de la saison estivale. Le premier pic de la figure 3.9 correspond à une fréquence d'apparition de 3,44 jours, le même que le pic de 3,45 jours est présent à la figure 3.8. Le deuxième pic est associé à une période

6. Ce genre d'analyse est faite à l'aide de méthodes spectrales, une technique mathématique utilisant les transformées de Fourier qui décomposent le signal dans le domaine des fréquences. L'annexe C explique plus en détails l'utilité et l'application de cette méthode d'analyse.

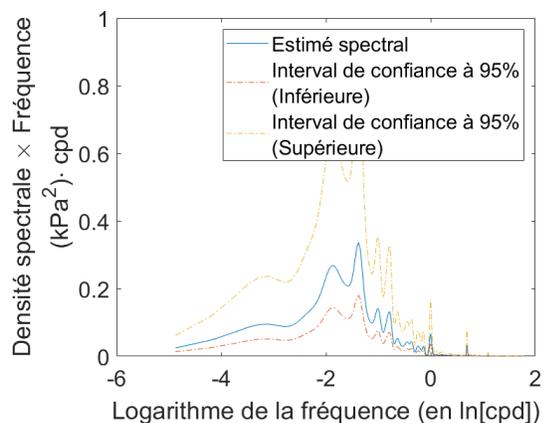


FIGURE 3.7 – Spectre des variations de pression atmosphérique pendant la période estivale

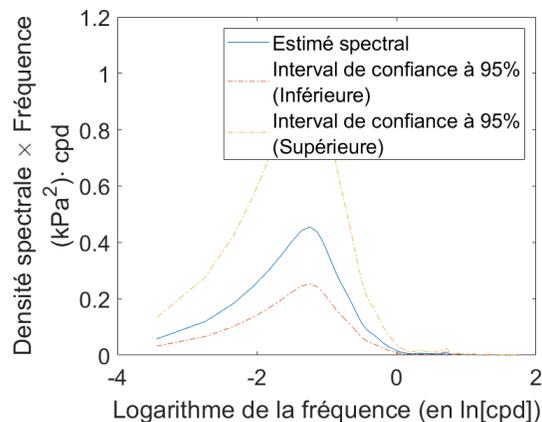


FIGURE 3.8 – Spectre des variations de pression atmosphérique pendant la période de fraie

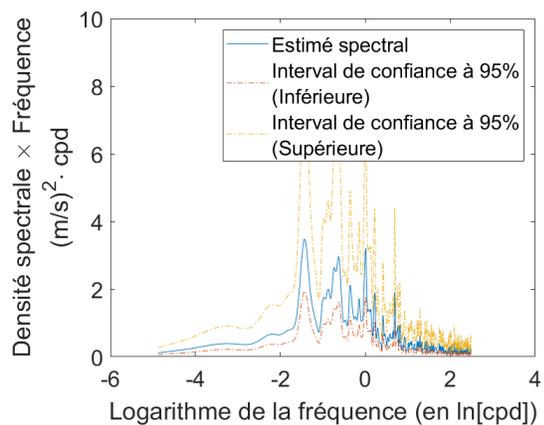


FIGURE 3.9 – Spectre des variations de vents parallèle à l'axe principal du lac pendant la période estivale

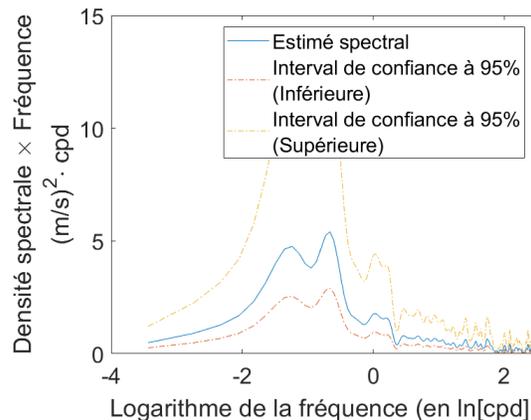


FIGURE 3.10 – Spectre des variations de vents parallèle à l'axe principal du lac pendant la période de fraie

de 1,93 jour et est semblable au deuxième pic de la période estivale (1,85 jour). Finalement, le troisième pic de la figure 3.9 correspond à un cycle journalier (période de 0,99 jour) qui est simplement associé au cycle diurne de réchauffement/refroidissement des masses d'air au-dessus du lac. Ces phénomènes correspondent à des brises de terres et des brises de mer (HOLTON 1973). L'air chauffe durant la journée, mais sa température diminue rapidement lorsque le soleil se couche, entraînant des mouvements d'airs, se traduisant par des vents. Les deux pics de la figure 3.10 se rapportent aux périodes de 3,44 jours et

de 1,93 jours.

Aussi, la direction moyenne des vents, tel que présentée au tableau 3.1 et à la figure A.1, indique que ceux-ci soufflent en moyenne le long de l'axe principal du lac. Ceci a pour effet de maximiser la longueur effective et donc, de maximiser l'énergie transmise, sous forme de vagues, au lac par les vents. Les vagues, ou les courants, se propagent généralement à 45° par rapport à la direction du vent (CSANADY 1982). L'exposition aux vagues du site de la Montagne-du-Fourneau sera élevée comparativement aux deux autres sites. Les vitesses des vents sont en moyenne plus élevées lors de la période de fraie à $5,69 \pm 0,30$ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ comparé à $4,16 \pm 0,11$ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ lors de la période estivale ce qui est en accord avec l'analyse précédente.

En bref, les vents et les tempêtes sont à la fois plus forts et plus fréquents pendant la période de fraie, comparativement au reste de la saison. Ce résultat n'est pas surprenant, puisque la fraie a lieu à l'automne, une saison caractérisée par davantage d'extrêmes météorologiques. De plus, ces conditions ont toujours été reliées à la fraie du touladi par plusieurs auteurs (MARTIN et OLVER 1980, MARSDEN et AL. 1995). L'analyse des données de vent, de température et d'oxygène dissous ne démontrent aucune condition abiotique adverse sur les frayères au lac Témiscouata.

4 Mouvements du touladi pendant la fraie

Le suivi télémétrique effectué aux automnes 2017 et 2018 avait pour objectif d'identifier les sites de fraie du touladi au lac Témiscouata. En complément d'analyse, il est aussi possible de situer temporellement et spatialement les agrégations de touladis durant la fraie. En combinant ces éléments avec les données abiotiques mesurées lors de ces agrégations, il est possible de faire des inférences sur les conditions d'habitat durant la fraie.

	Détection 1			Détection 2			Détection 3		
ID	15107	15108	51891	15109	28732	28733	15661	28732	28733
Date	23-Oct-2018 16-17h			31-Oct-2018 19-20h			05-Nov-2018 16-17h		
Profondeur (m)	10,3	10,6	NaN*	13,6	NaN	NaN	14,9	NaN	NaN
Site	Dégelis**			Dégelis			Dégelis		

* Certains émetteurs n'étaient pas munis de capteur de pression.

** Les sites de la Montagne du Fourneau et de la Pointe-aux-trembles ne furent pas suffisamment échantillonnés pour pouvoir y détecter des agglomérations.

Tableau 4.1 – Agglomérations de touladis lors de la fraie de 2018

Suivant les critères de [BINDER et al. 2015](#), une aggrégation de touladis est définie comme étant la détection de 10 % des poissons marqués⁷ dans un cercle de 10 m de rayon à l'intérieur d'une heure. Selon ces critères, 3 aggrégations distinctes ont pu être détectées en 2018. Les détails de ces regroupements sont présentés au tableau 4.1. Les trois détections ont eu lieu au site de Dégelis, car c'est le site qui a été le plus visité par l'équipe de terrain. Cela ne veut pas dire qu'il n'y a pas eu d'aggrégations aux autres sites. De plus, les sorties sur le terrain avaient lieu le soir, donc aucune détection n'a été enregistrée avant 16h. Malgré ces biais, des conclusions intéressantes peuvent être tirées du tableau 4.1.

7. Ou trois touladis dans notre cas, ce qui est peu.

Tout d’abord, les agrégations ont eu lieu à des intervalles d’une semaine. Cela indique que le touladi visite les sites de fraie pendant au moins deux semaines, une durée considérée typique pour l’espèce (DEROCHE 1969). Bien qu’il reste sur les frayères un certain temps, la majorité de la ponte de l’espèce se produit sur deux à trois jours (DEROCHE 1969), généralement lors de journée venteuse. Il est intéressant de noter que les poissons du lac Témiscouata munis de capteur de pression semblent se tenir plus près du fond, sous la barre des 10 m, alors que l’espèce a plutôt tendance à frayer en surface (MARTIN et OLVER 1980, FITZSIMONS et al. 2005). La détection de deux touladis près de 10 m le 23 octobre 2018 au site de Dégelis pourrait indiquer une fraie plus en profondeur chez la population de touladi du lac Témiscouata. La figure 4.1 présente la morphologie géologique de la frayère de Dégelis. Un aplanissement est visible près des dix mètres de profondeur autour du point *Dégelis 1*. Cet endroit pourrait constituer une zone de ponte privilégiée par les femelles due à la faiblesse de la pente, assurant entre autre un meilleur nettoyage des sédiments fins par les courants, mais aussi une zone de dépôt potentielle.

4.1 Conditions physiques lors des agrégations

L’ensemble des conditions physiques, incluant les vents, les courants et la température, lors des agrégations du tableau 4.1 est présenté aux figures A.3 à A.5. Les conditions thermiques lors des trois évènements sont pratiquement identiques. Elles se caractérisent d’abord par une colonne d’eau bien mélangée, avec une température uniforme autour de 10°C. Ces températures sont, encore une fois, similaires à celles rapportées par d’autres études sur la fraie du touladi (MARTIN et OLVER 1980, MARSDEN et AL. 1995). Ensuite, la présence de vents parallèles forts une journée avant la détection 1 et la détection 3 est conforme avec la littérature. Des vents moyennement forts ont été observés lors de la détection du 31 octobre. De manière générale, la colonne d’eau du site de Dégelis ne présente pas de forts courants durant les périodes d’agrégation, surtout comparée au site de la Montagne à la figure A.6. Cependant, les agrégations du 5 et du 23 se sont produites dans des conditions de mélange vertical de la colonne d’eau. Plus particulièrement, un

mouvement de va-et-vient est notable lors du 23 octobre aux figures A.3, A.5 et A.6. Ces mouvements ont pu déclencher la fraie du touladi et correspondent à des courants typiques des conditions optimales pour la reproduction.

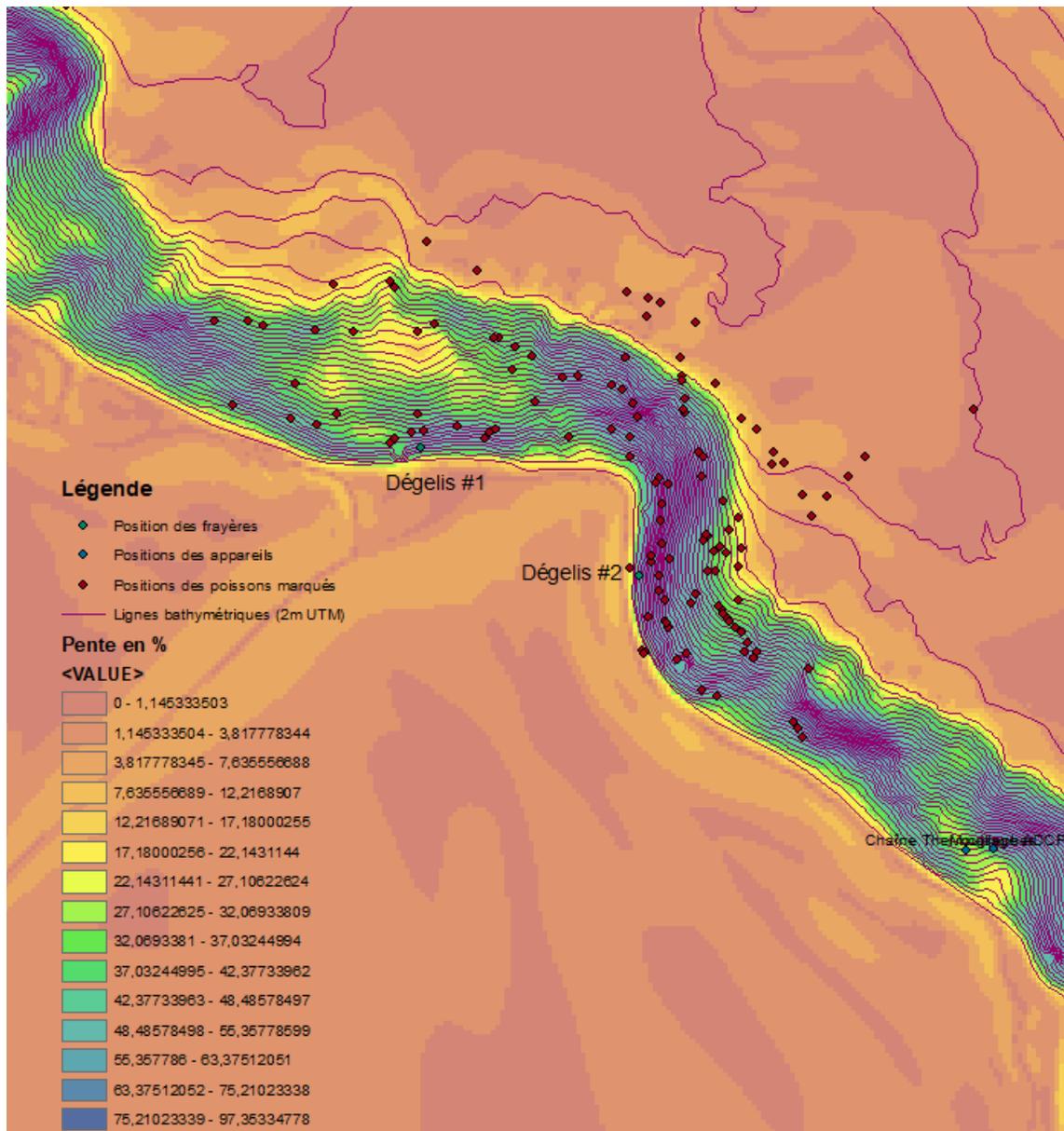


FIGURE 4.1 – Bathymétrie, position des poissons et pente de la frayère de Dégelis, regroupées en une représentation graphique de *ArcMap* (version 10.6)

