Description et fonctionnement du réseau hydrographique de l'archipel de Saint-Pierre et Miquelon dans le cadre du développement d'une filière aquacole valorisant une espèce locale à forte valeur ajoutée pour la consommation humaine et la pêche sportive : l'omble de fontaine (Salvelinus fontinalis)

Erwan Durand

▶ **To cite this version:**

Erwan Durand. Description et fonctionnement du réseau hydrographique de l'archipel de Saint-Pierre et Miquelon dans le cadre du développement d'une filière aquacole valorisant une espèce locale à forte valeur ajoutée pour la consommation humaine et la pêche sportive : l'omble de fontaine (Salvelinus fontinalis). Géographie. 2021. hal-03525840

HAL Id: hal-03525840
https://hal.univ-lorraine.fr/hal-03525840

Submitted on 14 Jan 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

Erwan DURAND

2020-2021
Master STPE spécialité ERGA
Rapport de stage 2ème année

Description et fonctionnement du réseau hydrographique de l'archipel de Saint-Pierre et Miquelon dans le cadre du développement d'une filière aquacole valorisant une espèce locale à forte valeur ajoutée pour la consommation humaine et la pêche sportive : l'omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*)

---

https://outremers360.com/politique/les-dossiers-a-suivre-a-saint-pierre-et-miquelon

Mots-clés : Saint-Pierre et Miquelon ; omble de fontaine ; climatologie ; géographie ; hydrométrie ; chimie.

Stage réalisé du 01/02/2021 au 31/07/2021,
dans les locaux de l'Université de Lorraine et de la Fédération Territoriale de la Pêche de Saint-Pierre et Miquelon,
sous la direction de : a) M. Fabrice TELETCHEA,
b) M. Gilles DROGUE.
Mémoire soutenu le 30/08/2021 devant le jury composé de M. Gilles DROGUE, président et enseignant référent
M. Fabrice TELETCHEA, tuteur professionnel
M. Didier FRANÇOIS, rapporteur.

"Il y a un autre monde, mais il est dans celui-ci."

Paul ELUARD

"Toute société, pour se maintenir et vivre, a besoin absolument de respecter quelqu'un et quelque chose, et surtout que ce soit le fait de tout le monde et non de chacun selon sa fantaisie."

Fiodor DOSTOIEVSKI

"Quand ils auront coupé le dernier arbre, pollué le dernier ruisseau, pêché le dernier poisson, alors ils s'apercevront que l'argent ne se mange pas."

Tatanka YOTANKA

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu mon tuteur professionnel de stage, M. Fabrice Teletchea, maître de conférences à l'Université de Lorraine et responsable pédagogique de la Licence Professionnelle « Aquaculture Continentale et Aquariologie ». Un éminent chercheur qui m'a accompagné (en réunion, comme sur le terrain) durant ces quelques mois, sans doute un peu trop courts. Il m'a offert l'opportunité de travailler sur un sujet aussi insolite que captivant, abordant une foule de questionnements scientifiques sur un territoire insulaire hydrologiquement inexploré. Lors de ce stage, j'ai eu l'occasion de mettre en pratique mes compétences acquises au cours de mes deux Masters, mais également d'en apprendre davantage sur de nouvelles méthodes de recherches. Je lui suis donc sincèrement reconnaissant pour ses enseignements, sa relecture méticuleuse, la confiance qu'il m'a accordée tout au long de ce projet, et surtout, pour la possibilité offerte de prolonger mon étude cette année. En plus d'être attentionné, c'est aussi un professeur dévoué qui est prêt à se mouiller pour aider ses étudiants en participant, notamment, aux relevés bathymétriques de l'étang de la Maquine. Enfin, Fabrice, je te remercie de m'avoir fait découvrir ton petit archipel si accueillant, pourtant perdu au bout du monde, et dont je suis, à mon tour, tombé amoureux…

Un immense merci à M. Gilles Drogues, professeur à l'Université de Metz et responsable pédagogique du Master « Eaux de surface, Ressources, Gestion et Aménagement », pour sa relecture et son aide précieuse en tant que co-encadrant. Responsable de plusieurs stagiaires, il a toujours su se rendre disponible pour me guider dans l'avancée de mon étude. Ses conseils avisés m'ont orienté, aussi bien dans l'acquisition de mes données que dans l'obtention d'un matériel courantométrique. Je vous réserve ce dernier mot, Gilles, car je dois également vous remercier pour cette chance que vous m'avez accordée en septembre dernier, lorsque j'ai reçu ma lettre d'admission au M2 ERGA.

Je souhaite adresser mes remerciements à M. Didier François, ingénieur de recherche au LOTERR, géographe hydrologue et géomaticien. Je vous suis reconnaissant pour le temps et l'investissement que vous aurez accordé à la lecture de mon mémoire. J'espère que vous aurez perçu l'engouement et l'enthousiasme qui m'ont porté au cours de ce projet.

Je remercie également, non sans une certaine émotion, toute l'équipe d'enseignants-chercheurs du Master ERGA ayant participé, *in fine,* à mon épanouissement professionnel. J'ai été honoré d'intégrer la promotion 2020-2021 dans laquelle j'ai eu la chance de rencontrer des professeurs heureux de partager leur savoir et de former la future génération de scientifiques.

Ce voyage n'aurait pas été rendu possible sans la participation financière de la Fédération Territoriale de Pêche de Saint-Pierre et Miquelon. Je remercie ainsi le président de la fédération, Robert Langlois, pour avoir réglé nos frais de logement et de déplacements. Je remercie également Nicolas Cormier, vice-président de la fédération et président de l'association Pêche Sportive Saint-Pierre Langlade, pour ses renseignements, la visite du service SIG de la DTAM, et la soirée homards !

À cette occasion, je me permets d'adresser de profonds remerciements aux deux gardes-pêche et agents du développement : Loïc Perrin et Raphaëlle Vasconcelos. Merci à toi Loïc, pour m'avoir orienté dans mon choix des cours d'eau et plans d'eau à étudier, et ce dès notre première réunion (en visioconférence). J'évoquerai aussi l'aide que tu m'as apportée lors du dysfonctionnement de la sonde multiparamétrique. Tu as, en quelque sorte, sauvé la partie chimique de mon stage.

Raph', dès notre première rencontre, tu n'as pas hésité à nous prendre, Edgard et moi, sous ton aile. Ces instants passés avec toi resteront gravés dans ma mémoire : nos séances de pêches, nos festins de rois, nos crises de fous rires... J'ai notamment été sensible au temps que tu as consacré et à l'énergie que tu as déployée pour nous guider sur le terrain. J'espère, un jour, pouvoir égaler cette gentillesse et cette bonne humeur qui te caractérisent si bien. Merci infiniment pour ton soutien !

À titre personnel, je garde une pensée toute particulière pour mes chers collègues et amis. Merci à Edgard Gustave, jeune scientifique lui aussi (Licence Professionnelle ACA), avec qui j'ai développé une relation fondée sur l'entraide. Je lui suis reconnaissant de m'avoir assisté dans les mesures physico-chimiques, la bathymétrie de l'étang Savoyard, et pour m'avoir accompagné sur le périlleux terrain de la Belle Rivière. Un grand merci pour tes cours de pêche !

Merci à Jean-François Secondé (Master 2 ERGA), pour son travail sur la climatologie de Saint-Pierre et Miquelon. Il a fourni des résultats similaires aux miens : son secteur d'étude étant porté sur l'île de Miquelon. Doué d'une grande sagesse, il s'est avéré être un précieux binôme de Master avec qui j'ai pris un immense plaisir à rire et travailler. Hâte de te croiser à SPM, J-F !

Merci à Ève, pour ses références et les présentations publiques, à Éloïse, pour l'organisation des ateliers à l'école, et à Marie, pour son aide dans les relevés bathymétriques de l'étang Savoyard.

J'exprime ici toute la gratitude que j'éprouve envers ces gens si chaleureux que sont Chantal – cuisinière hors pair – et Rubens – conteur d'exception – Teletchea, pour leur hospitalité à Langlade.

Enfin, d'une manière générale, je suis redevable envers toutes les personnes de l'archipel qui ont accepté de contribuer, de près ou de loin, à la progression de cette étude… au nom de la science !

Erwan Durand

Je ne pourrais pas terminer ces quelques lignes sans remercier mes parents pour leur présence, leurs encouragements permanents et leur curiosité envers mes recherches. Des parents formidables, à qui je dois tout. Ils sont pour moi les piliers fondateurs de ce que je suis et de ce que je fais. Des parents qui, à force de m'écouter parler, sont devenus bien malgré eux de véritables géographes.

Table des matières

PRESENTATION DES STRUCTURES D'ACCUEIL 10

INTRODUCTION 11

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART ET PRESENTATION DU SITE 13

I.1. L'OMBLE DE FONTAINE (*SALVELINUS FONTINALIS*) 13

I.1.1. Présentation générale 13

I.1.2. Cycle de vie 14

I.1.3. Habitats préférentiels 15

I.2. DES TRAVAUX DE PRESERVATION HYDROECOLOGIQUE 16

I.2.1. Restauration de la vie aquatique 16

I.2.2. Amélioration de la qualité de l'eau 16

I.2.3. Protection des milieux naturels 17

I.3. PRESENTATION DU SITE 18

I.3.1. Géologie et géomorphologie 18

I.3.2. Hydrographie 19

I.3.3. Climatologie 20

I.3.4. Occupation des sols 20

CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES 21

II.1. VOLET GEOMATIQUE ET TOPOGRAPHIE 22

II.1.1. Cartographie de l'archipel et des bassins 22

II.1.2. Bathymétrie des plans d'eau 23

II.2. VOLET HYDROLOGIE ET CLIMATOLOGIE 24

II.2.1. Simulation par homothétie des volumes 24

II.2.2. Simulations par bilan hydrologique et régionalisation 26

II.3. VOLET HYDROMETRIE ET HYDROMORPHOLOGIE 27

II.3.1. Jaugeage au sein des ruisseaux 27

II.3.2. Appréciation de la qualité physique des cours d'eau 28

II.4. VOLET PHYSICO-CHIMIQUE 29

CHAPITRE III : RESULTATS 30

III.1. VOLET HYDROLOGIE ET CLIMATOLOGIE 30

III.1.1. Modélisation par homothétie des volumes 30

III.1.2. Modélisation par bilan hydrologique et régionalisation ... 31
III.2. VOLET HYDROMETRIE ET HYDROMORPHOLOGIE ... 33
III.2.1. Analyses des débits ponctuels ... 33
III.2.1.a. Exutoire du ruisseau Savoyard ... 33
III.2.1.b. Profils en long hydrologiques ... 33
III.2.2. Données de qualité physique des milieux aquatiques ... 35
III.2.2.a. Diagnostic Qualphy – La Belle Rivière ... 35
III.2.2.b. Diagnostic Qualphy – Ruisseau Savoyard ... 36
III.3. VOLET PHYSICO-CHIMIQUE ... 38
III.3.1. Évolution temporelle à l'exutoire ... 38
III.3.2. Profil en long physico-chimique ... 38
III.4. TRAVAUX ET MISSIONS SUBSIDIAIRES A SPM ... 40
III.4.1. Projet OMBLESPM ... 40
III.4.2. Projet européen BEST ... 40
CHAPITRE IV : DISCUSSION ... 42
IV.1. ESTIMATION DU REGIME HYDROLOGIQUE ... 42
IV.2. UN RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE A CONSIDERER ... 45
IV.3. DES NOTIONS D'ECOHYDROLOGIE ET D'EXTREMUMS ... 46
IV.4. UNE CARACTERISATION DES RUISSEAUX CIBLES ... 48
IV.4.1. Contexte hydrogéologique ... 48
IV.4.2. Contexte biogéochimique ... 49
IV.5. VERS UN REAMENAGEMENT DES COURS D'EAU ... 51
CONCLUSION ... 53
REFERENCES ... 54
SOURCES BIBLIOGRAPHIQUES ... 54
SOURCES WEBOGRAPHIQUES ... 59
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS ... 61
ANNEXES ... 62
RESUME ... 105
ABSTRACT ... 105

Liste des figures

Figure 1. Morphologie et classification de l'omble de fontaine. Source : Langlois, 2010. 13

Figure 2. Cycle biologique de l'omble de fontaine anadrome (Salvelinus fontinalis). Source : Preynat, 2013. 14

Figure 3. Carte des réseaux hydrographiques du secteur sud de l'archipel de Saint-Pierre et Miquelon. 19

Figure 4. Diagramme ombrothermique mensuel, moyenné de 1981 à 2010, à la station de Saint-Pierre. Source : www.meteofrance. 20

Figure 5. Outils et méthodes d'analyses pour caractériser le fonctionnement des hydrosystèmes de l'archipel de SPM. 21

Figure 6. Carte topographique et hydrographique de l'île de Langlade, incluant les bassins versants de l'étang de la Maquine (contour rouge) et du ruisseau de la Belle Rivière (contour noir). 22

Figure 7. Localisation des stations hydrométriques, météorologiques et des bassins étudiés de la région SPM - péninsule de Burin. 24

Figure 8. Etude quantitative (en %) de l'occupation des sols, au sein des bassins de ; A) la Belle Rivière, B) le ruisseau Savoyard, et C) la rivière Salmonier. La catégorie « Autre » désigne les espaces tourbeux, la végétation herbacée, ou encore les roches affleurantes. 26

Figure 9. Carte des sous-bassins versants du ruisseau Savoyard définis à partir des tronçons étudiés. 29

Figure 10. Régime hydrologique du ruisseau Savoyard (bassin : 3,6 km²) simulé par homothétie des volumes (base : rivière Salmonier). 30

Figure 11. Evolution de l'évapotranspiration potentielle à Saint-Pierre (1988 à 2020 - ETP Penman). Source : Météo France. 31

Figure 12. Comparaison ETP (1981-2020) Oudin (Oudin et al., 2005), Penman (Météo France), Thornthwaite (www.geograchid.com). 31

Figure 13. Régime hydrologique du ruisseau Savoyard simulé par bilan hydrologique sur la base des ETP "Penman", "Oudin" et "Thornthwaite". Source ETP : Penman (Météo France), Oudin (Oudin et al., 2005) et Thornthwaite (www.geograchid.com). 32

Figure 14. Mesures de débits à l'exutoire du ruisseau Savoyard (période du 15/06/2021 au 26/07/2021). 33

Figure 15. Profil hydrologique de la Belle Rivière. Débits mesurés (du 23/06 au 26/06/2021) en valeurs absolues (L/s). 34

Figure 16. Profil hydrologique de la Belle Rivière. Débits mesurés (du 23/06 au 26/06/2021) en valeurs spécifiques (L/s/km^2). 34

Figure 17. Évolution amont-aval de la qualité physique du ruisseau de la Belle Rivière (campagne du 23/06 au 26/06/2021). 35

Figure 18. Évolution amont-aval de la qualité physique du ruisseau de Savoyard (campagne du 15/06/2021). 37

Figure 19. Évolution temporelle des paramètres physico-chimiques (température, taux de saturation en oxygène dissous, conductivité et pH) à l'exutoire du ruisseau Savoyard, du 15/06/2021 au 26/07/2021. 38

Figure 20. Profil des mesures de conductivité, réalisées le long de la Belle Rivière (campagne du 23/06/2021 au 26/06/2021). 39

Figure 21. Distribution spatiale de l'ensemble des bassins versants topographiques raccordés à la mer, et des réseaux hydrographiques de Langlade. 41

Figure 22. Régime de températures à la station de Saint-Pierre comparé au régime hydrologique du ruisseau Savoyard, estimé selon la méthode de l'homothétie des volumes (base de Salmonier), sur la période de 1981 à 2020. Sources : Météo France & Canada.ca. 43

Figure 23. Évolution des températures moyennes annuelles à Saint-Pierre (période 1990-2020). Source : Météo France. 45

Figure 24. Débits moyens annuels selon la surface des bassins versants pour les provinces Atlantiques. Source : Benyahya et al. (2009). 47

Figure 25. Relation hydrologie-géologie du ruisseau de la Belle Rivière. La lithologie est indiquée en noir et les confluences en bleu. 48

Figure 26. Fiche de synthèse des caractéristiques physiques du ruisseau Savoyard (inspirée de https://webgr.inrae.fr). 50

Liste des tableaux

Tableau 1. Seuils de vitalité et de conforts des paramètres physico-chimiques, propres à l'omble de fontaine (inspiré de Gustave, 2020). Source : Hynes (1970), pour la température létale ; Daye & Garside (1975), pour la tolérance au pH. 15

Tableau 2. Equations de débits utiles à l'étude. Les équations 1 et 3 dépendent de la superficie du bassin versant (SBV). 26

Tableau 3. Découpage du ruisseau Savoyard en tronçons homogènes à partir de la méthode Qualphy. La distance totale du linéaire est comptée à partir de la source. La typologie est spécifiée à l'aide de la fiche descriptive en Annexe 27. 28

Tableau 4. Récapitulatif des modules interannuels simulés, sur la période 1981-2020, par bilan hydrologique (ETP mensuelles selon Penman, Oudin, Thornthwaite et l'ETR annuelle selon Turc), par homothétie des volumes (sur la base du bassin versant topographique de la rivière Salmonier), et par la fonction puissance de régionalisation. 42

Tableau 5. Débits réservés du ruisseau Savoyard, spécifique au cycle de vie de l'omble de fontaine. Source : Belzile et al. (1997). 46

Liste des annexes

Annexe 1. Répartition mondiale des principales zones d'habitats de l'omble de fontaine. Source : https://www.cabi.org. 62

Annexe 2. Omble de fontaine de mer (grisée) et omble de fontaine de ruisseau (colorée) au ruisseau de la Mère Durand (Miquelon). Edgard Gustave, 09/06/2021. 62

Annexe 3. Effet de la température (de 4 à 12°C) sur la durée d'incubation des œufs – exemple de l'omble chevalier (Salvelinus alpinus). Sources : Swift (1965), Réalis-Doyelle (2016). 63

Annexe 4. Croquis des structures géomorphologiques de Saint-Pierre et Miquelon. Source : Sanguin (1981). 64

Annexe 5. Description des masses d'eau présentes au sein du bassin versant de la Belle Rivière. Source : Preynat, 2013. 65

Annexe 6. Description des masses d'eau présentes au sein du bassin versant du ruisseau Savoyard. Source : Preynat, 2013. 66

Annexe 7. Bassin versant topographique de l'étang de Savoyard. 67

Annexe 8. Bassin versant topographique de l'étang de la Maquine. 67

Annexe 9. Chronogramme de la préparation à la campagne de terrain sur l'archipel de Saint-Pierre et Miquelon. 68

Annexe 10. Carte topographique et hydrographique de l'île de Saint-Pierre, incluant les bassins versants de l'étang Savoyard (contour rouge) et du ruisseau Savoyard (contour noir). 69

Annexe 11. Exemple de sonogramme généré par le Deeper Chirp +. Ce graphique 2D représente la profondeur bathymétrique au cours du temps, suivant le trajet parcouru (de gauche à droite). Ici, le relief vert renseigne sur l'épaisseur d'une couche meuble (par exemple de la vase ou des végétaux aquatiques), tandis que le fond marron désigne un substrat plus consolidé (peut-être rocheux) et qui sera désigné en tant que « vrai fond bathymétriques » lors des relevés. 69

Annexe 12. Echosondeur Deeper Chirp + utilisé durant la campagne. 70

Annexe 13. Bathymétrie du Grand Etang de Miquelon ; A) en format carte, et B) en modèle 3D. Source : DTAM 975 (GéoSPM). 71

Annexe 14. Températures moyennes interannuelles (1982-1997) à Saint-Pierre, et relevés au niveau de trois stations météorologiques terre-neuviennes voisines. Sources : Météo France (Saint-Pierre) & Canada.ca (Fortune, Grand Bank.et Saint-Lawrence). 72

Annexe 15. Précipitations interannuelles (1982-1997) à Saint-Pierre, et relevés au niveau de trois stations météorologiques terre-neuviennes voisines. Sources : Météo France (Saint-Pierre) & Canada.ca (Fortune, Grand Bank.et Saint-Lawrence). 72

Annexe 16. Régimes hydrologiques des trois rivières terre-neuviennes proches de Saint-Pierre et Miquelon (période 1980-2019) ; A) résultats affichés en débits, et B) résultats affichés en lame d'eau. 73

Annexe 17. Carte géologique simplifiée de la région de SPM et de la péninsule de Burin. Lithologie : 1 : basaltes, gabbros ; 2 : rhyolites, tufs, ignimbrites et pyroclastites rhyolitiques ; 3 : phyllades grises à vertes ; 4 : quartzites ; 5 : shistes noirs ; 6 : shistes et grès ; 7 : granites de St-Lawrence et du Cap ; 8 : rhyolites de Burin ; 9 : dépôts glaciaires, moraines et tourbières ; φ : phase orogénique acadienne / calédonienne. Source : Aubert de la Rüe, 1951 ; O'Brien et al., 1977. 74

Annexe 18. Occupation des sols du bassin versant de la rivière Salmonier ; A) en format carte, et B) en format diagramme. La couverture végétale est tirée de la banque de données canadiennes (Circa 2000). 75

Annexe 19. Extraction de la végétation arborée du bassin de la rivière Salmonier ; A) d'une orthophotographie (2017), à B) une modélisation manuelle..... 75

Annexe 20. Carte de l'occupation des sols (végétation numérisée à la main) du bassin versant de la rivière Salmonier (Terre-Neuve)..... 76

Annexe 21. Carte de l'occupation des sols du bassin versant du ruisseau de la Belle Rivière (Langlade). 76

Annexe 22. Carte de l'occupation des sols du bassin versant du ruisseau de Savoyard (Saint-Pierre). 77

Annexe 23. Paramètres géographiques des bassins versants des ruisseaux étudiés. 77

Annexe 24. Maniement de la perche courantométrique MF Pro sur une section de la Belle Rivière. Edgard Gustave, 25/06/2021. 78

Annexe 25. Carte des sous-bassins versants du ruisseau de la Belle Rivière définis à partir des tronçons étudiés..... 78

Annexe 26. Découpage du ruisseau de la Belle Rivière en tronçons homogènes à partir de la méthode Qualphy. La distance totale du linéaire est comptée à partir de la source. La typologie est spécifiée à l'aide de la fiche descriptive en annexe 27. 79

Annexe 27. Typologie des cours d'eau compris dans la méthode Qualphy. 79

Annexe 28. Classification et signification des indices de qualités physiques des milieux. 80

Annexe 29. Mesures physico-chimiques avec la sonde multiparamètrique Hanna HI 98194 (ruisseau de la Belle Rivière). Edgard Gustave, 25/06/2021. 80

Annexe 30. Régime hydrologique de la rivière Salmonier (bassin de 115 km^2), à Terre-Neuve (période 1980-2019), station hydrométrique de Lamaline. Source : Canada.ca. 81

Annexe 31. Comparaison des ETP cumulées simulées selon Oudin, Penman et Thornthwaite (période 1981-2020). Sources : Oudin (Oudin et al., 2005), Penman (Météo France) et Thornthwaite (www.geograchid.com). 81

Annexe 32. Jeux de données regroupant les surfaces des bassins versants et débits (absolus et spécifiques) mesurés le long du ruisseau Savoyard, le 09/07/2021. 82

Annexe 33. Jeux de données regroupant les surfaces des bassins versants et débits (absolus et spécifiques) mesurés le long du ruisseau de la Belle Rivière, du 23/06/2021 au 26/06/2021. 82

Annexe 34. Hydrogramme de la rivière Salmonier à Lamaline sur la période de juin à août 2021. Le graphique représente le débit de référence (courbe verte) et les mesures effectuées en période de basses eaux (points rouge). Source : https://eau.ec.gc.ca. 82

Annexe 35. Profil hydrologique du ruisseau Savoyard. Débits mesurés (le 15/06/2021) en valeurs absolues (L/s). 83

Annexe 36. Profil hydrologique du ruisseau de la Belle Rivière. Débits mesurés (le 15/06/2021) en valeurs spécifiques (L/s/km^2). 83

Annexe 37. Photo du tronçon BR 11 – Belle Rivière. Les berges sont sapées par la dynamique du ruisseau. Erwan Durand, 08/06/2021. 84

Annexe 38. Photo du tronçon BR 3 – Belle Rivière. Une cascade naturelle, estimée à 10 m de hauteur, empêche la montaison des salmonidés. Edgard Gustave, 26/06/2021. 84

Annexe 39. Photo du tronçon BR 5 – Belle Rivière. Galets et blocs rocheux jonchent le lit mineur. Erwan Durand, 26/06/2021. 85

Annexe 40. Représentation diagramme de la qualité physique de la Belle Rivière, estimée d'après Qualphy sur sa longueur totale. 85

Annexe 41. Résultats des indices de qualité physique de la Belle Rivière, par tronçon (BR 3 à BR 15) et par compartiments. 85

Annexe 42. Photo du tronçon S1 – Ruisseau Savoyard. Des hélophytes prolifèrent jusque dans le lit mineur en voie d'assèchement. Erwan Durand, 15/06/2021. 86

Annexe 43. Photo du tronçon S2 – Ruisseau Savoyard. Un substrat et des berges bétonnés canalisent le cours d'eau recalibré. Edgard Gustave, 15/06/2021. 86

Annexe 44. Photo du tronçon S2 – Ruisseau Savoyard. La terminaison du canal est totalement détériorée, sous forme de débris, et perturbe considérablement le fonctionnement naturel du cours d'eau. Erwan Durand, 15/06/2021. 87

Annexe 45. Photo du tronçon S3 – Ruisseau Savoyard. Une ripisylve non-entretenue se trouve perchée au-dessus du lit mineur, au risque de former des embâcles. Erwan Durand, 15/06/2021. 87

Annexe 46. Photo du tronçon S5 – Ruisseau Savoyard. Le cours d'eau est obstrué par une barrière en bois, censée protéger des berges régulièrement piétinées par les équidés. Erwan Durand, 15/06/2021. 88

Annexe 47. Représentation diagramme de la qualité physique du ruisseau Savoyard, estimée d'après Qualphy sur sa longueur totale. 88

Annexe 48. Résultats des indices de qualité physique du ruisseau Savoyard, par tronçon (S1 à S5) et par compartiments. 88

Annexe 49. Jeux de données des paramètres physico-chimiques (température, taux de saturation en oxygène dissous, conductivité et pH) mesurés le long du ruisseau Savoyard, le 09/07/2021. 89

Annexe 50. Profil des mesures de température, réalisées le long du ruisseau Savoyard (le 09/07/2021). 89

Annexe 51. Profil des mesures de conductivité, réalisées le long du ruisseau Savoyard (le 09/07/2021). 89

Annexe 52. Profil des mesures de taux de saturation en oxygène dissous, réalisées le long du ruisseau Savoyard (le 09/07/2021). 90

Annexe 53. Profil des mesures de pH, réalisées le long du ruisseau Savoyard (le 09/07/2021). 90

Annexe 54. Jeux de données des paramètres physico-chimiques (température, taux de saturation en oxygène dissous, conductivité et pH) mesurés le long du ruisseau de la Belle Rivière, du 23/06/2021 au 26/06/2021. 91

Annexe 55. Profil des mesures de température, réalisées le long de la Belle Rivière (du 23/06/2021 au 26/06/2021). 91

Annexe 56. Profil des mesures de pH, réalisées le long de la Belle Rivière (du 23/06/2021 au 26/06/2021). 92

Annexe 57. Profil des mesures du taux de saturation en oxygène dissous, réalisées le long de la Belle Rivière (du 23/06/2021 au 26/06/2021). 92

Annexe 58. Prélèvements biologiques et analyses de l'état physique des ombles de fontaine (tronçon S1 du ruisseau Savoyard).Erwan Durand, 02/06/2021. 93

Annexe 59. Distribution spatiale de l'ensemble des bassins versants topographiques raccordés à la mer, et des réseaux hydrographiques de Saint-Pierre. 93

Annexe 60. Distribution spatiale de l'ensemble des bassins versants topographiques raccordés à la mer, et des réseaux hydrographiques de Miquelon. 94

Annexe 61. Carte des pentes du bassin versant du ruisseau Savoyard. 94

Annexe 62. Carte bathymétrique de l'étang de Savoyard, avec ; A) les profils bathymétriques réalisés avec l'échosondeur (campagne du mois de juillet 2021), et B) la modélisation du relief déterminé selon la méthode des plus proches voisins. 95

Annexe 63. Régime hydrologique du ruisseau Savoyard, simulé par homothétie des volumes sur la base des données de la rivière Salmonier (Canada.ca), et par bilan hydrologique, sur la base des ETP « Penman », « Oudin » et « Thornthwaite ». Source ETP : Penman (Météo France), Oudin (Oudin et al., 2005) et Thornthwaite (www.geograchid.com). 96

Annexe 64. Régime hydrologique du ruisseau Savoyard, simulé par homothétie des volumes sur la base des données de la rivière Salomnier (Canada.ca), et superposé à l'épaisseur moyenne mensuelle de la couverture de neige à Saint-Pierre sur la période 1981-2020. Source : Météo France. 96

Annexe 65. Régime hydrologique du ruisseau Savoyard, simulé par homothétie des volumes sur la base des données de la rivière Salomnier (Canada.ca), et superposé au nombre mensuel de jours avec des températures négatives à Saint-Pierre sur la période 1981-2020. Source : Météo France. 97

Annexe 66. Régime hydrologique du ruisseau Savoyard, simulé par homothétie des volumes sur la base des données de la rivière Salomnier (Canada.ca), et superposé au régime des précipitations à Saint-Pierre sur la période 1981-2020. Sources : Météo France..... 97

Annexe 67. Coefficients de Pardé mensuels du ruisseau Savoyard, simulé par homothétie des volumes (base : rivière Salmonier). Le diagramme compare les régimes hydrologiques du ruisseau avec des régimes nivo-pluvial (Fier à Val-de-Fier, période 1911-1939) et pluvio-nival (Lot à Cahors, période 1887-1926) français. Source : Société hydrotechnique de France (1939). 98

Annexe 68. Évolution des précipitations moyennes annuelles à Saint-Pierre (période 1990-2020). Source : Météo France. 98

Annexe 69. Températures maximales mensuelles mesurées à la station de Saint-Pierre au cours de l'année 2020 par rapport à la normale, moyennée sur la période 1981-2020. Source : Météo France. 99

Annexe 70. Températures minimales mensuelles mesurées à la station de Saint-Pierre au cours de l'année 2020 par rapport à la normale, moyennée sur la période 1981-2020. Source : Météo France. 99

Annexe 71. Débits réservés ; traditionnel (un quart du débit moyen annuel), annuel (pour l'omble de fontaine) et spécifique au cycle vital de l'omble de fontaine. Source : Benyahya et al. (2009). 100

Annexe 72. Régions écohydrologiques du Québec méridional. Source : Belzile et al. (1997). 100

Annexe 73. Indicateurs hydrologiques des ruisseaux de Savoyard et de la Belle Rivière. Cette liste présente le débit moyen annuel (QMA), la crue moyenne annuelle (CMA), l'étiage moyen annuel (EMA) et l'indice d'étiage, calculés selon la fonction puissance de Benyahya et al. (2009). 101

Annexe 74. Relation hydrologie-géologie du ruisseau Savoyard. La lithologie est indiquée en noir et les confluences en bleu. 101

Annexe 75. Intervalles de porosité totale, perméabilité et résistivité de roches, parmi les tufs volcaniques et les roches ignées. Source : https://coursgeologie.com/la-permeabilite-261/. 102

Annexe 76. Gamme de valeurs de perméabilité de roches et dépôts non-consolidés tels que les tills glaciaires et les silts. Source : http://hydrogeologistswithoutborders.org/wordpress/1979-francais/chapitre-2/ 102

Annexe 77. Représentation diagramme de la qualité physique de la Belle Rivière, post-simulation, estimée d'après Qualphy sur sa longueur totale. 103

Annexe 78. Indices de qualité physique de la Belle Rivière post-simulation, par tronçon (Br 3 à BR 15) et par compartiments 103

Annexe 79. Représentation diagramme de la qualité physique du ruisseau Savoyard, post-simulation, estimée d'après Qualphy sur sa longueur totale. 103

Annexe 80. Indices de qualité physique du ruisseau Savoyard post-simulation, par tronçon (S1 à S5) et par compartiments. 104

Annexe 81. Comparaison de graphiques à barres décrivant le niveau de qualité physique de chacun des paramètres qui caractérisent le tronçon S5 du ruisseau Savoyard ; A) avant, et B) après simulation de réaménagements. Les données révèlent des taux de satisfaction du milieu (barres bleues), et une quantification des préjudices (barres rouges) principalement causés par l'anthropisatio 104

Présentation des structures d'accueil

Dans un monde où la société doit faire face à des enjeux vitaux, liés à la sécurité alimentaire et au vieillissement de la population, certaines unités de recherches tentent actuellement de répondre à deux problématiques fondamentales (https://urafpa.fr) ; 1) le développement des productions piscicoles (domestication de nouvelles espèces et diversification de la production), et 2) la maîtrise de la qualité sanitaire des produits animaux (production d'aliments sains). Dans ce cas, il s'agit de savoir comment promouvoir le développement durable des productions animales aquatiques et terrestres, en suivant le rythme et les exigences de la consommation mondiale.

L'Unité de Recherche Animal et Fonctionnalités des Produits Animaux (UR AFPA) est un laboratoire de l'Université de Lorraine, sous contrat avec l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRAE ; département physiologie animale et systèmes d'élevage). Il est aussi rattaché au pôle scientifique Agronomie, Agroalimentaire, Forêt (A2F) et à la structure fédérative 4242 Écosystème Forestier, Agroressources, Bioprocédés et Alimentation (EFABA).

Les travaux de l'UR AFPA se concentrent autour de trois projets communs afin de trouver des solutions aux questionnements globaux. La thématique « Domestication en Aquaculture Continentale » (DAC) est celle privilégiant le développement de nouvelles espèces en pisciculture à partir d'une approche génétique et en étudiant les effets de cette domestication. Les objectifs sont d'engager une aquaculture variée et adaptée aux territoires en vue de bénéficier d'une filière résiliente et durable. Les recherches vont de la cellule isolée aux interactions entre espèces, en passant par l'organe, l'individu et la population. Les méthodes engagent l'écologie, l'analyse moléculaire et l'étude comportementale.

La Fédération Territoriale de la Pêche et de la Protection des Milieux Aquatiques de Saint-Pierre et Miquelon (FTPSPM) a été créée en octobre 2014. Elle regroupe les associations de pêche de loisir : « Société de Pêche Sportive Saint-Pierre Langlade » et « Joyeux Pêcheurs de Miquelon ».

Elle a pour missions de : 1) détenir et gérer les droits de pêche, 2) participer activement à la protection et à la surveillance des milieux aquatiques et de leur patrimoine piscicole, 3) élaborer et mettre en œuvre un plan de gestion piscicole, 4) effectuer les travaux et interventions de mise en valeur piscicole, 5) mener des actions d'informations, de formations et d'éducation en matière de protection des milieux aquatiques (https://jo-spm.fr).

Introduction

L'aquaculture définit les activités de production animale ou végétale en milieu aquatique (rivières, étangs et littoraux). Ce secteur est actuellement en plein essor, et ne cesse de se développer pour répondre aux besoins grandissants de la population mondiale. En effet, l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO) souligne en 2018 que 17% des protéines animales nécessaires à la consommation humaine proviennent de la pêche et de l'élevage de poissons.

Un récent rapport de la FAO (2020) indique que la production mondiale de poisson croît de 10% chaque année, depuis 1980, alors que l'intensité des activités de pêche est restée stable. Cette production repose sur l'élevage d'un nombre d'espèces aquacoles toujours plus important, bien qu'une dizaine d'entre elles représentent 90% de la productivité totale (Teletchea, 2016, 2019). Une meilleure gestion de ces ressources doit permettre de s'inscrire dans un contexte de durabilité socio-environnementale, et faire face à de nombreux défis ; la surpêche commerciale, la pollution environnementale, ou encore, le réchauffement climatique.

Les espèces au plus fort tonnage (> 1 million de tonnes), telles que la truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*) et la carpe commune (*Cyprinus carpio*), ont été implantées dans de nombreux pays (Teletchea, 2019). Pourtant, l'importation d'espèces exotiques dans des écosystèmes fait encourir des risques de perturbations à la biodiversité autochtone (Beisel & Teletchea, 2018). Il n'est donc pas exclu que l'introduction de ces espèces – potentiellement invasives – soit prohibée (Teletchea & Le Doré, 2011). Certains pays d'Europe ont mis en place une réglementation plus contraignante afin de soutenir une aquaculture plus résiliente et adaptée aux milieux (Fontaine & Teletchea, 2019).

La France dispose d'un grand potentiel aquacole, en métropole et plus particulièrement dans les collectivités d'Outre-Mer. La valorisation de ce patrimoine naturel local pourrait ainsi être privilégiée (Anonyme, 2016) par rapport à l'importation d'espèces non-indigènes (Fontaine & Teletchea, 2019). Cependant, la domestication d'une nouvelle espèce de poisson est un processus à la fois long et compliqué, menant bien souvent à l'échec (Teletchea & Fontaine, 2014 ; Teletchea, 2019). Une approche holistique améliore les chances de réussites concernant le développement d'une espèce dans un environnement défini.

L'objectif de mon stage consiste en la valorisation de l'élevage d'une espèce native de l'archipel de Saint-Pierre et Miquelon (SPM), l'omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*). Ce poisson est très apprécié par la population locale, et peut être pêché aussi bien pour le loisir que pour la consommation. Toutefois, les habitants, adeptes de la pêche récréative, témoignent d'une diminution de la population des ombles (Briand *et al.*, 2021).

Dans ce contexte, un projet de trois ans – intitulé OMBLESPM – financé par la fondation de France (2020-2023) a pour objectifs de réaliser : 1) une synthèse des travaux effectués sur cette espèce sur l'archipel de SPM, 2) des études complémentaires sur le terrain, 3) une comparaison régionale avec d'autres travaux effectués au Québec, à Terre-Neuve et en Nouvelle-Écosse. Une plus grande compréhension de la biologie de cette espèce doit ainsi contribuer à un meilleur développement de la pêche sur l'archipel.

Les hydrosystèmes de SPM sont peu connus et sous-exploités. Une étude du fonctionnement des réseaux hydrographiques serait indispensable pour soutenir les activités de pêche (Martinie-Cousty & Prévot-Madère, 2017). Cependant, il n'existe qu'une station météorologique de Météo France à Saint-Pierre (depuis 1981). Une étude de ce type requiert également la connaissance des valeurs de débits. Néanmoins, aucun équipement d'hydrométrie n'a encore été installé sur SPM.

Le premier objectif de ce travail est donc d'établir un « référentiel hydrographique » de l'ensemble de l'archipel, avec les principales caractéristiques physiques : 1) délimitation des bassins versants des cours d'eau et plans d'eau, 2) physiographie, à partir des données SIG disponibles.

De plus, l'archipel étant partagé en deux secteurs (nord et sud) qui définissent le rayon d'action des associations de pêche, le second objectif de ce stage est de réaliser une description des hydrosystèmes des îles de Saint-Pierre et Langlade (secteur sud), incluant :

- Une analyse physique du milieu aquatique : 1) apprécier sa qualité physique (mobilisation d'une méthodologie visant à quantifier la dégradation d'un milieu physique par rapport à son état de fonctionnement « naturel ») et suggérer, le cas échéant, des restaurations en vue de s'y rapprocher, 2) estimer les débits par hydrométrie des cours d'eau.
- Déterminer la qualité chimique de l'eau, au travers d'analyses de la température, du pH, du taux de saturation en O_2 dissous et de conductivité.

Le projet européen BEST, dirigé par la fédération locale de pêche (FTPSMP), en partenariat avec l'Office Française de la Biodiversité (OFB), le Conseil Territorial (CT), et des chercheurs de l'Université de Lorraine (UL), s'inscrit dans la continuité du projet scientifique OMBLESPM.

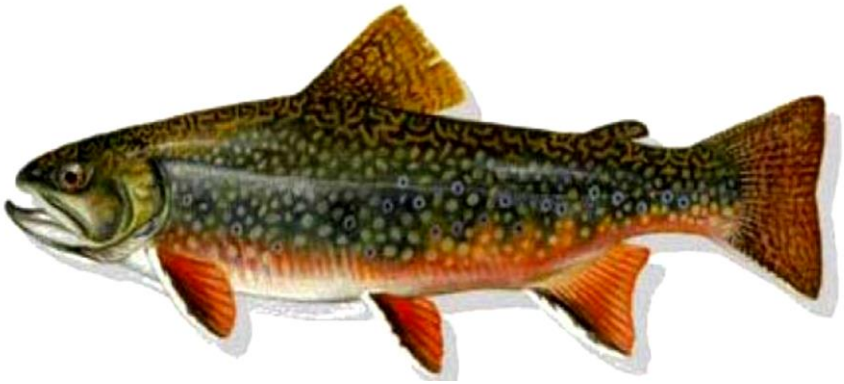
Une participation future à ce projet a requis l'étude de nouveaux secteurs potentiellement intéressants en vue d'un repeuplement piscicole et de réaménagements des hydrosystèmes. À des fins d'anticipation, d'autres ruisseaux et étangs ont donc fait l'objet d'analyses physiques et chimiques que nous développerons brièvement parmi les résultats. Pour autant, ces travaux de recherches ne feront pas partie intégrante de ce rapport.

CHAPITRE I : État de l'art et présentation du site

I.1. L'omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*)

I.1.1. Présentation générale

De son nom latin *Salvelinus fontinalis*, l'omble de fontaine – aussi connu sous le nom de truite de mer, truite mouchetée, ou encore saumon de fontaine – est un salmonidé largement répandu dans plusieurs pays de l'Atlantique Nord (Annexe 1). Originaire du continent nord-américain, ce poisson noble se retrouve jusqu'au large de la côte est du Canada, incluant les hydrosystèmes des îles environnantes. Cependant, au vu de leur taille particulièrement petite sur l'archipel de SPM (20 cm en moyenne), leur lien génétique avec le reste de la région est encore à déterminer.



Classification :

Phylum => Chordés
Superclasse => Ostéichthyens
Classe => Actinoptérygiens
Ordre => Salmoniformes
Famille => Salmonidés
Sous-famille => Salmoninae
Genre => *Salvelinus*
Espèce => *fontinalis*

Figure 1. Morphologie et classification de l'omble de fontaine. Source : Langlois, 2010.

Au stade adulte, l'apparence de l'omble varie selon l'âge, le sexe, l'alimentation, mais aussi le lieu de vie. Son dos (Figure 1) peut être vert à noir, en passant par le brun foncé. Ces flancs verts à bruns sont recouverts par des tâches pâles ou rouges, entourées d'un halo souvent bleuâtre. Le ventre est la partie du corps arborant la plus grande palette de couleur ; allant de l'orange foncé au rouge pour les mâles, et du blanc au jaune pour les femelles. Les nageoires inférieures sont cernées par des liserés noirs et blancs, et la nageoire caudale est peu fourchue. La chair peut aussi bien être orange, rose ou rouge, suivant le régime alimentaire du poisson (Langlois, 2010).

L'omble de fontaine est une espèce anadrome. En descendant vers l'aval pour rejoindre la mer, l'espèce subit une modification morphologique. Sa robe perd peu à peu ses marques caractéristiques et laisse place à une couleur argentée (Annexe 2). Seules les tâches rouges des flancs et les rebords noirs des nageoires inférieures restent apparents. Les poissons remontent ensuite le courant afin de pondre leurs œufs en amont. L'omble reprend alors son apparence initiale sur le trajet du retour, au contact de l'eau douce (Langlois, 2010).

I.1.2. Cycle de vie

La période automnale (octobre à décembre) est la saison de fraie pour les ombles de fontaine. La femelle pond ses œufs (entre 100 et 5000, pour un diamètre de 3 à 5 mm) qui seront fécondés par un ou plusieurs mâles. Cette espèce a besoin d'un lit de gravier dans un cours d'eau peu profond, proche d'une source d'eau fraiche (d'où son nom d'omble de fontaine), et des courants assurant une bonne oxygénation des œufs. Le substrat doit, en effet, permettre la percolation de l'eau entre les interstices (Witzel et MacCrimmon, 1981). Toutefois, ce poisson peut se satisfaire d'un milieu lacustre lorsque ces conditions ne sont pas réunies (Preynat, 2013).

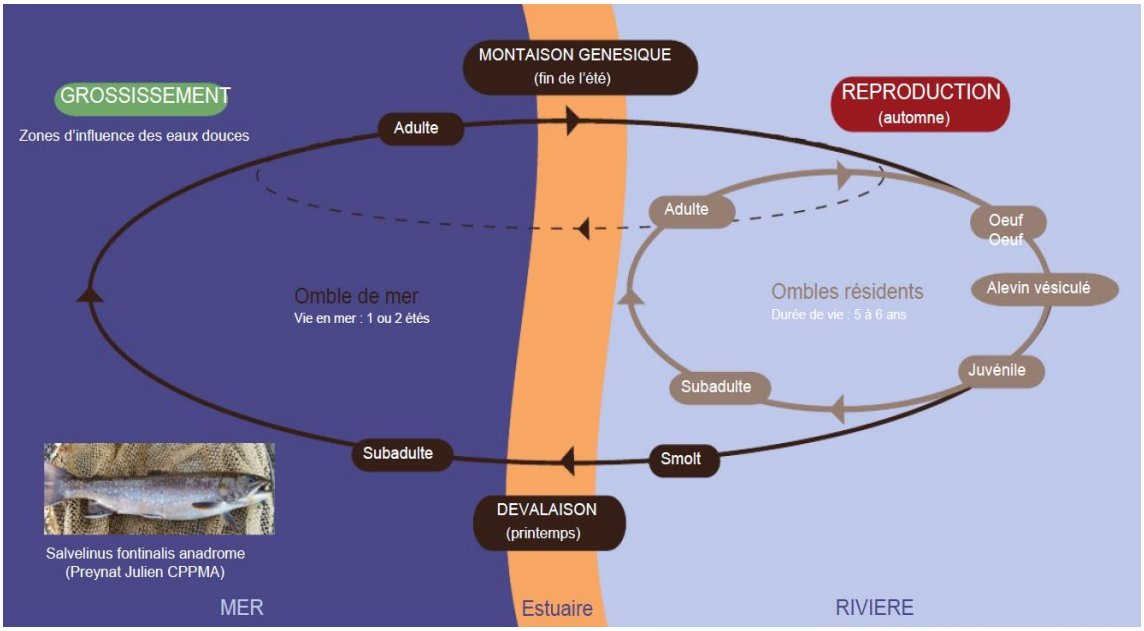


Figure 2. Cycle biologique de l'omble de fontaine anadrome (Salvelinus fontinalis). Source : Preynat, 2013.

Les alevins récemment éclos n'émergent de leur lit de gravier qu'au printemps, où ils atteignent une taille suffisante (entre 3 et 4 cm) pour découvrir leur nouvel environnement. Il faut attendre 2 à 4 ans avant que les poissons ne deviennent adultes. Leur taille varie alors de 10 à 20 cm, ce qui suggère une forte variabilité du taux de croissance selon les régions. Par exemple, les larges étendues d'eau abritent souvent les plus gros et vieux spécimens. L'espérance de vie excède rarement sept années (Scott et Crossman, 1974), tandis que le poids moyen d'un individu se rapproche de 500 g.

À leur tour, les jeunes individus migrent vers la mer entre les mois d'avril et juin (Figure 2) en restant à proximité des estuaires. Les quantités de nourriture y sont plus abondantes. Ils remontent les cours d'eau, généralement à la suite d'un épisode de crue (de juillet à septembre), pour frayer (Figure 2). Un tel trajet requiert beaucoup d'énergie, c'est pourquoi tous les ombles anadromes ne migrent pas chaque année. De plus, certains obstacles sont susceptibles d'entraver la dévalaison (infrastructures, embâcles, seuils, …), forçant le poisson à se sédentariser.

I.1.3. Habitats préférentiels

L'omble de fontaine est une espèce territoriale qui choisit son refuge en fonction du niveau de prédation et de la quantité de nourriture disponible. La qualité physico-chimique de l'eau doit répondre à des valeurs particulières de température, de pH, d'oxygène dissous – pour ne lister que les plus importants (Tableau 1) – , ainsi que de turbidité, de conductivité et de potentiel rédox.

Tableau 1. Seuils de vitalité et de conforts des paramètres physico-chimiques, propres à l'omble de fontaine (inspiré de Gustave, 2020). Source : Hynes (1970), pour la température létale ; Daye & Garside (1975), pour la tolérance au pH.

