

VULNÉRABILITÉ CLIMATIQUE DES COMMUNAUTÉS DE MACROINVERTÉBRÉS BENTHIQUES DU SUD DU QUÉBEC

Louis Astorg, Pascal Côté, Vincent Fugère

Groupe d'éducation et d'écosurveillance de l'eau

Table des matières

Résumé 1

Liste d'abréviations 2

1. Introduction 3

2. Matériel et méthodes 5

2.1. Données utilisées 5

2.1.1. Données de MIB 5

2.1.2. Données bioclimatiques 6

2.1.3. Affinité thermique 6

2.1.4. Données physiologiques 8

2.1.5. Température de l'eau 8

2.2. Analyses de communautés 9

2.2.1. Non-Metric Multidimensional Scaling (NMDS) 9

2.2.2. Arbre de Régressions multivariées (MRT) 9

2.2.3. Taxons Indicateurs 9

2.2.4. L'indice de température des communautés (CTI) 10

2.2.5. Modèle joint de distributions d'espèces (JSDM) 10

3. Résultats 11

3.1. Analyses de communautés 11

3.1.1. NMDS 11

3.1.2. MRT 13

3.2. Température de l'eau 15

3.3. Les taxons et la température 17

3.3.1. Taxons indicateurs 17

3.3.3. Les taxons et leurs traits 21

3.4. CTI 23

3.5. Prédictions futures 27

3.5.1. Projections climatiques 27

3.5.2. Projections des indices 29

4. Discussion 32

4.1. Structure des communautés de MIB et leurs traits 32

4.2. Indice de Température des Communautés - CTI 34

4.3. Les prédictions futures des sous-indices 35

4.4. Limites de l'étude 36

5. Conclusion et recommandations 36

6. Bibliographie 38

7. Annexe 42

Résumé

Les écosystèmes aquatiques et riverains sont essentiels pour le maintien de la biodiversité aquatique et pour les nombreux services écosystémiques qu'ils apportent aux sociétés humaines. Les macroinvertebrés benthiques (MIB) jouent un rôle central dans le fonctionnement et la santé de ces écosystèmes. Malgré l'importance des MIB dans les cours d'eau du Québec, aucune étude n'a exploré les impacts des changements climatiques sur ces organismes. Un programme du Groupe d'éducation et d'écosurveillance de l'eau (G3E), *SurVol Benthos*, permet d'avoir un réseau de surveillance de la santé des cours d'eau permanents qui documente les changements des MIB et leur biodiversité dans les écosystèmes aquatiques et riverains. Grâce aux suivis du G3E, les associations des MIB avec des variables climatiques et leurs changements temporels ont pu être explorées sur des centaines de cours d'eau au sud du Québec. Pour cela, les affinités thermiques des taxons de MIB ont été déterminées et comparées aux rares données physiologiques disponibles dans la littérature scientifique. Cela a permis le calcul de l'indice thermique des communautés (en anglais: community temperature index, ou CTI). Les taxons fortement associés avec des variables climatiques ont également été identifiés. Finalement, les compositions futures des communautés des MIB ont été projetées à l'aide de données climatiques simulées. Les résultats montrent que les affinités thermiques des différents taxons de macroinvertébrés bentiques (MIB), qui sont calculées à partir des niches thermiques réalisées, sont de bonnes approximations de leurs limites physiologiques (températures critiques maximales – CT_{max}). De plus, la structure des communautés de MIB est associée avec les températures du trimestre le plus chaud (les mois d'été) des sites échantillonnés. Ainsi, certains taxons de MIB sont sensibles à des températures d'été relativement élevées au sud du Québec. Le Groupe 3.1 (Capniidae, Chloroperlidae, Leuctridae, Nemouridae, Taeniopterygidae, Perlodidae), le Groupe 2.2 (Limnephilidae, Apataniidae, Lepidostomatidae, Brachycentridae, Odontoceridae, Uenoidae) ainsi que les taxons Ephemerellidae et Heptageniidae sont associés avec des températures d'été froides et semblent donc plus vulnérables au réchauffement climatique. Le taxon Hydropsychidae est, quant à lui, associé à des sites possédant des températures d'été chaudes. L'indice thermique des communautés est un indice prometteur pour suivre l'impact du réchauffement climatique sur les communautés de MIB. En effet, cet indice semble être influencé par des variations des températures résultantes de changements climatiques prédits par le modèle climatique CanESM5-CanOE. Plus de travail est à fournir afin de valider cet indice en utilisant des données de suivis à long terme et une résolution taxonomique plus détaillée. Les changements dans les communautés de MIB prédits par notre modèle sont relativement faibles à moyen terme (2021-2040) pour toutes les trajectoires communes d'évolution socio-économique, même les plus pessimistes. En revanche, les changements dans les communautés de MIB sont plus importants à long terme (2081-2100) pour les trajectoires communes d'évolution socio-économique les plus optimistes. Ces résultats soulignent la nécessité de continuer les efforts pour développer et améliorer les outils de suivis des impacts que peuvent avoir les changements climatiques sur les rivières du Québec.

Liste d'abréviations

CanESM5-CanOE : modèle climatique

CTI : L'indice de température des communautés

CT_{max} : températures critiques maximales

EPA : Environment Protection Agency

EPT : Éphéméroptères, trichoptères, plécoptères

G3E : Groupe d'éducation et d'écosurveillance de l'eau

ISB : Indice de santé biologique

JSDM : Modèle joint de distributions d'espèces

LT_{50} 96 heures : température léthale aiguë

MELCCFP : ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs

MIB : Macroinvertébrés benthiques

MRT : Arbre de Régressions multivariées

NARS : nationaux des ressources aquatiques américaines

NMDS : Non-Metric Multidimensional Scaling

PA : précipitations annuelles moyennes

PTPC : précipitations moyennes du trimestre le plus chaud

PTPS : précipitations moyennes du trimestre le plus sec

RCBA-CABIN: Réseau Canadien de Biosurveillance Aquatique

RSBenthos : Réseau de suivi du benthos

SP : la saisonnalité des précipitations

SSP (1,2,3,5) : Les trajectoires communes d'évolution socio-économique sont des scénarios de changements socio-économiques mondiaux

TTPC : températures moyennes du trimestre le plus chaud

TTPS : températures moyennes du trimestre le plus sec

1. Introduction

Les écosystèmes de rivières abritent une forte biodiversité (Dudgeon, *et al.*, 2006) et procurent d'importants services écologiques aux populations humaines tels que l'apport d'eau potable et de nourriture ainsi que le maintien des habitats et de la biodiversité (Hanna, *et al.*, 2018). Certaines recherches ont montré que les écosystèmes de rivières sont à la fois disproportionnellement importants et disproportionnellement menacés (Tockner, *et al.*, 2002; Vörösmarty, *et al.*, 2010). Les communautés de macroinvertébrés benthiques (MIB), soit les vers, les mollusques, les crustacés et les insectes qui vivent au fond des rivières, jouent un rôle prépondérant dans le fonctionnement de ces écosystèmes. Ils contribuent aux cycles biogéochimiques en se nourrissant d'algues et de matières organiques particulaires (Schmera, *et al.*, 2017). De plus, les MIB sont des organismes ingénieurs de leurs habitats (Mermillod-Blondin, 2011; Statzner, 2012) et servent de nourriture aux organismes de niveaux trophiques plus élevés comme les poissons (Covich, *et al.*, 1999; Schmera, *et al.*, 2017). Ces organismes servent de bio-indicateurs de la qualité du milieu où la disparition d'espèces sensibles à la pollution reflète une dégradation de l'habitat (par exemple, en raison de l'agriculture intensive dans les bassins versants). Des programmes de bio-suivis basés sur les MIB existent dans plusieurs pays et régions. Le Réseau Canadien de Biosurveillance Aquatique (RCBA, ou CABIN en anglais) et le programme Réseau de suivi du benthos (RSBenthos) en sont des exemples. Il existe également des programmes de science participative qui caractérisent la qualité de l'eau des cours d'eau à l'aide de bio-indicateurs MIB. Le Groupe d'éducation et d'écosurveillance de l'eau (G3E) a développé en 2006, en partenariat avec le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP), le programme *SurVol Benthos*. Ce programme de surveillance volontaire de la santé des petits cours d'eau utilise les macroinvertébrés benthiques comme indicateur biologique. Constitué des participants partout dans la province comme des organismes de bassin versant (OBV), des parcs nationaux de la SÉPAQ, des cégeps et d'autres organismes en environnement, ces échantillonnages ont permis de quantifier l'intégrité écologique d'un grand nombre de cours d'eau au sud du Québec. Un indice de santé du benthos adapté au niveau d'identification réalisé dans *SurVol Benthos* a été développé (ISB_{SurVol}) (MDDEFP, 2013). Depuis 2017, un projet du G3E utilisant notamment les protocoles de *SurVol Benthos* a été mis en place (*Des rivières surveillées, s'adapter pour l'avenir*). Ce projet permet au G3E d'avoir un réseau de surveillance de la santé des cours d'eau permanent qui documente l'impact des changements climatiques sur les écosystèmes aquatiques et riverains et leur biodiversité. Ce projet est financé par le gouvernement du Québec.

Malgré l'importance des MIB au Québec, encore peu d'études ont exploré l'impact du réchauffement climatique sur ces communautés. Dans un contexte de changements climatiques, il est particulièrement important de bien distinguer les effets du climat et ses changements sur la composition des communautés de MIB de ceux qu'induisent d'autres pressions, telles que la dégradation du milieu. Comprendre les effets du réchauffement sur les communautés de MIB permettrait de déployer des efforts de conservation adaptés et de mieux prédire l'évolution des indices de qualité de l'eau indépendamment des variations de la qualité de l'environnement. Compte tenu de l'importance des MIB pour le suivi écologique de nos cours d'eau, déterminer la sensibilité de ces organismes bio-indicateurs au réchauffement climatique est

essentiel pour les activités de suivi du G3E et des participants au programme *SurVol Benthos*. Plusieurs études récentes ont montré que le réchauffement du climat favorise les espèces préférant les milieux chauds et défavorise les espèces préférant les conditions froides (Bowler & Böhning-Gaese, 2017). Une telle tendance peut être visualisée grâce au calcul d'un « indice thermique des communautés » (en anglais: community temperature index, ou CTI), soit la moyenne pondérée des affinités thermiques de toutes les espèces composant une communauté (Devictor, *et al.*, 2008). Lorsqu'une communauté est composée principalement d'espèces préférant les milieux chauds, le CTI est élevé, alors qu'un CTI faible reflète une communauté dominée par des espèces dites « d'eau froide ». Les affinités thermiques des espèces peuvent être évaluées à l'aide de deux approches distinctes, soit: 1) par des tests physiologiques de tolérance thermique critique (en anglais: critical thermal maximum, ou CT_{max}), où des individus sont exposés à des conditions de plus en plus chaudes jusqu'à ce que leurs performances soient affectées (par exemple, perte d'équilibre et du contrôle de la flottabilité chez les poissons); ou 2) en déterminant la « niche thermique réalisée » des espèces, soit la température la plus chaude à laquelle une espèce a été recensée par des inventaires sur le terrains. Normalement, les espèces avec une affinité aux milieux chauds sont capables de maintenir leur performance à des températures plus élevées (CT_{max} plus élevé). Il est donc plus probable de les retrouver dans des milieux chauds (niche thermique réalisée plus chaude). La préférence pour les milieux chauds rend également ces espèces plus résilientes au réchauffement climatique.

Des études à long terme ont montré que les valeurs de CTI des communautés de MIB tendent à augmenter avec le réchauffement climatique (Ajani, *et al.*, 2020; Stuart-Smith, 2021). Par exemple, un grand nombre d'études physiologiques ont quantifié le CT_{max} de plusieurs espèces de poissons d'eau douce pour montrer que certaines d'entre elles préfèrent les eaux froides, fraîches ou chaudes (Comte, *et al.*, 2021). En combinant ces données physiologiques à des données de suivi en milieu naturel, les chercheurs ont pu démontrer que les communautés de poissons de rivière sont devenues de plus en plus « thermophiles » au cours des dernières décennies. Les espèces d'eau chaude ont progressivement remplacé les espèces d'eau froide et d'eau fraîche alors que le climat se réchauffait, ce qui augmente le CTI moyen des communautés. De telles études n'ont pas encore été menées sur les communautés de MIB. Dans cette étude, la niche thermique de toutes les familles de macroinvertébrés recensées par le programme de biosurveillance aquatique *SurVol Benthos* du G3E a été quantifié. Ceci a ensuite permis de déterminer si le CTI des communautés varie à travers le Québec. Comme les tests physiologiques de CT_{max} sont rares chez ces organismes qui proviennent d'une grande diversité de taxons, nos analyses s'appuient sur des données de distribution à grande échelle utilisant une base de « méga-données » issue des programmes de suivis états-uniens. Avec ces données, il a été possible de déterminer les conditions les plus chaudes dans lesquelles les taxons d'invertébrés retrouvés au Québec ont été recensés dans le climat plus chaud des États-Unis. À travers ces travaux de recherche, nous visons aussi à démontrer que le CTI peut servir d'indicateur de vulnérabilité climatique chez les communautés de macroinvertébrés benthiques en plus d'identifier les familles les plus vulnérables au réchauffement.

Pour les besoins de cette étude, de récents modèles statistiques en écologie des communautés, soit les modèles joints de distribution des espèces (Clark, *et al.*, 2017; Ovaskainen, *et al.*, 2017) ont été utilisés. Ces modèles représentent une extension des modèles de distribution classique, qui se concentrent

habituellement sur une seule espèce. Les modèles joints de distribution des espèces permettent de quantifier les relations entre des facteurs environnementaux (par exemple des variables climatiques) et les taxons qui composent les communautés. De plus, ces analyses permettent de prendre en considération les attributs (les traits fonctionnels des espèces) et la proximité entre les sites d'échantillonnage (l'autocorrélation spatiale) (Tikhonov, *et al.*, 2020). Pour déterminer l'effet des facteurs climatiques sur les taxons recensés par le programme *SurVol Benthos*, des données climatiques pour chaque site d'échantillonnage doivent d'abord être obtenues. Des analyses de communautés permettent ensuite de déterminer les variables climatiques importantes pour la composition des MIB ainsi que de grouper les sites en fonction des abondances des taxons de MIB en utilisant la variable climatique la plus importante. Ensuite, les groupes de sites sont utilisés pour désigner des taxons indicateurs dont l'association avec les groupements de sites est particulièrement forte. Finalement, un modèle joint de distribution des taxons a été ajusté à l'aide de ces prédicteurs climatiques. Ce modèle permet également de prédire les distributions futures en fonction des conditions climatiques futures simulées à partir de divers scénarios d'émissions de CO_2. De telles analyses de pointes ont récemment été menées pour quelques groupes d'organismes. Cependant, à notre connaissance, aucun modèle joint de distribution n'a encore été développé pour les MIB, au Québec ou ailleurs.

Cette étude vise à évaluer les impacts des changements climatiques sur les communautés de MIB dans les rivières du sud du Québec. Le projet comprend quatre sous-objectifs:

1. Déterminer l'affinité thermique de chaque taxon de MIB répandue au Québec.
2. Calculer l'affinité thermique moyenne de chaque communauté de MIB (CTI) recensée par le programme de suivi *SurVol Benthos* du G3E et produire une carte pour identifier les régions ou cours d'eau où les changements les plus prononcés sont susceptibles de se produire.
3. Identifier les taxons dont les associations avec des variables climatiques sont particulièrement fortes, sur lesquels les changements climatiques peuvent donc avoir des impacts importants.
4. Obtenir des variables climatiques pour chaque site d'échantillonnage de G3E, ajuster un modèle joint de distribution des taxons, puis projeter la composition future des communautés à l'aide de données climatiques simulées pour le futur.

La réalisation de ces quatre objectifs vise à fournir un outil de gestion pour G3E, soit un indicateur de vulnérabilité thermique à l'échelle de la communauté et une liste de familles sensibles pouvant servir d'indicateurs thermiques à l'échelle du taxon.

2. Matériel et méthodes

2.1. Données utilisées

2.1.1. Données de MIB

Après nettoyage des données, le programme *SurVol Benthos* du G3E a permis de quantifier les abondances non transformées de 76 taxons de MIB dans 215 cours d'eau au sud du Québec de 2005

à 2021 pour un total de 511 échantillons analysés dans le présent rapport. Les échantillons issus de *SurVol Benthos* ont été prélevés durant les mois d'août à octobre, une fois par année. Le protocole de prélèvement et d'identification des MIB est issu du Guide de surveillance biologique basée sur les MIB d'eau douce du Québec du MELCCFP (MDDEFP, 2013). Ce protocole comprend différents niveaux de précision taxonomique selon les besoins de l'utilisateur; les participants de *SurVol Benthos* utilisent les protocoles de niveau 1.

2.1.2. Données bioclimatiques

La disponibilité de données environnementales étant variable pour les différents sites et dates des suivis de *SurVol Benthos*, des données bioclimatiques historiques du projet *WorldClim* ont été extraites afin de caractériser l'environnement des échantillons biologiques. Les données bioclimatiques historiques fournies par le projet *WorldClim* sont dérivées des valeurs mensuelles de températures de l'air et de précipitations de 1970 à 2000 afin de générer des variables significatives sur le plan biologique (Fick & Hijmans, 2017). Ces données sont disponibles à plusieurs résolutions spatiales (exprimées en minutes d'un degré de longitude et de latitude): 10 minutes, 5 minutes, 2,5 minutes et 30 secondes. Les données bioclimatiques ont été extraites à une résolution spatiale de 2,5 minutes (d'un degré de longitude/latitude) pour les sites des suivis de *SurVol Benthos*, ce qui représente une grille d'environ 4,5 km^2 à l'équateur. La résolution de 2,5 minutes a été préférée à la résolution de 30 secondes, car celle-ci ne comprend pas de données pour toutes les coordonnées des sites des suivis de *SurVol Benthos*. Les variables bioclimatiques sont également disponibles pour des projections climatiques futures. Les valeurs mensuelles de la température minimale, de la température maximale et des précipitations ont été traitées pour 23 modèles climatiques mondiaux (GCM) et pour quatre trajectoires communes d'évolution socio-économique (SSP): 1, 2, 3 et 5. Les projections du modèle CanESM5-CanOE (Christian , *et al.*, 2022) ont été utilisées pour extraire les variables bioclimatiques futures de 2021-2040 et 2081-2100 à une échelle spatiale de 2,5 minutes. CanESM5-CanOE est le modèle canadien du système terrestre le plus récent intégrant les processus biogéochimiques océaniques. Les trajectoires communes d'évolution socio-économique (SSP) sont des scénarios de changements socio-économiques mondiaux projetés jusqu'en 2100. Ils sont utilisés pour dériver des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre avec différentes politiques climatiques. Les trajectoires communes d'évolution socio-économique (SSP) sont:

- SSP1: Une trajectoire de durabilité. Les politiques climatiques sont axées sur le bien-être humain, les technologies propres et la conservation des environnements naturels.
- SSP2: Une trajectoire à mi-chemin. Les politiques climatiques poursuivent les modèles de développement actuels.
- SSP3: Une trajectoire de rivalités régionales. Les politiques climatiques sont orientées sur les problèmes régionaux plutôt que mondiaux.
- SSP5: Une trajectoire de développement avec des énergies fossiles. Les politiques climatiques sont basées sur un développement à l'aide de combustibles fossiles.

