

# RAPPORT FINAL

## ANALYSE PROSPECTIVE DES RISQUES CLIMATIQUES SUR LE LAC ET LA RIVIÈRE MAGOG

Réalisé pour :

Jean-François Lachance (Responsable de projet)

**Action lac Magog**

Réalisé par :

Julie Vanderpotte (Personne chargée de projet)

**Clinique en environnement**

Centre universitaire de formation en environnement  
et développement durable (CUFE)

Le 2026-04-24

Hiver 2026

L'ORGANISATION PARTENAIRE reconnaît que le projet est réalisé par une étudiante ou un étudiant. Dans ce contexte, l'ORGANISATION PARTENAIRE dégage l'Université de Sherbrooke, le Centre universitaire de formation en environnement et développement durable, son personnel ainsi que l'étudiante ou l'étudiant ayant participé au projet de toute responsabilité professionnelle ou civile pouvant découler de sa participation au projet. Dans certains cas, il peut être conseillé de faire valider les résultats obtenus par des experts, et ce, préalablement à leur utilisation.

## **Contexte, objectifs et portée du rapport**

Le présent rapport s'inscrit dans le cadre d'un mandat réalisé par Julie Vanderpote via la Clinique en environnement du Centre Universitaire de formation en environnement et en développement durable de l'Université de Sherbrooke pour l'organisme Action lac Magog, une association citoyenne engagée dans la protection, la préservation et l'amélioration de la qualité de l'eau du lac Magog et de la rivière Magog. Dans un contexte marqué par les changements climatiques et par les pressions croissantes liées aux activités humaines sur le bassin versant, l'organisation souhaite renforcer sa capacité à anticiper les enjeux futurs et à orienter ses actions de sensibilisation et de gestion.

Ce mandat prend la forme d'une analyse prospective fondée sur une revue de littérature scientifique et technique, visant à mieux comprendre les impacts des changements climatiques sur la qualité de l'eau et les écosystèmes aquatiques du territoire étudié. Il s'inscrit ainsi dans une démarche d'aide à la décision et de planification stratégique, en cohérence avec les besoins exprimés par l'organisme partenaire .

## **Objectifs du rapport**

L'objectif principal du rapport est de produire une synthèse rigoureuse, structurée et accessible des connaissances actuelles portant sur les impacts des changements climatiques sur le lac et la rivière Magog, afin de soutenir la réflexion stratégique d'Action lac Magog.

Plus spécifiquement, le rapport vise à :

- Identifier et analyser les principaux aléas climatiques affectant les systèmes aquatiques ;
- Décrire les impacts écologiques et sur la qualité de l'eau, notamment en lien avec la biodiversité et les usages ;
- Établir des profils de vulnérabilité des composantes du système étudié ;
- Recenser et analyser des solutions d'adaptation issues de la littérature ;
- Formuler des recommandations adaptées au contexte local, en cohérence avec les enjeux identifiés.

## **Portée et limites du rapport**

Ce rapport repose principalement sur une revue de littérature scientifique et grise, ce qui implique certaines limites. D'une part, les analyses présentées s'appuient sur des connaissances existantes et non sur des données empiriques collectées directement sur le terrain. D'autre part, les projections climatiques disponibles concernent majoritairement les aléas (température, précipitations, etc.), tandis que les réponses écologiques des écosystèmes demeurent encore partiellement documentées. Ainsi, certaines interprétations reposent sur des inférences scientifiques, ce qui peut limiter la précision des résultats.

Par ailleurs, le rapport est circonscrit au territoire du lac Magog et de la rivière Magog et met prioritairement l'accent sur les enjeux liés aux changements climatiques. Les autres facteurs de pression, bien que mentionnés, ne font pas l'objet d'une analyse exhaustive. Enfin, ce document constitue un outil

d'aide à la décision et non une étude technique opérationnelle. Les recommandations proposées devront, au besoin, être approfondies ou validées dans le cadre d'analyses complémentaires.

## **Structure complémentaire du document**

Afin de faciliter la compréhension du rapport, certains outils complémentaires sont mis à disposition du lecteur :

- Un lexique, présenté en fin de document, qui définit les principaux concepts scientifiques et techniques mobilisés ;
- Une annexe dédiée aux impacts sur le tourisme et les usages récréatifs, permettant d'approfondir cet enjeu de manière complémentaire à l'analyse principale.

**TABLE DES MATIÈRES**

1	PORTRAIT DU LAC ET DE LA RIVIÈRE MAGOG.....	1
1.1	Bassin hydrographique.....	1
1.2	Écologie.....	2
1.3	Activités humaines.....	3
2	APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE.....	4
2.1	Cadre conceptuel.....	4
2.1.1	Risque climatique.....	5
2.1.2	Aléa climatique et exposition.....	6
2.1.3	Vulnérabilité climatique.....	6
2.1.4	Prise de décision.....	6
2.2	Veille bibliographique.....	8
2.2.1	Littérature grise.....	9
2.2.2	Littérature scientifique.....	9
3	LES ALÉAS CLIMATIQUES.....	10
3.1	Réchauffement de l'eau et réduction de la couverture de glace.....	10
3.2	Précipitations intenses et épisode de sécheresse.....	16
4	LES DIFFÉRENTS IMPACTS.....	21
4.1	Accroissement de la végétation algale et des cyanobactéries.....	22
4.2	Modification des communautés de poissons.....	30
4.3	Modification du réseau trophique et désynchronisation écologique.....	34
4.4	Altération de la qualité de l'eau.....	38
4.5	Synthèse des enjeux.....	41
5	PROFIL DE VULNÉRABILITÉ.....	42
5.1	Vulnérabilité des algues et des cyanobactéries.....	43
5.2	Vulnérabilité des communautés de poisson.....	44
5.3	Vulnérabilité des réseaux trophiques.....	44
5.4	Vulnérabilité de la qualité de l'eau.....	45
6	SOLUTIONS D'ADAPTATION.....	46

# Clinique en environnement

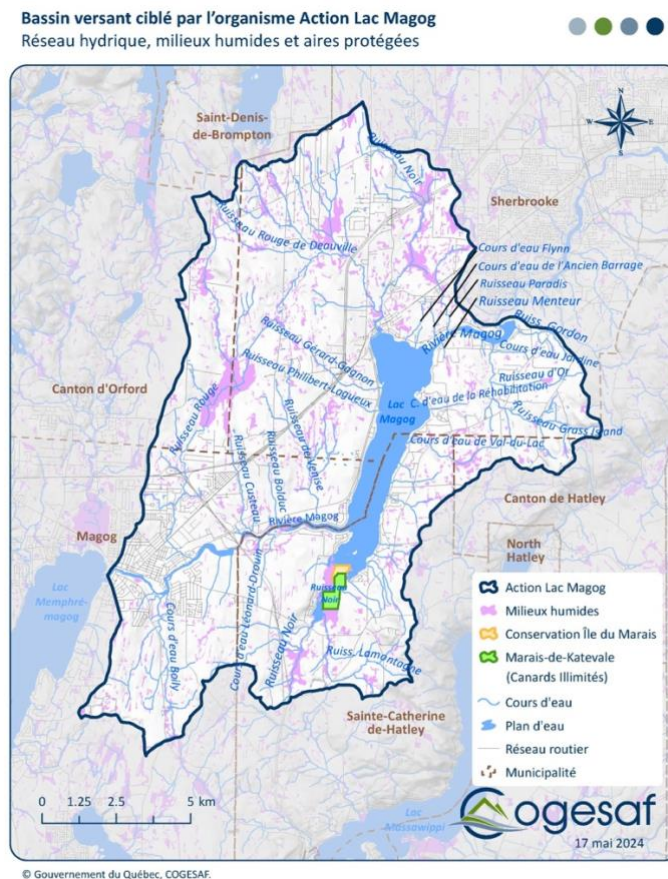
Centre universitaire de formation en environnement et en développement durable (CUFE)

6.1	Réduction des apports de nutriments à la source .....	49
6.2	Gestion hydrologique pour limiter le transport de nutriments .....	52
6.3	Restauration écologique et renforcement de la résilience du système aquatique .....	55
7	RECOMMANDATIONS POUR LA MISE EN ŒUVRE .....	58
	CONCLUSION .....	61
	BIBLIOGRAPHIE .....	59
	ANNEXE .....	76
	LEXIQUE .....	78

## 1 PORTRAIT DU LAC ET DE LA RIVIÈRE MAGOG

### 1.1 Bassin hydrographique

La présente analyse porte sur le lac et la rivière Magog situés dans les Cantons de l'Est. Pour commencer, le lac Magog a un bassin hydrographique intégrant la rivière Magog, elle-même alimentée par le lac Memphrémagog (Action lac Magog, s. d.). En d'autres termes, le lac Magog prend part au bassin versant de la rivière Magog (figure1).



**Figure 1 – Bassin hydrographique du lac Magog** (Action Lac Magog, s. d.) : Cette carte représente la délimitation du bassin versant du lac Magog. Elle montre l'étendue du réseau hydrographique, la répartition des milieux humides et les zones de conservation essentielles.

Ce bassin versant de 259 km<sup>2</sup> s'étend donc du lac Memphrémagog à la rivière Saint-François (COGESAF, 2011). Pour ce qui est des caractéristiques, le lac a une longueur de 11km et une largeur de 2km pour un volume d'eau estimé à 946 500 000 m<sup>3</sup>. La profondeur moyenne est de 8,65m et va jusqu'à 18,8m pour la fosse la plus profonde. Malgré la présence de nombreux tributaires, formant leurs sous-bassins (COGESAF, 2011), le lac dépend de la rivière à 90% pour son alimentation en eau (Action lac Magog, s. d.).

## 1.2 Écologie

Au niveau écologique plusieurs milieux humides, à l'exemple de marécages arborés, occupent le bassin hydrographique (figure 2).

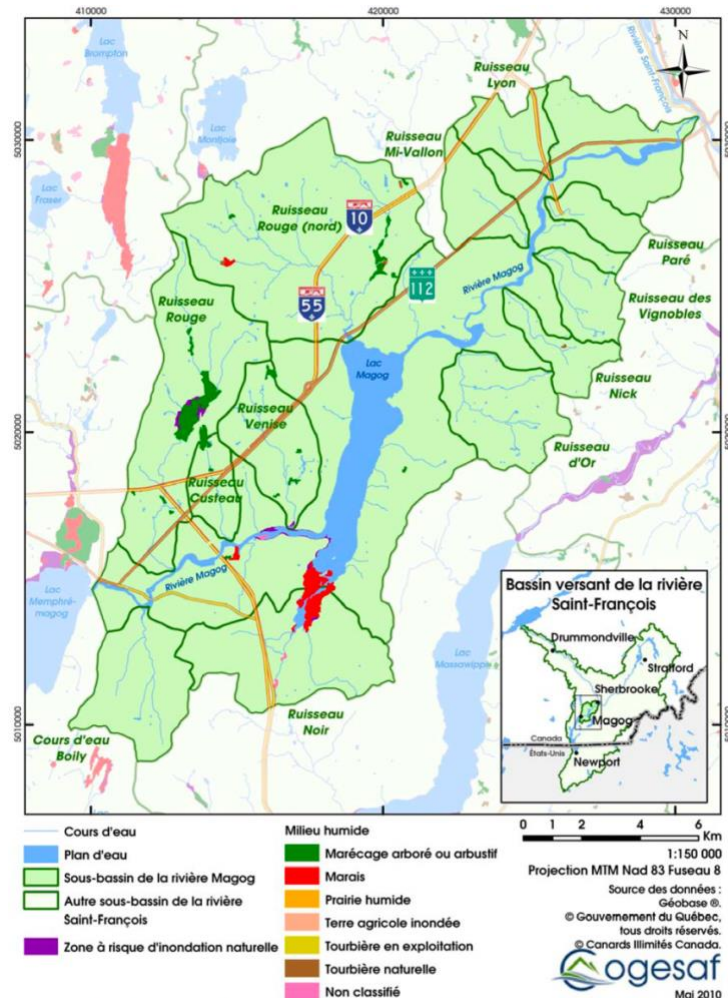


Figure 2.2 Sous-bassins, milieux humides et zones inondables

**Figure 2 - Zones humides et inondables du bassin (COGESAF, 2011) :** Cette carte détaille la division du bassin versant en divers sous-bassins versants de la rivière Magog. Elle précise aussi la typologie des milieux humides rencontrés, tels que les marécages arborés et les tourbières, mais aussi les zones à risque d'inondation naturelle.

En outre, quelques zones inondables figurent également sur le territoire (COGESAF, 2011). En ce qui a trait au climat, le bassin versant a un climat tempéré et humide avec des caractéristiques distinctives (tableau 1).

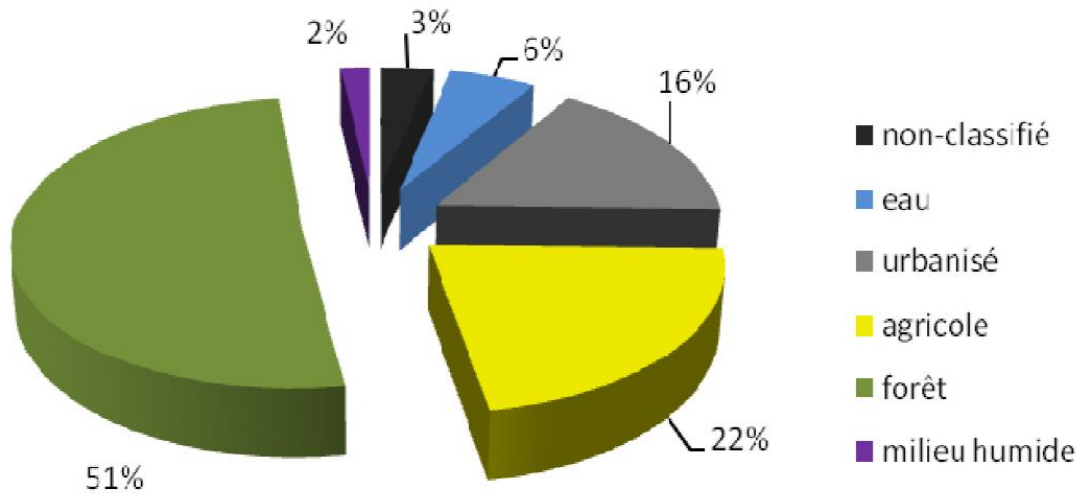
Paramètres	Données
Précipitations annuelles	1 026 à 1 059 mm
Températures moyennes annuelles	1,1 à 4,6°C
Croissance de végétation annuelle	162 à 202 jours
Période de gel	À compter du 5-13 décembre
Période de dégel	À compter du 31 mars – 10 avril

*Tableau 1 - Caractéristiques climatiques du bassin de la rivière Magog (COGESAF, 2011) : Ce tableau dresse le portrait climatique historique du secteur, fournissant des données essentielles pour évaluer une analyse du risque climatique.*

C'est pourquoi de la végétation tempérée nordique peuple la zone. À noter qu'il y a de la végétation aquatique à statut particulier sur le territoire au même titre que des espèces aquatiques envahissantes, dont l'élodée du Canada. Pour la faune, quelques espèces sont à enjeux, dont la tortue des bois ou des espèces envahissantes, telle que la moule zébrée (COGESAF, 2011).