Température		**pH**		**Oxygène dissous (aquaculture)**		**Salinité**	**MES (aquaculture)**	
Létalité	Confort	Létalité	Confort	Létalité	Confort	Alevin	Alevin	Adulte
0 - 25°C	12 - 14°C	3,5 - 9,8	6,5 - 8,0	< 3 mg/L	> 5,5 mg/L	0 - 35 ‰	< 25 mg/L	< 75 mg/L

La température de l'eau est le facteur écologique le plus important (Creaser, 1930 ; Mullen, 1958 ; McCormick *et al*., 1972 ; Preynat, 2013). Alors que des lacs et rivières peu profonds et chargés en sédiments sombres sont propices à des hausses de températures, une ripisylve dense assure, quant à elle, un ombrage suffisant pour conserver la fraicheur du milieu. Le réchauffement climatique représente un véritable danger pour cette espèce qui ne peut survivre bien longtemps au-delà de 25,3°C (Hynes, 1970 ; Preynat, 2013). L'omble peut donc être soumis à des épisodes de stress intenses durant certaines périodes de l'année.

La température joue aussi un rôle important dans la durée d'incubation des œufs (temps nécessaire entre la fécondation et l'éclosion de 50% des larves). En effet, les températures élevées accélèrent le développement et l'émergence des larves (Annexe 3) (Bjornn et Reiser, 1991). Elle a également une influence sur l'alimentation : dans des eaux à 13°C, l'omble est capable de manger jusqu'à 50% de son poids chaque jour (Langlois, 2010). L'intervalle de confort est compris entre 9 et 17°C (optimum de 12 à 14°C ; *Biologie des poissons d'eau douce européens*, 2001), mais Bernatchez et Giroux (2000) estiment que sa gamme de tolérance s'étend de 0 à 20°C.

Le pH est une unité servant à mesurer le niveau d'acidité d'un milieu. D'après les estimations de Dunson et Martin (1973) et Fraser (1982), l'omble est l'une des espèces, parmi les salmonidés, les mieux adaptées aux pH acides. Des études réalisées en laboratoire par Daye et Garside (1975), démontrent que la tolérance de l'omble est comprise entre 3,5 et 9,8. Néanmoins, une exposition prolongée dans des masses d'eaux très acides (< 6,5) nuit au bon développement de l'omble (Menendez, 1976), pouvant aller de l'atrophie des nageoires et des branchies à la mort des embryons. L'intervalle de pH idéal pour le bien-être de cette espèce est situé entre 6,5 et 8,0 (Raleigh, 1982).

I.2. Des travaux de préservation hydroécologique

I.2.1. Restauration de la vie aquatique

Afin de garantir un bon développement durant leur cycle biologique, les ombles de fontaine ont besoin d'un habitat qui les protègera des courants forts, des températures estivales, des prédateurs et de la compétition interspécifique. Un abri représente également un poste de chasse idéal pour des juvéniles encore vulnérables. Or, certains ruisseaux de l'archipel n'offrent pas suffisamment de caches pour ce salmonidé territorial. Une capacité d'accueil restreinte entraine l'exclusion des jeunes ombles, chassés par les poissons dominants. La restauration des milieux dégradés et l'agrandissement des zones d'accueil est donc nécessaire (Preynat, 2013). Ces solutions assurent la préservation de l'espèce et favorise l'accroissement des populations au sein des hydrosystèmes.

Le réaménagement des milieux aquatiques doit prendre en compte un autre paramètre afin de promouvoir le développement de l'omble ; le potentiel de recrutement (surfaces favorables à la reproduction ; Preynat, 2013). En période de fraie, la femelle creuse un lit dans un substrat de gravier grossier (0,2 à 2 cm de diamètre), au sein d'une colonne d'eau peu profonde (20 à 40 cm) et face à des courants contribuant à l'oxygénation des œufs (vitesses de 30 à 80 $cm.s^{-1}$). Le meilleur moyen de lutter contre la réduction de ces surfaces est la restauration et l'implantation de frayères artificielles. Le potentiel de recrutement est aussi en lien avec la réussite de l'incubation des œufs. Elle dépend fortement de la température, de l'oxygène dissous et du pH. Avec des pH inférieurs à 5, l'acidité des milieux aquatiques de l'archipel limite ce taux de réussite (Preynat, 2013). Bien qu'il soit impossible d'agir sur ces paramètres naturels, une ripisylve en bon état est l'un des facteurs permettant de rétablir la qualité environnementale.

I.2.2. Amélioration de la qualité de l'eau

La végétation rivulaire est un atout naturel majeur qu'il faut mettre à profit pour préserver la qualité physico-chimique des réseaux hydrographiques. En effet, elle maintient une continuité écologique du milieu par un gain d'ombrage, régulant ainsi la température de l'eau. De plus, une eau fraîche possède un taux d'oxygène dissous plus important et un niveau de pH bas, offrant des lieux de vie propices au développement de l'omble. Comme expliqué *supra*, cette espèce apprécie les eaux entre 9 et 17°C. L'omble est peu actif à la fois dans les eaux froides (ses déplacements lui coûtent beaucoup d'énergie), et dans les eaux chaudes (les fortes températures lui procurent du stress).

Le déploiement du système racinaire est un moyen naturel de soutenir les berges et lutter contre l'érosion. Ce rôle est assuré localement par des arbustes (aulne, myrique baumier, …), adaptés au

terrain et au climat de SPM. Les salmonidés peuvent ainsi se réfugier sous les berges et entre les racines. Les grands arbres sont généralement des stabilisateurs de rives, mais l'abondance des résineux (essentiellement des sapins baumiers) parmi les quelques forêts n'apporte pas de protection pérenne et efficace contre l'effondrement et le sapement des berges. Au contraire, les courants puissants ont tendance à emporter les résineux, responsables *in fine* de la formation d'embâcles.

Enfin, une bonne gestion de la ripisylve permet d'optimiser le faciès d'écoulement d'un cours d'eau. La végétation apporte également des nutriments et de nouvelles proies aux ombles de fontaine. Ces changements sont donc favorables à la biodiversité dans les eaux courantes et stagnantes.

I.2.3. Protection des milieux naturels

La migration fait partie intégrante du cycle biologique de l'omble de fontaine. Par conséquent, un cours d'eau doit permettre le passage du salmonidé anadrome, que ce soit pour la dévalaison ou la montaison. La formation d'un embâcle ou l'implantation d'un barrage risque de compromettre la circulation de l'ichtyofaune. Ces phénomènes, observables dans de très nombreux hydrosystèmes du monde, sont responsables de l'isolation des populations. Le brassage génétique n'étant plus entretenu, deux groupes identiques vont finir par se différencier au cours du temps. Il s'agit là d'un problème majeur que l'on retrouve à SPM. En effet, les nappes phréatiques étant très mal circonscrites, l'eau potable est captée au niveau des retenues artificielles de la Vigie et du Goéland (Dussut, 2007). Ces aménagements représentent des barrières infranchissables pour les salmonidés. Or, le découpage d'un bassin versant doit respecter des enjeux concernant l'autonomie des capacités d'accueil et du potentiel de recrutement, afin de maintenir la continuité piscicole (Preynat, 2013).

Les impacts sur la faune et la flore aquatique n'ont pas été pris en considération lors de la construction des deux barrages (> 70 ans). L'amont d'un seuil se caractérise par la formation d'une plaine d'inondation générant ; 1) un ralentissement et une uniformisation des écoulements, 2) une rupture du transit sédimentaire et un colmatage du substrat responsable d'une diminution du taux d'oxygène dissous (envasement, anaérobie), et 3) le cloisonnement biologique du milieu. Ces eaux, devenues alors artificiellement stagnantes, sont exposées à des hausses de températures – une situation pouvant s'aggraver en période estivale –, et au développement d'organismes indésirables (bactéries, algues, …). En revanche, la partie avale est marquée par une chute du débit et une érosion régressive intense. Aujourd'hui, il faut considérer que l'effacement des seuils a une influence bénéfique sur la qualité des écosystèmes lotiques, et par conséquent sur la survie des organismes vivants (tel que *Salvelinus fontinalis*). C'est pourquoi l'emplacement des buses (passages sous les routes) est soumis à des normes écologiques strictes. Les embâcles ne doivent pas perturber l'écoulement en période d'étiage, tandis que l'évolution des atterrissements exige une surveillance constante.

I.3. Présentation du site

Depuis 1816, l'archipel de SPM est le seul territoire du continent nord-américain qui soit resté à la France. Situé au Sud de Terre-Neuve (Est du Canada), l'archipel se compose de huit îles – dont trois principales – et peut être dissocié en quatre grandes unités ; Miquelon (presqu'îles du Cap et Grande Miquelon ; 110 km^2), l'isthme de Miquelon-Langlade (20 km^2), Langlade (90 km^2) et Saint-Pierre (25 km^2). Ces deux dernières unités (moitié sud de l'archipel) sont placées dans le secteur d'activité de la société de « Pêche Sportive Saint-Pierre Langlade » (elle-même affiliée à la fédération territoriale de pêche), et entrent dans le cadre de cette étude.

I.3.1. Géologie et géomorphologie

L'archipel se situe à la terminaison Nord de la chaîne de montagnes des Appalaches, avec Terre-Neuve et la Nouvelle-Écosse. Un relief plat et érodé laisse aujourd'hui apparaitre des mornes (petites collines) dont les sommets affleurants s'élèvent à 207 m (le Trépied – île de Saint-Pierre), et 190 m d'altitude (Cuquemel – presqu'île de Langlade).

L'île de Saint-Pierre est le vestige d'un volcanisme de type explosif (585-575 Ma) ayant généré des tufs et des brèches pyroclastiques. Ces terrains présentent, par endroits, des faciès effusifs basaltiques et andésitiques (Dubois, 2006 ; Blein *et al.*, 2015 ; Cerema, 2020). De la même manière que pour ses îlots adjacents, l'unité de Saint-Pierre est constituée de rhyolithes (roches acides magmatiques résultant d'un épanchement volcanique) (Reux, 2018 ; Cerema, 2020). D'un point de vue géomorphologique, les côtes au sud de l'île sont bordées par des dépôts morainiques (amas de débris rocheux charriés et remaniés, témoins de la période de glaciation Quaternaire qui a façonné le paysage) épais de plusieurs mètres au niveau de la pointe aux Savoyards. L'île est divisée en deux régions, séparées par une faille qui se propage du cap de l'Aigle à l'anse de Savoyard ; une partie haute (nord-ouest ; annexe 4) plus accidentée, et une partie basse (sud-est) au relief homogène.

La lithologie de Langlade se compose principalement de roches paradérivées peu métamorphisées du Cambrien inférieur et moyen ; siltites, quartzites, grès et schistes. Elles sont disposées en bandes parallèles, orientées en nord-est / sud-ouest, et sont séparées par des réseaux de failles décrochantes (Reux, 2018 ; Cerema, 2020). Seule la partie septentrionale de l'île présente des traces de coulées rhyolitiques et basaltiques, recoupées par quelques filons doléritiques (Aubert de la Rüe, 1951 ; Cerema, 2020). Des mornes forment de petites dépressions, au nord et à l'ouest, comblées par de nombreux étangs. Les moraines, généralement recouvertes par un horizon tourbeux, occupent une grande surface et atteignent jusqu'à 30 m d'épaisseur dans le Petit Barachois. Enfin, des dépôts de type gravier tapissent les terrasses alluviales de certains ruisseaux, tels que la Belle Rivière.

I.3.2. Hydrographie

L'archipel de SPM se caractérise par une grande couverture d'étangs, connectés entre eux par un réseau dense de ruisseaux et rivières (Figure 3) s'écoulant sur un substrat dominé par la tourbe (accumulation peu perméable de débris de végétaux tapissant les zones marécageuses ou alluvionnaires). L'hydrosystème propre à chacun des bassins versants est relativement homogène et semblable entre les îles de Miquelon et Langlade. L'île de Saint-Pierre possède néanmoins un réseau plus limité, lié à la géomorphologie et à la nature des sols sur lesquels il s'est développé (Cerema, 2020). À ce jour, aucune étude hydrogéologique n'a été menée à notre connaissance. Cependant, l'affleurement du socle magmatique et l'occupation des sols sur l'île de Saint-Pierre semblent peu propices à la formation d'aquifères, contrairement aux deux autres îles principales où la nappe phréatique pourrait être connectée avec la mer (société Louis Hardy S.A.S., 2016).

La dérive sédimentaire et les débits solides sont à l'origine de la formation de cordons littoraux. Des connexions mer-lagune peuvent se faire au niveau d'un détroit ; on parle alors de « barachois » (par exemple, l'étang Savoyard – Saint-Pierre). Les principaux drains traversent Langlade (la Belle Rivière, la Maquine, …) et présentent un fort débit, notamment en hiver (Harrache & Gilly, 1986).

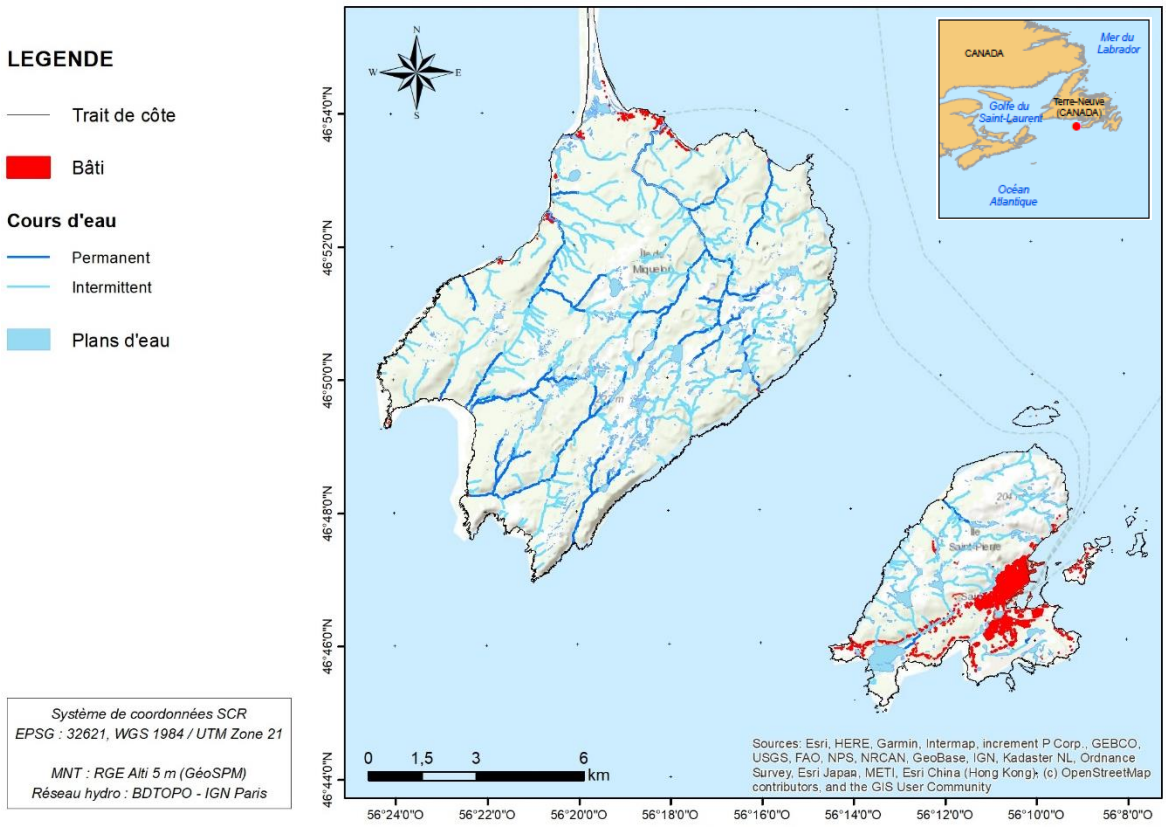


Figure 3. Carte des réseaux hydrographiques du secteur sud de l'archipel de Saint-Pierre et Miquelon.

I.3.3. Climatologie

Le climat de SPM est de type subarctique, bien qu'adouci par l'influence océanique (Cerema, 2020). Les étés sont particulièrement courts et frais (19°C en août) pour des hivers dont les températures descendent sous la barre des 0°C (-3,2°C en février). La moyenne annuelle étant de 5,7°C, les températures peuvent toutefois s'étendre selon des extrêmes allant de -14°C à 28°C. Les précipitations représentent, quant à elles, une lame d'eau annuelle de 1385 mm, avec une bonne répartition temporelle ; 90 mm en juillet et 140 mm en novembre (Figure 4).

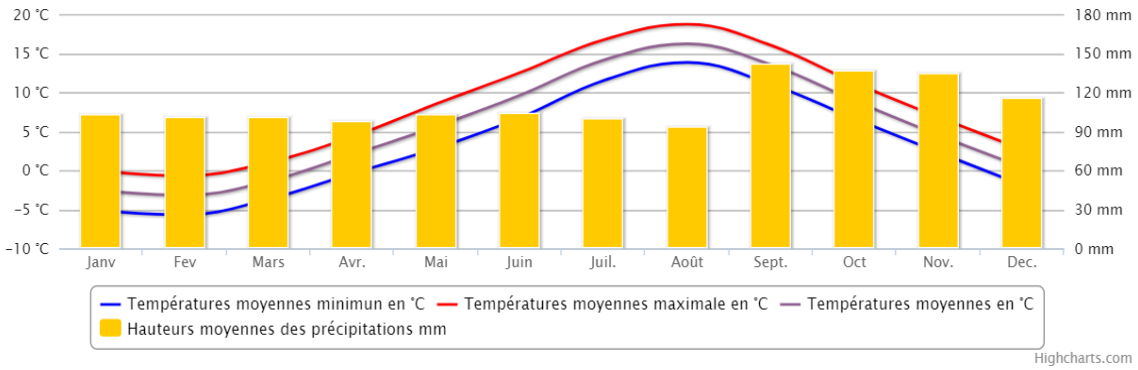


Figure 4. Diagramme ombrothermique mensuel, moyenné de 1981 à 2010, à la station de Saint-Pierre. Source : www.meteofrance.

Anormalement froid pour sa latitude (47°), l'archipel subit à la fois l'influence de masses d'air polaires – provenant des régions arctiques –, et de masses d'eau tièdes – guidées par les courants océaniques du Labrador. Une zone d'affrontement se crée alors entre courants marins et aériens. En effet, le Gulf Stream et les vents doux du sud-ouest rencontrent le courant du Labrador et les vents froids du nord (source : https://www.climatsetvoyages.com/climat/st-pierre-et-miquelon). La région est alors placée sous la conjugaison de fortes pluies, de brouillards fréquents, et de chutes de neige en périodes hivernales. En fin d'été, l'archipel peut même se retrouver sur la trajectoire de certaines queues d'ouragans tropicaux, remontant le long des Caraïbes.

I.3.4. Occupation des sols

Ce territoire d'outre-mer abrite la seule forêt boréale de France, toutefois en proie à des dégradations environnementales en raison des activités humaines (Jouglet & Letournel, 2010). Le secteur Langlade/Saint-Pierre est pourvu de multiples zones humides (tourbières, marais, lacs et rivières) occupant 50% du territoire. Une végétation comportant un faible réseau racinaire (prostrée et herbacée) complète les paysages. Les zones protégées des rafales de vents comptent de rares boisements plurispécifiques ; une grande quantité de conifères (sapins baumiers et épinettes), ou encore des feuillus (bouleaux à papier, cerisiers, aulnes et sorbiers, …) (Dussut, 2007). Enfin, bien que 95% du trait de côte soit naturel, les secteurs urbains et autres villages de pêcheurs tendent à artificialiser le littoral (Cerema, 2017, 2020).

CHAPITRE II : Matériels et méthodes

L'étude des réseaux hydrographiques de SPM s'articule autour de quatre axes de travail ; 1) établir un référentiel cartographique et bathymétrique visant à dresser le portrait des bassins versants sélectionnés, 2) suivre l'évolution climatique et modéliser des débits sur un territoire dépourvu de stations hydrométriques, 3) procéder à des campagnes de jaugeage et apprécier la qualité physique des cours d'eau, et 4) estimer la qualité physico-chimique des masses d'eau (Figure 5). Chacune de ces étapes doit contribuer *in fine* à l'élaboration de pistes de réflexions dans le cadre d'une restauration des hydrosystèmes, ainsi qu'à l'implantation d'un réseau hydrométrique. Cette approche holistique s'inscrit donc parfaitement dans le contexte de repeuplement de l'archipel, pérennisant de ce fait la pêche sportive tout en préservant le salmonidé.

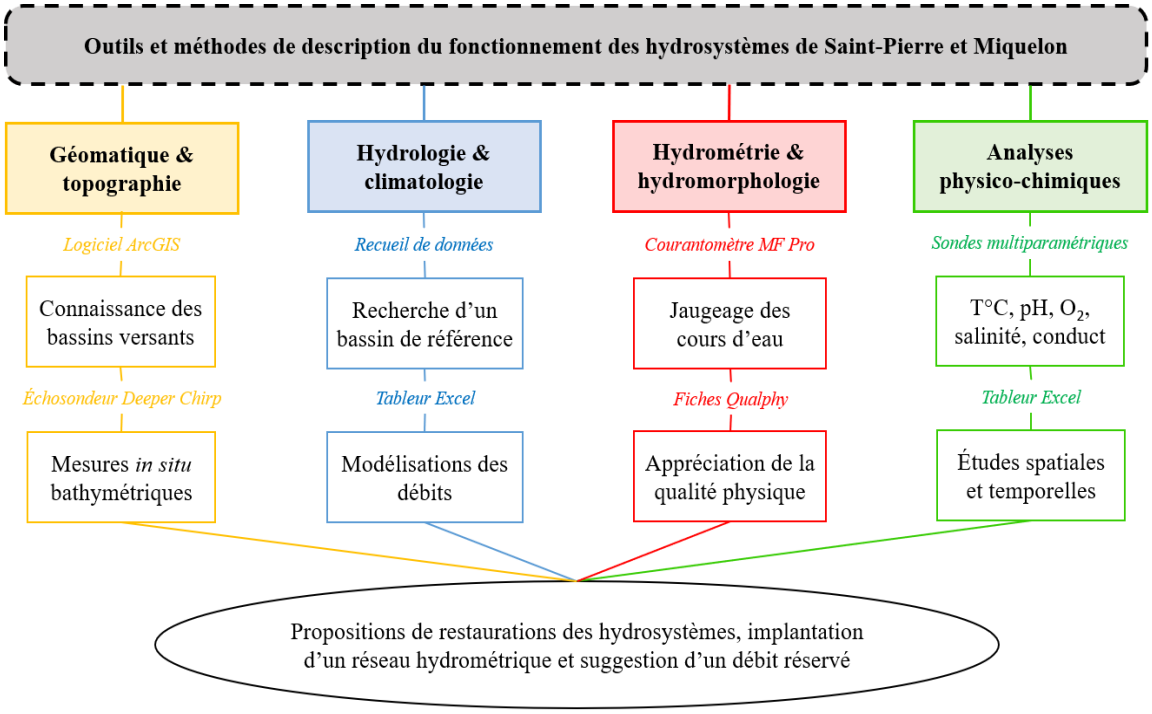


Figure 5. Outils et méthodes d'analyses pour caractériser le fonctionnement des hydrosystèmes de l'archipel de SPM.

Le secteur sud (Saint-Pierre et Langlade) comporte 15 cours d'eau et 51 plans d'eau. La durée sur le terrain (2 mois) ne permettant pas un travail sur l'ensemble du territoire, il a été fait le choix d'étudier deux cours d'eau et deux plans d'eau du fait de leur importance spatiale (la Belle Rivière ; annexe 5), de leur productivité biologique (le ruisseau Savoyard, l'étang Savoyard et la Maquine ; annexe 6, 7 et 8), et sur la base d'échanges avec les agents de la FTPSPM.

La première partie du stage fut consacrée à l'élaboration de pistes de recherche puis à des propositions d'achats de matériels. Dans un second temps, une étude de terrain a été organisée (annexe 9), du 22 mai au 31 juillet 2021, en collaboration avec Edgard Gustave (étudiant en Licence Professionnelle Aquaculture Continentale et Aquariologie, également impliqué dans le projet OMBLESPM).

II.1. Volet géomatique et topographie

II.1.1. Cartographie de l'archipel et des bassins

Une meilleure connaissance des hydrosystèmes implique en premier lieu une exploration cartographique des bassins versants. Cette étude a nécessité le téléchargement d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT), de type RGE Alti avec une résolution spatiale de cinq mètres, via le portail cartographique local (https://www.geospm.com). Ces données rasters, provenant d'un travail collaboratif entre la Direction des Territoires, de l'Alimentation et de la Mer (DTAM) de SPM, ainsi que de l'Institut National de l'Information Géographique (IGN), fournissent des valeurs d'altitude essentielles à la production de cartes. Les réseaux hydrographiques, les zones arborées et le bâti de l'archipel ont, quant à eux, été téléchargés en libre accès et au format vectoriel depuis la BDTOPO (description 3D des éléments du territoire français) du site https://geoservices.ign.fr.

Les données ont été intégrées dans le logiciel ArcGIS, en respectant le système de coordonnées géographiques régionales ; WGS 1984 / UTM Zone 21, EPSG : 32 621. Les fonctions avancées du logiciel ont contribué à la production de cartes topographiques et hydrographiques, mettant en évidence les bassins des ruisseaux et étangs sélectionnés sur les îles de Langlade (Figure 6) et de Saint-Pierre (Annexe 10). Les rivières sont classées selon leur persistance (intermittentes ou permanentes) afin de repérer les zones d'habitats stables dont dispose l'omble de fontaine.

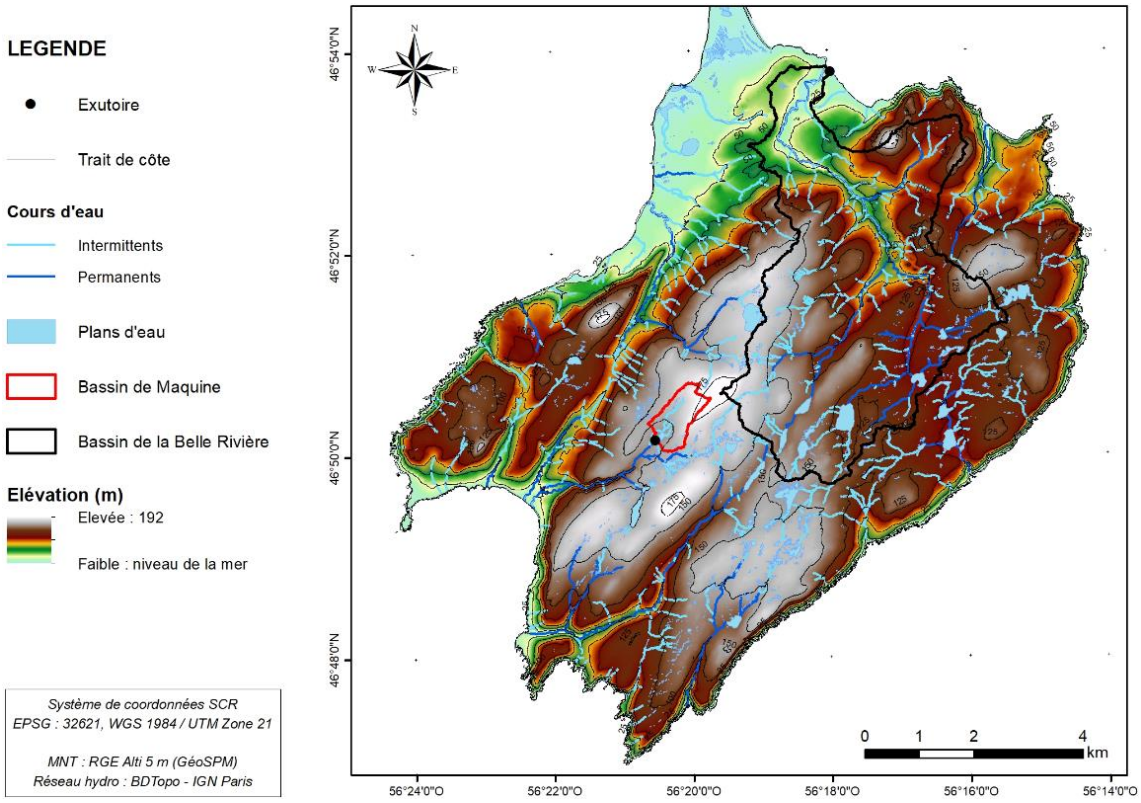


Figure 6. Carte topographique et hydrographique de l'île de Langlade, incluant les bassins versants de l'étang de la Maquine (contour rouge) et du ruisseau de la Belle Rivière (contour noir).

II.1.2. Bathymétrie des plans d'eau

Le fonctionnement d'un échosondeur est fondé sur l'estimation de la hauteur d'eau à partir de l'impulsion d'une onde acoustique ultrasonore (principe d'écholocation). La perturbation se propage dans le milieu jusqu'à atteindre une surface de réflexion ; obstacles ou fond marin/lacustre. Le signal se répand alors dans toutes les directions selon un angle contraint par la topographie. L'échosondeur ne capte pas la totalité du signal ; seule l'onde spéculaire (empruntant le même chemin que l'onde incidente) est réceptionnée. L'appareil calcule ensuite la durée du trajet aller-retour, ceci en admettant une vitesse constante de l'onde dans le milieu de propagation. La visualisation des données acquises se fait à partir d'un sonogramme (Annexe 11), rendant ainsi possible la détermination du niveau bathymétrique.

Dans le domaine de la prospection sismique, un signal parfait serait caractérisé par l'émission d'une onde qui comprendrait toutes les gammes de fréquences, permettant à la fois de définir le relief et de sonder le substratum. La technologie du Deeper Chirp + (Annexe 12) tente justement de s'en approcher en employant une méthode qui consiste à faire varier la fréquence du signal au cours du temps. L'appareil envoie un flux continu de fréquences : basse (100 kHz), moyenne (240 kHz), et haute (675 kHz), pour une lecture plus claire des très petits fonds (de 30 cm à 100 m de profondeur) que les sondeurs traditionnels. Une fréquence élevée induit un faible indice de pénétration dans le sédiment, mais garantit une haute résolution de l'imagerie. En plus d'être portatif, sans fil et peu encombrant, cet outil est très abordable sur le marché. Il s'avère idéal pour la cartographie des petites étendues d'eau, car pouvant opérer en mode tracté (derrière un bateau) ou projeté (à la canne à pêche).

Les étangs de la Maquine (Langlade) et de Savoyard (Saint-Pierre) ont fait l'objet d'une étude bathymétrique dans le but d'évaluer les lieux de vie des ombles de fontaine lacustres. Une appréciation de la profondeur (axe z) en plusieurs points d'un plan d'eau doit être couplée à des données de géolocalisation, obtenues à partir d'un GPS (axes x et y). Les relevés 3D sont ensuite intégrés dans le logiciel SIG afin de modéliser la morphologie de l'étang. Plus les levés bathymétriques seront nombreux, et plus le MNT sera précis et proche de la réalité.

Un test a été appliqué au Grand Etang de Miquelon. Le jeu de données bathymétriques, réalisé au cours des années 2016 à 2018, est issu du recueil du Cerema et de la DTAM 975. Les relevés ont été déterminés à partir du niveau altimétrique de référence : le zéro de Nivellement Général de la France (0 NGF). La production du MNT (Annexe 13) à partir des informations téléchargées a permis de quantifier le volume d'eau de l'étang, puis de l'estimer à 5,52 Mm^3, estimation cohérente avec une étude de l'Ifremer (5,23 Mm^3 ; Le Moine *et al*., 2016). Ce résultat permet, dans ce cas, de valider la démarche considérée, en vue de la modélisation des plans d'eau à étudier.

II.2. Volet hydrologie et climatologie

Dans l'état actuel de nos connaissances, aucune campagne scientifique n'a effectué un suivi hydrométrique des réseaux hydrographiques de l'archipel de SPM. Les cours d'eau ne comportant pas de station de mesures, le régime hydrologique des ruisseaux de Savoyard et de la Belle Rivière est encore inconnu. Cela nous amène à aborder la question suivante : Par quel(s) moyen(s) pouvons-nous obtenir des valeurs de débits pour des cours d'eau non-jaugés ?

II.2.1. Simulation par homothétie des volumes

Une première approche consiste à recueillir des valeurs de débits d'un bassin voisin et à les affecter au cours d'eau étudié au prorata des surfaces. Pour ce faire, les bassins doivent répondre à des critères de similitude physique. On parle de simulation des débits par homothétie des volumes.

Un repérage des stations météorologiques et hydrologiques a été réalisé à proximité de l'archipel. La péninsule de Burin (Terre Neuve) est l'unique territoire situé à moins de 25 km des côtes de SPM. D'après le site officiel https://eau.ec.gc.ca, trois stations hydrométriques (Figure 7) étaient en service durant la période 1980-2019 ; Lamaline (Salmonier River), Garnish (Garnish River) et Boat Harbour (Rattel Brook). Les tailles respectives de ces bassins sont 115, 205 et 43 km^2. Trois stations météorologiques furent identifiées dans la région ; Fortune, Grand Bank et Saint Lawrence. Les données mensuelles de précipitations et températures ont été recueillies via le site https://meteo.gc.ca.

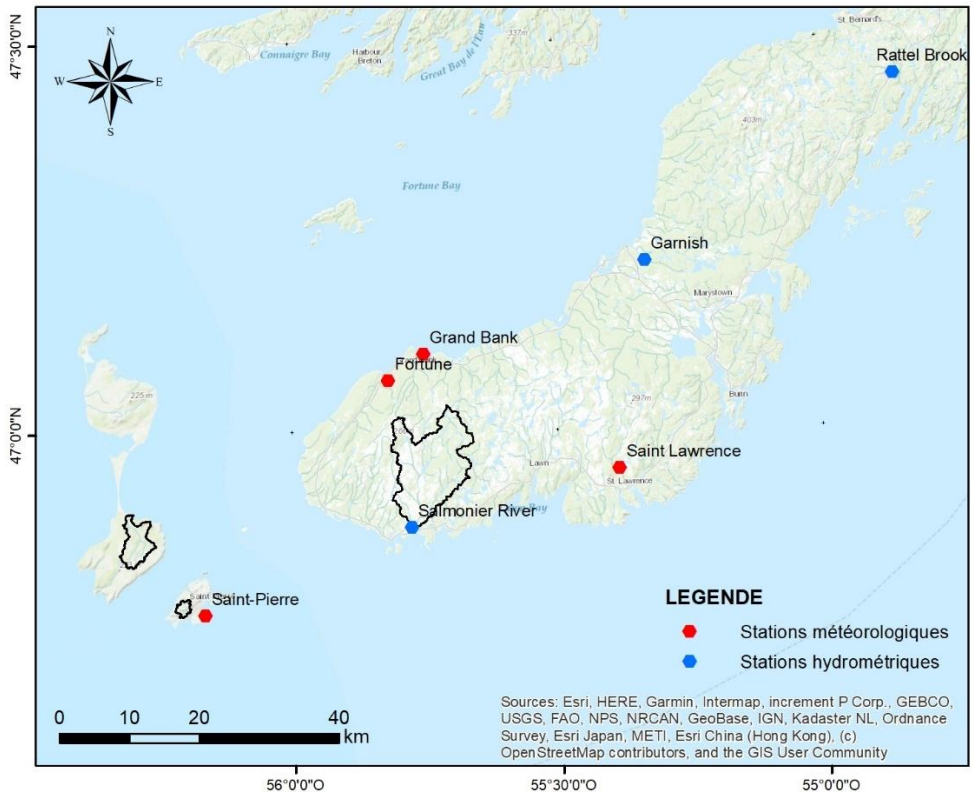


Figure 7. Localisation des stations hydrométriques, météorologiques et des bassins étudiés de la région SPM - péninsule de Burin.

L'étude des températures moyennes annuelles, entre les stations de Terre Neuve et SPM (obtenues via le site https://meteofrance.com), révèle une tendance commune ainsi qu'une quasi-superposition des courbes (Annexe 14). Il en va de même pour les données de précipitations annuelles (Annexe 15). Ces résultats démontrent la présence d'un climat régional commun à l'archipel et la péninsule.

L'analyse des débits des trois rivières terre-neuviennes a permis de comparer graphiquement leur régime hydrologique, moyenné sur 40 ans (1980-2019), en considérant les stations comme exutoires des bassins. Les courbes sont proportionnellement identiques (Annexes 16), caractérisant un régime régional. Le choix du bassin de référence se porte donc sur la rivière Salmonier, sur la base des critères climatiques et hydrologiques. De taille réduite par rapport au bassin de Garnish, il se trouve également plus proche de l'archipel et des stations météorologiques – ce qui assure la rigueur des simulations.

Terre Neuve n'apparaissant pas dans la cartothèque BDTopo, le bassin de Salmonier est tracé à partir d'un MNT SRTM à 30 m, téléchargé librement via le site de la Nasa (https://dwtkns.com/srtm30m/).

Le principe d'un calage de débits, d'un bassin à un autre, exige une correspondance entre les différentes caractéristiques physiques du milieu. Une étude des principaux facteurs discriminants a donc eu une influence sur le choix du bassin versant à estimer, par rapport au bassin de référence.

La péninsule de Burin et SPM s'inscrivent dans un contexte géologique régional. La lithologie correspond parfaitement entre les bassins de « Salmonier River » et l'île de Saint-Pierre ; rhyolites, tufs, ignimbrites et pyroclastites (Cerema, 2020). En revanche, les sols de Langlade sont composés de roches sédimentaires du Cambrien (Annexe 17), et donc jugés inaptes à la simulation des débits.

La comparaison de l'occupation des sols se base sur trois principaux paramètres ; la surface des plans d'eau, les zones arborées et le bâti. Comme expliqué précédemment, les données de SPM proviennent de la BDTOPO du géoservice IGN. Canada.ca propose également une banque de données libres, comprenant les plans d'eau et les cours d'eau du Réseau Hydrographique National – Série GéoBase. Toutefois, la couche vectorielle de la végétation canadienne fut plus importante que prévu (Annexe 18). Par conséquent, les surfaces arborées ont été numérisées manuellement à partir de la visualisation des orthophotos disponibles parmi les fonds de cartes d'ArcGIS (Annexe 19). Deux analyses ont été menées afin d'assurer la qualité de l'étude ; une analyse cartographique (Annexes 20 à 22) et une analyse quantitative (Figure 8). Ces comparaisons révèlent une forte ressemblance entre l'occupation du sol du bassin de la rivière Salmonier et de celui du ruisseau Savoyard.

Enfin, d'autres descripteurs secondaires (densité de drainage, indice de compacité, pente… ; annexe 23) apportent également des résultats satisfaisants. Le choix du bassin à estimer se porte donc sur le ruisseau Savoyard, sur la base des critères géologiques, géographiques et d'occupation des sols.

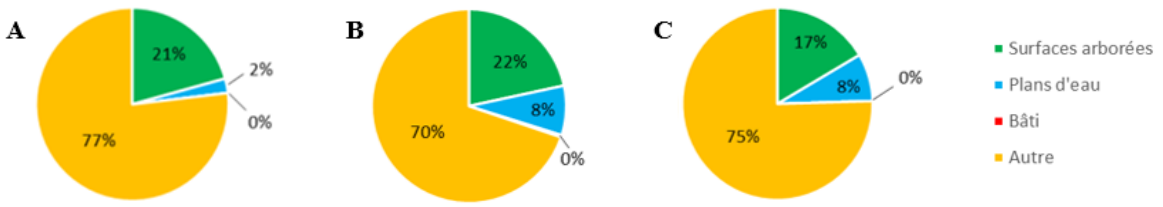


Figure 8. Etude quantitative (en %) de l'occupation des sols, au sein des bassins de ; A) la Belle Rivière, B) le ruisseau Savoyard, et C) la rivière Salmonier. La catégorie « Autre » désigne les espaces tourbeux, la végétation herbacée, ou encore les roches affleurantes.

II.2.2. Simulations par bilan hydrologique et régionalisation

Outre le calcul par homothétie des volumes, il existe d'autres manières d'estimer un débit annuel. Cela passe par la résolution d'un bilan hydrologique ou par une méthode de régionalisation.

Á l'échelle annuelle, la variation de réserve en eau d'un bassin versant peut être considérée comme négligeable. En effet, les nappes se rechargent généralement en hiver et se vidangent l'été. L'équation du bilan hydrologique (éq.2) repose sur la conservation des masses d'eau au sein d'un bassin. Les seules variables sont la pluie (P), l'écoulement (Q), l'évapotranspiration réelle (ETR) et les échanges entre bassins. On partira de l'hypothèse que ces échanges sont nuls en raison du contexte géologique.

L'ETR est la somme des quantités de vapeur d'eau évaporées par le sol et les plantes, pour un climat défini et un couvert végétal ayant atteint un stade de développement spécifique (Thornthwaite & Mather, 1955). L'ETR est calculée à partir de la formule annuelle de Turc ou de l'évapotranspiration potentielle (ETP). Les valeurs d'ETP sont, ici, obtenues en suivant trois méthodes ; Penman (fournies par Météo France), Oudin (évaluées selon des températures journalières ; Oudin *et al.*, 2005) et Thornthwaite (estimées à partir des températures mensuelles ; https://www.geograchid.com). L'ETP caractérise la quantité maximale d'eau susceptible d'être perdue en phase vapeur, sous un climat donné, par un couvert végétal continu spécifié (gazon) bien alimenté en eau et pour un végétal sain en pleine croissance. C'est, plus concisément, le pouvoir évaporant de l'atmosphère.

Benyahya *et al.* (2009) ont étudié les écoulements de 175 rivières de l'Est du Canada dans le but d'associer le débit annuel à des variables physiographiques et météorologiques. Ce modèle régional en fonction puissance (éq.3 ; tableau 2) évalue les débits de différents bassins d'une même région, de manière simple et rapide (*e.g.*, Ouarda *et al.*, 1999). Les coefficients « a » et « b », estimés par régression linéaire, sont dépendants du secteur d'étude (ici, la province Terre-Neuve et Labrador).

Tableau 2. Equations de débits utiles à l'étude. Les équations 1 et 3 dépendent de la superficie du bassin versant (SBV).

Homothétie des volumes	Bilan hydrologique	Méthode de régionalisation
$Q = \frac{Q_{réf} \times SBV}{SBV_{réf}}$ (*éq.1*),	$Q = P - ETR$ (*éq.2*),	$Q = a \times SBV^b$ (*éq.3*).

II.3. Volet hydrométrie et hydromorphologie

II.3.1. Jaugeage au sein des ruisseaux

En hydrométrie, les instruments de jaugeage permettent d'obtenir des valeurs de débits dans les cours d'eau. Cette application passe par l'exploration du champ des vitesses en différents points d'une section mouillée. La méthode nécessite de mesurer, séparément et à chaque point, les trois composantes de l'espace ; la profondeur moyenne, la largeur superficielle et la vitesse du courant. Pour ce faire, des stations (ou verticales) sont espacées de manière égale le long d'un profil transversal à la rivière. L'utilisateur choisit de placer un ou plusieurs points de mesures par station, selon la hauteur d'eau. Leur position est alors déterminée automatiquement par l'appareil à l'aide d'un capteur de pression. Le suivi d'un tel quadrillage de section indique directement la valeur du débit total.

Grâce à l'aide gracieuse du LIST (et à J. F. Iflly), nous avons pu disposer d'un « MF Pro » ; un courantomètre à induction magnétique mesurant automatiquement le courant des rivières (Annexe 24). Lorsque le capteur est actif dans l'eau, un champ magnétique se forme autour et crée une tension proportionnelle à la vitesse d'écoulement. L'amplitude de la tension délivrée renseigne sur l'intensité du débit d'eau. Le signal est alors détecté par les électrodes du capteur et est transmis au moniteur.

Les campagnes de prospection des débits font l'objet d'une double étude au niveau des ruisseaux de Savoyard et de la Belle Rivière. La première approche correspond à une analyse de l'évolution temporelle des débits. Elle nécessite un suivi continu des valeurs. Les mesures de jaugeage se font à l'exutoire du bassin et à l'échelle journalière.

En système d'eau souterrain peu profond, l'eau répond rapidement à la recharge et à la décharge de la nappe. Elle représente une large part du débit de base du cours d'eau, et est régulée par divers réservoirs naturels. Une approche spatialisée conduit alors à une déglobalisation de la connaissance hydrologique du linéaire, sans que le régime soit directement influencé par les pluies.

L'objectif de la seconde étude consiste en la prospection des ressources en eau, d'amont en aval, en période de tarissement (après une période d'au moins 2 jours sans pluie). Le limnigramme de la rivière Salmonier (site de Lamaline) fournit des données qui seront prises en référence pour déterminer les périodes de tarissement. Des mesures ponctuelles de débits sont effectuées à différentes sections du linéaire. Cette analyse s'applique en suivant le découpage généré par la méthode Qualphy (Figure 9 & Annexe 25). Ces sondages sont notamment réalisés au niveau de différentes formations géologiques afin de produire des profils hydrologiques et ainsi établir une relation entre l'hydrologie et la lithologie. Une telle campagne, d'autant plus importante au vu de la diversité géologique du milieu, permet de localiser les ressources d'eau souterraines au sein d'un même bassin versant.

II.3.2. Appréciation de la qualité physique des cours d'eau

Depuis 2010, l'agence de l'eau en France métropolitaine a élaboré une méthode permettant d'évaluer la qualité physique des cours d'eau, résultant de l'interaction entre des facteurs morphologiques, hydrologiques et hydrauliques.

L'outil Qualphy est une méthode informatique permettant, au moyen de feuilles de calculs numériques, de caractériser et de quantifier le niveau de dégradation d'un milieu physique à partir d'observations de terrain. Le niveau de qualité est jaugé par rapport à l'état de référence naturel du cours d'eau. Ce diagnostic nécessite, dans un premier temps, une prise en compte des différents paramètres qui influencent le cours d'eau (écorégion, typologie de la rivière, contexte physique et anthropique) afin de diviser le linéaire en tronçons homogènes (Tableau 3 & Annexe 26).

Tableau 3. Découpage du ruisseau Savoyard en tronçons homogènes à partir de la méthode Qualphy. La distance totale du linéaire est comptée à partir de la source. La typologie est spécifiée à l'aide de la fiche descriptive en Annexe 27.

Distance totale (m)	Typologie physique simplifiée	Eco-région	Perméabilité	Pente du cours d'eau (‰)	Confluences	Tronçons abiotiques	Occupation du sol	Découpage terrain	Longueur (m)
0	T6	Saint-Pierre	Rhyolites ignimbrites	36		S 1	Tourbe et herbes	S 1	550
550									
1060			Tufs et brêches pyroclastiques				Plan d'eau		510
1810	T1			100		S 2	Végétation arborée	S 2	750
2860	T2			25		S 3	Batis	S 3	1050
3110			Tufs et rhyolites			S 4		S 4	250
3760	T4		Tills glaciaires		Ruisseau du Goéland	S 5	Tourbes, herbes et lickens	S 5	650

L'appréciation d'une liste de quarante variables caractérisant le milieu (végétation, écoulement, encombrement, type de substrat, sinuosité, largeur…) doit ensuite être réalisée pour chaque tronçon. Ces derniers sont classés selon les trois grands compartiments qui composent la rivière et ses écosystèmes ; lit majeur, berges et lit mineur. La dernière étape du diagnostic Qualphy consiste à retranscrire dans le logiciel les paramètres évalués sur le terrain. Elle apporte ainsi une note (Annexe 28), allant de 0% (qualité nulle) à 100% (qualité maximale), par tronçon et par compartiment.

Ces fiches de calculs permettent également à l'utilisateur de générer une simulation en proposant des pistes stratégiques d'amélioration, de restauration et de gestion du milieu physique (Guyon *et al.*, 2003 ; Guyon & Moy, 2004) pour atteindre un meilleur état de fonctionnement du cycle hydrologique.

II.4. Volet physico-chimique

La qualité physico-chimique des masses d'eau est évaluée directement sur le terrain au moyen d'une sonde multiparamétrique portable. La sonde Hanna HI 98194 (Annexe 29), est ainsi pourvue de trois capteurs capables d'apprécier jusqu'à 11 paramètres parmi la température, le pH, l'oxygène dissous, l'électro-conductivité, la salinité, le potentiel rédox et le total des solides dissous (TDS).

Le potentiel d'oxydo-réduction, ou potentiel rédox, est une grandeur empirique exprimée en volt qui permet de déterminer la réactivité des espèces chimiques entre elles. La conductivité électrique, ou électro-conductivité, est un paramètre physique qui traduit la capacité d'une substance à laisser circuler un courant électrique. En sachant que le courant est transporté par les ions, la conductivité traduit en fait l'activité ionique d'une solution. Une augmentation de sa valeur est révélatrice d'une forte concentration d'ions (https://www.lenntech.fr). Elle est en lien avec les TDS, soit la somme des minéraux, sels, métaux et ions dissous dans l'eau (https://www.josmose.fr).