5 Taux de sédimentation, transport et colmatage

5.1 Transport des sédiments

Il existe principalement deux processus dynamiques ([MORALES-MARIN et al. 2018](#), [HÅKANSON et JANSSON 2002](#), [KJARAN et al. 2004](#)) qui sont responsables de la déposition et de la dispersion des sédiments dans un lac. La force des vagues et les courants internes. L'impact des vagues sur les côtes induit une remise en suspension constante des sédiments qui s'y déposent ([SEIBT et al. 2013](#), [HAWLEY et LESHT 1992](#), [HÅKANSON et JANSSON 2002](#)). Cependant, l'effet des vagues est restreint aux premiers mètres de profondeur. Cette zone d'érosion inclut tout le pourtour du lac entre la surface et la *profondeur de démarcation des dépôts* (PDD). Cette limite a été proposée par [ROWAN et al. 1992](#) puis amélioré par [HAMILTON et MITCHELL 1996](#) et permet d'estimer la profondeur minimale de déposition des sédiments fins transportés par les vagues. Au-dessus de la PDD, les vagues entraînent des remous suffisamment forts pour remettre constamment en suspension les sédiments. Sous la PDD, l'impact des vagues est moindre et les sédiments peuvent s'y déposer. Cependant, à ces profondeurs, l'autre processus : les ondes internes et les courants qui y sont associés, peut remettre en suspension les sédiments. Ces derniers sont générés principalement par les vents lors d'évènements météorologiques importants ([MORALES-MARIN et al. 2018](#), [KALFF 2002](#), [HÅKANSON et JANSSON 2002](#)), mais peuvent aussi prendre leur source ailleurs. Il est possible de déterminer la fréquence de la resuspension en profondeur à partir des données de courants mesurées en 2018 et ainsi de vérifier si les espaces interstitiels sont à risque d'être colmatés.

5.1.1 Éléments de théorie sur la distribution sédimentaire en lac : les vagues et la PDD

D'après KOMAR et MILLER 1974, la vitesse critique induite par les vagues à laquelle les sédiments plus petits que 0,05 cm sont soulevés du sol est donnée par :

$$u_{\tau} = \sqrt{\frac{0,21\sqrt{d_0/D}(\rho_s - \rho)gD}{\rho}}, \quad (5.1)$$

où $\rho = 1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ est la densité de l'eau douce, $\rho_s = 2650 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ est la densité moyenne des sables (BERGERON 2018), $g = 9,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ est l'accélération gravitationnelle, $D = 125 \times 10^{-6} \text{ m}$ est le diamètre moyen des particules et

$$d_0 = \frac{H_w}{\sinh(2\pi H/L)} \quad (5.2)$$

prend en compte l'impact de la hauteur significative⁸ des vagues (H_w), leur longueur d'onde (L) et la profondeur d'intérêt (H). La valeur de H_w est directement liée à la valeur de la longueur effective du site d'intérêt tel que :

$$H_w = 0,332\sqrt{F}. \quad (5.3)$$

Pour une longueur effective F^9 minimum de 7 km, comme à la Montagne du Fourneau, la PDD théorique est située entre 7,44 et 10,53 m (voir le tableau 5.1). Cela correspond aux observations reportées par les plongeurs (Anne-Marie Pelletier, données non publiées) qui ont rapporté peu d'espaces colmatés au-dessus de 7,5 m de profondeur. Ainsi, puisque les trappes à sédiments étaient situées à une profondeur typique de 6,8 m sur cette frayère, il est assez normal de constater qu'il n'y a que peu d'accumulation de sédiments dans les trappes près de la surface.

8. Définit comme la hauteur moyenne du tiers supérieur des vagues.

9. *Fetch* en anglais

5.1.2 Éléments de théorie sur la distribution sédimentaire en lac : les courants internes

Sous la PDD, ce sont plutôt les courants internes et le cisaillement qui exercent une force sur le substrat et qui sont le principal processus de transport des sédiments. Il est difficile de modéliser adéquatement ce type de transport (HÅKANSON et JANSSON 2002) dû à la complexité et l'incertitude associées à la prédiction des vitesses au niveau du substrat, la profondeur étudiée et la morphologie du lit (KJARAN et al. 2004). En s'inspirant des équations régissant le transport sédimentaire en rivière, lorsque le cisaillement est trop fort, les sédiments sont remis en suspension selon la formulation de Shields (SHIELDS 1936).

$$\theta = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho)gD} \quad (5.4)$$

Où θ représente le rapport de la contrainte de cisaillement (τ) sur le poids apparent de la particule $(\rho_s - \rho)gD$. Sur une pente, l'équation 5.4 doit être modifiée tel que la constante g prendra en compte l'inclinaison du site. Pour ce faire, l'introduction d'un facteur cosinus est nécessaire pour modéliser a priori l'action de la force de gravité sur le transport. Alors, l'équation devient

$$\theta = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho)(g \cos \phi)D} \quad (5.5)$$

où ϕ représente l'angle de la pente en degrés. La contrainte de cisaillement peut s'exprimer de plusieurs manières différentes (BIRON et al. 2004). Nous suivrons ici la méthode de WILLIAMS 1995, valable pour les sables, tel que

$$\tau_e = \rho C_d u^2 \quad (5.6)$$

où la contrainte de cisaillement efficace τ_e est directement proportionnelle au carré de la vitesse des courants u . La valeur du coefficient de traînée C_d est difficile à estimer,

mais en moyenne, [WILLIAMS 1995](#) l'évalue autour de $C_d = 0,0056$. Selon [SHIELDS 1936](#), le transport des sédiments débute lorsque le rapport $\theta \approx 0,047$. Ainsi, pour $\tau = \tau_e$ on obtient l'équation

$$u^2 = \frac{\theta(\rho_s - \rho)g \cos \phi D}{C_d \rho}. \quad (5.7)$$

En insérant les valeurs de pente pour les différentes frayères (tableau [5.1](#)), on obtient :

$$\begin{aligned} MF & : |u| = 12,11 \pm 0,12 \quad [\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}] \\ PAT & : |u| = 12,39 \pm 0,02 \quad [\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}] \\ DEG & : |u| = 12,11 \pm 0,11 \quad [\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}] \end{aligned}$$

comme vitesses critiques pour lesquelles il y aura transport des sédiments en profondeur (sous la PDD). Cependant, il est connu que le modèle de Shields n'est pas précis pour des inclinaisons supérieures à 2° ([SMART 1984](#)), car l'équation ne prend pas en compte la diminution du facteur d'ancrage, ou du frottement, des sédiments sur le substrat. Ainsi, ces vitesses représentent une borne supérieure. Au-dessus de ces vitesses, le transport est certain, mais il peut se produire en-dessous. Ces valeurs, relativement élevées pour un lac, concordent avec les estimations présentées dans la littérature ([SEIBT et al. 2013](#)) et indiquent qu'en temps normal, il ne devrait pas y avoir de transport de sédiments. Cependant, de forts événements météorologiques peuvent entraîner un brassage important de toute la colonne d'eau avec des vitesses atteignant les $|u| > 10 \text{ [cm} \cdot \text{s}^{-1}]$ (voir la figure [5.1](#)). Lors de tels événements, les sédiments fins de moins de $125 \mu\text{m}$ de diamètre seront mis en suspension sur toute la colonne d'eau et transportés ailleurs dans le lac. Ainsi, un colmatage des interstices est possible sous la PDD, mais des perturbations météorologiques ponctuelles sont susceptibles d'assurer une redistribution périodique. De manière générale, la zone d'accumulation standard de ces sédiments sera au fond du lac, là où les vitesses sont les moins élevées ([HÅKANSON et JANSSON 2002](#)). Le colmatage évident (Anne-Marie Pelletier, communications personnelles) des interstices sur les sites de fraie

ne peut donc pas s'expliquer par l'absence ou la faiblesse des courants et des vagues.

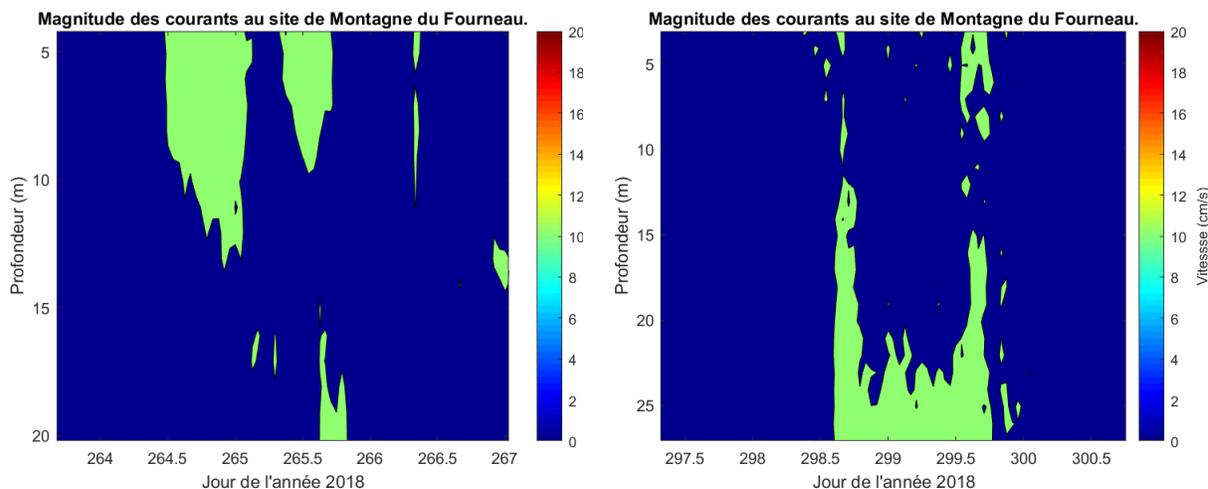


FIGURE 5.1 – Exemples de forts courants susceptible de déplacer les sédiments sur toute la colonne d'eau.

5.2 Taux de sédimentation

Les taux de sédimentation obtenus par filtration sont présentés au tableau 5.1. Ces taux sont du même ordre de grandeur, bien qu'un peu plus élevés, que ce qui peut être trouvé dans la littérature (KOREN et KLEIN 2000, DOMINIK et al. 1983, KEMP et HARPER 1976). Les résultats de l'analyse granulométrique par tamisage sont présentés à la figure 5.2. De manière générale $92,38 \pm 0,01\%$, des sédiments se constituent de sable fin, dont le diamètre médian est typiquement inférieur à $425 \mu\text{m}$.

5.2.1 Sédimentologie sur les sites de fraies

Les taux de sédimentation sont différents à chacun des trois sites de fraie. Au moins trois facteurs différents peuvent être mis en cause pour expliquer ces divergences : la proximité d'un tributaire (qui peut apporter des sédiments fins), l'exposition aux vents dominants (voir les sections précédentes 5.1.1 et 5.1.2) et la présence de développements anthropiques (HÅKANSON et JANSSON 2002). Les tributaires sont les principales voies

	Montagne du Fourneau	Pointes-aux-trembles	Dégelis
Taux* [$\frac{\text{mg}}{\text{cm}^2\text{jour}}$]	0,3809 ± 0,0017	0,7704 ± 0,0017	1,0172 ± 0,0017
Profondeur trappe [m]	6,8	4,1	7,4
Fetch** [km]	7-13	7,5-9,5	2,5-3
PDD [m]	7,43-10,53	7,73-8,83	4,16-4,61
Inclinaison moyenne*** [°]	25,54±2,13	18,93±0,70	25,54±1,99

* Ces données sont présentées avec une erreur absolue sur la mesure.

** Valeurs très similaires à celles données par [TESSIER 2008](#), estimées par ArcGIS.

*** Valeurs calculées par une routine ArcGIS.

Tableau 5.1 – Taux de sédimentation, Fetch, PDD, pente et profondeur des trappes des frayères à touladi du lac Témiscouata

d'apports en sédiments dans un lac puisqu'ils concentrent les sédiments provenant du ruissellement érosif du bassin versant ([KALFF 2002](#), [HÅKANSON et JANSSON 2002](#), [KOREN et KLEIN 2000](#)). Tel que mentionné précédemment, l'exposition d'un site est caractérisée par sa susceptibilité à recevoir des vagues plus ou moins fortes générées par le vent. Ce paramètre est déterminé par la longueur effective F du lac au site, qui détermine l'énergie maximale que peuvent avoir les vagues qui arrivent au site. Ces valeurs sont présentées au tableau 5.1. La présence de routes, sentiers, pistes cyclables ou chalets peut augmenter l'apport en sédiments local, dans la mesure où le ruissellement sur des sites anthropiques près du lac aura tendance à transporter davantage de sédiments ([KALFF 2002](#)) provenant des sols mis à nu.