2.1.3. Affinité thermique

Pour déterminer la vulnérabilité d'une communauté au réchauffement climatique, il faut d'abord calculer

l'affinité thermique de chaque espèce composant la communauté. Deux approches sont généralement utilisées: 1) utiliser des tests physiologiques de l'affinité thermique, par exemple pour déterminer le maximum thermique critique (acronyme en anglais: CT_{max}), ou 2) utiliser des données de distribution pour déterminer la température maximale à laquelle on retrouve l'espèce, soit la limite supérieure de la « niche thermique réalisée ». Compte tenu de la grande diversité taxonomique des MIB, des données physiologiques sont disponibles que pour une faible proportion de taxons. Les données de distribution des MIB provenant des suivis benthiques américains ont donc été utilisées pour quantifier la niche thermique des taxons, une mesure hautement corrélée avec la tolérance physiologique (thermique) chez d'autres organismes.

Pour ce faire, toutes les données disponibles des relevés nationaux des ressources aquatiques américaines (NARS) de l'Environment Protection Agency (EPA) (U.S. EPA, 2022) ont été compilées. Les NARS comprennent des milliers de sites d'échantillonnage à des latitudes au sud des sites échantillonnés par G3E. Les données provenant des NARS permettent donc une bonne estimation de l'affinité thermique des taxons retrouvés au Québec. La base de données NARS compilée pour cette étude comprend:

- L'évaluation nationale des lacs (National Lakes Assesment) 2007, 2012, 2017
- L'évaluation nationale des rivières et des ruisseaux (National Streams and Rivers Assessment) 2004, 2008-2009, 2013-2014, 2018-2019
- L'évaluation nationale de l'état des côtes (National Coastal Condition Assessment) 1999-2001, 2005-2006, 2010, 2015 en conservant uniquement les sites des Grands Lacs, afin d'exclure les milieux saumâtres ou marins

La base de données compilée comprend l'abondance de chaque taxon enregistré aux États-Unis à chaque site échantillonné de 1999 à 2019, où les MIB sont échantillonnés à l'aide de protocoles standards. Les données bioclimatiques historiques avec une résolution spatiale de 5 minutes ont été extraites pour chacun des sites dans la base de données NARS pour associer les taxons échantillonnés avec une température associée à leur niche thermique réalisée. Une fois les variables bioclimatiques obtenues pour chaque station d'échantillonnage des programmes de l'EPA, il est possible de déterminer, pour chaque taxon, les conditions climatiques les plus chaudes dans lesquelles chaque espèce a été recensée. La variable bioclimatique des températures moyennes du trimestre le plus chaud a été sélectionnée, car elle représente bien la préférence de température des taxons (Sundermann, *et al.*, 2022). Plus cette température est importante, plus le taxon peut être considéré comme un taxon d'eau chaude, donc moins vulnérable au réchauffement climatique. Même si les données bioclimatiques portent sur la température de l'air, il est assumé qu'à très large échelle spatiale, cette dernière reflète la variation dans la température de l'eau.

Dans les milliers de taxons retrouvés dans les données de l'EPA, seulement une petite proportion se retrouve au Québec. Ainsi, cette base de données a été épurée en utilisant une liste de tous les taxons recensés au Québec, fournit par le programme Réseau de suivi du benthos du MELCCFP. Comme les données de MIB du G3E sont identifiées au niveau taxonomique de la famille, l'affinité thermique et les tolérances à la pollution moyennes de chaque famille ont été calculées en combinant les données spécifiques aux genres ou aux espèces qui composent ces familles.

2.1.4. Données physiologiques

Une revue de littérature a été réalisée à l'aide du moteur de recherche Google Scholar afin de compiler les données de CT_{max} de MIB. Les mots clés utilisés pour cette recherche combinent un ou plusieurs mots clés spécifiques aux taxons de MIB : macroinvertebrate, benthic macroinvertebrate, chironomidae, chironomids, nonbiting midges, lake flies, ephemeroptera, mayfly, plecoptera, stonefly, trichoptera, caddisfly, odonata, dragonfly avec les mots clés suivants: critical thermal maximum, critical thermal limit, CT_{max}, CTM, LT_{50}, LT_{100}, upper thermal tolerance, thermal limit, heat tolerance et thermal tolerance. Après une première épuration des résultats en se basant sur le titre des articles, un total d'environ 80 articles ont été analysés plus en détails. Parmi ceux-ci, seules les études faites en Amérique du Nord sur des macroinvertébrés benthiques et leurs tolérances thermiques ont été retenues. À partir des références comprises dans ces articles, une trentaine articles supplémentaires ont été identifiés pour un total d'environ 110 articles analysés. Parmi les articles analysés, 17 articles ayant les informations recherchées ont été retenus afin d'en extraire les données. Cette revue de littérature a permis l'extraction des données de CT_{max} ou de température léthale aiguë (acronyme en anglais: LT_{50} 96 heures) pour 21 familles de MIB. Pour ces familles de MIB, les relations entre les valeurs de CT_{max}, de LT_{50} 96 heures et les valeurs d'affinités thermiques moyennes estimées à partir de la niche réalisée (données de l'EPA) ont été explorées avec des modèles de régression linéaire. Il est important de noter que la température d'acclimatation exerce une influence importante sur l'affinité thermique; cependant, compte tenu du nombre limité de données, les effets des températures d'acclimatation sur le CT_{max} et LT_{50} n'ont pas été analysés. L'analyse a été faite sur les données brutes en assumant que les auteurs des études ont choisi une température d'acclimatation représentative du milieu naturel dans lequel les individus avaient été prélevés.

2.1.5. Température de l'eau

Les valeurs de températures provenant des données bioclimatiques étant dérivées de températures de l'air historique, il est important de vérifier que ces températures sont représentatives des températures retrouvées dans l'eau des rivières au sud du Québec. Pour cela, des données journalières de température de l'eau de surface de rivières au sud du Québec ont été téléchargées depuis la plateforme DataStream. Cette plateforme permet d'organiser, stocker et visualiser les données sur la qualité des eaux en Amérique du Nord. Toutes les données terrain de températures journalières de l'eau de surface disponibles pour les rivières de la province du Québec ont été extraites de la plateforme DataStream Grands Lacs (Mikisew Cree First Nation, 2023). Les sites comportant des données négatives de température ont été exclus des données. Les sites ayant des latitudes supérieures à 55°N ont également été exclus dans le but de mieux représenter les sites suivis dans *SurVol Benthos*. En calculant les températures moyennes par trimestre des différents sites, il a été déterminé que le troisième trimestre est le trimestre le plus chaud dans les rivières sélectionnées. Les températures moyennes du trimestre le plus chaud des eaux de surface ont ensuite pu être comparées aux températures du trimestre le plus chaud extrait des variables bioclimatiques (basées sur la température de l'air) pour les sites des données DataStream à l'aide d'un modèle de régression linéaire.

2.2. Analyses de communautés

2.2.1. Non-Metric Multidimensional Scaling (NMDS)

La NMDS est un moyen de visualiser le niveau de similarité des objets individuels d'un ensemble de données. Cette analyse est utilisée pour visualiser des informations sur les distances de paires d'objets dans un espace abstrait. Plus techniquement, MDS fait référence à un ensemble de techniques d'ordinations connexes utilisé dans la visualisation d'informations, en particulier pour afficher les informations contenues dans une matrice de distance. C'est une forme de réduction de dimensionnalité non linéaire. Une analyse de NMDS a été faite sur le jeu de données d'abondances de MIB fourni par le G3E afin de visualiser la similarité entre les sites en matière de composition de la communauté. Dans cette analyse, les sites les plus proches sur le diagramme ont une communauté de MIB plus similaire. Il est également possible de mettre en relation les valeurs des sites sur les axes de la NMDS avec différentes variables associées à ces sites avec des relations linéaires. Après avoir extrait les variables bioclimatiques historiques pour tous les sites de *SurVol Benthos*, les relations entre les scores de NMDS des sites et ces variables ont été explorées afin de visualiser les associations entre la structure des communautés benthiques et les variables bioclimatiques. De plus, les scores de NMDS des sites et les abondances des taxons ont également été mis en relation afin de visualiser les associations entre les différences de communautés de MIB et les abondances des différents taxons. La librairie R *vegan* version 2.5-7 (https://github.com/vegandevs/vegan) a été utilisée pour faire l'analyse de NMDS.

2.2.2. Arbre de Régressions multivariées (MRT)

L'arbre de régressions multivariées (MRT) est une technique de groupement hiérarchique contraint (Death, 2002). La MRT divise une matrice de réponse en plusieurs groupes en fonction de seuils de variables explicatives afin de produire un arbre de régression qui illustre les interactions entre ces variables. Dans notre cas, la matrice réponse est la matrice contenant les abondances des taxons aux différents sites échantillonnés dans le cadre de *SurVol Benthos*. La matrice de variables explicatives est la matrice contenant les valeurs de variables bioclimatiques extraites pour les sites échantillonnés dans *SurVol Benthos*. Afin d'extraire la variable bioclimatique ayant la plus forte influence sur la communauté de MIB ainsi que d'avoir un modèle simple et facilement interprétable, le nombre de groupes créé par l'analyse de MRT est de deux. Ce modèle va donc déterminer quel est le seuil d'une variable bioclimatique historique qui départage le mieux les sites en deux groupes suivant les abondances des MIB. La librairie R *mvpart* version 1.6-2 a été utilisée pour faire l'analyse de MRT.

2.2.3. Taxons Indicateurs

Il est possible de déterminer quels taxons sont fortement associés à chacun de ces groupes créés par l'arbre de régressions multivariées. Pour cela, des valeurs de taxons indicateurs (Dufrene & Legendre, 1997) ont été calculées. Ces valeurs sont basées sur la fidélité (fréquence relative du taxon dans un groupe) et l'abondance (concentration des abondances du taxon dans un groupe) des taxons dans les différents groupes. Ensuite, des tests de permutations ont été utilisés afin d'assigner une valeur de support statistique (valeur de p) aux valeurs d'indice des taxons pour évaluer lesquels sont les plus

fortement liés à chacun des groupes. La librairie R *labvs* version 2.0-1 (Dufrene & Legendre, 1997) a été utilisée pour déterminer les taxons indicateurs.

2.2.4. L'indice de température des communautés (CTI)

Dans cette étude, le CTI est une moyenne des affinités thermiques des taxons pondérée par leurs abondances dans les différents échantillons de *SurVol Benthos*. La formule du CTI peut être écrite:

$$CTI = \sum_{t=1}^{n} Affinité\,thermique_t * AbondanceRelative_t$$

avec le nombre de taxons n et avec pour chaque taxon (t) une valeur d'affinité thermique et une valeur d'abondance relative (l'abondance du taxon divisée par l'abondance de tous les taxons). Afin de comprendre si le CTI a évolué de manière prédictible au cours du temps, les tendances temporelles du CTI aux sites échantillonnés ont été explorées à l'aide de modèles linéaires mixtes avec les sites en variable aléatoire. Le but de cette analyse étant de détecter un effet du réchauffement climatique sur le CTI, il est important d'évaluer si les données disponibles sont adaptées pour explorer ce processus à long terme. Pour mieux comprendre la disponibilité de sites avec une grande couverture temporelle, la relation entre la couverture temporelle (le nombre d'années entre le premier et le dernier échantillon) et le nombre d'échantillons pour chaque site a été explorée. Il est aussi important de comprendre les associations potentielles entre le CTI et d'autres indices, comme l'indice de santé du benthos (ISB). En effet, une forte relation entre ces deux indices remettrait en question la pertinence de calculer un nouvel indice. Afin d'explorer la relation entre le CTI et l'ISB, un modèle linéaire mixte avec les sites en variable aléatoire a été utilisé. Les modèles linéaires mixtes ont été réalisés avec la librairie R lme4 version 1.1-29 (Bates, *et al.*, 2015).

2.2.5. Modèle joint de distributions d'espèces (JSDM)

Parmi les nombreux outils analytiques disponibles aux écologistes, les modèles joints de distribution des espèces (JSDM) sont de plus en plus populaires. Les JSDM permettent de mettre en relation des données d'abondances d'espèces, des covariables environnementales et des traits de taxons (Tikhonov, *et al.*, 2020). Un JSDM a été utilisé afin de comprendre les relations entre les abondances des taxons échantillonnés durant le suivi *SurVol Benthos* du G3E, les variables environnementales associées aux différents sites et deux traits disponibles pour les taxons identifiés. Afin d'intégrer un maximum de sites des suivis benthiques effectués dans le programme *SurVol Benthos*, les variables environnementales utilisées pour le JSDM sont les variables bioclimatiques historiques disponibles en ligne. Les variables bioclimatiques à une échelle de 2,5 minutes sélectionnées pour le modèle sont la saisonnalité des précipitations (SP), les précipitations annuelles moyennes (PA), les précipitations moyennes du trimestre le plus sec (PTPS), les précipitations moyennes du trimestre le plus chaud (PTPC), les températures moyennes du trimestre le plus chaud (TTPC) et les températures moyennes du trimestre le plus sec (TTPS). Ces variables ont été sélectionnées afin de limiter la colinéarité entre les variables. Les traits disponibles pour les taxons intégrés dans le modèle JSDM sont les affinités thermiques calculées et

les valeurs de tolérance à la pollution fournies par le G3E. Pour faciliter la convergence des modèles JSDM, les taxons étant présents dans moins de 10 % des sites ont été exclus. De plus, pour éliminer la pseudoréplication et garantir l'indépendance des points de données, seuls les échantillons les plus récents ont été utilisés pour les sites qui ont plusieurs années d'échantillonnage. La distribution utilisée pour le JSDM est une distribution normale. Ainsi, les données d'abondance de même que les données environnementales ont subi une transformation logarithmique pour les calculs du JSDM. Les paramètres de la méthode Monte-Carlo par chaînes de Markov utilisés dans le modèle JSDM sont les suivants: thin = 5, samples = 10000, nChains = 3 et transient = 5000. Le modèle a été ajusté avec la fonction *sampleMcmc* de la librairie R *HMSC* version 3.0-14 (Tikhonov*, et al.*, 2020).

Les relations établies par le JSDM entre les abondances des taxons, les traits des taxons et les variables bioclimatiques historiques permettent de faire des prédictions sur les abondances et les traits des taxons. Pour ce faire, des données bioclimatiques futures calculées à partir de projections climatiques suivant différentes trajectoires communes d'évolution socio-économique ont été utilisées. Les prédictions d'abondances des taxons ont permis le calcul du CTI et des sous-indices permettant le calcul de l'ISB (nombre de taxons, nombre de taxons EPT (Éphéméroptères, Plécoptères, Trichoptères), % EPT sans Hydropsychidae, % Chironomidae, % des 2 taxons dominants et l'indice biotique d'Hilsenhoff (FBIv)) pour les trajectoires communes d'évolution socio-économique SSP1, SSP2, SSP3 et SSP5, pour les années 2021-2040 et 2081-2100.

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées sur le logiciel R version 4.2.3.

3. Résultats

3.1. Analyses de communautés

3.1.1. NMDS

Certaines variables bioclimatiques historiques sont associées avec d'importantes différences dans les communautés de MIB des sites échantillonnés (Fig. 1A). En effet, les flèches associées aux variables de température du trimestre le plus chaud, de température maximale du mois le plus chaud et de température annuelle moyenne sont les plus longues, témoignant d'une forte association entre ces variables et d'importantes différences de composition des communautés de MIB. L'analyse de NMDS permet de visualiser que les abondances de certains taxons sont également associées avec un gradient de température (Fig. 1B). Notamment, les taxons Groupe 3.1, Groupe 2.2, Ephemerelidae et Heptageniidae (Annexe Table.1) ont des abondances plus importantes dans des sites ayant des valeurs de températures moyennes du trimestre le plus chaud faible relativement aux autres sites. En revanche, les taxons Hydropsychidae et Oligochète ont des abondances plus importantes dans des sites plus chauds ayant des valeurs de températures moyennes du trimestre le plus chaud plus élevées.