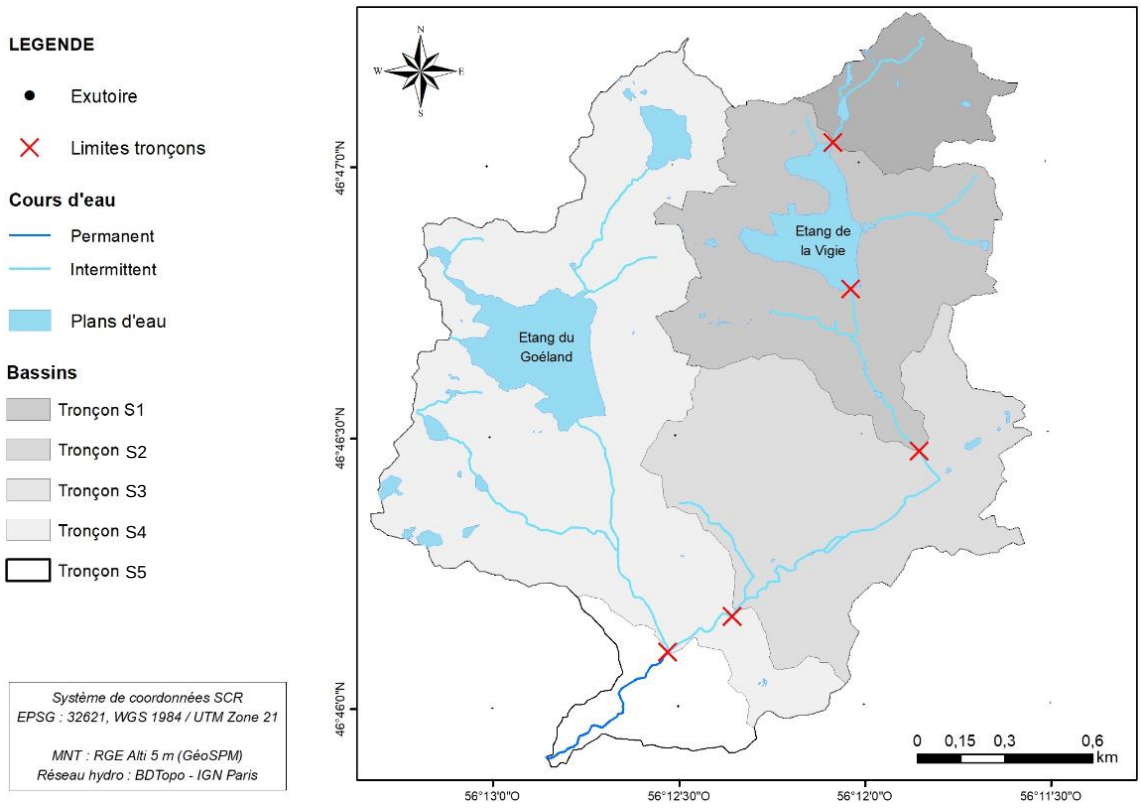


Figure 9. Carte des sous-bassins versants du ruisseau Savoyard définis à partir des tronçons étudiés.

De la même manière que pour l'hydrométrie, les points de mesures se font au début de chaque tronçon (Figure 9), caractérisant ainsi la chimie des sous-bassins versants du linéaire. Des données spatialisées et temporalisées de la qualité chimique des milieux seront fondamentales pour déterminer les zones à intérêt biologique ou devant faire l'objet d'un aménagement hydraulique avec prise d'eau – type ferme aquacole.

CHAPITRE III : Résultats

III.1. Volet hydrologie et climatologie

III.1.1. Modélisation par homothétie des volumes

Comme décrit *supra*, le bassin de la rivière Salmonier (bassin donneur) est le meilleur candidat régional pour servir de référence hydrologique, et ainsi établir une estimation des débits du ruisseau Savoyard (bassin receveur). Désormais, les deux bassins ne se différencient plus que par leur superficie (115 km^2 pour le bassin Salmonier, contre 3,6 km^2 pour celui du ruisseau Savoyard).

La figure 10 présente le régime hydrologique du bassin receveur, simulé par un calcul de prorata, sur la base des valeurs de débits relevées au niveau de la station de Lamaline (Annexe 30). Ces données s'étendent sur la période de 1980 à 2019, et sont moyennées à l'échelle d'une année civile.

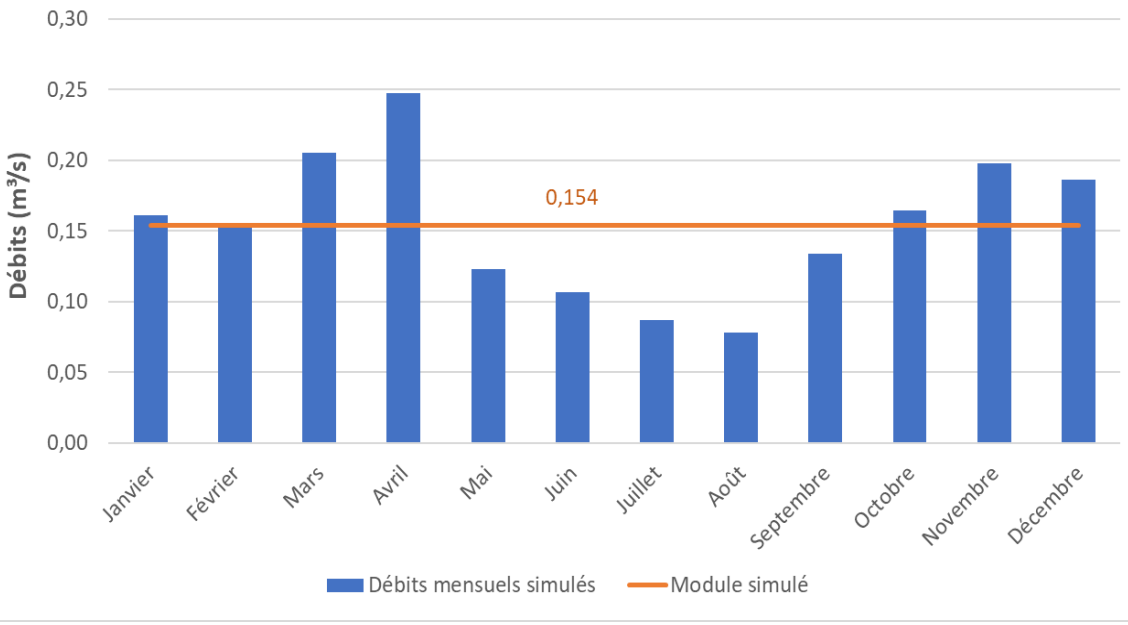


Figure 10. Régime hydrologique du ruisseau Savoyard (bassin : 3,6 km²) simulé par homothétie des volumes (base : rivière Salmonier).

L'analyse de la courbe de régime révèle une évolution des débits sur trois périodes : un épisode de basses eaux, et deux de hautes eaux. Les premiers mois de l'année (février à mai) sont marqués par des écoulements plus intenses, car au-dessus du module (débit hydrologique moyen interannuel : 0,154 $m^3.s^{-1}$). Les plus forts débits sont atteints au mois d'avril, avec des valeurs estimées à 0,25 $m^3.s^{-1}$. La seconde période (mai à septembre) se manifeste par une forte diminution des écoulements (0,13 $m^3.s^{-1}$) entre avril et mai. Les débits sont inférieurs au module interannuel, avec des valeurs moyennes estimées à 0,11 ± 0,03 $m^3.s^{-1}$, ce qui caractérise la période de basses eaux. La valeur d'étiage (0,08 $m^3.s^{-1}$) est atteinte au mois d'août. C'est à partir du mois de septembre, et jusqu'en février, que les valeurs sont supérieures au module, avec une valeur moyenne de 0,18 ± 0,02 $m^3.s^{-1}$.

III.1.2. Modélisation par bilan hydrologique et régionalisation

Au cours des trente dernières années, le pouvoir évaporant de l'atmosphère s'est élevé de 150 mm : de 579 ± 25 mm/an (1988-1994) à 736 ± 20 mm/an (2012-2019) (Figure 11). Les valeurs d'ETP estimées à Saint-Pierre suivent une tendance linéaire (coefficient de détermination R^2 de 77%).

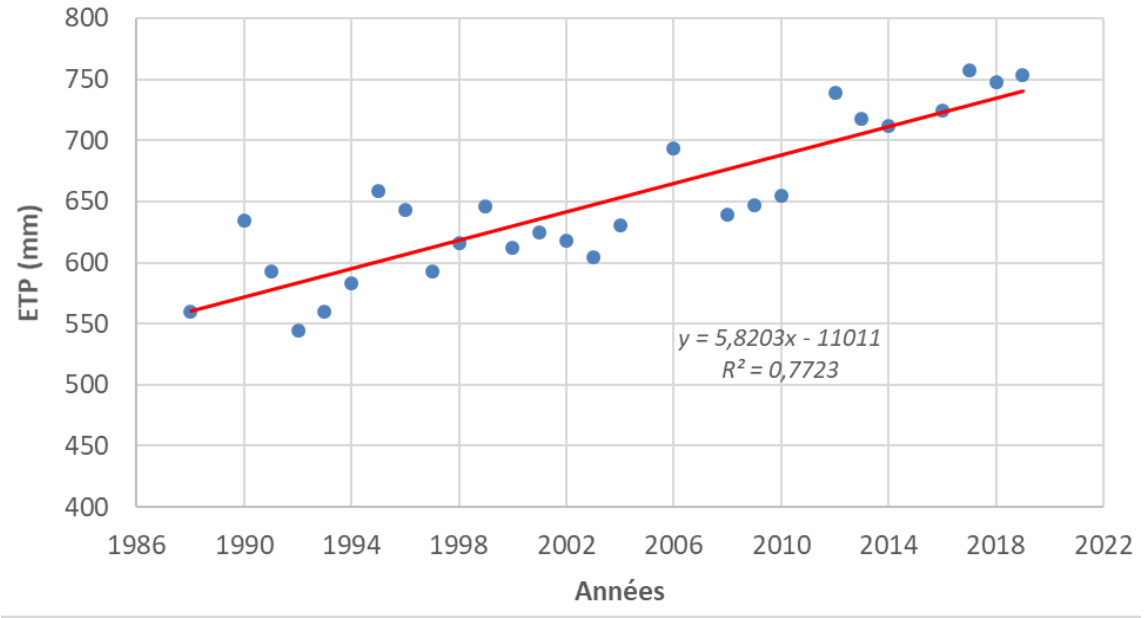


Figure 11. Evolution de l'évapotranspiration potentielle à Saint-Pierre (1988 à 2020 - ETP Penman). Source : Météo France.

L'ETP est déterminée selon trois méthodes de calculs : Oudin, Penman et Thornthwaite, moyennées sur 40 ans (Figure 12). De manière générale, les courbes sont proches entre elles et suivent toutes une tendance gaussienne. Les évapotranspirations potentielles maximales sont observées durant les mois d'été (juillet et août), tandis que les valeurs minimales sont atteintes aux mois de janvier et février.

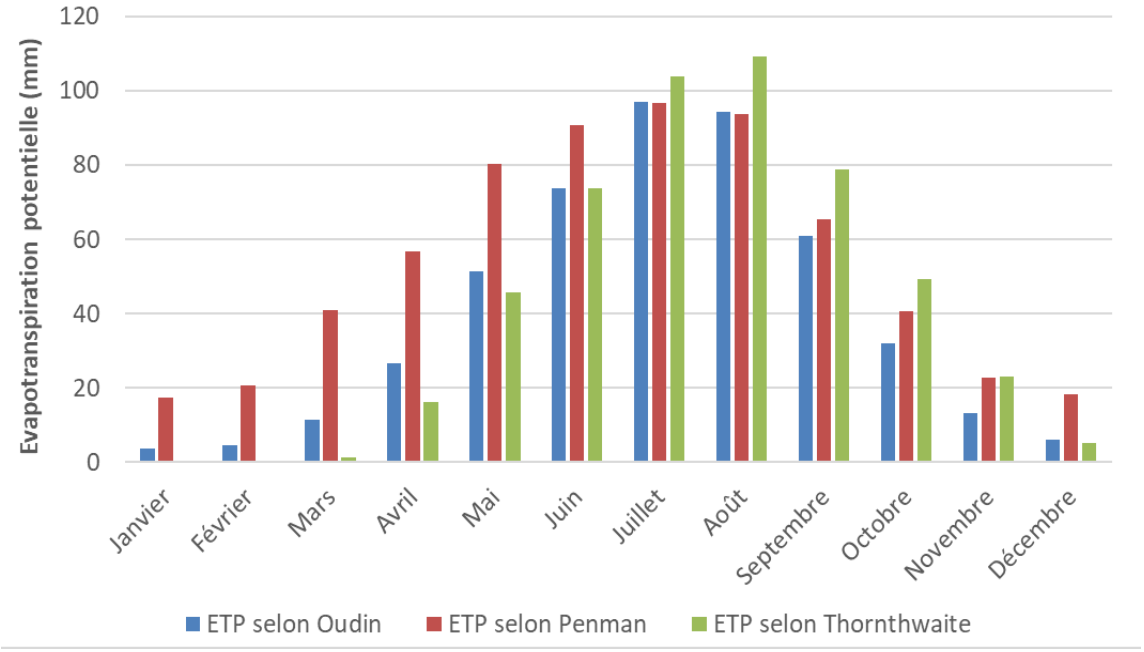


Figure 12. Comparaison ETP (1981-2020) Oudin (Oudin et al., 2005), Penman (Météo France), Thornthwaite (www.geograchid.com).

Le bilan hydrologique permet de calculer des débits à partir des ETP et des précipitations mensuelles (moyennées sur 40 ans ; figure 13). À SPM, les précipitations sont toujours supérieures aux ETP mensuelles. L'eau n'étant pas limitante, on considère alors que l'ETR est égale à l'ETP.

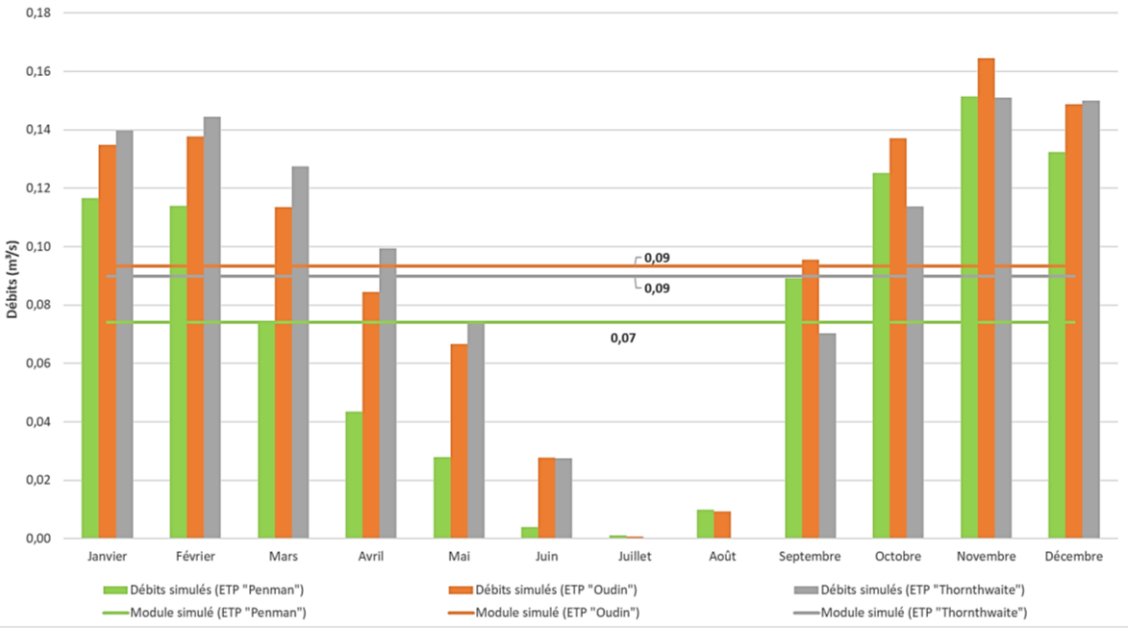


Figure 13. Régime hydrologique du ruisseau Savoyard simulé par bilan hydrologique sur la base des ETP "Penman", "Oudin" et "Thornthwaite". Source ETP : Penman (Météo France), Oudin (Oudin et al., 2005) et Thornthwaite (www.geograchid.com).

Selon le modèle développé par Oudin, l'ETP moyenne annuelle à Saint-Pierre est égale à 475 mm/an. Les débits sont de 0,14 ± 0,01 $m^3.s^{-1}$ sur la période d'octobre à février, avec un pic d'écoulement de 0,16 $m^3.s^{-1}$ au mois de novembre. Les valeurs diminuent progressivement jusqu'à atteindre, en juillet, un niveau d'étiage critique avec près de 0 $m^3.s^{-1}$ estimé à l'exutoire. La période estivale (juin à août) est ainsi marquée par des estimations de débits très basses : 0,01 ± 0,01 $m^3.s^{-1}$.

La méthode de Thornthwaite présente un cumul d'ETP annuel équivalent à celui de Oudin : 506 mm/an (Annexe 31). Il en résulte donc un module interannuel similaire : 0,09 $m^3.s^{-1}$. Les estimations présentent des débits importants de novembre à mars, menant à une moyenne de 0,14 ± 0,01 $m^3.s^{-1}$. Elles diminuent entre les mois de mars (0,13 $m^3.s^{-1}$) et août (0 $m^3.s^{-1}$), révélant un écoulement moyen en été de 0,01 ± 0,01 $m^3.s^{-1}$.

Le cumul annuel de l'ETP Penman est de 644 mm/an, soit 36 % de plus que les deux méthodes précédentes. Le bilan hydrologique révèle alors un module plus bas : 0,07 $m^3.s^{-1}$. L'estimation selon Penman présente des débits de 0,13 ± 0,02 $m^3.s^{-1}$ d'octobre à février, avec une valeur maximale en novembre (0,15 $m^3.s^{-1}$). La période estivale est soulignée par des débits quasi-nuls : environ 0 $m^3.s^{-1}$.

Enfin, la formule de Turc permet également, à partir du calcul de l'ETR (selon les données de précipitations et de températures annuelles), de résoudre un bilan hydrologique. L'ETR moyenne sur la période 1981-2020 étant égale à 426 mm/an, le module est estimé à 0,099 $m^3.s^{-1}$.

III.2. Volet hydrométrie et hydromorphologie

III.2.1. Analyses des débits ponctuels

III.2.1.a. Exutoire du ruisseau Savoyard

Les débits, directement mesurés à l'exutoire du ruisseau Savoyard, sont représentés en figure 14. Au total, onze jaugeages ont été réalisés du 15/06/2021 au 26/07/2021. Une moyenne de 20,4 $L.s^{-1}$ s'observe parmi des débits qui oscillent entre 10 et 34 $L.s^{-1}$.

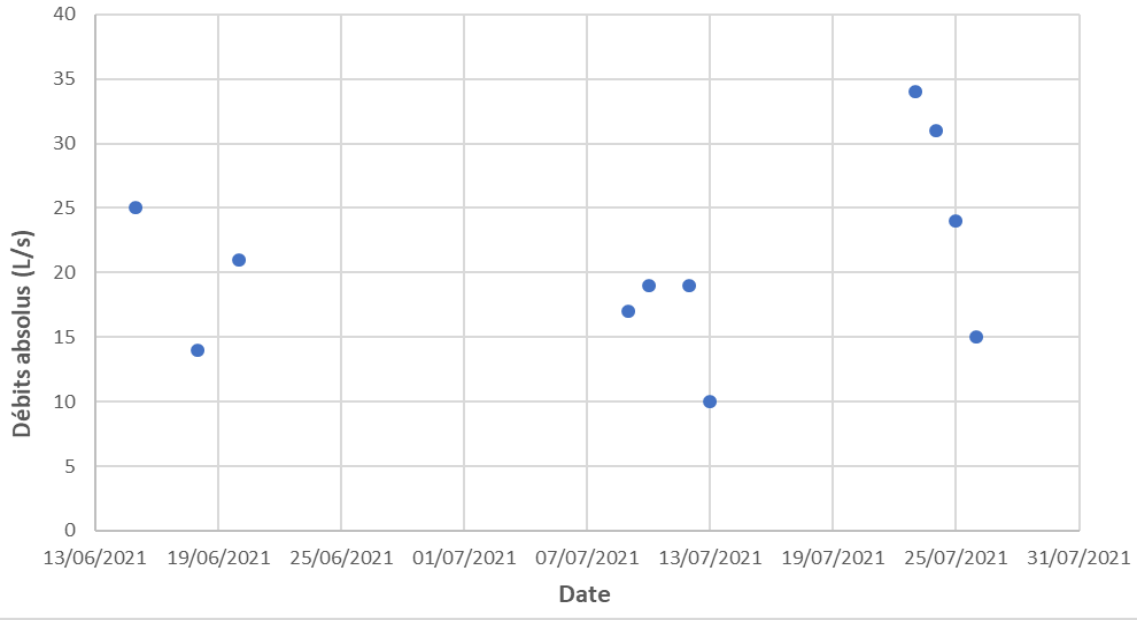


Figure 14. Mesures de débits à l'exutoire du ruisseau Savoyard (période du 15/06/2021 au 26/07/2021).

III.2.1.b. Profils en long hydrologiques

Les mesures récoltées sur chacun des linéaires (ruisseaux Savoyard et Belle Rivière) sont résumées en annexes 32 et 33, respectivement, et respectent les périodes de tarissement référencées à Lamaline (Annexe 34). Les débits sont exprimés en valeurs absolues ($L.s^{-1}$) et spécifiques ($L.s^{-1}.km^{-2}$) : calcul de rendement en fonction de la surface du bassin versant. L'approche spatialisée permet de créer des profils en long hydrologiques mettant en exergue l'évolution des débits sur le linéaire. D'un point de vue global, toutes les courbes suivent une tendance croissante, d'amont en aval.

Les débits absolus du ruisseau Savoyard sont faibles (8,2 ± 6,5 $L.s^{-1}$), malgré une augmentation significative, de la source à l'exutoire (Annexe 35). En revanche, les débits spécifiques reflètent une évolution irrégulière, typique d'un changement de milieu. En effet, les trois mesures amont (points situés à 550, 1810 et 2860 m de la source ; annexe 36) présentent une moyenne de 5,3 ± 1,0 $L.s^{-1}.km^{-2}$, contre 3,3 ± 0,6 $L.s^{-1}.km^{-2}$ pour les deux mesures aval (points à 3110 et 3760 m). Cette segmentation est moins visible pour les débits absolus.

À la Belle Rivière, l'évolution des débits se différencie en trois séquences. La zone amont (de 2200 à 4700 m) est caractérisée par des débits faibles : 9,7 ± 9,0 $L.s^{-1}$ (Figure 15) et 2,5 ± 1,2 $L.s^{-1}.km^{-2}$ (Figure 16). Une partie centrale se démarque nettement avec une hausse flagrante des débits absolus (facteur 4) et spécifiques (facteur 2), entre 4700 et 4833 m de la source. Elle présente ainsi les plus fortes moyennes en termes de valeurs absolues (74,5 ± 12,5 $L.s^{-1}$) et spécifiques (4,7 ± 0,5 $L.s^{-1}.km^{-2}$). Cette courbe décline à compter du point 692,55. Enfin, la région avale (de 7539 à 10200 m) est marquée par une diminution brutale des débits par un facteur 2, dès la première mesure. Toutefois, les valeurs se stabilisent au niveau des trois derniers points : 64,7 ± 4,0 $L.s^{-1}$ et 3,1 ± 0,2 $L.s^{-1}.km^{-2}$.

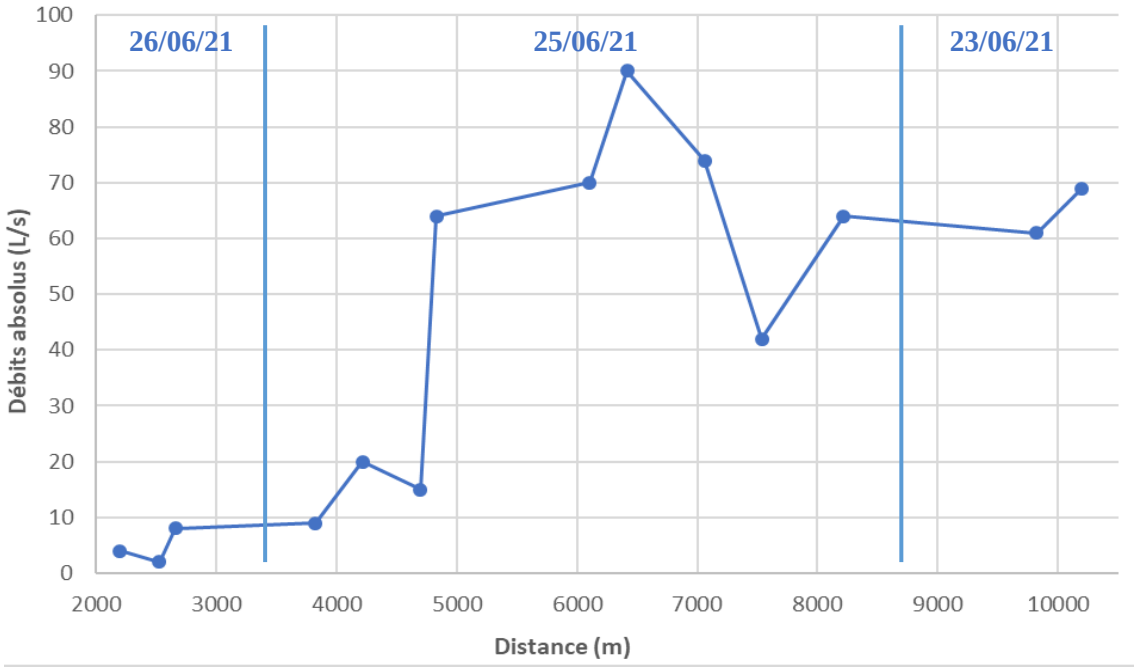


Figure 15. Profil hydrologique de la Belle Rivière. Débits mesurés (du 23/06 au 26/06/2021) en valeurs absolues (L/s).

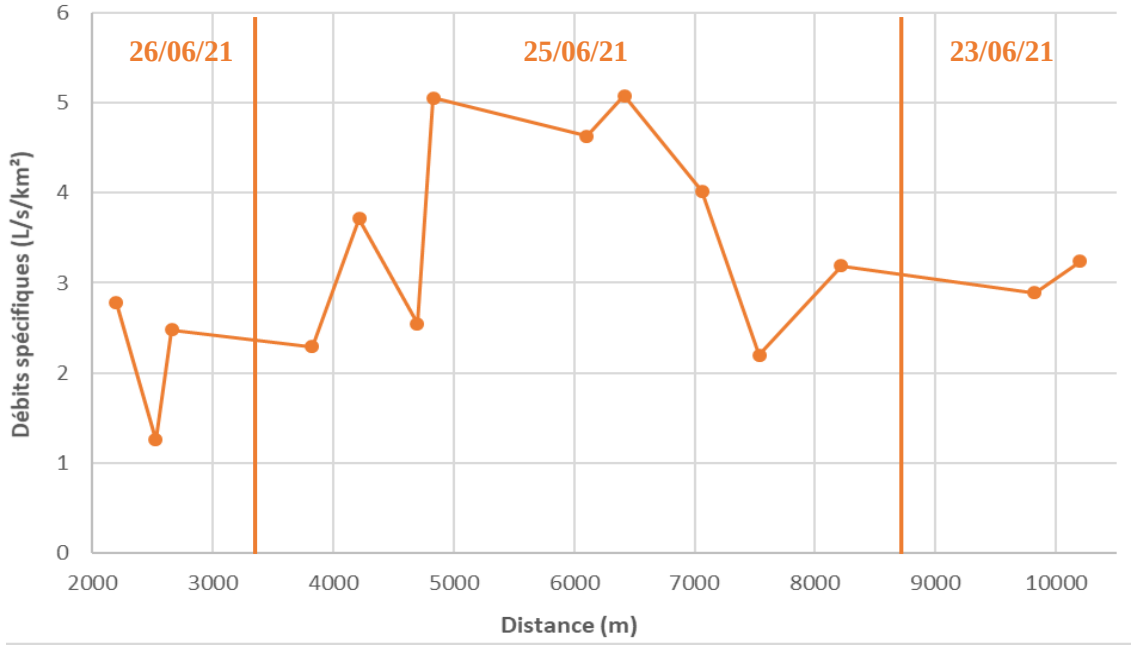


Figure 16. Profil hydrologique de la Belle Rivière. Débits mesurés (du 23/06 au 26/06/2021) en valeurs spécifiques ($L/s/km^2$).

III.2.2. Données de qualité physique des milieux aquatiques

III.2.2.a. Diagnostic Qualphy – La Belle Rivière

Le ruisseau de la Belle Rivière a été découpé en 16 tronçons, sur une distance de 10,2 km. Il présente un lit majeur occupé par des prairies et des forêts sur toute sa longueur. Seul un pont fait office d'axes de communication en travers du lit, proche de l'exutoire. La situation hydraulique est qualifiée de totalement naturelle (ancien lit, trous d'eau…), et la zone est naturellement inondable.

Les berges sont constituées de nombreux matériaux naturels : blocs rocheux, galets, graviers, terre, racines et végétation. Elles sont néanmoins souvent sapées et effondrées (Annexe 37). Certaines rives sont naturellement stables ; berges d'accumulation ou de roche mère. Des conifères, bouleaux et buissons constituent une ripisylve dense d'une à deux strates, tandis que la végétation herbacée (prairies) est majoritaire en amont. La ripisylve s'étend ainsi sur 80% du linéaire. Il n'est pas rare de trouver en amont des arbres perchés ou couchés dans le lit, au point de former des embâcles.

Le lit mineur possède un coefficient de sinuosité moyen de 1,6. Les débits sont souvent cassés par des seuils naturels générant des faciès d'écoulement variés à l'échelle de la dizaine de mètres. Certaines cascades semblent parfois infranchissables pour la faune aquatique, notamment à l'amont (10 m de haut ; Annexe 38). La profondeur et la largeur du lit sont variables en aval et constantes en amont, abaissant progressivement la qualité physique du cours d'eau (Figure 17). Le substrat est généralement composé de galets, graviers et blocs ; dépôts généralisés non-colmatants mis en place à la suite de crues (Annexe 39). La végétation aquatique est inexistante en aval, et dégradée à compter du tronçon BR6, due à la présence de quelques hélophytes et algues brunes. Il est important de noter l'absence de prolifération végétale, ce qui participe au bon état du ruisseau.

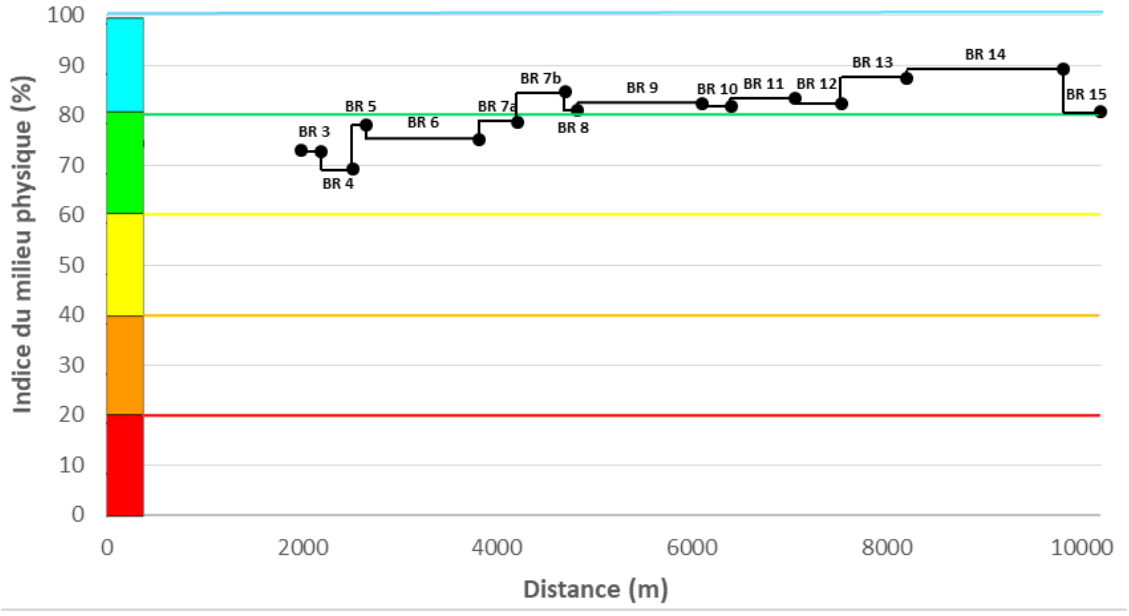


Figure 17. Évolution amont-aval de la qualité physique du ruisseau de la Belle Rivière (campagne du 23/06 au 26/06/2021).

Les tronçons BR1 et BR2 n'ont pas pu être étudiés en raison du manque d'accessibilité. D'après la modélisation Qualphy, 73% du linéaire observé (6 km) est jugé excellent à correct, et 27% (2,2 km) est « assez bon » (Annexe 40). L'indice global obtenu est de 80%, soit une valeur assez élevée pour considérer le milieu physique comme étant proche de son état de fonctionnement naturel.

Les résultats mettent en évidence une amélioration de la qualité au long du cours d'eau : les cinq tronçons amont disposant d'une note de 75 ± 4%, contre 84 ± 4% pour la partie aval. Cet effet est dû à l'évolution de l'état physique des trois unités qui composent le chenal (lit majeur, berges et lit mineur). Avec un indice de 94 ± 5% sur l'ensemble du cours d'eau (Annexe 41), le lit majeur est le compartiment le mieux noté, devant les berges (87 ± 8%) et le lit mineur (68 ± 11%). Ces résultats démontrent que la Belle Rivière est largement préservée des activités anthropiques.

III.2.2.b. Diagnostic Qualphy – Ruisseau Savoyard

Le ruisseau Savoyard a été découpé en cinq tronçons longs de 250 à 1050 m. Le tronçon S1 (à la source) présente un lit majeur occupé par des prairies et des forêts de résineux. Des axes de communications (routes) jouxtent le lit mineur sur la totalité du tronçon, réduisant ainsi la zone d'inondabilité. Les berges sont composées d'éléments naturels et sont soumises à l'érosion. La géométrie du chenal (profondeur, sinuosité, largeur) est régulière, et son substrat est dominé par un mélange de vases, blocs et galets. Quasiment en état d'assèchement, le cours d'eau est envahi par des hélophytes (Annexe 42), ce qui amplifie le niveau de dégradation du ruisseau.

Les tronçons S1 et S2 sont espacés par l'étang artificiel de la Vigie qui alimente la commune en eau potable. Le tronçon S2 est encaissé dans une vallée à forte pente, générant un écoulement torrentiel, occupée par des résineux et des bouleaux. La majorité du ruisseau est formée de berges stables et d'un substrat naturel épargné par la prolifération végétale. En revanche, une partie du tronçon est traversée par un pont, là où le chenal se trouve canalisé sur une dizaine de mètres (Annexe 43) – dont la terminaison est totalement dégradée (Annexe 44). Quelques arbres sont perchés au-dessus du lit mineur, parmi une ripisylve dense qui s'étend sur 80% du linéaire. De nombreux obstacles perturbent le débit : plusieurs embâcles, des seuils naturels infranchissables par les poissons et trois barrages.

Le tronçon S3 est la portion la plus anthropisée du ruisseau Savoyard, et également la moins bien notée (Figure 18). Le chenal traverse une zone d'habitations, conduit par des ouvrages hydrauliques (types buses et canaux) et coupé par neuf ponts. L'inondabilité est supprimée par une route sur remblai qui longe la totalité du tronçon. La majorité des berges composées de matériaux naturels sont instables, alors que d'autres sont stabilisées par de l'enrochement. La ripisylve (bouleaux sur 10% du linéaire) est perchée au-dessus du lit mineur et risque de provoquer des embâcles (Annexe 45). L'écoulement est varié, malgré une géométrie constante et une prolifération d'algues brunes.

Enfin, les tronçons S4 et S5 sont très similaires sur le plan de la qualité physique. Les lits majeurs sont occupés par des prairies (pâturages équins). Des ouvrages bétonnés sont construits en travers du chenal. L'inondabilité est réduite du fait de l'enrochement des berges et de remblais. Bien que la majorité des berges soit constituée de matériaux naturels (blocs, galets, graviers et terre), certaines d'entre elles présentent des remblais en bois afin de bloquer l'accès aux équidés. Pourtant, les rives sont bien souvent piétinées, sapées, effondrées. De plus, ces structures peuvent tomber dans le lit mineur sous l'action du vent et de la dynamique du ruisseau, obstruant, par là même, le flux du cours d'eau (Annexe 46). L'absence de ripisylve laisse place à de la végétation herbacée jusqu'à l'exutoire. Le lit mineur est caractérisé par des bas-fonds, des berges régulières et un régime d'écoulement varié. Son substrat est marqué par des dépôts généralisés non-colmatants et des algues brunes envahissantes.

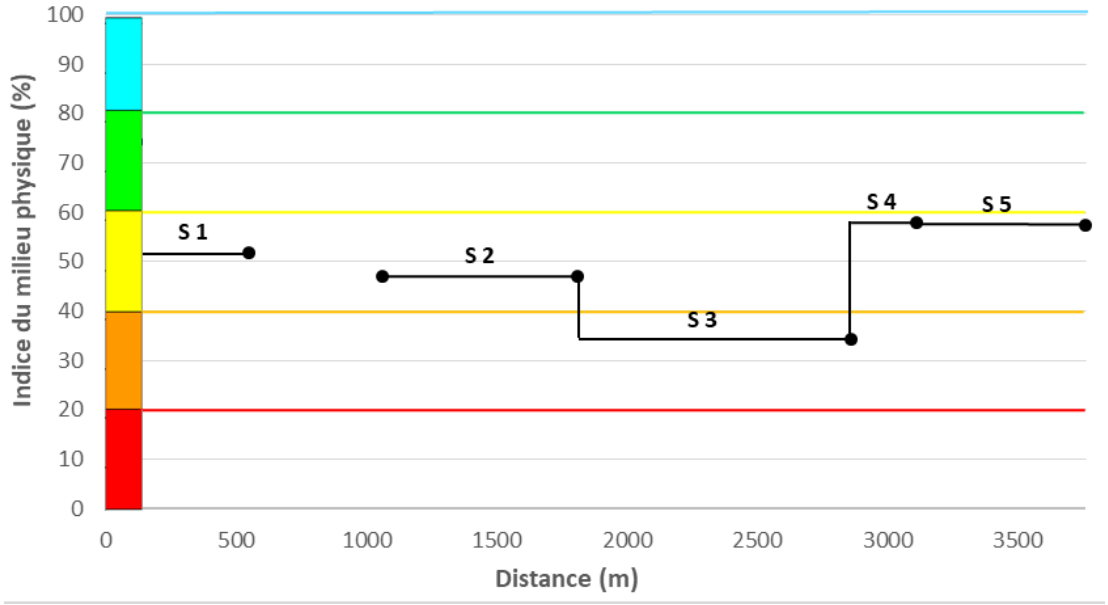


Figure 18. Évolution amont-aval de la qualité physique du ruisseau de Savoyard (campagne du 15/06/2021).

La modélisation Qualphy apporte une note globale de 50% sur les 3250 m de linéaire. Cette note décrit un milieu qui commence à s'écarter de son état de référence. Son fonctionnement est perturbé par les multiples aménagements hydrauliques et la diversité des habitats naturels s'en retrouve appauvrie. La majorité du ruisseau (68%) s'inscrit dans la catégorie « moyen à médiocre », tandis que 32% du secteur (1050 m) est jugé de mauvaise qualité (Annexe 47).

Le ruisseau Savoyard est marqué par un écart de note important entre son tronçon le plus urbanisé (29%), et le reste du linéaire (49 ± 2% en amont et 58,5 ± 0,5% en aval). La comparaison entre les trois compartiments démontre l'influence négative du lit mineur (40 ± 10%) sur l'indice global, notamment en amont (Annexe 48). Les berges et le lit majeur présentent, en revanche, des indices plus élevés ; 63 ± 8% et 53 ± 12%, respectivement. Le lit majeur est lourdement impacté par le secteur urbain, au tronçon S3, ce qui lui vaut un niveau de dégradation maximal. Ces résultats rendent compte d'une hétérogénéité entre tronçons et d'une emprise accrue de l'activité humaine.

III.3. Volet physico-chimique

III.3.1. Évolution temporelle à l'exutoire

Les paramètres physico-chimiques (température, taux de saturation en oxygène dissous, conductivité et pH) ont été collectés à l'exutoire du ruisseau Savoyard, du 15 juin au 26 juillet 2021, et sont représentés suivant une évolution journalière.

La figure 19 montre une très légère fluctuation de la température dans le temps, avec une moyenne de 17,1 ± 2,4°C. Il en va de même pour le taux de saturation en oxygène dissous et le pH, dont les valeurs se concentrent autour de valeurs moyennes : 84,0 ± 9,8% et 6,7 ± 0,3, respectivement. Les données de conductivité sont, en revanche, plus dispersées : 128,1 ± 23,5 µS/cm. Elles présentent, en effet, un écart type de 12,76 µS/cm, contre 1,48°C, 6,59% et 0,16, pour les paramètres précédents.

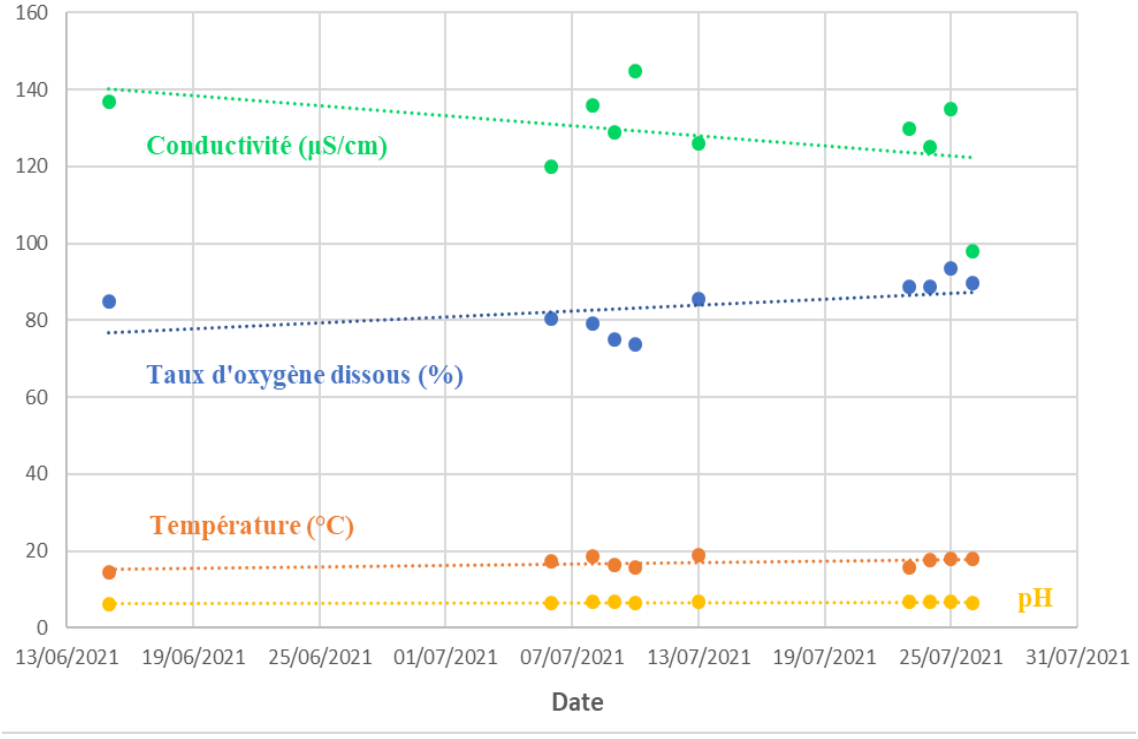


Figure 19. Évolution temporelle des paramètres physico-chimiques (température, taux de saturation en oxygène dissous, conductivité et pH) à l'exutoire du ruisseau Savoyard, du 15/06/2021 au 26/07/2021.

III.3.2. Profil en long physico-chimique

L'approche spatialisée des paramètres physico-chimiques, réalisée au cours du 09/07/2021 au niveau du ruisseau Savoyard, a conduit à l'élaboration de profils en long (les données chiffrées étant résumées en annexe 49). D'après les résultats, la température varie très peu de la source à l'exutoire (17,7 ± 1,7°C de moyenne ; annexe 50). On note toutefois une légère diminution de ce paramètre entre les points 468,09 à 827,13 (16,5 ± 0,3°C de moyenne).

Le profil de la conductivité démontre que le cours d'eau peut laisser plus facilement circuler un courant électrique proche de l'exutoire (131,7 ± 3,5 µS/cm de moyenne) qu'au niveau de la source (108,7 ± 8,0 µS/cm ; annexe 51). Les valeurs restent toutefois relativement stables, et se concentrent autour d'une moyenne de 120,2 ± 17,0 µS/cm, pour un écart type de 13,9.

L'évolution de la saturation en oxygène dissous révèle un taux faible à la source : 58% (Annexe 52). Elle atteste cependant d'une stagnation positive des valeurs sur le reste du linéaire : 80,7 ± 5,5%. L'acidité de l'eau est sans doute le descripteur le plus stable, avec une moyenne de 6,66 ± 0,31 (Annexe 53). Il existe néanmoins une sensible variation : le pH à la source est de 6,24, contre 6,79 ± 0,06, du point 468,09 à l'exutoire.

La campagne de mesure à la Belle Rivière s'est échelonnée sur trois jours (du 23 juin au 26 juin 2021). Les données de l'étude spatialisée sont résumées en annexe 54. La courbe de température met en avant une évolution discontinue, d'amont en aval (Annexe 55). En effet, malgré une moyenne de 20,7 ± 6,5°C, les températures oscillent entre 13,25°C et 26,26°C. Elles montrent une variation nette et dégressive entre les points situés à 6104 et 8215 m. À l'inverse, le pH est moins acide sur ces mêmes tronçons, avec une moyenne de 7,38, contre 6,94 pour le reste du linéaire (Annexe 56). Ces données chimiques sont très proches entre elles, à raison d'un écart type de 0,25.

Les mesures de conductivité décrivent une courbe en asymptote. La mesure à l'exutoire affiche un niveau relativement élevé (393 µS/cm) ; une valeur qui tend vers 70 µS/cm, à l'amont (Figure 20). Enfin, le taux de saturation en oxygène dissous varie peu et de manière discontinue, mais toujours selon des valeurs supérieures à 50% : 79,5 ± 17,5% en moyenne (Annexe 57).

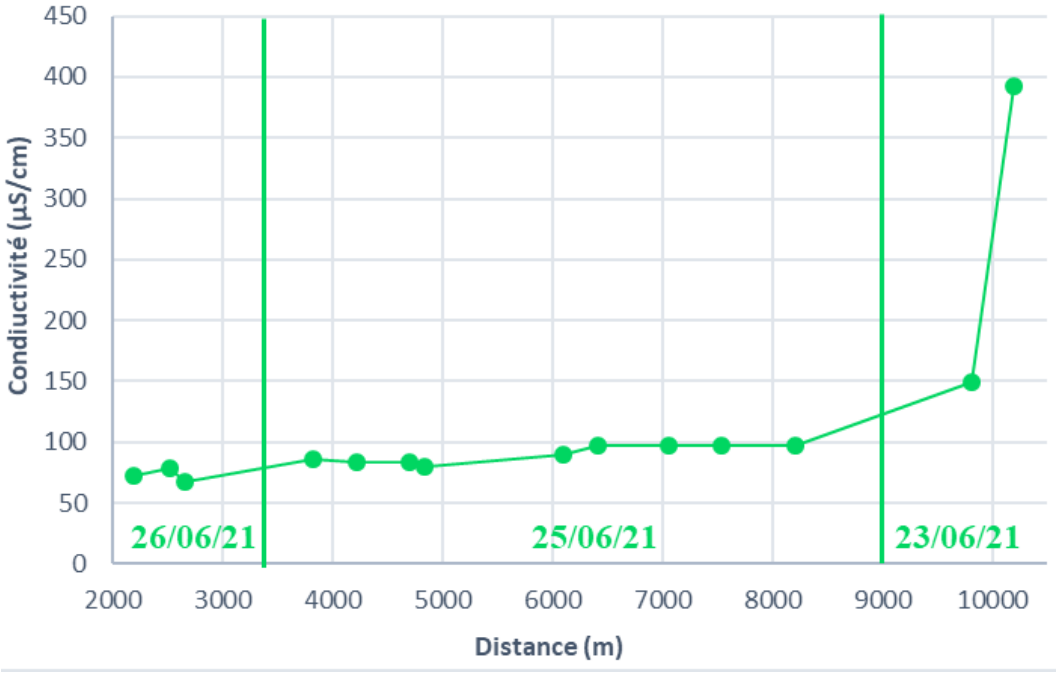


Figure 20. Profil des mesures de conductivité, réalisées le long de la Belle Rivière (campagne du 23/06/2021 au 26/06/2021).