### 1.3 Activités humaines

Concernant l'aspect anthropique, le bassin hydrographique traverse les villes de Sherbrooke et Magog, composée respectivement de 181 000 (Ville de Sherbrooke, s. d.) et 28 312 personnes (Statistique Canada, 2025), ainsi que la municipalité de Sainte-Catherine-de-Hatley. Le bassin est constitué d'une plage publique au parc de la plage municipale du secteur Deauville à Sherbrooke. Le lac Magog comprend également une descente à bateaux publique et trois descentes privées ainsi qu'une station de lavage (Action lac Magog, s. d.). Au niveau des installations hydrographiques, il y a un barrage de présent sur la rivière Magog proche de Sherbrooke, ce qui crée le lac des Nations : un important pôle récréotouristique (COGESAF, 2011). À propos de l'utilisation des sols dans le bassin versant, trois secteurs s'imposent : forestier, agricole et urbain (figure 3).



*Figure 3 - Représentation graphique de l'usage des sols du territoire (COGESAF, 2011) : Ce graphique illustre la répartition de l'occupation du sol au sein du bassin versant, mettant en évidence la prédominance des massifs forestiers (51 %) et l'importance relative des zones agricoles (22 %) et urbanisées (16 %).*

En parallèle, d'autres activités sont aussi à mentionner, comme les industries présentes sur le territoire, mais surtout le récréotourisme permis par les points d'eau et les nombreuses activités de la région (COGESAF, 2011; Tourisme Memphremagog, s. d.).

En résumé, la zone étudiée est une zone dynamique avec des activités humaines variées et elle regorge d'écosystèmes. Ainsi, cet ensemble dépend d'une bonne qualité de l'eau du territoire. C'est pourquoi la question climatique a besoin d'être abordée afin de conserver l'attractivité de ce territoire sur tous les aspects. Pour cela une approche méthodologique ciblée permet d'évaluer les futures menaces sur le bassin versant de la rivière Magog. Le cadre conceptuel présenté plus bas servira de levier pour de prochaines stratégies d'adaptation concrètes.

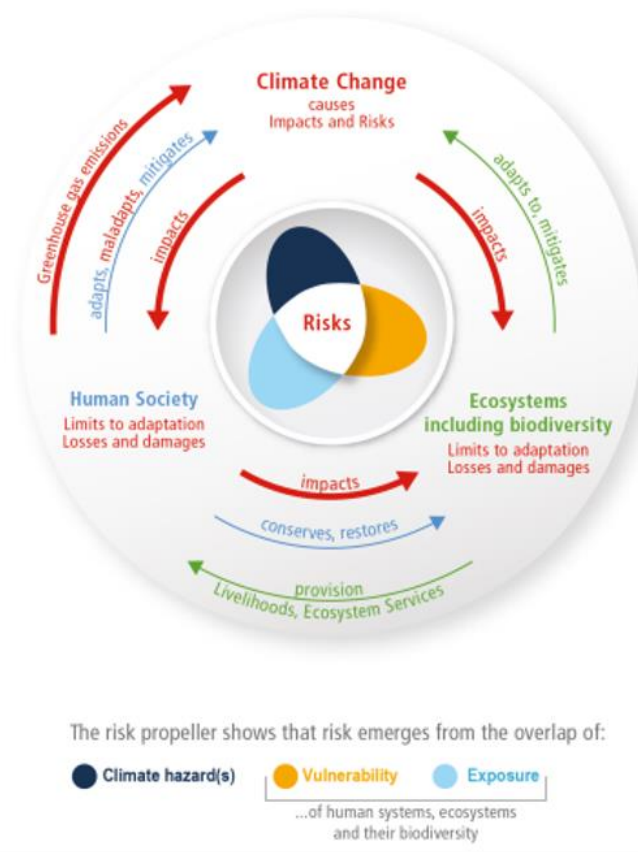
## 2 APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

### 2.1 Cadre conceptuel

Le cadre conceptuel est l'ensemble structuré des concepts, théories et relations qui servent de fondement à une recherche et orientent la compréhension du phénomène étudié. Il est essentiel dans une approche méthodologique, car il guide la formulation des hypothèses, le choix des méthodes et l'interprétation des résultats, en assurant la cohérence et la rigueur scientifique de l'analyse.

### 2.1.1 Risque climatique

Tout d'abord, il s'agit de comprendre l'importance de l'adaptation aux changements climatiques. En effet, celle-ci s'impose comme une nécessité stratégique visant à ajuster les systèmes socioécologiques aux perturbations inévitables, afin d'anticiper les impacts plutôt que de simplement les subir. À partir de cette notion, le cadre conceptuel du risque climatique apparaît. Le risque climatique désigne la possibilité de conséquences négatives du changement climatique sur les sociétés humaines et les écosystèmes. Il résulte des interactions entre les aléas climatiques, l'exposition et la vulnérabilité des systèmes concernés, et peut aussi provenir des réponses humaines au changement climatique (IPCC, 2022a). De ce fait, le cadre du risque climatique est composé de plusieurs concepts dont il est essentiel de saisir la signification et les relations pour s'adapter aux changements climatiques (figure 4)(IPCC, 2022b).



**Figure 4 - Le risque climatique (IPCC, 2022b) :** « La société humaine est responsable du changement climatique. Le changement climatique, à travers les aléas, l'exposition et la vulnérabilité, génère des impacts et des risques qui peuvent dépasser les limites d'adaptation et entraîner des pertes et des dommages. La société humaine peut s'adapter, mal s'adapter et atténuer le changement climatique, tandis que les écosystèmes peuvent s'adapter et atténuer dans certaines limites. Les écosystèmes et leur

*biodiversité fournissent des moyens de subsistance et des services écosystémiques. La société humaine a un impact sur les écosystèmes et peut les restaurer et les conserver. » (IPCC, 2022b)*

## **2.1.2 Aléa climatique et exposition**

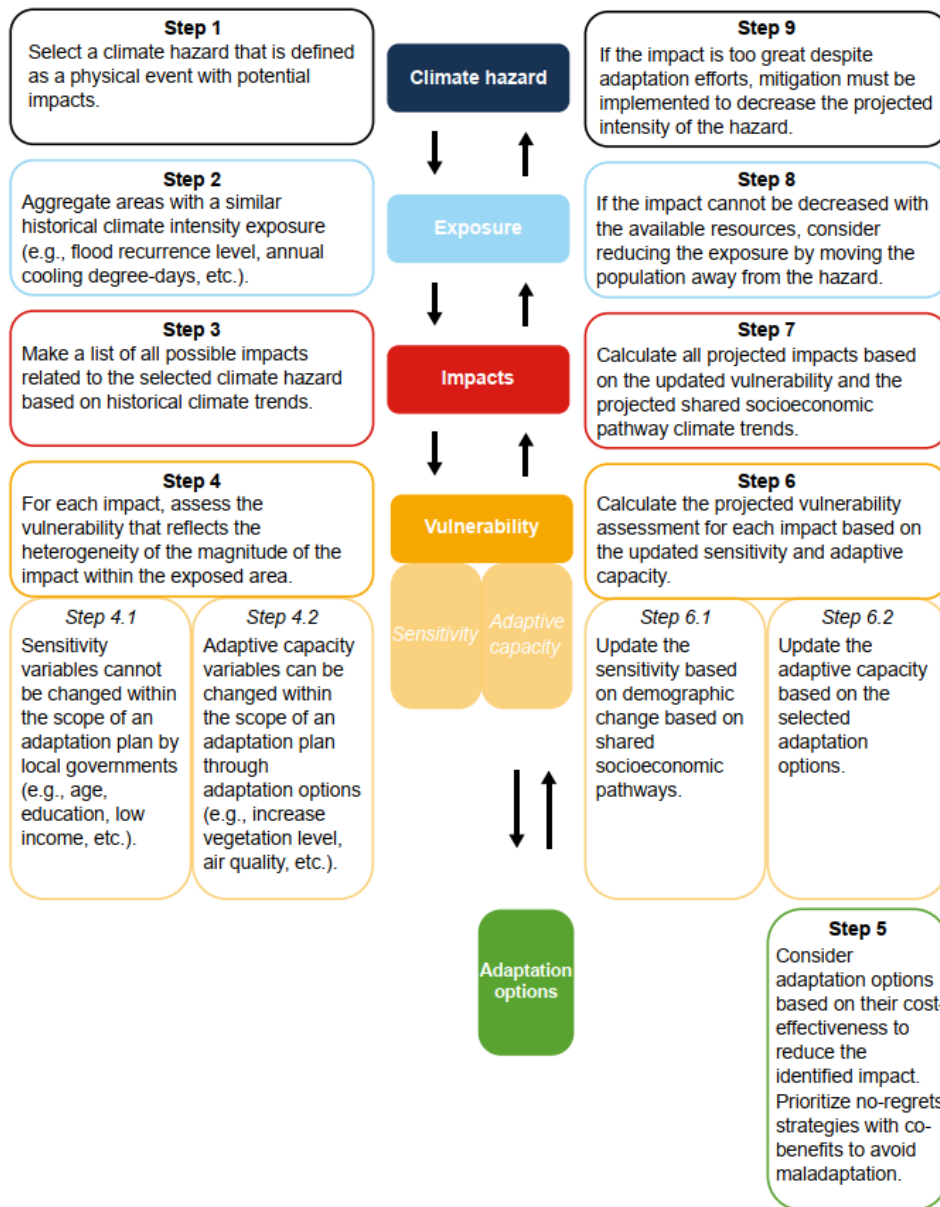
Comme premier concept dans ce cadre, il y a les aléas climatiques (*climate hazards*), qui désignent des phénomènes susceptibles de provoquer des dommages aux personnes, aux biens ou aux écosystèmes (IPCC, 2022a). Par exemple au Québec, les aléas climatiques peuvent inclure les inondations, les précipitations extrêmes ou encore les températures extrêmes (Gouvernement du Québec, s. d.). Ensuite prend place le concept d'exposition (*exposure*). Il évoque la présence de personnes, d'activités, d'infrastructures ou d'écosystèmes dans des lieux susceptibles d'être touchés par un aléa climatique (IPCC, 2022a). Ainsi, l'exposition a un lien étroit avec les aléas climatiques.

## **2.1.3 Vulnérabilité climatique**

Enfin, on retrouve la notion de vulnérabilité (*vulnerability*). Elle représente la propension ou la prédisposition à subir des effets négatifs (IPCC, 2022a). Celle-ci englobe deux paramètres à considérer pour de l'adaptation : la sensibilité et la capacité d'adaptation. Le premier évoque ce qui ne peut être modifié, comme l'âge. Le second indique les changements pouvant être mis en œuvre localement et à court terme, tel que le verdissement d'un quartier (Côté et al., 2023).

## **2.1.4 Prise de décision**

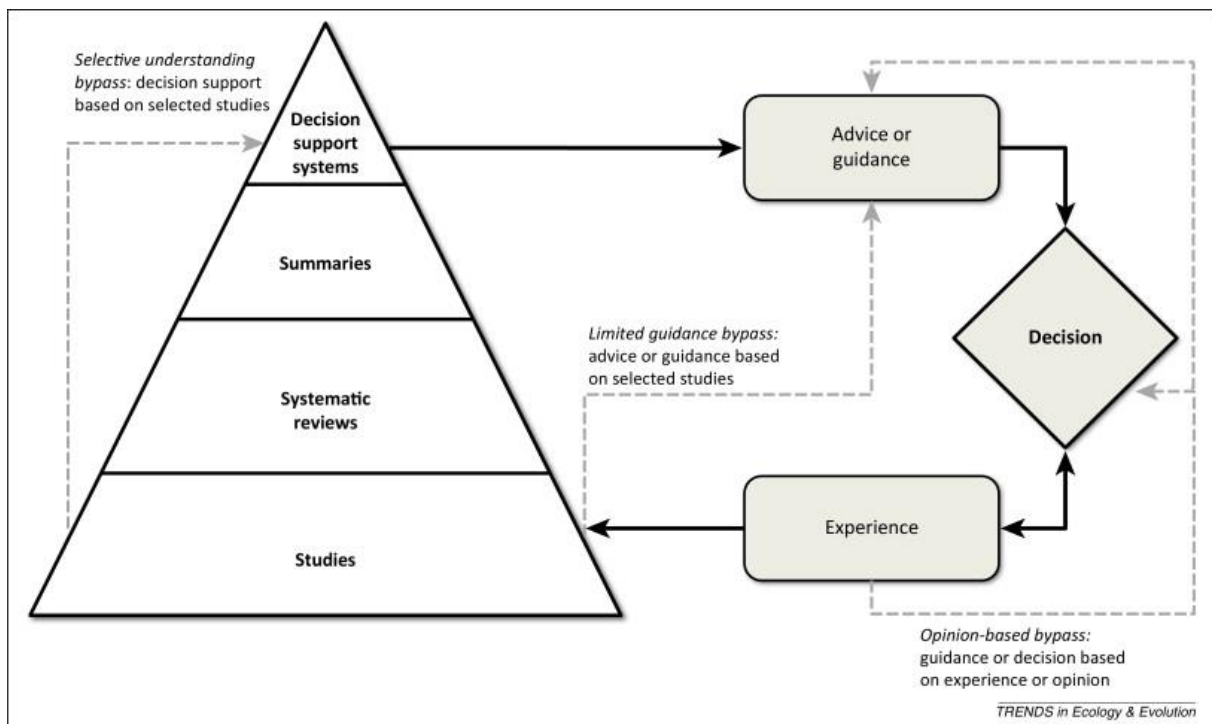
Ainsi, l'ensemble de ces notions s'intègre dans un cadre conceptuel du risque qui aide à la prise de décision (figure 5). En effet, le cadre choisit pour cette analyse, reprend chaque concept et implique une évaluation du risque étape par étape. Par exemple, l'étape 3 du cadre sert à dresser une liste des impacts sur le lac et la rivière Magog, donc les conséquences amenées par les aléas (étape 1) et l'exposition (étape 2). En somme, la réalisation des étapes de ce cadre offre la manipulation de chaque concept. Le tout mène à considérer les options d'adaptations envisageables les plus appropriées à la situation évaluée (Côté et al., 2023). Autrement dit, l'utilisation de cette méthode permet de trouver des stratégies et mesures possibles pour s'adapter aux changements climatiques. En conclusion, les options d'adaptations suivant ce cadre conceptuel rigoureux octroient des solutions réellement adaptées à la zone étudiée.



**Figure 5- Cadre conceptuel du risque aux changements climatiques (Côté et al., 2023) :** Ce cadre conceptuel propose une démarche en plusieurs étapes pour analyser les risques climatiques. Il part de l'identification d'un aléa climatique, puis caractérise l'exposition des territoires et les impacts potentiels à partir des tendances passées et futures. La vulnérabilité est ensuite évaluée en tenant compte à la fois de la sensibilité des populations et de leur capacité d'adaptation. Sur cette base, des options d'adaptation sont envisagées et priorisées selon leur efficacité et leurs cobénéfices. Enfin, si les impacts restent trop importants malgré l'adaptation, des mesures de mitigation sont recommandées pour réduire l'intensité de l'aléa ou l'exposition des populations.