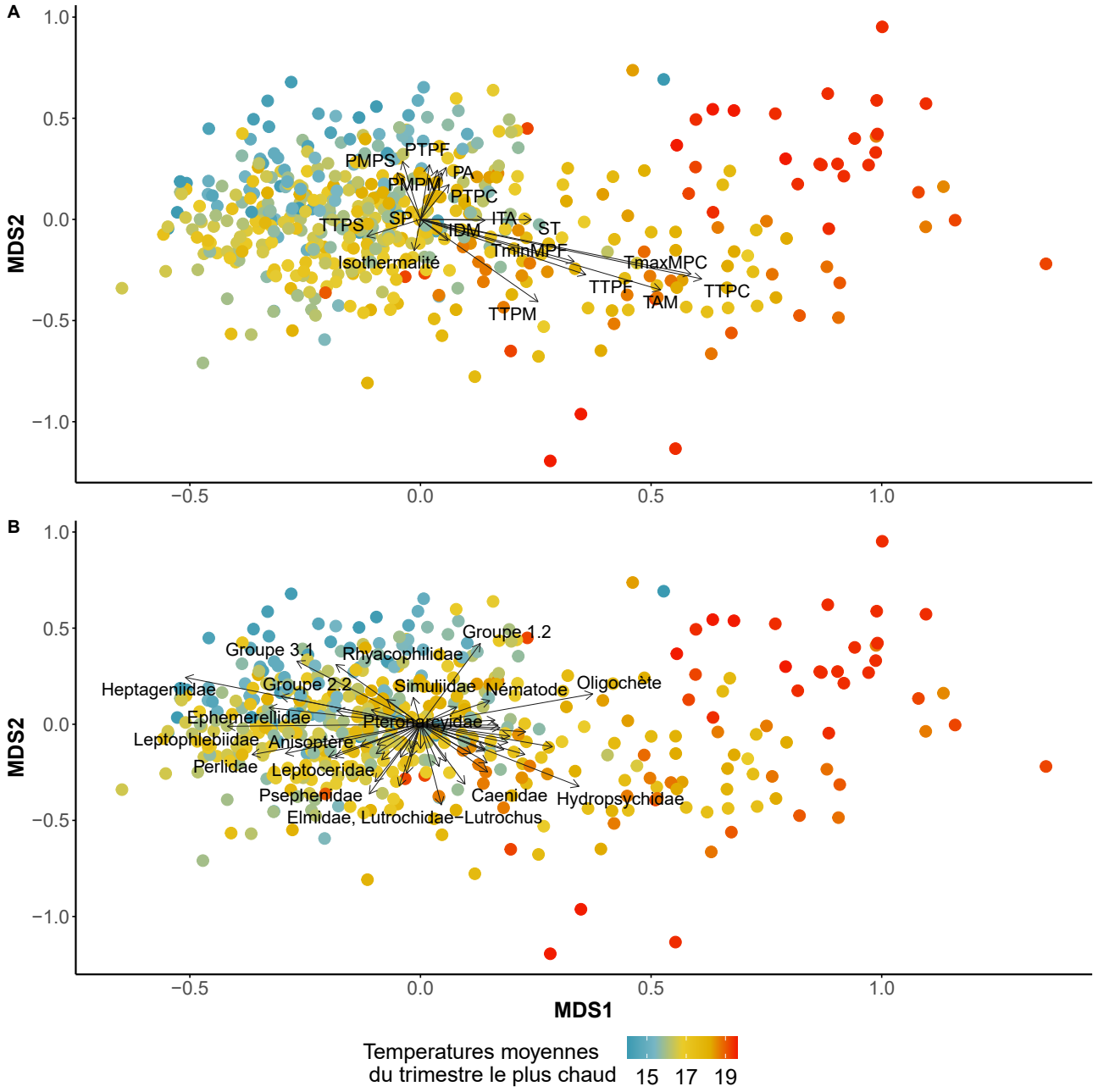


Figure 1. *NMDS : Chaque point représente la communauté de MIB d'un échantillon. La couleur des points est associée aux températures moyennes du trimestre le plus chaud extraites des variables bioclimatiques historiques pour ce site. Dans le panel A, les flèches représentent les associations entre les dissimilarités des communautés de MIB et les variables bioclimatiques historiques extraites pour chacun des sites (Températures annuelles moyennes (TAM), Interval diurne moyen (IDM), Isothermalité, Sesonalité des températures (ST), Températures maximales du mois le plus chaud (TmaxMPC), Températures minimales du mois le plus froid (TminMPF), Inerval de températures annuelles (ITA), Températures trimestre le plus mouillé (TTPM), Températures trimestre le plus sec (TTPS), Températures trimestre le plus chaud (TTPC), Températures trimestre les plus froid (TTPF), Précipitations annuelles (PA), Précipitations mois le plus mouillé (PMPM), Précipitation mois le plus sec (PMPS), Sésonalité des précipitations (SP), Précipitations trimestre le plus mouillé (PTPM), Précipitations trimestre le plus sec (PTPS), Précipitations trimestre le plus chaud (PTPC), Précipitations trimestre le plus froid (PTPF)). Dans le panel B, les flèches représentent les associations entre les dissimilarités des communautés de MIB et les abondances des taxons de MIB des différents échantillons. Les flèches pointent vers les sites ayant les valeurs les plus élevées des variables représentées, alors que les longueurs des flèches indiquent la force de la relation.*

3.1.2. MRT

L'analyse d'arbre de régressions multivariées permet de définir des valeurs seuils des variables les plus aptes à regrouper les sites en fonction de leur communauté de MIB. Dans notre cas, c'est la variable des températures moyennes du trimestre le plus chaud qui explique le mieux la séparation entre deux groupes de sites. La séparation entre les deux groupes de sites déterminée par l'arbre de regression multivarié le long de la variable des températures moyennes du trimestre le plus chaud se fait à une valeur de 18.21°C. Les sites ayant une température moyenne du trimestre le plus chaud supérieure à 18.21 °C seront donc considérés comme « chauds » alors que ceux avec des valeurs inférieures à 18.21 °C seront considérés comme « froids » (Fig. 2.A). On observe bien que le groupe des sites chauds est associé avec des valeurs élevées des variables de températures (les températures moyennes du trimestre le plus chaud, les températures maximales du mois le plus chaud et les températures annuelles moyennes) qui ont une forte association avec d'importantes différences de composition des communautés de MIB (Fig. 2.B). On observe également que le groupe de sites chauds est associé aux taxons Hydropsychidae, Oligochète et Tipulidae et que le groupe de sites froids est associé aux taxons Groupe 3.1, Groupe 2.2, Ephemerellidae et Heptageniidae (Fig 2.C).

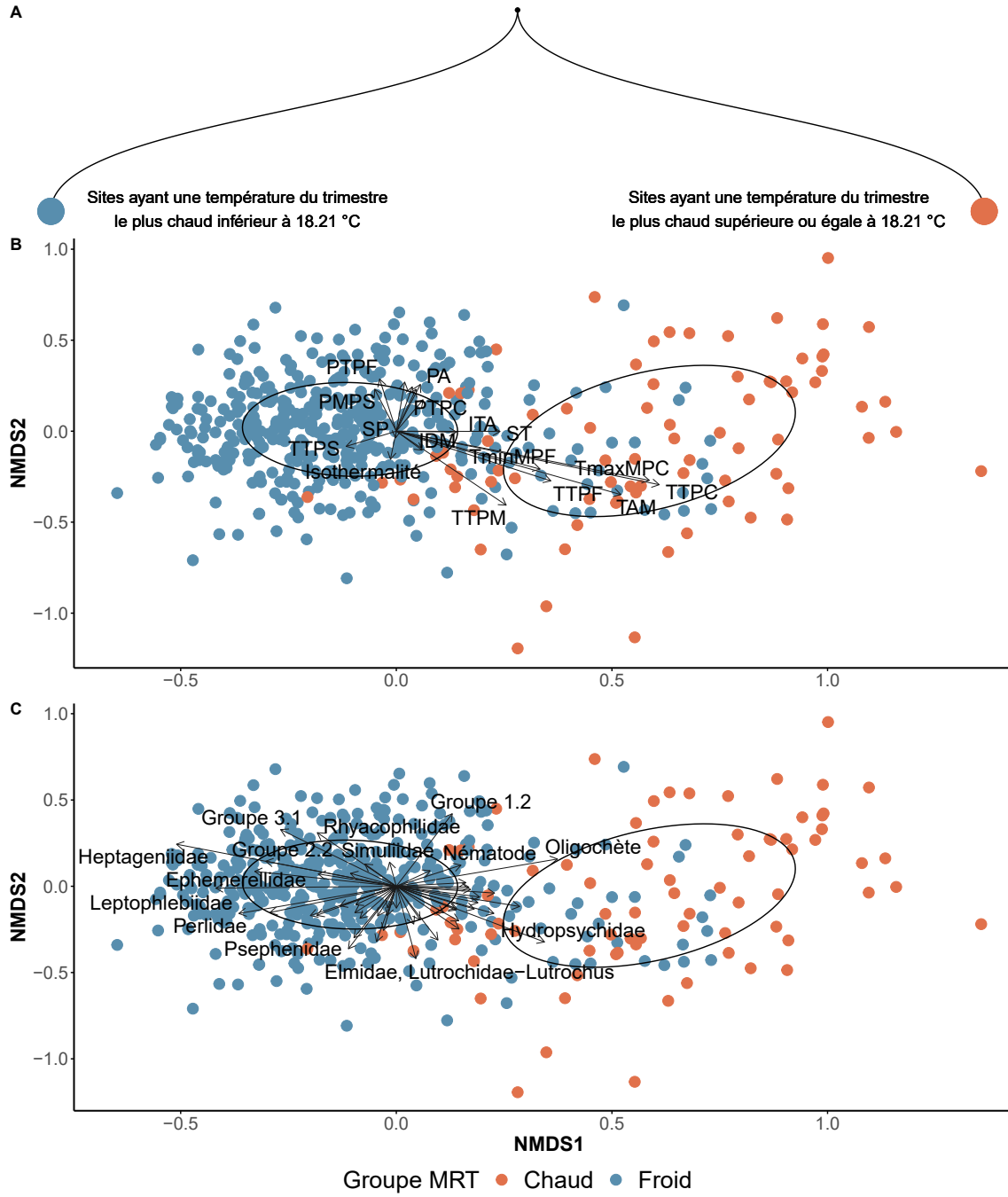


Figure 2. *MRT: Le panel A représente les deux groupes de sites créés par l'analyse de MRT. Dans les panels B et C, chaque point représente la communauté de MIB d'un échantillon. La couleur des points est associée au groupe de site défini par la MRT. Dans le panel A, les flèches représentent les associations entre les dissimilarités des communautés de MIB et les variables bioclimatiques historiques extraites pour chacun des sites (Températures annuelles moyennes (TAM), Interval diurne moyen (IDM), Isothermalité, Sesonalité des températures (ST), Températures maximales du mois le plus chaud (TmaxMPC), Températures minimales du mois le plus froid (TminMPF), Inerval de températures annuelles (ITA), Températures trimestre le plus mouillé (TTPM), Températures trimestre le plus sec (TTPS), Températures trimestre le plus chaud (TTPC), Températures trimestre les plus froid (TTPF), Précipitations annuelles (PA), Précipitations mois le plus mouillé (PMPM), Précipitation mois le plus sec (PMPS), Sésonalité des précipitations (SP), Précipitations trimestre le plus mouillé (PTPM), Précipitations trimestre le plus sec (PTPS), Précipitations trimestre le plus chaud (PTPC), Précipitations trimestre le plus froid (PTPF)). Dans le panel B, les flèches représentent les associations entre les dissimilarités des communautés de MIB et les abondances des taxons de MIB des différents échantillons. Les flèches pointent vers les sites ayant les valeurs les plus élevées des variables représentées, alors que les longueurs des flèches indiquent la force de la relation.*

3.2. Température de l'eau

L'analyse d'arbre de régressions multiples a permis de souligner la variable bioclimatique « températures moyennes du trimestre le plus chaud » comme étant particulièrement bien associée avec la structure des communautés de MIB des rivières échantillonnées. Il est important de vérifier que les températures moyennes du trimestre le plus chaud de l'air sont bien corrélées avec les températures moyennes du trimestre le plus chaud de l'eau. Pour ce faire, 386,036 valeurs de températures journalières moyennes de 542 sites au sud du Québec ont été extraites (Fig. 3.A) pour ensuite calculer les températures moyennes du trimestre le plus chaud mesurées dans l'eau pour chacun des sites. On observe une relation positive (pente = 1.546) avec un fort support statistique (valeur de $p < 0.00001$) entre les deux variables (Fig. 3.B). La relation linéaire explique une grande portion de la variance dans les variables (R^2 ajusté = 63.2 %) et la corrélation de Pearson est élevée entre les deux variables avec une valeur de 0.8. Toutes ces valeurs tendent à supporter une forte association entre les deux variables. À l'échelle spatiale de notre analyse, la variable bioclimatique historique des températures moyennes du trimestre le plus chaud de l'air est donc une bonne approximation des températures moyennes du trimestre le plus chaud de l'eau des rivières au sud du Québec. Cela permet donc d'utiliser la température de l'air (disponible pour tout le Québec) pour modéliser les effets de la température sur les communautés de MIB recensées par G3E même en l'absence d'information sur la température de l'eau.

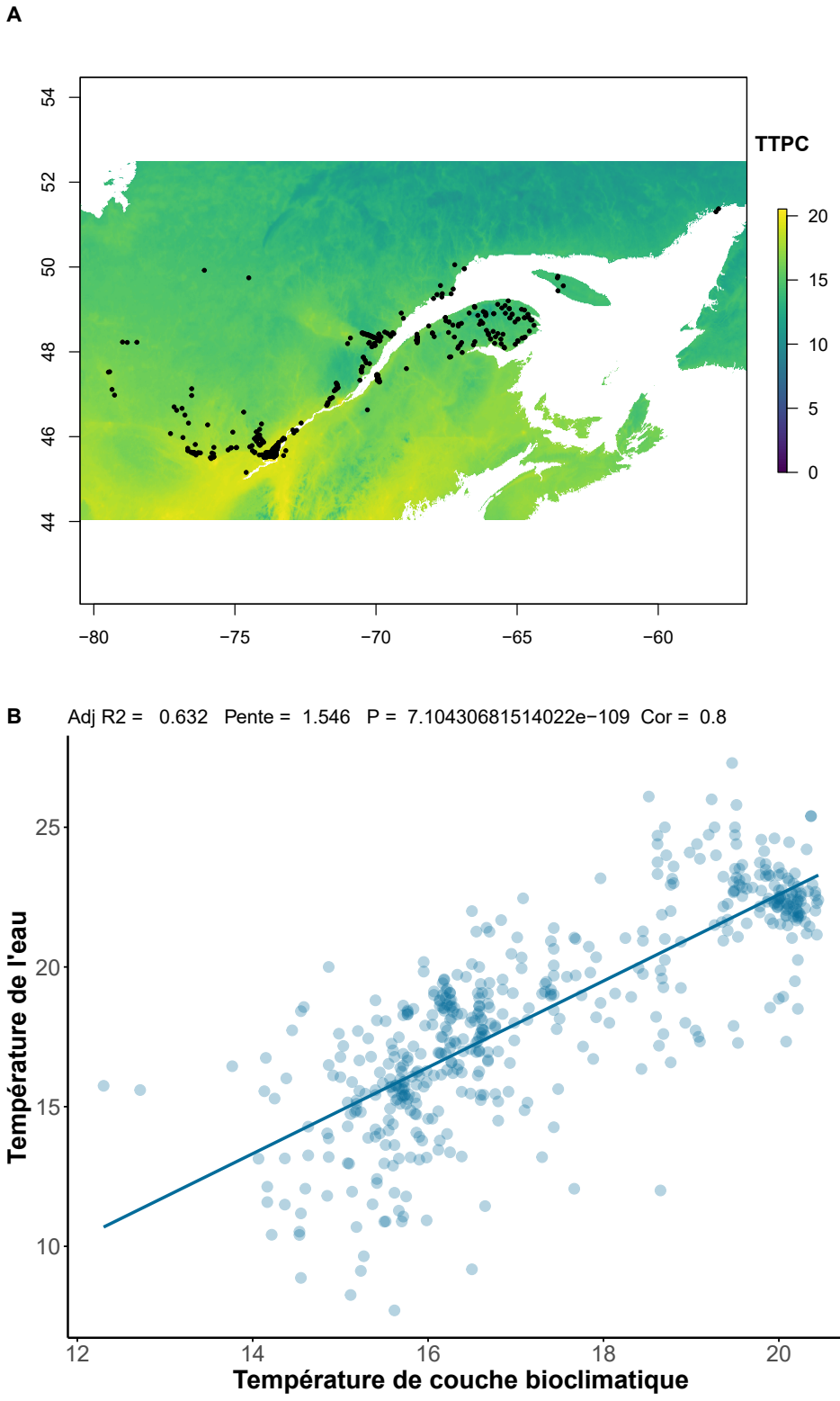


Figure 3. *Température de l'eau: Le panel A montre la répartition géographique des sites dans des rivières ayant des mesures de température de l'eau de surface. Les couleurs représentent les températures moyennes du trimestre le plus chaud (TTPC) pour la région. Le panel B montre la relation entre les températures moyennes du trimestre le plus chaud mesurées dans l'eau et les températures moyennes du trimestre le plus chaud extraites des variables climatiques historiques. Le Adj R2 représente la valeur de R^2 ajusté, la pente de la relation linéaire est écrite comme Pente, la valeur de p est écrite P et Cor correspond à la valeur de corrélation de Pearson entre les deux variables de la relation.*

3.3. Les taxons et la température

3.3.1. Taxons indicateurs

Certains taxons semblent être de bons indicateurs des groupes définis par la MRT (chaud et froid). Ces taxons ont des scores relativement élevés pour l'analyse de taxons indicateurs par rapport aux autres taxons (Fig. 4). Les scores les plus élevés sont présents dans les taxons indicateurs du groupe froid, sont le taxon Groupe 3.1 (0.755), les Ephemerellidae (0.754), les Heptageniidae (0.747), le Groupe 2.2 (0.696) et les Leptophlebiidae (0.69). Les taxons indicateurs du groupe de sites chauds sont les Hydropsychidae (0.583), les oligochètes (0.579) et les Tipulidae (0.496) dont les scores sont néanmoins plus faibles que les groupes indicateurs de sites froids (les 4 groupes mentionnés ci-dessus). Les scores de taxons indicateurs sont disponibles en Annexe Table.1. Ces analyses indiquent qu'il y a plusieurs taxons indicateurs des milieux froids, mais que les associations sont moins fortes dans les milieux chauds.