III.4. Travaux et missions subsidiaires à SPM

III.4.1. Projet OMBLESPM

Le projet OMBLESPM est, avant tout, un programme mettant en relation plusieurs disciplines scientifiques. L'objectif premier est de valoriser l'espèce « parapluie » de l'archipel de SPM : l'omble de fontaine. C'est pourquoi, des prélèvements ont été réalisés avec Edgard Gustave, à des fins biologiques, sur les trois îles principales (Annexe 58). Parmi les sites d'échantillonnage figurent : l'étang de la Vigie, l'étang du Pain de sucre, les ruisseaux et étangs de Savoyard et de Frecker (Saint-Pierre), l'étang de la Maquine et le ruisseau de Debons (Langlade), ainsi que le ruisseau de la Mère Durand (Miquelon). Ce travail collaboratif a apporté une analyse détaillée de la quantité et de l'état physique des ombles récoltés : poids, taille (dans le but de fournir une estimation de la biomasse au sein des hydrosystèmes), taux de parasitisme et prélèvement de nageoire adipeuse (pour de futures analyses génétiques). Ces prélèvements ont été assurés selon différentes techniques de pêche ; au filet, à la canne et au martin pêcheur (méthode de pêche électrique).

La détérioration grandissante du barrage de la Vigie a nécessité l'intervention d'une série de pêches de sauvegarde dans l'étang amont. Enfin, l'aménagement d'une frayère artificielle dans l'étang du Cap Noir (Saint-Pierre), a été engagé sous la supervision des gardes de pêche.

Parallèlement, nous avons dû ; 1) gérer des ateliers dans des écoles primaires, 2) participer à des présentations « Grand Public », ou encore, 3) être interviewés par la radio locale : SPM 1ère .

III.4.2. Projet européen BEST

Dans le cadre de l'avancement du projet BEST, une recherche géographique globale a renseigné sur la distribution spatiale de l'ensemble des bassins versants topographiques de l'archipel : Langlade, Saint-Pierre et Miquelon (Figure 21, Annexe 59 & 60, respectivement). Ces bassins de premier ordre, tracés à partir du MNT 5 m, sont tous raccordés à la mer par un exutoire côtier.

La production des cartes géologiques des bassins étudiés apporte une meilleure connaissance environnementale. De même, la carte des pentes du bassin du ruisseau Savoyard démontre une nouvelle fois l'hétérogénéité du linéaire, d'un point de vue physique (Annexe 61), avec des pentes allant de 0 à 5° dans sa partie aval, tandis que la partie amont constitue un terrain plus accidenté à cause de nombreux seuils localisés et des pentes supérieures à 30°.

Le ruisseau de Debons étant l'un des secteurs d'étude d'Edgard Gustave, des relevés physico-chimiques et une analyse de la qualité physique du linéaire ont été réalisés afin d'être, plus tard, associés et comparés aux prélèvements biologiques.

Des travaux de géomatique (cartes géologiques, topographiques, hydrologiques, d'occupation des sols et de pentes), réalisés en collaboration avec Jean-François Secondé, ont également apporté une meilleure caractérisation de l'île de Miquelon, et plus particulièrement de quatre bassins versants : les plans d'eau de Mirande et de la Loutre, ainsi que les cours d'eau de Sylvain et de Terre Grasse. Ces deux derniers ruisseaux ont, par ailleurs, été étudiés dans le cadre d'une estimation des débits selon les quatre méthodes de calculs (*cf.* Chapitre II.2.2).

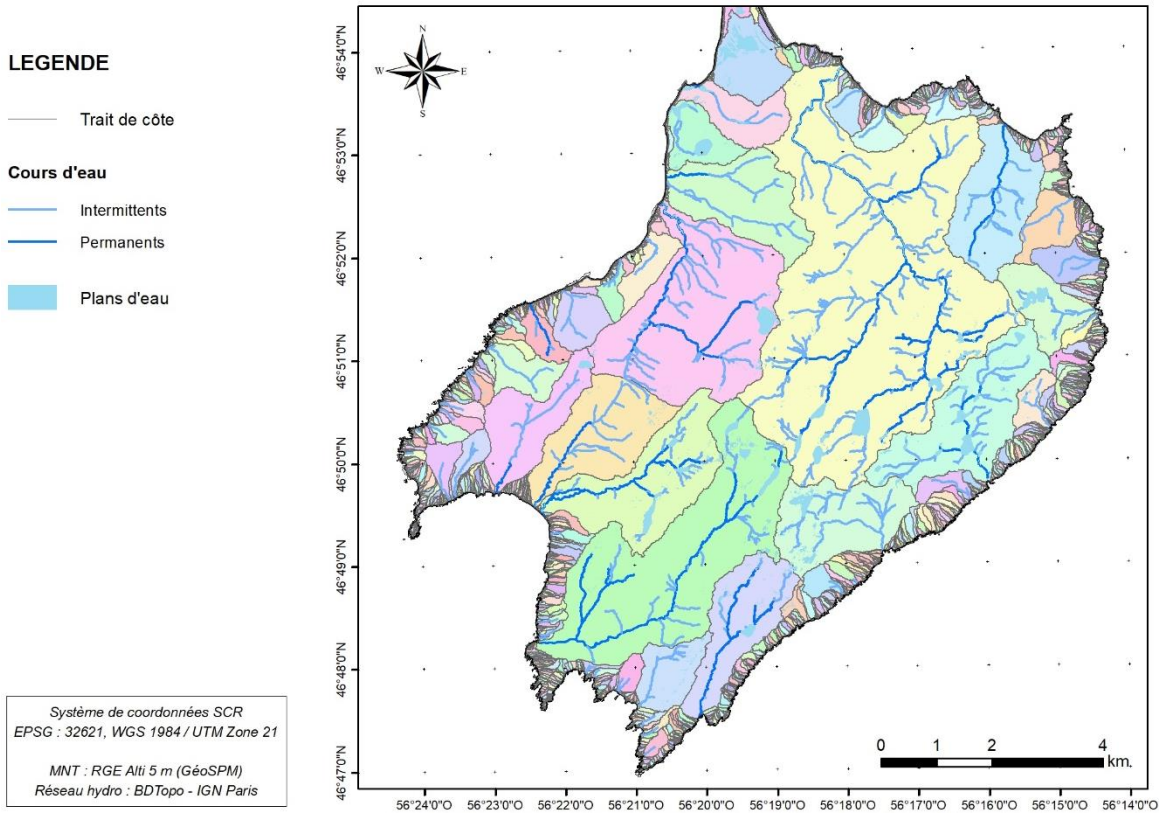


Figure 21. Distribution spatiale de l'ensemble des bassins versants topographiques raccordés à la mer, et des réseaux hydrographiques de Langlade.

D'autres travaux, encore inachevés, comptent également parmi les objectifs à long terme de ce projet européen. C'est le cas, par exemple, de la modélisation bathymétrique des étangs de Savoyard (Annexe 62) et de la Maquine. Ces travaux feront partie d'une étude de plus grande ampleur dont la finalité sera d'établir une cartographie de tous les plans d'eau de l'archipel. Les données seront couplées à des analyses physico-chimiques, effectuées à différents points de chaque étang, afin de définir des zones de transition entre les couches de la colonne d'eau (thermocline, chimiocline…). Une telle opération a, par ailleurs, d'ores et déjà débuté pour l'étang de la Maquine. Ces combinaisons cartographiques et physico-chimiques viendront, à l'avenir, compléter la connaissance actuelle des hydrosystèmes.

CHAPITRE IV : Discussion

IV.1. Estimation du régime hydrologique

Le régime hydrologique d'un cours d'eau est, en soit, une synthèse de ses capacités d'écoulement en fonction des variations saisonnières. Elles sont la conséquence de l'ensemble des facteurs physiques influençant l'écoulement : la pluviométrie, l'évapotranspiration, l'infiltration, la pente des sols… Chaque cours d'eau possède, de ce fait, un régime qui lui est propre, pouvant être interprété comme une empreinte caractéristique d'une région climatique et géologique. Or, d'après les résultats de cette étude, les modélisations concernant le ruisseau Savoyard ne coïncident pas entre-elles, et ce pour des raisons d'amplitudes des modules et de reliefs des courbes de régimes divergents.

Les modules estimés par les quatre équations de bilan hydrologique sont très proches, et proposent un module moyen de 86 ± 12 $L.s^{-1}$ (Tableau 4). Notons, par ailleurs, que la courbe de Thornthwaite se rapproche de celle de Oudin. Ces deux formules nécessitent, en effet, l'insertion des données de températures (mensuelles et journalières, respectivement) et de radiations solaires globales (variables en fonction de la latitude). Il n'est donc pas surprenant de constater une grande similitude entre les deux courbes d'ETP cumulées (Annexe 31), et par conséquent, entre les modélisations. Ces résultats se différencient nettement de ceux simulés par homothétie des volumes et du débit moyen annuel (QMA) – calculé à partir de la fonction de régionalisation de Benyahya *et al.* (2009) –, qui affichent un module moyen de 156 ± 2 $L.s^{-1}$.

Tableau 4. Récapitulatif des modules interannuels simulés, sur la période 1981-2020, par bilan hydrologique (ETP mensuelles selon Penman, Oudin, Thornthwaite et l'ETR annuelle selon Turc), par homothétie des volumes (sur la base du bassin versant topographique de la rivière Salmonier), et par la fonction puissance de régionalisation.

Modules simulés par :	**Valeurs ($m^3.s^{-1}$)**
Bilan hydrologique (ETP "Penman")	0,074
Bilan hydrologique (ETP "Oudin")	0,093
Bilan hydrologique (ETP "Thornthwaite")	0,090
Bilan hydrologique (ETR "Turc")	0,099
Homothétie des volumes	0,154
Fonction de régionalisation (Benyahya *et al.* 2009)	0,158

En ce qui concerne l'amplitude, les débits simulés par bilan hydrologique rendent compte d'un déficit de l'écoulement, de février à novembre, en raison d'un niveau d'évapotranspiration maximal lors de la période estivale (notamment en juillet). Or, le calcul de l'homothétie suggère une augmentation progressive des débits à partir du mois de février, jusqu'à un pic de l'écoulement au mois d'avril. La saison sèche est, quant à elle, moins prononcée qu'attendue, d'après cette méthode (Annexe 63).

Les variations des écoulements peuvent provenir de multiples facteurs climatiques, appréciables parmi les données de Météo France. La station météorologique de Saint-Pierre renseigne, entre autres, sur les régimes de températures et de précipitations (1981-2020), les périodes de gel (1991-2020) et la couverture d'enneigement (2007-2020). Ces données nous ont aiguillé vers la sélection de la méthode la plus fiable. Nous choisissons d'analyser le régime hydrologique estimé selon l'homothétie des volumes ; un régime qui peut être découpé en trois phases.

La première période de l'année civile (de janvier à avril) est marquée par une accumulation nivale, avec une épaisseur maximale de 11 cm en février (Annexe 64). Ce manteau neigeux représente une retenue d'eau en altitude qui ne sera pas immédiatement déversée dans les cours d'eau. Les conditions climatiques sont, par ailleurs, favorables au maintien de cette couche, car les mois de janvier et février comptent un nombre de jours conséquents (15 jours) où les températures moyennes n'excèdent pas 0°C (Annexe 65). L'augmentation progressive des températures est responsable de la fonte nivale. Les sols, dont les horizons profonds sont encore gelés, facilitent le ruissellement de cette eau ancienne jusqu'à l'exutoire, réhaussant à cette occasion la courbe des débits du mois d'avril.

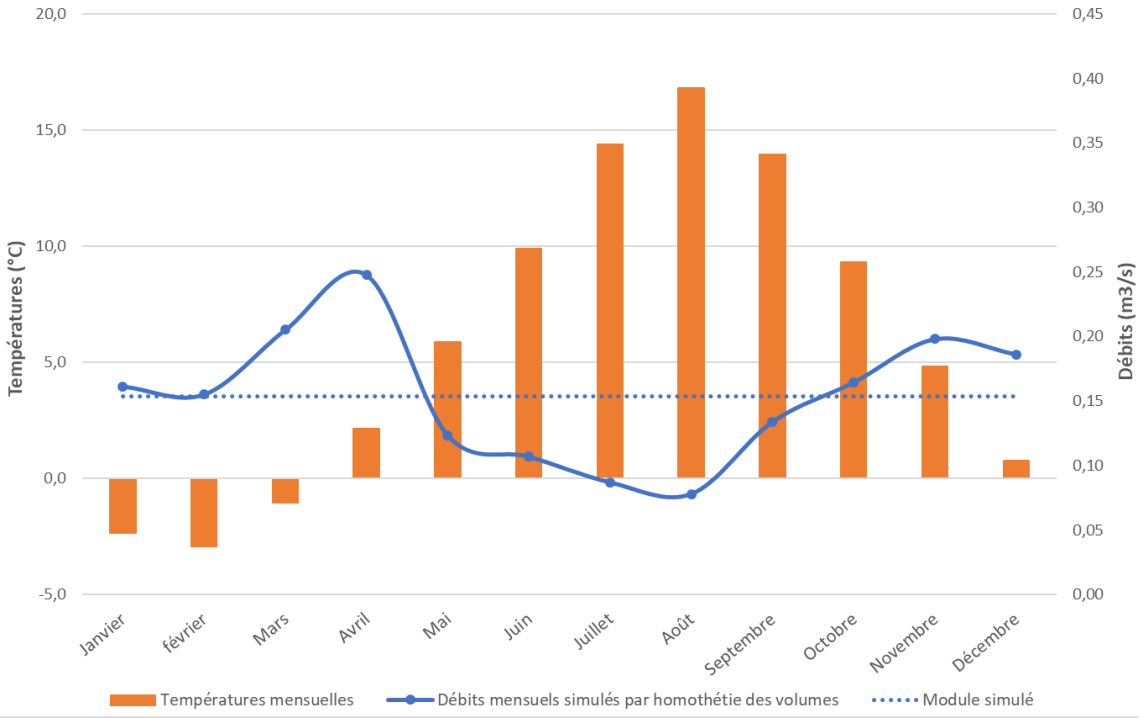


Figure 22. Régime de températures à la station de Saint-Pierre comparé au régime hydrologique du ruisseau Savoyard, estimé selon la méthode de l'homothétie des volumes (base de Salmonier), sur la période de 1981 à 2020. Sources : Météo France & Canada.ca.

Le régime des températures affiche des valeurs positives (8,7 ± 6,8°C) entre les mois d'avril à décembre (Figure 22). Le pic du régime étant atteint en août (14,5°C), cette progression coïncide pleinement avec la période de basses eaux (mai à septembre : seconde partie de l'année) définie par la méthode de l'homothétie des volumes. C'est précisément en août, lorsque l'évapotranspiration est à son apogée, qu'est estimée la période d'étiage à hauteur de 78 $L.s^{-1}$.

C'est lors de la dernière période annuelle (septembre à décembre) que les précipitations sont les plus importantes. Elles atteignent en moyenne 128 ± 9 mm/mois, durant ces quatre mois, contre 98 ± 8 mm/mois pendant le reste de l'année (Annexe 66). Ces données concordent une nouvelle fois avec la courbe de régime hydrologique, affichant une tendance croissante des débits à compter de septembre.

D'après le coefficient de Pardé (*e.g.*, Société hydrotechnique de France, 1939), deux types de régimes hydrologiques complexes se rapprochent de l'allure de la courbe simulée pour le ruisseau Savoyard. Le régime nivo-pluvial colle davantage à SPM que le régime pluvio-nival (écart type de 0,17 et 0,27, respectivement ; annexe 67). Parmi d'autres indices hydrologiques, le coefficient de ruissellement indique une valeur positive (1,02). Un écoulement supérieur à la quantité d'eau précipitée stipulerait d'un échange souterrain entre les bassins topographiques ou du déversement des eaux usées urbaines.

L'analyse des données climatiques, à la station de Saint-Pierre, corrobore l'idée selon laquelle la méthode de l'homothétie des volumes est la simulation la plus cohérente et convaincante, parmi celles étudiées. Cette conclusion valide, à ce titre, la méthode de régionalisation proposée par Benyahya *et al.* (2009), suggérant un module théorique similaire à 2,6% près. En revanche, les modélisations par bilan hydrologique dévoilent leurs limites s'agissant de l'estimation des débits, et plus particulièrement durant les phases hivernales. La présence du manteau neigeux et l'impact des sols gelés sur le ruissellement ne sont, en effet, pas pris en compte dans les équations. Ces contraintes sont donc difficiles à résoudre, même pour des modèles de prédictions de type pluie-débit ; tels que les logiciels GR4J ou GR2M (Mouehli, 2003). De plus, l'application d'un bilan hydrologique part du principe que les échanges souterrains entre les bassins sont nuls. Cette hypothèse semble irréaliste, bien qu'actuellement non-vérifiable, mais les cartes du BRGM indiquent la présence de grandes failles géologiques et d'une lithologie parfois perméable (grès, calcaire, roches magmatiques fissurées…). Ces constats nous amènent à valoriser des méthodes issues de comparaisons régionales.

Les débits théoriques devront toujours être confrontés à des données de terrain, quelle que soit la méthode de calcul. C'est dans ce cadre qu'interviennent les mesures de débits réalisées à l'exutoire du ruisseau Savoyard. Bien que les données journalières ne s'étendent pas sur la totalité du mois de juillet, il en ressort néanmoins une moyenne mensuelle de 21 $L.s^{-1}$. S'il est vrai que ce résultat s'éloigne de l'estimation de 87 $L.s^{-1}$ (Figure 22), il faut aussi reconnaitre que l'été 2021 fut plus chaud et sec qu'attendu (communications privées avec des riverains).

L'exutoire de chacun des ruisseaux est précédé, à moins de 100 m, d'un pont routier. L'implantation d'échelles limnimètriques nivelées serait un moyen efficace pour mesurer quotidiennement la hauteur du niveau d'eau à ces sections transversales. L'emploi d'un débimètre permettrait de tracer des courbes de tarages, et ainsi de pouvoir transformer une courbe des hauteurs en courbe des débits.

IV.2. Un réchauffement climatique à considérer

Depuis ces trente dernières années, l'ETP Penman estimée à la station Saint-Pierre a gagné près de 150 mm. Ce résultat découle de la progression de deux paramètres : la pluviométrie et la température. Les graphiques démontrent que, sur cette période, les précipitations n'ont cessé de diminuer, passant ainsi d'un cumul moyen annuel d'eau précipitée de 1405 ± 232 mm (1990-2000) à 1223 ± 194 mm (2010-2020) (Annexe 68). À cela s'ajoute une hausse des températures qui, d'après la courbe de régression linéaire en figure 23, est évaluée à 0,5°C : de 5,4°C à 5,9°C sur la période 1990-2020. Ces résultats sont étayés par un récent rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), soutenant que la température moyenne de la planète a augmenté de 1,1°C depuis le début de l'ère industrielle ; soit un réchauffement inédit depuis au moins 2000 ans.

Ce réchauffement décennal s'accompagne d'une hausse des températures. L'analyse des températures maximales mensuelles illustre une nette supériorité des données de 2020 par rapport à la normale de 1981-2020, et plus particulièrement durant la période été-automne (anomalie annuelle de 2,8°C ; annexe 69). En parallèle, l'année 2020 expose des températures minimales mensuelles plus basses que la normale, en hiver, générant de ce fait une anomalie négative de 2,0°C (Annexe 70).

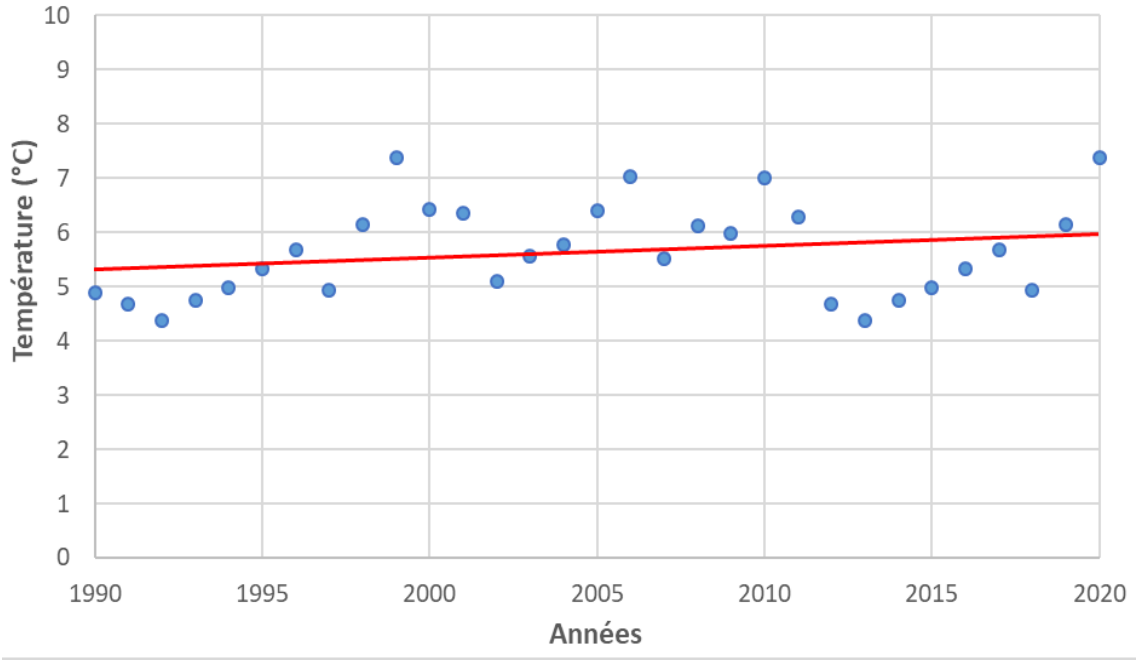


Figure 23. Évolution des températures moyennes annuelles à Saint-Pierre (période 1990-2020). Source : Météo France.

Ces tendances climatiques sont confirmées par le modèle du Goddard Institute for Space Studies, qui prévoit une augmentation de la température estivale de l'ordre de 4°C dans les 50 à 100 prochaines années (Smith, 1989 *in* Meisner, 1990 ; Hengeveld, 1990 ; Therrien & Lachance, 1997). Or, une hausse aussi significative occasionnerait une perte d'habitat estival pour les salmonidés de l'ordre de 30% à 50% (Meisner, 1990 ; Keleher & Rahel, 1996 ; Therrien & Lachance, 1997).

IV.3. Des notions d'écohydrologie et d'extremums

La présence d'ouvrages (contrôles ou barrages) sur un linéaire est bien souvent à l'origine de conséquences directes sur les écoulements, pouvant occasionner la perte d'habitats naturels, une perturbation fonctionnelle de l'écosystème aquatique et un changement dans la dynamique des communautés piscicoles (*e.g.*, Fraser, 1972 ; Ruggles & Watt, 1975 ; Hamilton & Buell, 1976 ; Holden, 1979 ; Burt & Mundie, 1986 ; Beaudelin & Bérubé, 1994 ; Belzile *et al.*, 1997).

De multiples raisons justifient le recours à un débit minimum (ou débit réservé), en lien avec des logiques écoenvironnementales, récréatives (pêche, baignade), esthétiques et de navigation (Estes & Orsborn, 1986 ; Belzile *et al.*, 1997). Selon Filipek *et al*. (1987), il existerait plus d'une quarantaine de méthodes permettant de calculer un débit réservé. Parmi elles, la méthode du 0,25 QMA – couramment utilisée dans les provinces maritimes du Canada (Cassie & El-Jabi, 1995 ; Belzile *et al.*, 1997) – suppose que le quart du QMA est suffisant pour assurer une vie aquatique convenable, indépendamment des espèces et des saisons.

Une méthode écohydrologique de détermination des débits réservés, pour la préservation des habitats des poissons, a été développée par Belzile *et al.* (1997) dans un rapport de l'INRS-Eau. Elle consiste en la cartographie des bassins versants colonisés par des espèces – dont l'omble de fontaine –, au Québec. Une carte écohydrologique est produite à partir de la superposition des cartes régionales écologiques et hydrologiques (Annexe 71). L'avantage de cette méthode est qu'elle discrimine, dans le calcul du débit réservé, les différentes étapes du cycle vital de l'espèce ciblée (Tableau 5 & Annexe 72). La détermination de la région écohydrologique, voisine de SPM (en l'occurrence, la région 1 ; 1b, H-1), donne accès aux types de débits, nécessaires au cycle de l'omble, et aux paramètres de la formule régionale pour une rivière non-jaugée,

$$Qr = e^{k} \times S^{a} , \qquad (éq.\ 4)$$

où « e » vaut 2,71828, et « S » se rapporte à la superficie du bassin (km²). Bien qu'efficace, cette méthode fournit toutefois un débit réservé supérieur à l'écoulement, sur la période du 15/04 au 30/06.

Tableau 5. Débits réservés du ruisseau Savoyard, spécifique au cycle de vie de l'omble de fontaine. Source : Belzile et al. (1997).

Période critique	**Phase du cycle de vie**	**Type de débit réservé**	**Paramètres régionaux**		**Débit réservé (m^3/s)**
			k	a	
Toute l'année	---	0,5 QMA	-4,73	1,038	0,033
Du 15/04 au 30/06	Émergence des alvins	0,5 QMP	-3,42	0,999	0,117
Du 1/06 au 30/09	Alimentation	Q_{50} août	-7,26	1,367	0,004
Du 15/09 au 31/10	Fraye	Q_{50} septembre	-7,94	1,454	0,002
Du 15/10 au 30/06	Incubation des œufs	0,25 QMA	-5,42	1,038	0,017

Le cycle de vie des populations fluviatiles est lié aux variations du régime hydrologique (Poff *et al.*, 1997). Par exemple, Cunjak *et al.* (1998) a prouvé que certaines inondations, postérieures aux étiages hivernaux du ruisseau Catamaran (Nouveau Brunswick), entrainaient la destruction des frayères du saumon Atlantique (*Salmo salar*), et donc la mort des œufs. L'étude d'indicateurs hydrologiques, relatifs aux intensités et aux fréquences des débits, assure une meilleure connaissance du régime et la préservation de l'écosystème dans un but économique et écologique.

La fonction de Benyahya *et al.* (2009) permet d'en apprendre davantage sur les capacités des cours d'eau en calculant les débits extrêmes. Rappelons que, dans cette étude de l'INRS-ETE, les QMA de 175 rivières, réparties parmi les provinces Est du Canada, sont tracés en fonction de la surface de leur bassin. Il en résulte des relations, caractéristiques de chaque province. Par exemple, la rivière de Salmonier, qui n'a pas été utilisée pour ajuster cette loi, se situe dans la province de TNL. Or, son QMA théorique coïncide parfaitement avec son module mesuré à la station de Lamaline (5 m^3/s ; figure 24). La méthode offre donc un gain de confiance dans sa capacité prédictive des QMA à SPM.

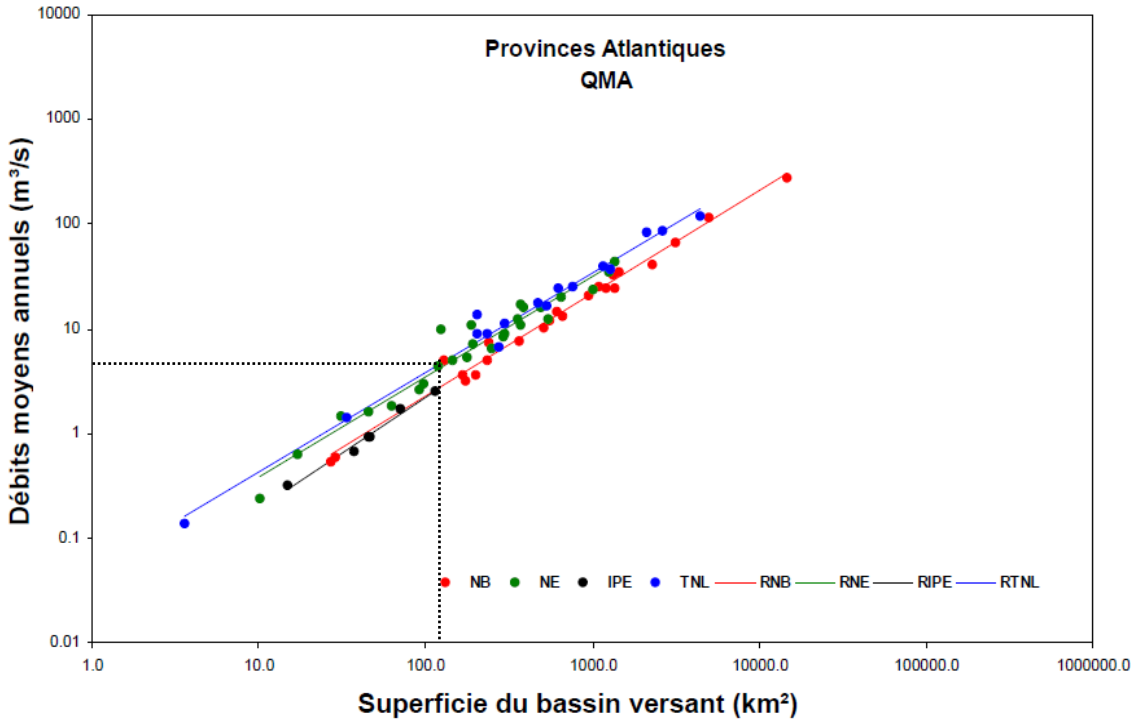


Figure 24. Débits moyens annuels selon la surface des bassins versants pour les provinces Atlantiques. Source : Benyahya et al. (2009).

Trois indicateurs hydrologiques sont retenus : la crue moyenne annuelle (CMA), l'étiage moyen annuel (EMA), et l'indice d'étiage. Il en résulte un CMA de 2,41 m^3/s et un EMA de 0,01 m^3/s pour le ruisseau Savoyard (Annexe 73). Avec un QMA de 0,864, la Belle Rivière possède un CMA de 9,67 m^3/s, ainsi qu'un EMA de 0,05 m^3/s. La situation d'étiage est estimée selon des indices de 0,17 et 0,20, respectivement, soit en-deçà de la moyenne à TNL (0,29). Cet indice permet de quantifier le débit de base : une valeur faible décrit un étiage sévère (Benyahya *et al.*, 2009). Ces résultats rendent compte d'un écoulement non-permanent, induisant une faible contribution des eaux souterraines.

IV.4. Une caractérisation des ruisseaux ciblés

IV.4.1. Contexte hydrogéologique

La Belle Rivière s'écoule sur des lithologies très variées (Cerema, 2020). En comparant les débits spécifiques du profil en long, il est possible d'apprécier l'impact de la géologie sur leur évolution. La figure 25 permet ainsi d'établir une relation entre l'hydrologie et le contexte géologique.

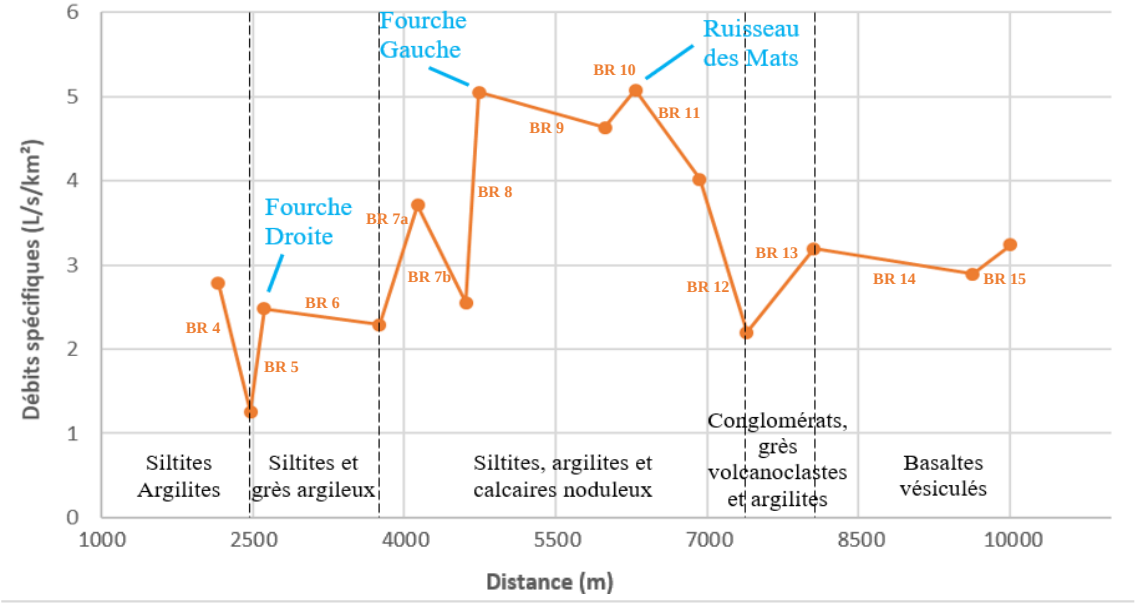


Figure 25. Relation hydrologie-géologie du ruisseau de la Belle Rivière. La lithologie est indiquée en noir et les confluences en bleu.

Dans la partie amont du bassin, le ruisseau s'écoule sur un substrat dominé par des argiles et siltites qui favorise le ruissellement, alimentant directement la rivière. Le secteur central du bassin est recouvert de siltites, argilites, roches calcaires et quelques rares bancs de quartzites. Les calcaires se caractérisent par une perméabilité du sol plus ou moins prononcée, d'où l'inflexion de la courbe au point 739,12. La plus grande abondance de l'écoulement est majoritairement due aux confluences de la Fourche Gauche (4833 m) et du ruisseau des Mâts (6104 m). La région avale est en partie constituée de conglomérats, de grès volcanoclastes et d'argilites (entre 7539 et 8215 m). La portion proche de l'exutoire se compose, quant à elle, de basaltes vésiculés. Ces lithologies décrivent un terrain propice à l'infiltration. En effet, la courbe des débits se stabilise à un niveau bas, ce qui coïncide avec l'hypothèse selon laquelle le ruissellement alimente une nappe plus capacitive.

L'analyse des débits spécifiques démontre que, proportionnellement à la taille de son bassin versant, le ruisseau Savoyard est drainé par des écoulements plus abondants que la Belle Rivière (Annexe 74). La lithologie des tronçons S1 à S4 est relativement homogène. Le cours d'eau traverse un terrain composé de roches ignées (rhyolites) et de débris volcaniques (tufs et brèches). D'ordinaire, les rhyolithes sont bien moins perméables que les volcanoclastes (Annexe 75). Pourtant, le profil en

long montre clairement une hausse des débits au niveau des tufs et des brèches pyroclastiques (de 1810 à 2860 m). Cette anomalie est causée par l'urbanisation des sols, représentant une entrave à l'infiltration, ainsi que la canalisation de certaines portions du ruisseau, diminuant la rugosité du chenal. La valeur du tronçon S4 se distingue par une nette diminution du débit, expliquée par l'absence de zones artificialisées. L'eau s'infiltre plus facilement, attestant d'une grande capacité de stockage de la nappe. Des valeurs en hausse, à l'exutoire, sont dues à la composition du substrat : des dépôts glaciaires (tills), dotés d'une plus faible perméabilité (Annexe 76). L'ensemble des données physiques caractérisant le ruisseau Savoyard est ainsi résumé en une fiche de synthèse (Figure 26).

IV.4.2. Contexte biogéochimique

Au ruisseau Savoyard, les données physico-chimiques évoluent très peu dans le temps, à l'échelle du mois de juillet. Une analyse sur une période très courte (1 mois) doit avoir peu d'incidence sur la variation de la qualité chimique du cours d'eau. De plus, le niveau hydrométrique n'a quasiment pas changé durant cette période, comme l'atteste l'étude temporelle des débits.

L'étude spatialisée montre que les relevés chimiques sont relativement stables au ruisseau Savoyard, en raison d'une proximité géographique entre la source et l'exutoire. Les valeurs de températures sont inférieures au seuil maximal de tolérance de l'omble, fixé par Hynes (1970), tandis que les mesures de pH se situent dans l'intervalle de confort établi par Raleigh (1982). L'étude de la conductivité indique une minéralisation faible de l'eau (Bouliane *et al.*, 2003). Elle peut s'apparenter à de l'eau de montagne (30 à 300 µS/cm ; www.josmose.fr), voire même à de l'eau potable. Cette conclusion s'éloigne de l'hypothèse d'une eau fortement minéralisée, d'autant que les sols sont majoritairement recouverts par des tourbières. Enfin, le niveau d'oxygène étant fort (environ 80% de saturation), l'eau est très aérée et se rapproche du taux de saturation d'un torrent. Il s'agit également d'un indice favorable au développement de l'omble (Gustave, 2020).

Les observations du taux d'oxygène dissous sont identiques pour le ruisseau de la Belle Rivière. L'eau est peu acide car le ruisseau incise des roches métasédimentaires ; moins chargée en silice, fer et magnésium, contrairement à la rhyolite et aux tufs de Saint-Pierre. La conductivité fait état d'une forte minéralisation à l'exutoire. Le ruisseau achemine une eau douce qui, au contact avec l'eau de mer, se transforme en un mélange saumâtre. Enfin, les mesures de températures ont été récoltées sur trois jours et sont alors soumises à un biais journalier. Il est difficile d'établir une relation entre la température et le substrat. En revanche, les relevés du 25/06 montrent que la température de l'eau est déjà supérieure à 25°C, alors que le pic de chaleur atmosphérique survient au mois d'août. La tolérance thermique est liée à la répartition biogéographique des espèces (Pörtner, 2002 ; Stitt *et al.*, 2013). Cela laisse supposer que cette espèce est capable de s'acclimater pour survivre.

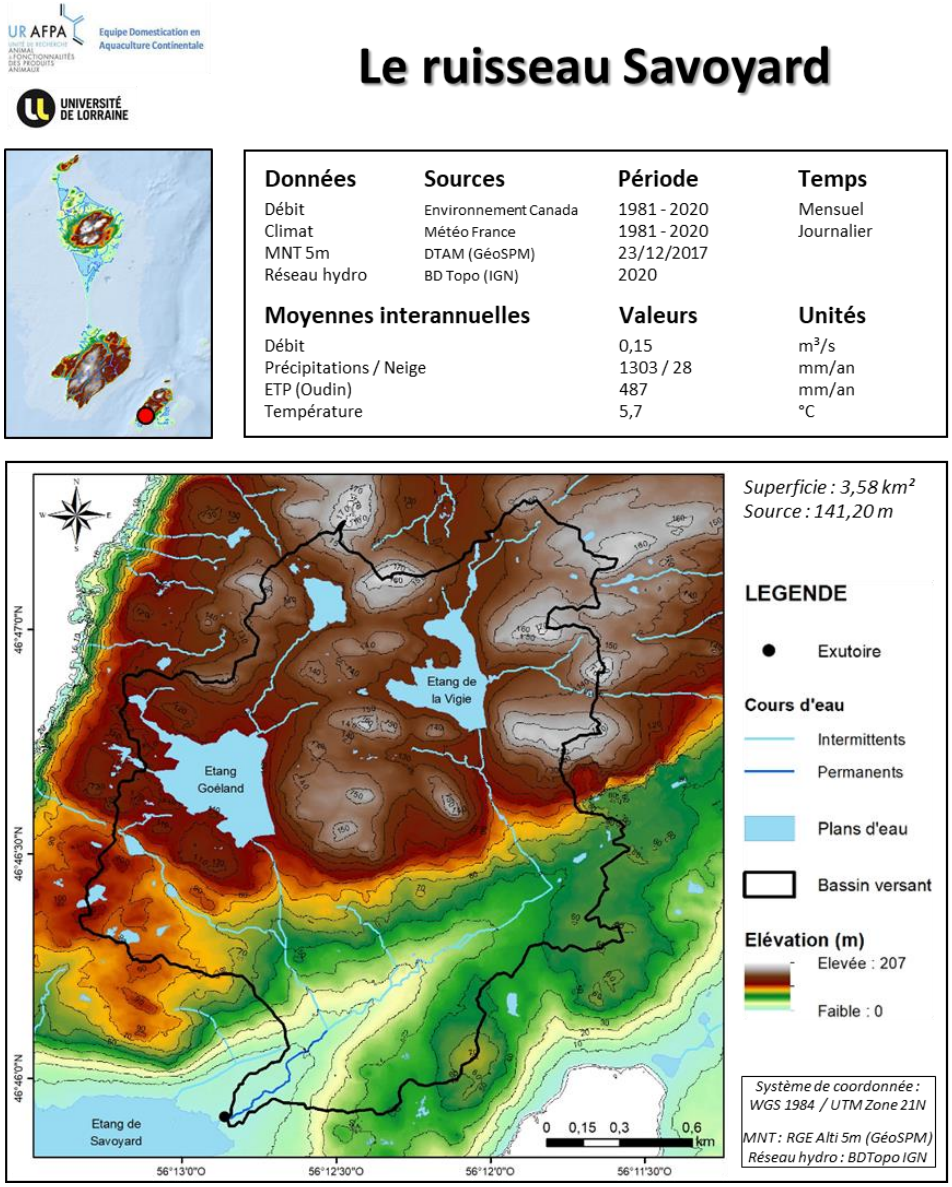


Figure 26. Fiche de synthèse des caractéristiques physiques du ruisseau Savoyard (inspirée de https://webgr.inrae.fr).

IV.5. Vers un réaménagement des cours d'eau

La restauration d'un cours d'eau vise à réhausser l'indice de qualité physique de ses tronçons par des travaux de réaménagement, le ramenant ainsi vers son état de fonctionnement naturel. Le ruisseau de la Belle Rivière possède un indice fort, car n'étant pas exposé aux actions anthropiques. Cependant, certains éléments dans le ruisseau suscitent un intérêt : absence de végétation aquatique, présence de dépôts généralisés dans le fond du lit. Le lit mineur devient parfois étroit, tandis que des tronçons rectilignes comptent des seuils, en amont, infranchissables par les salmonidés. Aussi, la présence d'embâcles et de berges sapées dégradent le linéaire.

Dans une démarche réaliste, des moyens pourraient être mis en œuvre afin d'effacer toutes traces d'embâcles perturbant le débit ou générant une retenue d'eau, hormis celles n'imposant pas ou peu de contraintes à l'écoulement (par exemple, dans les zones d'eaux mortes) et constituant des caches écologiques (Preynat, 2013). Des campagnes d'élagages préserveraient le cours d'eau de la ripisylve perchée. Enfin, l'affaissement des berges est en partie causé par le piétinement des chasseurs. Le suivi d'un autre chemin forestier permettrait sans doute d'empêcher leur destruction. Ces modifications augmenteraient l'indice général de 2 points, où 80% du linéaire serait jugé « excellent à correct » (Annexes 77 & 78), contre 73% avant simulation.

Le ruisseau Savoyard est très anthropisé et requiert, de ce fait, des restaurations importantes. Les améliorations communes à apporter à chaque tronçon concernent la végétation rivulaire et aquatique. La plantation et l'entretien d'une ripisylve à une et deux strates (arbustes et arbres, respectivement) jouent un rôle dans le développement de la biodiversité et l'écrêtement des pointes de crues. Les espèces végétales, adaptées au terrain et au climat, doivent comporter des racines suffisamment robustes et profondes pour exercer un maintien des berges : buissons, friches, frênes, aulnes… Les observations de terrain détaillent aussi de l'existence d'une prolifération d'algues et d'hélophytes dans le lit mineur, pouvant être enlevée à la suite d'un curage manuel du ruisseau.

Des travaux d'aménagements sont à envisager au niveau des tronçons S4 et S5 dans un but de stabilisation des berges. Le piétinement des équidés occupant les plaines entraîne une destruction des berges et un apport en matières organiques nocif au cours d'eau. La meilleure solution consiste en l'installation de clôtures fermant l'accès au ruisseau. Des pompes à nez permettront aux animaux de s'abreuver et les remblais instables en bois pourront être retirés. L'érosion des berges est toutefois un processus naturel, en partie dû au caractère non-cohésif des éléments qui les composent. Des techniques efficaces et abordables, issues du génie végétal, sont généralement employées pour lutter contre l'érosion latérale des talus ; géotextile biodégradable, bouturage, ensemencement, mais aussi des pieds de berges ; tressage et fascine de saule.

Le fonctionnement hydrologique des tronçons S2 et S3 est largement perturbé par le barrage de la Vigie, ainsi que par divers seuils artificiels et naturels. Les ouvrages hydrauliques représentent un obstacle pour la migration de la faune aquatique. Or, tous les ouvrages ne comportent pas de buses facilitant la montaison. L'idéal serait donc de défaire les seuils artificiels inutiles. Les autres digues et cascades naturelles peuvent être contournées à l'aide de systèmes de passes à poissons ou de passes à ralentisseur. En revanche, le démantèlement d'un barrage est une intervention onéreuse, et le terrain n'autorise pas la construction de tels aménagements piscicoles. La solution consiste donc à fixer un ascenseur à poissons assurant une franchissabilité permanente. De même, les portions canalisées sont à supprimer afin de limiter les pointes de crues en aval et rétablir une continuité écologique.

Enfin, des travaux de curage ont été dirigés par les gardes-pêche pour faire face à l'envahissement d'hélophytes. La création d'un lit mineur d'étiage par déblai dans le sédiment existant est, quant à elle, une option envisageable pour diversifier les débits et ainsi lutter contre l'assèchement.

Selon la simulation Qualphy, les actions de réaménagements réhausseraient l'indice général de 25 points. Le diagramme, en annexe 79, affiche une répartition de 63% de qualité « assez bonne » et 37% de qualité « correcte à excellente » sur la longueur totale du ruisseau. Le compartiment des berges est le principal bénéficiaire de ces actions avec une amélioration de près de 35% de la qualité, contre 30% et 8% pour les lits mineurs et majeurs, respectivement (Annexe 80). Ces effets sont d'autant plus visibles en confrontant les situations avant et après restauration, en annexe 81. Cependant, le lit majeur urbanisé du tronçon S3 ne profite pas de ces modifications.

Ces simulations de restaurations du fonctionnement hydrologique ont pour vocation à orienter un maître d'œuvre qui aura la charge de conserver ou de restaurer la qualité physique des milieux. Ces travaux peuvent être complétés par l'aménagement de frayères artificielles, dans un intérêt purement biologique. Par exemple, le taux de survie des œufs dépend de la granulométrie du substrat (Chapman, 1988 ; Gobeil, 2010). Un nid à gravier grossier facilite l'apport en oxygène dissous à travers les interstices, et garantit le déplacement des alevins dans le substrat lors de leur émergence (Witzel & MacCrimmon, 1981 ; Gobeil, 2010). L'ajout d'un substrat de meilleure qualité assure donc un rôle bénéfique dans la survie des œufs, impliquant un plus grand potentiel de recrutement.

Cependant, les études de terrain réalisées avec Edgard Gustave ont révélé que la population d'ombles de fontaine était plus dense au ruisseau Savoyard qu'au ruisseau de Debons. Pourtant, conformément aux simulations, l'indice de qualité physique de Debons (75%) est supérieur à celui de Savoyard (50%). Outre le potentiel d'adaptabilité de l'omble à un environnement, une autre raison réside dans la différence de réglementations entre les îles de Miquelon-Langlade (où tous les secteurs sont ouverts à la pêche) et de Saint-Pierre (où seule la pêche de plans d'eau est autorisée).

Conclusion

Plus que jamais, nous percevons les causes et l'impact des variations du régime hydrologique sur les habitats aquatiques. Il s'avère primordial de cerner ces fluctuations interannuelles en proposant plusieurs méthodes d'estimation du régime. Le succès des formules se basant sur des comparaisons régionales (homothétie des volumes, fonction de puissance) conduit à la détermination d'un régime nivo-pluvial. L'idéal consisterait cependant à disposer un réseau de stations hydrométriques à l'exutoire de chaque cours d'eau pouvant faire l'objet d'une étude hydrologique, d'un intérêt biologique, ou dans un cadre plus concret, d'un aménagement hydraulique (type ferme aquacole).

Le dernier rapport du GIEC stipule que la situation climatique va s'aggraver dans les années à venir. Selon les pires estimations, la température atmosphérique devrait augmenter de 3,3 à 5,7°C d'ici 2100. Ces grands bouleversements à l'échelle mondiale auront des conséquences dévastatrices et irréversibles sur la biodiversité, et notamment sur ces animaux poïkilothermes que sont les poissons. C'est aussi pour cette raison que la notion de débit réservé représente une valeur écoenvironnementale si précieuse. Pour autant, les relevés de température de l'eau à Langlade (supérieurs à 25°C pendant plusieurs heures, dans une même journée) viennent contester les seuils létaux décrits dans la littérature, démontrant une nouvelle fois l'incroyable capacité d'acclimatation du salmonidé.