Le taux de sédimentation le plus élevé est celui de la frayère de Dégelis ($1,0172 \pm 0,0017$ [$\text{mg}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{jour}^{-1}$]). La pointe sud de la frayère est directement exposée aux vagues générées

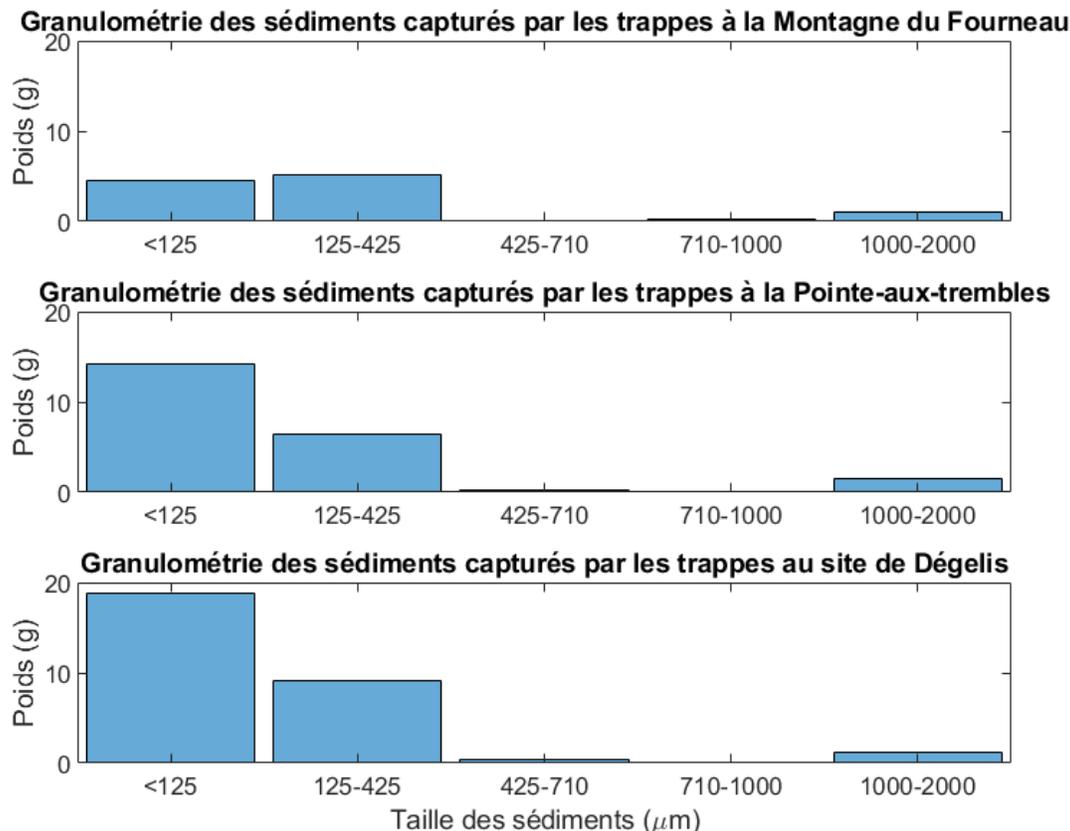


FIGURE 5.2 – Granulométrie des sédiments capturés sur les sites de fraie du touladi, au lac Témiscouata. Du haut vers le bas, la granulométrie de la *Montagne-du-Fourneau*, de la *Pointes-aux-trembles* et de *Dégelis*

par les vents dominants. Cependant, le fetch est faible, ce qui fait que les vagues ne peuvent déloger les sédiments sous 4,61 m. Comme l'échantillonnage à ce site a été effectué à 7,4 m de profondeur, seuls des courants internes forts générés par des systèmes dépressionnaires pourraient causer la resuspension. À l'inverse, la pointe nord est beaucoup moins exposée aux vents dominants. Ce site n'est pas situé à proximité d'un des trois tributaires du lac. Conséquemment, il n'y a pas de source locale importante de sédiments. Par contre, la présence du tracelle, passant juste au-dessus, peut créer une source importante de sédiments. La piste située plus haut est très prisée des cyclistes l'été et des motoneigistes l'hiver. La piste étant constituée de graviers fins, le ruissellement sur la piste pourrait

transporter ce gravier directement en contre-bas aux niveau de la frayère. La quantité plus importante de sédiments qui se déposent à ce site serait donc causée par la fréquence d'utilisation de la piste, combinée avec la faiblesse des vagues et courants. Les courants sont un peu plus faibles au site de Dégelis qu'au deux autres frayères ($3,37 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ en moyenne contre $3,51$ et $3,77 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ pour la Montagne et la Pointe).

Le deuxième site avec le plus fort taux de sédimentation est celui de Pointe-aux-trembles ($0,7704 \pm 0,0017 \text{ [mg}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{jour}^{-1}\text{]})$, bien que la trappe à sédiments se situait au-dessus de la PDD. Ce site possède de bons courants en profondeur ($3,71 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ en moyenne comparativement à $2,84$ et $2,17$ pour la Montagne et Dégelis sous les 10 m de profondeur), mais ces derniers risquent davantage d'amener les sédiments en provenance de la rivière Touladi, dont l'embouchure est située au nord-est du site. La frayère est exposée aux courants perpendiculaires à l'axe principal du lac qui sont générés le long des côtes en provenance de l'embouchure de la rivière. Il est donc probable que la sédimentation de la Pointe-aux-trembles soit reliée à la présence de la rivière Touladi. Cependant, il est difficile de vérifier cette hypothèse.

Le dernier site, qui présente la plus faible sédimentation ($0,3809 \pm 0,0017 \text{ [mg}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{jour}^{-1}\text{]})$, est le site de la Montagne-du-Fourneau. Ce dernier est situé assez loin de tout tributaire. Par contre, il présente une longueur effective de 7 à 13 km avec une PDD d'au moins $7,73 \text{ m}$. Également, il n'y a pas vraiment de développement ou de présence anthropique près de ce site. Puisque le site est fréquemment frappé par de nombreuses vagues et courants internes importants et que l'échantillonnage des sédiments s'est fait au-dessus de la PDD à $6,8 \text{ m}$. Il n'est pas étonnant que ce site présente le plus faible taux des trois étant donné qu'aucune des trois causes de forts dépôts ne s'applique.

5.2.2 Causes potentielles du colmatage

Le colmatage partiel des frayères tel qu’observé par les plongeurs d’*Enviromer* ne peut donc pas s’expliquer par un apport continu élevé de sédiments en provenance du bassin versant. Afin de mieux visualiser ce que représente les taux de sédimentation du tableau 5.1, une modélisation du temps nécessaire au colmatage est développée à l’annexe B. D’autres hypothèses sont à privilégier. Par exemple, un apport massif et soudain de sédiments a davantage de chance de réussir à colmater les interstices. Si l’apport en sédiments fins est suffisant et soudain, la contrainte de cisaillement exercée par les courants peut ne pas être suffisamment élevée pour les déloger. Comme l’apport est massif et rapide, les sédiments ont alors le temps de s’imbriquer l’un dans l’autre, les rendant plus difficiles à bouger. Plusieurs événements récents dans l’histoire de la région pourraient avoir occasionné cet apport massif.

Tout d’abord, la construction du barrage du lac Témiscouata dans les années 1930 et sa reconstruction en 1990 a rehaussé subitement le niveau d’eau du lac de 61 centimètres (CHARBONNEAU et GRÉGOIRE 2016), augmentant ainsi la quantité de berges érodables. Les berges instables pourraient s’être effondrées entraînant de forts apports sédimentaires locaux juste au-dessus des frayères traditionnelles. Notamment, le Ministère du Développement Durable, de l’Environnement et des Parcs, en 2008 a documenté le remodelage des baies et anses du lac Témiscouata (TESSIER 2008) suite au rehaussement du niveau du lac.

Également, le développement du parc national du lac Témiscouata en 2009 a entraîné un développement de routes, terrains de camping et sentiers pédestres qui peuvent tous contribuer à l’érosion et au transport de sédiments vers le lac. Le parc attire beaucoup de visiteurs (57 000 en 2017, Samuel Moreau communications personnelles). Cette augmentation de l’achalandage se traduit directement en augmentation de véhicules, vagues générées par les bateaux et autres facteurs érodants. Bien que moins subite que la construction du

barrage, ce changement a pu avoir un impact.

De plus, la construction de l'autoroute 85 a augmenté le flux de véhicules et de camions lourds qui transitent par la région. Tous ces facteurs mis ensemble peuvent potentiellement expliquer un apport accru de sédiments au lac, et possiblement la colmatation partielle des frayères.

6 Transport des oeufs

6.1 Transport des oeufs

Le transport des oeufs de touladi par les courants est un processus important dans la sélection d'un site de fraie par une population ([FITZSIMONS et MARSDEN 2014](#), [SLY 1988](#), [MARTIN et OLVER 1980](#)). En utilisant directement l'équation 5.7 et les dimensions appropriées pour les oeufs, il est possible de déterminer, la vitesse critique à partir de laquelle les courants peuvent transporter les oeufs de touladi. Comme les espaces entre les roches du substrat sont partiellement colmatés, des courants assez forts peuvent déplacer les oeufs en surface et les amener à l'extérieur des sites de fraie, plutôt que de les pousser dans les interstices. L'utilisation de l'équation de Shields n'est pas tout à fait adaptée à ce type de calcul. Bien que le transport sédimentaire en rivière est très similaire à celui sur le littoral du lac, une des différences principale est l'importance de la pente. L'impact de cette dernière a tendance à être sous-estimé, en particulier lorsqu'elle est supérieure à 3 % soit $\approx 2^\circ$ ([SMART 1984](#)) ce qui est évidemment le cas pour les frayères étudiées. Également, l'équation de Shields est paramétrisée pour les sables de petite taille et modélise moins bien la dynamique entourant les particules plus grosses et peu denses comme les oeufs de touladi ([RIJN 2019](#)).

La synthèse la plus récente concernant les propriétés des oeufs du touladi est celle de [MARTIN et OLVER 1980](#). La taille d'un oeuf est typiquement entre 1,6 à 6,8 mm de diamètre. Cette taille varie avec les saisons, la grandeur de la femelle et le lac. En utilisant les données de six études, la synthèse de [MARTIN et OLVER 1980](#) permet de déterminer un diamètre moyen de $D = 4,975$ [mm]. Cependant, aucune étude ne s'est intéressée à mesurer la densité ou le poids moyen d'un oeuf de touladi, l'autre paramètre nécessaire pour utiliser l'équation 5.7. Une seule mention de la «flottabilité négative» de l'oeuf est faite par [GUNN 1995](#). La synthèse de Martin permet de déterminer de manière indirecte la densité ρ_s d'un oeuf de touladi en $\text{mg}\cdot\text{mm}^{-3}$. Selon ces données, une femelle moyenne

contient environ 1492 oeufs par kilogramme, pèse 4,69 kg dont 11,25% provient de ses oeufs. Ainsi, la femelle moyenne contiendra 6997 oeufs qui comptent pour 0,528 kg de son poids. Autrement dit, un oeuf moyen de touladi pèse 75,4 mg, avec un volume de 64,47 mm³, pour une densité massique de $\rho_s = 1,170 \text{ mg} \cdot \text{mm}^{-3} \Rightarrow \rho_s = 1170 \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}]$ légèrement supérieure à celle de l'eau.

Pour une telle densité, la vitesse critique u_c est donnée par 5.7 avec $\rho_s = 1170$, $D = 4,975 \times 10^{-3}$. Le coefficient de trainée d'une sphère C_d dépend du régime hydraulique quantifié par le *nombre de Reynolds*. En choisissant un écoulement laminaire avec des vitesses de $20 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, le nombre de Reynold est de l'ordre de 750, ce qui correspond à un régime avec un coefficient de trainée stable autour de $C_d = 0,445$ (voir la figure A.7). Cependant, la valeur du coefficient de trainée varie beaucoup dans cette ordre de grandeur des vitesses. Cela fait que, pour un écoulement laminaire avec des vitesses autour de $5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, le nombre de Reynold vaut environ 200, ce qui correspond à une valeur de $C_d = 0,850$. Ainsi, la vitesse critique pour laquelle il y a déplacement des oeufs de touladis dépend de la valeur du coefficient de trainée qui est comprise entre $0,445 \leq C_d \leq 0,850$ (CLIFT et al. 2005). En insérant ces paramètres dans l'équation 5.7 (voir aussi la figure A.8), les valeurs obtenues sont :

$$MF \quad : \quad 1,97 \leq |u| \leq 2,77 \quad [\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$PAT \quad : \quad 1,97 \leq |u| \leq 2,77 \quad [\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$DEG \quad : \quad 2,03 \leq |u| \leq 2,83 \quad [\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}]$$

Autrement dit, la plupart des oeufs devraient être transportés par les courants, car des vitesses autour de $3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ sont fréquemment atteintes lors d'épisode de fort vent comme le montre les figures 5.1 et A.6.

6.2 Densité d'oeufs sur les frayères

Afin de vérifier si le colmatage des interstices limite la quantité d'oeufs qui se développent sur les sites, les plongeurs d'*Enviromer* ont compté le nombre d'oeufs qu'ils pouvaient trouver à l'intérieur de quadrats de 0,25 m² à la frayère de la Montagne du Fourneau. En comparant la densité (en [oeufs·m⁻²]) *in situ* de $2,88 \pm 1,6$ ¹⁰ oeufs·m⁻² à une densité théorique, il est possible de déterminer la proportion d'oeufs qui se développent sur les frayères et de quantifier le succès de la reproduction.