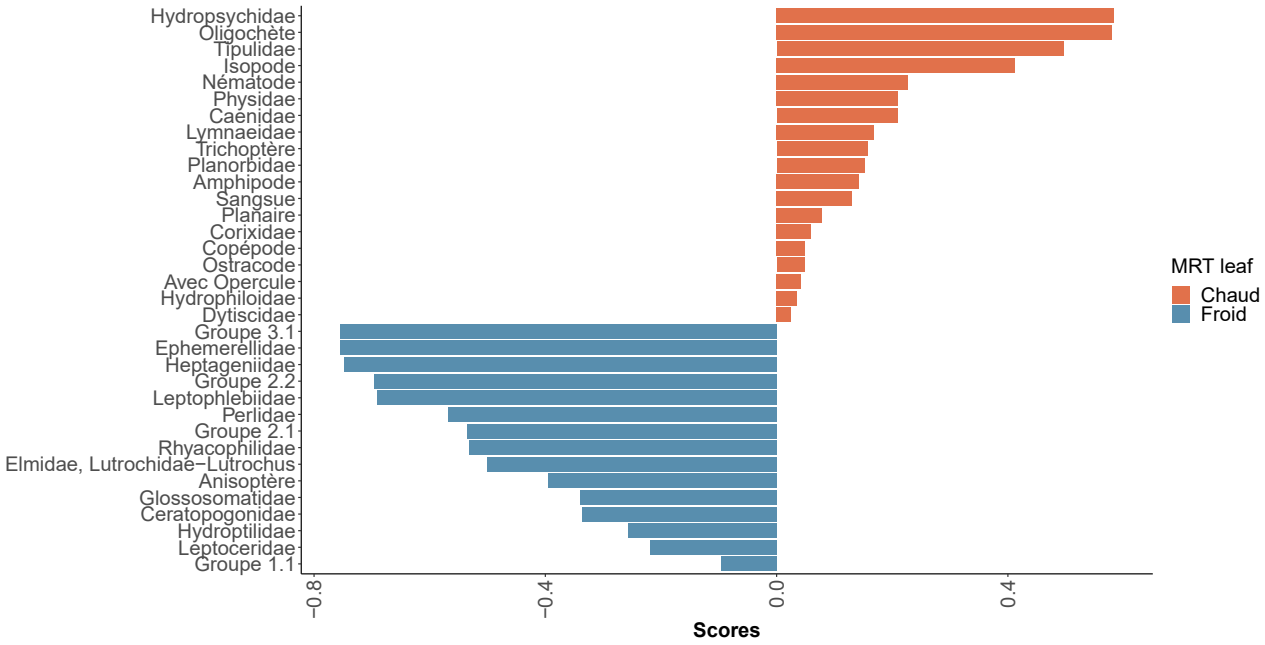


Figure 4. *Taxons Indicateurs: Chaque barre du graphique représente le score qu'un taxon a reçu à l'analyse de taxon indicateur pour les deux groupes définis par la MRT. Les scores de taxons indicateurs du groupe froids en bleu sont multipliés par -1 afin qu'ils soient mieux séparés visuellement des scores des taxons indicateurs du groupe chaud en orange.*

3.3.2. Influences du climat sur les taxons (JSDM)

Les coefficients β (bêta) du JSDM représentent les pentes des relations linéaires entre les abondances des taxons de MIB et les variables bioclimatiques historiques du modèle. Une valeur fortement positive ou négative est un indicateur d'une relation importante entre une variable bioclimatique et l'abondance d'un taxon de MIB. On observe que certains taxons de MIB ont des pentes de relations relativement fortes (valeurs β positivement ou négativement élevées) avec des variables bioclimatiques en comparaison avec d'autres taxons, notamment avec les précipitations moyennes du trimestre le plus sec (PTPS), les précipitations moyennes du trimestre le plus chaud (PTPC) et les températures moyennes du trimestre le plus chaud (TTPC) (Fig. 5.A). La variable d'intérêt « températures moyennes du trimestre le plus chaud » (TTPC), qui a été montrée comme importante par la NMDS et la MRT, semble avoir des relations fortes avec certains taxons. En effet, on constate que les taxons Groupe 2.2, Groupe 3.1, Heptageniidae et Ephemerillidae ont des coefficients β fortement négatifs relativement aux autres taxons (Fig. 5.B) ce qui indique une association négative entre les températures moyennes du trimestre le plus chaud et ces taxons. En revanche, seul le taxon Hydropsychidae semble avoir une valeur β fortement positive relativement aux autres taxons (Fig. 5.B). À noter que les taxons Oligochète et Tipulidae, préalablement identifiés comme indicateurs de sites chauds, ont bien des valeurs β positives, mais relativement peu élevées (Fig. 5.B). Ces analyses confirment que certains taxons sont fortement indicateurs des milieux froids (ils ne se trouvent qu'en milieu froid) alors que les taxons typiques des milieux chauds peuvent également se retrouver en milieu froid.

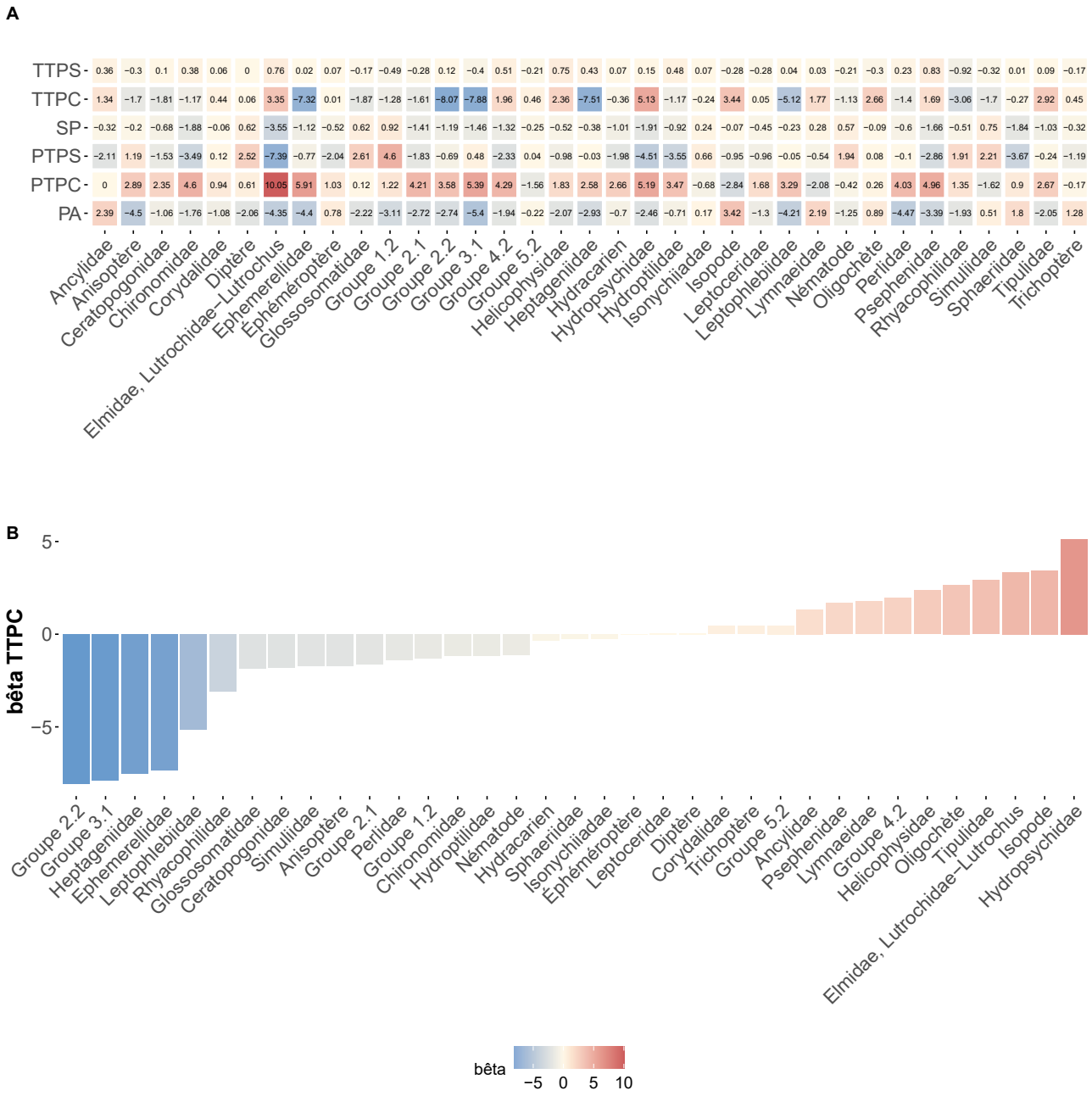


Figure 5. *JSDM β (bêta): Sur cette figure, la couleur est associée avec les valeurs des coefficients bêta pour les différentes relations exposées. Les valeurs négatives sont en bleu, nulles en blanc et positives en rouge. Sur le panel A, les coefficients β pour toutes les variables bioclimatiques (les températures moyennes du trimestre le plus sec (TTPS), les températures moyennes du trimestre le plus chaud (TTPC), la saisonnalité des précipitations (SP), les précipitations moyennes du trimestre le plus sec (PTPS), les précipitations moyennes du trimestre le plus chaud (PTPC) et les précipitations annuelles moyennes (PA) sont affichés pour chaque taxon du modèle JSDM. Dans le panel B, les valeurs des coefficients β pour la variable d'intérêt des températures moyennes du trimestre le plus chaud (TTPC) sont affichées et les taxons sont classés en ordre de leur valeur β.*

Afin de pouvoir correctement interpréter les résultats du JSDM, il est important de prendre en considération le pouvoir explicatif du modèle. En effet, des valeurs de coefficients β élevées sont indicatives d'une relation relativement forte identifiée par le modèle entre une variable environnementale et l'abondance d'un taxon seulement si le pouvoir explicatif du modèle dans son ensemble est satisfaisant. La variance expliquée par le modèle a été extraite pour les variables de températures (les températures moyennes du trimestre le plus chaud (TTPC) et les températures moyennes du trimestre le plus sec (TTPS) et pour le reste des variables (la saisonnalité des précipitations (SP), les précipitations annuelles moyennes (PA), les précipitations moyennes du trimestre le plus sec (PTPS), les précipitations moyennes du trimestre le plus chaud (PTPC) et la variable spatiale aléatoire) (Fig. 6). Les taxons ayant leur part de variance expliquée par les variables de températures la plus élevée sont Groupe 2.2 (20.77 %), Heptageniidae (17.43 %), Groupe 3.1 (16.05 %) et Ephemerellidae (14.95 %) pour les groupes ayant été identifiés comme indicateurs de sites froids. Pour les taxons ayant été identifiés comme indicateurs de sites chauds, seuls les Hydropsychidae (11.68 %) ont une part de variance expliquée par les variables de température supérieure à 10 %. En effet, les Oligochètes et les Tipulidae sont des taxons qui avaient des scores d'espèces indicatrices relativement élevés pour les sites chauds, mais leurs variances expliquées par les variables de températures sont seulement de 3.09 % et 5.44 % respectivement. Le groupe 3.1 et les Perlidae semblent avoir une grande portion de leur variance expliquée par les variables climatiques du modèle autres que la température.

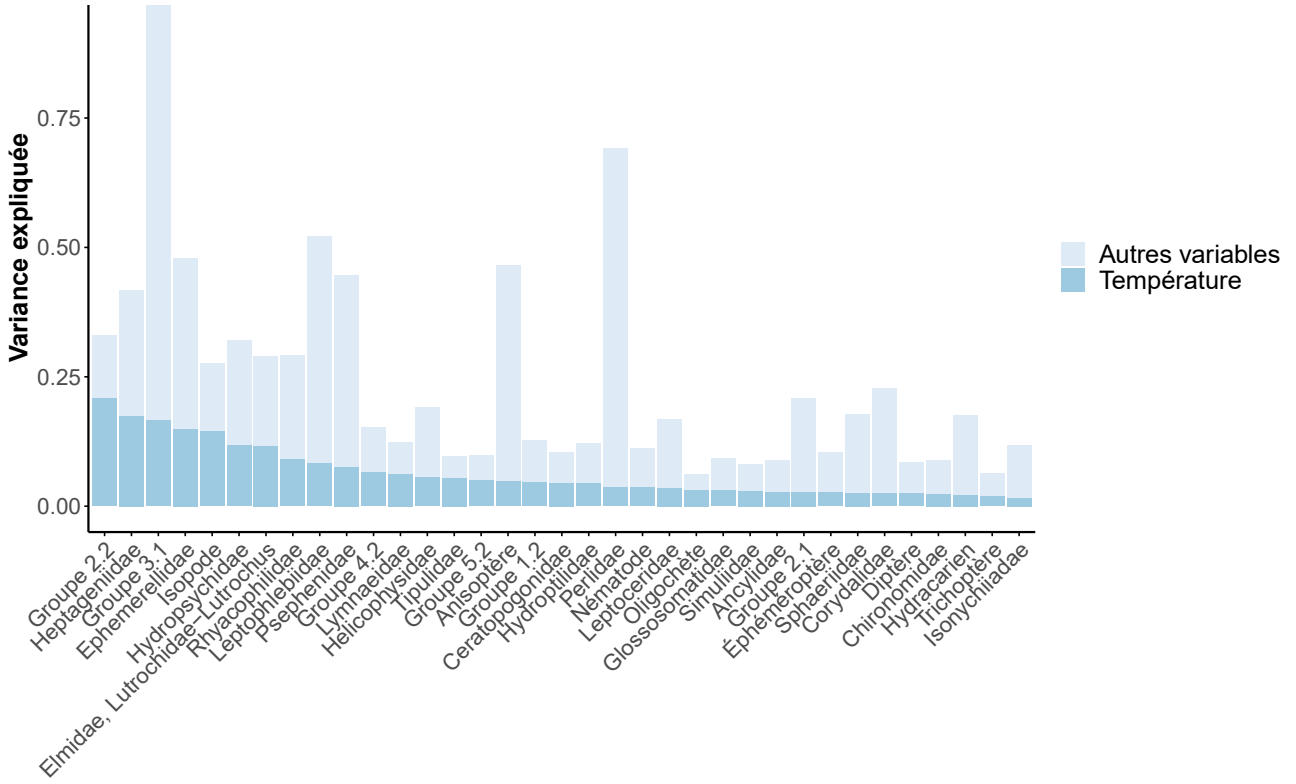


Figure 6. *Partitionnement de la variance: le pouvoir explicatif du modèle JSDM pour chaque taxon est exprimé en variance expliquée par le modèle de 0 (0 %) à 1 (100 %). La couleur des barres correspond à la part de variance expliquée par les différentes variables environnementales séparées en variables de température (les températures moyennes du trimestre le plus chaud (TTPC) et les températures moyennes du trimestre le plus sec (TTPS)) et pour le reste des variables (la saisonnalité des précipitations (SP), les précipitations annuelles moyennes (PA), les précipitations moyennes du trimestre le plus sec (PTPS), les précipitations moyennes du trimestre le plus chaud (PTPC) et la variable spatiale aléatoire). Les taxons sont classés de manière décroissante de gauche à droite en utilisant la part de variance expliquée par les variables de températures.*

3.3.3. Les taxons et leurs traits

Chaque taxon a une valeur de trait de tolérance à la pollution et d'affinité thermique qui ont été intégrées dans le modèle JSDM. Il est donc possible d'explorer à la fois les relations entre ces deux traits entre les taxons (Fig. 7.A) ainsi que les relations de ces traits avec les variables bioclimatiques du modèle JSDM (Fig. 7.B). Les coefficients gamma du JSDM représentent la pente des relations linéaires entre les valeurs de traits des taxons de MIB et les variables bioclimatiques historiques du modèle. Une valeur fortement positive ou négative est un indicateur d'une relation entre une variable environnementale et la valeur moyenne d'un trait à l'intérieur de la communauté. La relation entre les traits de tolérance à la pollution et d'affinité thermique des différents taxons est positive, mais faible (pente = 0.179, valeur de p = 0.046). La variance expliquée par le modèle linéaire (4.07 %) ainsi que la corrélation de Pearson (0.23) sont faibles (Fig. 7.A). En revanche, la pente de la relation entre la tolérance à la pollution et la température du trimestre le plus chaud (indiquée par le coefficient gamma) est positive et relativement forte (0.76). Cela est également le cas pour le coefficient gamma de la relation entre l'affinité thermique et la température du trimestre le plus chaud (0.44). Une relation positive entre un coefficient gamma et une variable environnementale du modèle JSDM signifie que la valeur moyenne du trait pour la communauté tend à augmenter dans des sites où la variable environnementale a une valeur plus élevée.

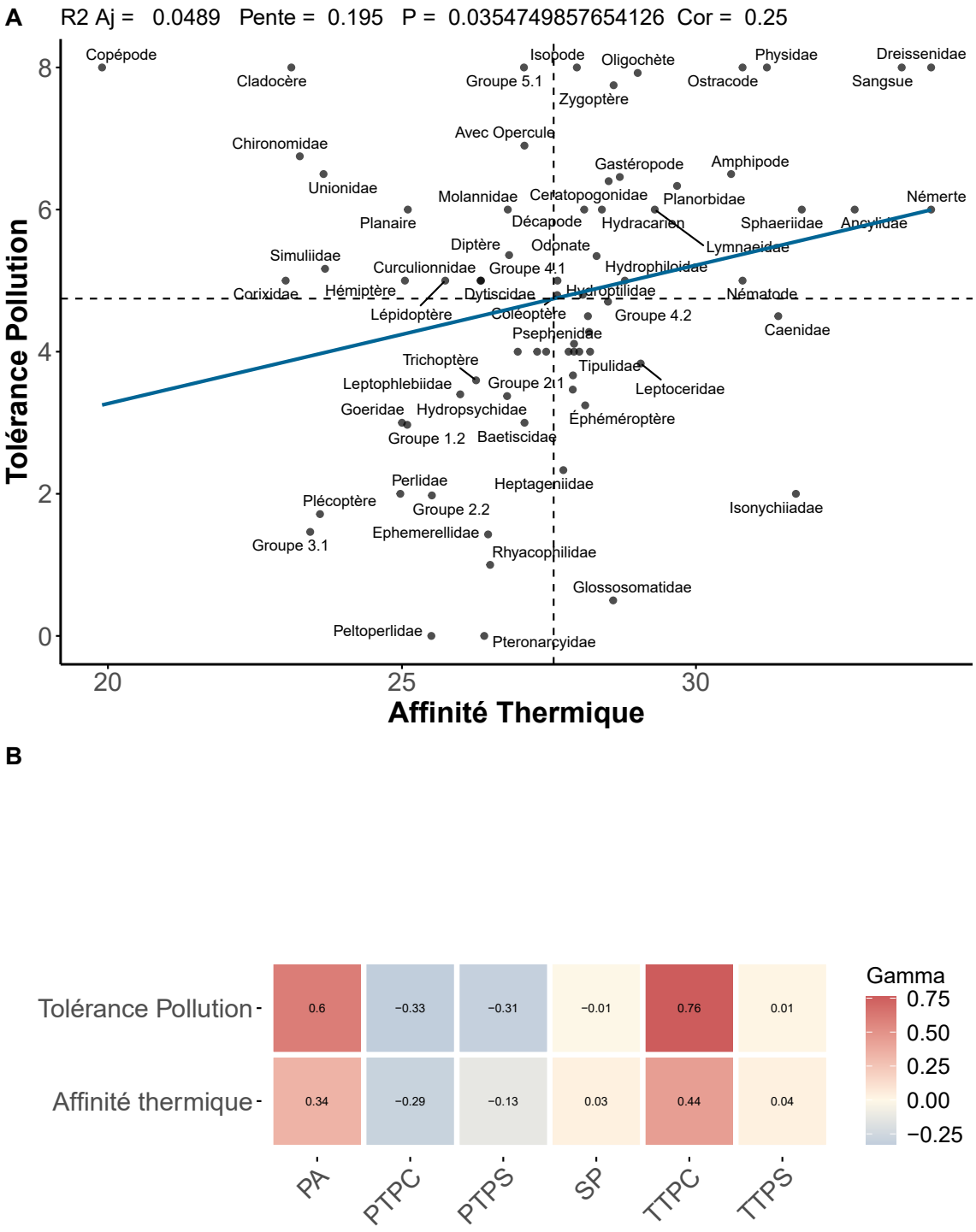


Figure 7. *Le panel A représente la relation linéaire entre les valeurs de tolérance à la pollution et d'affinité thermique pour les différents taxons. Le R2 Aj est la valeur de R² ajusté, la pente de la relation linéaire est écrite comme Pente, la valeur de p est écrite P et Cor correspond à la valeur de corrélation de Pearson entre les deux variables de la relation. La ligne bleu représente la ligne de régression linéaire. Les lignes pointillées représentent les moyennes des deux variables. Le panel B représente les valeurs du coefficient gamma pour toutes les variables bioclimatiques (la saisonnalité des précipitations (SP), les précipitations annuelles moyennes (PA), les précipitations moyennes du trimestre le plus sec (PTPS), les précipitations moyennes du trimestre le plus chaud (PTPC), les températures moyennes du trimestre le plus chaud (TTPC) et les températures moyennes du trimestre le plus sec (TTPS)) pour chaque trait du modèle JSDM.*

3.3.4. CT_{max} et affinité thermique

La relation entre des mesures physiologiques et les affinités thermiques que nous avons calculées en utilisant la niche réalisée des taxons à partir des suivis benthiques américains a été explorée. Deux indices physiologiques ont été analysés, le CT_{max} et le LT_{50} 96 heures (Fig. 8). La relation entre le CT_{max} et l'affinité thermique des différents taxons est positive (pente = 0.913) et fortement significative ($p < 0.00001$). La variance expliquée par le modèle linéaire (48.94 %) ainsi que la corrélation de Pearson 0.71 sont élevées (Fig. 8.A). La relation entre le LT_{50} 96 heures et l'affinité thermique des différents taxons est positive (pente = 1.032) mais non significative (valeur de p = 0.079). La variance expliquée par le modèle linéaire (10.87 %) ainsi que la corrélation de Pearson (0.39) sont faibles (Fig. 8.A). Cette analyse confirme que les valeurs d'affinités thermiques calculées en utilisant les niches réalisées aux États-Unis sont de bonnes approximations des limites thermiques physiologiques (CT_{max}) des taxons étudiés.