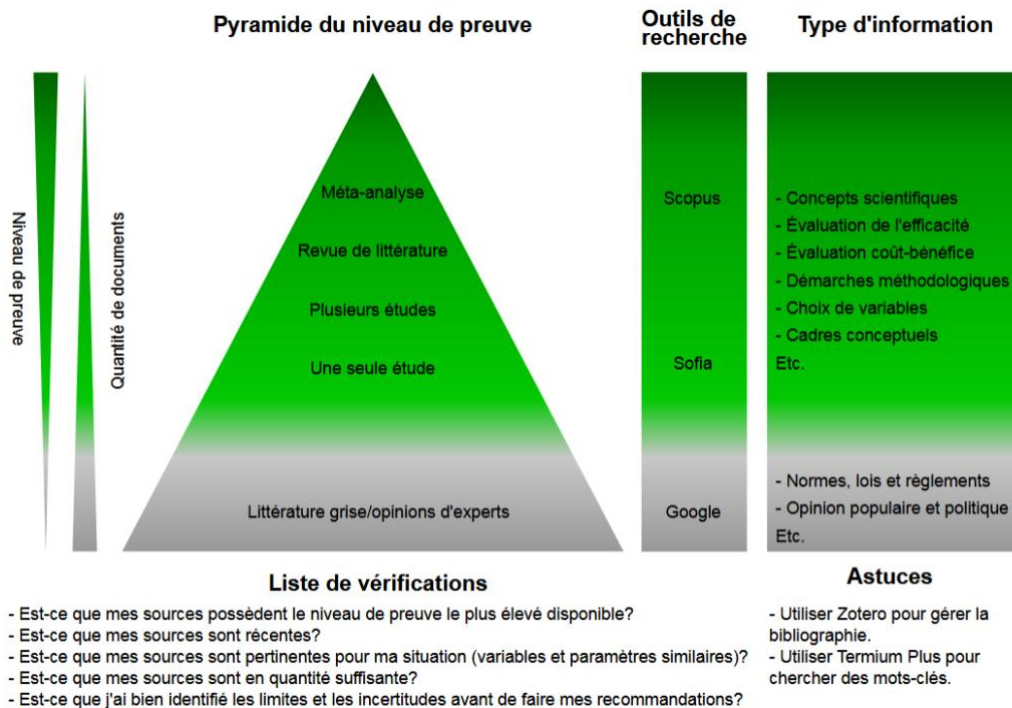
## 2.2 Veille bibliographique

Dans le but de recenser de l'information de qualité pour ce présent rapport, une veille bibliographique rigoureuse a été réalisée. Celle-ci s'appuie sur le modèle pyramidal « 4S », lesquels permet une catégorisation systématique des données scientifiques pour l'aide à la décision (figure 6)(Dicks et al., 2014). En privilégiant les synthèses et les protocoles de support aux études isolées, cette méthodologie assure une réduction des biais de sélection et une meilleure intelligibilité des preuves empiriques nécessaires à la gestion des enjeux environnementaux.



**Figure 6 – Schéma de la structure 4S** (Dicks et al., 2014) : Le schéma illustre la structure hiérarchique « 4S » conçue pour optimiser l'intégration des preuves scientifiques dans la gestion environnementale. À la base, les Études individuelles représentent une masse de données brutes souvent difficilement exploitables isolément ; celles-ci sont filtrées et consolidées par les Revues systématiques pour en extraire une synthèse rigoureuse. Le niveau supérieur, les Résumés, transforme ces synthèses en recommandations accessibles, tandis qu'au sommet, les Systèmes de support à la décision intègrent ces connaissances directement dans des outils opérationnels pour les praticiens. L'objectif central de cette pyramide est de contrer les « court-circuits » habituels, comme l'usage exclusif d'opinions d'experts ou de données sélectives en proposant un flux d'information structuré, transparent et scientifiquement validé.

En d'autres termes, la structure de cette veille bibliographique s'est basée sur cette structure afin de réaliser une recherche pertinente (figure 7)



**Figure 7 – Schéma de recherche d'information** (Côté, 2026) : Le premier niveau de preuve, c'est-à-dire le plus faible, concerne la littérature grise et les opinions d'experts. Ainsi, tout ce qui ne repose pas sur une méthodologie scientifique, figure en bas de la pyramide (partie grise). Les niveaux du dessus font référence à la littérature scientifique. Celle-ci atteint le plus haut niveau de preuve lorsque les études sont des méta-analyses, donc des analyses qui regroupent d'autres études.

### 2.2.1 Littérature grise

Dans un premier temps, ce sont différents documents s'apparentant à de la littérature grise qui ont été consultés. Parmi les rapports utilisés pour ce travail, on peut mentionner ceux fournis par l'association Action Lac Magog à l'exemple de *l'Analyse du bassin versant de la rivière Magog* faite par le COGESAF.

### 2.2.2 Littérature scientifique

Dans un second temps, la partie la plus conséquente du travail a reposé sur de la recherche au sein de la littérature scientifique. Pour cela, différentes plateformes qui regroupent les articles scientifiques internationaux ont été employées, telles que Scopus. Afin d'effectuer une analyse pertinente, des mots clés ont été définis :

Climate change ; river ; lake ; biodiversity ; ecosystem ; water quality ; hazard ; risk ; impacts ; canadian ; tourism ; leisure activity ; recreation ; aquatic ; tourist.

Ces mots ont aidé à repérer les articles scientifiques en lien avec le présent sujet. Ensuite, la sélection des articles s'est basée sur plusieurs critères, notamment la date de parution de l'article (environ 10 ans maximum) et la popularité de l'article dans la communauté scientifique.

Enfin, différentes hypothèses ont été formulées pour mieux orienter la recherche :

- 1) Les changements climatiques impactent les écosystèmes présents dans les lacs, ce qui vient perturber la qualité de l'eau et impactent ainsi les activités récréotouristiques
- 2) Les aléas climatiques, tels que les vagues de chaleur induisent plus de tourisme sur et dans les zones aquatiques et donc plus de pression sur la biodiversité qui y est présente ainsi que sur la qualité de l'eau
- 3) Les changements climatiques participent à l'eutrophisation des écosystèmes aquatiques à cause de la propagation de nutriments liés aux activités humaines autour, comme l'agriculture

Ces hypothèses servent seulement à débiter la recherche. C'est pourquoi elles ne seront plus abordées pour la suite de ce rapport. Ainsi; elles ne seront ni confirmées ni réfutées.

À partir des éléments trouvés dans la littérature, de premiers constats ressortent sur les impacts des changements climatiques pour la rivière et le lac Magog.

Grâce aux explications sur le cadre conceptuel des risques climatiques, il est alors possible d'analyser le risque climatique pour la rivière et le lac Magog, en particulier sur la qualité de l'eau. Pour cela, les études scientifiques apportent de premiers éléments de réponses. À l'échelle mondiale, les changements climatiques induiraient différents aléas et impacts sur les lacs (Jiang et al., 2024; Woolway et al., 2022) et les rivières (Xia et al., 2014).

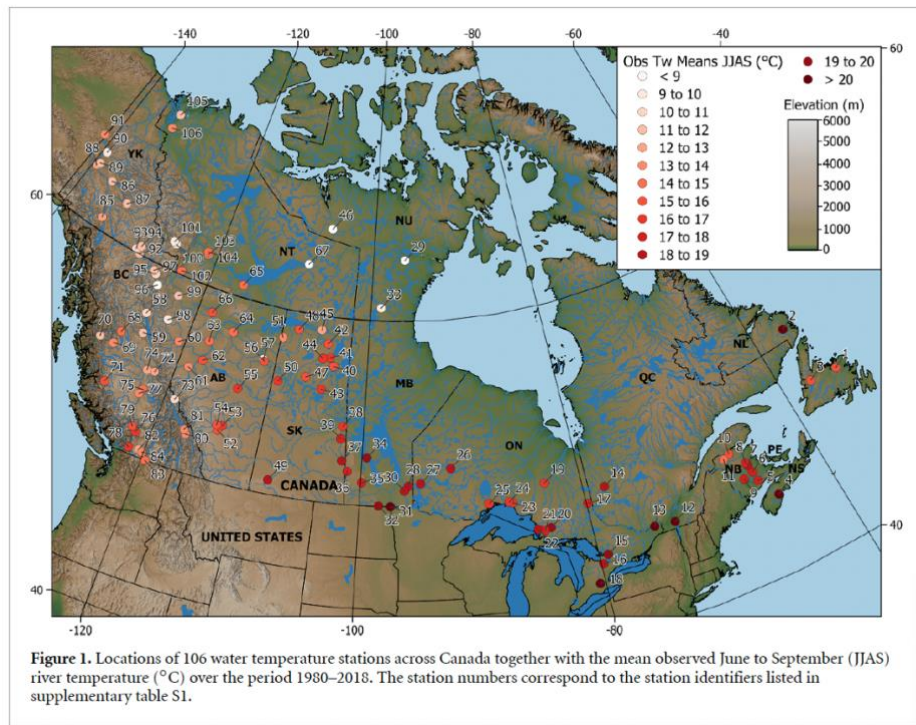
### **3 LES ALÉAS CLIMATIQUES**

Dans ce cadre, l'analyse des aléas climatiques permet d'identifier les phénomènes susceptibles d'influencer les écosystèmes aquatiques et la qualité de l'eau du lac et de la rivière Magog. La littérature met particulièrement en évidence quatre phénomènes majeurs.

#### **3.1 Réchauffement de l'eau et réduction de la couverture de glace**

Pour commencer, le réchauffement de l'eau constitue l'un des aléas climatiques les plus documentés dans la littérature concernant les écosystèmes aquatiques (Jiang et al., 2024; Woolway et al., 2022). Dans le cas des lacs, ce phénomène est généralement mesuré à partir de la température de surface de l'eau (Xia et al., 2014). Pour les rivières, les études s'appuient plutôt sur l'analyse des températures moyennes estivales ou encore sur l'atteinte de seuils thermiques critiques (18 °C - 20 °C) pour certaines espèces aquatiques (R. Shrestha et al., 2024). D'après les modèles, une hausse de 2 °C de la température de l'air peut augmenter la température de l'eau de 0,5 à 1,5 °C en raison des échanges thermiques entre l'atmosphère et les masses d'eau (R. Shrestha et al., 2024). De plus, certains événements climatiques

extrêmes, comme les épisodes de sécheresses, peuvent aussi accentuer ce phénomène en réduisant les débits et la circulation de l'eau (Graham et al., 2024). Ainsi, l'augmentation généralisée de la température des rivières est déjà observée au Canada entre 1980 et 2018, particulièrement dans l'est du pays (figure 8)(R. Shrestha et al., 2024). En somme, ces « vagues de chaleur lacustre » (Guilbert et al., 2014) tendraient à la dégradation de la qualité de l'eau (Kim et al., 2025).



**Figure 8 – Carte représentant la température estivale des stations en rivière étudiées (R. Shrestha et al., 2024) :** Cette carte présente les températures moyennes des rivières canadiennes de juin à septembre (1980-2018), révélant un gradient thermique marqué où les eaux se réchauffent. Les rivières du sud du Canada semblent le plus exposées aux températures élevées.

Pour continuer, la réduction de la couverture de glace constitue un second phénomène étroitement lié aux changements climatiques (Jeppesen et al., 2014; Woolway et al., 2022). De plus, la réduction de la durée de glace contribue à accentuer le réchauffement des masses d'eau, car une surface libre de glace est exposée plus longtemps au rayonnement solaire. Ce phénomène est souvent analysé à partir d'indicateurs (figure 9), tels que la date de formation de la glace (Imrit & Sharma, 2021). L'augmentation de la température de l'air modifie ces dynamiques saisonnières de glace. Des automnes plus chauds retardent la formation de la glace, tandis que des printemps plus précoces accélèrent sa fonte. Dans certaines régions d'Amérique du Nord, la formation de la glace se produirait à peu près 11 jours plus tard et la débâcle approximativement neuf jours plus tôt. Cela entraînerait une diminution globale d'environ 19 jours de la durée de glace (Hébert et al., 2021; Imrit & Sharma, 2021). Ainsi, à l'échelle

de l'hémisphère nord, ces évolutions se traduisent par une diminution graduelle de la couverture de glace, certains lacs connaîtraient même des hivers sans formation complète de glace (Imrit & Sharma, 2021).

Critères	Constats
Date de formation de la glace (ice-on)	Retardée d'environ 11 jours par siècle.
Date de la fonte de la glace (ice-off)	Arrive environ 9 jours plus tôt par siècle.
Durée totale de la couverture de glace	Diminue d'environ 19 jours par siècle.

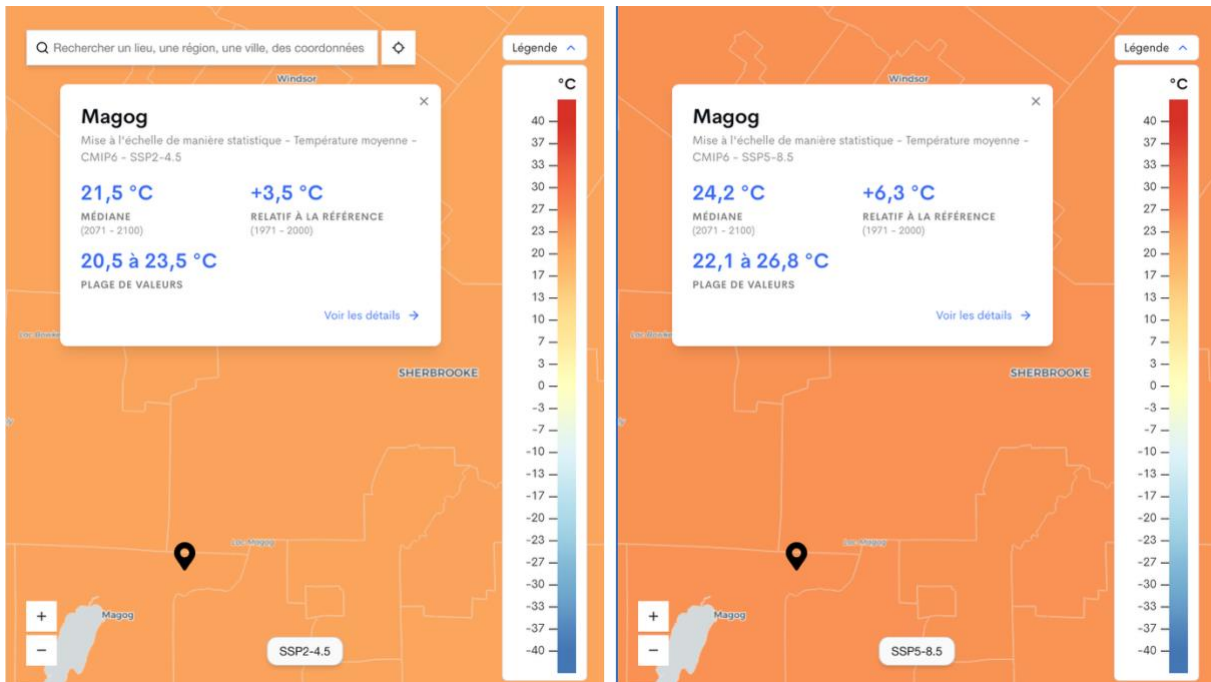
**Figure 9 - Critères pour l'évaluation de la réduction de la couverture de glace (Imrit & Sharma, 2021) :** Le tableau présente trois indicateurs de la phénologie de la glace — la date de formation (ice-on), la date de fonte (ice-off) et la durée de couverture — qui permettent de suivre l'évolution du régime de glace des lacs. L'ensemble de ces indicateurs met en évidence un raccourcissement progressif de la saison de glace, caractérisé par une formation plus tardive et une fonte plus précoce.