6.2.1 Estimation de la densité d'oeufs

Cependant, déterminer une densité théorique n'est pas chose aisée. Les modèles existants sont empiriques et approximatifs, ce qui fait que l'analyse suivante doit être considérée avec précaution. Pour calculer la densité théorique, il faut connaître le nombre de femelles matures présentes dans le lac Témiscouata. Ce nombre peut s'estimer à l'aide de modèle ou par des méthodes de marquage-recapture.

Bien que qu'un touladi marqué a été recapturé lors de l'inventaire ichtyologique de [PELLETIER 2019](#), les données recueillies sont insuffisantes pour estimer de manière probante la taille de la population. Ainsi, il faut se rabattre sur des modèles.

Nombre de captures (C)	Nombre de femelles matures (M)	Captures par filet (CPUE)	Poids moyen femelle mature (en kg)	Nombre de filet
240	36	6,5	2,7±0,28*	37

* Ces données sont présentées avec un intervalle de confiance à 95%

Tableau 6.1 – Statistiques de l'inventaire ichtyologique de 2018 du lac Témiscouata

10. Intervalle de confiance à 80%

À cette fin, celui développé par [JANOSCIK et LESTER 2003](#) pour le ministère des Ressources naturelles de l'Ontario est assez bien adapté à la situation au lac Témiscouata. Celui-ci est basé sur deux variables, la capture par unité d'effort et la superficie du plan d'eau, deux valeurs connues au lac. La capture par unité d'effort (*CPUE*) a été calculée par [PELLETIER 2019](#) lors du dernier inventaire ichtyologique et est estimée à 6,5 (voir le tableau 6.1). La superficie a également été mesurée à 67 km² ([LAJEUNESSE et al. 2017](#)). Selon [JANOSCIK et LESTER 2003](#), la densité de touladis par hectare D est donnée par

$$D = \frac{81 \times CUE^{1.07}}{\sqrt{A}}, \quad (6.1)$$

ou *CUE* est le *Capture per Unit Effort* et A est l'aire du lac en hectare (1 km² = 100 hectares). La *CUE* correspond au nombre de touladis capturés par des filets maillants dont la taille est standardisée selon la méthode *SLIN*¹¹ ([JANOSCIK 2001](#), [LESTER et al. 1991](#)). Comme la méthode *SLIN* diffère du protocole de [LECLERC et al. 2011](#) utilisé par [PELLETIER 2019](#) en 2018, un ajustement de la valeur du *CPUE* doit être fait pour utiliser ce modèle.

La méthode *SLIN* consiste à effectuer une pêche de 90 minutes au printemps dans les zones peu profondes du lac avec trois filets par site. L'engin utilisé est un filet maillant composé de six panneaux de 15,2 × 2,4 m². Chacun des trois filets est composé uniformément et respectivement de mailles carrées de 38, 51 et 64 mm de large ([LESTER et al. 1991](#)). Ainsi, chaque filet échantillonne concrètement 218,88 m² pendant 1,5 heures. La méthode utilisée par [PELLETIER 2019](#) lors de l'inventaire de 2018 est bien différente. Les engins de pêche sont des filets maillant constitués de huit panneaux de 7,6 × 1,8 m², dont les mailles sont respectivement de taille 25, 38, 51, 64, 76, 102, 127, 152 mm. L'échantillonnage a lieu tard dans l'été, vers le milieu du mois d'août et les filets pêchent la nuit entre 18 et 24h. Cependant, lors de l'inventaire de 2018, les filets ont pêché en moyenne pendant 17h46 heures sur une surface de 109,44 m², dû à des problèmes techniques. La taille des

11. Spring Littoral Index Netting

mailles utilisées par [PELLETIER 2019](#) font que la proportion de la population sous les 4 années d'âge est sous-échantillonnée. Ce biais induit donc que les valeurs calculées sont vraies pour la proportion de la population âgée de plus de 4 ans. Puisque'on s'intéresse ici aux femelles matures, et que celles-ci sont toujours plus agée que 4 ans, ce biais ne pose pas problème.

Afin d'utiliser le modèle de [JANOSCIK et LESTER 2003](#), il faut convertir les unités de *CPUE* calculées avec la méthode de [LECLERC et al. 2011](#) en unités *CUE* de [JANOSCIK 2001](#). En se basant sur les différences de temps de pêche et de taille de filet, la *CPUE* de 6,5 de [PELLETIER 2019](#) devient

$$CUE = 6,5 \times \text{ratio heure} \times \text{ratio taille} \quad (6.2)$$

$$CUE = 6,5 \times \frac{1,5}{19,77} \times \frac{218,88}{109,44} \quad (6.3)$$

$$CUE = 0,99 [\text{capture} \cdot \text{filet}^{-1}]. \quad (6.4)$$

En insérant cette valeur transformée dans [6.1](#), on obtient

$$D = \frac{81 \times CUE^{1.07}}{\sqrt{A}} \quad (6.5)$$

$$D = \frac{81 \times (0,99)^{1.07}}{\sqrt{6700}} \quad (6.6)$$

$$D = 0,98 [\text{touladi} \cdot \text{hectare}^{-1}]. \quad (6.7)$$

Cette densité correspond à une population totale de

$$0,98 \times 6700 = \quad (6.8)$$

$$6566 \text{ touladis}. \quad (6.9)$$

L'intervalle de confiance du modèle est donné par

$$IC = D^{1 \pm t \times SE}, \quad (6.10)$$

où $SE = 0,33$, est l'erreur type du modèle et t est le paramètre de Student. Ainsi, les intervalles de confiance à 80% ($t = 1,37$) sont

$$IC = 0,98^{1 \pm 1,37 \times 0,33} \quad (6.11)$$

$$D = [0,97 \quad 0,99] \quad (6.12)$$

$$N = [6499 \quad 6633]. \quad (6.13)$$

Cet intervalle de confiance est certainement sous-estimé. Dû à la nature logarithmique du modèle, les valeurs près de l'unité auront automatiquement un intervalle de confiance faible. Cet artéfact a aussi pour conséquence d'accentuer les incertitudes si les valeurs s'éloignent beaucoup de l'unité.

L'objectif est toujours de déterminer le nombre de femelles matures présent au lac Témiscouata. Des données du tableau 6.1, sur 240 captures, 36 d'entre elles étaient des femelles matures. Cela signifie qu'une proportion de $36/240 = 15 \pm 3,1\%$ (VOLLSET 1993)¹² de la population de plus de 4 ans est composée de femelles matures. Il y aurait donc entre 774 et 1201 femelles matures dans le lac¹³. Considérant que les femelles matures, au lac Témiscouata, pèsent $2,75 \pm 0,20$ kg, et qu'une femelle moyenne pond 1492 oeufs par kg (voir la section 6.1), alors chaque femelle pourrait pondre 4103 ± 298 oeufs par fraie. Sachant qu'environ $90,0 \pm 8,7\%$ ¹⁴ des femelles matures du lac se reproduisent dans une année (Anne-Marie Pelletier, communications personnelles), quelque $[2,95 \leq 4,04 \leq 5,29]$ millions d'oeufs se déposeraient sur les frayères du lac pendant une période de fraie.

12. Intervalle de confiance à 80% en utilisant une approximation basée sur la loi normale.

13. En moyenne 985.

14. Encore une fois basée sur la loi normale, ça serait peut être mieux estimer avec la binomiale

En combinant les données de télémétrie avec la carte bathymétrique du lac, il est possible de calculer la superficie qu'occupent les frayères connues du lac Témiscouata. Ces dernières recouvrent communément entre 140 000 et 320 000 m². Ainsi, la densité d'oeufs sur les frayères sera comprise entre

$$D = [9, 22 \quad 37, 78] \text{ oeufs} \cdot \text{m}^{-2} \quad (6.14)$$

avec en moyenne une valeur de 17,57 oeufs·m⁻². Ces nombres sont similaires à plusieurs études ([BENOIT et LEGAULT 2002](#), [FITZSIMONS 1995](#), [MARSDEN et al. 2005](#)).

6.2.2 Hypothèse sur la faible densité et la survie des oeufs

En comparant les valeurs de [6.14](#) avec la densité calculée des données préliminaires de $2,88 \pm 1,6$ [oeufs·m⁻²], au mieux

$$\frac{2,88 + 1,6}{9,22} = 48,6 \text{ \%} \quad (6.15)$$

des oeufs restent sur les frayères alors qu'au pire, seulement

$$\frac{2,88 - 1,6}{37,78} = 3,4 \text{ \%} \quad (6.16)$$

s'y retrouvent. En moyenne, 16,4 % des oeufs restent sur les frayères, ce qui implique que 83,6 % sont perdus. Considérant, les arguments développés à la section [6.1](#), il semblerait que la majeure partie des oeufs de touladis soit dispersée dans le lac par les courants. Plus spécifiquement, dans le cas du lac Témiscouata, la plupart des oeufs se retrouveront probablement au fond du lac. Bien que les oeufs de touladi n'ont pas de problème à se développer en profondeur ([ESHENRODER et al. 1995](#), [FITZSIMONS et al. 2005](#), [MARSDEN et al. 1995](#), [MARTIN et OLVER 1980](#), [CASSELMAN 1995](#), [RILEY et al. 2014](#)), la qualité du substrat et l'abondance des prédateurs, deux facteurs clés dans la survie des oeufs, y sont inconnus. Cependant, la faiblesse des courants en profondeur laisse croire qu'il risque

d'y avoir une accumulation de sédiments importante, limitant les espaces interstitiels s'il y en a. Ainsi, plusieurs facteurs limitant la survie des oeufs sont présents, et peuvent conséquemment nuire au recrutement.

7 Conclusion

L'objectif de cette étude était, tout d'abord, de caractériser les sites de fraie du touladi au lac Témiscouata. L'idée était de vérifier si les conditions abiotiques à ces sites étaient adéquates pour la reproduction du *Salvelinus Namaycush*, de la ponte jusqu'à l'éclosion des oeufs. La section 2 présente les détails de l'étude et les méthodes utilisées pour analyser les données. Les résultats présentés à la section 3 ont permis d'établir que les conditions adéquates sont bien présentes pour la fraie et la survie des oeufs, aux trois sites connus. En complément, la synthèse de l'analyse télémétrique, présentée à la section 4, a permis de vérifier la présence du touladi sur les sites durant sa période de reproduction. En comparant avec la littérature, il a été possible de conclure que le touladi du lac Témiscouata avait un comportement tout à fait normal pour son espèce. Ensuite, afin de vérifier l'hypothèse de départ, une modélisation du transport des sédiments et des oeufs aux sites de fraie a été développée aux sections 5 et 6. Les taux de sédimentation actuels, entre $0,3809 \pm 0,0017$ et $1,0172 \pm 0,0017$, ne sont pas suffisants pour expliquer le colmatage des interstices, puisque ces derniers sont comparables à la littérature tout comme la distribution granulométrique des sédiments, constituée à $92,38 \pm 0,01$ % de sables fins. Cependant, les résultats tendent à démontrer que 80,5 % des oeufs pondus lors de la fraie ne restent pas sur les frayères. Étant donné que des vitesses de $2,83 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ sont suffisantes pour entraîner le déplacement des oeufs et sont fréquemment observées dans la colonne d'eau, il semble probable que ces derniers soient transportés ailleurs dans le lac par les courants internes. Les oeufs pourraient aussi être exposés davantage à la prédation due au colmatage partiel des interstices rocheuses sur les sites.

Bien que du travail reste à faire pour assurer la pérennité de la population de touladi au lac Témiscouata, ce rapport représente un avancement majeur dans notre compréhension du problème. La perte d'oeufs sur les frayères semble être l'élément qui limite le recrutement naturel de la population. Il existe possiblement plusieurs solutions à ce problème, et chacune d'entre elles nécessitera de poursuivre les efforts de recherche. Par exemple, le

colmatage actuel des interstices pourrait être réglé par l'aménagement de frayères artificielles qui aurait des interstices propres. Cependant, il faudra s'assurer que ces frayères ne seront pas rapidement envahies de plantes aquatiques ou de périphyton, des plantes présentes à certains endroits dans le lac Témiscouata (CHARBONNEAU et GRÉGOIRE 2016). Le rapport de BOUCHER 2019 contient une synthèse de la littérature entourant l'aménagement de frayères de touladi et devrait être en mesure de fournir des solutions adéquates à ce niveau. Il faudra aussi vérifier que le touladi se déplacerait bien vers ces nouveaux aménagements, bien que plusieurs auteurs indiquent que ça ne serait pas un problème (MARTIN et OLVER 1980, FITZSIMONS 1996, BENOÎT et PERREault 1998). De même, des politiques favorisant la préservation des berges et la limitation de l'érosion sur le bassin versant, comme une revégétalisation des espaces mis à nu, pourraient contribuer à diminuer la charge sédimentaire, limitant ainsi l'eutrophisation du lac et l'apport sédimentaire sur les frayères. Par ailleurs, l'une de ces solutions, la nouvelle réglementation sur la remise à l'eau des touladis matures¹⁵, mise en place par le MFFP, a déjà commencé à avoir un impact positif sur le recrutement naturel. En favorisant la remise à l'eau, particulièrement des femelles de moins de 60 cm, celles-ci ont plus de chances de se reproduire au moins une fois, augmentant le nombre d'oeufs pondus chaque année. Dans le même ordre d'idées, une diminution de la population des prédateurs d'oeufs augmenterait probablement le taux de survie (CLARAMUNT et al. 2005). Cet aspect du problème, tout comme la plupart des facteurs biotiques, n'a pas été exploré dans ce rapport. Évidemment, il serait intéressant de vérifier l'impact de la pêche, de la prédation et d'autres variables biologiques sur le recrutement naturel du touladi, avant de poursuivre vers la mise en place de solutions. En bref, le succès de ce projet réside dans un éventail de clés différentes qui, mises ensemble, assureront un fort recrutement naturel dans le lac Témiscouata pour les années à venir.