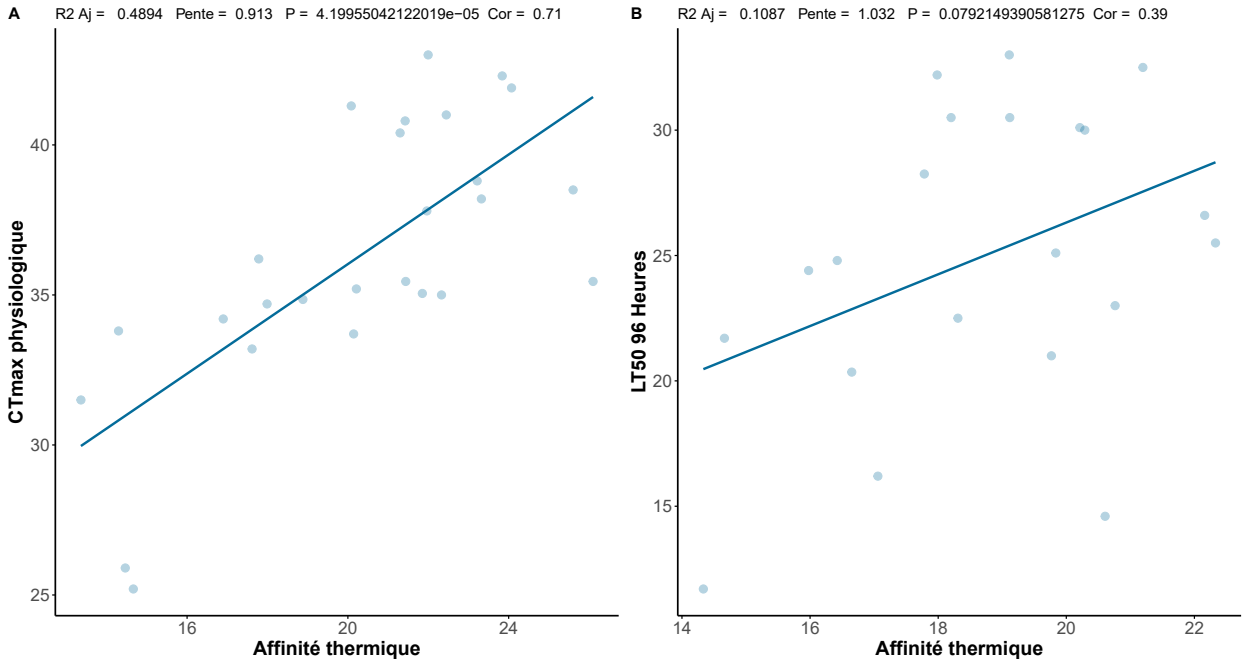


Figure 8. *Mesures physiologiques. Le panel A représente la relation linéaire entre les valeurs de CT_{max} physiologiques et d'affinité thermique pour les taxons disponibles. Le R2 Aj est la valeur de R^2 ajusté, la pente de la relation linéaire est écrite comme Pente, la valeur de p est écrite P et Cor correspond à la valeur de corrélation de Pearson entre les deux variables de la relation. Le panel B représente la relation linéaire entre les valeurs de LT_{50} 96 heures physiologiques et d'affinité thermique pour les taxons disponibles. Le R2 Aj est la valeur de R^2 ajusté, la pente de la relation linéaire est écrite comme Pente, la valeur de p est écrite P et Cor correspond à la valeur de corrélation de Pearson entre les deux variables de la relation.*

3.4. CTI

L'indice thermique des communautés (CTI) est calculé en faisant la moyenne de valeurs d'affinités thermiques pondérée par les abondances de chaque taxon dans les sites échantillonnés par le programme *SurVol Benthos*. La répartition spatiale des valeurs de CTI des sites échantillonnés est présentée (Fig. 9). Il est difficile d'identifier des tendances spatiales évidentes de CTI. En effet, il ne semble pas y avoir de différence importante entre les régions échantillonnées ou de claires tendances latitudinales dans les valeurs de CTI.

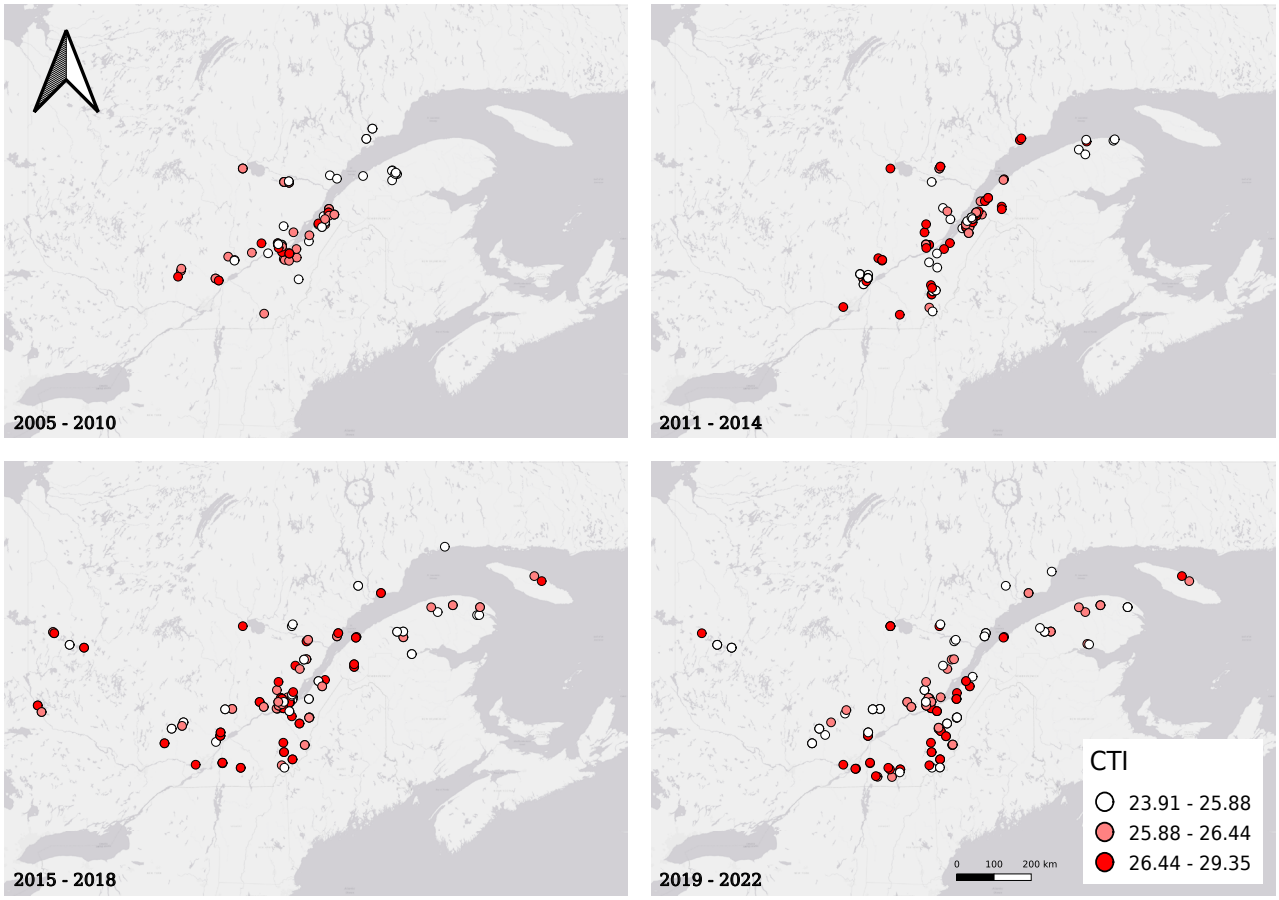


Figure 9. *Carte de répartition spatiale des valeurs de CTI des sites échantillonnés dans le programme SurVol Benthos. La couleur de blanc à rouge représente 3 catégories de valeurs de CTI allant de 23.91 °C à 29.35 °C. Chaque panneau représente une période d'échantillonnage du programme SurVol Benthos.*

Certains sites dans le cadre de *SurVol Benthos* ont été échantillonnés à plusieurs reprises au fil des années, ce qui permet d'explorer les tendances temporelles du CTI. Pour ce faire, un modèle linéaire mixte entre CTI et années avec les sites en variable aléatoire a été utilisé. La relation entre la variable année et CTI est faiblement positive (pente = 0.053) mais non significative (valeur de p = 0.176) (Fig. 10.A). Le R^2 marginal, qui représente la proportion de variance expliquée dans les valeurs de CTI par la variable année, est de seulement 0.5 %. Pour mettre en perspective les résultats de ce modèle dans le contexte des changements climatiques, il est important d'explorer la disponibilité de données permettant une analyse temporelle de qualité pour des processus à long terme. Ainsi, pour chaque site, le nombre d'échantillons récoltés en relation avec la couverture temporelle en années de ces échantillons (première année échantillonnée - dernière année échantillonnée) est présenté (Fig. 10.B). Les changements climatiques les plus prononcés se manifestant sur une échelle de plusieurs décennies, il serait idéal d'avoir une grande quantité de sites avec un grand nombre d'échantillons et une couverture temporelle supérieure à 10 années. Seuls quelques sites ont une couverture temporelle supérieure à 10 années. La grande majorité des sites ont peu d'échantillons et une couverture temporelle inférieure à cinq années. Ainsi, un suivi sur le plus long terme des sites par le G3E et les participants à *SurVol Benthos* est fort probablement nécessaire afin de détecter des tendances temporelles dans le CTI.

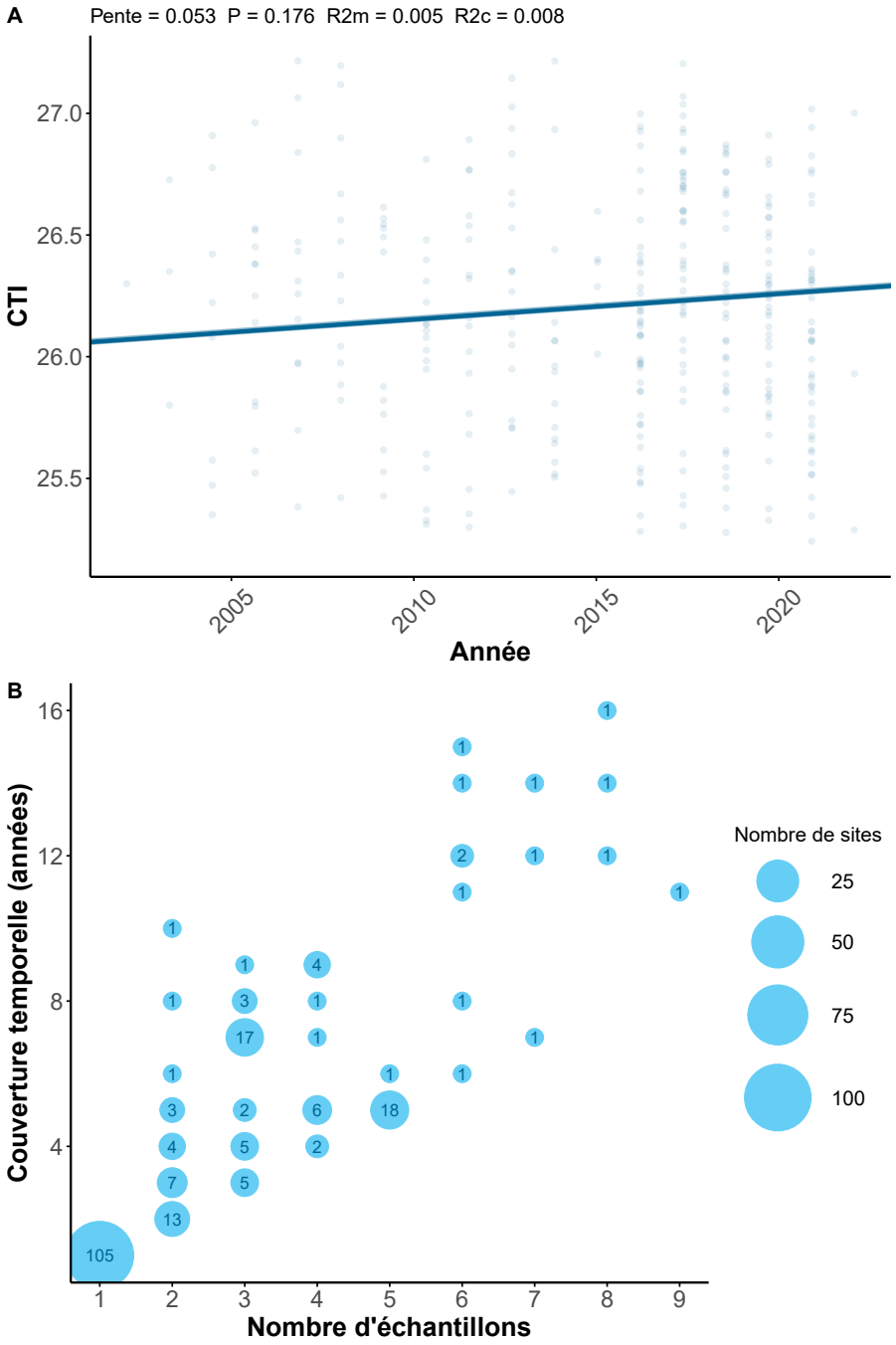


Figure 10. *CTI dans le temps. Le panel A représente la relation linéaire mixte entre CTI et l'année des sites ayant plus d'une année d'échantillonnage. La pente de la relation linéaire est écrite comme Pente, la valeur de p est écrite P, le R² marginal représentant la portion de variance expliquée par les effets fixes du modèle est R2m sur la figure et le R² conditionnel représentant la portion de variance expliquée par les effets aléatoires est R2c sur la figure. Chaque point représente un échantillon, chaque ligne fine représente le modèle linéaire d'un site et la ligne épaisse représente le modèle linéaire mixte moyen comprenant tous les sites. Le panel B représente la relation entre le nombre d'échantillons par site et la couverture temporelle par site. La taille de points correspond aux nombres de sites ayant les mêmes valeurs de nombre d'échantillons et de couverture temporelle.*

Afin de comprendre si les indices CTI et ISB_{SurVol} répondent de manière comparable aux changements de communauté des MIB, la relation entre CTI et ISB_{SurVol} a été explorée avec un modèle linéaire mixte. La relation entre les valeurs des indices CTI et ISB_{SurVol} est négative (pente = -0.452) et non significative (valeur de p = 0.467) (Fig. 11). Le R^2 marginal qui représente la portion de variance expliquée dans les valeurs de l'ISB_{SurVol} par les valeurs de CTI est de seulement 0.1 %. Cette analyse suggère que les indices CTI et ISB_{SurVol} ne sont pas très corrélés. Il est donc possible que les deux indices fournissent des informations complémentaires et indépendantes.