Afin d'anticiper la future progression de ces phénomènes, la littérature scientifique mobilise des projections climatiques basées sur les scénarios socio-économiques partagés (SSP). Ils combinent différentes trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre et hypothèses d'évolution socio-économique (Données Climatiques, s. d.). Ces scénarios permettent d'explorer plusieurs trajectoires plausibles de réchauffement et d'évaluer leurs impacts potentiels sur les ressources en eau et les systèmes hydrologiques (Gombault et al., 2015). Ils constituent également un outil central pour soutenir la planification de l'adaptation aux changements climatiques (Côté et al., 2024; Soltani et al., 2024a). Dans le cadre de l'analyse sur le lac et la rivière Magog, deux scénarios contrastés sont retenus afin d'encadrer l'incertitude associée aux évolutions climatiques futures. Le scénario SSP2-4.5, correspond à une trajectoire intermédiaire compatible avec la poursuite des politiques climatiques actuelles. Le scénario SSP5-8.5, représente une trajectoire de fortes émissions associée à une dépendance accrue aux combustibles fossiles (figure 10)(Côté et al., 2024).

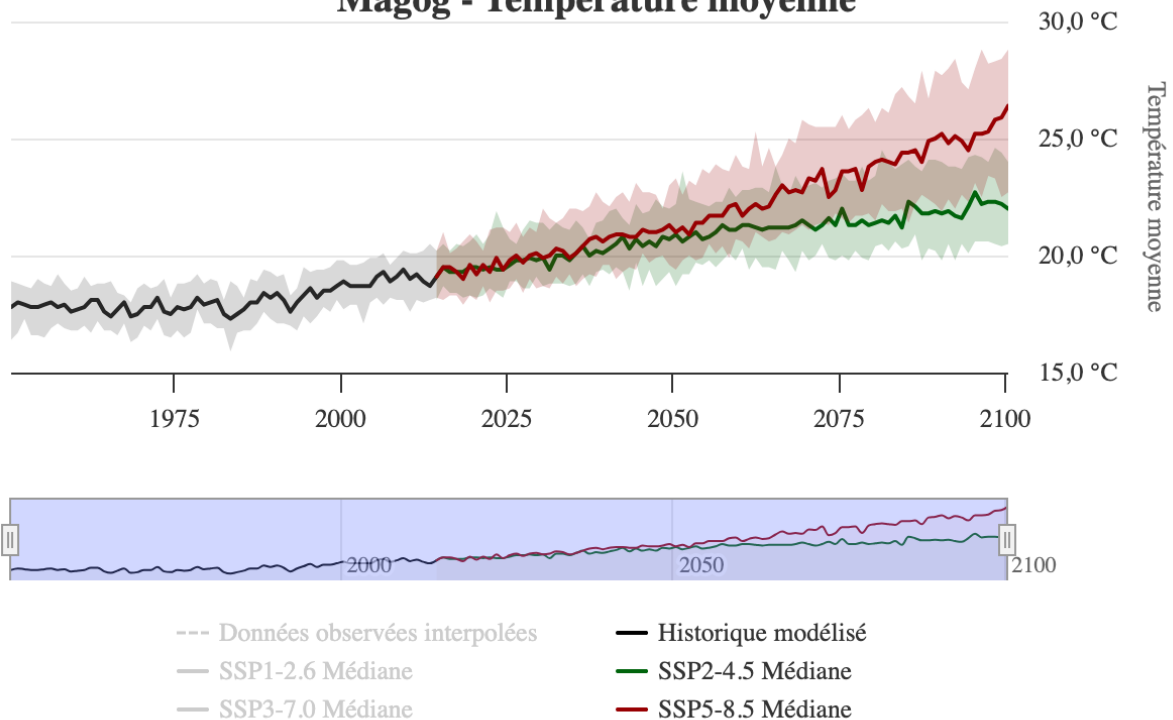


**Figure 10 - Les cinq trajectoires de scénarios basés sur les ssp utilisés dans les modèles cmip6 et des défis plus ou moins élevés qui leur sont associés en ce qui concerne la mise en œuvre de stratégies d'atténuation ou d'adaptation (Données Climatiques, s. d.) :** Cette figure présente les cinq trajectoires socioéconomiques partagées (SSP1 à SSP5), utilisées dans les modèles climatiques CMIP6 comme cadre de scénarisation. Elle met en relation ces scénarios avec deux indicateurs clés, soit les défis liés à l'atténuation et ceux liés à l'adaptation, montrant que selon la trajectoire choisie, les niveaux de difficulté pour répondre aux changements climatiques varient significativement.

Les tendances historiques confirment que le réchauffement de l'eau et la réduction de la couverture de glace sont déjà observés à l'échelle mondiale. Entre 1985 et 2009, la température moyenne des lacs aurait augmenté d'environ 0,34 °C par décennie (Woolway et al., 2022), tandis que la durée de la couverture de glace diminuerait progressivement depuis le XIX<sup>e</sup> siècle (Imrit & Sharma, 2021). Cette diminution attendrait en moyenne 31 jours de glace pour les lacs de l'hémisphère nord (Woolway et al., 2022). Au Canada, les observations hydrologiques montrent aussi une réduction de la durée de glace depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle. Les dates de débâcle y sont avancées de 1 à 2,2 jours par décennie dans plusieurs bassins versants (DeBeer et al., 2016). Sur cette base, les projections climatiques indiquent une évolution cohérente entre la hausse de la température moyenne estivale et la diminution du nombre de cycles de gel et de dégel dans la région de Magog. Selon ces projections, la température moyenne estivale à Magog pourrait augmenter d'environ 3,9 °C dans le scénario SSP2-4.5 et jusqu'à 6,4 °C dans le scénario SSP5-8.5 d'ici la fin du siècle par rapport à la période de référence 1971-2000 (figure 11).



### Magog - Température moyenne

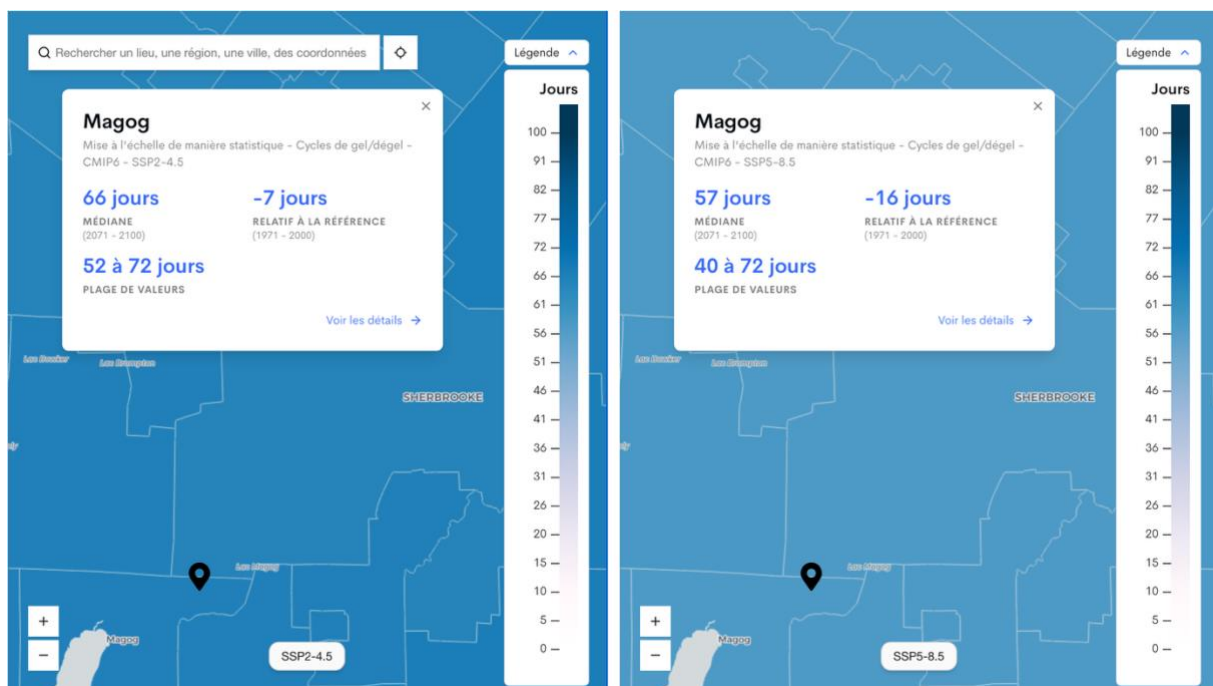


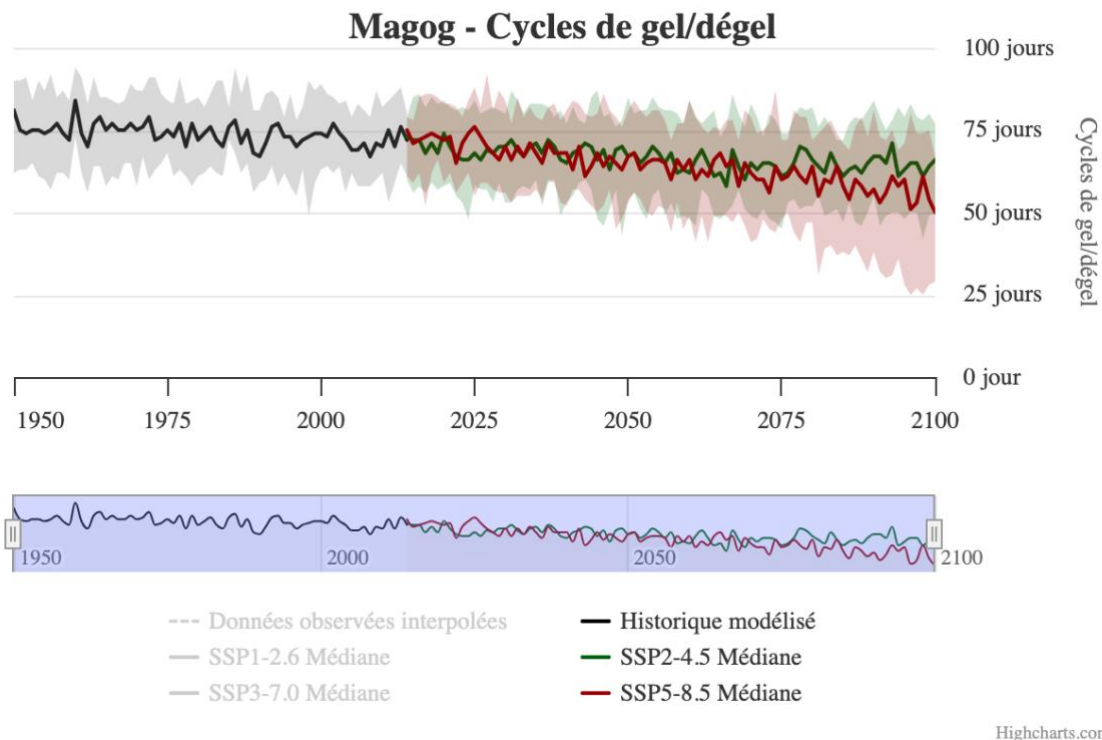
Highcharts.com

**Figure 11 - Représentation graphique des tendances historiques et projections climatiques pour l'augmentation de la température moyenne (DonneesClimatiques.ca, s. d.) :** Cette figure présente un indicateur clé du changement climatique, soit l'évolution de la température moyenne à Magog, en combinant les données historiques modélisées et les projections futures selon différents scénarios SSP.

*Elle met en évidence une tendance marquée à la hausse des températures, plus prononcée sous le scénario à fortes émissions (SSP5-8.5), illustrant l'influence des trajectoires d'émissions sur l'intensité du réchauffement.*

Parallèlement, le nombre médian de cycles de gel et de dégel pourrait passer de 73 jours à 66 jours dans le scénario SSP2-4.5 et jusqu'à 57 jours dans le scénario SSP5-8.5 (figure 12). Ces évolutions traduisent un réchauffement progressif du climat régional susceptible de modifier les conditions thermiques et saisonnières qui structurent le fonctionnement du lac et de la rivière Magog, et d'influencer ainsi la qualité de leurs eaux.





**Figure 12 - Représentation graphique des tendances historiques et projections climatiques pour les cycles de gel / dégel (DonnéesClimatiques.ca, s. d.) :** Cette figure montre une tendance à la baisse du nombre de cycles de gel/dégel à Magog, tant dans les données historiques que dans les projections futures. On observe que cette diminution s'accroît au cours du siècle, avec des valeurs nettement plus faibles sous les scénarios à fortes émissions, ce qui reflète des hivers plus doux et moins propices aux variations autour du point de congélation.

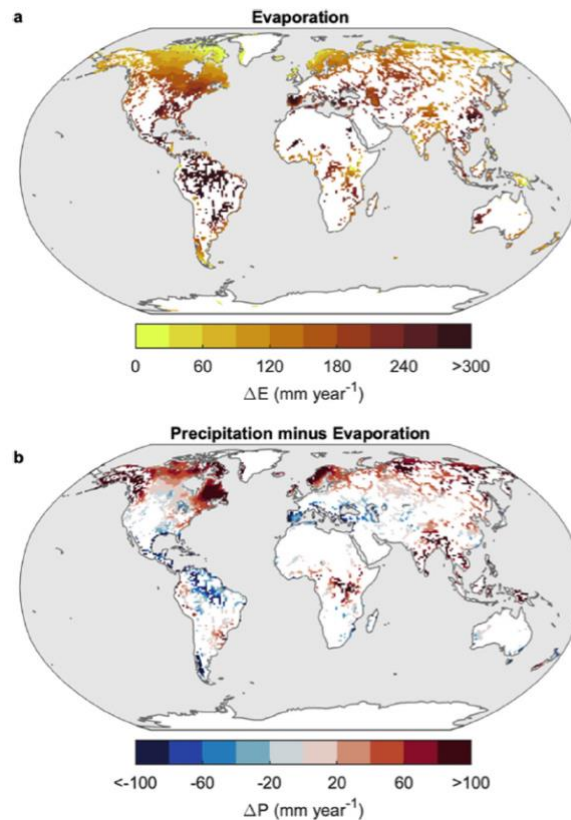
### 3.2 Précipitations intenses et épisode de sécheresse

La littérature scientifique identifie aussi deux autres aléas climatiques susceptibles d'influencer les systèmes aquatiques. En premier, il y a les précipitations intenses (Côté, 2021) définies comme des épisodes de pluie forte, souvent courts (5 à 8 jours) mais marqués (Low et al., 2022). Leur observation s'appuie sur des critères mesurables (figure 13) tels que le nombre de jours où les précipitations dépassent 20mm (Côté, 2021). Plusieurs événements météorologiques engendreraient ces régimes de précipitations extrêmes allant jusqu'au sud du Québec, en particulier l'hiver (Low et al., 2022). En effet, la hausse de la température de l'air augmente la capacité de l'atmosphère à contenir de la vapeur d'eau. Lorsque cette vapeur se condense, elle peut produire des épisodes de précipitations plus intenses (Jiang et al., 2024). Par ailleurs, les changements climatiques modifient la circulation atmosphérique et les cycles hydrologiques, ce qui favorise l'augmentation de la fréquence des événements de précipitations extrêmes (R. Shrestha et al., 2024). À noter qu'une partie de ces précipitations tomberaient sous forme de pluie plutôt que de neige durant l'hiver (Boulangier et al., 2023).