Les études spatialisées confirment et suivent l'impact de la géologie sur la chimie de l'eau. Les rivières sont dépourvues de toutes traces de polluants et répondent aux besoins des ombles en oxygène dissous. La nature des sols est très variable (roches ignées et métasédimentaires) et influence le débit de base. Certaines lithologies montrent une capacité du système à stocker de l'eau, mais l'analyse des écoulements hypodermiques et des nappes profondes reste encore un sujet extrêmement sensible du fait de la présence de réseaux de failles géologiques et de possibles conduits karstiques.

Une présentation des données Qualphy, avant et après les travaux de restaurations, permet d'apprécier l'impact des réaménagements. La qualité du ruisseau Savoyard varie en fonction des milieux qu'il traverse. Ce cours d'eau garde une qualité générale moyenne, bien que certains tronçons nécessitent plus d'entretien que d'autres à cause de l'influence des activités anthropiques. Ces aménagements assurent un gain de qualité à Savoyard qui ne se reflète pas au ruisseau de la Belle Rivière. Ils peuvent s'accompagner de l'installation de frayères artificielles jouant un rôle dans le potentiel de recrutement. Une question se pose, néanmoins, quant à la légitimité de tels renouvellements, d'autant que les estimations de terrain démontrent que la qualité physique des cours d'eau – et donc des habitats naturels – ne semble pas avoir d'incidence majeure sur le peuplement des ombles de fontaine. En revanche, l'impact et l'intensité de la pêche n'est pas un cas à négliger, d'où la notion si importante de responsabilité en vue de s'engager dans le sens d'une exploitation durable des milieux aquatiques.

Références

Sources bibliographiques

Anonyme, 2016. Plan Stratégique National : Développement des aquacultures durables 2020, 121p. https://www.europe-en-france.gouv.fr/fr/ressources/plan-strategique-national-pour-le-developpement-des-aquacultures-durables-2020.

Aubert de La Rüe, E., 1937, Le Territoire de Saint-Pierre et Miquelon. [Etude de géographie physique et humaine.]: Etude de géographie physique et humaine.: Journal de la Société des Américanistes, v. 29, p. 239–372. doi:10.3406/jsa.1937.1957.

Aubert de La Rüe, E., 1951. Recherches géologiques et minières aux îles saint-Pierre et Miquelon. S.l. : Librairie Larose.

Beaudelin, P. et Bérubé, P., 1994. Cadre d'analyse des projets de petites centrales hydroélectriques. Ministère de l'Environnement et de la Faune (document de régie interne). 4 sections et 4 annexes.

Belzile, L., Bérubé, P., Hoang, V.D. et M. Leclerc, 1997. Méthode écohydrologique de détermination des débits réservés pour la protection des habitats du poisson dans les rivières du Québec. Rapport présenté par l'INRS-Eau et le Groupe-conseil Génivar inc. au ministère de l'Environnement et de la Faune et à Pêches et Océans Canada, 83p.

Benyahya, L., 2009. INRS-ETE, Canada, Ministère des pêches et des océans, Région du golfe, and University of New Brunswick, Caractérisation du régime naturel du débit des bassins versants de l'est du Canada:, https://central.bac-lac.gc.ca/.item?id=R1057_LBenyahya_2009&op=pdf&app=Library (accessed August 2021). Rapport 1057, 88p.

Bernatchez, L., & Giroux, M., 2000. *Les poissons d'eau douce du Québec et leur répartition dans l'est du Canada* (p. 100). Boucherville, Québec: Broquet.

Bjornn, T.C., and Reiser, D.W, 1991. Habitat Requirements of Salmonids in Streams, 56p.

Blein, O., Rabu, D., Courbouleix, S. et Audru, J.-C., 2015. Carte géologique de la France à 1/50 000, Saint-Pierre et Miquelon - 1/50 000. S.l. : BRGM. ISBN : 978-2-7159-1001-0.

Boulianne, F., Côté, S., & Hins, C., 2003. Évaluation de l'état de la population d'ombles de fontaine (Salvelinus fontinalis) du lac Chasseur, Réserve faunique Duchénier. 39p.

Briand, E., Gustave, E., Perrin, L., Teletchea, F., 2021. Synthèse des connaissances acquises et des travaux réalisés sur l'omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*) sur l'archipel de Saint-Pierre et Miquelon. Livrable 1.1, Projet OMBLESPM, Université de Lorraine (Financement Fondation de France). 182p.

Bruslé, J., & Quignard, J. P., 2001. *Biologie des poissons d'eau douce européens*. Lavoisier.

Burt, D.W. et J.H. Mundie, 1986. Case histories of regulated stream flow and its effects on salmonids populations. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 1477, 98p.

Caissie, D. & N. El-Jabi, 1995. Comparison ans regionalization of hydrologically based instream flow techniques in Atlantic Canada. Can. J. Civ. Eng. v. 22 (WR2), p. 235-246. doi :10.1139/l95-033.

Cerema, 2017. Cartographie nationale des ouvrages et aménagements littoraux. In : [en ligne]. 2017. Disponible à l'adresse : http://www.geolittoral.developpement-durable.gouv. fr/cartographie-nationale-des-ouvrages-et-r502.html.

Cerema, 2020. Dynamiques et évolution du littoral Fascicule 11 : Synthèse des connaissances de Saint-Pierre-et-Miquelon. Collection : Connaissances. ISBN : 978-2-37180-341-1.

Chapman, D.W., 1988. Critical review of variables used to define effects of fines in redds of large salmonids. Transactions of the American Fisheries Society. 117:1-21. doi:10.1577/1548-8659(1988)117<0001:CROVUT>2.3.CO;2.

Creaser, C.W., 1930, Relative Importance of Hydrogen-Ion Concentration, Temperature, Dissolved Oxygen, and Carbon-Dioxide Tension, on Habitat Selection by Brook-Trout: Ecology, v. 11, p. 246–262. doi:10.2307/1930261.

Cunjak R.A., T.D. Prowse, D.L. Parrish, 1998. Atlantic Salmon *(Salmo salar*) in winter: the season of parr discontent. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, v. 55, p. 161-180. doi:10.1139/d98-008.

Daye, P.G., and Garside, E.T., 1975. Lethal levels of pH for brook trout, *Salvelinus fontinalis* (Mitchill): Canadian Journal of Zoology, v. 53, p. 639–641. doi:10.1139/z75-077.

Dubois, JMM, 2006. Saint-Pierre-et-Miquelon: un laboratoire de terrain en miniature pour les géographes physiques. In : Enjeux géographiques 2. 2006. p. 36-44.

Dunson, W.A., and Martin, R.R., 1973. Survival of Brook Trout in a Bog-Derived Acidity Gradient: Ecology, v. 54, p. 1370–1376. doi:10.2307/1934201.

Dussut, D., 2007. Saint-Pierre et Miquelon : Un diagnostic du territoire. S.l. DTAM - Direction de l'Equipement, 100p.

Estes, C.C., and Orsborn, J.F., 1986. REVIEW AND ANALYSIS OF METHODS FOR QUANTIFYING INSTREAM FLOW REQUIREMENTS: Journal of the American Water Resources Association, v. 22, p. 389–398. doi:10.1111/j.1752-1688.1986.tb01893.x.

FAO, 2018. Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations. Meeting the sustainable development goals. Rome.

FAO, 2020. La situation mondiale des pêches et de l'aquaculture 2020. La durabilité en action. Rome. doi:10.4060/ca9229fr.

Filipek, S.P., Keith, W.E., and J. Giese, 1987. The status of the instream flow issue in Arkansas. Proc. Ark. Acad. Sci. v. 41, p. 43-48.

Fontaine, P., Teletchea, F., 2019. Domestication of Eurasian perch. In "Animal Domestication" (Ed. Teletchea F), p. 137-159.

Fraser, J.C., 1972. Regulated discharge and stream environment. Pages 263-286 dans R.T. Oglesby, C.A. Carlson and J.A. McCann 9 (éd.), River ecology and man. Academic press, New York.

Fraser, J.M., 1982. An atypical brook charr (Salvelinus fontinalis) spawning area: Environmental Biology of Fishes, v. 7, p. 385–388. doi:10.1007/BF00005574.

Gobeil, P., 2010. Évaluation des travaux d'aménagement et de restauration des habitats de l'omble de fontaine dans la réserve faunique des Laurentides. Université du Québec à Chicoutimi, 67p.

Gustave, E., 2020. Accompagner la transition vers une pêche sportive durable de l'omble de fontaine sur l'archipel de Saint-Pierre et Miquelon, 26p.

Guyon, F., Cogels, X. & Vanderborghtv, P., 2003a. Application d'un outil d'évaluation de la qualité physique des cours d'eau en Région wallonne – Modèle QUALPHY, Validation de la méthode dans le bassin de la Semois, Rapport Final, Fondation Universitaire Luxembourgeoise et Direction des Cours d'Eau Non Navigables, Arlon, 141p.

Guyon, F., Moy J., 2004. Validation et adaptation de l'outil QUALPHY d'évaluation de la qualité physique des cours d'eau aux Masses d'Eau wallonnes, in Actes du Colloque : Monitoring et Gestion physique des cours d'eau wallons, FUSAGx, le 26 mai 2004.

Hamilton, R. et J.W. Buell, 1976. Effects on modified hydrology on Campbell salmonids. Technical report No. PAC/T-76-20, Department of Environment, Fisheries and Marine Service, Habitat Protection Directorale, Vancouver, B.C, 156p.

Harache, Y. et Gilly, B., 1986. Evaluation technique et économique des filières aquacoles existantes à Saint-Pierre-et- Miquelon. Rapport technique. Département Ressources Aquacoles de Brest, Département Stratégies de Développement et d'Aménagament de Nantes. Ifremer - Direction des Ressources Vivantes. https://archimer.ifremer.fr/doc/00000/2498/

Hengeveld, H.G., 1990. Global Climate Change: Implications for Air Temperature and Water Supply in Canada, Transactions of the American Fisheries Society, 9p. doi : 10.1577/1548-8659(1990)119<0176:GCCIFA>2.3.CO;2

Holden, P.B., 1979. Ecology of riverine fishes on regulated stream system. Pages 57-74 dans J.V. Ward and J.A. Stanford (éd.). The ecology of regulated stream. Plenum press, New York.

Hynes, H. B. N., 1970. The Ecology of Flowing Waters in Relation to Management. Journal (Water Pollution Control Federation) v. 42(3): 418-424. http://www.jstor.org/stable/25036513.

Jouglet, M. et Letournel, B., 2010. Cerf de Virginie, lièvre d'Amérique et forêt boréale dans l'archipel de Saint-Pierre-et-Miquelon, une histoire d'équilibre. 2010. S.l. : ONCFS - Fédération des chasseurs.

Keleher, C.J., and Rahel, F.J., 1996. Thermal Limits to Salmonid Distributions in the Rocky Mountain Region and Potential Habitat Loss Due to Global Warming: A Geographic Information System (GIS) Approach, 15p. doi:10.1577/1548-8659(1996)125<0001:TLTSDI>2.3.CO;2.

Le Moine, O., Geairon, P., Robert, S., Coudray, S., Fiandrino, A., Goraguer, H., & Goulletquer, P., 2016. Hydrologie du Grand Etang de Miquelon. Estimation des flux et renouvellements. 67p.

Martinie-Cousty, M., Prévot-Madère, J., 2017. Les fermes aquacoles marines et continentales : enjeux et conditions d'un développement durable réussi. Les avis du CESE, 100p.

McCormick, J.H., Hokanson, K.E.F., and Jones, B.R., 1972, Effects of Temperature on Growth and Survival of Young Brook Trout, *Salvelinus fontinalis*: Journal of the Fisheries Research Board of Canada, v. 29, p. 1107–1112. doi:10.1139/f72-165.

Meisner, J.D., 1990. Potential Loss of Thermal Habitat for Brook Trout, Due to Climatic Warming, in Two Southern Ontario Streams. 12p. doi:10.1577/1548-8659(1990)119<0282:PLOTHF>2.3.CO;2

Menendez, R., 1976, Chronic Effects of Reduced pH on Brook Trout (*Salvelinus fontinalis*): Journal of the Fisheries Research Board of Canada, v. 33, p. 118–123. doi:10.1139/f76-014.

Mouelhi S., 2003. Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de Doctorat, ENGREF, Cemagref Anthony, France, 323 PP.

Mullen, J.W., 1958. A compendium of the life history and ecology of the eastern brook trout, Salvelinus fontinalis Mitchill. *The Massachusetts Division of Fisheries and Game. Fish Bull*, *23*, 37.

O'Brien, S.J., Strong, P.G. et Evans, J.L., 1977. 77-7 : The geology of the Grand Bank and Lamaline map areas, Burin peninsula, Newfoundland. S.l. Mineral. Dev. Div. Dept of Mines and Energy, Government of Newfoundland and Labrador.

Ouarda, T.B.M.J., Lang, M., Bobée, B., Bernier, J., and Bois, P., 2005. Synthèse de modèles régionaux d'estimation de crue utilisée en France et au Québec: Revue des sciences de l'eau, v. 12, p. 155–182. doi:10.7202/705347ar.

Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F. and Loumagne, C., 2005. Which potential evapotranspiration input for a rainfall-runoff model? Part 2 - Towards a simple and efficient PE model for rainfall-runoff modelling. Journal of Hydrology, v. 303(1-4), p. 290-306. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.08.026.

Poff, N.L., J.D. Allan, M.B. Bain, J.R. Karr, K.L. Prestegaard, B.D. Richter, R.E. Sparks, J.C. Stromberg, 1997. The natural flow regime. *BioScience* v. 47, p. 769-784. doi:10.2307/1313099.

Pörtner, H.O., 2002, Climate variations and the physiological basis of temperature dependent biogeography: systemic to molecular hierarchy of thermal tolerance in animals: Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology, v. 132, p. 739–761. doi:10.1016/S1095-6433(02)00045-4.

Preynat, J., 2013. Plan de Gestion Piscicole intermédiaire de Saint-Pierre et Miquelon. 335 p.

Langlois R., (2010), Programme de gestion piscicole : La pêche sportive en eau douce et l'omble de fontaine à Saint-Pierre et Miquelon, p. 81.

Raleigh, R.F., 1982. Habitat Suitability Index Models: Brook trout: FWS/OBS Report 82/10.24, http://pubs.er.usgs.gov/publication/fwsobs82_10_24.

Réalis-Doyelle, E. , 2016. Influence de la température sur les premiers stades de vie de trois espèces de poissons dulcicoles : étude de la survie et de la plasticité phénotypique. Sciences agricoles. Université de Lorraine. Français. NNT : 2016LORR0272.

Reux, S., 2018. C16RA0023 : Document stratégique de bassin maritime de Saint-Pierre-et-Miquelon. Situation de l'existant, décembre 2016. Cerema Normandie Centre. Département Aménagement Durable des Territoires – Groupe Environnement Énergie Littoral.

Ruggles, C.P. et W.D. Watt, 1975. Ecological change due to hydroelectric development on the Saint John River. J. Fish. Res. Board Can. v. 32, p. 161-170.

Sanguin A.-L., 1981. II. Un milieu insulaire et nordique. In: Norois, n°110, pp. 155-169; https://www.persee.fr/doc/noroi_0029-182x_1981_num_110_1_3958.

Scott, W. B., et E. J. Crossman. 1974. Poissons d'eau douce du Canada. Office des recherches sur les pêcheries du Canada Bulletin 184. 1026p.

Smith, J.B., 1989. Methodology. Pages 57-69 *in* J. B. Smith and D. Tirpak, editors. The potential effects of global climate change on the United States. U.S. Environmental Protection Agency, EPA-230-05-89-050, Washington, D.C. (U.S. Government Printing Office. GPO 055-000-00358-1. Washington, D.C.)

Société hydrotechnique de France, 1939. Tableau général de l'hydrologie fluviale française. Annuaire hydrologique de la France, 187p.

Société Louis Hardy S.A.S. – Saint-Pierre, 2016. RC28163/1 : Étude d'impact et étude de Dangers [en ligne]. Résumé non technique. Saint-Pierre. LECES (Laboratoire d'Études et de Contrôle de l'Environnement Sidérurgique). [Consulté le 2 avril 2019]. Disponible à l'adresse : http://www.saint-pierre-et-miquelon.gouv.fr/content/down-load/4448/27081/file/R%C3%A9sum%C3%A9%20non%20 technique.pdf.

Stitt, B.C., Burness, G., Burgomaster, K.A., Currie, S., McDermid, J.L., and Wilson, C.C., 2014. Intraspecific Variation in Thermal Tolerance and Acclimation Capacity in Brook Trout (*Salvelinus fontinalis*): Physiological Implications for Climate Change: Physiological and Biochemical Zoology, v. 87, p. 15–29. doi:10.1086/675259.

Swift DR., 1965. Effect of Temperature on mortality and rate of development of the eggs of the Pike (*Esox lucius* L.) and the Perch (*Perca fluviatilis* L.). Nature 206: 528.

Teletchea, F., 2020. De la pêche à l'aquaculture. Demain, quels poissons dans nos assiettes ? Editions Belin, Paris, 180p. ISBN 978-2701164397.

Teletchea, F., 2021. Fish domestication in aquaculture: 10 unanswered questions, v. 11, p. 87–91, doi:10.1093/af/vfab012.

Teletchea, F., & Beisel, J. N., 2018. Alien fish species in France with emphasis on the recent invasion of gobies. *Biological resources of water*, 75-92.

Teletchea, F., Fontaine, P., 2014. Levels of domestication in fish: Implications for the sustainable future of aquaculture. *Fish and* Fisheries, v. 15, p. 181-195.

Teletchea, F., Le Doré, Y., 2011. Etude sur l'élevage des carpes dites chinoises en France et plus spécifiquement sur les questions de leur hypothétique reproduction naturelle dans les cours d'eau Français, 92p.

Therrien, J., Lachance, S., 1997. Outil diagnostique décrivant la qualité de l'habitat de l'omble de fontaine en rivière au Québec – Phase I : Revue de la documentation et choix des variables. La Direction, Ministère de l'environnement et de la faune, 63p.

Thornthwaite, C.W. & Mather, J.R., 1955. The water balance. Centerton (N.J., U.S.A.), Drexel Institute of Climatology, Laboratory of Climatology, v. 8(1), p. 104.

Witzel, L.D., and MacCrimmon, H.R., 1981. Role of gravel substrate on ova survival and alevin emergence of rainbow trout, *Salmo gairdneri*: Canadian Journal of Zoology, v. 59, p. 629–636. doi:10.1139/z81-092.

Sources webographiques

Données météorologiques des stations de la province de Terre-Neuve et Labrador :
https://climat.meteo.gc.ca/historical_data/search_historic_data_f.html

Site de téléchargement des MNT SRTM30 :
https://dwtkns.com/srtm30m/

Perméabilité des tufs volcaniques et autres roches ignées :
https://coursgeologie.com/la-permeabilite-261/

Localisation des stations hydrométriques dans la province de Terre-Neuve et Labrador :
https://eau.ec.gc.ca/google_map/google_map_f.html?map_type=real_time&search_type=region&region=CAN

Graphique des données hydrométriques en temps réel pour la rivière Salmonier, proche de Lamaline (02ZG003) [NL] :
https://eau.ec.gc.ca/report/real_time_f.html?stn=02ZG003&mode=Graph&startDate=2021-04-10&endDate=2021-06-15&prm1=46&y1Max=&y1Min=&prm2=-1&y2Max=&y2Min=

Perméabilité de roches et dépôts non-consolidés parmi les tills glaciaires et les silts :
http://hydrogeologistswithoutborders.org/wordpress/1979-francais/chapitre-2/.

Rapport du Conseil Exécutif à la Collectivité Territoriale :
https://jo-spm.fr/doc_jo/DELIB2019-0108.pdf

Site du Géoservice IGN :
https://geoservices.ign.fr

Site de Météo France :
https://meteofrance.com

Répartition mondiale des habitats colonisés par *Salvelinus fontinalis* :
https://www.cabi.org/isc/datasheet/65325#toDistributionMaps

Climat SPM :
https://www.climatsetvoyages.com/climat/st-pierre-et-miquelon

Application pour le calcul de l'ETP mensuelle Thornthwaite :
https://www.geograchid.com/2020/01/application-pour-le-calcul-de-letp.html

Fiche Excel pour calculer l'ETR annuelle par la méthode de Turc :
https://www.geograchid.com/2020/01/feuille-excel-calcul-ETR-TURC.html

Site du GéoSPM :
https://www.geospm.com/accueil

Site de josmose (solides dissous totaux) :
https://www.josmose.fr/blog/5-la-tds-c-est-quoi-

Site de Lenntech (conductivité de l'eau) :
https://www.lenntech.fr/applications/ultrapure/conductivite/eau-conductivite.htm

GIEC, [consulté le 11 août 2021] :
https://www.novethic.fr/actualite/environnement/climat/isr-rse/rapport-du-giec-cinq-chiffres-marquants-sur-le-rechauffement-climatique-et-ses-consequences-150066.html

Site de l'URAFPA :
https://www.urafpa.fr/index.php/thematiques/detail/1

Liste des sigles et abréviations

A2F
Agronomie, agroalimentaire, forêt

BRGM
Bureau de recherches géologiques et minières

CMA
Crue moyenne annuelle

CT
Conseil territorial

DAC
Domestication en aquaculture continentale

DTAM
Direction des territoires, de l'alimentation et de la mer

EFABA
Écosystème forestier, agroressources, bioprocédés et alimentation

EMA
Étiage moyen annuel

ETP
Évapotranspiration potentielle

ETR
Évapotranspiration réelle

FAO
Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

FTPSPM
Fédération territoriale de la pêche et de la protection des milieux aquatiques de l'archipel de Saint-Pierre et Miquelon

GIEC
Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

IGN
Institut national de l'information géographique et forestière

INRAE
Institut nationale de la recherche agronomique

INRS
Institut national de la recherche scientifique

MNT
Modèle numérique de terrain

NGF
Nivellement général de la France

OFB
Office français de la biodiversité

Q_{50} août
Débit médian du mois d'août

Q_{50} septembre
Débit médian du mois de septembre

QMA
Débit moyen annuel

QMP
Débit moyen sur une période

SIG
Systèmes d'informations géographiques

SPM
Saint-Pierre et Miquelon

SRTM
Shuttle radar topography mission

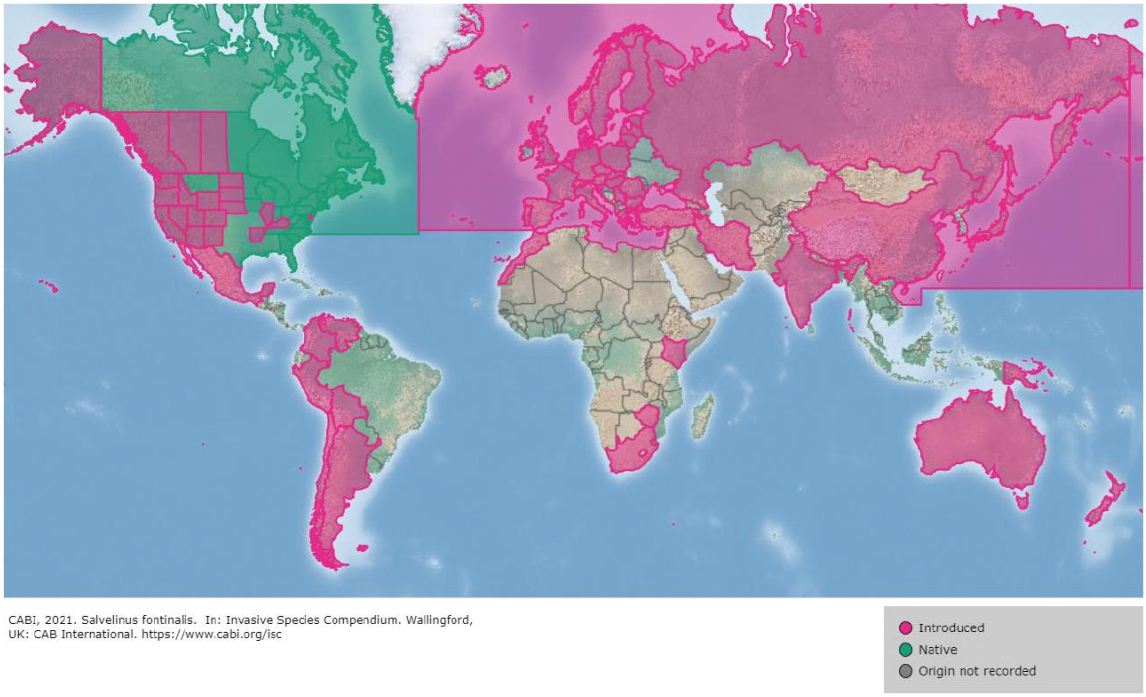
TDS
Total des solides dissous

TNL
Terre-Neuve et Labrador

UL
Université de Lorraine

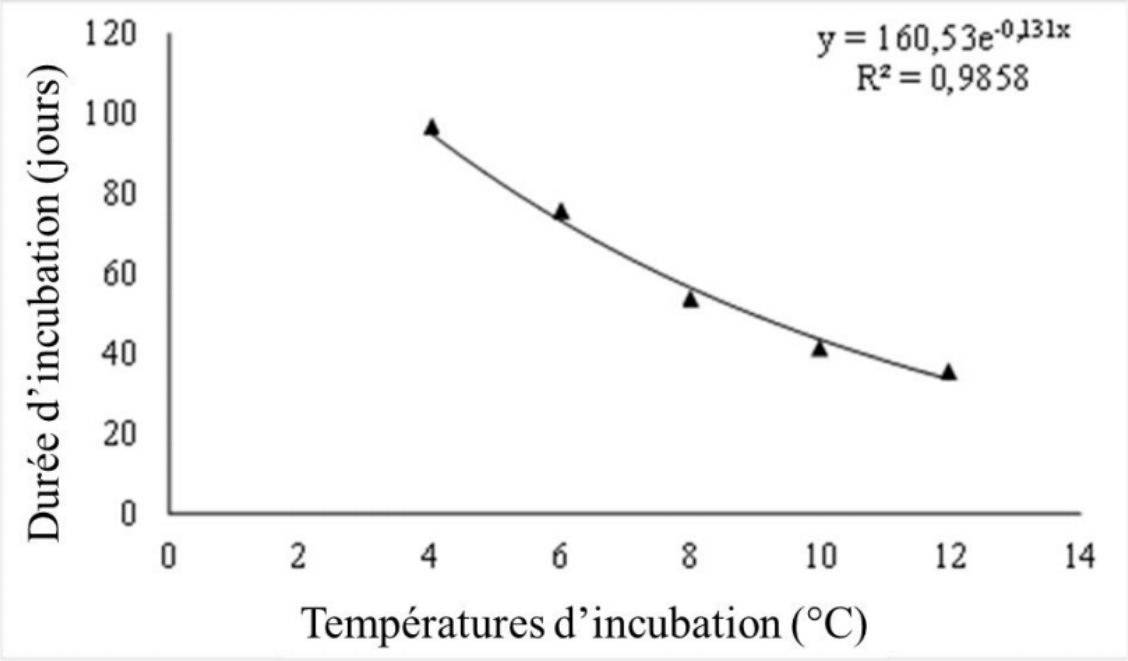
URAFPA
Unité de recherche animal et fonctionnalités des produits animaux

Annexes

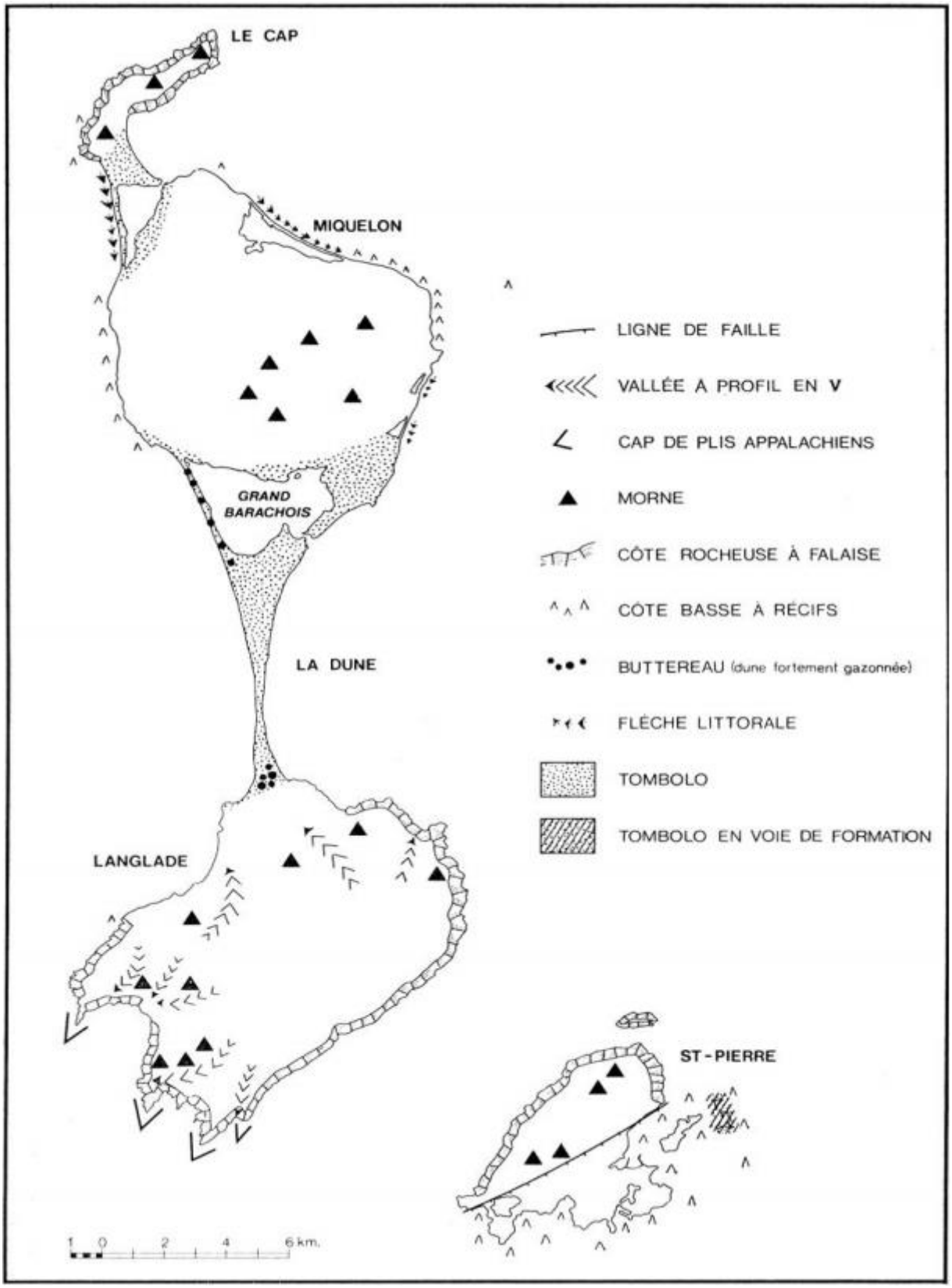


Annexe 1. Répartition mondiale des principales zones d'habitats de l'omble de fontaine. Source : https://www.cabi.org.

Annexe 2. Omble de fontaine de mer (grisée) et omble de fontaine de ruisseau (colorée) au ruisseau de la Mère Durand (Miquelon). Edgard Gustave, 09/06/2021.



Annexe 3. Effet de la température (de 4 à 12°C) sur la durée d'incubation des œufs – exemple de l'omble chevalier (Salvelinus alpinus). Sources : Swift (1965), Réalis-Doyelle (2016).



Annexe 4. Croquis des structures géomorphologiques de Saint-Pierre et Miquelon. Source : Sanguin (1981).

Le ruisseau de la Belle Rivière est le principal cours d'eau de l'archipel. Son linéaire s'écoule du Sud vers le Nord sur une distance de 15,5 km, en suivant une pente moyenne de 1,2%. Il présente également un bassin versant topographique relativement grand (21,29 km^2). Une telle surface de drainage suggère une forte concentration du ruissellement à l'échelle de SPM, faisant de ce bassin un remarquable générateur de crue par temps de précipitations intenses (Preynat, 2013).

La Belle Rivière incise un substrat rocheux de type protolithique (roche mère) sur plusieurs centaines de mètres qui, couplé à un lit mineur peu marqué, offrent très peu d'abris et de lieux de fraies aux ombles de fontaine. En conséquence, la population salmonicole dispose d'une faible diversité des habitats, et donc d'une moindre capacité d'accueil, notamment durant la période estivale où la plupart des ruisseaux sont proches de l'assèchement (Preynat, 2013).

L'embouchure du ruisseau se connecte à la mer au niveau d'un lambeau morainique (banc de galets) mobile. L'infiltration de l'eau douce et d'alluvions dans la baie du Gouvernement (partie aval du fleuve) a un impact bénéfique sur la qualité chimique du milieu (Preynat, 2013). La faune et la flore s'y développent facilement en raison d'un meilleur apport en nutriments (zooplancton, invertébrés, …) et d'une multitude de caches écologiques. Cette zone, comparable à un sas d'adaptation entre deux environnements chimiques opposés, est un passage obligé pour les populations anadromes.

Description de l'unité de gestion				
Réseau hydrographique (Cours d'eau)	Limite amont	Limite aval	Longueurs cumulées (m)	Réserve de pêche
Ruisseau de la Belle Rivière	Sources	Océan	15 500	
Ruisseau des Mats	Source	Belle Rivière	2300	Totale sur le ruisseau

Réseau hydrographique (Plans d'eau)			Surface (Ha)	Réserve de pêche
Etang du Goéland			7,69	
Etang du Lingard			4,7	
Etang Bourroult			2,8	
Etang des Nègres			4,0	
Etang de Lescamela			4,4	
Etang des Huit			2,6	
Etang des Fourches			13,2	

Annexe 5. Description des masses d'eau présentes au sein du bassin versant de la Belle Rivière. Source : Preynat, 2013.

Le ruisseau de Savoyard est le principal cours d'eau de l'île de Saint-Pierre. Long d'environ 3 km pour une pente moyenne de 3,66%, il draine le bassin le plus étendu du secteur (3,58 km^2), du Nord-Est au Sud-Ouest. Prenant sa source près de la ville de Saint-Pierre (capitale de l'archipel), le cours d'eau se développe sur un terrain majoritairement urbanisé. Mais il n'en reste pas moins le ruisseau le plus productif en terme piscicole, au même titre que le ruisseau de Terre Grasse (île de Miquelon ; Preynat, 2013).

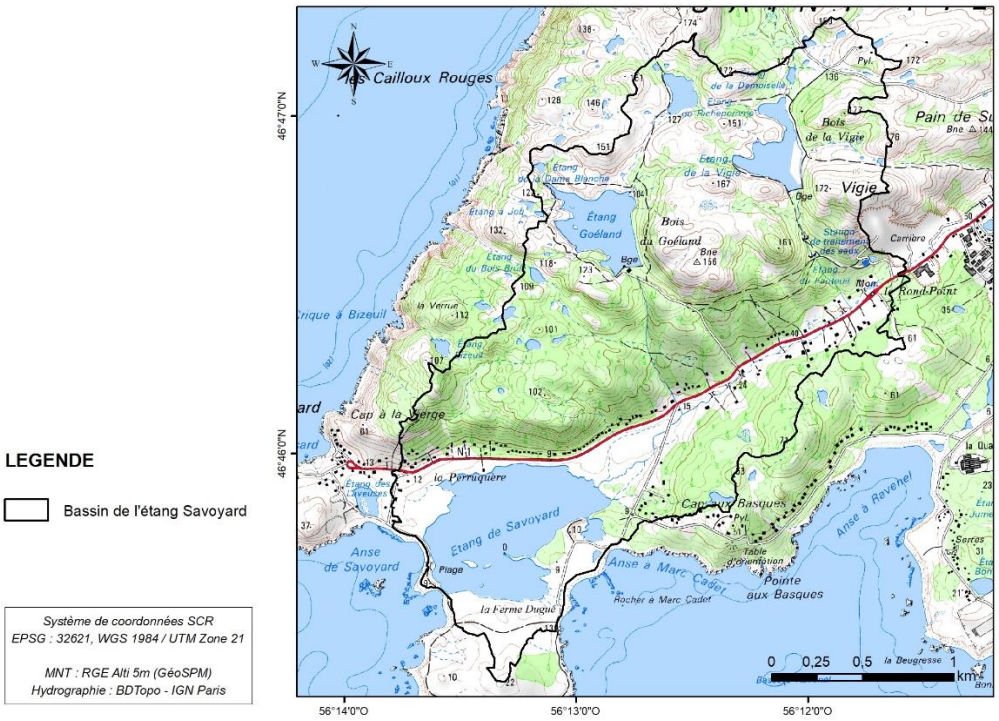
Le changement d'intensité des débits entre les crues et les périodes d'étiages est radical. Les épisodes de fortes pluies entrainent des débordements du lit majeur qui mettent en danger les habitations des riverains. La puissance générée par ces inondations apporte des éléments grossiers (particules de type graviers et blocs) dans le fond du lit qui profitent au développement de l'espèce prépondérante qu'est l'omble de fontaine (Preynat, 2013).

Formé d'un lit mineur d'un mètre de large, le ruisseau traverse des plaines tourbeuses avant de se déverser dans l'étang Savoyard (48,8 ha d'étendue d'eau pour 5,36 km^2 de surface de bassin versant). Une connexion avec la mer est envisageable au travers de la flèche littorale (banc de galets). La diversité des écoulements, la quantité de frayères et les nombreux abris sous-berges font de cette rivière un milieu propice à la réussite du cycle de vie des salmonidés (Preynat, 2013). Aucun obstacle n'entrave la migration des géniteurs, mais le lit mineur est bétonné sur un tronçon amont de 50 m. La pente augmente progressivement vers la source, et les seuils naturels précédant les barrages de la Vigie et du Goéland deviennent infranchissables.

Description de l'unité de gestion				
Réseau hydrographique (Cours d'eau)	Limite amont	Limite aval	Longueurs cumulées (m)	Réserve de pêche
Ruisseau de Savoyard	Barrage de la Vigie	Etang de Savoyard	2940	Totale sur le ruisseau
Ruisseau du Goéland	Barrage du Goéland	Ruisseau de Savoyard	996	Totale sur le ruisseau
Ruisseau du Bois Brulé	Etang du Bois Brulé	Ruisseau de Savoyard	1337	Totale sur le ruisseau
Affluent rive droite	Source	Ruisseau de Savoyard	797	Totale sur le ruisseau

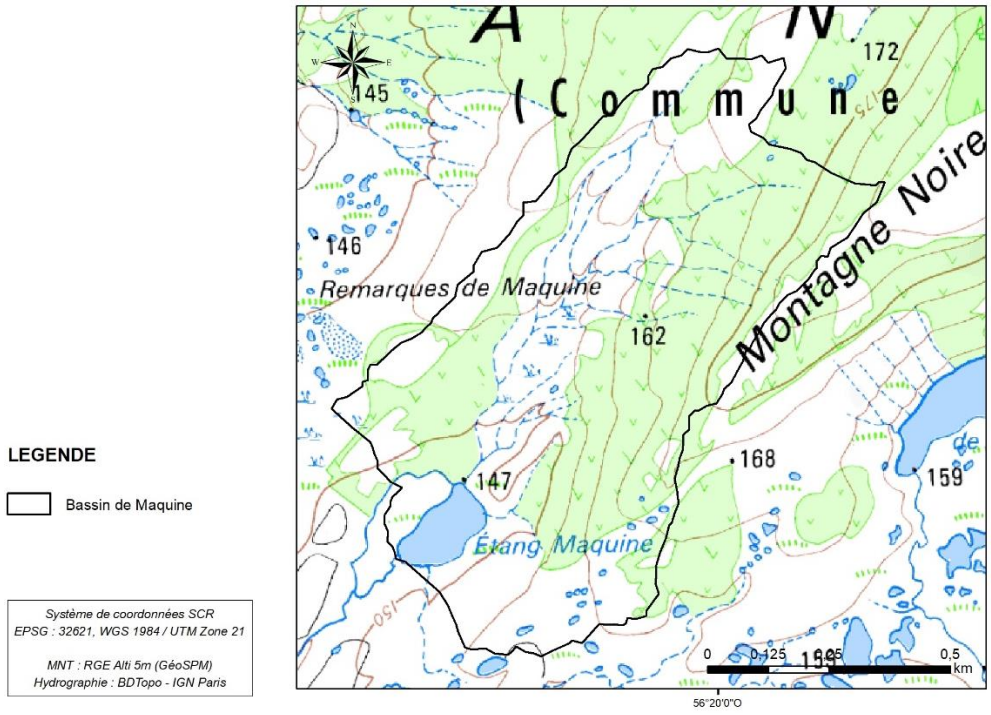
Réseau hydrographique (Plans d'eau)			Surface (Ha)	Réserve de pêche
Etang de Savoyard			48,8	Domaine Public Maritime
Etang du Bois Brulé			0,43	
Marais Dugué			1,15	

Annexe 6. Description des masses d'eau présentes au sein du bassin versant du ruisseau Savoyard. Source : Preynat, 2013.

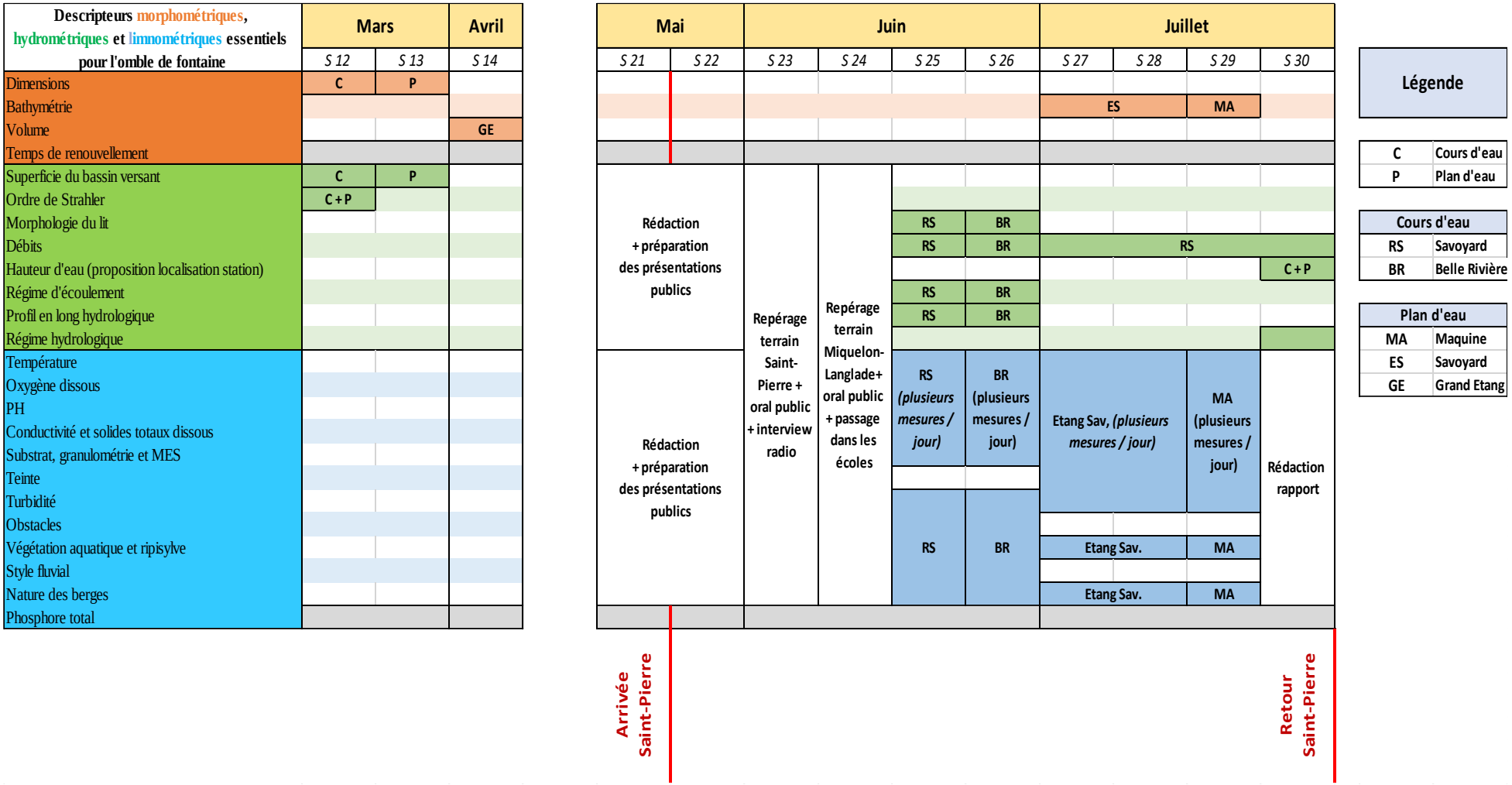


Annexe 7. Bassin versant topographique de l'étang de Savoyard.

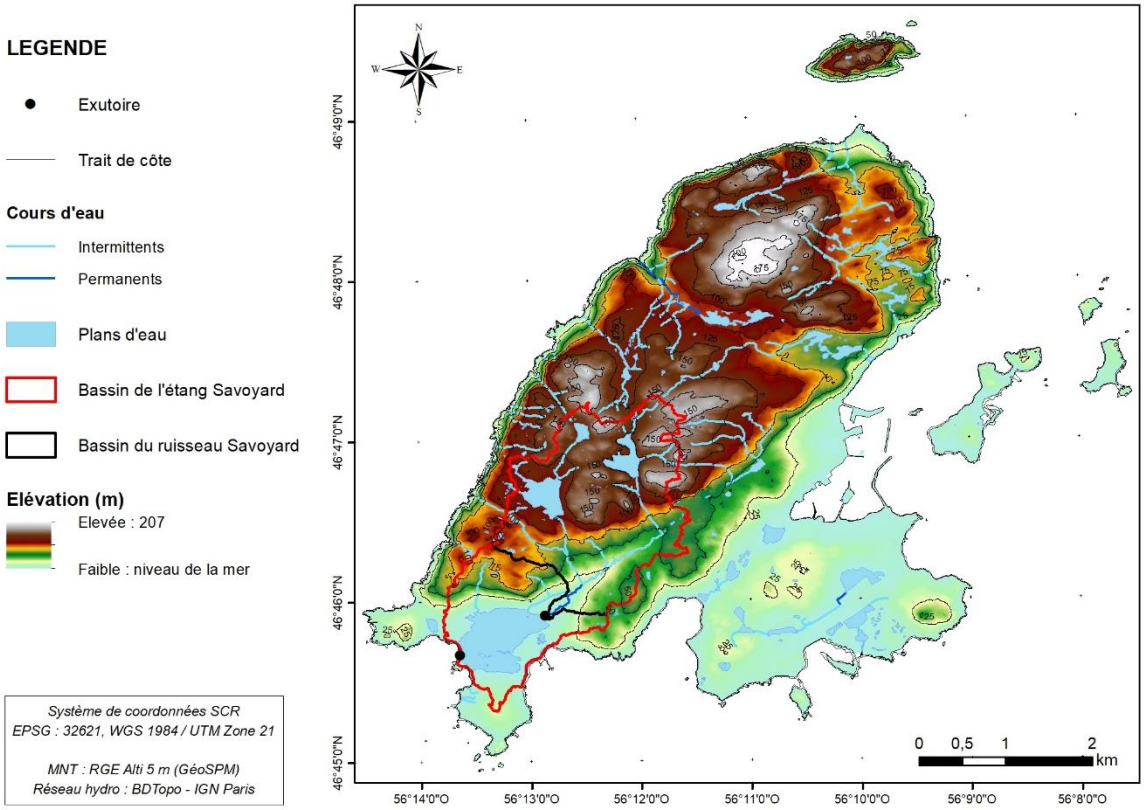
L'étang de Maquine possède un bassin versant topographique de 0,69 km^2 pour une étendue d'eau de 1,74 hm^2. Il fait partie du réseau hydrographique ouest de Langlade. Quatre cours d'eau se jettent dans l'Anse du Sud-Ouest, parmi lesquels les deux ruisseaux de Maquine. Ils prennent leurs sources dans les plaines tourbeuses et s'écoulent de manière plus ou moins rectiligne au fond des vallées encaissées. Le Deuxième Ruisseau Maquine, incluant l'étang, présente sans doute la vallée la plus profonde et escarpée de l'archipel (Aubert de la Rüe, 1937).