15. Les captures de moins de 60 cm ne peuvent pas être gardées par les pêcheurs.

Références

- BENOÎT J., M. Legault et R. PERREAULT (1998). *Validation d'une technique d'induction de la reproduction du touladi (Salvelinus namaycush) sur des frayères situées en zone littorale profonde*. Ministère de l'Environnement et de la Faune, Direction de la faune et des habitats et Direction régionale Mauricie-Bois-Francs.
- BENOIT, Jean et Michel LEGAULT (2002). "Assessment of the feasibility of preventing reproduction of lake charr, *Salvelinus namaycush*, in shallow areas of reservoirs affected by drawdowns". In : *Ecology, behaviour and conservation of the charrs, genus Salvelinus*. Springer, p. 303–311.
- BERGERON, Normand (2018). *Le transport des sédiments - Notes de cours*.
- BINDER, Thomas R, Henry T THOMPSON, Andrew M MUIR, Stephen C RILEY, J Ellen MARSDEN, Charles R BRONTE et Charles C KRUEGER (2015). "New insight into the spawning behavior of lake trout, *Salvelinus namaycush*, from a recovering population in the Laurentian Great Lakes". In : *Environmental biology of fishes* 98.1, p. 173–181.
- BIRON, Pascale M, Colleen ROBSON, Michel F LAPOINTE et Susan J GASKIN (2004). "Comparing different methods of bed shear stress estimates in simple and complex flow fields". In : *Earth Surface Processes and Landforms : The Journal of the British Geomorphological Research Group* 29.11, p. 1403–1415.
- BOUCHER, Clémence (2019). *Revue de littérature critique de l'aménagement de frayères en milieu lacustre pour le touladi*.
- CALLAGHAN, David T., Paul J. BLANCHFIELD et Peter A. COTT (2016). "Lake trout (*Salvelinus namaycush*) spawning habitat in a northern lake : The role of wind and physical characteristics on habitat quality". In : *Journal of Great Lakes Research* 42, p. 299–307.
- CASSELMAN, J.M. (1995). "Survival and development of lake trout eggs and fry in eastern Lake Ontario-in situ incubation". In : *Journal of Great Lakes Research* 21, p. 384–399.
- CHARBONNEAU, Kim C. et Michel GRÉGOIRE (2016). *Carnet de santé du lac Témiscouata*. Organisme de bassin versant du fleuve Saint-Jean (OBVFSJ).

- CHRISTIE, Gavin C. et Henry A. REGIER (1988). “Measures of Optimal Thermal Habitat and Their Relationship to Yields for Four Commercial Fish Species”. In : *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 45, p. 301–314.
- CLARAMUNT, Randall M., Jory L. JONAS, John D. FITZSIMONS et J. Ellen MARSDEN (2005). “Influences of Spawning Habitat Characteristics and Interstitial Predators on Lake Trout Egg Deposition and Mortality”. In : *Transactions of the American Fisheries Society* 134, p. 1048–1057.
- CLIFT, Roland, John R GRACE et Martin E WEBER (2005). *Bubbles, drops, and particles*. Courier Corporation.
- CSANADY, G.T. (1982). *Circulation in the Coastal Ocean*. T. 2. Springer Netherlands.
- DEROCHE, Stuart E. (1969). “Observations on the Spawning Habits and Early Life of Lake Trout”. In : *The Progressive Fish-Culturist* 31.2, p. 109–113.
- DOMINIK, J., A. MANGINI et F. PROSI (1983). “Sedimentation rate variations and anthropogenic metal fluxes into Lake Constance sediments”. In : *Environmental Geology* 5.3, p. 151–157.
- DUBÉ, Caroline et Yannick SOULARD (2017). *Protocole de mesure de la variation de la température de l'eau en lac*. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) – Gouvernement du Québec. Québec.
- ESHENRODER, Randy L, Charles R BRONTE et James W PECK (1995). “Comparison of lake trout-egg survival at inshore and offshore and shallow-water and deepwater sites in Lake Superior”. In : *Journal of Great Lakes Research* 21.3, p. 313–322.
- ESTEVE, Manu, Deborah A. MCLENNAN et John M. GUNN (2008). “Lake trout (*Salvelinus namaycush*) spawning behaviour : the evolution of a new female strategy”. In : *Environmental Biology of Fishes* 83.1, p. 69–76.
- EVANS, David O (2007). “Effects of hypoxia on scope-for-activity and power capacity of lake trout (*Salvelinus namaycush*)”. In : *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 64.2, p. 345–361.

- FITZSIMONS, John D. (1995). "Assessment of Lake Trout Spawning Habitat and Egg Deposition and Survival in Lake Ontario". In : *Journal of Great Lakes Research* 21, p. 337–347.
- FITZSIMONS, John D (1996). "The significance of man-made structures for lake trout spawning in the Great Lakes : are they a viable alternative to natural reefs?" In : *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 53.S1, p. 142–151.
- FITZSIMONS, John D., Georgina FODOR, Bill WILLISTON, Henk DON, Bruce GRAY, Mike BENNER, Todd BREEDON et Dave GILROY (2005). "Deepwater spawning by lake trout (*Salvelinus namaycush*) in Keuka Lake, New York". In : *Journal of Great Lakes Research* 31.1, p. 1–10.
- FITZSIMONS, John D. et J.Ellen MARSDEN (2014). "Relationship between lake trout spawning, embryonic survival, and currents : A case of bet hedging in the face of environmental stochasticity?" In : *Journal of Great Lakes Research* 40, p. 92–101.
- GIBSON, E.S. et F.E.J. FRY (1954). "The Performance of the Lake Trout, *Salvelinus Namaycush*, at Various Levels of Temperature and Oxygen Pressure". In : *Can. J. Zool* 32.
- GUNN, John M (1995). "Spawning behavior of lake trout : effects on colonization ability". In : *Journal of Great Lakes Research* 21, p. 323–329.
- HÅKANSON, Lars et Mats JANSSON (2002). *Principles of lake sedimentology*. The Blackburn Press, New Jersey.
- HAMILTON, David P et Stuart F MITCHELL (1996). "An empirical model for sediment resuspension in shallow lakes". In : *Hydrobiologia* 317.3, p. 209–220.
- HARGRAVE, Barry T (1972). "Oxidation-reduction potentials, oxygen concentration and oxygen uptake of profundal sediments in a eutrophic lake". In : *Oikos*, p. 167–177.
- HAWLEY, Nathan et Barry M. LESHT (1992). "Sediment resuspension in Lake St. Clair". In : *Limnology and Oceanography* 37.8, p. 1720–1737.
- ST-HILAIRE, André, Caissie DANIEL, Richard A. CUNJAK et Bourgeois GILLES (2005). "Streambed sediment composition and deposition in a forested stream : spatial and temporal analysis". In : *River Research and Applications* 21.8, p. 883–898.

- HOLTON, James R (1973). *An introduction to dynamic meteorology*. T. 41. 5. AAPT, p. 752–754.
- JANOSCIK, Tamara (2001). “Monitoring the abundance of lake trout, *Salvelinus namaycush*, with index netting”. In :
- JANOSCIK, Tamara M. et Nigel P. LESTER (2003). “Use of Spring Littoral Index Netting (SLIN) to Assess Lake Trout Abundance”. In : *FAU Report*.
- KALFF, Jacob (2002). *Limnology : inland water ecosystems*. English. c c2002 ; reprinted with corrections 2003. Upper Saddle River, N.J. : Prentice Hall.
- KEMP, ALW et NS HARPER (1976). “Sedimentation rates and a sediment budget for Lake Ontario”. In : *Journal of Great Lakes Research* 2.2, p. 324–339.
- KJARAN, Snorri Páll, Sigurdur Lárus HÓLM et Eric Matthew MYER (2004). “Lake circulation and sediment transport in Lake Myvatn”. In : *Aquatic Ecology* 38, p. 145–162.
- KOMAR, Paul et Martin MILLER (1974). “Sediment threshold under oscillatory waves”. In : *Coastal Engineering Proceedings* 1.14, p. 44.
- KOREN, Nir et Micha KLEIN (2000). “Rate of Sedimentation in Lake Kinneret, Israel : Spatial and Temporal Variations”. In : *Earth Surface Processes and Landforms* 25, p. 895–904.
- LAJEUNESSE, Patrick, Bryan SINKUNAS, Antoine MORISSETTE, Alexandre NORMANDEAU, Gabriel JOYAL, Guillaume ST-ONGE et Jacques LOCAT (2017). “Large-scale seismically-induced mass-movements in a former glacial lake basin : Lake Témiscouata, northeastern Appalachians (eastern Canada)”. In : *Marine Geology* 384. Subaquatic paleoseismology : records of large Holocene earthquakes in marine and lacustrine sediments, p. 120–130.
- LECLERC, Véronique, Martin ARVISAIS, Alain DEMERS, Henri FOURNIER, Hélène GOUIN, Louis HOUDE, Alain LACHAPPELLE, Michel LEGAULT et Daniel NADEAU (2011). *Guide de normalisation des méthodes d’inventaire ichtyologique en eaux intérieures, Tome I, Acquisition de données*. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune.

- LESTER, NP, MM PETZOLD, WI DUNLOP, BP MONROE, SD ORSATTI, T SCHANER et DR WOOD (1991). “Sampling Ontario lake trout stocks : issues and standards”. In : *Lake Trout Synthesis Sampling Issues and Methodology Working Group, Ontario Ministry of Natural Resources. Toronto, ON.*
- MARSDEN, J. Ellen. et AL. (1995). “Lake Trout Spawning Habitat in the Great Lakes- a Review of Current Knowledge”. In : *Journal of Great Lakes Research* 21, p. 487–497.
- MARSDEN, J. Ellen, Brian J ELLROTT, Randall M CLARAMUNT, Jory L JONAS et John D. FITZSIMONS (2005). “A Comparison of Lake Trout Spawning, Fry Emergence, and Habitat Use in Lakes Michigan, Huron, and Champlain”. In : *Journal of Great Lakes Research* 31, p. 492–508.
- MARTIN, Nigel V. et Charles H. OLVER (1980). “The lake charr, *Salvelinus namaycush*”. In : *Charrs : salmonid fishes of the genus Salvelinus*. Sous la dir. de Balon EK. The Hague : Dr. W. Junk Publishing, p. 205–277.
- MORALES-MARIN, LA, JR FRENCH, H BURNINGHAM et RW BATTARBEE (2018). “Three-dimensional hydrodynamic and sediment transport modeling to test the sediment focusing hypothesis in upland lakes”. In : *Limnology and Oceanography* 63.S1, S156–S176.
- MUIR, A. M., C. T. BLACKIE, J. E. MARSDEN et C. C. KRUEGER (2012). “Lake charr *Salvelinus namaycush* spawning behaviour : new field observations and a review of current knowledge”. In : *Review of Fish Biology Fisheries* 22, p. 575–593.
- PELLETIER, Anne-Marie (2019). *État de situation du touladi au lac Témiscouata - Bilan de l'inventaire de 2018*. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs.
- PLUMB, John.M. et Paul.J. BLANCHFIELD (2009). “Performance of temperature and dissolved oxygen criteria to predict habitat use by lake trout (*Salvelinus namaycush*)”. In : *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 66.2011-2023.
- POND, Stephen et George L PICKARD (2013). *Introductory dynamical oceanography*. Elsevier.
- RIJN, LC van (2019). “Critical movement of large rocks in currents and waves”. In : *International Journal of Sediment Research* 34.4, p. 387–398.

- RILEY, Stephen C, Thomas R BINDER, Nigel J WATTRUS, Matthew D FAUST, John JANSSEN, John MENZIES, J Ellen MARSDEN, Mark P EBENER, Charles R BRONTE, Ji X HE et al. (2014). “Lake trout in northern Lake Huron spawn on submerged drumlins”. In : *Journal of Great Lakes Research* 40.2, p. 415–420.
- ROWAN, DJ, J KALFF et JB RASMUSSEN (1992). “Estimating the mud deposition boundary depth in lakes from wave theory”. In : *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 49.12, p. 2490–2497.
- SEIBT, Christian, Frank PEETERS, Michael GRAF, Michael SPRENGER et Hilmar HOFMANN (2013). “Modeling wind waves and wave exposure of nearshore zones in medium-sized lakes”. In : *Limnology and Oceanography* 58.1, p. 23–36.
- SHIELDS, Albert (1936). *Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement*.
- SLY, Peter G. (1988). “Interstitial water quality of Lake Trout Spawning Habitat”. In : *Journal of Great Lakes Research* 14, p. 301–315.
- SMART, Graeme M (1984). “Sediment transport formula for steep channels”. In : *Journal of Hydraulic Engineering* 110.3, p. 267–276.
- TALLEY, Lynne D (2011). *Descriptive physical oceanography : an introduction*. Academic press.
- TESSIER, Isabelle (2008). *États des connaissances, Parc national du lac Témsicouata*. Ministère du Développement Durable, de l’Environnement et des Parcs.
- VOLLSET, Stein Emil (1993). “Confidence intervals for a binomial proportion”. In : *Statistics in medicine* 12.9, p. 809–824.
- WETZEL, Robert G (2001). *Limnology : lake and river ecosystems*. gulf professional publishing.
- WILLIAMS, Jon J (1995). “Drag and sediment dispersion over sand waves”. In : *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 41.6, p. 659–687.