Critères				
Précipitation maximale quotidienne	précipitations maximales sur 5 jours	nombre de jours > 10 mm	nombre de jours > 20 mm	débites de crue maximaux.

**Figure 13 - Critères pour l'observation des précipitations intenses (Côté, 2021) :** Cette figure regroupe plusieurs critères utilisés pour caractériser les épisodes de précipitations intenses, en intégrant des indicateurs d'intensité comme les précipitations maximales sur une journée ou sur cinq jours, des indicateurs de fréquence avec le nombre de jours dépassant certains seuils, ainsi que des indicateurs hydrologiques liés aux débits de crue. L'ensemble permet d'obtenir une lecture plus complète des événements de pluie extrême et de leurs impacts sur le territoire

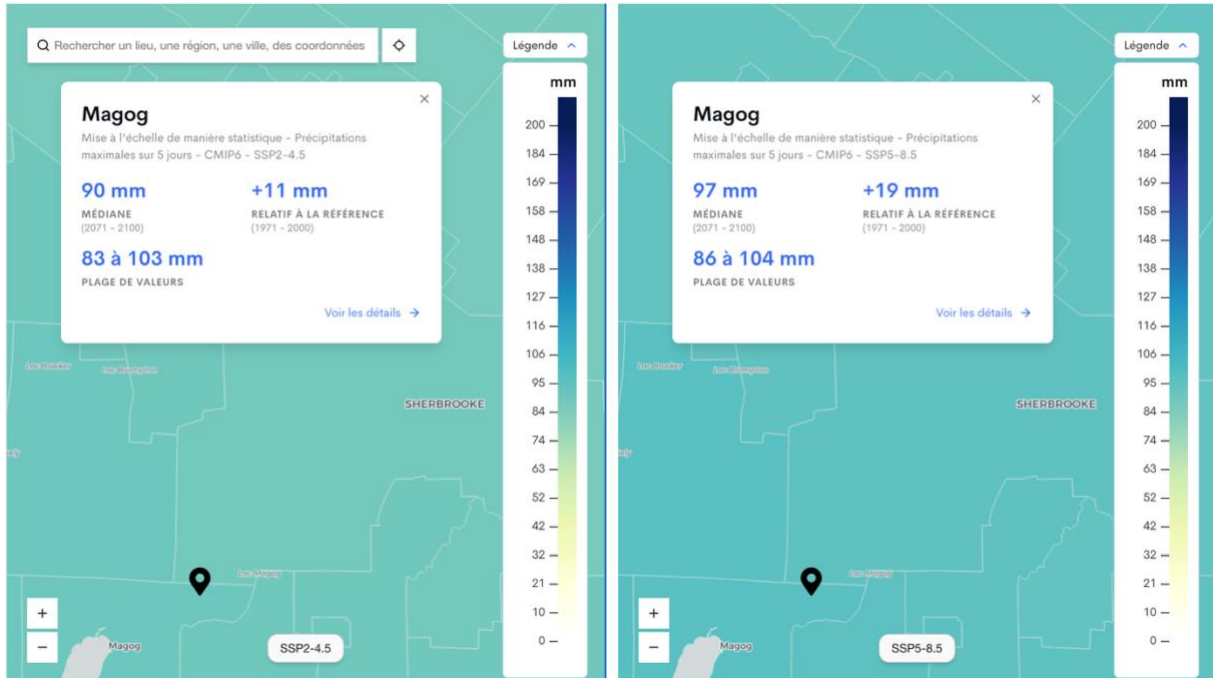
En second phénomène, il y a les épisodes de sécheresse (Graham et al., 2024), définis comme des périodes de faibles apports en eau et de débits anormalement bas (Graham et al., 2024; Woolway et al., 2022). Ces épisodes seraient anticipés et toucheraient en particulier le sud du Canada (Soltani et al., 2024b). Au Québec, les changements climatiques modifient la répartition saisonnière des précipitations, ce qui entraînerait des périodes prolongées sans pluie suivies d'épisodes de précipitations plus intenses (Boulanger et al., 2023; R. Shrestha et al., 2024). En combinaison avec l'augmentation des températures et la fréquence accrue des vagues de chaleur, ces conditions favoriseraient l'évaporation et la diminution de l'humidité des sols. Cela accentuerait ainsi les épisodes de sécheresse (figure 14)(Graham et al., 2024; R. Shrestha et al., 2024). Enfin, les études analysent la sécheresse à travers différents critères, comme le débit inférieur au 10<sup>e</sup> percentile (10 % plus faibles des débits observés)(Graham et al., 2024). Par exemple, l'observation du débit moyen minimal sur 7 jours affirmerait qu'à l'horizon 2050, la rivière Magog aura un débit minimal réduisant de 42 % (Côté, 2021).



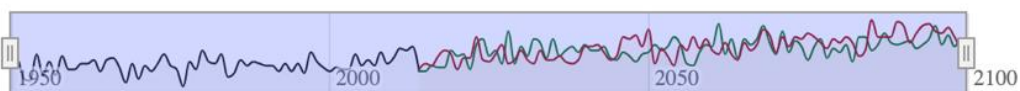
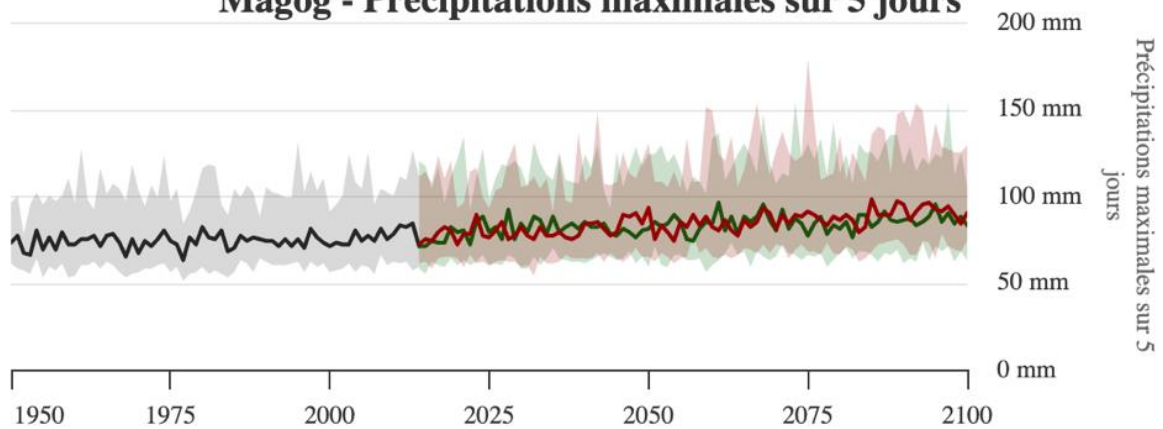
**Figure 14 – Critères pour l’observation des précipitations intenses (Woolway et al., 2022) :** La carte (a) montre la variation de l’évaporation annuelle ( $\Delta E$ ) exprimée en mm/an. Les couleurs jaunes à rouges indiquent une augmentation de l’évaporation, parfois supérieure à 300 mm/an dans certaines régions. Cette hausse est particulièrement marquée dans de nombreuses zones tempérées et continentales, notamment en Amérique du Nord, en Europe et dans certaines régions d’Asie. Cette tendance est directement liée à l’augmentation de la température de l’air, qui intensifie les flux d’évaporation à la surface des plans d’eau. La carte (b) représente la variation du bilan hydrique (précipitations moins évaporation,  $\Delta P$ ). Les zones rouges indiquent un bilan hydrique positif, où les précipitations augmentent davantage que l’évaporation. Les zones bleues indiquent au contraire un bilan hydrique négatif, signifiant que l’évaporation dépasse l’augmentation des précipitations. Dans plusieurs régions du globe, notamment certaines zones tempérées et subtropicales, on observe des zones bleutées, suggérant que les pertes d’eau par évaporation pourraient dépasser les apports par précipitation, ce qui pourrait entraîner une diminution du niveau des lacs ou une concentration accrue des nutriments.

D’après les tendances historiques, les précipitations intenses augmentent sur la zone d’étude avec une hausse du nombre de jours >10 mm et >20 mm à Magog (Côté, 2021). Les projections climatiques viennent confirmer ces changements dans les régimes de précipitations. Le graphique représentant les

précipitations maximales sur 5 jours montre une évolution historique relativement stable jusqu'au début des années 2000, suivie d'une augmentation progressive dans les projections (figure 15). Cela suggère que les épisodes de pluie intense pourraient devenir plus récurrents d'ici la fin du siècle.



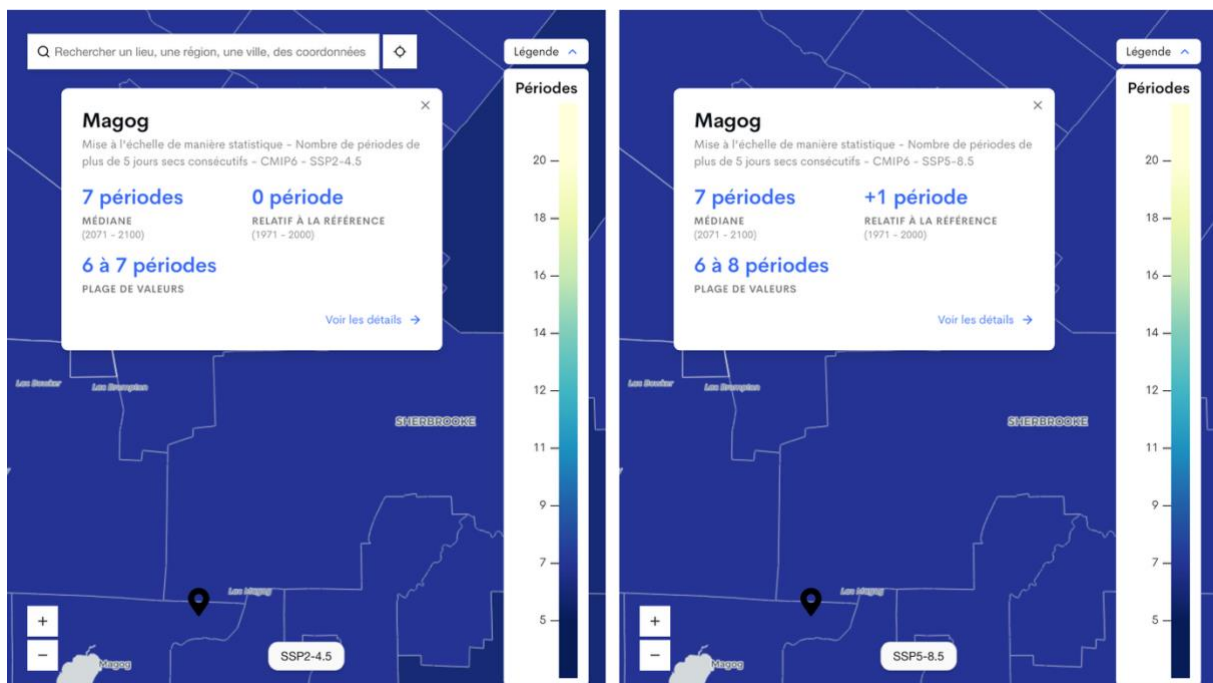
**Magog - Précipitations maximales sur 5 jours**

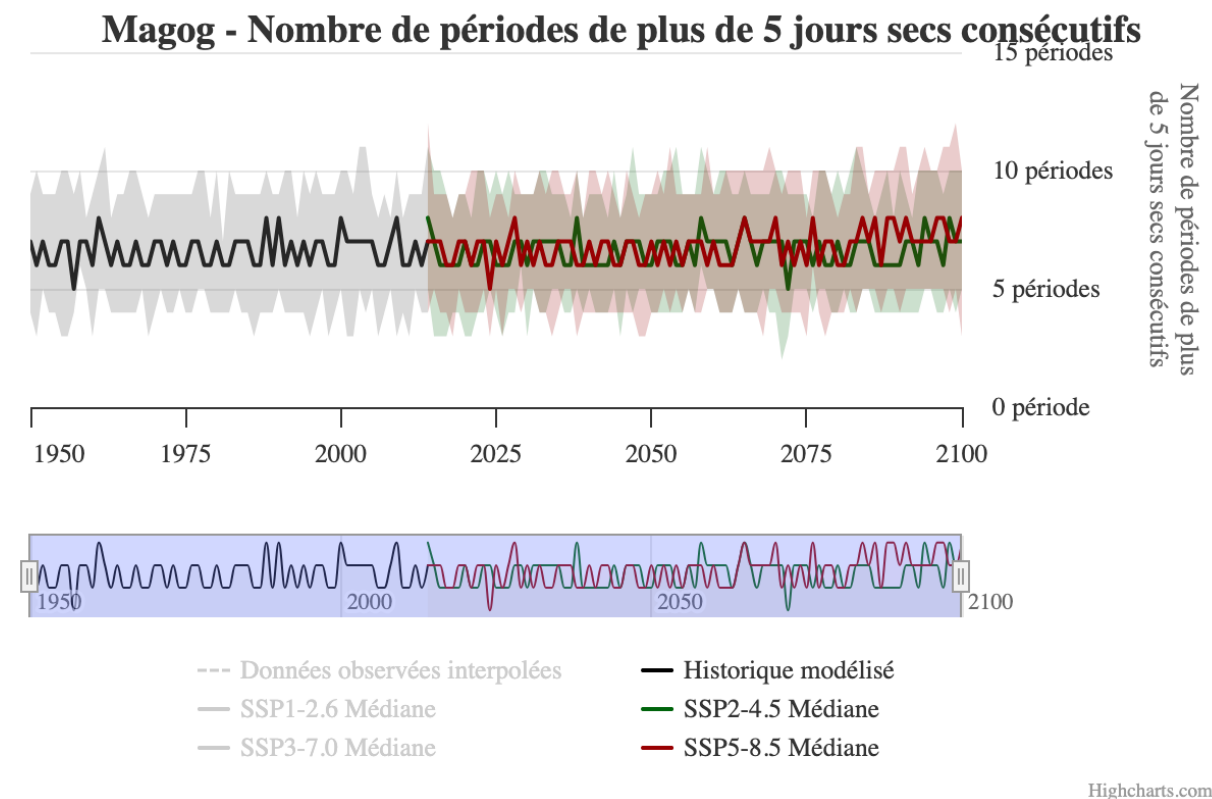


- Données observées interpolées
- Historique modélisé
- SSP1-2.6 Médiane
- SSP2-4.5 Médiane
- SSP3-7.0 Médiane
- SSP5-8.5 Médiane

**Figure 15 – Représentation graphique des tendances historiques et projections climatiques pour les précipitations estivales maximales sur 5 jours (DonnéesClimatiques.ca, s. d.) :** Cette figure met en évidence une tendance à l'augmentation des précipitations maximales sur cinq jours à Magog, en comparant les données historiques aux projections climatiques. Les valeurs projetées montrent une intensification progressive des épisodes de pluie sur de courtes périodes, particulièrement sous les scénarios à fortes émissions, ce qui suggère un risque accru d'événements de précipitations intenses.