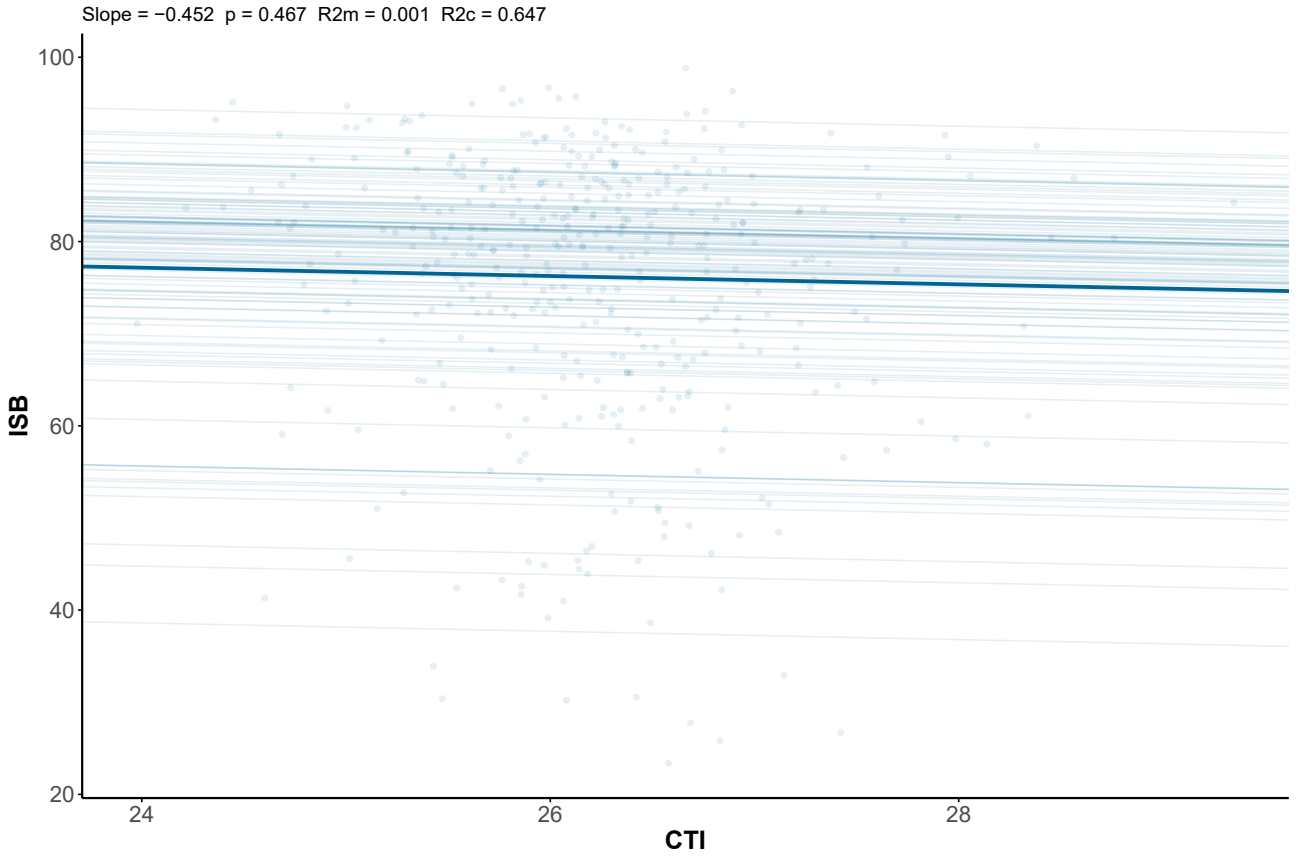


Figure 11. *CTI et* ISB_{SurVol}*: La figure présente la relation entre CTI et* ISB_{SurVol} *estimée à partir d'un modèle linéaire à effets mixtes. La pente de la relation linéaire est écrite comme Pente, la valeur de p est écrite P, le* R^2 *marginal représentant la portion de variance expliquée par les effets fixes du modèle est R2m sur la figure et le* R^2 *conditionnel représentant la portion de variance expliquée par les effets fixes et aléatoires est R2c sur la figure. Chaque point représente un échantillon, chaque ligne fine représente le modèle linéaire d'un site et la ligne épaisse représente le modèle linéaire mixte moyen comprenant tous les échantillons.*

3.5. Prédictions futures

3.5.1. Projections climatiques

Afin de mieux comprendre la sensibilité de plusieurs indices d'intérêt (CTI et sous-indices de l'ISB_{SurVol}) aux changements climatiques, le modèle JSDM calibré avec des données bioclimatiques historiques a été utilisé pour prédire les abondances des taxons communs (présents à plus de 10 % des sites) en utilisant les variables bioclimatiques prédites de 2021-2040 et 2081-2100 par le modèle CanESM5-CanOE (Christian*, et al.*, 2022) pour quatre trajectoires communes d'évolution socio-économique (SSP): 1, 2, 3 et 5 (Fig. 12.A). À noter que le scénario 1-1.9 n'a pas de données bioclimatiques associées et ne sera donc pas discuté dans ce rapport.

On observe que les différentes trajectoires communes d'évolution socio-économique (SSP) ont une forte influence sur la quantité de CO_2 atmosphérique prédite à l'horizon 2100 (Fig. 12.A). Les concentrations prédites sont croissantes de SSP1-2.6 à SSP5-8.5, avec des concentrations plus que doublées en 2100 pour SSP5-8.5 par rapport au SSP1-2.6 (Fig. 12.A). Selon le modèle climatique CanESM5-CanOE, ces changements de teneurs en CO_2 atmosphérique vont avoir d'importantes conséquences sur les températures moyennes du trimestre le plus chaud aux sites échantillonnés par les suivis G3E au sud du Québec. En effet, on observe une augmentation moyenne entre 1.7 et 2.1 °C des températures moyennes du trimestre le plus chaud prédite suivant les trajectoires communes d'évolution socio-économique pour la période 2021-2040 (Fig. 12.B). Pour la période 2081-2100, les températures moyennes du trimestre le plus chaud sont fortement impactées par les différentes trajectoires communes d'évolution socio-économique partagée. En effet, en comparaison avec les données bioclimatiques historiques pour la période 2081-2100, l'augmentation moyenne des températures moyennes du trimestre le plus chaud prédite selon la trajectoire commune d'évolution socio-économique SSP1-2.6 est de 2.4 °C, selon la trajectoire SSP2-4.5 l'augmentation moyenne est de 4.2 °C, selon la trajectoire SSP3-7.0 l'augmentation moyenne est de 7.1 °C et selon la trajectoire SSP5-8.5 l'augmentation moyenne est de 8.3 °C.

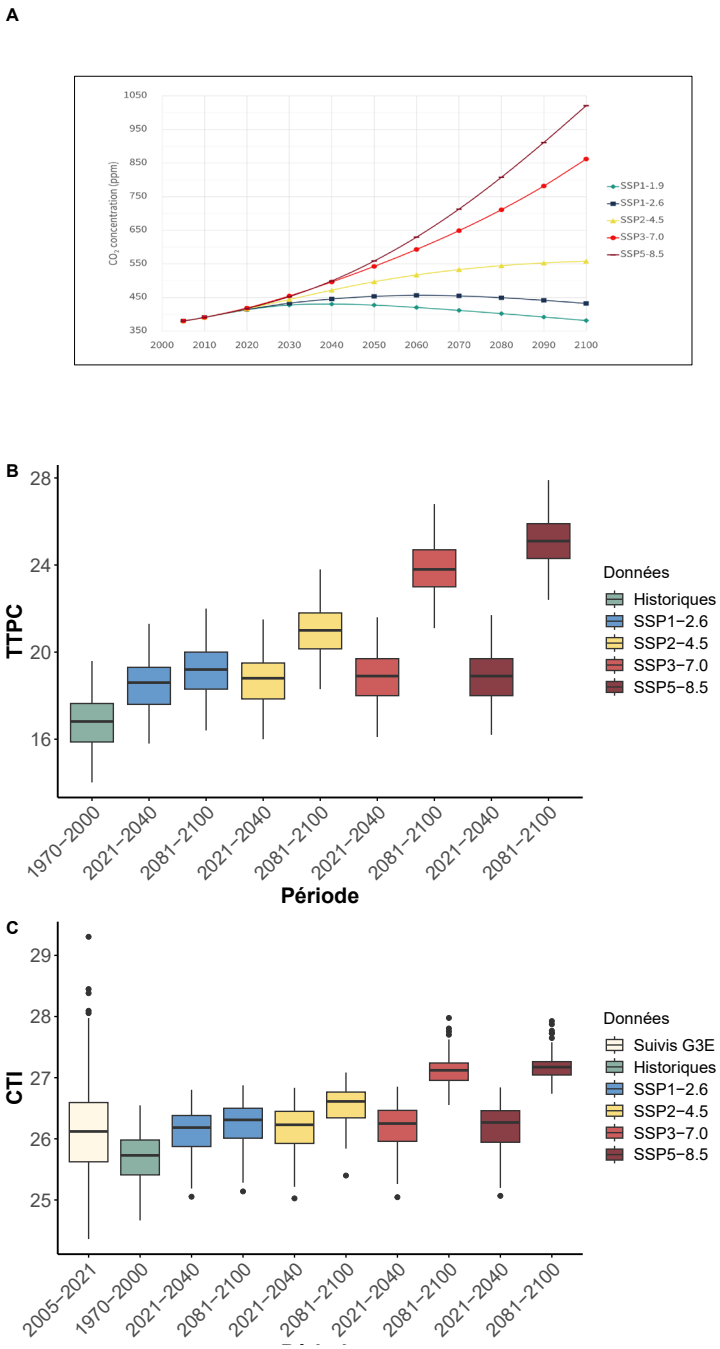


Figure 12. *Projections climatiques: Le panel A représente les concentrations de CO_2 atmosphérique prédites de 2005 à 2100 suivant cinq trajectoires communes d'évolution socio-économique (SSP): 1-1.9, 1-2.6, 2-4.5, 3-7.0 et 5-8.5. À noter que le scénario 1-1.9 n'a pas de données bioclimatiques associées et ne sera donc pas discuté dans ce rapport (Riahi, et al., 2017). Le panel B représente les températures moyennes du trimestre le plus chaud (TTPC) des sites des suivis du G3E en utilisant les données bioclimatiques historiques ainsi que les prédictions climatiques du modèle CanESM5-CanOE suivant 4 trajectoires communes d'évolution socio-économique (SSP): 1-2.6, 2-4.5, 3-7.0 et 5-8.5. Le panel C représente le CTI des sites des suivis du G3E, en blanc sont présentées les valeurs brutes des indices calculées avec les abondances des taxons échantillonnés par les échantillonnages réalisés dans le cadre de SurVol Benthos. En vert sont présentées les valeurs des indices calculées avec les abondances des taxons présents dans plus de 10 % des sites prédits par le JSDM à partir des données bioclimatiques historiques; ces boîtes représentent la valeur actuelle des indices selon le modèle, que l'on peut comparer avec les valeurs observées en blanc. En bleu, jaune, orange et rouge sont présentées les valeurs des indices calculées avec les abondances prédites par le JSDM à partir des données bioclimatiques futurs selon 4 trajectoires communes d'évolution socio-économique (SSP): 1-2.6, 2-4.5, 3-7.0 et 5-8.5 respectivement pour les périodes 2021-2040 et 2081-2100.*

3.5.2. Projections des indices

Pour comprendre comment les changements climatiques résultants des différentes trajectoires communes d'évolution socio-économique vont impacter les différents indices discutés dans le présent rapport (CTI et sous-indices de l'ISB_{SurVol}), ces indices ont été calculés en utilisant les abondances prédites par le modèle JSDM suivant les différentes trajectoires communes d'évolution socio-économique aux périodes 2021-2040 et 2081-2100. Le réchauffement climatique prédit par le modèle CanESM5-CanOE (Fig. 12) semble entraîner des changements importants sur certains indices aux sites échantillonnés par les suivis G3E au sud du Québec. En effet, on observe **une augmentation moyenne du CTI** entre 0.4 et 0.5 °C prédite pour la période 2021-2040 comparée avec les valeurs de CTI calculées par le JSDM à partir des données bioclimatiques historiques (Fig. 12.C). Pour la période 2081-2100, l'augmentation moyenne du CTI selon la trajectoire commune d'évolution socio-économique SSP1-2.6 est de 0.6 °C, selon la trajectoire SSP2-4.5 l'augmentation moyenne est de 0.8 °C, selon la trajectoire SSP3-7.0 l'augmentation moyenne est de 1.4 °C et selon la trajectoire SSP5-8.5 l'augmentation moyenne est de 1.5 °C.

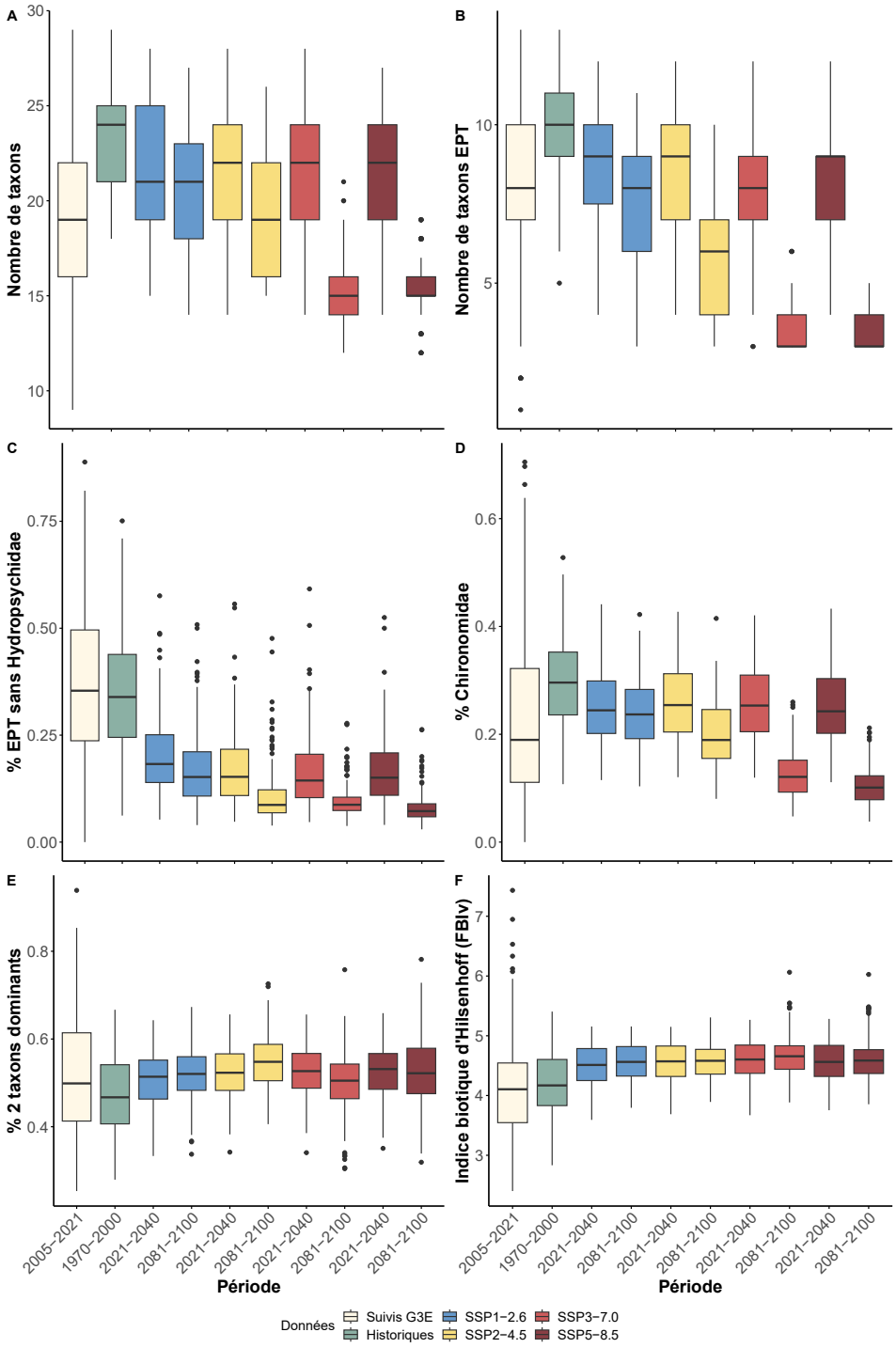


Figure 13. *Projections des sous-indices: Le panel A représente le nombre de taxons présents, le panel B représente le nombre de taxons EPT présents, le panel C représente le % d'abondance des taxons EPT sans les Hydropsychidae, le panel D représente le % d'abondance des Chironomidae, le panel E représente le % d'abondance des deux taxons dominants et le panel F représente l'indice biotique d'Hilsenhoff (FBIv). La légende est commune à tous les graphiques; en blanc sont présentées les valeurs brutes des indices calculées avec les abondances des taxons échantillonnés par les échantillonnages réalisés dans le cadre de SurVol Benthos. En vert sont présentées les valeurs des indices calculés avec les abondances des taxons présents dans plus de 10 % des sites prédits par le JSDM à partir des données bioclimatiques historiques; ces boîtes représentent la valeur actuelle des indices selon le modèle, que l'on peut comparer avec les valeurs observées en blanc. En bleu, jaune, orange et rouge sont présentées les valeurs des indices calculés avec les abondances prédites par le JSDM à partir des données bioclimatiques futurs selon 4 trajectoires communes d'évolution socio-économique (SSP): 1-2.6, 2-4.5, 3-7.0 et 5-8.5 respectivement pour les périodes 2021-2040 et 2081-2100.*

De plus, la plupart des sous-indices servant à calculer l'ISB_{SurVol} devraient également être influencés par le réchauffement (Fig. 13), soit:

1. **Une diminution moyenne du nombre de taxons** de 1.6 à 2 est prédite suivant les trajectoires communes d'évolution socio-économique comparées avec les valeurs du nombre de taxons calculées par le JSDM à partir des données bioclimatiques historiques (Fig. 13.A). Pour la période 2081-2100, la diminution moyenne du nombre de taxons prédite selon la trajectoire commune d'évolution socio-économique SSP1-2.6 est de 2.5, selon la trajectoire SSP2-4.5 la diminution moyenne est de 4.2, selon la trajectoire SSP3-7.0 et selon la trajectoire SSP5-8.5 la diminution moyenne du nombre de taxons est de 8.
2. **Une diminution moyenne du nombre de taxons EPT** de 1.5 à 2 est prédite suivant les trajectoires communes d'évolution socio-économique comparées avec les valeurs du nombre de taxons EPT calculées par le JSDM à partir des données bioclimatiques historiques (Fig. 13.B). Pour la période 2081-2100, la diminution moyenne du nombre de taxons EPT prédite selon la trajectoire commune d'évolution socio-économique SSP1-2.6 est de 2.27, selon la trajectoire SSP2-4.5 la diminution moyenne est de 4.07, selon les trajectoires SSP3-7.0 et SSP5-8.5 les diminutions moyennes du nombre de taxons sont de 6.35 et 6.43 respectivement.
3. **Une diminution moyenne du pourcentage de taxons EPT sans Hydropsychidae** de 14.2 % à 17.9 % est prédite suivant les trajectoires communes d'évolution socio-économique comparées avec les valeurs du pourcentage de taxons EPT sans Hydropsychidae calculées par le JSDM à partir des données bioclimatiques historiques (Fig. 13.C). Pour la période 2081-2100, la diminution moyenne du pourcentage de taxons EPT sans Hydropsychidae prédite selon la trajectoire commune d'évolution socio-économique SSP1-2.6 est de 17.3 %, selon la trajectoire SSP2-4.5 la diminution moyenne est de 23.6 %, selon les trajectoires SSP3-7.0 et SSP5-8.5 les diminutions moyennes du nombre de taxons sont de 24.83 % et 26.27 % respectivement.
4. **Une diminution moyenne du pourcentage de Chironomidae** de 3.9% à 4.6% est prédite suivant les trajectoires communes d'évolution socio-économique comparées avec les valeurs du pourcentage de Chironomidae calculées par le JSDM à partir des données bioclimatiques historiques (Fig. 13.D). Pour la période 2081-2100, la diminution moyenne du pourcentage de Chironomidae prédite selon la trajectoire socio-économique SSP1-2.6 est de 5.9 %, selon la trajectoire SSP2-4.5 la diminution moyenne est de 9.8 %, selon les trajectoires SSP3-7.0 et SSP5-8.5 les diminutions moyennes des pourcentages de Chironomidae sont de 17.2 % et 19.4 % respectivement. Les Chironomidae étant un taxon cosmopolite, ce résultat surprenant s'explique fort probablement par le fait que le modèle ne considère pas la possibilité d'immigration de nouveaux taxons (d'eau chaude) en provenance du sud. Davantage d'informations sur cette limitation du modèle sont élaborées ci-bas.
5. Les changements de **pourcentage des deux taxons dominants** comparés aux valeurs calculées par le JSDM à partir des données bioclimatiques historiques sont faibles et il n'y a **pas de changement** consistant, quelles que soient les trajectoires communes d'évolution socio-économique ou les périodes (Fig. 13.E).