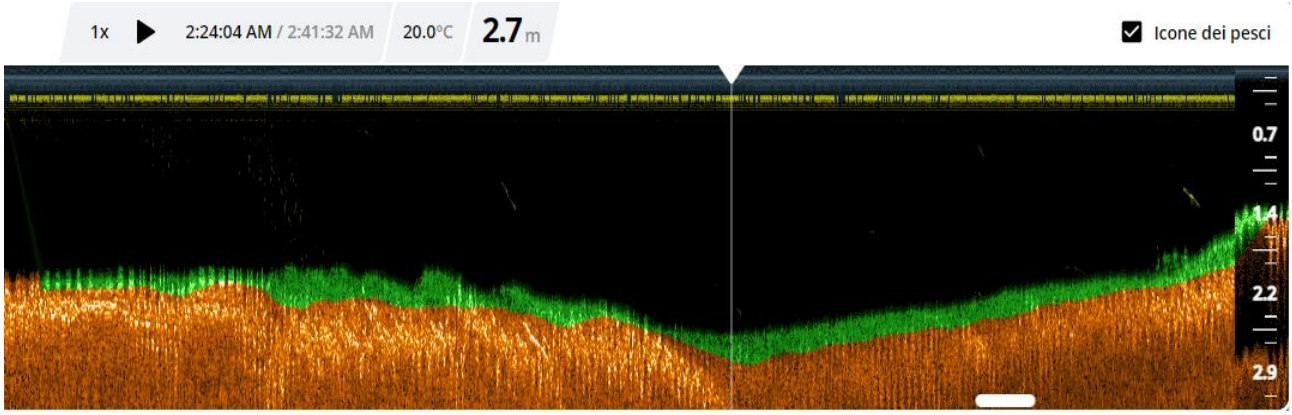
Annexe 8. Bassin versant topographique de l'étang de la Maquine.



Annexe 9. Chronogramme de la préparation à la campagne de terrain sur l'archipel de Saint-Pierre et Miquelon.

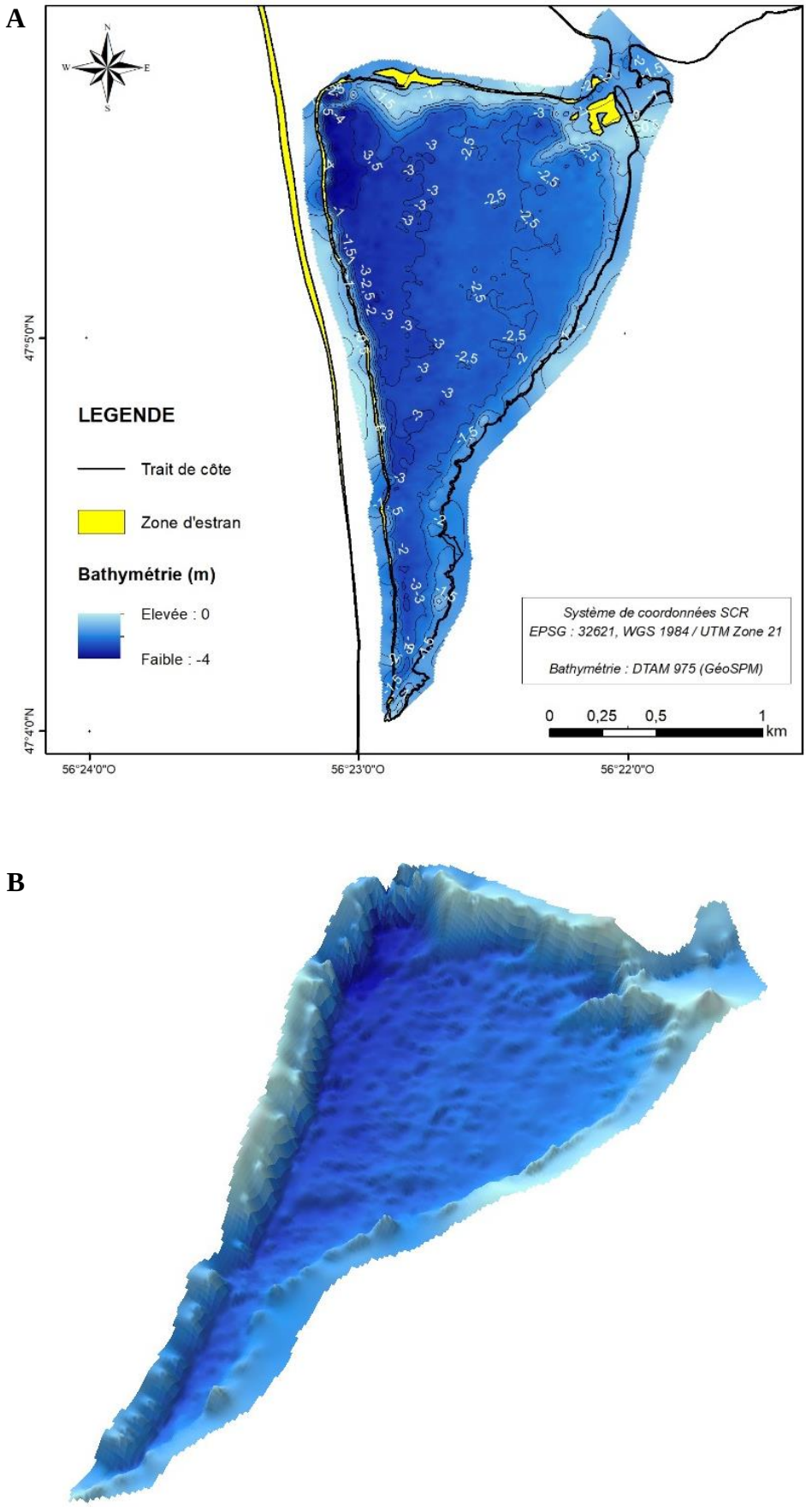


Annexe 10. Carte topographique et hydrographique de l'île de Saint-Pierre, incluant les bassins versants de l'étang Savoyard (contour rouge) et du ruisseau Savoyard (contour noir).

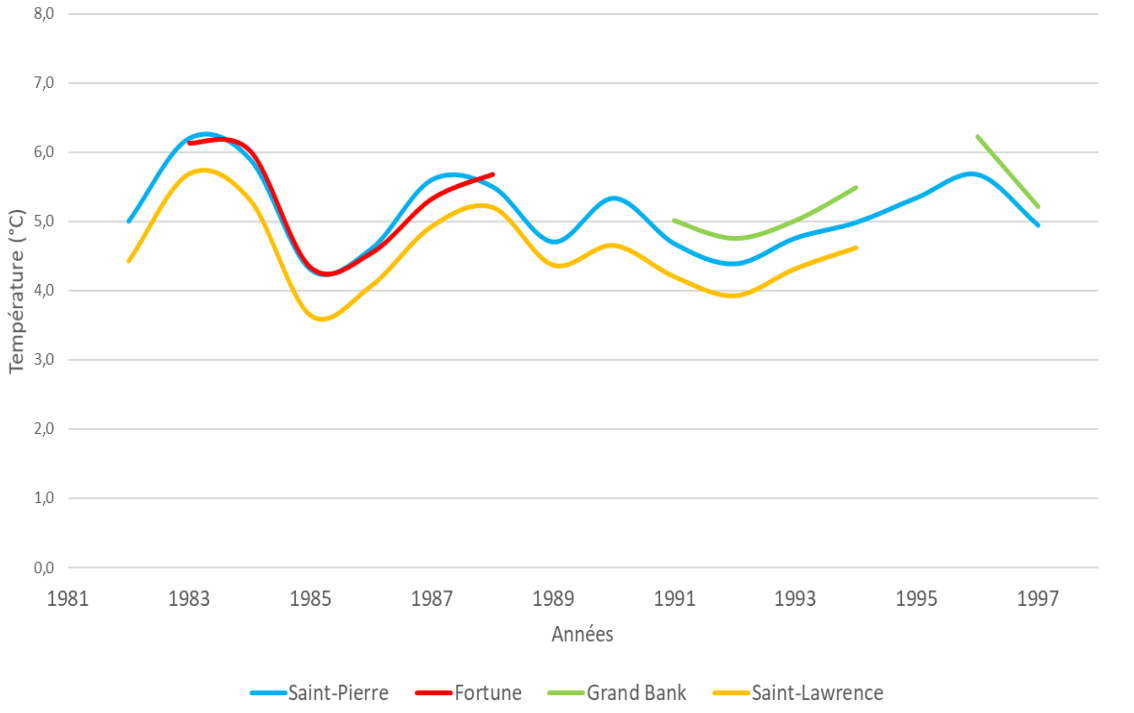


Annexe 11. Exemple de sonogramme généré par le Deeper Chirp +. Ce graphique 2D représente la profondeur bathymétrique au cours du temps, suivant le trajet parcouru (de gauche à droite). Ici, le relief vert renseigne sur l'épaisseur d'une couche meuble (par exemple de la vase ou des végétaux aquatiques), tandis que le fond marron désigne un substrat plus consolidé (peut-être rocheux) et qui sera désigné en tant que « vrai fond bathymétriques » lors des relevés.

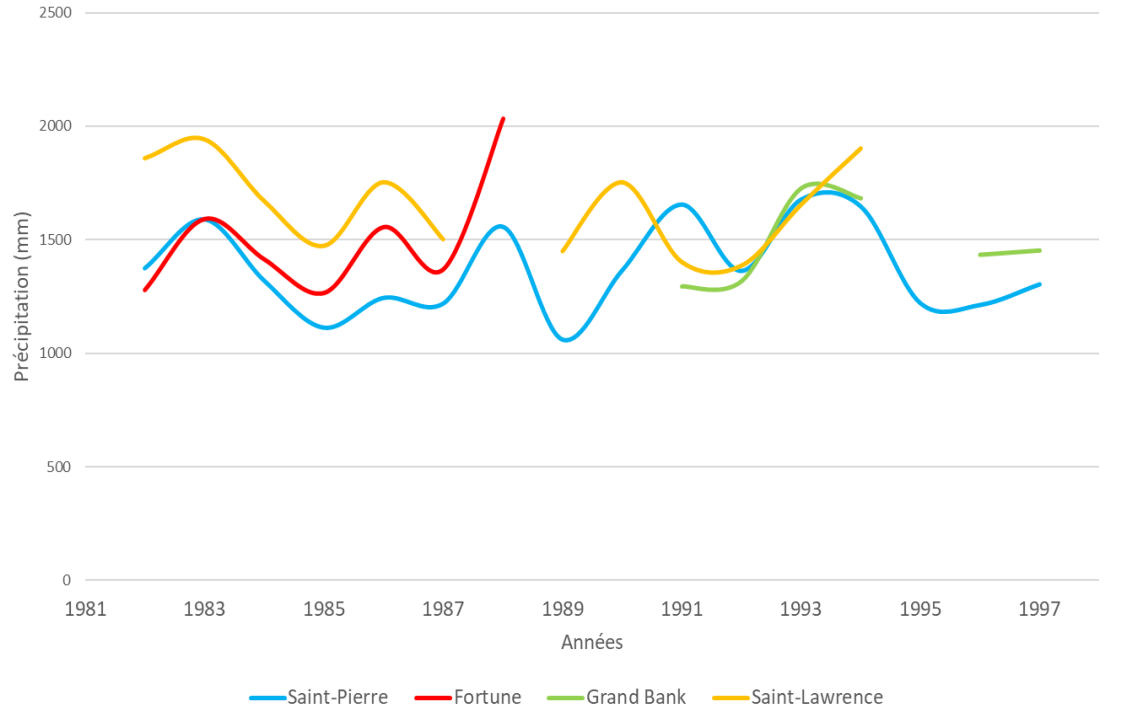
Annexe 12. Echosondeur Deeper Chirp + utilisé durant la campagne.



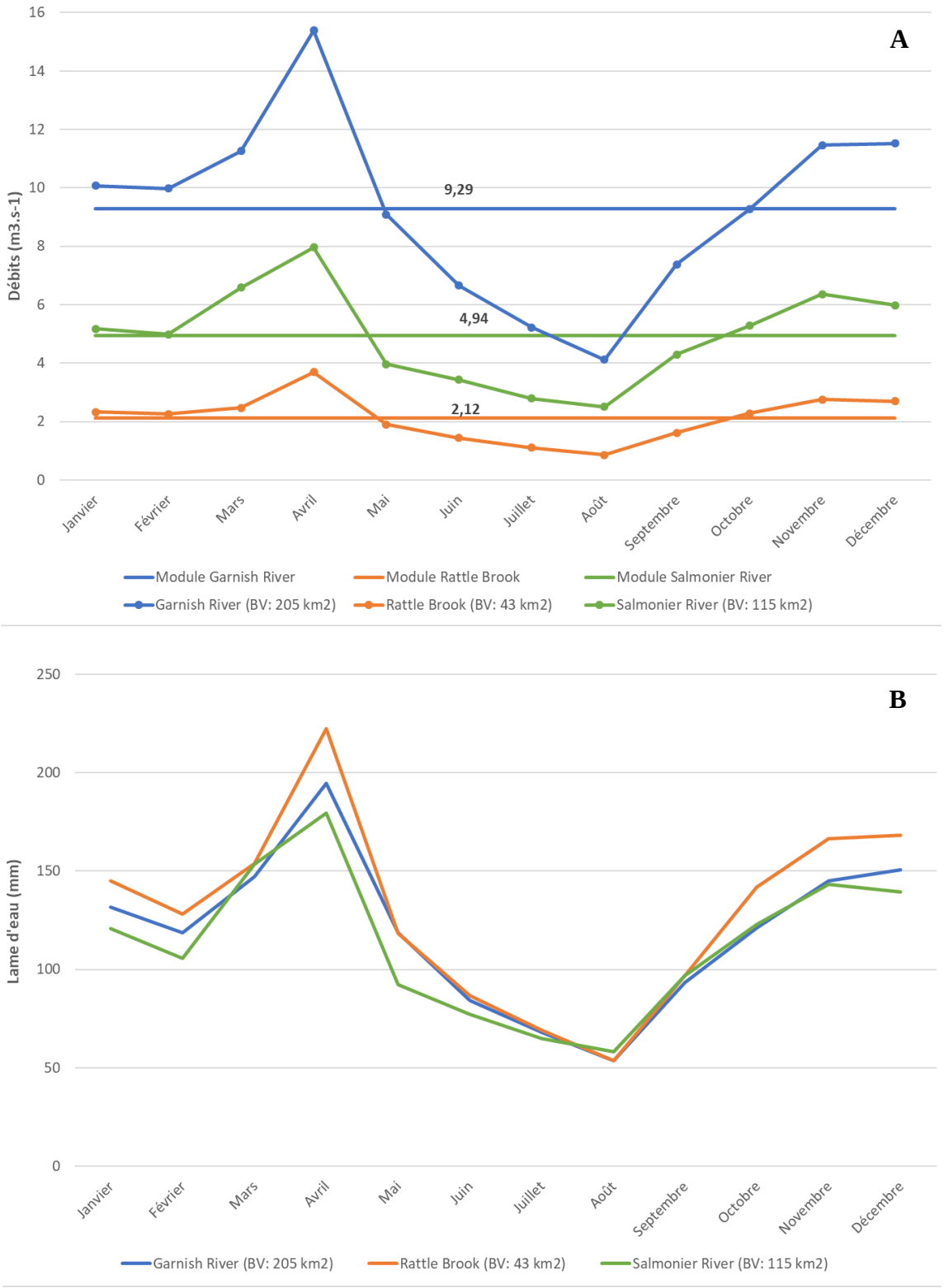
Annexe 13. Bathymétrie du Grand Etang de Miquelon ; A) en format carte, et B) en modèle 3D. Source : DTAM 975 (GéoSPM).



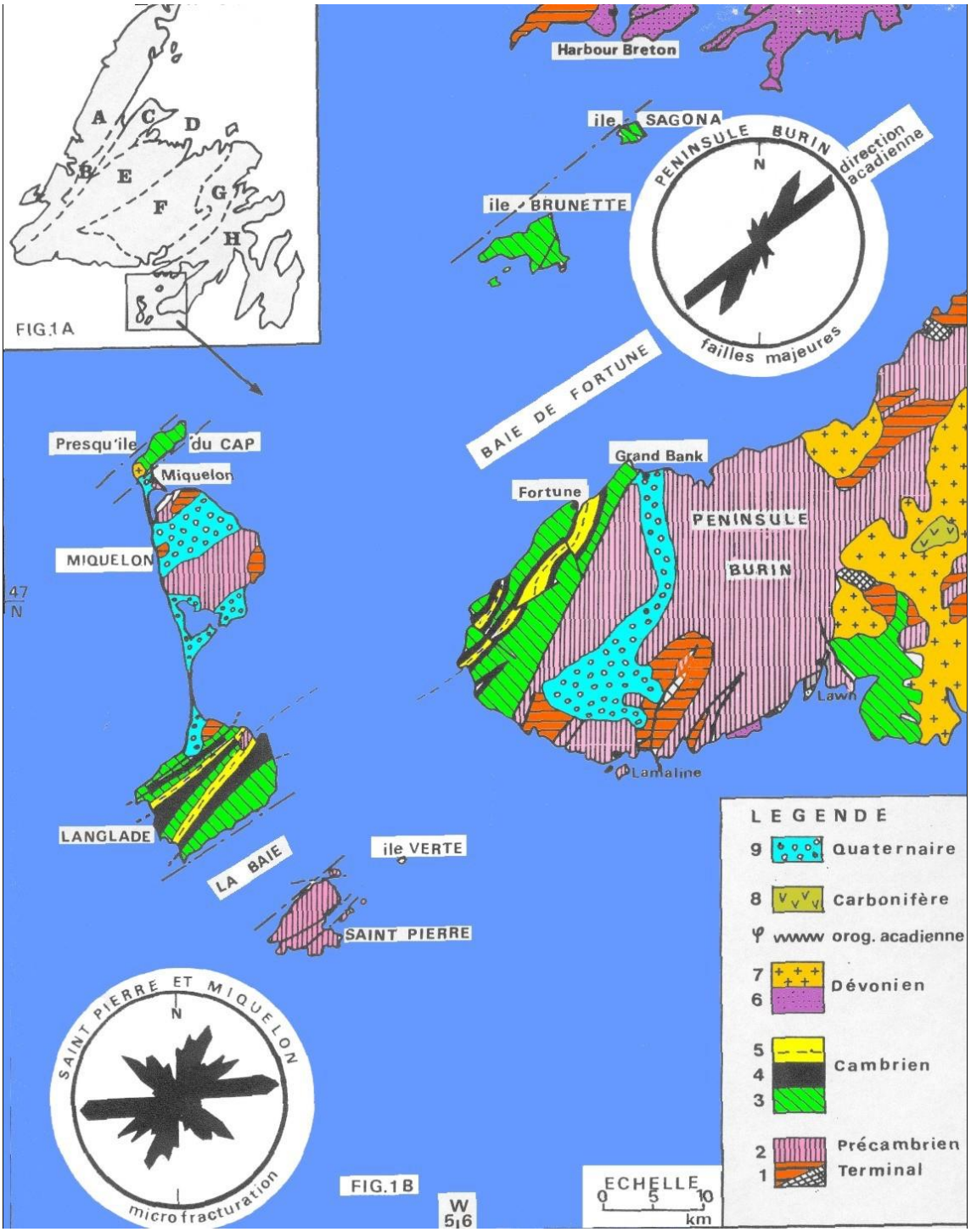
Annexe 14. Températures moyennes interannuelles (1982-1997) à Saint-Pierre, et relevés au niveau de trois stations météorologiques terre-neuviennes voisines. Sources : Météo France (Saint-Pierre) & Canada.ca (Fortune, Grand Bank.et Saint-Lawrence).



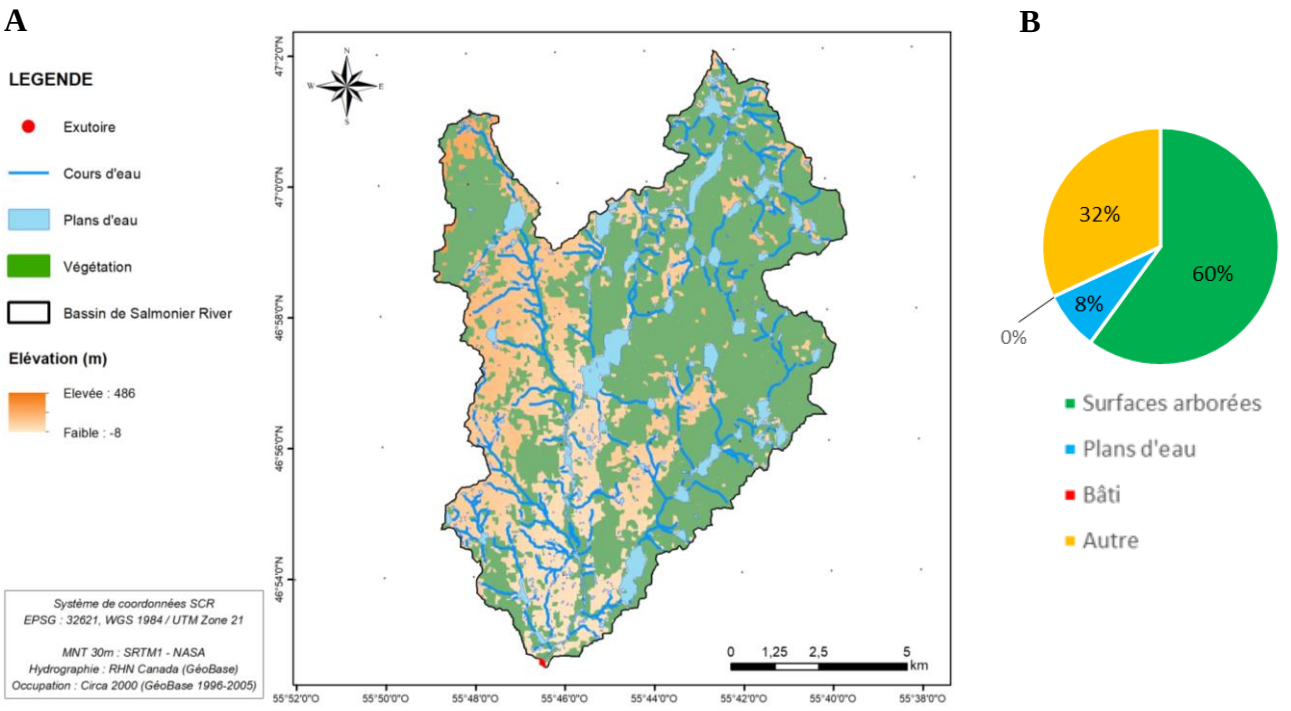
Annexe 15. Précipitations interannuelles (1982-1997) à Saint-Pierre, et relevés au niveau de trois stations météorologiques terre-neuviennes voisines. Sources : Météo France (Saint-Pierre) & Canada.ca (Fortune, Grand Bank.et Saint-Lawrence).



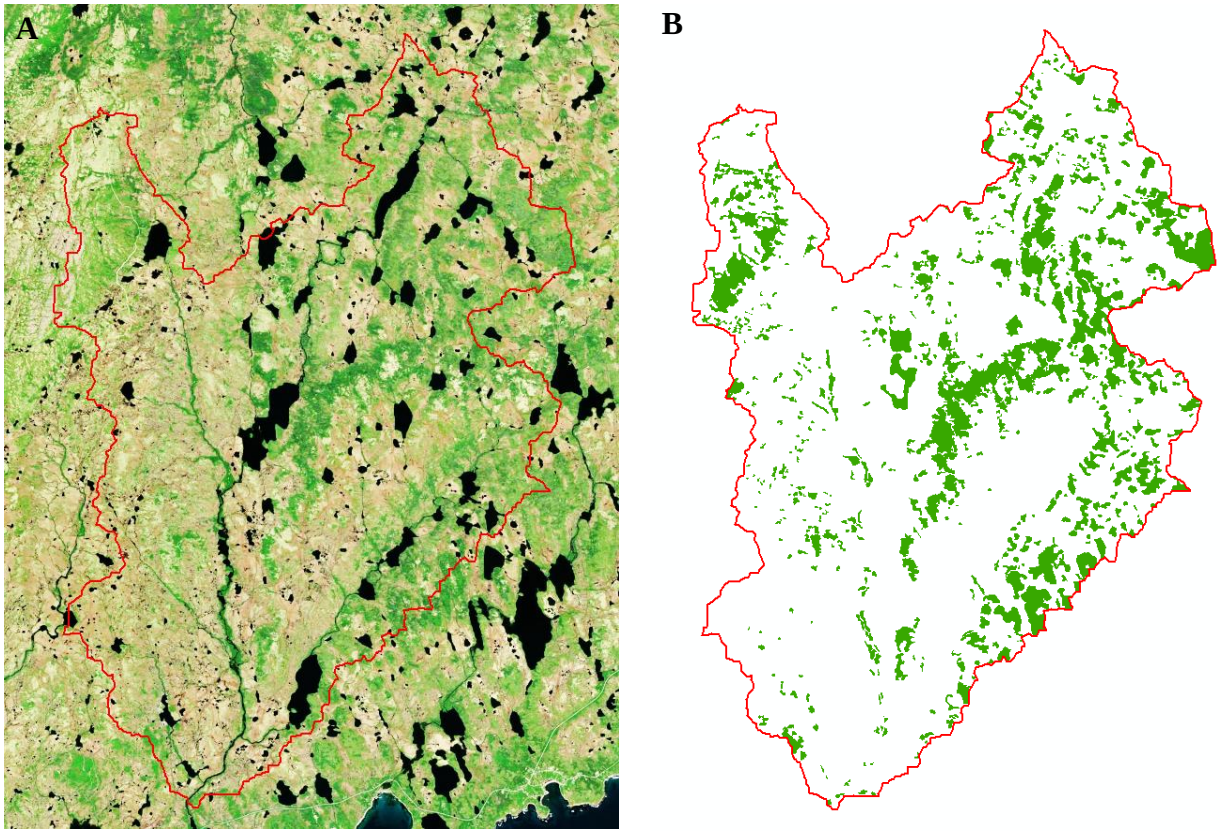
Annexe 16. Régimes hydrologiques des trois rivières terre-neuviennes proches de Saint-Pierre et Miquelon (période 1980-2019) ; A) résultats affichés en débits, et B) résultats affichés en lame d'eau.



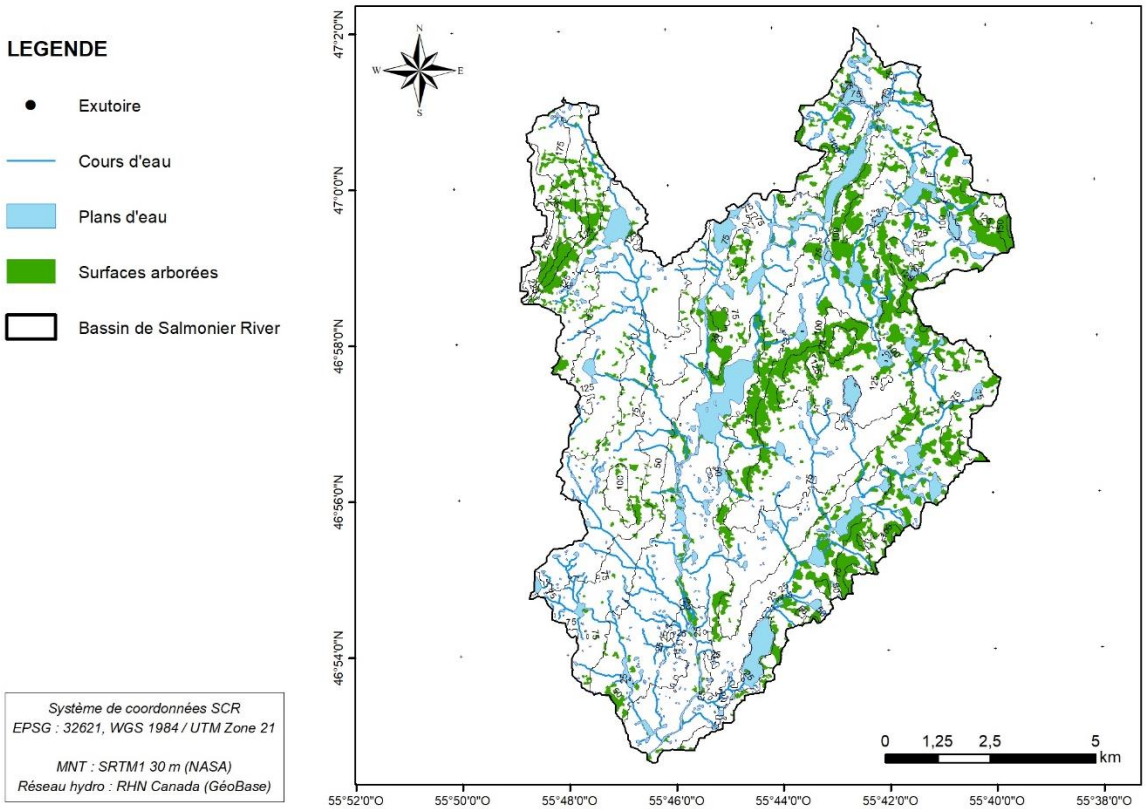
Annexe 17. Carte géologique simplifiée de la région de SPM et de la péninsule de Burin. Lithologie : 1 : basaltes, gabbros ; 2 : rhyolites, tufs, ignimbrites et pyroclastites rhyolitiques ; 3 : phyllades grises à vertes ; 4 : quartzites ; 5 : shistes noirs ; 6 : shistes et grès ; 7 : granites de St-Lawrence et du Cap ; 8 : rhyolites de Burin ; 9 : dépôts glaciaires, moraines et tourbières ; φ : phase orogénique acadienne / calédonienne. Source : Aubert de la Rüe, 1951 ; O'Brien et al., 1977.



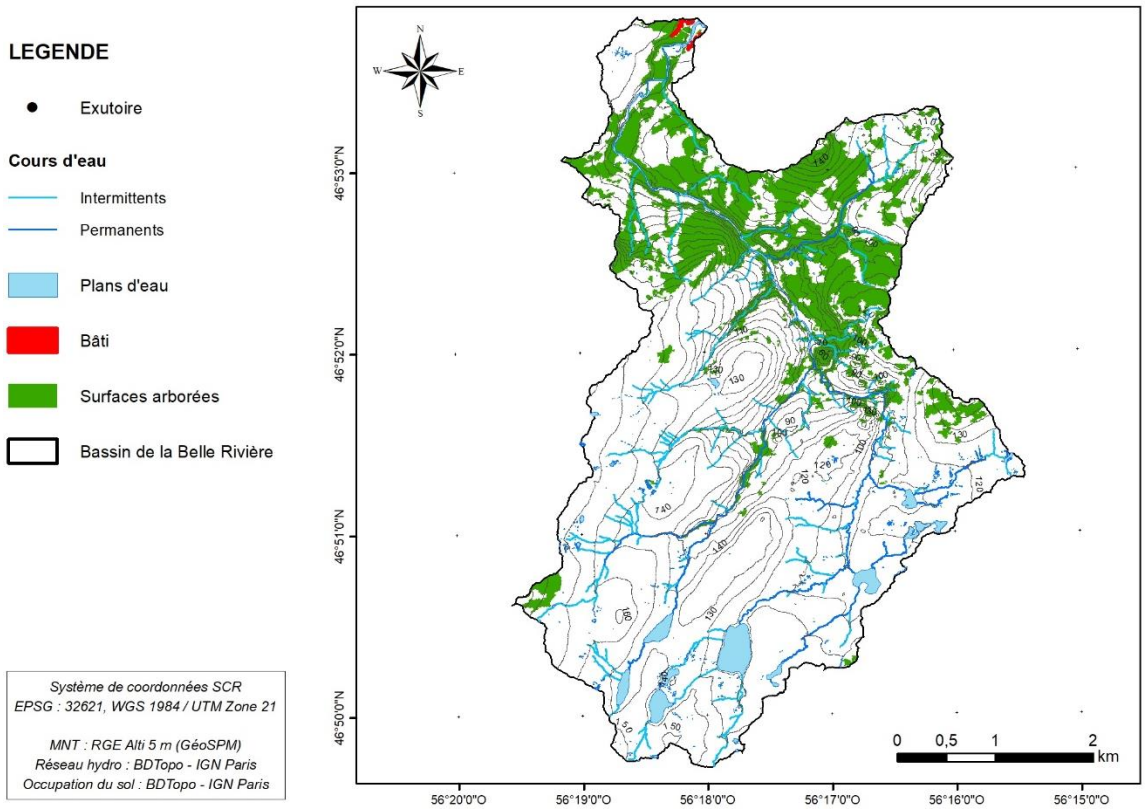
Annexe 18. Occupation des sols du bassin versant de la rivière Salmonier ; A) en format carte, et B) en format diagramme. La couverture végétale est tirée de la banque de données canadiennes (Circa 2000).



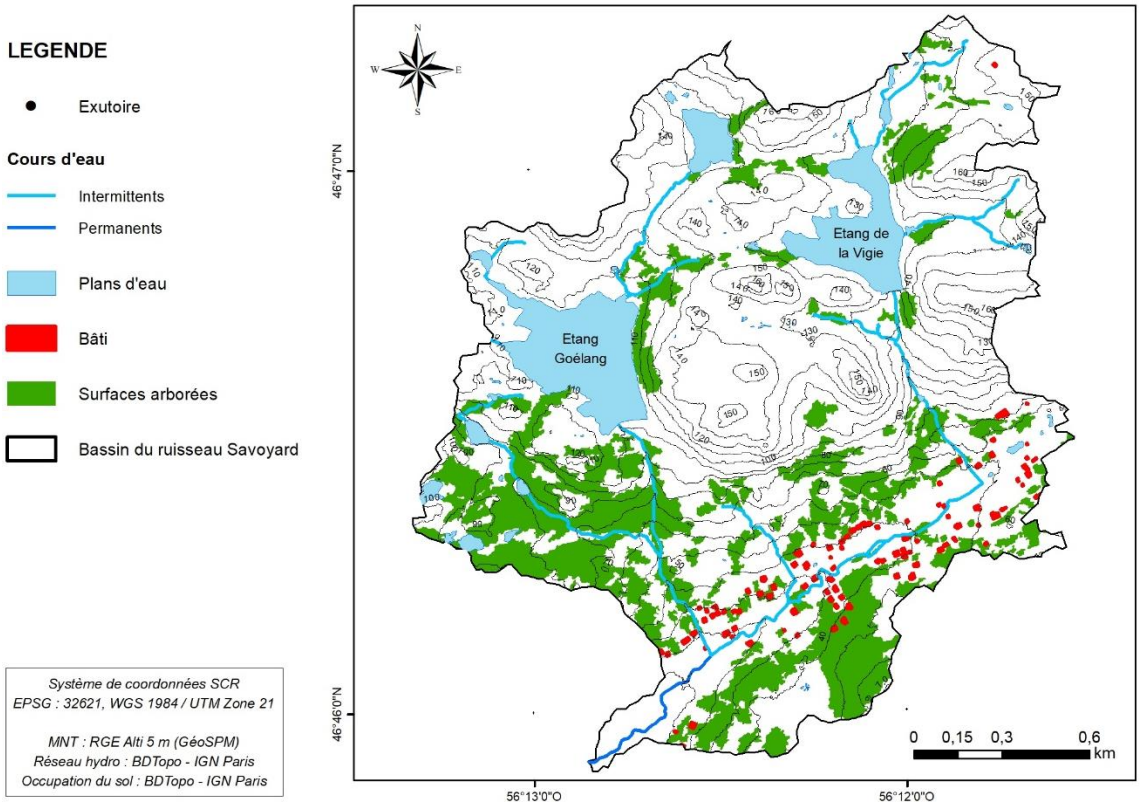
Annexe 19. Extraction de la végétation arborée du bassin de la rivière Salmonier ; A) d'une orthophotographie (2017), à B) une modélisation manuelle.



Annexe 20. Carte de l'occupation des sols (végétation numérisée à la main) du bassin versant de la rivière Salmonier (Terre-Neuve).



Annexe 21. Carte de l'occupation des sols du bassin versant du ruisseau de la Belle Rivière (Langlade).

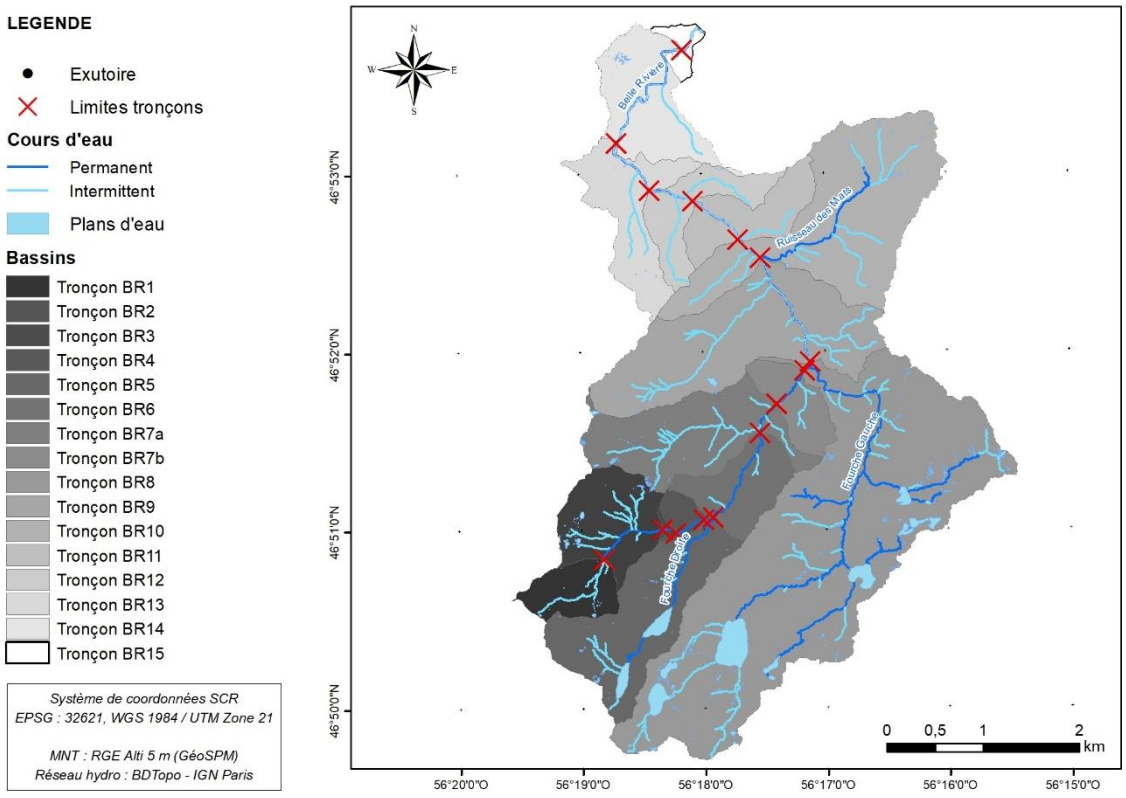


Annexe 22. Carte de l'occupation des sols du bassin versant du ruisseau de Savoyard (Saint-Pierre).

Rivière	Indice de compacité	Densité de drainage	Pente moyenne	Altitude moyenne
Belle Rivière	1,74	3,15 m^{-1}	5,38°	109,35 m
Savoyard	1,65	2,76 m^{-1}	8,82°	98,52 m
Salmonier	1,83	1,06 m^{-1}	2,89°	81,77 m

Annexe 23. Paramètres géographiques des bassins versants des ruisseaux étudiés.

Annexe 24. Maniement de la perche courantométrique MF Pro sur une section de la Belle Rivière. Edgard Gustave, 25/06/2021.



Annexe 25. Carte des sous-bassins versants du ruisseau de la Belle Rivière définis à partir des tronçons étudiés.

Distance totale (m)	Typologie physique simplifiée	Eco-région	Perméabilité	Pente du cours d'eau (‰)	Confluences	Tronçons abiotiques	Occupation du sol	Découpage terrain	Longueur (m)
0,00	T5	Langlade	Siltites et grès argileux	19		BR 1	Landes, tourbes, lickens et arbustes	BR 1	1225
1225,00									
2050,00			Siltites-argilites et calcaires noduleux			BR 2		BR 2	825
2200,00	T1			100		BR 3		BR 3	150
2526,00	T2			24		BR 4		BR 4	326
2662,00			Siltites et grès argileux			BR 5		BR 5	136
3825,00					Fourche Droite	BR 6		BR 6	1163
4216,00			Siltites-argilites et calcaires noduleux			BR 7		BR 7a	391
4700,00							Surfaces arborées	BR 7b	484
4833,00				9		BR 8		BR 8	133
6104,00	T3				Fourche Gauche	BR 9		BR 9	1271
6415,00					Ruisseau des Mats	BR 10		BR 10	311
7064,00			Quartzite			BR 11		BR 11	649
7539,00			Siltites-argilites et calcaire noduleux			BR 12		BR 12	475
8215,00			Conglomérats, grès volcanoclastiques et argilites			BR 13		BR 13	676
9820,00			Basaltes vésiculés			BR 14		BR 14	1605
10200,00	T6					BR 15	Batis	BR 15	380

Annexe 26. Découpage du ruisseau de la Belle Rivière en tronçons homogènes à partir de la méthode Qualphy. La distance totale du linéaire est comptée à partir de la source. La typologie est spécifiée à l'aide de la fiche descriptive en annexe 27.

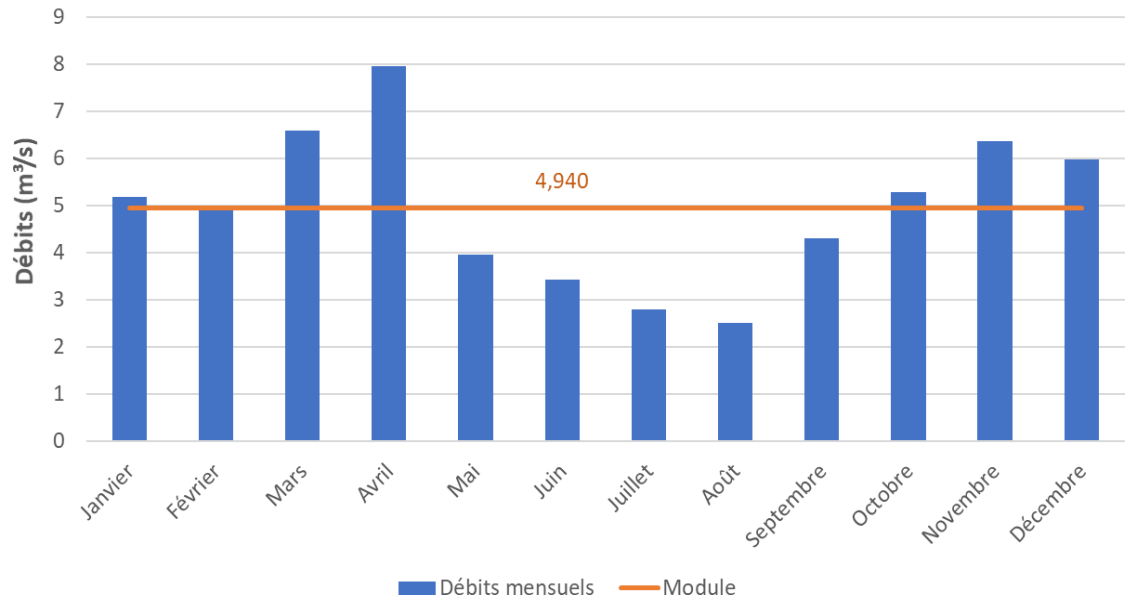
TYPES OBSERVES n° et nom du type	T1 cours d'eau et torrents de montagne	T2 moyennes vallées des Vosges cristallines	T2 bis hautes et moyennes vallées des Vosges gréseuses	T3 cours d'eau sur Piémont	T4 cours d'eau de côtes calcaires et marno-calcaires	T4 bis cours d'eau sur schistes ardennais	T5 basses vallées de plateaux calcaires	T6 cours d'eau de plaines argilo-limoneuses	T6 bis collines argilo-limoneuses	T6 ter cours d'eau sur cailloutis ou alluvions sablo-graveleuses	T7 cours d'eau phréatiques
GEOLOGIE	cristallin métamorphique	cristallin métamorphique	grès	variée non morphogène	calcaire marno-calcaire	schistes	basses vallées de plateau calcaire	argiles et limons remaniés	collines argilo-limoneuses	cailloutis du Sundgau ou glacis sablo-graveleux de Haguenau	alluvions ello-rhénanes héritées
PENTE (forte, moyenne, faible) valeur	forte à très forte	moyenne à forte	faible excepté en amont	moyenne « rupture de pente en amont »	moyenne à faible	moyenne à faible	faible	très faible	moyenne à faible	moyenne	faible
Vallée (V - U - gorges - plaine)	« V »	« U »	encaissée souvent en gorge	cône alluvial	très encaissée « V » puis « U » en gorge	très encaissée gorges	« U » large	plaine d'accumulation	« V » ouvert	" V " ouvert à " U " étroit	glacis (cône) alluvial du Rhin
LIT MAJEUR											
Largeur	quasi-inexistant	modeste	étroit	élargissement	très étroit	très étroit	étroit à large	très large	étroit	étroit	-
Annexes hydrauliques (présence, abondance, type)	absentes	absentes	absentes	nombreuses	absentes	absentes	peu nombreuses	nombreuses	très rares	rares	absentes
Relations nappe : infiltration ou alimentation dominante (faible, moyen, fort)	très faible	très faible	très faible	forte	forte	faible	forte	faible	faible	variable (cailloutis)	très forte relation avec l'aquifère principale
Hydrologie (Q régulier, Q variable)	variable	variable	régulier	variable	assez régulier	assez régulier	régulier	régulier	variable	assez régulier	très régulier
LIT MINEUR											
largeur / profondeur	faible	moyenne	faible	moyenne à importante	moyenne	moyenne à importante	moyenne à importante	forte à importante	faible à très faible	moyenne à très faible	faible à très faible
Style fluvial, (rectiligne, sinueux, tresses, anastomoses, méandres confinés, méandres tortueux)	rectiligne	sinuosité légère	méandres confinés	tresses anastomoses méandres actifs	sinueux à méandres confinés	méandres encaissés	méandres légèrement confinés	méandres tortueux	rectiligne à méandreux	rectiligne à extrêmement méandreux	rectiligne sinueux
Faciès d'écoulement dominants (type, répartition)	cascades/ fosses	plat courant	plat courant	plat courant mouille/radier	plat courant mouille/radier	plat courant	plat lent quelques plats courants	plat lent profond	plat lent plat courant	plat lent plat courant	plat lent plat courant
Activité morphodynamique (faible, moyenne, importante, lit mobile)	moyenne incision	modérée transition	moyenne à faible	assez forte lit mobile divagation	faible	faible	faible méandrage	moyenne à faible recoupement	faible	moyenne	très faible
Bancs alluviaux	très rares très grossiers	rares grossiers	blancs de sable	nombreux	bancs diagonaux cailloux plats	bancs diagonaux cailloux plats	rares bancs de connexité	rares bancs de connexité	absents	absents	absents
discontinuité des écoulements, hauteur de chute	importante h > 0,1 - 0,2 m	moyenne à faible	faible	forte	assez forte	faible	faible	nulle	faible	faible	nulle
Substrat, granulométrie : dalles, blocs, galets - cailloux, sables, limons, argiles - vases %	très grossière >10 cm blocs/cailloux	grossière, variée 2 à 20 cm quelques blocs	sables graviers	variée souvent grossière (galets)	grossière autochtone cailloux, graviers (plaquettes)	cailloux, graviers (plaquettes)	cailloux, graviers plus ou moins colmatés	graviers colmatés	graviers colmatés	variable, souvent assez grossière (cailloutis)	graviers colmatés
Forme : roulés, anguleux, aplatis	anguleux autochtones	plus ou moins roulés	anguleux	roulés allochtones	anguleux autochtones	anguleux autochtones	plus ou moins anguleux	variable	anguleux autochtones	"autochtones" hérités	variable
Berges, nature, dynamique (stables, attaquées) pente	très basses stables	basses stables	assez basses	instables basses	assez basses stables	assez basses stables	moyennes à hautes	hautes argilo-limoneuses	hautes argilo-limoneuses	hautes argilo-limoneuses	variable souvent hautes
Occupation des sols	forêt	prairies	prairies résineux	prairies/bocage alluvial	prairies forêt	prairies forêts (versants)	prairies/cultures	cultures	cultures	prairies forêts (sur sables)	prairies/cultures

Annexe 27. Typologie des cours d'eau compris dans la méthode Qualphy.