Parallèlement, le graphique illustrant le nombre de périodes de plus de cinq jours secs consécutifs à Magog (figure 16), montre une variation majeure dans la période historique. Toutefois, les projections indiquent une légère augmentation du nombre de ces périodes dans certains scénarios climatiques. Ainsi, ces deux indicateurs révèlent une évolution vers un cycle hydrologique plus variable, caractérisé par des épisodes de pluie plus intenses entrecoupés de périodes sèches un peu plus fréquentes. Cette variabilité accrue des précipitations constitue un aléa climatique important, car elle peut accentuer le ruissellement et le transport de nutriments lors des pluies intenses. Tandis que les périodes de sécheresse favoriseraient la concentration des polluants et la diminution des débits des rivières. En somme, les aléas climatiques explicités pourraient modifier les dynamiques physiques et hydrologiques du lac et de la rivière Magog. Cela entraînerait plusieurs impacts sur la qualité de l'eau et les écosystèmes aquatiques.





**Figure 16 – Représentation graphique des tendances historiques et projections climatiques pour les périodes de plus de 5 jours de secs consécutifs (DonneesClimatiques.ca, s. d.) :** Cette figure illustre l'évolution du nombre de périodes de plus de cinq jours secs consécutifs à Magog, en comparant les observations historiques aux projections climatiques. Elle montre une variabilité importante, mais laisse entrevoir une légère augmentation de ces épisodes dans le futur, particulièrement sous les scénarios à fortes émissions, ce qui suggère un risque accru de sécheresses prolongées.

#### 4 LES DIFFÉRENTS IMPACTS

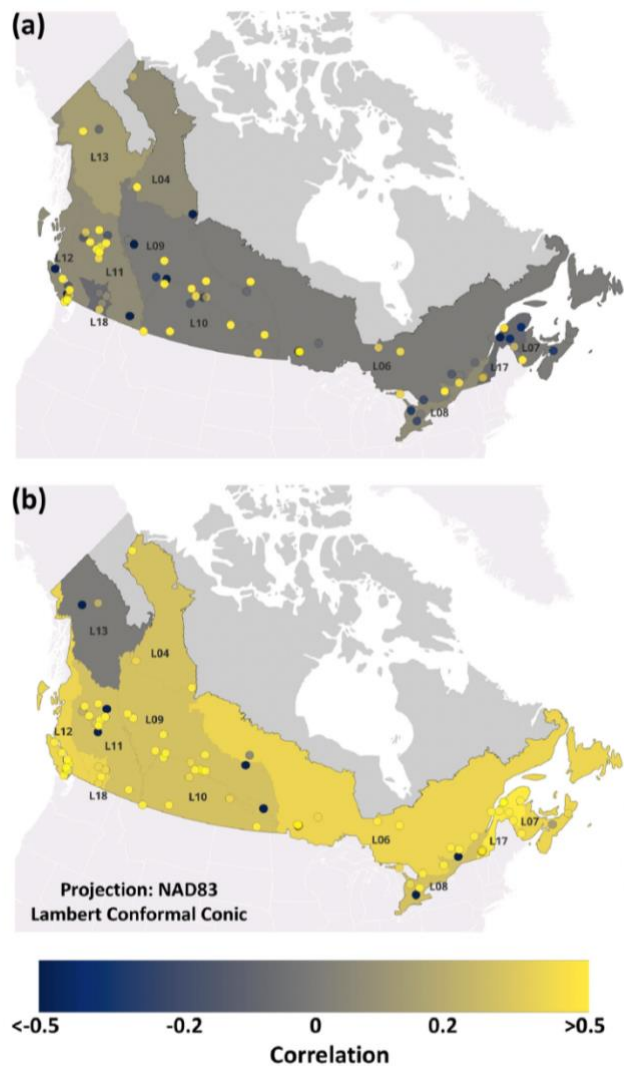
Avant de débiter, mentionner que l'analyse suivante comporte certaines limites est important. Bien que plusieurs études permettent de décrire les mécanismes écologiques associés aux changements climatiques, les données disponibles sur les tendances historiques demeurent encore restreintes pour plusieurs composantes de la biodiversité aquatique. De plus, les projections concernant les impacts écologiques restent peu développées dans la littérature scientifique. Ainsi, les projections utilisées dans cette partie visent généralement sur l'évolution des aléas eux-mêmes, comme la température de l'eau ou la couverture de glace, plutôt que sur la biodiversité directement. Par conséquent, l'analyse présentée pour chacun des impacts étudiés repose en partie sur des inférences à partir des aléas climatiques. Cela

en limite la portée et souligne la nécessité de poursuivre les recherches sur les réponses écologiques des écosystèmes aquatiques face aux changements climatiques.

## **4.1 Accroissement de la végétation algale et des cyanobactéries**

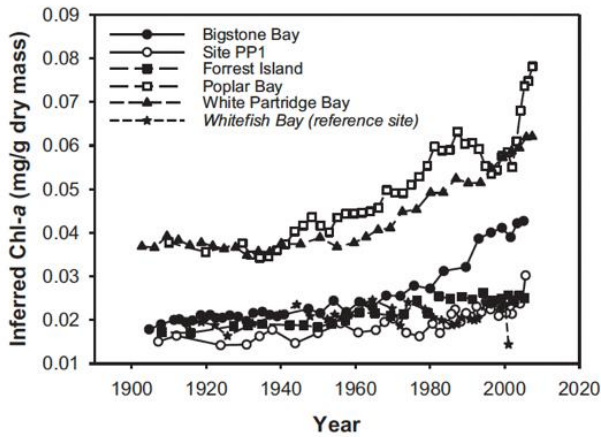
Le premier impact étudié concerne l'accroissement de la végétation algale et des cyanobactéries. C'est que les principaux contrôles de la productivité lacustre sont modifiés à cause du réchauffement de l'eau et de la réduction de la couverture de glace (R. Shrestha et al., 2024; Woolway et al., 2022). Ainsi, ces conditions favorisent une intensification de la production primaire dans les lacs, observable notamment par des variations accrues de chlorophylle, un indicateur de la biomasse photosynthétique (Ghanbari et al., 2025). En outre, l'augmentation précoce de la chlorophylle au printemps suggère un allongement de la saison de croissance des producteurs primaires dans les lacs nordiques (Adams et al., 2022; M. Peterson et al., 2017). Dans ce contexte, la biomasse d'algues tend à croître dans plusieurs plans d'eau, même en profondeur (Jeppesen et al., 2014). Ce phénomène est déjà observé au Canada et dans le sud du Québec (figure 17)(Ghanbari et al., 2025; INSPQ, 2009). À noter que, parmi les espèces favorisées, il y a des aquatiques envahissantes, dont certaines sont exotiques et parviennent maintenant à persister (Woolway et al., 2022).

Fig. 4 | Correlation between chlorophyll and temperature trends across spatial scales and time periods. Correlations between temperature and chlorophyll at the ecozone and individual study lake scales between (a) 1850–1966 CE; and (b) 1966–2014 CE. Warmer colors show greater positive correlations between chlorophyll and temperature trends.

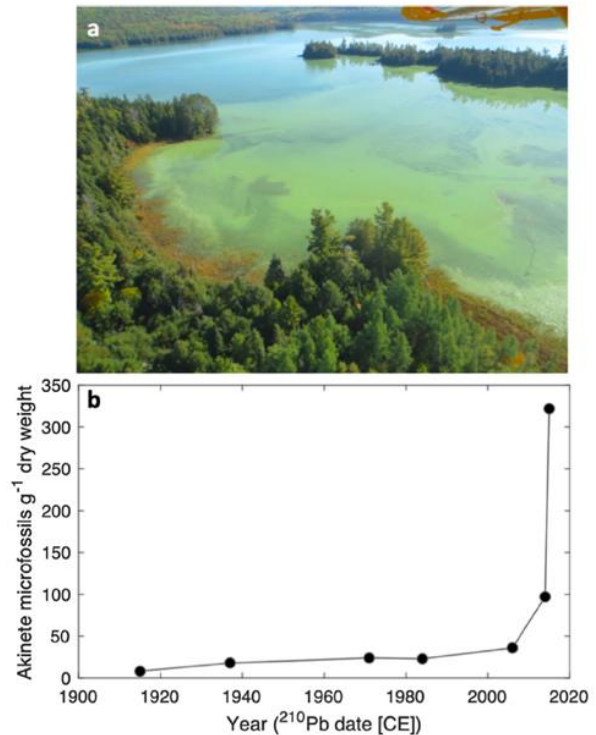


**Figure 17 - Représentation graphique de la corrélation entre la chlorophylle des lacs et la température (Ghanbari et al., 2025) :** Ces cartes illustrent l'évolution de la corrélation entre la température et les niveaux de chlorophylle dans les lacs canadiens, comparant la période historique (1850-1966) à la période récente (1966-2014). On observe un passage global de tons gris/bleus vers le jaune, indiquant que le réchauffement climatique récent exerce désormais une influence positive et généralisée sur la productivité biologique des lacs à travers presque tout le pays.

Parmi les organismes envahissants s'inscrivent les cyanobactéries, qui tirent profit des changements climatiques (figure 18) (Woolway et al., 2022). En effet, la réduction de la durée de la couverture de glace engendre des eaux de surface plus chaudes et encourage ainsi la formation de blooms de cyanobactéries (Woolway et al., 2022).



**Figure 2.** Line graphs of chlorophyll *a* (Chl-*a* in mg/g dry mass) changes over time, inferred using visible range spectroscopy. Data are shown for 5 impact sites and 1 reference site (in italics) in Lake of the Woods, Ontario. The time period represented by each core is: Bigstone Bay (~1905 – 2006); Site PP1 (~1907 – 2006); Forrest Island (~1908 – 2006); Poplar Bay (~1910 – 2008); White Partridge Bay (~1903 – 2008); and Whitefish Bay (~1915 – 2002).



**Figure 3.** Cyanobacterial bloom in Dickson Lake (Ontario). (a) Aerial view of the *Dolichospermum* bloom on remote Dickson Lake (Algonquin Provincial Park, Ontario) in September 2014. Photograph: Courtesy of Alison Lake, Ontario Parks. (b) Concentrations of cyanobacterial akinetes (resting stages) in a high-resolution sediment core collected from Dickson Lake, scaled by age of sediment estimated from <sup>210</sup>Pb dating, showing the unprecedented increases in cyanobacteria in the most recent sediments. Source: Redrawn from data presented in Favot and colleagues (2019).

**Figure 18 - Représentation graphique de l'évolution de la chlorophylle à travers le temps dans des lacs en ontario (M.Peterson et al., 2017; Woolway et al., 2022) :** La figure (2) montrant l'évolution de la biomasse algale dans le lac Lake of the Woods met en évidence une augmentation progressive de la production algale au cours des dernières décennies. Cette tendance est associée à l'augmentation des températures et à l'allongement de la saison de croissance, deux phénomènes liés au réchauffement climatique (M.Peterson et al., 2017). Figure (3) : La partie (a) montre une photographie aérienne d'un bloom de cyanobactéries dans le lac Dickson, situé dans le parc provincial Algonquin en Ontario. L'eau apparaît verdâtre à la surface, ce qui est caractéristique des proliférations de cyanobactéries, ici dominées par le genre *Dolichospermum*. Cette image illustre visuellement l'ampleur que peuvent atteindre ces événements dans les écosystèmes lacustres. La partie (b) présente l'évolution historique des cyanobactéries dans ce même lac à partir d'une carotte de sédiments datée au plomb-210. L'axe

*vertical représente la concentration d'akinetes (formes de repos des cyanobactéries) dans les sédiments, tandis que l'axe horizontal indique l'âge des sédiments depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle. Le graphique montre des concentrations relativement faibles et stables entre 1900 et environ 2000, puis une augmentation très rapide au cours des dernières décennies, avec un pic marqué dans les sédiments les plus récents. Cette forte hausse indique que les blooms de cyanobactéries sont devenus beaucoup plus fréquents ou intenses récemment, ce qui correspond aux observations contemporaines dans de nombreux lacs (Woolway et al., 2022). Cette figure met donc en évidence une augmentation récente et sans précédent des cyanobactéries, confirmant que les blooms observés aujourd'hui s'inscrivent dans une tendance récente d'intensification dans certains lacs tempérés. Elle appuie ainsi l'idée que les changements environnementaux récents, notamment l'eutrophisation et le réchauffement climatique, peuvent favoriser la prolifération des cyanobactéries.*

Dans certains lacs peu profonds, comme le lac Magog, l'affaiblissement de la stratification thermique peut également rendre les nutriments accumulés dans les sédiments plus accessibles, ce qui favorise leur multiplication (INSPQ, 2009). À leur tour, les blooms produiront de grandes quantités de matière organique en décomposition, entraînant alors des conditions d'hypoxie et accentuant les risques de proliférations nuisibles ou toxiques (Adams et al., 2022). Ce phénomène contribue donc à accélérer l'eutrophisation des lacs et à diminuer la qualité de l'eau (Adams et al., 2022; Jeppesen et al., 2014). De plus, d'autres aléas climatiques, comme les précipitations intenses, peuvent renforcer ces processus en favorisant le lessivage des nutriments depuis les bassins versants (figure 19) (Garner et al., 2025; Hébert et al., 2021; M.Peterson et al., 2017). Enfin, il faut mentionner que le réchauffement de l'eau peut agir de manière additive avec l'eutrophisation. Dans un lac déjà enrichi en nutriments, il modifie davantage les communautés algales et prolonge la saison de croissance des cyanobactéries au sein des communautés phytoplanctoniques (Rigosi et al., 2014). Cela avantage des blooms multiples et de plus en plus longs (Garner et al., 2025).