Les changements de l'**indice biotique d'Hilsenhoff** comparés aux valeurs calculées par le JSDM à partir des données bioclimatiques historiques sont faibles et il n'y a **pas de changement** consistant, quelles que soient les trajectoires communes d'évolution socio-économique ou les périodes (Fig. 13.F)

4. Discussion

Les résultats des différentes analyses indiquent que la structure des communautés des MIB du sud du Québec est bien associée à certaines variables bioclimatiques historiques, en particulier les variables bioclimatiques liées à la température (Fig. 1 et Fig. 2). Les températures moyennes du trimestre le plus chaud ressortent comme particulièrement bien associées avec ces changements dans les communautés de MIB (Fig. 1 et Fig. 2). De plus, nos résultats montrent que les températures moyennes du trimestre le plus chaud extraites des variables bioclimatiques historiques sont de bonnes estimations des températures moyennes du trimestre le plus chaud dans les eaux de surface des rivières du sud du Québec (Fig. 3). Les analyses de communautés (NMDS et MRT) (Fig. 1 et Fig. 2), l'analyse de taxons indicateurs (Fig. 4) et les résultats du JSDM (Fig. 5 et Fig. 6) indiquent que certains taxons manifestent des affinités pour des environnements froids (Groupe 3.1, Groupe 2.2, Heptageniidae, Ephemerellidae) et, en moindre mesure, pour des environnements chauds (Hydropsychidae, Oligochètes, Tipulidae). Les affinités thermiques des taxons calculées à partir de leurs niches réalisées aux États-Unis ont une faible relation avec les valeurs de tolérance à la pollution des taxons et semblent associées positivement avec les températures du mois le plus chaud (Fig. 7). De plus, les affinités thermiques calculées sont de bons indicateurs des valeurs de CT_{max} physiologiques des taxons de MIB (Fig. 8). Les valeurs de CTI varient dans les sites au sud du Québec, mais aucun patron géographique évident de cet indice n'a été détecté (Fig. 9). Le CTI ne montre de relations ni avec les années ni avec les valeurs d'ISB_{SurVol} (Fig. 10 et Fig. 11). En revanche, notre analyse montre que les données disponibles ne sont pas suffisantes pour tester une tendance temporelle du CTI en relation avec l'échelle temporelle des changements climatiques (Fig. 10.B). Les impacts des changements climatiques sur les variables bioclimatiques prédits par le modèle CanESM5-CanOE varient fortement suivant les trajectoires communes d'évolution socio-économique et les périodes testées, mais toutes les prédictions prévoient des augmentations de températures moyennes du trimestre le plus chaud (Fig. 12). Pour la majorité des sous-indices explorés (nombre de taxons, nombre de taxons EPT, % EPT sans Hydropsychidae et % Chironomidae), les projections montrent également des changements dont l'ampleur est variable suivant les trajectoires communes d'évolution socio-économique et les périodes testées (Fig. 13).

4.1. Structure des communautés de MIB et leurs traits

Nos résultats indiquent que la structure des communautés de MIB est associée aux variations des températures (Fig. 1 et Fig. 2). La sensibilité des communautés de MIB à ces variations est souvent associée à la disponibilité en oxygène dans l'eau et non directement à la température (Croijmans, *et al.*, 2021). La forte association entre l'assemblage de MIB et les températures moyennes du trimestre le plus chaud (Fig. 1 et Fig. 2) pourrait donc s'expliquer par le fait que les cours d'eau avec des températures

particulièrement élevées durant l'été pourraient avoir des concentrations en oxygène plus faibles. Cet effet pourrait être amplifié dans des cours d'eau en milieu agricole où le débit est réduit en étiage et que la charge en nutriments et en matières organiques est plus importante (Sundermann, *et al.*, 2022). De tels environnements, sujets à de multiples stresseurs, sont favorables au développement de conditions de respirations particulièrement difficiles pour les MIB. Les températures d'été (soit le trimestre le plus chaud de l'année) élevées dans les rivières, qui favorisent le développement de conditions environnementales suboptimales, ont des conséquences variables sur différents taxons de MIB (Fig. 1.B, Fig. 2.B, Fig. 4 et Fig. 5). En effet, les demandes métaboliques et seuils de tolérances à différents stresseurs comme la déficience en oxygène ou la tolérance à différents polluants sont spécifiques à différents taxons (Metcalfe, 1989; Rubalcaba, *et al.*, 2020).

Certains taxons sont associés à des sites dont les températures sont relativement chaudes (Hydropsychidae, Oligochète, Tipulidae) tandis que d'autres taxons sont associés à des sites dont les températures sont relativement froides (Groupe 2.2, Groupe 3.1, Ephemerellidae, Heptageniidae et Leptophlebiidae) (Fig. 4 et Fig. 5). Il est notable que les taxons associés aux sites froids ont des scores de taxons indicateurs plus élevés (Fig. 4) et des valeurs de coefficients β du modèle JSDM, pour la variable des températures moyennes du trimestre le plus chaud, plus élevées relativement aux taxons associés aux sites chauds (Fig. 5). Il semblerait donc que la présence et l'abondance relative des taxons associés à des sites relativement froids soient de bons indicateurs de la sensibilité thermique des communautés de MIB. Dans un contexte de réchauffement climatique, ces taxons fortement sensibles à des températures élevées seront donc les premiers a être exclus des communautés de MIB. Dans des habitats où ils sont présents aujourd'hui, la disparition de ces taxons dans le futur pourrait donc être un bon indicateur de l'impact des changements climatiques si aucun autre changement environnemental n'affecte ces sites. Les abondances des taxons associés avec les sites relativement chauds sont moins bien prédites par le modèle JSDM (Fig. 6) et leurs associations avec la température sont plus faibles (Fig. 5.B), à l'exception des Hydropsychidae. Ces résultats indiquent que les relations entre les abondances de ces taxons (Oligochètes et Tipulidae) et la température sont relativement faibles. Ces taxons comportent des groupes (familles, genres ou espèce) généralistes et/ou relativement résistants à différents stresseurs (Chapman, *et al.*, 1982; Ficsór & Csabai, 2021), ce qui pourrait augmenter leurs abondances relatives dans des habitats chauds lorsque les taxons sensibles voient leurs abondances réduites ou qu'ils sont totalement exclus de la communauté de MIB. En effet, certains groupes d'Hydropsychidae sont résistants à l'augmentation de la température et à la diminution du débit des rivières, notamment grâce à des traits reliés à la respiration (Ficsór & Csabai, 2021). Les Oligochètes font partis d'une sous-classe comportant une forte diversité avec des taxons résistants à de multiple stresseurs environnementaux (Chapman, *et al.*, 1982). Ainsi, certains taxons ont été identifiés comme indicateurs des conditions froides, mais l'inverse n'est pas vrai dans les conditions chaudes, car ces milieux renferment des taxons que l'on retrouve dans une vaste gamme de conditions environnementales. L'utilisation de la résolution taxonomique niveau 1 entraîne le regroupement de taxons dont les affinités environnementales peuvent fortement varier. Cela limite notre capacité à identifier des associations fortes entre les variables environnementales et les abondances des différents taxons dans cette étude. Les taxons sensibles à des températures élevées pouvant également être relativement sensibles à la pollution (Metcalfe, 1989; Woodcock & Huryn,

2007), il est important d'intégrer plusieurs traits des taxons pour bien comprendre les réponses des MIB aux stress multiples. La relation entre les traits de tolérance à la pollution et d'affinité thermique a été analysée (Fig. 7.A) et ces deux traits semblent faiblement reliés dans les données de suivis de *SurVol Benthos*. Cette faible association montre que le trait d'affinité thermique n'est pas totalement redondant avec le trait de tolérance à la pollution et pourrait permettre une meilleure compréhension des communautés de MIB. De plus, la forte relation entre les valeurs d'affinités thermiques et de CT_{max} (Fig. 8) valide l'utilisation des niches réalisées aux États-Unis pour approximer l'affinité thermique des taxons de macroinvertébrés recensées au sud du Québec par le programme de biosurveillance aquatique du G3E. Bien que faible, la relation entre les valeurs d'affinité thermique et de tolérance à la pollution observée pourrait être reliée à des adaptations physiologiques dans l'utilisation de faibles quantités d'oxygène. En effet, l'augmentation des concentrations de certains polluants comme les nutriments (azote et phosphore) sont également associés à l'eutrophisation des eaux douces et à la diminution des concentrations d'oxygène dans ces environnements (Jenny*, et al.*, 2014; Nürnberg, 1995, 2019). De plus, la tolérance à la pollution est un trait qui est attribué suivant la présence des taxons à des sites dégradés. La dégradation des écosystèmes de rivières est un processus multifactoriel et les augmentations de température de l'eau sont favorisées par différents facteurs de perturbations tels que l'urbanisation (McGrane, 2016) et le développement agricole (Essaid & Caldwell, 2017). Il est donc possible que la tolérance à la pollution d'un taxon soit associée, en partie, à sa tolérance à des températures relativement élevées. Cela vient mettre en lumière l'importance de continuer à établir des stations de référence (stations peu ou pas impactées) dans le programme *SurVol Benthos* et de les suivre à long terme. Le projet *Des rivières surveillées, s'adapter pour l'avenir* a d'ailleurs permis aux participants de suivre ce genre de stations pour en évaluer l'impact des changements climatiques.

4.2. Indice de Température des Communautés - CTI

Nos résultats montrent, qu'avec les données disponibles, il n'est pas possible de détecter une tendance temporelle dans les valeurs de CTI (Fig. 10.A). Il est important de noter que les changements climatiques et l'augmentation des températures globales sont des processus à long terme qui ont des impacts notables à l'échelle de plusieurs décennies. Malgré nos efforts, il est donc difficile de conclure définitivement sur l'impact du réchauffement climatique entre 2005 et 2022 sur les valeurs de CTI. En effet, peu de sites ont une couverture temporelle et un nombre d'échantillons permettant une analyse temporelle robuste (Fig. 10.B). Ce point souligne la nécessité de maintenir et d'augmenter l'effort des suivis à long terme des communautés de MIB au sud du Québec afin de pouvoir correctement comprendre les changements temporels de ces communautés et mettre en place des outils de gestion appropriés. Aux vues de l'association entre l'affinité thermique et la tolérance à la pollution, il est important d'étudier la relation entre le CTI et l'ISB_{SurVol} qui sont respectivement des indices dérivés des valeurs de ces traits à l'échelle de la communauté. Les données disponibles ne semblent indiquer aucune association forte entre le CTI et l'ISB_{SurVol} (Fig. 11). Ce résultat montre que le CTI n'est pas fortement redondant avec l'ISB_{SurVol}, qui est un indice actuellement utilisé pour les suivis de qualité des écosystèmes aquatiques d'eau douce au Québec.

Les valeurs prédites par le modèle JSDM, en utilisant des projections climatiques futures, indiquent

que le CTI serait sensible à un réchauffement important au sud du Québec prédit par le modèle CanESM5-CanOE (Fig. 12). En effet, à moyen terme (pour la période 2021-2040) le modèle prédit une augmentation modérée, mais notable des valeurs de CTI comparable pour les différentes trajectoires communes d'évolution socio-économique (Fig. 13). En revanche, à long terme (pour la période 2081-2100), les augmentations de CTI prédites sont plus importantes particulièrement pour les trajectoires communes d'évolution socio-économique les plus pessimistes (Fig. 13). Ces résultats montrent que le CTI est un outil prometteur, car il est sensible aux changements dans les communautés de MIB associés au réchauffement climatique (Bowler, *et al.*, 2017; Brice, *et al.*, 2019; Burrows, *et al.*, 2020; Fumy, *et al.*, 2020). À ce jour, en utilisant les données des suivis *SurVol Benthos* du G3E, le recul nécessaire pour mettre en évidence l'association du CTI avec des changements de températures passés n'est pas disponible. Les prédictions climatiques du modèle CanESM5-CanOE, en association avec le modèle JSDM, permettent de mettre en évidence l'intérêt de continuer les efforts d'échantillonnage et le potentiel du CTI pour suivre l'évolution des impacts du réchauffement climatique sur les communautés de MIB au Québec. Ces informations sont primordiales afin de comprendre les changements dans les écosystèmes de rivières au Québec et mettre en place des stratégies de conservation efficaces dans un contexte de réchauffement global.

4.3. Les prédictions futures des sous-indices

Les différents sous-indices pour lesquels des projections ont été calculées (Fig. 13) semblent tous varier suivant les périodes et les trajectoires communes d'évolution socio-économique, à l'exception du pourcentage des deux taxons dominants et FBIv (Fig. 13). Les changements prédits par notre modèle sont modérés à moyen terme (période 2021-2040) mais certainement notables comparés à la variabilité dans les données historiques et les prédictions à long terme. Ces changements à moyen terme varient peu selon les différentes trajectoires communes d'évolution socio-économique (Fig. 13) en utilisant l'identification taxonomique de niveau 1. Ce résultat indique que même les scénarios les plus pessimistes n'entraîneraient pas de changements extrêmes dans les communautés de MIB du sud du Québec dans les vingt prochaines années. En revanche, à long terme (période 2081-2100), les changements prédits sont plus importants ainsi que les différences de prédictions entre les trajectoires communes d'évolution socio-économique (Fig. 13). Pour la période 2081-2100, les trajectoires communes d'évolution socio-économique les plus optimistes prédisent des changements importants dans les communautés de MIB. L'ISB_{SurVol} est composé des six variables suivantes: le nombre total de taxons, le nombre de taxons Ephemeroptera, Plecoptera et Trichoptera (EPT), le pourcentage d'EPT sans Hydropsychidae, le pourcentage de Chironomidae, le pourcentage des deux taxons dominants et l'indice biotique d'Hilsenhoff (FBIv). Les résultats du modèle JSDM montrent que des changements importants de certaines de ces variables sont possibles en réponse au réchauffement climatique. Ces changements sont particulièrement marqués pour les taxons EPT, comme le montrent le nombre de taxons EPT (Fig. 13.C) et le pourcentage d'abondance d'EPT sans Hydropsychidae (Fig. 13.D). Il est donc possible que les changements climatiques puissent entraîner des variations de l'ISB_{SurVol} indépendamment des effets de la qualité de l'eau et de l'habitat.

4.4. Limites de l'étude

Il est important de nuancer les résultats de modélisations obtenus. En effet, le modèle JSDM et les prédictions climatiques du modèle CanESM5-CanOE sont sujets à certaines incertitudes. Les valeurs exactes d'abondances des taxons de MIB et les indices dérivants de ces abondances sont donc eux-mêmes sujets à ces incertitudes. La comparaison de plusieurs scénarios climatiques est intéressante et permet d'explorer les variations relatives de différents indices selon les scénarios. En revanche, il n'est pas conseillé d'interpréter les valeurs des abondances des taxons de MIB et des différents indices de manière absolue. Par exemple, il est probable que le CTI et le nombre d'espèces EPT varieront davantage avec le réchauffement climatique que d'autres indices comme le % des 2 taxons dominants, mais il est difficile de se prononcer sur la valeur absolue des changements de CTI ou du nombre d'espèces d'EPT. Les chiffres rapportés plus haut servent uniquement à comparer la réponse relative des différents indices. De plus, il est important de noter que les prédictions du modèle JSDM n'intègrent aucun processus de migration ou d'adaptation des taxons de MIB, comme c'est généralement le cas pour les modèles de distribution des espèces (Wuitchik, *et al.*, 2022). En réalité, il est probable qu'en cas de réchauffement progressif dû aux changements climatiques, certains taxons plus adaptés à des températures élevées venant de basses latitudes puissent migrer vers les rivières du sud du Québec. À long terme, il est également possible que des processus d'adaptations entraînent des changements des affinités thermiques de certains taxons. Tous ces processus peuvent modifier les prédictions des abondances des taxons de MIB et des indices calculés. Ceci est particulièrement important avec la définition taxonomique utilisée dans les données de cette étude. En effet, les taxons utilisés dans cette étude ont une définition taxonomique relativement grossière. Certains taxons sont donc composés d'une forte diversité de genres dont l'affinité thermique et la tolérance à la pollution peuvent varier et changer les valeurs attendues des différents indices présentés dans cette étude. Ainsi, si la composition d'une famille change alors que des espèces ou des genres d'eau chaude remplacent progressivement les genres ou espèces d'eau froide, l'affinité thermique de la famille pourrait augmenter considérablement. Les prédictions sont donc dépendantes de la variation qui existe à l'intérieur d'une famille au niveau de la tolérance ou de l'affinité thermique.

5. Conclusion et recommandations

Cette étude a permis de déterminer les affinités thermiques des taxons de MIB identifiés lors des suivis benthiques du G3E au sud du Québec. Ces valeurs ont ensuite permis de calculer la l'affinité thermique moyenne des communautés de MIB (CTI) recensées par le programme de suivi *SurVol Benthos*. Les valeurs des CTI ont permis la production d'une carte, ainsi que d'identifier le besoin de données de suivis à long terme pour identifier les changements du CTI liés au réchauffement climatique.

En effet, le réchauffement climatique est un processus se manifestant à l'échelle de plusieurs décennies et cette étude met en lumière le manque de données adéquates disponibles à cette échelle temporelle. Seuls quelques sites ont été suivis sur une période d'environ 10 ans et de nombreux sites ont une seule année du suivi. Ce point souligne la nécessité de maintenir et idéalement d'augmenter l'effort des suivis à long terme des communautés de MIB au Québec afin de mieux comprendre les effets du réchauffement climatique.