A Tableaux de données et figures

Profondeur m	Période estivale*	Période de fraie**
	Température °C	Température °C
1,40	17,39 ± 0,19***	9,55 ± 0,15
2,45	17,23 ± 0,18	9,54 ± 0,15
4,55	17,06 ± 0,18	9,67 ± 0,15
6,55	16,45 ± 0,17	9,49 ± 0,15
11,75	14,29 ± 0,13	9,31 ± 0,15
29,90	7,08 ± 0,02	7,72 ± 0,06

* Du 29 juin au 7 novembre 2018

** Du 7 octobre au 7 novembre 2018

*** IC à 95%

Tableau A.1 – Statistiques de la température à la Montagne-du-Fourneau

Profondeur m	Période estivale*	Période de fraie**
	Température °C	Température °C
2,00	16,54 ± 0,16***	10,69 ± 0,14
4,00	16,12 ± 0,15	10,74 ± 0,14
6,00	15,50 ± 0,14	10,74 ± 0,14
8,00	14,64 ± 0,13	10,68 ± 0,14
10,00	13,64 ± 0,11	10,68 ± 0,14
12,00	12,43 ± 0,09	10,64 ± 0,14
14,00	11,35 ± 0,08	10,61 ± 0,14
16,00	10,28 ± 0,07	10,33 ± 0,13
18,00	9,52 ± 0,06	10,06 ± 0,12
20,00	8,83 ± 0,05	9,62 ± 0,10
25,00	7,74 ± 0,04	8,74 ± 0,07
30,00	7,08 ± 0,03	8,14 ± 0,05
40,00	6,60 ± 0,03	7,69 ± 0,04
50,00	6,20 ± 0,03	7,24 ± 0,04

* Du 29 juin au 7 novembre 2018

** Du 7 octobre au 7 novembre 2018

*** IC à 95%

Tableau A.2 – Statistiques de la température à la l'île Notre-Dame

Profondeur	Période estivale*	Période de fraie**
	Température	Température
m	°C	°C
0,40	16,93 ± 0,17***	10,45 ± 0,16
1,35	17,32 ± 0,17	10,71 ± 0,16
2,30	16,91 ± 0,17	10,48 ± 0,16
3,20	16,82 ± 0,17	10,45 ± 0,16
5,15	16,58 ± 0,16	10,46 ± 0,16
10,10	15,88 ± 0,15	10,52 ± 0,16
20,45	10,45 ± 0,06	10,36 ± 0,15
25,25	8,28 ± 0,03	8,82 ± 0,08
30,30	7,39 ± 0,02	8,09 ± 0,04

* Du 29 juin au 7 novembre 2018

** Du 7 octobre au 7 novembre 2018

*** IC à 95%

Tableau A.3 – Statistiques de la température à la Pointe-aux-trembles

Profondeur	Période estivale*	Période de fraie**
	Température	Température
m	°C	°C
0,15	17,49 ± 0,17***	10,96 ± 0,15
1,15	17,22 ± 0,17	10,79 ± 0,15
2,15	18,11 ± 0,17	11,77 ± 0,15
3,15	16,72 ± 0,16	10,69 ± 0,15
5,20	16,64 ± 0,16	10,87 ± 0,15
7,20	16,13 ± 0,15	10,70 ± 0,14
9,20	15,76 ± 0,14	10,90 ± 0,14
11,25	14,92 ± 0,13	10,81 ± 0,14
15,25	12,68 ± 0,11	10,53 ± 0,14

* Du 29 juin au 7 novembre 2018

** Du 7 octobre au 7 novembre 2018

*** IC à 95%

Tableau A.4 – Statistiques de la température à Dégelis

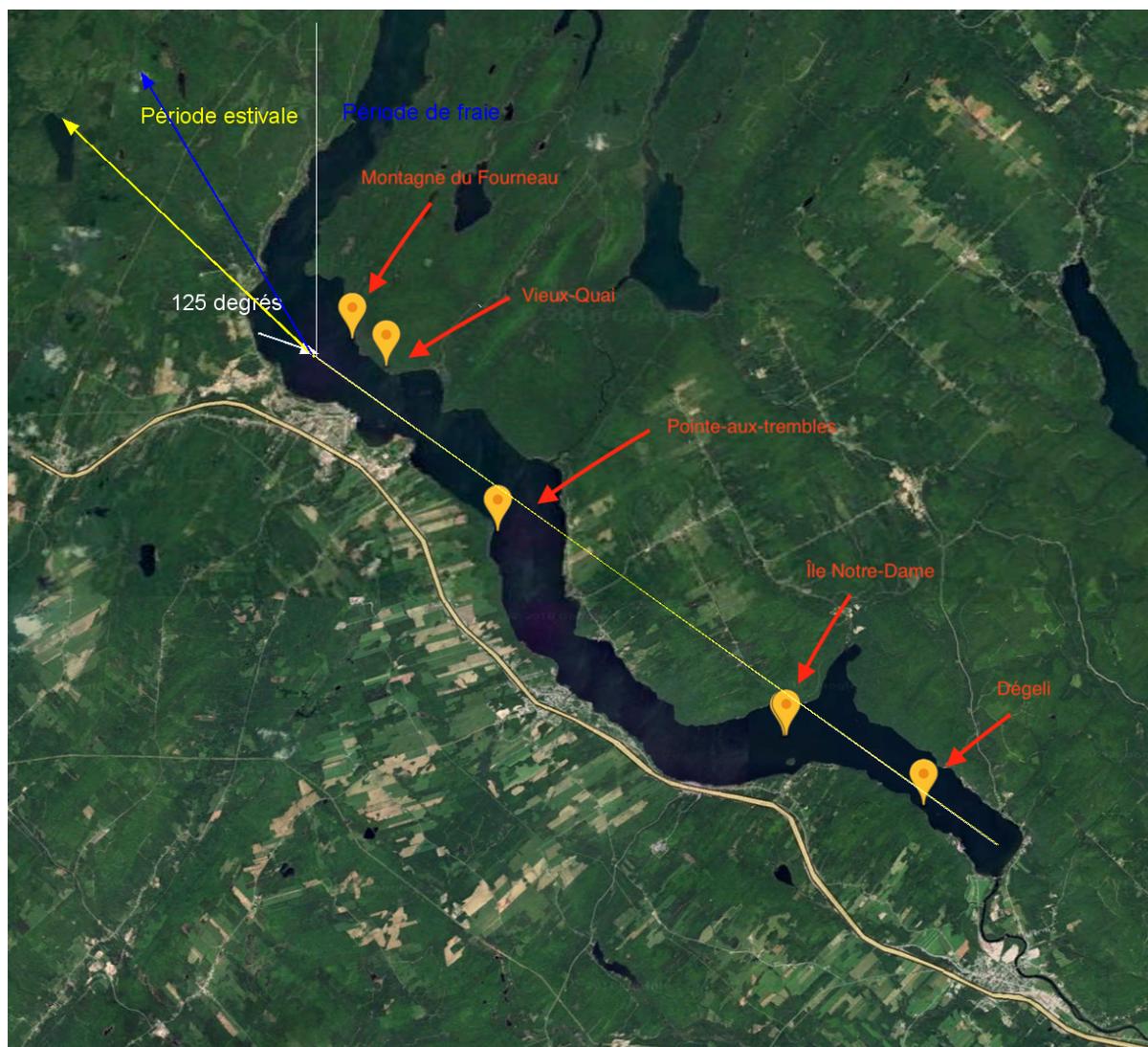


FIGURE A.1 – Provenance des vents dominant et sites d'intérêts, tel que les trois frayères (*Montagne-du-Fourneau*, *Pointe-aux-trembles*, *Dégelis*) et les sites d'échantillonnage du Vieux-Quai et de l'Île Notre-Dame

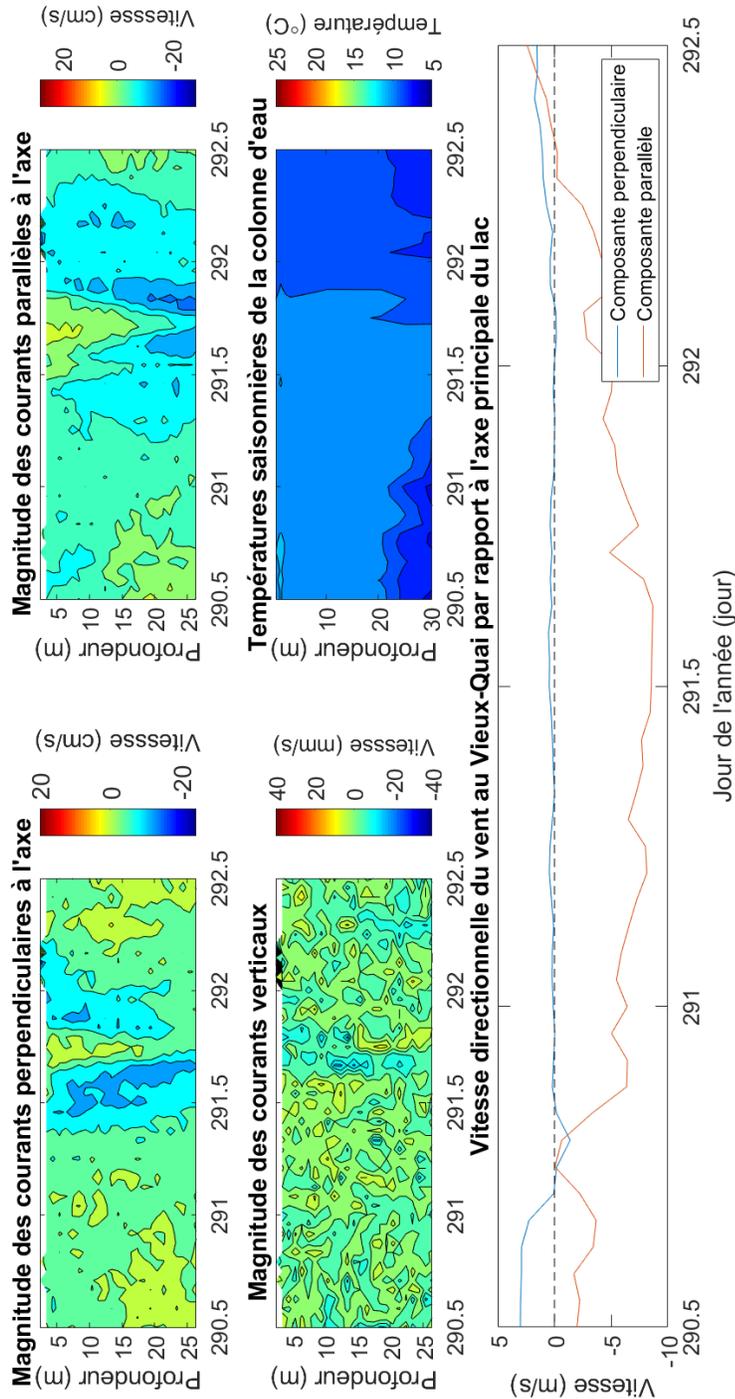


FIGURE A.2 – Conditions physiques (courants, vents, température) lors de l'anomalie en oxygène du 18 octobre 2018 à la Pointe-aux-termbles.

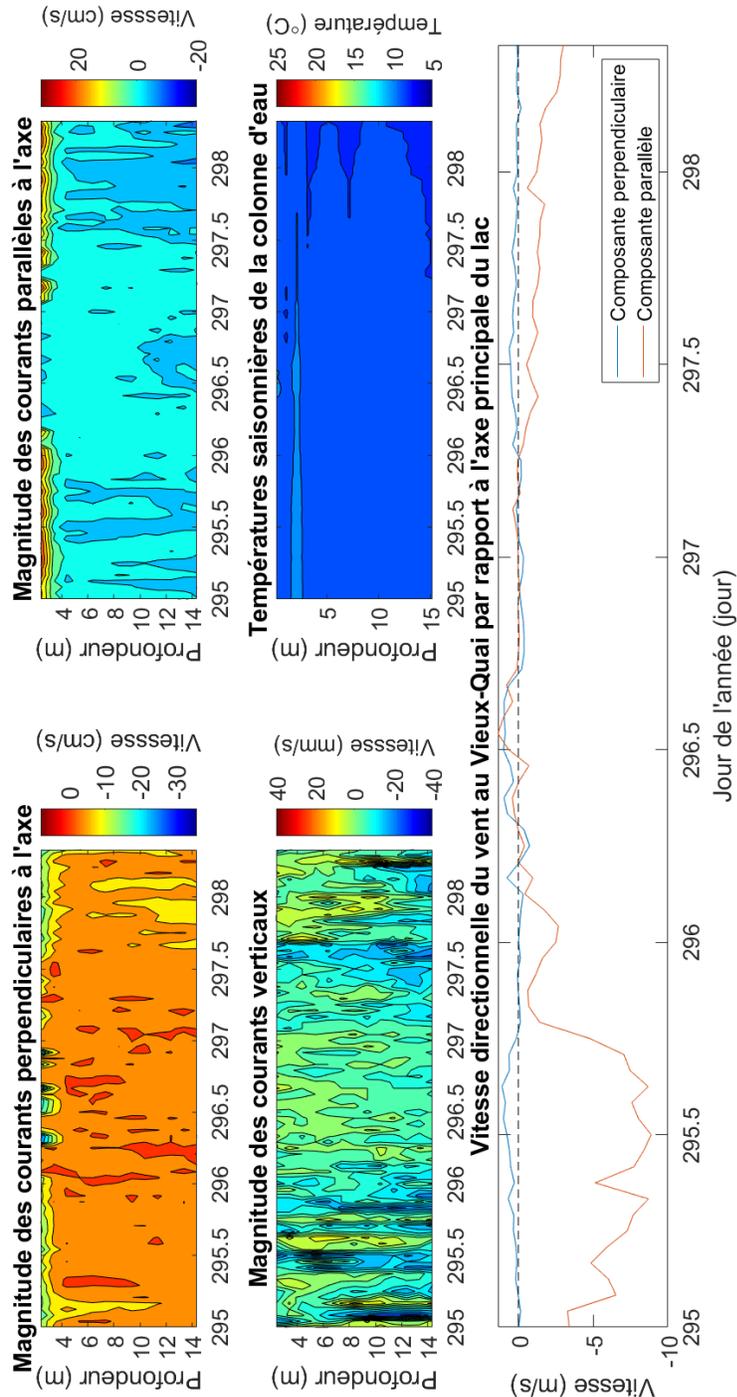


FIGURE A.3 – Conditions physiques (courants, vents, température) lors de l'agglomération du 23 octobre à Dégelis.