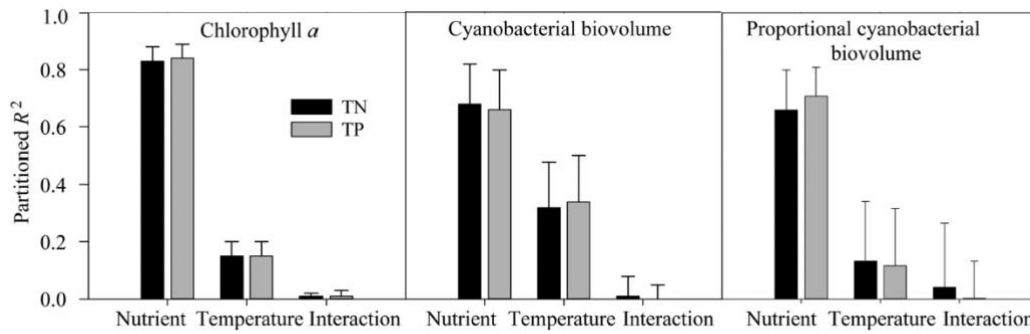


Fig. 1. The relative effects of nutrients (both TN and TP), temperature, and their interaction on chlorophyll *a*, cyanobacterial biovolume, and proportional cyanobacterial biovolume.

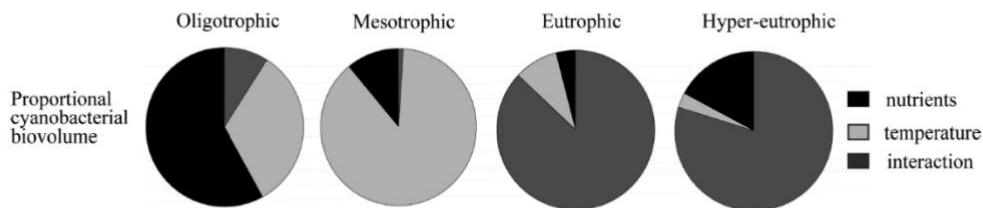
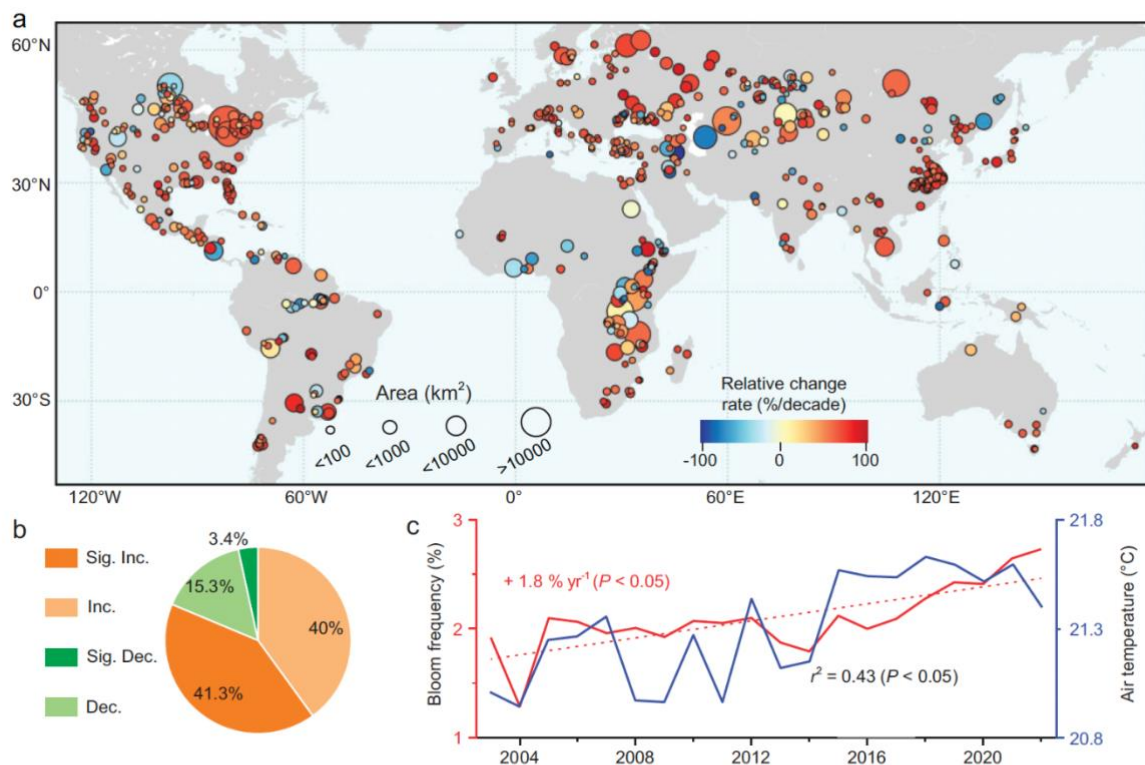


Fig. 2. The relative effects of nutrients, temperature, and their interaction on the proportional cyanobacterial biovolume in oligotrophic, mesotrophic, eutrophic, and hyper-eutrophic lakes.

**Figure 19 – Interaction entre température et nutriments dans la dominance des cyanobactéries (Rigosi et al., 2014) :** La figure (1) illustrant la relation entre température et dominance des cyanobactéries montre que l'augmentation de la température favorise la dominance de ces organismes dans les communautés algales. Cet effet est amplifié lorsque les concentrations en nutriments sont élevées, ce qui suggère que le réchauffement climatique et l'eutrophisation agissent de manière synergique. Ce graphique (figure 2) montre que l'influence de la température sur les blooms de cyanobactéries devient plus importante lorsque les lacs sont déjà riches en nutriments. Dans les lacs eutrophes ou hyper-eutrophes, l'interaction entre température et nutriments amplifie davantage la biomasse de cyanobactéries.

Les études constatent une hausse globale de la fréquence des blooms dans près de 2000 lacs au cours des dernières décennies (figure 20) (Wang et al., 2025). Des reconstructions paléolimnologiques confirment cette hausse marquée de la production algale dans les lacs canadiens depuis 1960 (Ghanbari et al., 2025).



**Figure 2.** Global trend of algal blooms in large freshwater lakes between 2003 and 2022. (a) Linear slopes of the bloom frequency for lakes that exhibited blooms for at least 10 years during our study period ( $n = 620$ ). (b) The proportions of four distinct trends: significant increase (Sig. Inc.), non-significant increase (Inc.), significant decrease (Sig. Dec.), and non-significant decrease (Dec.). (c) Long-term changes in global median bloom frequency for bloom-affected lakes over the study period, with the linear slope and  $P$ -value annotated. Also plotted are the corresponding median air temperatures concurrent to bloom events, and with the correlation to bloom frequency indicated. The colors of the curves correspond with the  $y$ -axis.

**Figure 20 – Augmentation globale de la fréquence des blooms algaux et lien avec le réchauffement climatique (Wang et al., 2025) :** Cette figure présente une analyse globale portant sur 1956 grands lacs à travers le monde et met en évidence une augmentation généralisée de la fréquence des blooms algaux au cours des deux dernières décennies. La carte (a) illustre la distribution spatiale des lacs étudiés ainsi que le taux de variation de la fréquence des blooms. Les points rouges indiquent une augmentation de la fréquence des blooms, largement dominante à l'échelle mondiale, ce qui traduit une tendance globale à l'intensification de ces phénomènes dans la majorité des régions. À l'inverse, les points bleus, plus rares, signalent une diminution locale. Cette répartition suggère que l'augmentation des blooms n'est pas isolée, mais bien systémique. Le diagramme circulaire (b) montre que la majorité des lacs présentent une augmentation significative ou non significative des blooms (plus de 80 % des cas), tandis qu'une faible proportion seulement affiche une diminution. Cela confirme le caractère généralisé de la tendance observée.

Le graphique (c) met en relation l'évolution temporelle de la fréquence des blooms algaux et celle de la température de l'air. On observe une augmentation concomitante des deux variables, avec une corrélation positive statistiquement significative ( $r = 0,43$  ;  $p < 0,05$ ). Cette relation suggère que le

*réchauffement climatique constitue un facteur explicatif important de l'augmentation des blooms, notamment en favorisant des conditions propices à la croissance du phytoplancton (température plus élevée, saison de croissance allongée). Dans l'ensemble, cette figure démontre que l'intensification des blooms algaux s'inscrit dans une dynamique globale cohérente avec les tendances de réchauffement climatique, renforçant l'hypothèse d'un lien causal entre augmentation des températures et eutrophisation des systèmes aquatiques.*

Les cyanobactéries ont aussi connu une croissance significative depuis le XIX<sup>e</sup> siècle. Et elles ont accéléré depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle (figure 21) (Taranu et al., 2015).

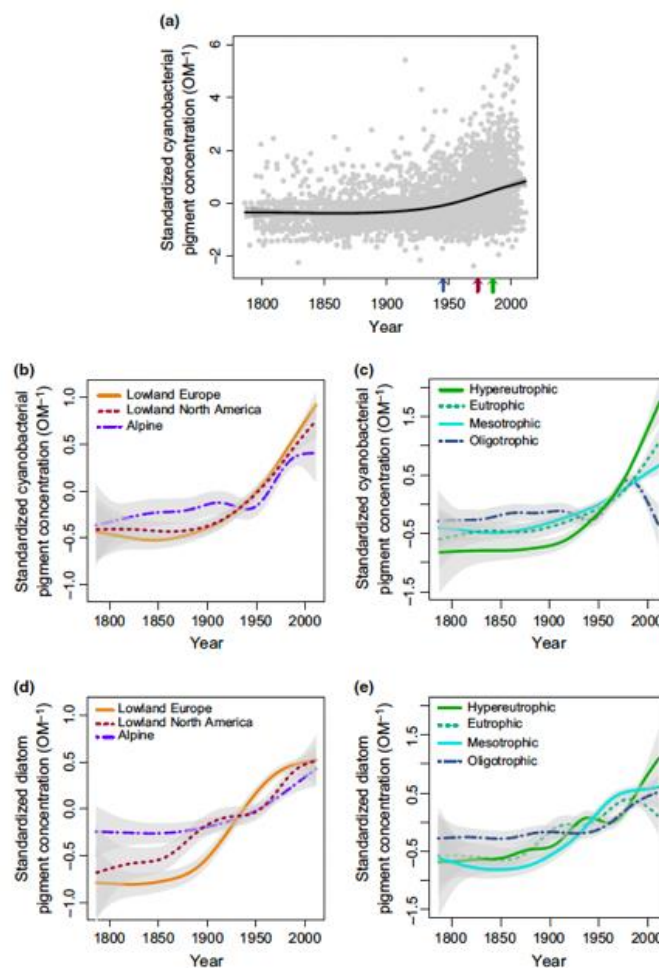


Figure 3 Additive mixed-effect model (AMM) response curves for the cyanobacteria and diatom paleolimnological data. Cyanobacteria concentration vs. (a) year ( $R^2 = 0.14$ ,  $n = 98$ ), (b) year  $\times$  region ( $R^2 = 0.15$ ,  $n = 98$ ) and (c) year  $\times$  trophic state ( $R^2 = 0.17$ ,  $n = 88$ ). Diatom concentration vs. (d) year  $\times$  region ( $R^2 = 0.15$ ,  $n = 95$ ), and (e) year  $\times$  trophic status ( $R^2 = 0.16$ ,  $n = 86$ ). Arrows in (a) provide the 1st quantile (blue: 1943), median (red: 1973) and 3rd quantile (green: 1985) of breakpoint regression dates. All models were significant, as was the temporal autocorrelation structure (range:  $\phi = 0.36$ – $0.50$ ,  $P < 0.0001$ ). Grey bands indicate 95% confidence intervals of the predicted mean based on the AMM.

**Figure 21 – Augmentation historique de l'abondance des cyanobactéries dans les lacs depuis le xx<sup>e</sup> siècle (Taranu et al., 2015) : L'analyse de séries temporelles couvrant environ 200 ans montre une augmentation marquée de l'abondance des cyanobactéries, avec une accélération importante à partir du milieu du XX<sup>e</sup> siècle.**

Ce qu'on voit :

*concentrations relativement stables jusqu'au début du XX<sup>e</sup> siècle  
forte augmentation après ~1945.*

*Les auteurs identifient des points d'accélération :*

*~1943*

*~1973*

*~1985*

*L'étude montre que l'augmentation des cyanobactéries est plus rapide que celle d'autres groupes d'algues, ce qui traduit une modification de la structure des communautés phytoplanctoniques. Les cyanobactéries augmentent 28 % plus rapidement que les diatomées dans certains lacs eutrophes.*

Des observations plus récentes traduisent cette évolution avec la hausse des signalements de blooms dans les lacs de l'Ontario (figure 22) (Favot et al., 2023). Ainsi, les tendances historiques témoignent de l'augmentation de la productivité biologique dans les lacs tempérés et froids. Ces tendances devraient se poursuivre dans les lacs canadiens avec le réchauffement climatique (Ghanbari et al., 2025). Dans le contexte du lac Magog, qualifié de mésotrophe (Réseau de surveillance volontaire des lacs, 2020), les projections climatiques indiquent un réchauffement progressif de l'eau et une réduction de la durée de la couverture de glace. Ces évolutions pourraient donc privilégier davantage les proliférations algales et les blooms de cyanobactéries. En effet, ces transformations entraînent une modification du fonctionnement des écosystèmes lacustres, où les conditions environnementales deviennent de plus en plus favorables aux espèces opportunistes, comme les cyanobactéries. En conclusion, les tendances historiques et projection climatiques soulignent l'importance de renforcer les stratégies de gestion visant à maintenir une qualité de l'eau pour empêcher les changements de structure des communautés aquatiques.

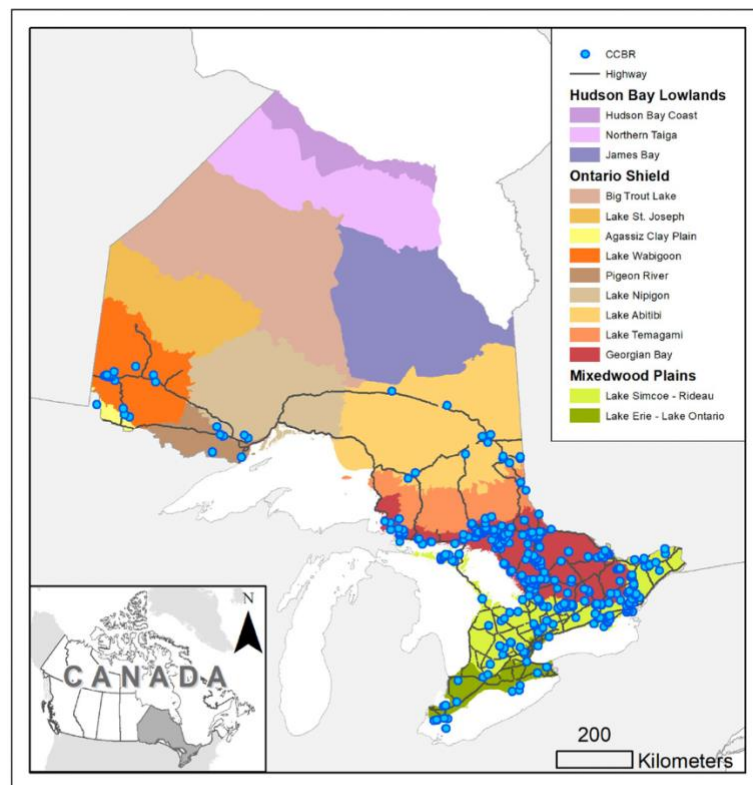
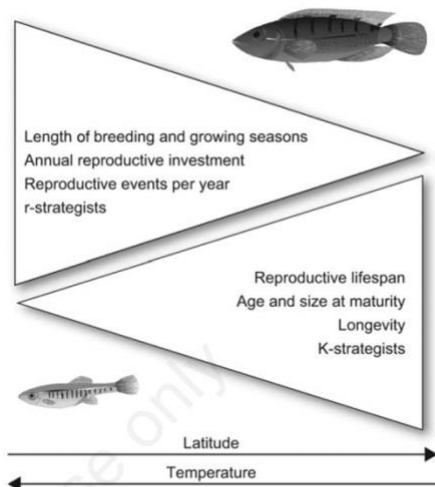


Figure 1. Locations of confirmed cyanobacterial blooms (CCBR) reported to the Ministry of the Environment, Conservation and Parks between 1994 and 2019 (blue dots) across the province of Ontario. Colored areas display ecoregion, and black lines represent freeways and highways (Ontario Road Network 2018).