Les projections futures du CTI et sa faible association avec l'ISB_{SurVol} montrent le potentiel de cet indice pour le suivi des effets du réchauffement climatique sur les communautés de MIB au Québec. Les taxons Groupe 3.1, Groupe 2.2, Heptageniidae et Ephemerellidae ont été identifiés comme associés avec de basses températures. Ces taxons pourraient donc être utilisés comme indicateurs d'impacts du réchauffement climatique dans des sites n'étant pas sujets à d'autres stresseurs environnementaux.

Il pourrait être pertinent d'utiliser des données avec une résolution taxonomique plus fine (le genre par exemple) pour faire ces analyses. Les données du MELCCFP seraient à explorer dans ce sens. Cela permettrait de confirmer les résultats de cette étude ainsi que d'identifier les genres qui pourrait expliquer les associations entre les taxons et les variables bioclimatiques que nous avons identifiées dans le présent rapport. De telles analyses pourraient également permettre d'identifier le niveau d'agrégation taxonomique le plus pertinent pour la surveillance des perturbations des communautés de MIB liées aux changements climatiques.

Les résultats de cette étude montrent que le calcul systématique du CTI des communautés de MIB pourrait être utile pour suivre l'évolution des impacts du réchauffement climatique dans les sites suivis par le G3E et les participants de *SurVol Benthos*. Au vu des données actuellement disponibles, et si les efforts de suivi sont maintenus, une nouvelle étude des tendances temporelles des communautés de MIB et du CTI serait pertinente d'ici 5 à 10 ans. Dans cette optique, il serait particulièrement pertinent de focaliser l'effort de suivi sur des sites ne subissant pas d'autres pressions anthropiques.

En effet, une augmentation du nombre de suivis à long terme des communautés de MIB par le G3E et les participants à *SurVol Benthos* est nécessaire pour mettre en place des outils de gestion appropriés afin de maintenir la santé des écosystèmes aquatiques et riverains du Québec face aux changements à venir.

6. Bibliographie

Ajani, P. A., Davies, C. H., Eriksen, R. S., & Richardson, A. J. (2020). Global Warming Impacts Micro-Phytoplankton at a Long-Term Pacific Ocean Coastal Station. Frontiers in Marine Science, 7. https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2020.576011

Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. Journal of Statistical Software, 67, 1–48. https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01

Bowler, D., & Böhning-Gaese, K. (2017). Improving the community-temperature index as a climate change indicator. PLOS ONE, 12(9), e0184275. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0184275

Bowler, D., Hof, C., Haase, P., Kröncke, I., Schweiger, O., Adrian, R., Baert, L., Bauer, H.-G., Blick, T., Brooker, R. W., Dekoninck, W., Domisch, S., Eckmann, R., Hendrickx, F., Hickler, T., Klotz, S., Kraberg, A., Kühn, I., Matesanz, S., … Böhning-Gaese, K. (2017). Cross-realm assessment of climate change impacts on species' abundance trends. Nature Ecology & Evolution, 1(3), Article 3. https://doi.org/10.1038/s41559-016-0067

Brice, M.-H.,Cazelles, K., Legendre, P., & Fortin, M.-J. (2019). Disturbances amplify tree community responses to climate change in the temperate–boreal ecotone. Global Ecology and Biogeography, 28(11), 1668–1681. https://doi.org/10.1111/geb.12971

Burrows, M. T., Hawkins, S. J., Moore, J. J., Adams, L., Sugden, H., Firth, L., & Mieszkowska, N. (2020). Global-scale species distributions predict temperature-related changes in species composition of rocky shore communities in Britain. Global Change Biology, 26(4), 2093–2105. https://doi.org/10.1111/gcb.14968

Chapman, P. M., Farrell, M. A., & Brinkhurst, R. O. (1982). Relative tolerances of selected aquatic oligochaetes to individual pollutants and environmental factors. Aquatic Toxicology, 2(1), 47–67. https://doi.org/10.1016/0166-445X(82)90005-4

Christian, J. R., Denman, K. L., Hayashida, H., Holdsworth, A. M., Lee, W. G., Riche, O. G. J., Shao, A. E., Steiner, N., & Swart, N. C. (2022). Ocean biogeochemistry in the Canadian Earth System Model version 5.0.3: CanESM5 and CanESM5-CanOE. Geoscientific Model Development, 15(11), 4393–4424. https://doi.org/10.5194/gmd-15-4393-2022

Clark, J. S., Nemergut, D., Seyednasrollah, B., Turner, P. J., & Zhang, S. (2017). Generalized joint attribute modeling for biodiversity analysis: Median-zero, multivariate, multifarious data. Ecological Monographs, 87(1), 34–56. https://doi.org/10.1002/ecm.1241

Comte, L., Olden, J. D., Tedesco, P. A., Ruhi, A., & Giam, X. (2021). Climate and land-use changes interact to drive long-term reorganization of riverine fish communities globally. Proceedings of the National Academy of Sciences, 118(27), e2011639118. https://doi.org/10.1073/pnas.20116391

Covich, A. P., Palmer, M. A., & Crowl, T. A. (1999). The Role of Benthic Invertebrate Species in Freshwater Ecosystems: Zoobenthic species influence energy flows and nutrient cycling. BioScience, 49(2), 119–127. https://doi.org/10.2307/1313537

Croijmans, L., Jong, J. F. D., & Prins, H. H. T. (2021). Oxygen is a better predictor of macroinvertebrate richness than temperature—A systematic review. Environmental Research Letters, 16(2), 023002. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9b42

Devictor, V., Julliard, R., Couvet, D., & Jiguet, F. (2008). Birds are tracking climate warming, but not fast enough. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 275(1652), 2743–2748. https://doi.org/10.1098/rspb.2008.0878

Dudgeon, D., Arthington, A. H., Gessner, M. O., Kawabata, Z.-I., Knowler, D. J., Lévêque, C., Naiman, R. J., Prieur-Richard, A.-H., Soto, D., Stiassny, M. L. J., & Sullivan, C. A. (2006). Freshwater biodiversity: Importance, threats, status and conservation challenges. Biological Reviews, 81(2), 163–182. https://doi.org/10.1017/S1464793105006950

Dufrene, M., & Legendre, P. (1997). Species Assemblages and Indicator Species: The Need for a Flexible Asymmetrical Approach. Ecological Monographs, 67(3), 345–366. https://doi.org/10.2307/2963459

Essaid, H. I., & Caldwell, R. R. (2017). Evaluating the impact of irrigation on surface water – groundwater interaction and stream temperature in an agricultural watershed. Science of The Total Environment, 599–600, 581–596. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.205

Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology, 37(12), 4302–4315. https://doi.org/10.1002/joc.5086

Ficsór, M., & Csabai, Z. (2021). Longitudinal zonation of larval Hydropsyche (Trichoptera: Hydropsychidae): abiotic environmental factors and biotic interactions behind the downstream sequence of Central European species. Hydrobiologia, 848(15), 3371–3388. https://doi.org/10.1007/s10750-021-04602-0

Fumy, F., Löffler, F., Samways, M. J., & Fartmann, T. (2020). Response of Orthoptera assemblages to environmental change in a low-mountain range differs among grassland types. Journal of Environmental Management, 256, 109919. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109919

Hanna, D. E. L., Tomscha, S. A., Ouellet Dallaire, C., & Bennett, E. M. (2018). A review of riverine ecosystem service quantification: Research gaps and recommendations. Journal of Applied Ecology, 55(3), 1299–1311. https://doi.org/10.1111/1365-2664.13045

Jenny, J.-P., Arnaud, F., Alric, B., Dorioz, J.-M., Sabatier, P., Meybeck, M., & Perga, M.-E. (2014). Inherited hypoxia: A new challenge for reoligotrophicated lakes under global warming. Global Biogeochemical Cycles, 28(12), 1413–1423. https://doi.org/10.1002/2014GB004932

McGrane, S. J. (2016). Impacts of urbanisation on hydrological and water quality dynamics, and urban water management: A review. Hydrological Sciences Journal, 61(13), 2295–2311. https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1128084

Mikisew Cree First Nation – Community Based Monitoring Program (dataset). 14.0.0. DataStream. 10.25976/afj8-cc25.

Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP), 2013. Guide de surveillance biologique basée sur les macroinvertébrés benthiques d'eau douce du Québec – Cours d'eau peu profonds à substrat grossier, 2013. Direction du suivi de l'état de l'environnement, ISBN 978-2-550-69169-3 (PDF), 2e édition : 88 p. (incluant 6 ann.).

Mermillod-Blondin, F. (2011). The functional significance of bioturbation and biodeposition on biogeochemical processes at the water–sediment interface in freshwater and marine ecosystems. Journal of the North American Benthological Society, 30(3), 770–778. https://doi.org/10.1899/10-121.1

Metcalfe, J. L. (1989). Biological water quality assessment of running waters based on macroinvertebrate communities: History and present status in Europe. Environmental Pollution, 60(1), 101–139. https://doi.org/10.1016/0269-7491(89)90223-6

Nürnberg, G. K. (1995). Quantifying anoxia in lakes. Limnology and Oceanography, 40(6), 1100–1111. https://doi.org/10.4319/lo.1995.40.6.1100

Nürnberg, G. K. (2019). Quantification of Anoxia and Hypoxia in Water Bodies. In Encyclopedia of Water (pp. 1–9). John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1002/9781119300762.wsts0081

Ovaskainen, O., Tikhonov, G., Dunson, D., Grøtan, V., Engen, S., Sæther, B.-E., & Abrego, N. (2017). How are species interactions structured in species-rich communities? A new method for analysing time-series data. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 284(1855), 20170768. https://doi.org/10.1098/rspb.2017.0768

Rubalcaba, J. G., Verberk, W. C. E. P., Hendriks, A. J., Saris, B., & Woods, H. A. (2020). Oxygen limitation may affect the temperature and size dependence of metabolism in aquatic ectotherms. Proceedings of the National Academy of Sciences, 117(50), 31963–31968. https://doi.org/10.1073/pnas.2003292117

Schmera, D., Heino, J., Podani, J., Erős, T., & Dolédec, S. (2017). Functional diversity: A review of methodology and current knowledge in freshwater macroinvertebrate research. Hydrobiologia, 787(1), 27–44. https://doi.org/10.1007/s10750-016-2974-5

Statzner, B. (2012). Geomorphological implications of engineering bed sediments by lotic animals. Geomorphology, 157–158, 49–65. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.03.022

Stuart-Smith, R. D. (2021). Climate change: Large-scale abundance shifts in fishes. Current Biology, 31(21), R1445–R1447. https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.09.063

Sundermann, A., Müller, A., & Halle, M. (2022). A new index of a water temperature equivalent for summer respiration conditions of benthic invertebrates in rivers as a bio-indicator of global climate change. Limnologica, 95, 125980. https://doi.org/10.1016/j.limno.2022.125980

Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., Kc, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., … Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. Global Environmental Change, 42, 153–168. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009

Tikhonov, G., Opedal, Ø. H., Abrego, N., Lehikoinen, A., de Jonge, M. M. J., Oksanen, J., & Ovaskainen, O. (2020). Joint species distribution modelling with the r-package Hmsc. Methods in Ecology and Evolution, 11(3), 442–447. https://doi.org/10.1111/2041-210X.13345

Tockner, K., Ward, J. V., Edwards, P. J., & Kollmann, J. (2002). Riverine landscapes: An introduction. Freshwater Biology, 47(4), 497–500. https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2002.00913.x

U.S Environmental Protection Agency. 2022. National Aquatic Resource Surveys. National Lakes Assessment 2017, National Lakes Assessment 2012, National Lakes Assessment 2007, National Rivers and Streams Assessment 2013-2014, National Rivers and Streams Assessment 2008-2009, Wadeable Streams Assessment 2004, National Coastal Condition Assessment 2015, National Coastal Condition Assessment 2010(data and metadata files). Available from U.S. EPA website: http://www.epa.gov/national-aquatic-resource-surveys/data-national-aquatic-resource-surveys. Date accessed: 2022-11-05.

Vörösmarty, C. J., McIntyre, P. B., Gessner, M. O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., Glidden, S., Bunn, S. E., Sullivan, C. A., Liermann, C. R., & Davies, P. M. (2010). Global threats to human water security and river biodiversity. Nature, 467(7315), Article 7315. https://doi.org/10.1038/nature09440

Woodcock, T. S., & Huryn, A. D. (2007). The response of macroinvertebrate production to a pollution gradient in a headwater stream. Freshwater Biology, 52(1), 177–196. https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2006.01676.x

Wuitchik, S. J. S., Mogensen, S., Barry, T. N., Paccard, A., Jamniczky, H. A., Barrett, R. D. H., & Rogers, S. M. (2022). Evolution of thermal physiology alters the projected range of threespine stickleback under climate change. Molecular Ecology, 31(8), 2312–2326. https://doi.org/10.1111/mec.16396

7. Annexe

Table.1: Identification visée pour les différents taxons des suivis du G3E (Niveau 1). Cette table inclue les scores de taxon indicateur, les affinités thermiques et les tolérances à la pollution moyens des taxons des suivis du G3E.

Taxons	Identification visée	Score taxon indicateur	Affinité thermique	Tolérance
Éphéméroptère	Baetiscidae	0.018	27.08	3
Éphéméroptère	Groupe 1.1 (Ephemeridae, Polymitarcyidae)	0.096	28.02	4
Éphéméroptère	Potamanthidae	0.019	26.97	4
Éphéméroptère	Ephemerellidae	0.754	26.47	1
Éphéméroptère	Leptophlebiidae	0.690	25.99	2
Éphéméroptère	Caenidae	0.208	31.4	7
Éphéméroptère	Leptohyphidae (anciennement Tricorythidae)	0.027	NA	4
Éphéméroptère	Heptageniidae	0.747	27.74	4
Éphéméroptère	Isonychiiadae – Isonychia	0.089	31.7	2
Éphéméroptère	Groupe1.2 (Ameletidae, Baetidae, Siphlonuridae, Metretopodidae)	0.416	25.09	3
Éphéméroptère	Éphéméroptère non identifié	0.119	28.12	3
Trichoptère	Hydropsychidae	0.583	26.79	4
Trichoptère	Hydroptilidae	0.256	28.07	4
Trichoptère	Helicopsychidae	0.128	30.3	3
Trichoptère	Rhyacophilidae	0.531	26.5	0
Trichoptère	Groupe 2.1 (Philopotamidae, Polycentropodidae, Psychomyiidae, Dipseudopsidae)	0.535	27.91	4
Trichoptère	Goeridae	0.025	25	3
Trichoptère	Leptoceridae	0.219	29.06	4
Trichoptère	Molannidae	0.011	26.8	6

Trichoptère	Groupe 2.2 (Limnephilidae, Apataniidae, Lepidostomatidae, Brachycentridae, Odontoceridae, Uenoidae)	0.696	25.51	2
Trichoptère	Phryganeidae	0.032	27.3	4
Trichoptère	Glossosomatidae	0.340	28.59	0
Trichoptère	Trichoptère non identifié	0.157	26.26	3
Plécoptère	Peltoperlidae	0.011	25.5	0
Plécoptère	Pteronarcyidae	0.080	26.4	0
Plécoptère	Perlidae	0.568	24.97	1
Plécoptère	Groupe 3.1 (Capniidae, Chloroperlidae, Leuctridae, Nemouridae, Taeniopterygidae, Perlodidae)	0.755	23.44	1
Plécoptère	Plécoptère non identifié	0.016	23.61	1
Hémiptère	Corixidae	0.059	23.02	5
Hémiptère	Hémiptère non identifié	0.007	25.05	-
Mégaloptère	Sialidae - Sialis	0.054	28.2	4
Mégaloptère	Corydalidae	0.101	27.83	0
Mégaloptère	Mégaloptère non identifié	0.004	27.93	2
Coléoptère	Psephenidae	0.200	28.16	4
Coléoptère	Elmidae, Lutrochidae -Lutrochus	0.500	27.93	4
Coléoptère	Haliplidae	0.010	29.85	5
Coléoptère	Gyrinidae	0.006	29.15	4
Coléoptère	Dytiscidae	0.025	26.35	5
Coléoptère	Hydrophiloidea (Hydrophilidae, Hydrochidae, Helophoridae)	0.035	28.79	5
Coléoptère	Coléoptère non identifié	0.009	27.64	5

Coléoptère	Curculionidae	0.015	26.34	5
Coléoptère	Groupe 4.1 (Hydrophilidae, Dytiscidae, Noteridae)	0.023	27.65	5
Coléoptère	Groupe 4.2 (Elmidae, Dryopidae, Helophoridae, Hydrochidae)	0.346	28.5	5
Lépidoptère		0.033	25.74	5
Odonate	Zygoptera	0.062	28.6	7
Odonate	Anisoptera	0.394	28.18	5
Odonate	Odonate non identifié	0.002	28.31	5
Diptère	Chironomidae	0.506	23.26	8
Diptère	Ceratopogonidae	0.336	28.52	6
Diptère	Simuliidae	0.225	23.69	6
Diptère	Groupe 5.1 (Culicidae, Chaoboridae)	0.008	27.08	8
Diptère	Tipulidae	0.496	27.91	3
Diptère	Groupe 5.2 (Empididae, Athericidae -Atherix)	0.365	27.45	5
Diptère	Diptère non identifié	0.218	26.82	5
Hydracarien	Hydracarina	0.398	28.4	6
Planaire	Planaire	0.078	25.1	6
Némerte	Némertea	0.018	34	6
Nématode	Nématoda	0.227	30.79	5
Annélide – Oligochète	Annélide - Oligochaeta	0.579	29.01	8
Sangsue	Sangsue	0.130	33.5	8
Isopode	Isopoda	0.412	27.97	8
Amphipode	Amphipoda	0.142	30.6	7
Décapode	Decapoda	0.043	28.1	6
Ostracode	Ostracoda	0.048	30.79	8

Cladocère	Cladocera	0.021	23.12	8
Copépode	Copepoda	0.048	19.9	8
Bivalve	Sphaeriidae	0.213	31.8	6
Bivalve	Dreissenidae (Moule zebra ou quagga)	0.002	34	8
Bivalve	Unionide (Margaritiferidae, Unionidae)	0.004	23.67	6
Bivalve	Bivalve (non identifié)	0.004	27.1	NA
Gastéropode sans opercule	Planorbidae	0.152	29.68	6
Gastéropode sans opercule	Lymnaeidae	0.168	29.3	6
Gastéropode sans opercule	Physidae	0.210	31.21	8
Gastéropode sans opercule	Ancylidae	0.171	32.7	6
Gastéropode avec opercule	Prosobranche (Pleuroceridae, Hydrobiidae, Viviparidae, Bithyniidae)	0.042	27.08	7