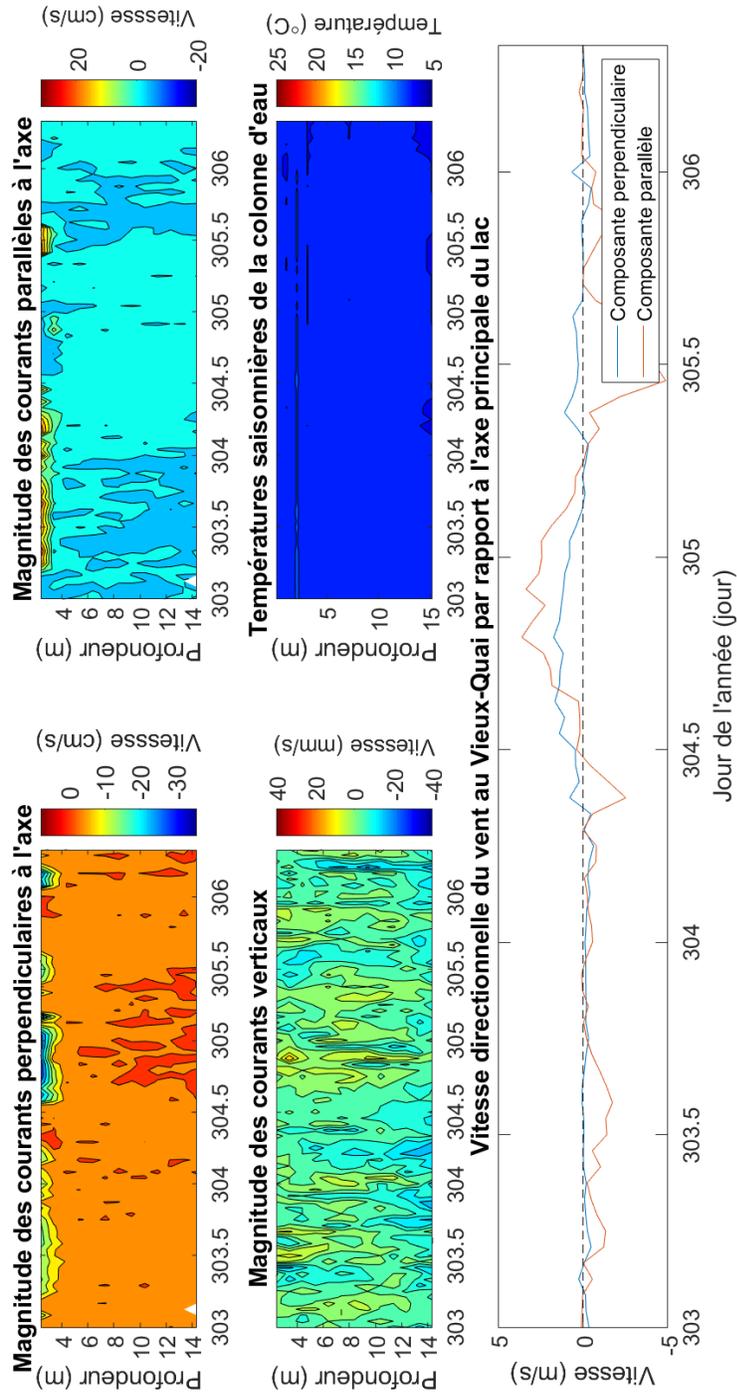


FIGURE A.4 – Conditions physiques (courants, vents, température) lors de l'agglomération du 31 octobre à Dégelis.

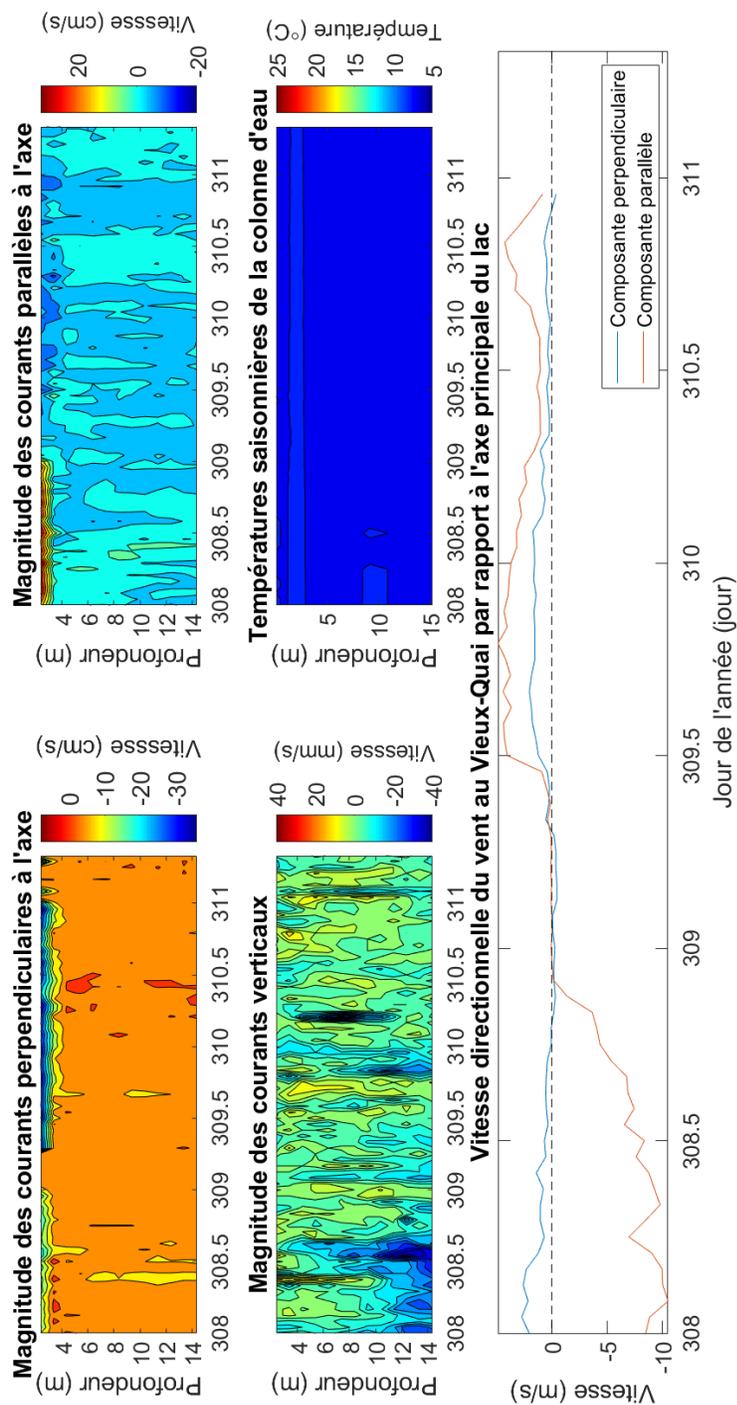


FIGURE A.5 – Conditions physiques (courants, vents, température) lors de l’agglomération du 5 novembre à Dégelis.

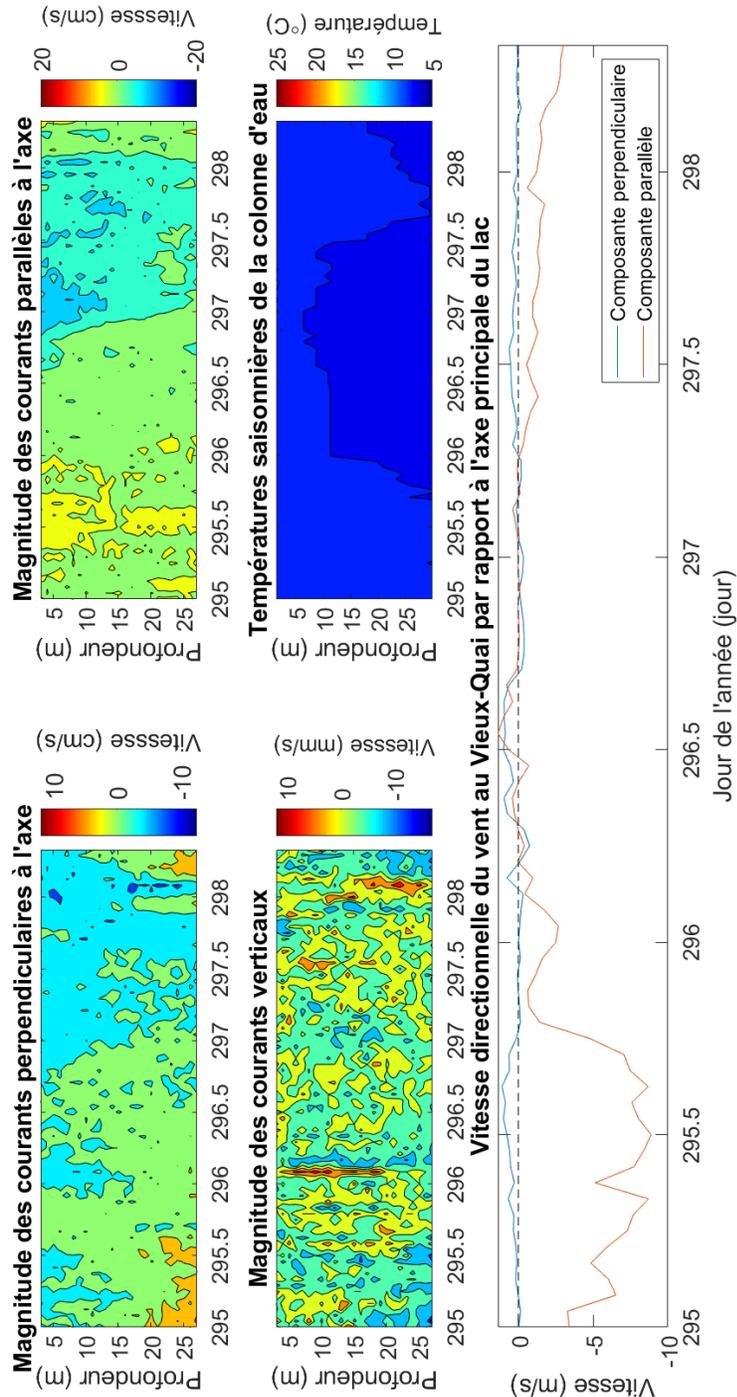


FIGURE A.6 – Conditions physiques (courants, vents, température) lors de l'agglomération du 23 octobre à la Montagne.