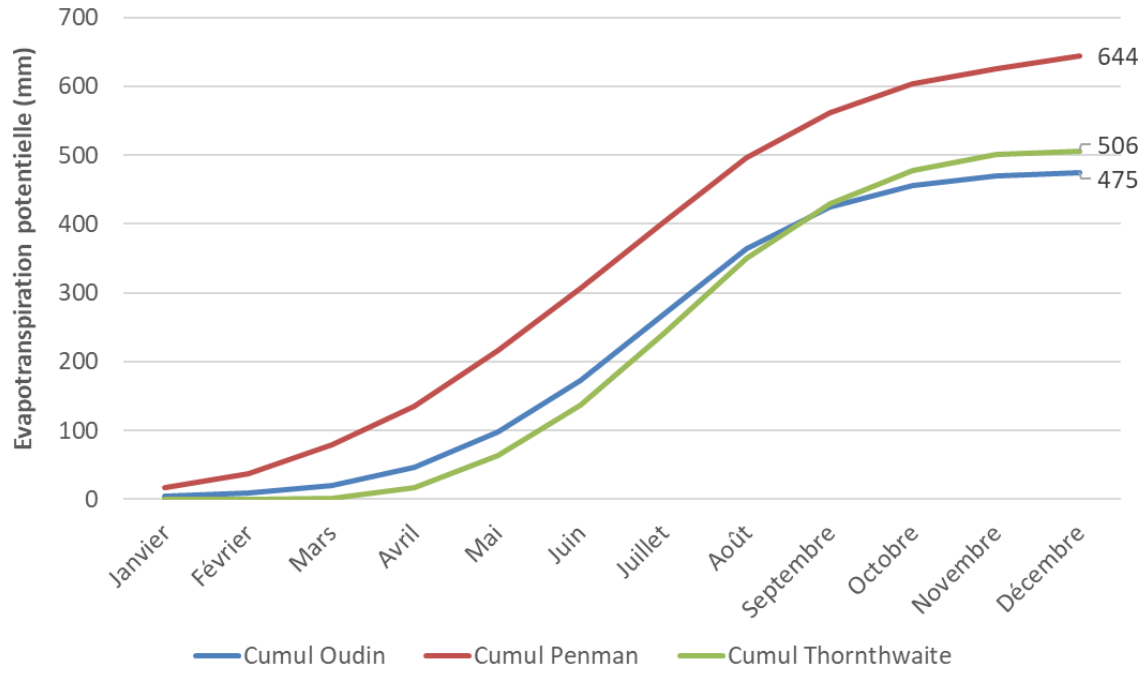
Indice milieu physique	Classe de qualité	Signification - Interprétation
81 – 100%	Qualité excellente	Le tronçon présente un état proche de l'état naturel qu'il devrait avoir, compte tenu de sa typologie (état de référence du cours d'eau)
61 – 80%	Qualité assez bonne	Le tronçon a subi une pression anthropique modérée, qui entraîne un éloignement de son état de référence. Toutefois, il conserve une bonne fonctionnalité et offre les composantes physiques nécessaires au développement d'une faune et d'une flore diversifiées.
41 – 60%	Qualité moyenne	Le milieu commence à se banaliser et à s'écarter de façon importante de l'état de référence. Le tronçon a subi des interventions importantes (aménagements hydrauliques). Son fonctionnement s'y trouve perturbé. La disponibilité en habitats s'est appauvrie, mais il en subsiste encore quelques éléments intéressants dans l'un ou l'autre des compartiments étudiés (lit mineur, berges, lit majeur).
21 – 40%	Qualité mauvaise	Milieu très perturbé. En général, les trois compartiments (lit mineur, lit majeur, berges) sont atteints fortement par des altérations physiques d'origine anthropique. La disponibilité des habitats naturels devient faible et la fonctionnalité du cours d'eau est très diminuée.
0 – 20%	Qualité très mauvaise	Milieu totalement artificialisé, ayant totalement perdu son fonctionnement et son aspect naturel (cours d'eau canalisé).

Annexe 28. Classification et signification des indices de qualités physiques des milieux.

Annexe 29. Mesures physico-chimiques avec la sonde multiparamètrique Hanna HI 98194 (ruisseau de la Belle Rivière). Edgard Gustave, 25/06/2021.



Annexe 30. Régime hydrologique de la rivière Salmonier (bassin de 115 km²), à Terre-Neuve (période 1980-2019), station hydrométrique de Lamaline. Source : Canada.ca.



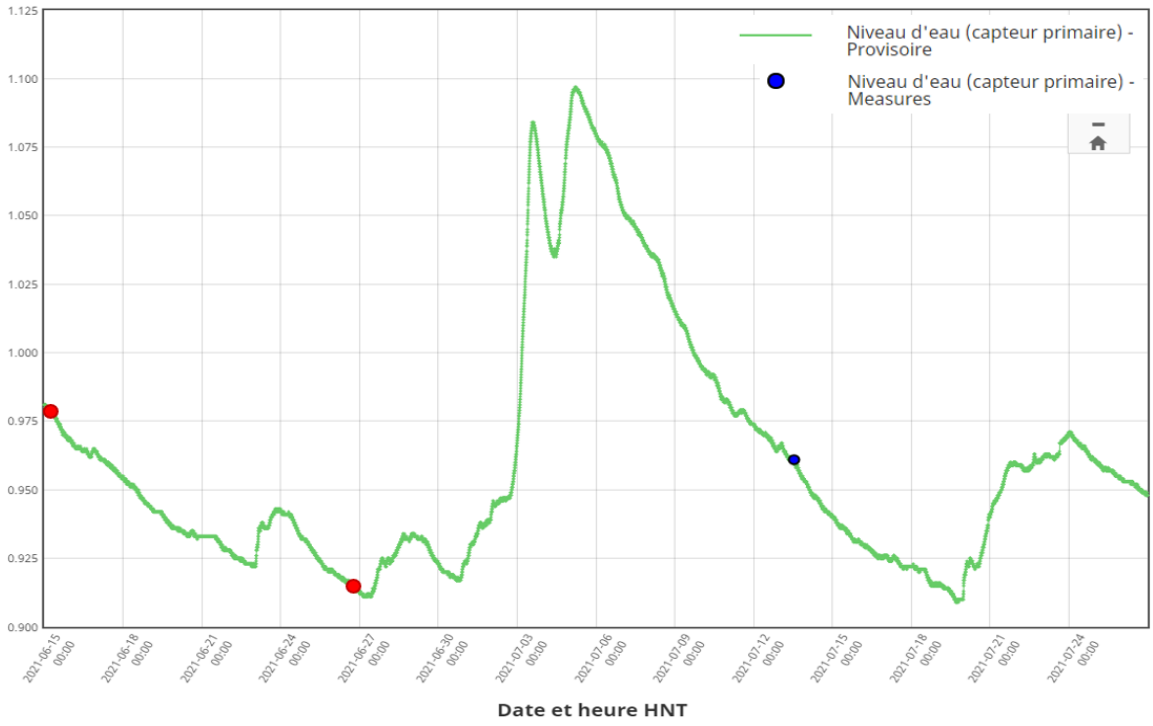
Annexe 31. Comparaison des ETP cumulées simulées selon Oudin, Penman et Thornthwaite (période 1981-2020). Sources : Oudin (Oudin et al., 2005), Penman (Météo France) et Thornthwaite (www.geograchid.com).

Tronçons	Distance à la source (m)	Surface B.V (km^2)	Débits absolus ($L.s^{-1}$)	Débits spécifiques ($L.s^{-1}.km^{-2}$)	Heure
S 1	550	0,22	1	4,55	11:30
S 2	1810	1,03	5	4,85	13:30
S 3	2860	1,85	12	6,49	16:30
S 4	3110	3,38	9	2,66	22:30
S 5	3760	3,58	14	3,91	21:00

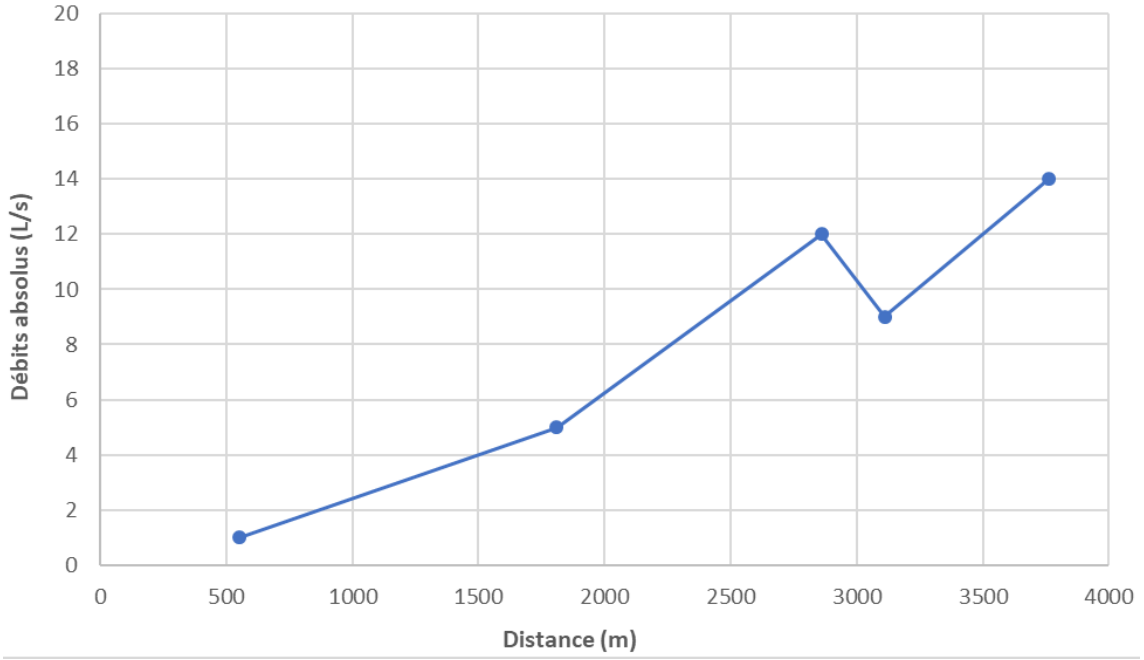
Annexe 32. Jeux de données regroupant les surfaces des bassins versants et débits (absolus et spécifiques) mesurés le long du ruisseau Savoyard, le 09/07/2021.

Tronçons	Distance à la source (m)	Surface B.V (km^2)	Débits absolus ($L.s^{-1}$)	Débits spécifiques ($L.s^{-1}.km^{-2}$)	Heure
BR 3	2200	1,44	4	2,78	13:20
BR 4	2526	1,59	2	1,26	11:56
BR 5	3662	3,23	8	2,48	11:31
BR 6	3825	3,93	9	2,29	18:22
BR 7a	4216	5,39	20	3,71	16:50
BR 7b	4700	5,88	15	2,55	16:05
BR 8	4833	12,68	64	5,05	15:18
BR 9	6104	15,11	70	4,63	14:09
BR 10	6415	17,73	90	5,08	12:54
BR 11	7064	18,43	74	4,02	11:35
BR 12	7539	19,08	42	2,2	9:57
BR 13	8215	20,06	64	3,19	8:22
BR 14	9820	21,14	61	2,89	16:00
BR 15	10200	21,23	69	3,24	16:30

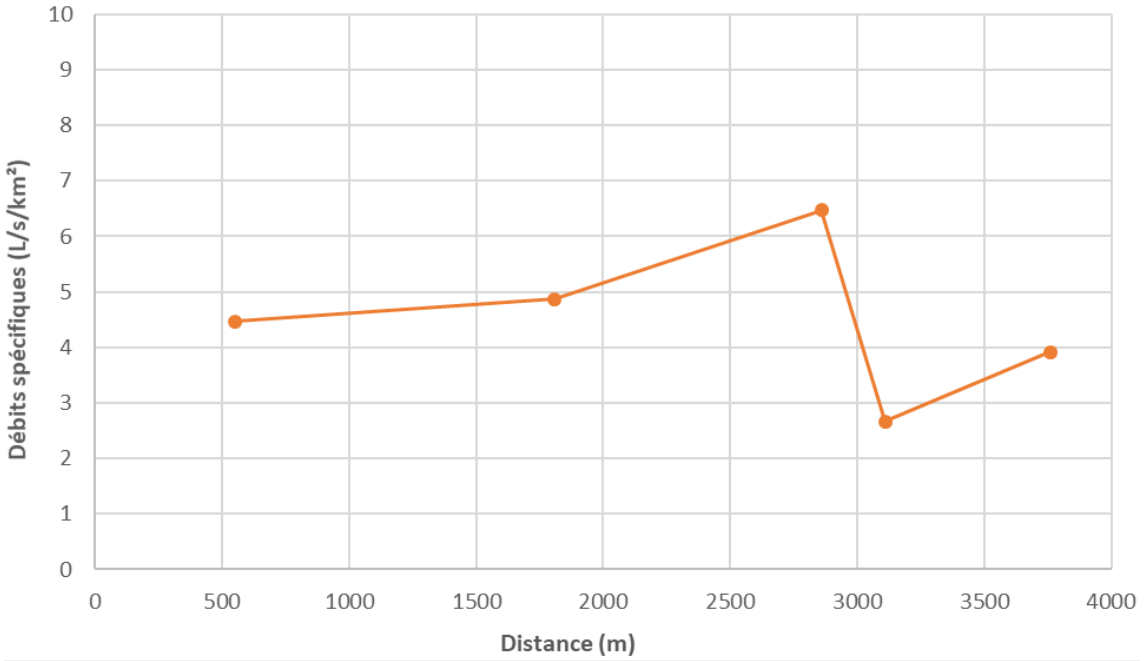
Annexe 33. Jeux de données regroupant les surfaces des bassins versants et débits (absolus et spécifiques) mesurés le long du ruisseau de la Belle Rivière, du 23/06/2021 au 26/06/2021.



Annexe 34. Hydrogramme de la rivière Salmonier à Lamaline sur la période de juin à août 2021. Le graphique représente le débit de référence (courbe verte) et les mesures effectuées en période de basses eaux (points rouge). Source : https://eau.ec.gc.ca.



Annexe 35. Profil hydrologique du ruisseau Savoyard. Débits mesurés (le 15/06/2021) en valeurs absolues (L/s).

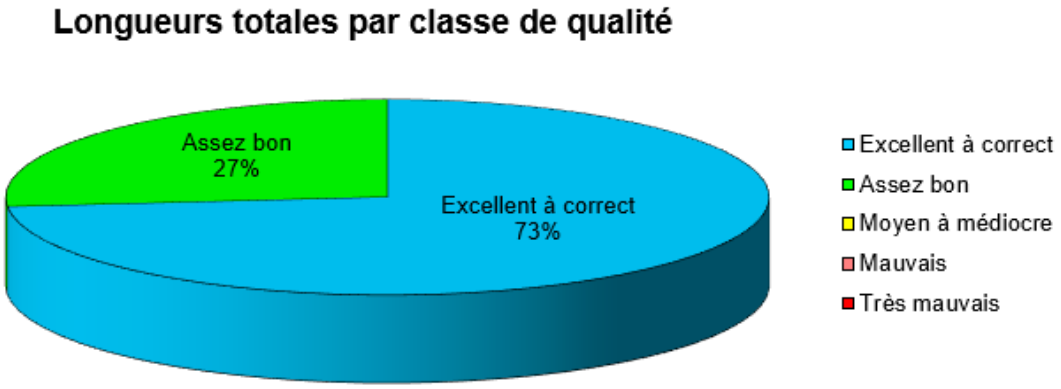


Annexe 36. Profil hydrologique du ruisseau de la Belle Rivière. Débits mesurés (le 15/06/2021) en valeurs spécifiques (L/s/km²).

Annexe 37. Photo du tronçon BR 11 – Belle Rivière. Les berges sont sapées par la dynamique du ruisseau. Erwan Durand, 08/06/2021.

Annexe 38. Photo du tronçon BR 3 – Belle Rivière. Une cascade naturelle, estimée à 10 m de hauteur, empêche la montaison des salmonidés. Edgard Gustave, 26/06/2021.

Annexe 39. Photo du tronçon BR 5 – Belle Rivière. Galets et blocs rocheux jonchent le lit mineur. Erwan Durand, 26/06/2021.



Annexe 40. Représentation diagramme de la qualité physique de la Belle Rivière, estimée d'après Qualphy sur sa longueur totale.

Secteurs	Tronçons	Longueur	Type	**Indice**	% par rapport au maximum possible par compartiment		
					Lit majeur	Berges	Lit mineur
Langlade	BR 15	380 m	T6	**81**	93%	90%	65%
	BR 14	1 605 m	T3	**89**	100%	96%	71%
	BR 13	676 m	T3	**87**	100%	95%	68%
	BR 12	475 m	T3	**82**	95%	86%	66%
	BR 11	649 m	T3	**83**	95%	85%	69%
	BR 10	311 m	T3	**82**	95%	85%	65%
	BR 9	1 271 m	T3	**82**	95%	85%	67%
	BR 8	133 m	T2	**81**	90%	92%	73%
	BR 7b	484 m	T2	**85**	90%	91%	80%
	BR 7a	391 m	T2	**79**	90%	82%	75%
	BR 6	1 163 m	T2	**75**	90%	82%	68%
	BR 5	136 m	T2	**78**	90%	92%	67%
	BR 4	326 m	T2	**69**	90%	82%	57%
	BR 3	150 m	T1	**73**	100%	79%	67%
Linéaire total		**8150 m**		**80**			

Annexe 41. Résultats des indices de qualité physique de la Belle Rivière, par tronçon (BR 3 à BR 15) et par compartiments.

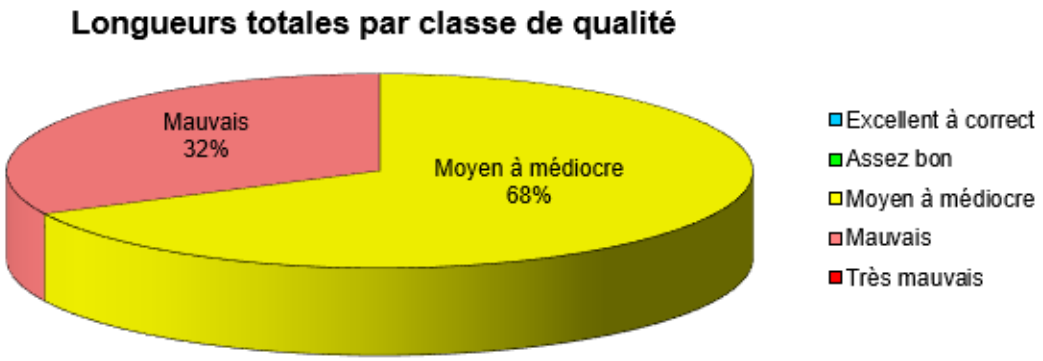
Annexe 42. Photo du tronçon S1 – Ruisseau Savoyard. Des hélophytes prolifèrent jusque dans le lit mineur en voie d'assèchement. Erwan Durand, 15/06/2021.

Annexe 43. Photo du tronçon S2 – Ruisseau Savoyard. Un substrat et des berges bétonnés canalisent le cours d'eau recalibré. Edgard Gustave, 15/06/2021.

Annexe 44. Photo du tronçon S2 – Ruisseau Savoyard. La terminaison du canal est totalement détériorée, sous forme de débris, et perturbe considérablement le fonctionnement naturel du cours d'eau. Erwan Durand, 15/06/2021.

Annexe 45. Photo du tronçon S3 – Ruisseau Savoyard. Une ripisylve non-entretenue se trouve perchée au-dessus du lit mineur, au risque de former des embâcles. Erwan Durand, 15/06/2021.

Annexe 46. Photo du tronçon S5 – Ruisseau Savoyard. Le cours d'eau est obstrué par une barrière en bois, censée protéger des berges régulièrement piétinées par les équidés. Erwan Durand, 15/06/2021.



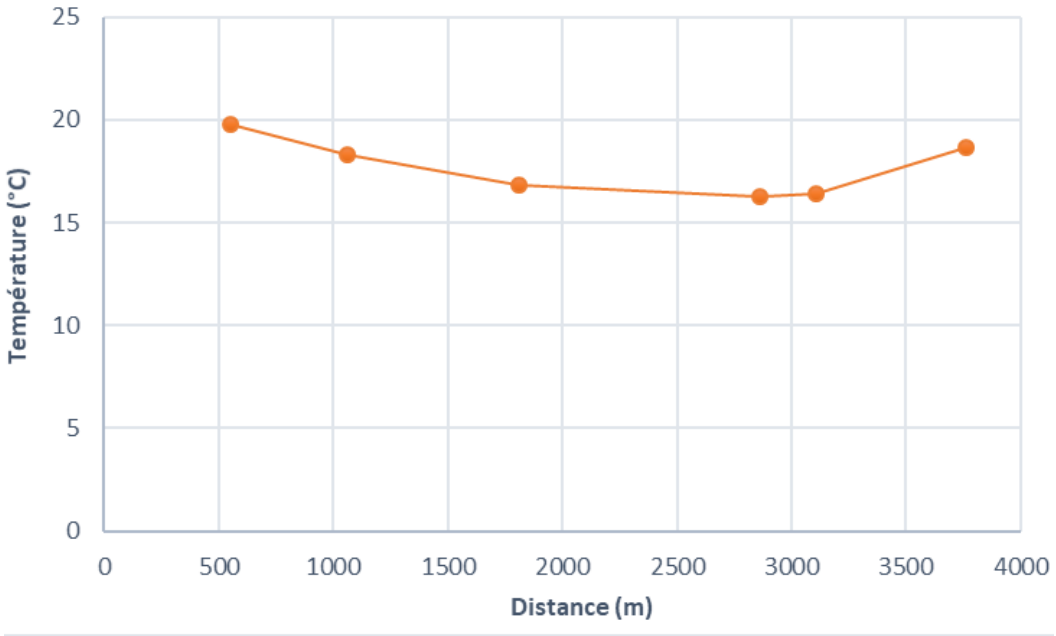
Annexe 47. Représentation diagramme de la qualité physique du ruisseau Savoyard, estimée d'après Qualphy sur sa longueur totale.

Secteurs	Tronçons	Longueur	Type	**Indice**	% par rapport au maximum possible par compartiment		
					Lit majeur	Berges	Lit mineur
Saint-Pierre	S5	650 m	T4	**59**	65%	62%	55%
	S4	250 m	T2	**58**	59%	75%	49%
	S3	1 050 m	T2	**29**	0%	42%	30%
	S2	750 m	T1	**47**	75%	68%	35%
	S1	550 m	T6	**52**	64%	67%	31%
Linéaire total		**3250 m**		**50**	53%	63%	40%

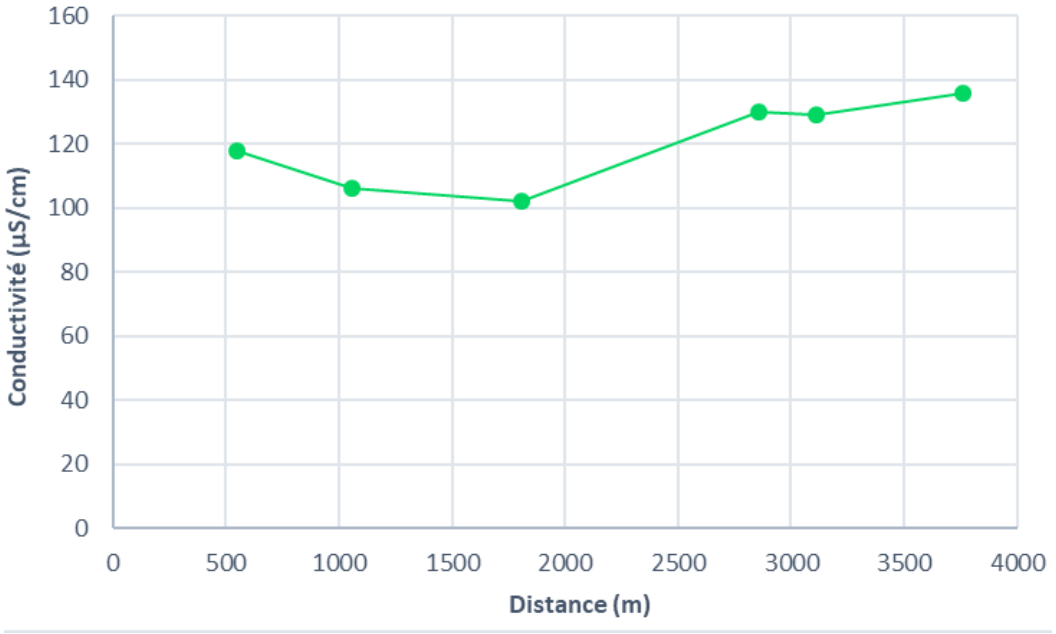
Annexe 48. Résultats des indices de qualité physique du ruisseau Savoyard, par tronçon (S1 à S5) et par compartiments.

Tronçons	Distance à la source (m)	Température (°C)	Oxygène dissous (%)	Conductivité (µS/cm)	pH
S 1	550	19,76	58	118	6,24
S 2	1810	16,82	79,9	102	6,83
S 3	2860	16,28	79,1	130	6,75
S 4	3110	16,39	88,1	129	6,86
S 5	3760	18,69	79,3	136	6,73

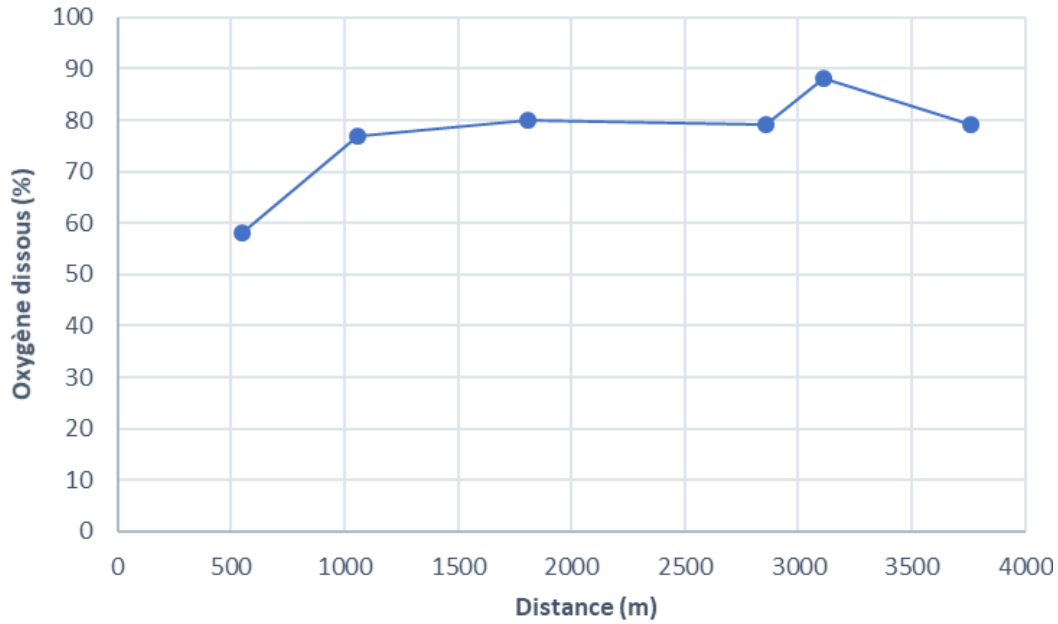
Annexe 49. Jeux de données des paramètres physico-chimiques (température, taux de saturation en oxygène dissous, conductivité et pH) mesurés le long du ruisseau Savoyard, le 09/07/2021.



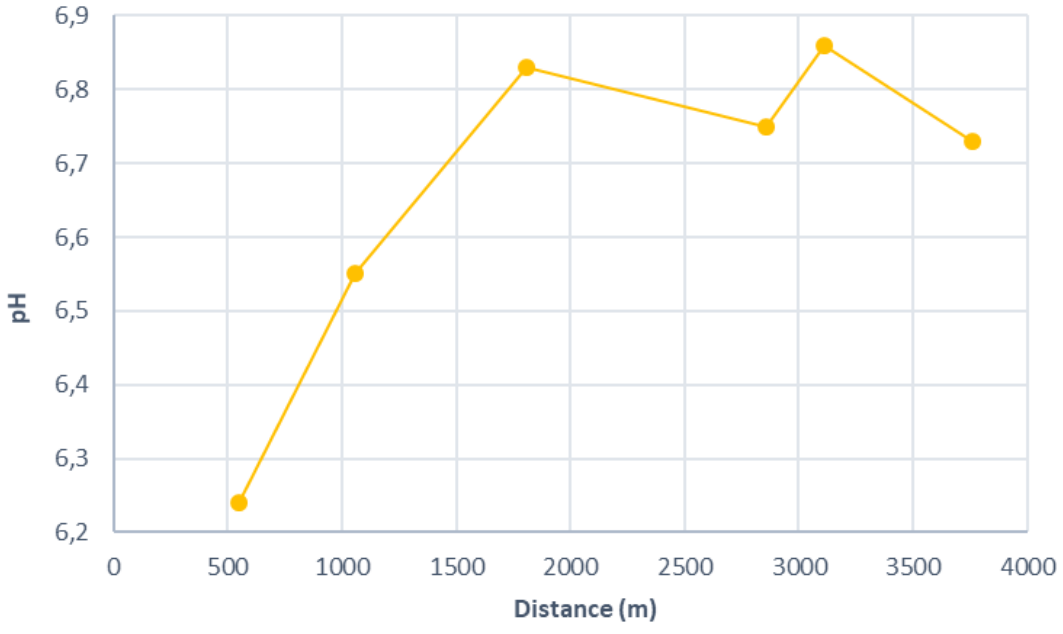
Annexe 50. Profil des mesures de température, réalisées le long du ruisseau Savoyard (le 09/07/2021).



Annexe 51. Profil des mesures de conductivité, réalisées le long du ruisseau Savoyard (le 09/07/2021).



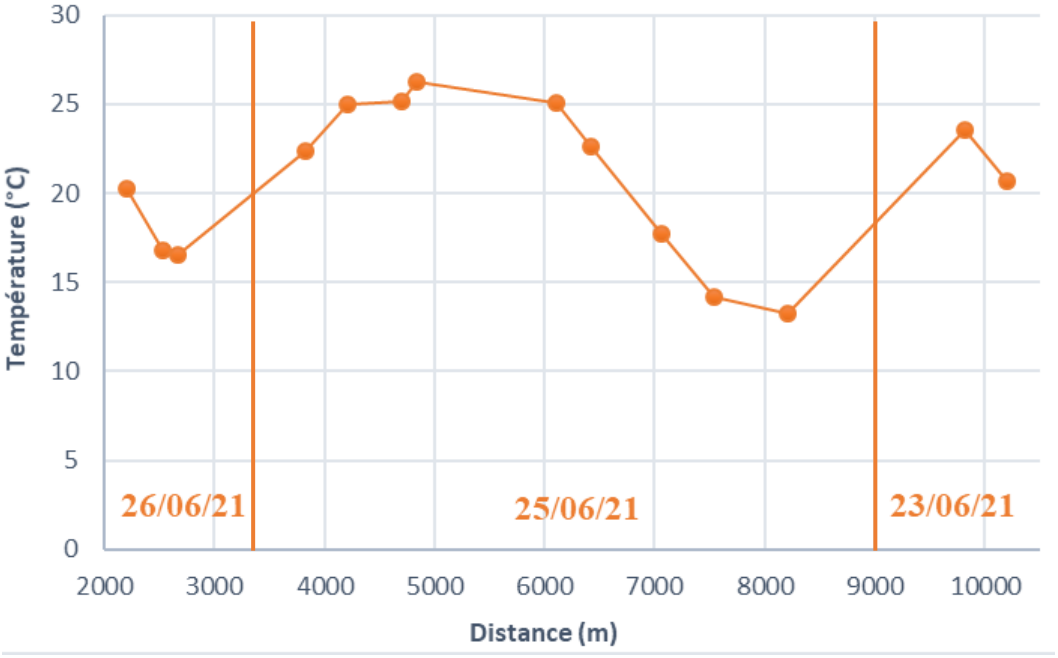
Annexe 52. Profil des mesures de taux de saturation en oxygène dissous, réalisées le long du ruisseau Savoyard (le 09/07/2021).



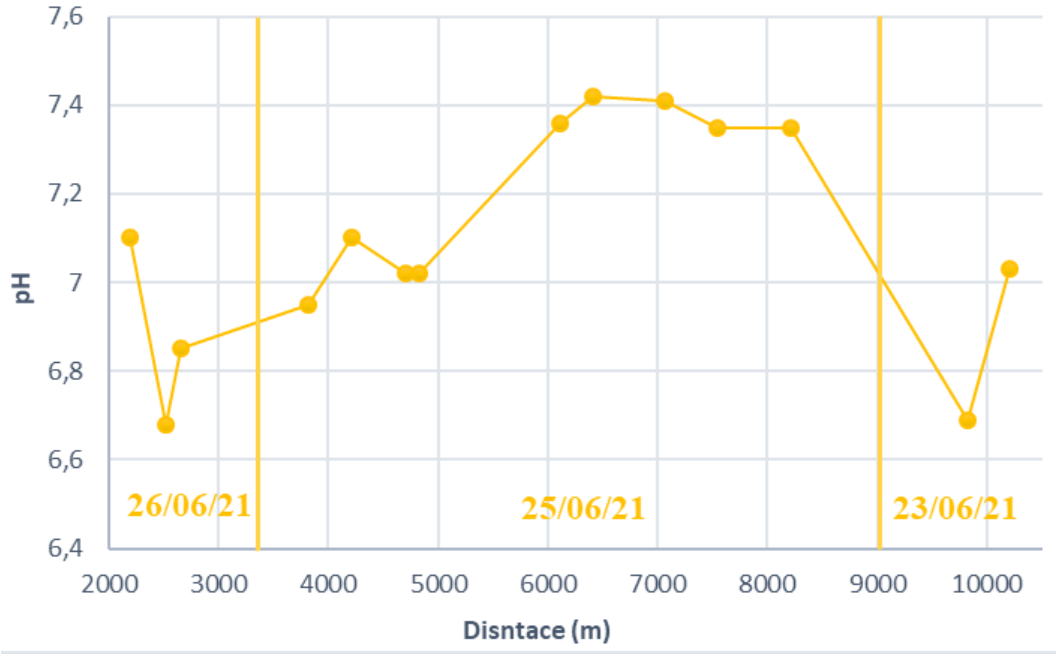
Annexe 53. Profil des mesures de pH, réalisées le long du ruisseau Savoyard (le 09/07/2021).

Tronçons	Distance à la source (m)	Température (°C)	Oxygène dissous (%)	Conductivité (µS/cm)	pH
BR 3	2200	20,24	73,4	72	7,1
BR 4	2526	16,83	84,4	78	6,68
BR 5	3662	16,53	88,5	67	6,85
BR 6	3825	22,34	72	86	6,95
BR 7	4216	24,98	85,5	83	7,1
BR 8	4700	25,14	75,6	83	7,02
BR 9	4833	26,26	75,9	80	7,02
BR 10	6104	25,07	78	90	7,36
BR 11	6415	22,6	80,6	97	7,42
BR 12	7064	17,75	94,4	97	7,41
BR 13	7539	14,19	87,3	97	7,35
BR 14	8215	13,25	79,6	97	7,35
BR 15	9820	23,55	59,5	149	6,69
BR 16	10200	20,67	78,2	393	7,03

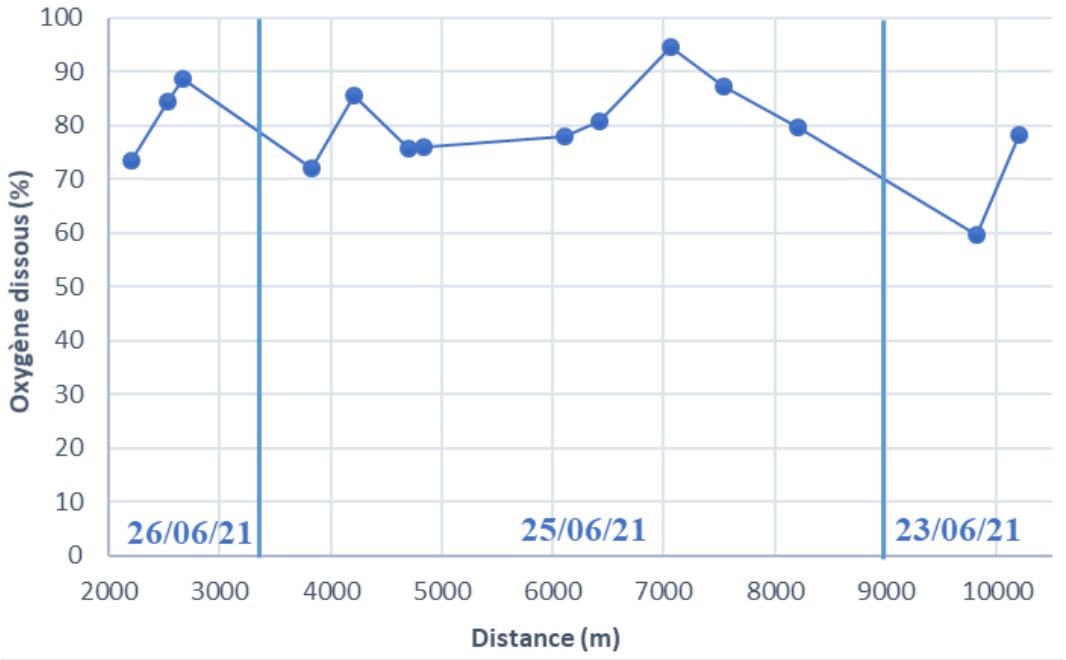
Annexe 54. Jeux de données des paramètres physico-chimiques (température, taux de saturation en oxygène dissous, conductivité et pH) mesurés le long du ruisseau de la Belle Rivière, du 23/06/2021 au 26/06/2021.



Annexe 55. Profil des mesures de température, réalisées le long de la Belle Rivière (du 23/06/2021 au 26/06/2021).

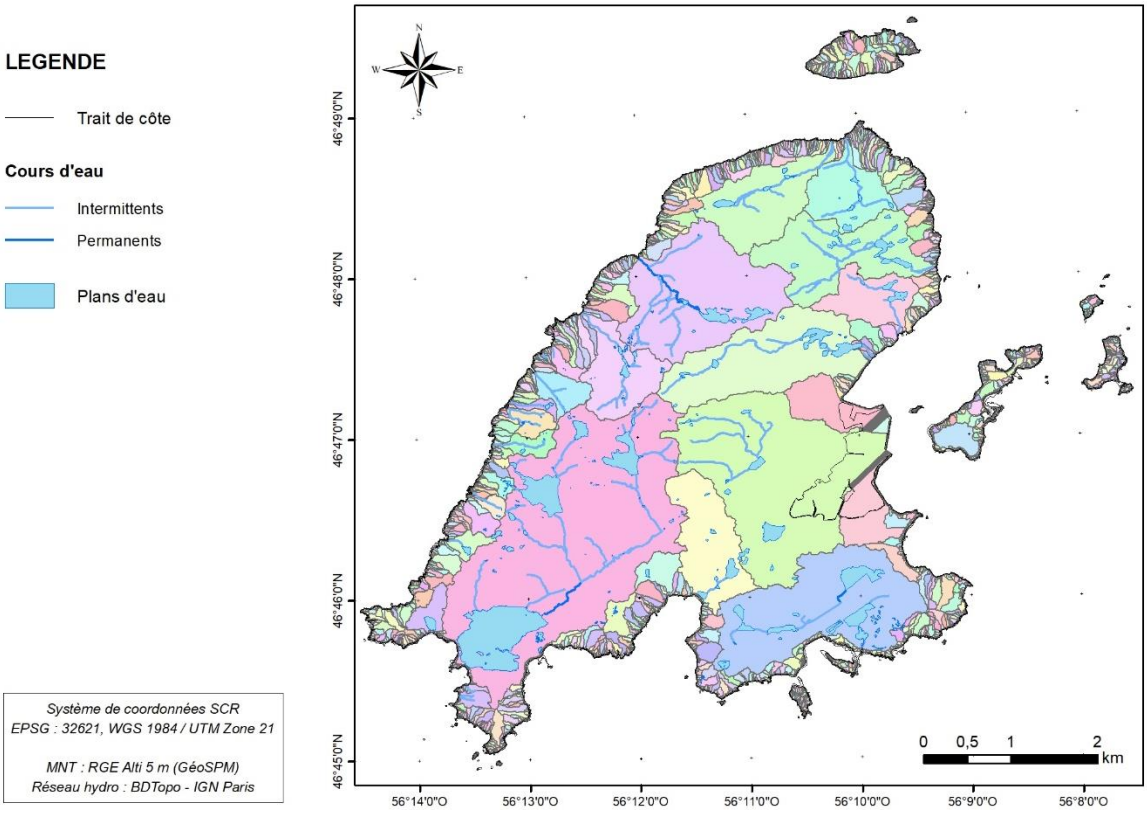


Annexe 56. Profil des mesures de pH, réalisées le long de la Belle Rivière (du 23/06/2021 au 26/06/2021).

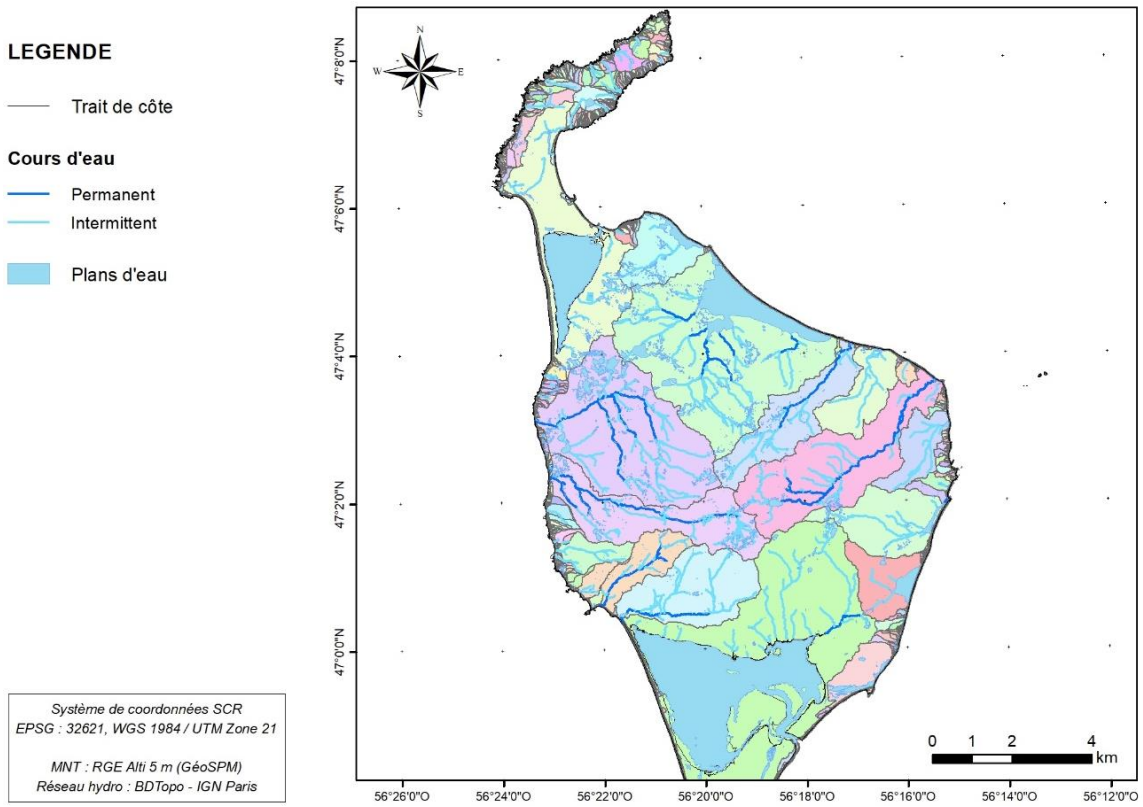


Annexe 57. Profil des mesures du taux de saturation en oxygène dissous, réalisées le long de la Belle Rivière (du 23/06/2021 au 26/06/2021).

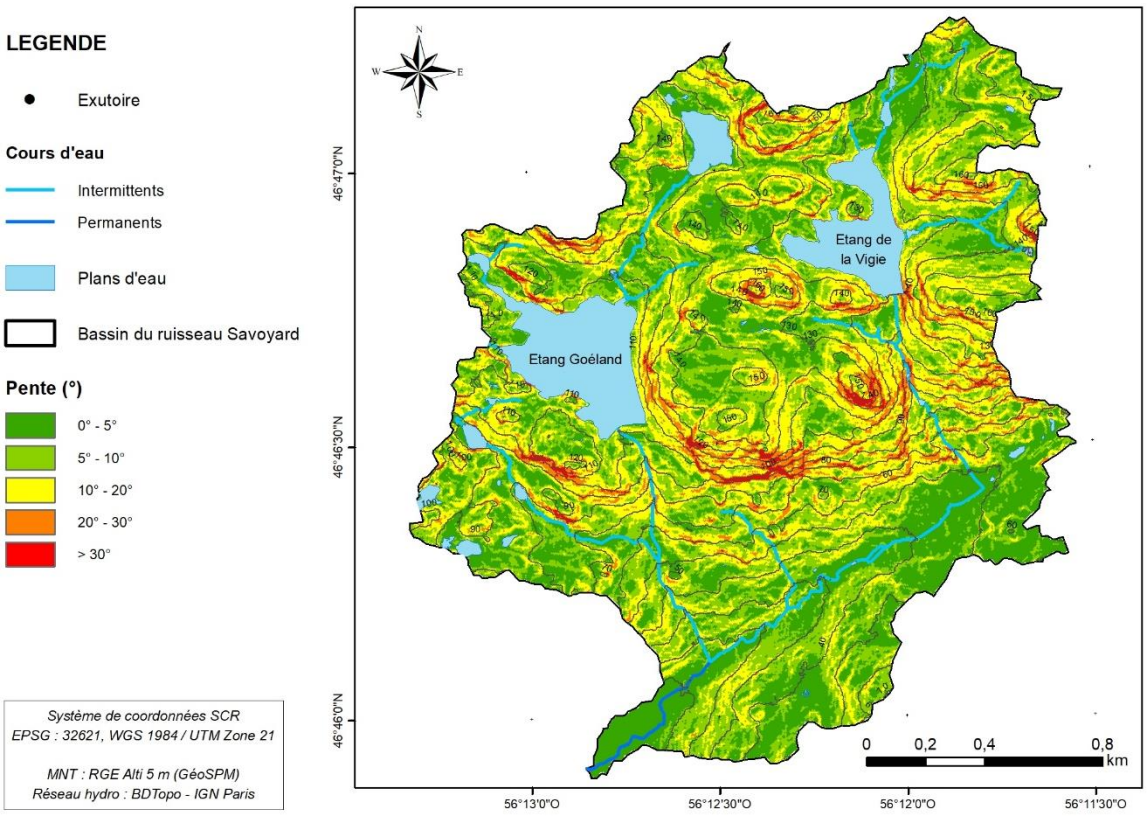
Annexe 58. Prélèvements biologiques et analyses de l'état physique des ombles de fontaine (tronçon S1 du ruisseau Savoyard).Erwan Durand, 02/06/2021.