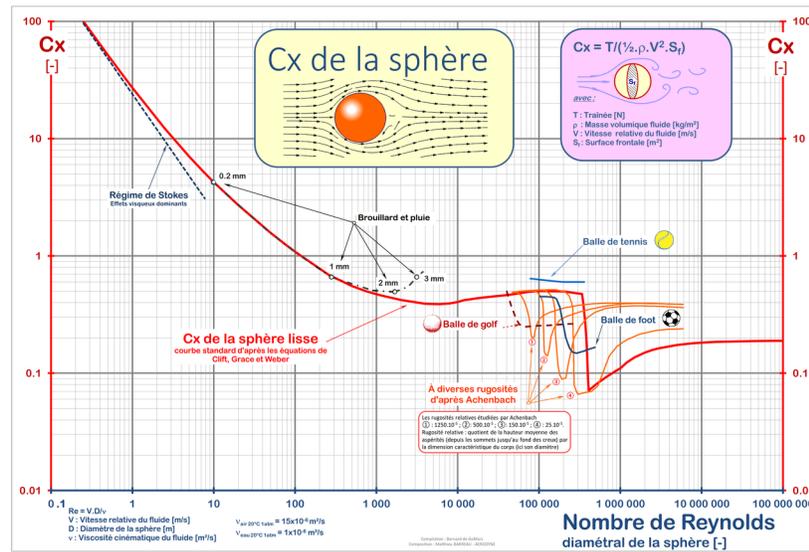


FIGURE A.7 – Coefficient de trainée d'une sphère en fonction du nombre de Reynolds

* Image tirée de http://perso.numericable.fr/gomars2/aero/cx_sphere.pdf

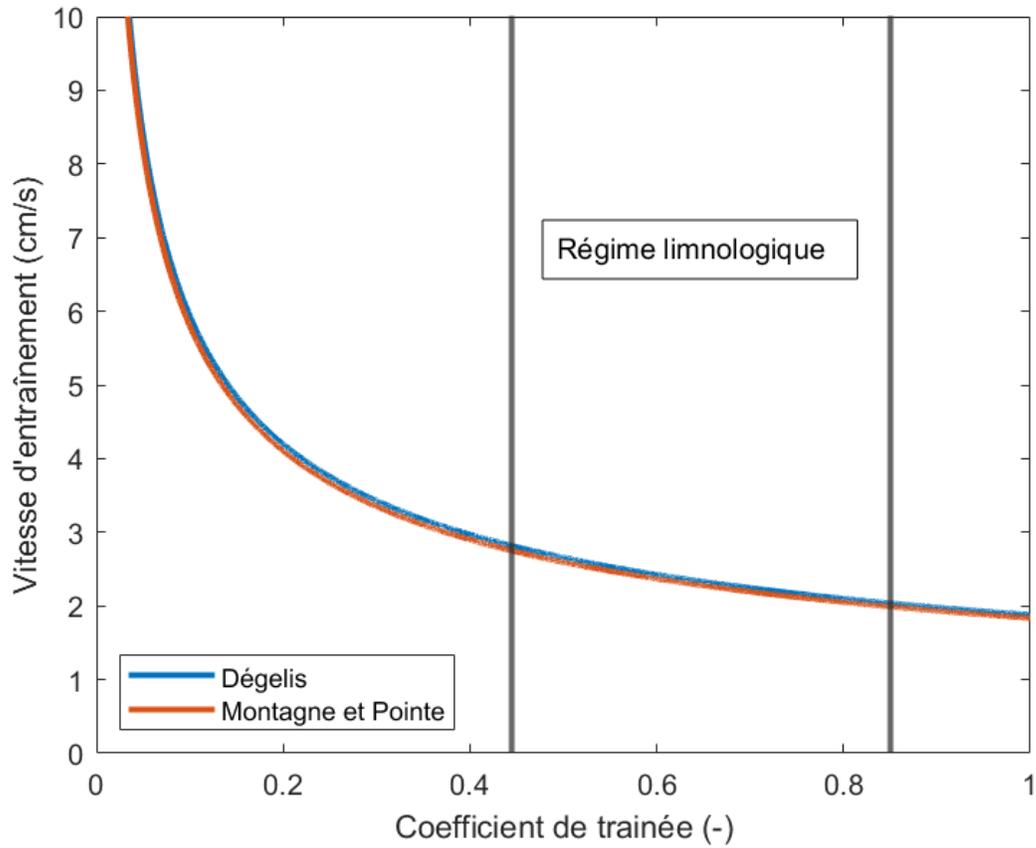


FIGURE A.8 – Vitesse d'entraînement des oeufs selon le coefficient de trainée d'une sphère de 5 mm de diamètre

B Exemple de calcul de colmatage interstitiel au lac Témiscouata

Afin de donner une idée du temps nécessaire au colmatage d'un espace interstitiel des frayères de touladi par les taux présentés au tableau 5.1. Un modèle simple est présenté dans cette section.

On suppose un espace interstitiel théorique (tiré de FITZSIMONS et al. 2005) de forme rectangulaire et de dimension $2 \cdot 2 \cdot 15 = 60 \text{ cm}^3$ au site de Dégelis. Avec un taux de sédimentation moyen de $1,0172 \pm 0,0017 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{jour}^{-1}$ et une distribution granulométrique de la sédimentation suivant les proportions de 63,65 % plus petites que $63 \mu\text{m}$ et 31,13 %¹⁶ entre 63 et $425 \mu\text{m}$, alors on peut calculer le temps nécessaire au remplissage de l'espace par les grains de sable.

Quelques hypothèses supplémentaires s'imposent. D'abord, on suppose que le diamètre des grains entre 125 et $425 \mu\text{m}$ est normalement distribué, ce qui nous permet d'assumer une taille moyenne de $275 \mu\text{m}$ pour cette catégorie granulométrique. Ensuite, comme il n'y a pas de borne inférieure sur le diamètre des grains plus petits que $125 \mu\text{m}$, on utilise le diamètre le plus conservateur, soit $125 \mu\text{m}$, comme valeur pour cette catégorie granulométrique. Finalement, à des fins de simplification, on assume des grains de sable cubiques avec les arrêtes de tailles égales aux diamètres associés à chaque catégorie.

Ainsi, les deux grains utilisés sont des cubes de

$$125 \cdot 125 \cdot 125 \mu\text{m}^3 = 1,95 \times 10^{-12} \text{ m}^3$$

$$275 \cdot 275 \cdot 275 \mu\text{m}^3 = 2,08 \times 10^{-11} \text{ m}^3$$

16. Proportions obtenues à l'aide de la figure 5.2

respectivement. Avec une ouverture de 4 cm^2 , on aura

$$4 \cdot 1,0172 = 4,072 \pm 0,0068 \text{ mg} \cdot \text{jour}^{-1}$$

de sable qui s'infiltrer dans l'interstice. De cette valeur, 63,65 % sera plus petite que $125 \mu\text{m}$ soit :

$$0,6365 \cdot 4,072 = 2,592 \pm 0,004 \text{ mg} \cdot \text{jour}^{-1}$$

et 31,13 % soit :

$$0,3113 \cdot 4,072 = 1,268 \pm 0,002 \text{ mg} \cdot \text{jour}^{-1}$$

sera entre 125 et $425 \mu\text{m}$. En utilisant une densité moyenne pour le sable de $1602 \times 10^6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, alors les grains de sable pèsent respectivement :

$$1602 \times 10^6 \cdot 1,95 \times 10^{-12} = 3,124 \times 10^{-3} \text{ mg}$$

$$1602 \times 10^6 \cdot 2,08 \times 10^{-11} = 0,033 \text{ mg}.$$

En suivant les proportions granulométriques établies ci-dessus, cela signifie que

$$\frac{2,592}{3,124 \times 10^{-3}} = 829 \pm 2 \text{ grains} \cdot \text{jour}^{-1}$$

de taille inférieure à $125 \mu\text{m}^3$ s'infiltreront dans l'interstice, alors que seulement

$$\frac{1,268}{0,033 \times 10^{-4}} = 38 \pm 1 \text{ grains} \cdot \text{jour}^{-1}$$

de taille entre 125 et 425 μm s'y retrouvent. En supposant un emboîtement parfait des grains de sable dans l'espace interstitiel, ce dernier se remplit à un rythme de

$$829 \cdot 1,95 \times 10^{-12} + 38 \cdot 2,08 \times 10^{-11} = 2,407 \pm 0,025 \times 10^{-9} \text{ m}^3 \cdot \text{jour}^{-1}$$

Alors, l'interstice de volume $0,6 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ se remplira totalement en :

$$\frac{0,6 \times 10^{-4}}{2,407 \times 10^{-9}} \approx 24927 \pm 256 \text{ jours,}$$

où

$$\frac{49834}{365} \approx \boxed{68,29 \pm 0,70 \text{ ans}}$$

B.1 Commentaires sur le calcul

En premier lieu, les grains de sable ne sont évidemment pas tous des cubes, mais ont plutôt des formes variées. Remplir un espace rectangulaire avec des sphères, par exemple, occasionne des pertes d'espaces d'environ 50%. Ainsi, le temps nécessaire au remplissage par des sphères sera deux fois plus court, soit 34,15 ans. Ensuite, le calcul ci-contre suppose que la sédimentation est constante dans le temps et qu'aucun processus hydrodynamique n'intervient pour nettoyer l'espace interstitiel, ce qui est évident faux et a été discuté en détail précédemment. Également, le calcul ne modélise pas l'effet du colmatage par des organismes vivants comme le périphyton. De plus, seulement les deux catégories granulométriques les plus importantes ont été utilisées dans ce calcul. Environ $100 - 63,65 - 31,13 = 5,22\%$ du taux de sédimentation n'a pas été pris en compte. Toutes ces considérations montrent que le temps de 68,29 ans représente une valeur maximale. En réalité, le colmatage serait fort probablement plus rapide.

C Complément d'analyse spectrale

L'analyse spectrale permet d'extraire les fréquences d'oscillations de n'importe quel signal temporel ainsi que leur importance l'une par rapport à l'autre. Le principe de base suppose que n'importe quelle fonction (ou signal) peut être représentée en une série de sinus et de cosinus (les expressions mathématiques des oscillations) qui, une fois additionnés, reforment le signal (ou la fonction) original(e). Ainsi, l'analyse spectrale d'une série chronologique (le signal), comme la vitesse moyenne horaire des vents au Vieux-Quai entre le 1 juin 2018 et le 15 novembre 2018 (ou encore le chant d'un oiseau, voir la figure C.1), renseigne sur les fréquences principales à laquelle cette série (ce signal) oscille puisque les fréquences discrètes sont facilement «accessibles» par l'entremise des fonctions sinus et cosinus.

Au final, la décomposition en série de Fourier d'une fonction (l'analyse spectrale d'un signal), n'est qu'une manière différente de décrire une seule et même chose (le signal). Au lieu de dire : «Voici une pomme relativement rouge», on dit «Voici une pomme dont la couleur est constituée à 90 % de rouge pur et 10 % de vert pur» (un gros (0,9) sinus rouge additionné à un petit (0,1) sinus vert). Dans les deux cas, la description est valide, mais la manière de formuler diffère. Une analogie (imparfaite) avec les données de vents serait : «Pendant les 24h dernières heures, les vents moyens étaient de $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ » ou «Pendant les 24h dernières heures, les vents ont oscillé entre 0 et $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ».

Pour en revenir aux figures 3.7 à 3.10, l'axe des abscisses présente une variante des fréquences ($\ln[\text{cpd}]$) en unité, tout comme l'axe des ordonnées présente une variante de l'énergie ($\text{unité}^2 \times \text{fréquence} [\text{cpd}]$). Cette manière de présenter l'analyse spectrale permet de préserver la variance. Cela signifie que la hauteur des pics, dans ces figures, est bien proportionnelle à leur contribution énergétique (le nombre devant le sinus). D'autres représentations ne préservent pas nécessairement la variance ce qui a pour effet de distordre le graphique, engendrant des différences de hauteur entre les pics qui ne sont pas

directement proportionnels à la variance à cette fréquence.

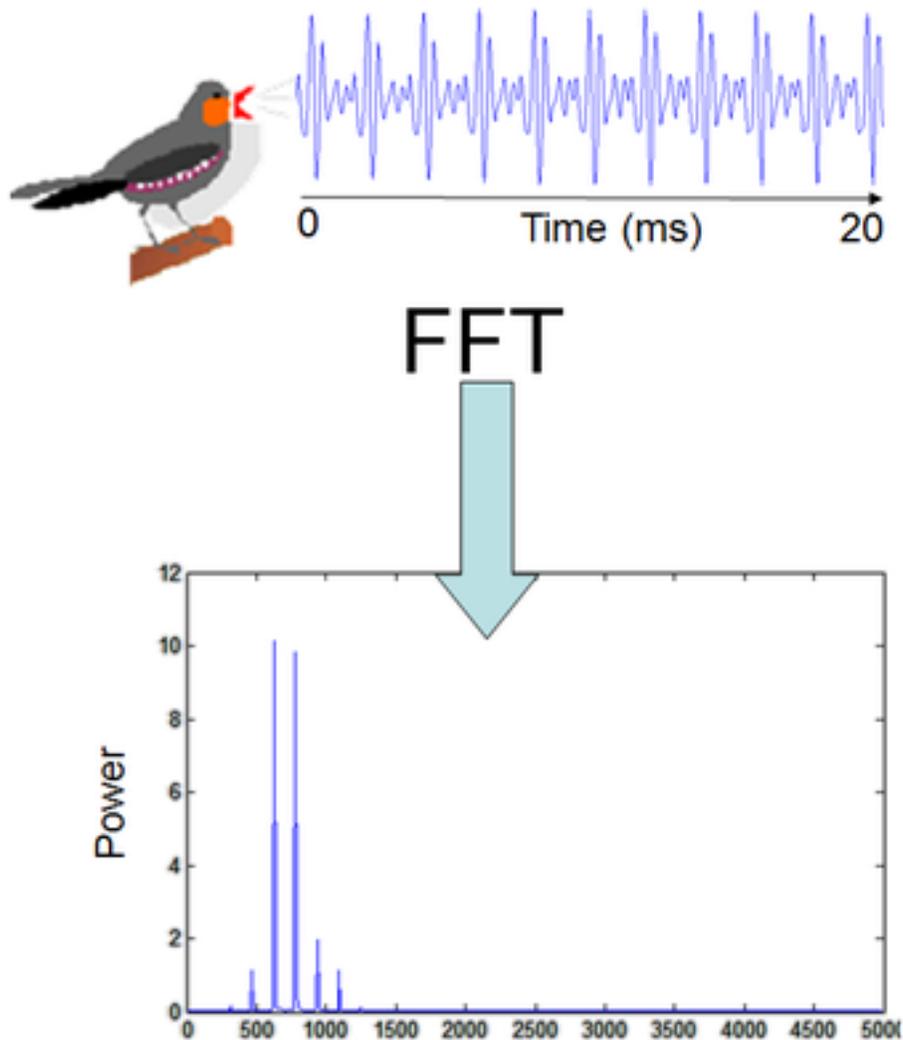


FIGURE C.1 – Le chant d’un oiseau et sa transformée de Fourier

* Image tirée de <http://soundanalysispro.com/manual-1/spectral-analysis/introduction-to-spectral-analysis>