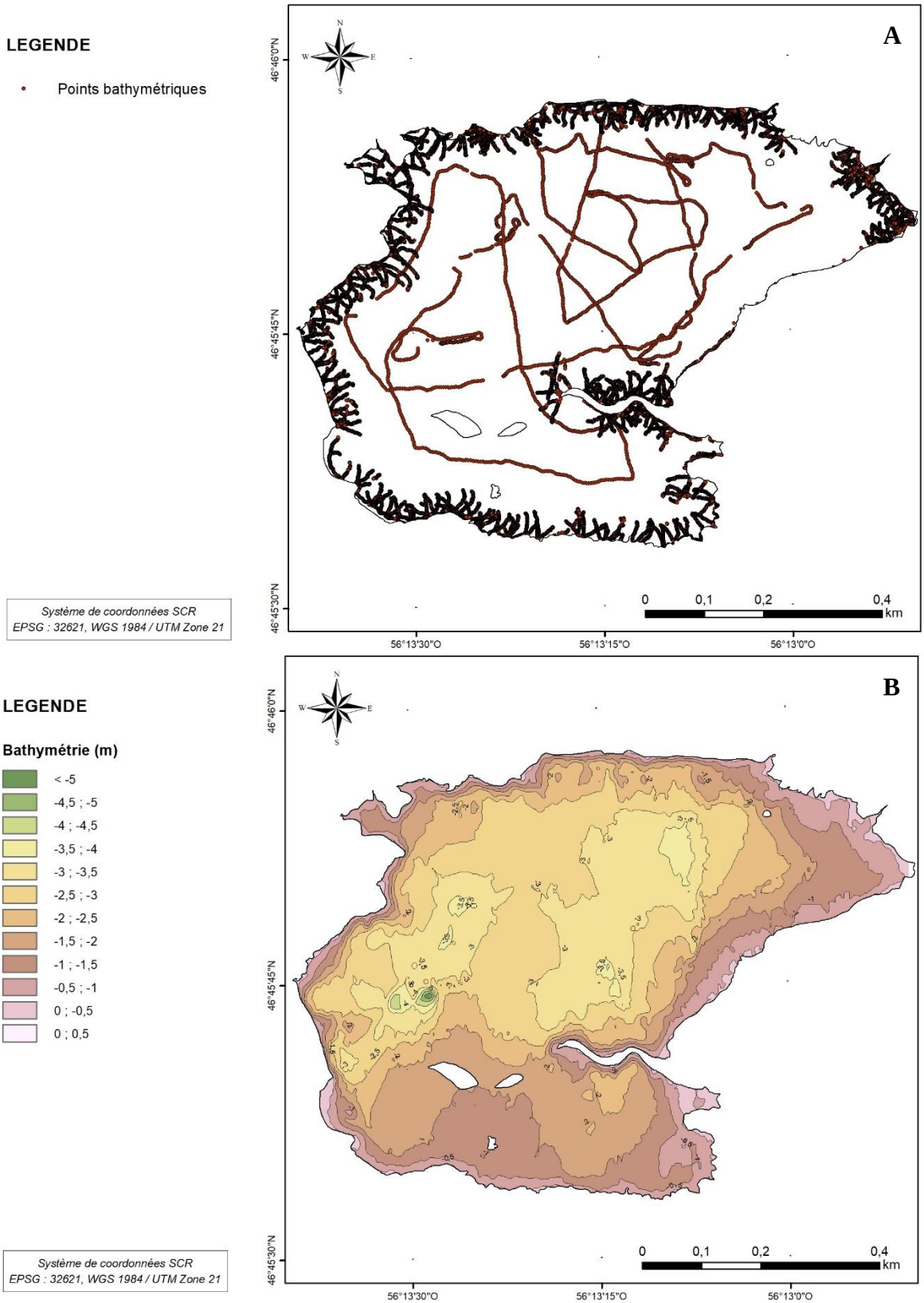
Annexe 59. Distribution spatiale de l'ensemble des bassins versants topographiques raccordés à la mer, et des réseaux hydrographiques de Saint-Pierre.



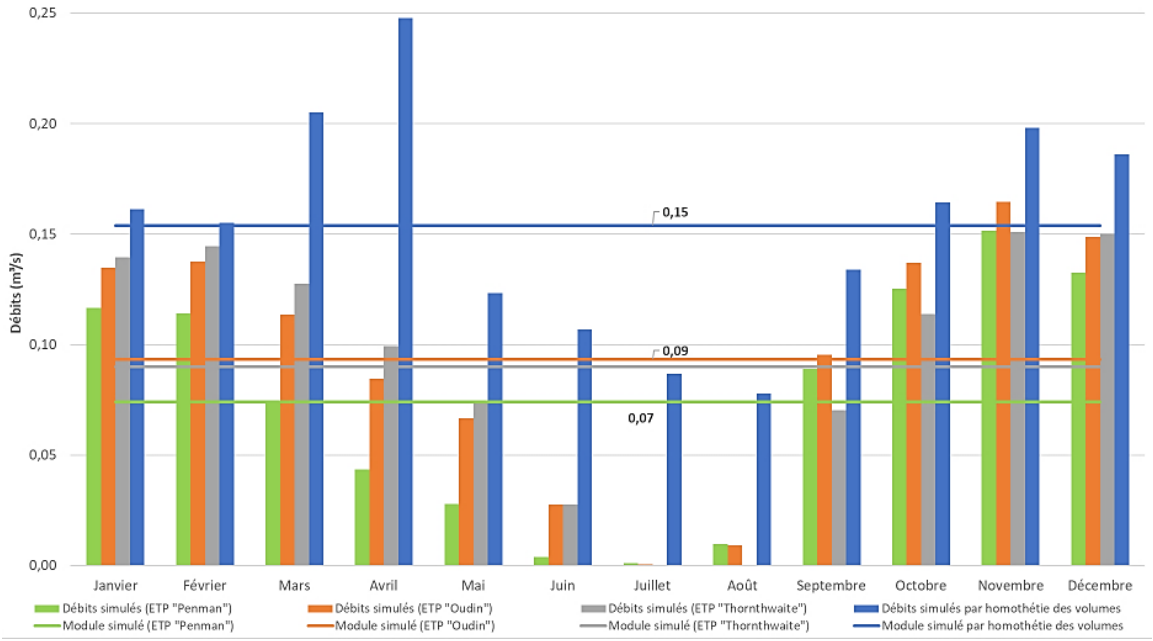
Annexe 60. Distribution spatiale de l'ensemble des bassins versants topographiques raccordés à la mer, et des réseaux hydrographiques de Miquelon.



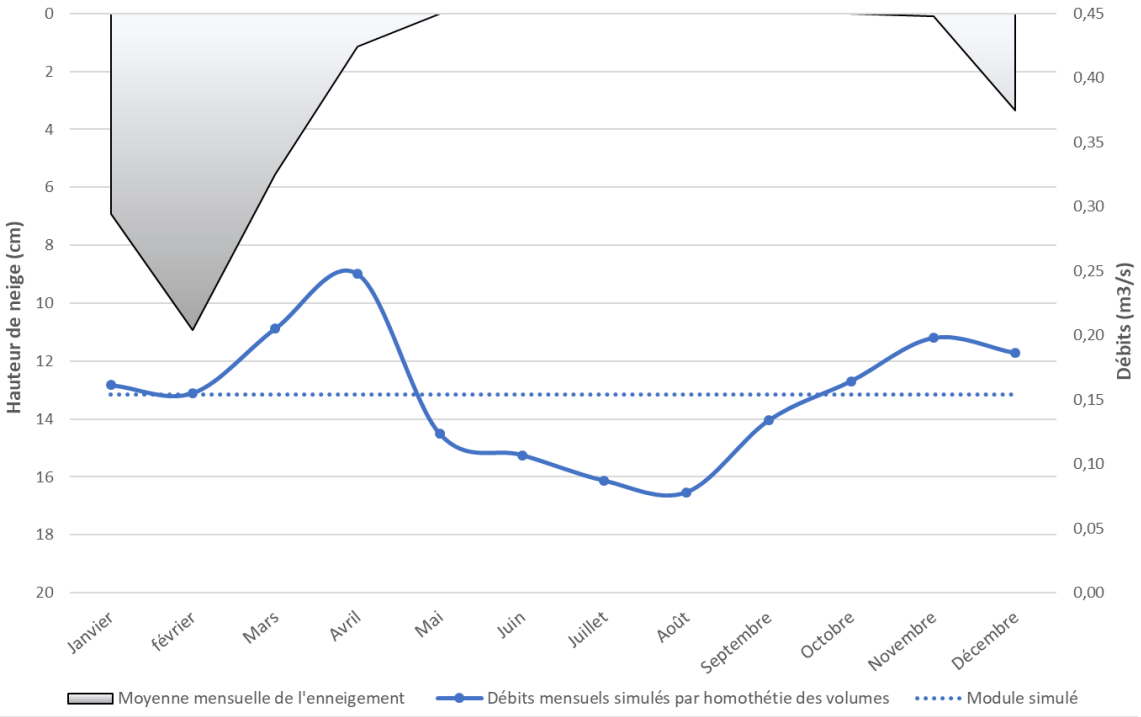
Annexe 61. Carte des pentes du bassin versant du ruisseau Savoyard.



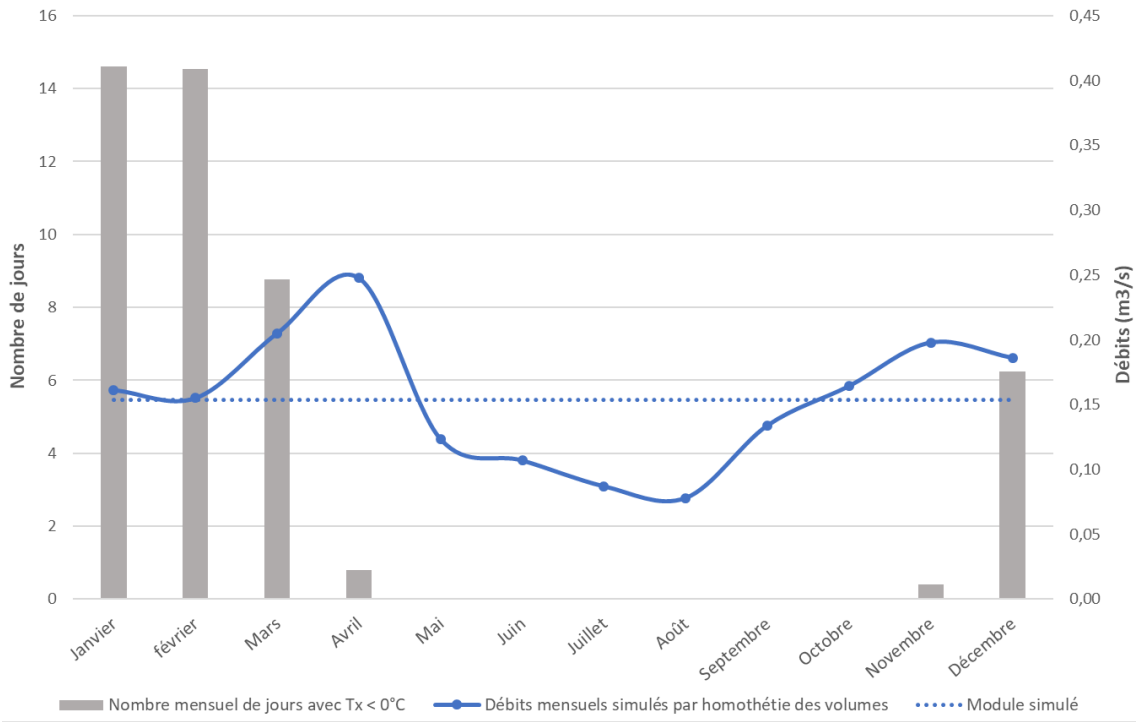
Annexe 62. Carte bathymétrique de l'étang de Savoyard, avec ; A) les profils bathymétriques réalisés avec l'échosondeur (campagne du mois de juillet 2021), et B) la modélisation du relief déterminé selon la méthode des plus proches voisins.



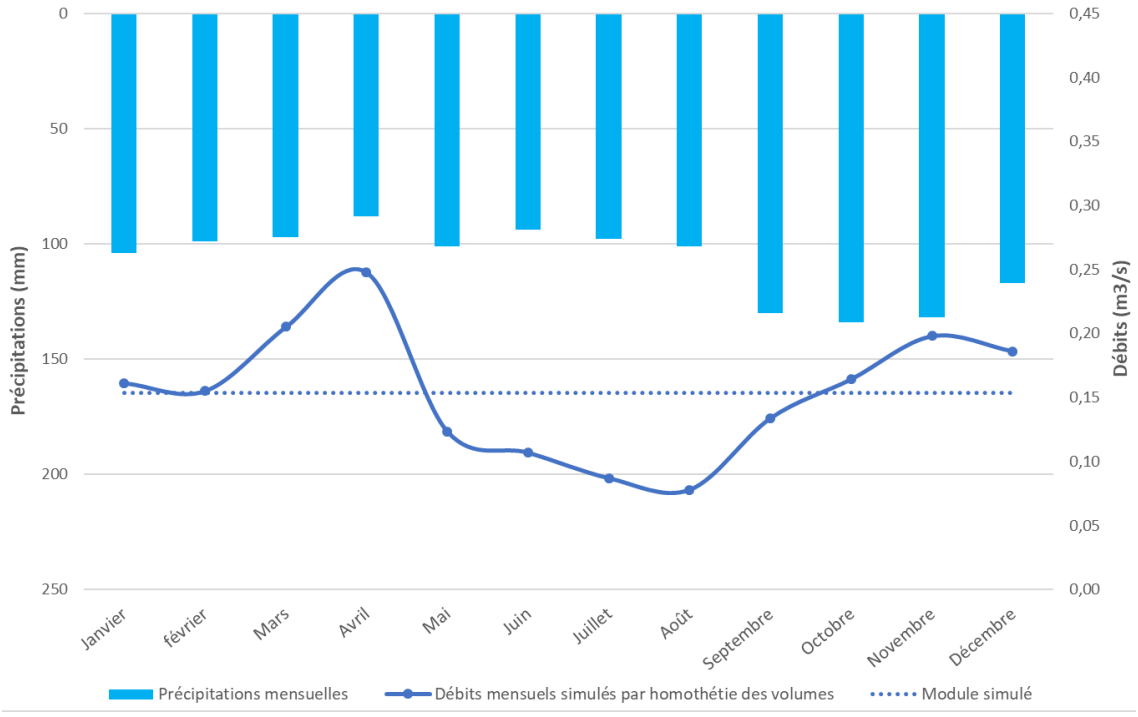
Annexe 63. Régime hydrologique du ruisseau Savoyard, simulé par homothétie des volumes sur la base des données de la rivière Salmonier (Canada.ca), et par bilan hydrologique, sur la base des ETP « Penman », « Oudin » et « Thornthwaite ». Source ETP : Penman (Météo France), Oudin (Oudin et al., 2005) et Thornthwaite (www.geograchid.com).



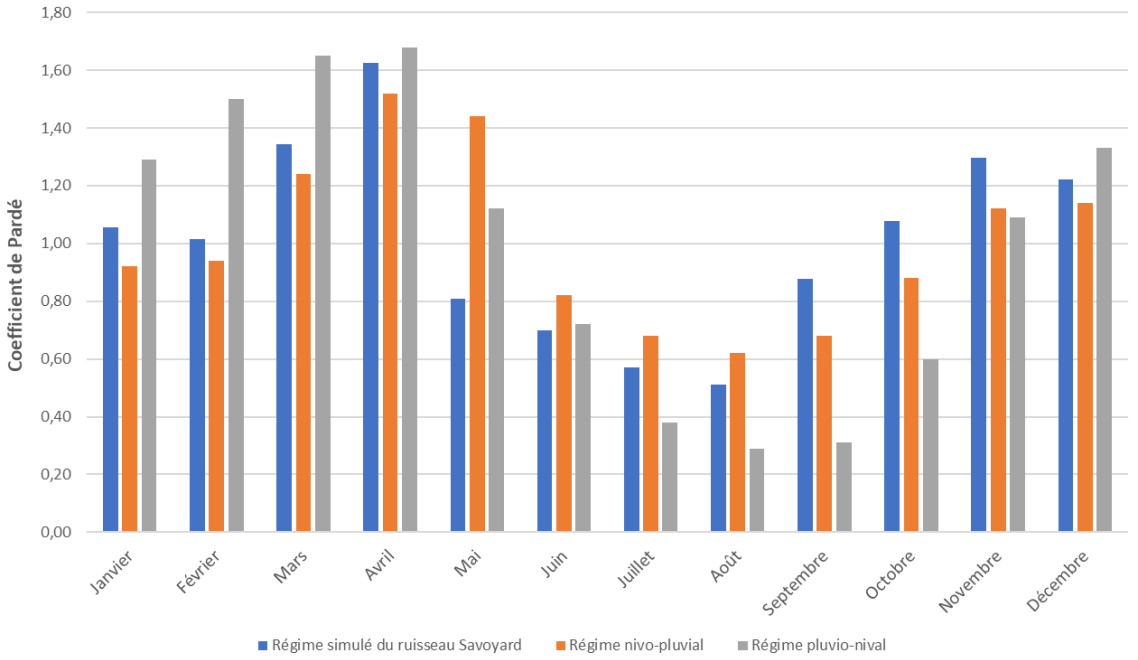
Annexe 64. Régime hydrologique du ruisseau Savoyard, simulé par homothétie des volumes sur la base des données de la rivière Salomnier (Canada.ca), et superposé à l'épaisseur moyenne mensuelle de la couverture de neige à Saint-Pierre sur la période 1981-2020. Source : Météo France.



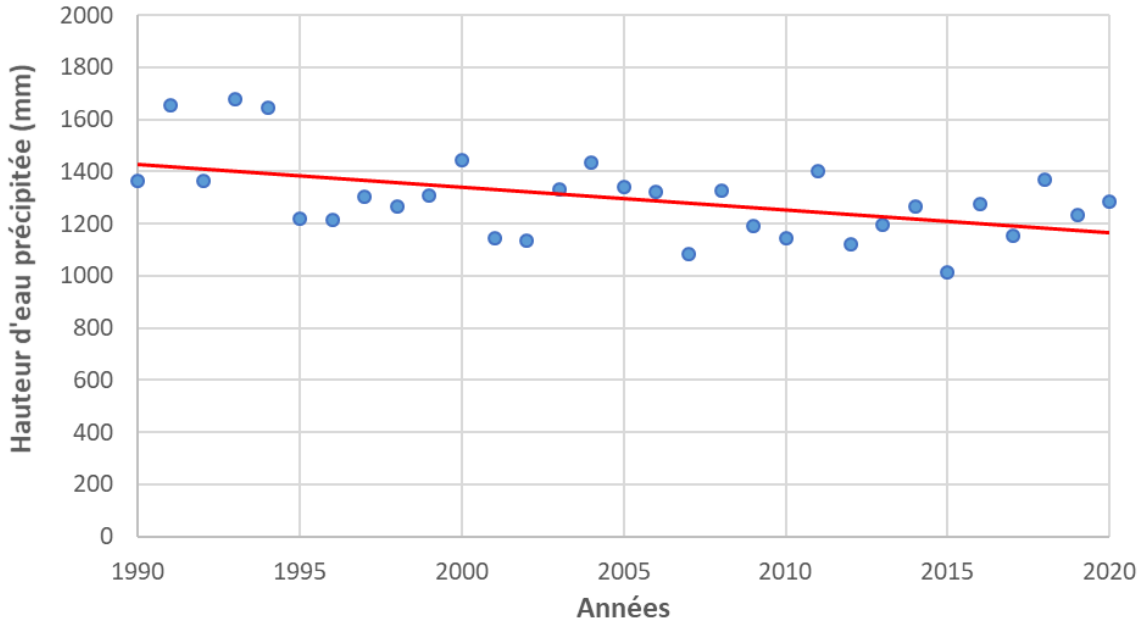
Annexe 65. Régime hydrologique du ruisseau Savoyard, simulé par homothétie des volumes sur la base des données de la rivière Salomnier (Canada.ca), et superposé au nombre mensuel de jours avec des températures négatives à Saint-Pierre sur la période 1981-2020. Source : Météo France.



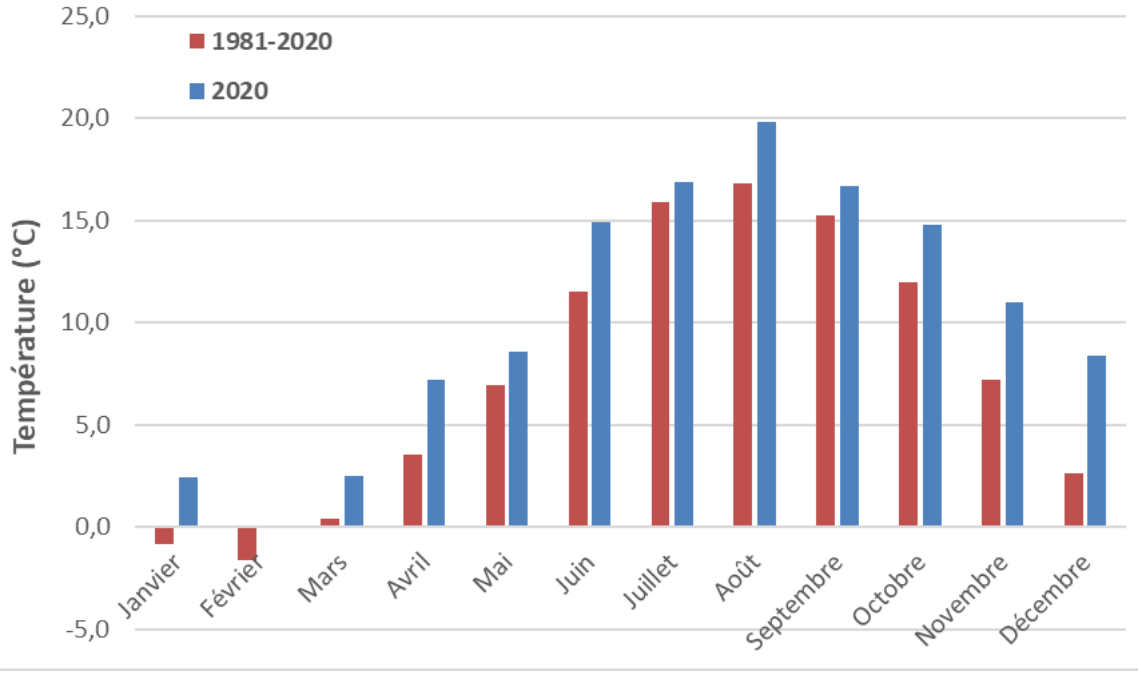
Annexe 66. Régime hydrologique du ruisseau Savoyard, simulé par homothétie des volumes sur la base des données de la rivière Salomnier (Canada.ca), et superposé au régime des précipitations à Saint-Pierre sur la période 1981-2020. Sources : Météo France.



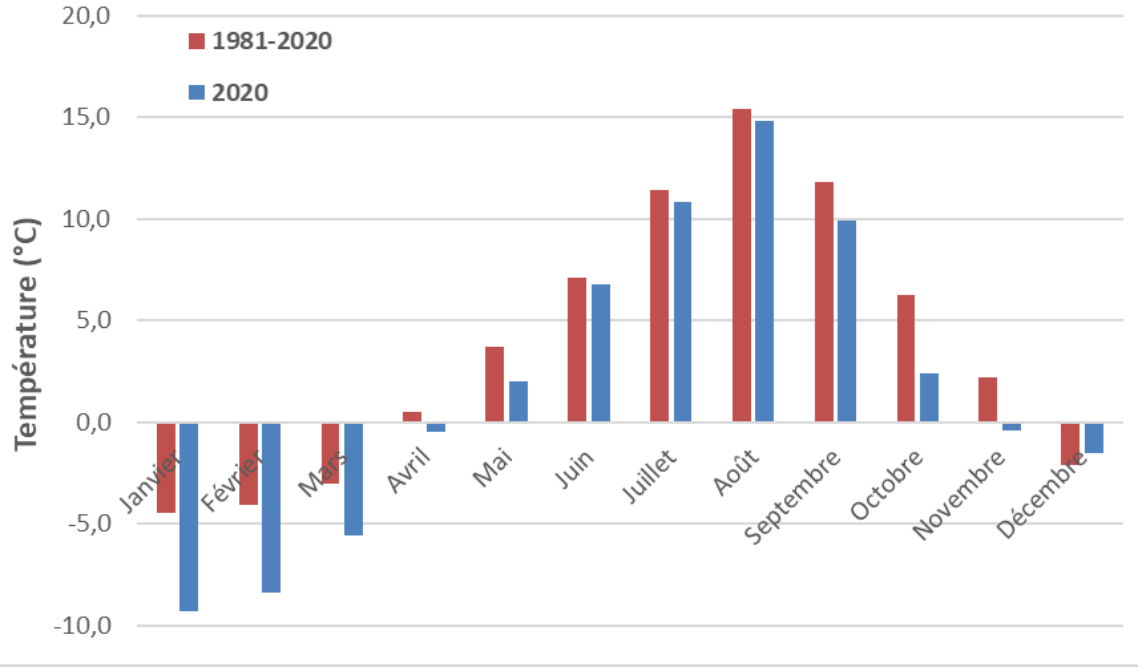
Annexe 67. Coefficients de Pardé mensuels du ruisseau Savoyard, simulé par homothétie des volumes (base : rivière Salmonier). Le diagramme compare les régimes hydrologiques du ruisseau avec des régimes nivo-pluvial (Fier à Val-de-Fier, période 1911-1939) et pluvio-nival (Lot à Cahors, période 1887-1926) français. Source : Société hydrotechnique de France (1939).



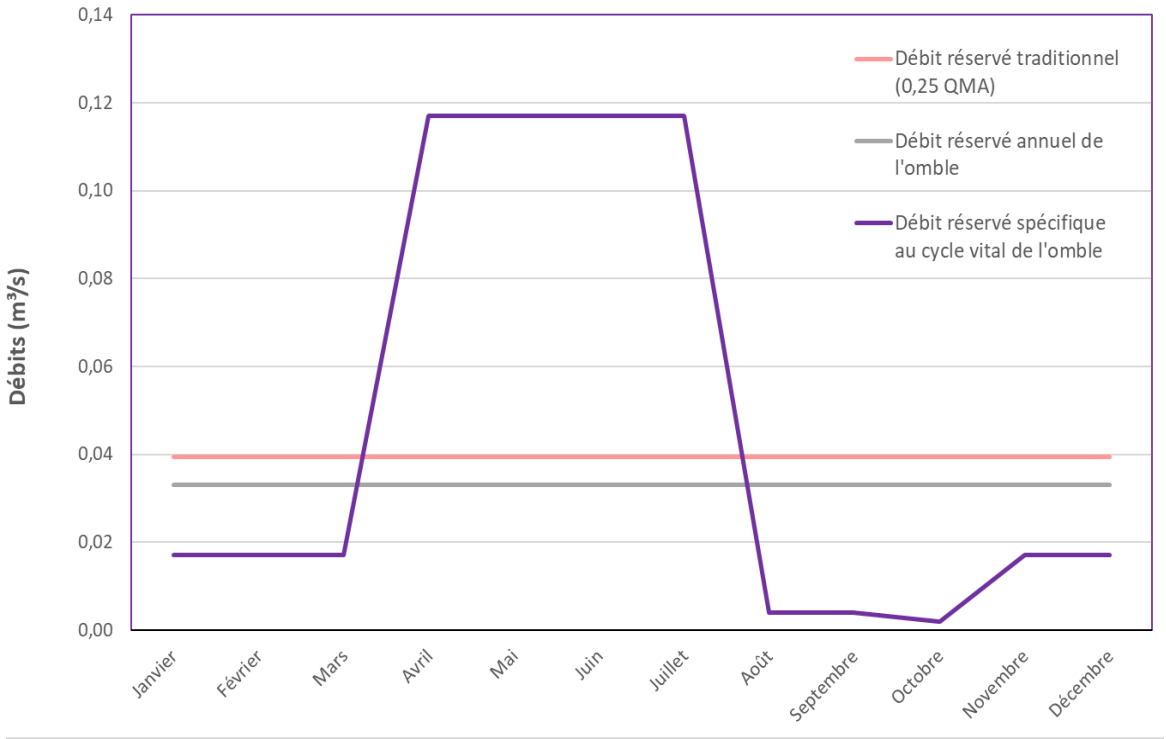
Annexe 68. Évolution des précipitations moyennes annuelles à Saint-Pierre (période 1990-2020). Source : Météo France.



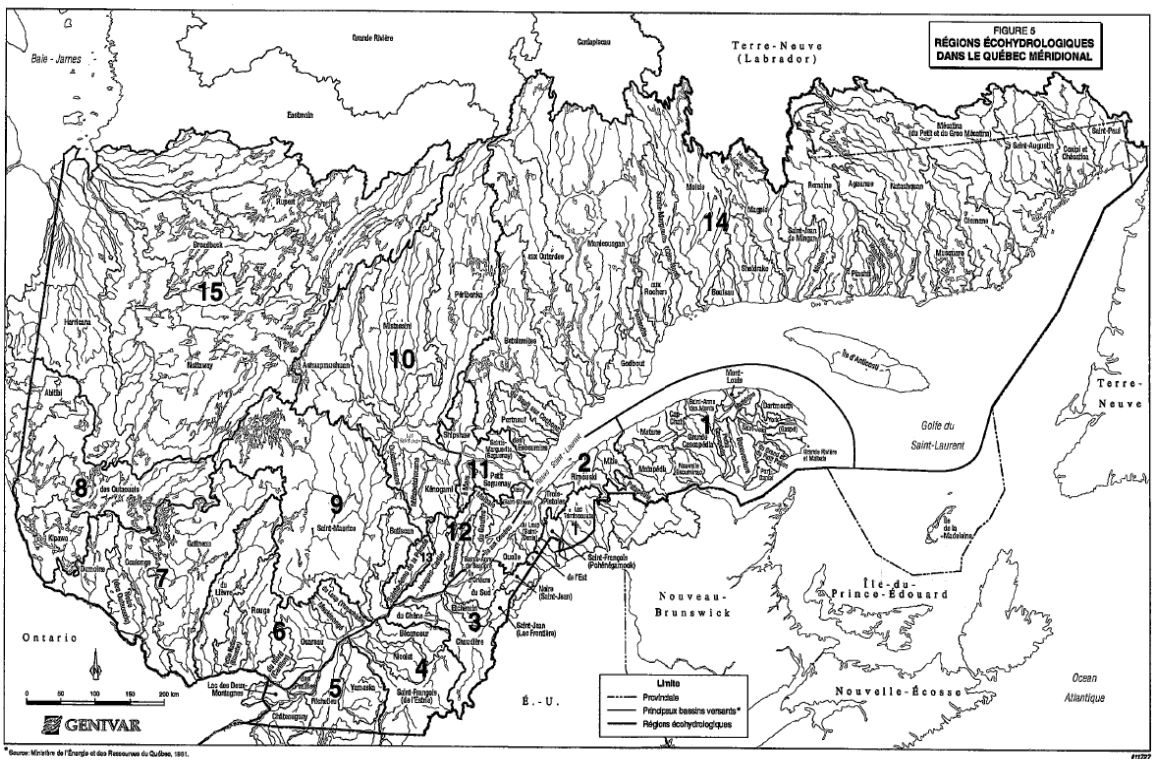
Annexe 69. Températures maximales mensuelles mesurées à la station de Saint-Pierre au cours de l'année 2020 par rapport à la normale, moyennée sur la période 1981-2020. Source : Météo France.



Annexe 70. Températures minimales mensuelles mesurées à la station de Saint-Pierre au cours de l'année 2020 par rapport à la normale, moyennée sur la période 1981-2020. Source : Météo France.



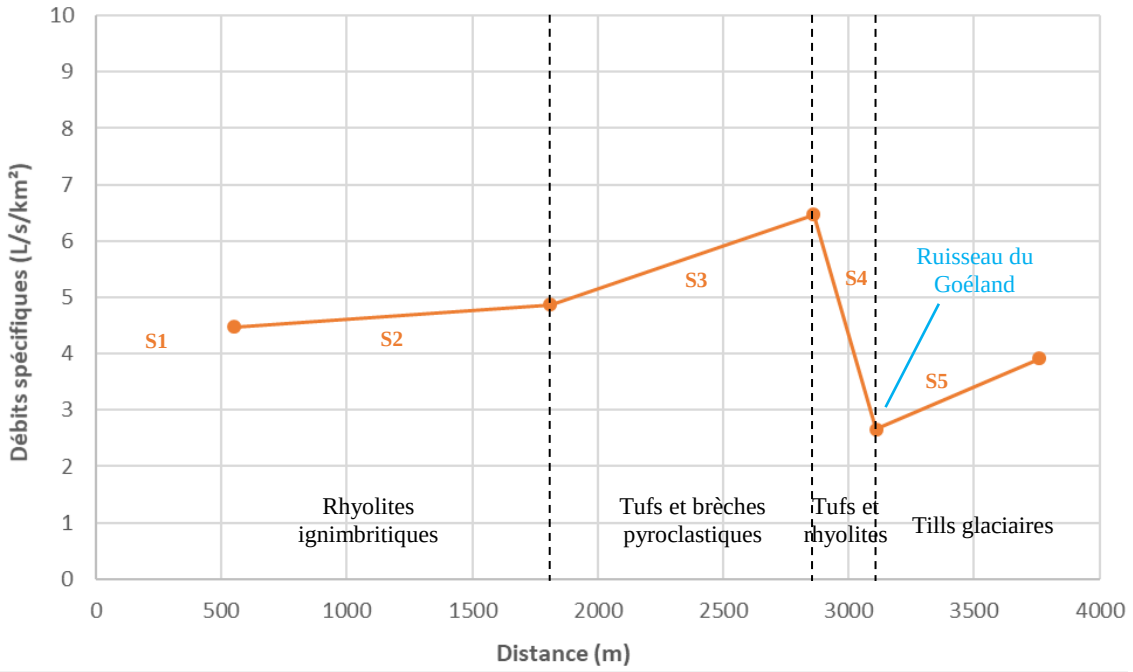
Annexe 71. Débits réservés ; traditionnel (un quart du débit moyen annuel), annuel (pour l'omble de fontaine) et spécifique au cycle vital de l'omble de fontaine. Source : Benyahya et al. (2009).



Annexe 72. Régions écohydrologiques du Québec méridional. Source : Belzile et al. (1997).

Indicateurs hydrologiques	Paramètres régionaux		Ruisseau Savoyard (m^3/s)	La Belle Rivière (m^3/s)
	a	*b*		
QMA	0,047	0,952	0,158	0,864
CMA	0,89	0,78	2,407	9,669
EMA	1,30E-03	1,185	0,006	0,049
Indice d'étiage	---	---	0,17	0,20

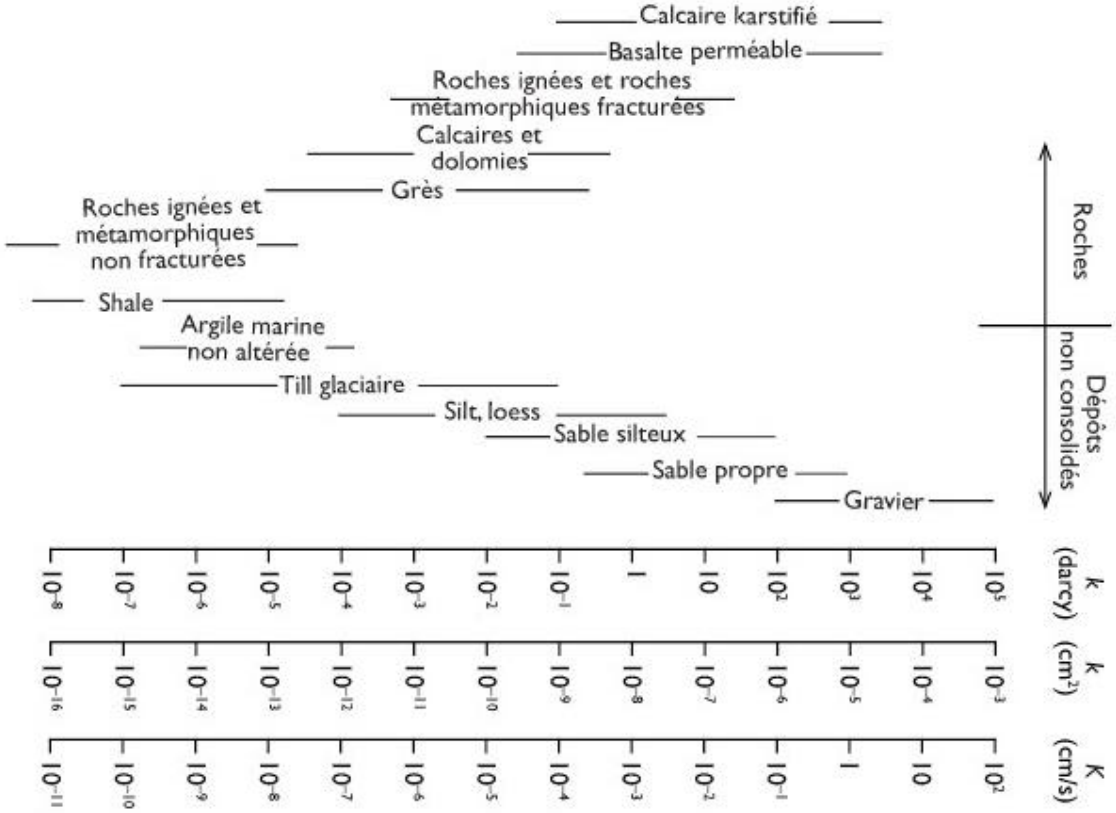
Annexe 73. Indicateurs hydrologiques des ruisseaux de Savoyard et de la Belle Rivière. Cette liste présente le débit moyen annuel (QMA), la crue moyenne annuelle (CMA), l'étiage moyen annuel (EMA) et l'indice d'étiage, calculés selon la fonction puissance de Benyahya et al. (2009).



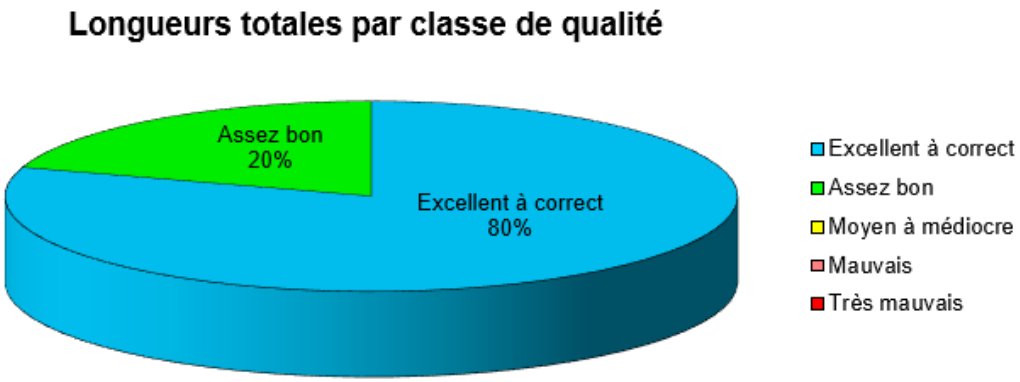
Annexe 74. Relation hydrologie-géologie du ruisseau Savoyard. La lithologie est indiquée en noir et les confluences en bleu.

Roches	Porosité totale (%)	Perméabilité (cm/s)	Résistivité (ohms*m)
Argilite	35	10^{-8} - 10^{-9}	70 à 200
Craie	35	10^{-5}	30 à 300
Tuf volcanique	32	10^{-5}	20 à 300
Marnes	27	10^{-7} - 10^{-9}	20 à 100
Grès	3 à 35	10^{-3} - 10^{-6}	30 à 800
Dolomite	1 à 12	10^{-5} - 10^{-7}	200 à 10'000
Calcaires	3	10^{-10} - 10^{-12}	200 à 10'000
Métaschistes	2.5	10^{-4} - 10^{-9}	300 à 800
Gneiss	1.5	10^{-8}	1'000 à 20'000
Quartzite	<1	10^{-10}	1'000 à 10'000
Granite	1	10^{-9} - 10^{-10}	1'000 à 15'000
Gabbro	1 à 3	10^{-4} - 10^{-9}	6'000 à 10'000
Basalte	1.5	10^{-6} - 10^{-8}	800 à 15'000

Annexe 75. Intervalles de porosité totale, perméabilité et résistivité de roches, parmi les tufs volcaniques et les roches ignées. Source : https://coursgeologie.com/la-permeabilite-261/.



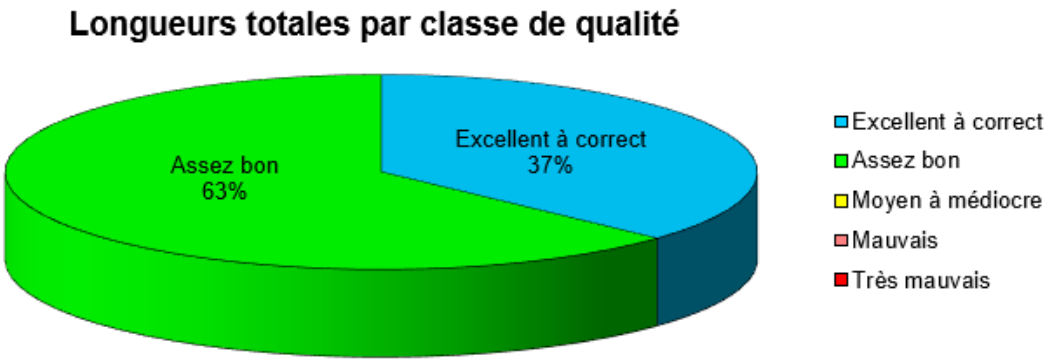
Annexe 76. Gamme de valeurs de perméabilité de roches et dépôts non-consolidés tels que les tills glaciaires et les silts. Source : http://hydrogeologistswithoutborders.org/wordpress/1979-francais/chapitre-2/.



Annexe 77. Représentation diagramme de la qualité physique de la Belle Rivière, post-simulation, estimée d'après Qualphy sur sa longueur totale.

Secteurs	Tronçons	Longueur	Type	**Indice**	% par rapport au maximum possible par compartiment		
					Lit majeur	Berges	Lit mineur
Langlade	BR 15	380 m	T6	**81**	93%	92%	65%
	BR 14	1 605 m	T3	**89**	100%	97%	71%
	BR 13	676 m	T3	**88**	100%	96%	68%
	BR 12	475 m	T3	**83**	95%	88%	66%
	BR 11	649 m	T3	**84**	95%	87%	69%
	BR 10	311 m	T3	**82**	95%	86%	65%
	BR 9	1 271 m	T3	**83**	95%	86%	67%
	BR 8	133 m	T2	**83**	90%	100%	73%
	BR 7b	484 m	T2	**87**	90%	100%	80%
	BR 7a	391 m	T2	**81**	90%	88%	75%
	BR 6	1 163 m	T2	**78**	90%	90%	68%
	BR 5	136 m	T2	**80**	90%	100%	67%
	BR 4	326 m	T2	**71**	90%	89%	57%
	BR 3	150 m	T1	**73**	100%	79%	67%
Linéaire total		**8150 m**		**82**			

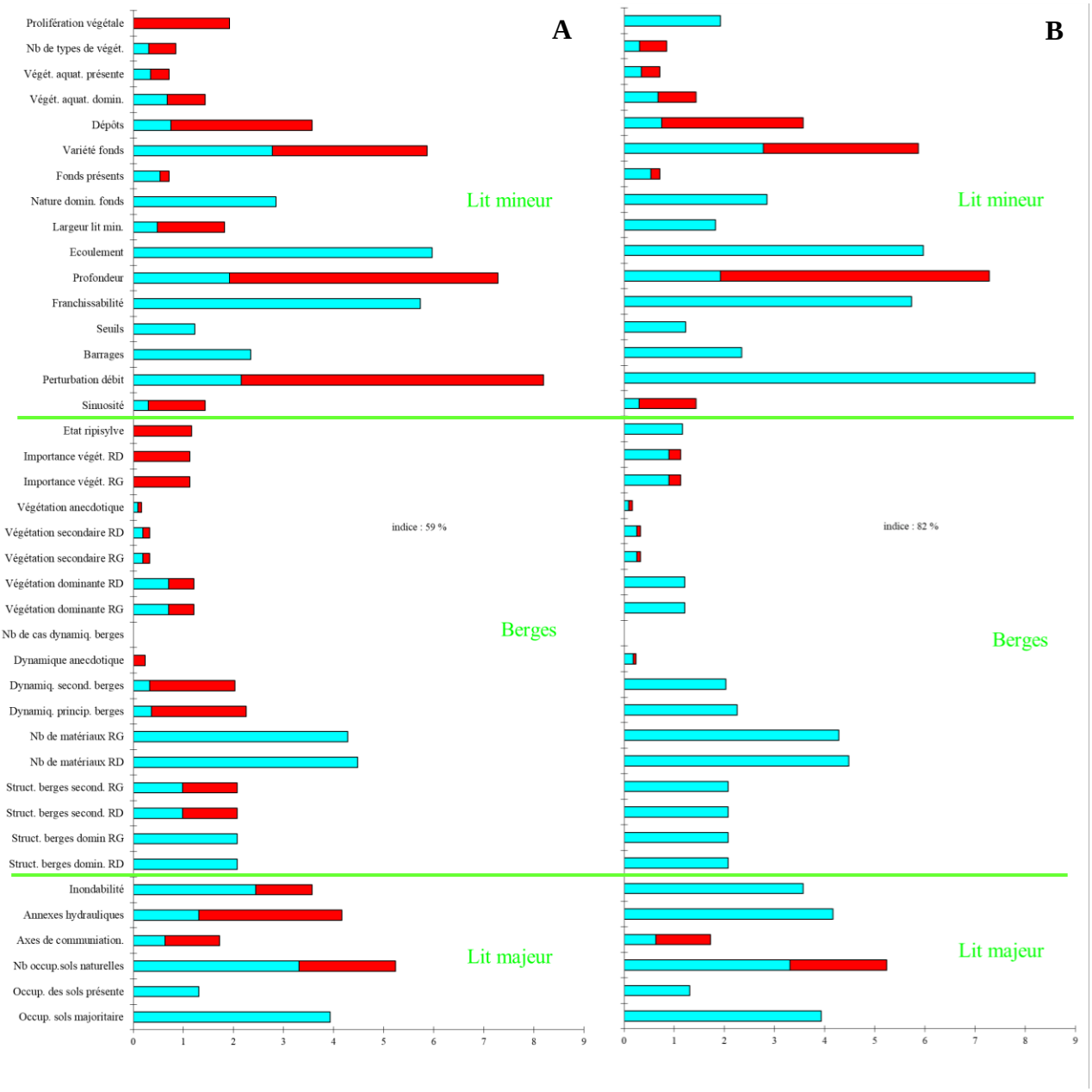
Annexe 78. Indices de qualité physique de la Belle Rivière post-simulation, par tronçon (Br 3 à BR 15) et par compartiments.



Annexe 79. Représentation diagramme de la qualité physique du ruisseau Savoyard, post-simulation, estimée d'après Qualphy sur sa longueur totale.

Secteurs	Tronçons	Longueur	Type	**Indice**	% par rapport au maximum possible par compartiment		
					Lit majeur	Berges	Lit mineur
Saint-Pierre	S5	650 m	T4	**82**	85%	97%	73%
	S4	250 m	T2	**75**	64%	97%	66%
	S3	1 050 m	T2	**60**	0%	97%	57%
	S2	750 m	T1	**77**	89%	99%	66%
	S1	550 m	T6	**81**	64%	95%	83%
Linéaire total		**3250 m**		**75**	61%	97%	69%

Annexe 80. Indices de qualité physique du ruisseau Savoyard post-simulation, par tronçon (S1 à S5) et par compartiments.



Annexe 81. Comparaison de graphiques à barres décrivant le niveau de qualité physique de chacun des paramètres qui caractérisent le tronçon S5 du ruisseau Savoyard ; A) avant, et B) après simulation de réaménagements. Les données révèlent des taux de satisfaction du milieu (barres bleues), et une quantification des préjudices (barres rouges) principalement causés par l'anthropisatio

Résumé

Le projet de recherche OMBLESPM s'inscrit dans une démarche scientifique encourageant l'interdisciplinarité ; un lien essentiel à entretenir, si ce n'est pour pouvoir mieux décrire et donc comprendre le fonctionnement des hydrosystèmes de l'archipel de Saint-Pierre et Miquelon. Une vision holistique, par l'analyse de facteurs climatiques, géographiques, hydrométriques et physico-chimiques, a pour objectif d'apprécier l'espace vital de l'espèce repère : l'omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*), parmi les ruisseaux de la Belle Rivière (Langlade) et Savoyard (Saint-Pierre).

Alors que l'archipel est vierge de tous relevés hydrométriques, cette étude vise à récolter des données temporelles et spatialisées. La comparaison des modélisations de régimes hydrologiques du ruisseau Savoyard accorde une plus grande fiabilité aux méthodes de régionalisation. Une prévention des risques écologiques passe par la définition des débits extrêmes, et la proposition de débits réservés spécifiques au cycle de vie de l'omble. L'exploration de la qualité physique et chimique démontre l'impact de l'anthropisation dans des milieux qu'il s'agit de restaurer, ainsi qu'une grande capacité d'adaptation du salmonidé face à un climat et un environnement pourtant d'apparences hostiles.

Mots-clés : Saint-Pierre et Miquelon ; omble de fontaine ; climatologie ; géographie ; hydrométrie ; chimie.

Abstract

The OMBLESPM research project is part of a scientific approach encouraging interdisciplinarity; an essential link to maintain, if not to be able to better describe and therefore understand the functioning of the hydrosystems of the archipelago of Saint-Pierre and Miquelon. A holistic vision, through the analysis of climatic, geographical, hydrometric and physico-chemical factors, aims to appreciate the living space of the main species: the brook trout (Salvelinus fontinalis), among the streams of la Belle Rivière (Langlade) and Savoyard (Saint-Pierre).

While the archipelago is untouched by any hydrometric surveys, this study aims to collect temporal and spatial data. The comparison of models of the hydrological regimes of the Savoyard stream gives greater reliability to the regionalization methods. Prevention of ecological risks involves defining extreme flows, and proposing reserved flows specific to the life cycle of the char. The exploration of the physical and chemical quality demonstrates the impact of anthropization in environments that need to be restored, as well as a great capacity for adaptation of the salmonid in the face of a climate and an environment of nonetheless hostile appearances.

Keywords: Saint-Pierre and Miquelon; brook trout; climatology; geography; hydrometry; chemistry.