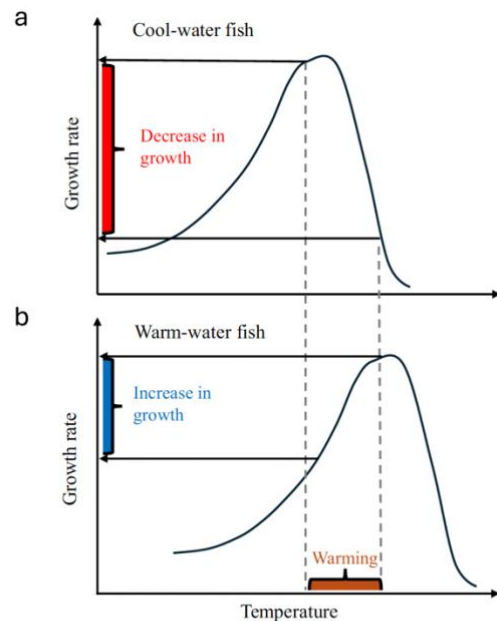
*Figure 22 – Répartition spatiale et augmentation des signalements de blooms de cyanobactéries en ontario (Favot et al., 2023) : La carte présentant les signalements de blooms de cyanobactéries en Ontario montre une augmentation du nombre de cas rapportés au cours du XXI<sup>e</sup> siècle. Cette tendance suggère que les proliférations de cyanobactéries deviennent plus fréquentes dans les lacs de la région.*

#### 4.2 Modification des communautés de poissons

Un autre impact majeur des phénomènes climatiques concerne la modification des communautés de poissons dans les lacs et les rivières. Les aléas, tels que le réchauffement de l'eau, altèrent les habitats thermiques disponibles pour les espèces aquatiques. Par ailleurs, la diminution de la durée du couvert de glace prolonge la saison d'eau libre et accélère le réchauffement printanier des lacs, ce qui accentue aussi les pressions thermiques sur les espèces sensibles (Woolway et al., 2022). Les poissons étant des organismes ectothermes, la température de l'eau influence directement leur physiologie, leur croissance et leur reproduction (figure 23) (Poesch et al., 2016).



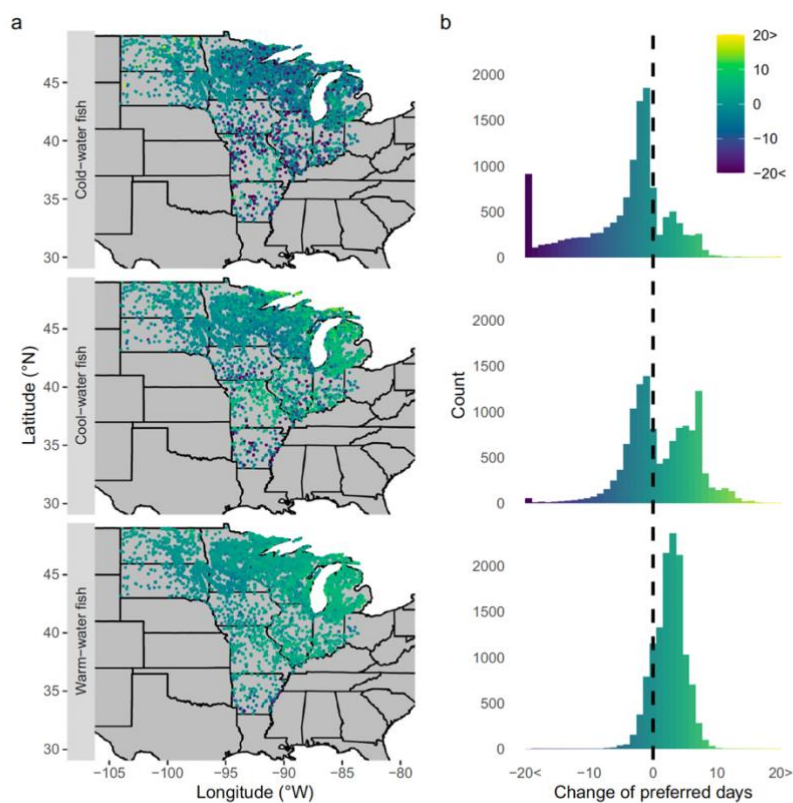
**Fig. 2.** Expected changes in the main life history traits of fish along a temperature and latitudinal gradient based on our review of literature from inland water systems. With increases in temperature, longer breeding and growing seasons, annual reproductive investment and more reproduction events are predicted; a longer reproductive lifespan, greater age and size at maturity and longevity being negatively related with temperature. See text for details and supporting literature. From Meerhoff *et al.* (2012).



**Fig. 6 | Fish growth rate in relation to water temperature.** Fish growth rates experience a modest increase as temperatures approach the optimal point but undergo a sharp decline when temperatures exceed this threshold. Due to this asymmetry, the same degree of lake warming can result in a more pronounced decrease in the growth rates of cool-water species (a) compared to the increase in growth rates of warm-water species (b).

**Figure 23 – Effets de l’augmentation de la température sur les traits de vie des poissons (Jeppesen et al., 2014; Xu et al., 2024) :** La figure 2 illustre les changements attendus dans les traits d’histoire de vie des poissons d’eau douce en fonction d’un gradient de température et de latitude. Avec l’augmentation de la température, la durée de la saison de croissance et de reproduction ainsi que l’investissement reproductif et la fréquence des événements de reproduction tendent à augmenter. À l’inverse, la taille et l’âge à maturité, la longévité et certaines stratégies de vie associées aux espèces à croissance plus lente tendent à diminuer. Cette figure met en évidence l’influence du réchauffement climatique sur la biologie et les stratégies de reproduction des poissons dans les écosystèmes d’eau douce (Jeppesen et al., 2014). La figure 6 illustre l’effet de la température de l’eau sur le taux de croissance des poissons selon leur préférence thermique. Chez les espèces d’eau froide, une augmentation de la température peut rapidement dépasser leur seuil optimal, entraînant une diminution du taux de croissance. À l’inverse, les espèces d’eau chaude peuvent voir leur croissance augmenter lorsque la température se rapproche de leur optimum thermique. En raison de cette asymétrie, un réchauffement des lacs tend à défavoriser les espèces d’eau froide tout en favorisant les espèces adaptées à des eaux plus chaudes, ce qui peut modifier la structure des communautés de poissons (Xu et al., 2024).

Dans les lacs tempérés, ces changements favorisent en général les espèces tolérantes à des températures élevées, généralement qualifiées d'eurythermes. En même temps, les espèces d'eau froide voient leur habitat se réduire au fur et à mesure (figure 24)(Jeppesen et al., 2014). Certaines espèces, souvent omnivores ou herbivores, pourraient aussi tirer avantage de ces nouvelles conditions environnementales (Jeppesen et al., 2014). En parallèle, le réchauffement de l'eau amplifie la stratification thermique des lacs. Cela limite les échanges entre les couches d'eau et peut provoquer une diminution de l'oxygène dissous dans les eaux profondes (Jiang et al., 2024; Woolway et al., 2022). Cette combinaison de températures élevées et de conditions d'oxygénation réduites restreint alors l'espace habitable pour les espèces d'eau froide qui dépendent d'eaux fraîches bien oxygénées (Jeppesen et al., 2014; R. R. Shrestha & Pesklevits, 2023).



**Fig. 2 | Spatial and frequency distribution of the change in average preferred days for cold-water (top), cool-water (middle), and warm-water (bottom) fish from 1980–2000 to 2001–2021.** Each point in (a) represents the average change of days for all populations within the corresponding thermal guild. Histograms in

(b) represent the count of lakes experiencing a specified change in preferred days. The color of the points in (a) and bars in (b) corresponds to the changes in preferred days as indicated by the color palette legend. Source data are provided as a Source Data file.

**Figure 24 – Déplacement des périodes thermiques préférées chez les poissons d'eau douce en Amérique du nord (Xu et al., 2024) :** Cette figure illustre les changements dans les périodes de température préférées pour différentes catégories de poissons d'eau douce (eau froide, eau tempérée et eau chaude) entre 1950 et 2000 comparativement à la période 2001-2021. Les cartes montrent la répartition spatiale de ces changements en Amérique du Nord, tandis que les histogrammes présentent la distribution du nombre de jours thermiquement favorables. Les résultats indiquent un déplacement

général des conditions thermiques, avec une augmentation du nombre de jours favorables pour les espèces d'eau chaude et une diminution ou un déplacement pour les espèces d'eau froide. Ces tendances reflètent l'influence du réchauffement climatique sur la distribution et les conditions d'habitat des poissons d'eau douce.

Les observations et les projections climatiques indiquent que ces transformations se produisent et devraient s'accroître au cours du XXI<sup>e</sup> siècle. À l'échelle mondiale, une proportion importante des espèces de poissons d'eau douce pourrait être exposée à des conditions climatiques franchissant leur niche actuelle si le réchauffement global se poursuit (Barbarossa et al., 2021). L'accroissement de la température de l'eau entraîne déjà une hausse de la fréquence de dépassement de seuils thermiques critiques pour certaines espèces aquatiques (R. R. Shrestha & Pesklevits, 2023). Au Canada, des analyses menées dans les lacs de l'Ontario, montrent que la limite nord de distribution de certaines espèces de poissons. Elle s'est déplacée d'environ 12 à 17 km vers le nord, au cours des dernières décennies, en réponse à l'augmentation des températures (figure 25) (Alofs et al., 2014). Les études suggèrent que ces tendances devraient se poursuivre. Une augmentation de 2 °C de la température de l'air pourrait induire une hausse de 0,5 à 1,5 °C de la température de l'eau des rivières et des lacs (R. R. Shrestha & Pesklevits, 2023).

Figure 1 Map of the 1527 Ontario lakes surveyed once between 1957 and 1986 and again between 1983 and 2011. Colours indicate the status of Smallmouth Bass in each lake between survey periods. Numbers indicate average July air temperature (°C) from 1951 to 1980 at weather stations. Overwinter survival of young-of-year and establishment of self-reproducing populations of Smallmouth Bass decline rapidly in lakes as mean July air temperature drops below 18 °C; survival is essentially zero in lakes where the mean July air temp is 16.6 or less (Shuter et al., 1980).

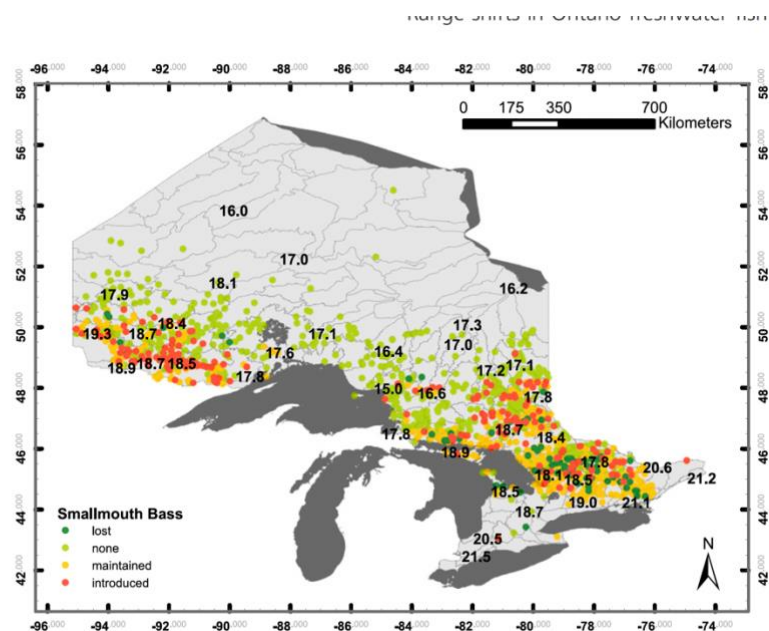


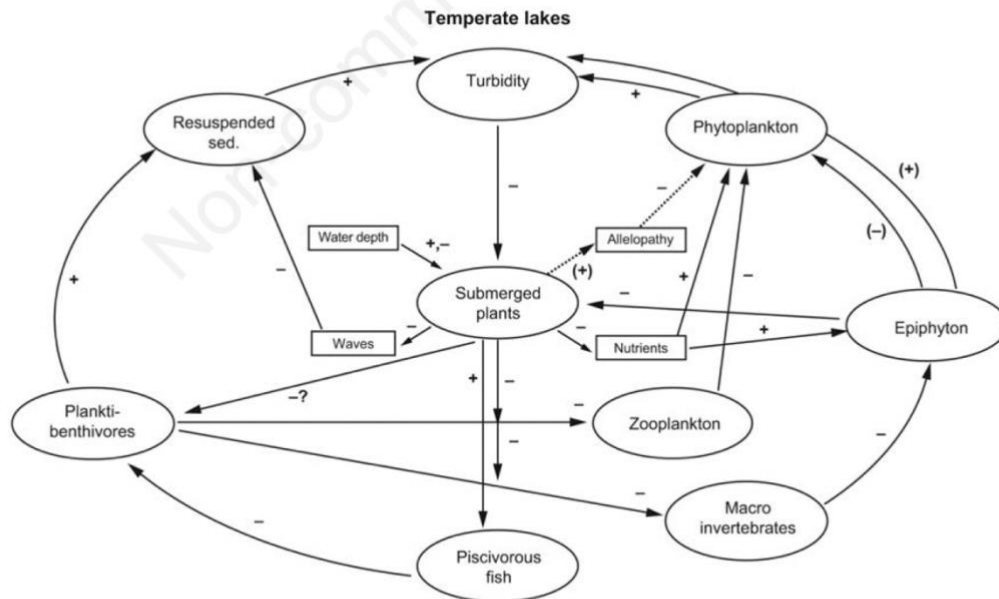
Figure 25 – Expansion de l'achigan à petite bouche dans les lacs de l'ontario en fonction de la température estivale (Alofs et al., 2014) : Cette carte présente la distribution de l'achigan à petite bouche (*Micropterus dolomieu*) dans 1 527 lacs de l'Ontario pour deux périodes d'inventaire (1983-1986 et 1989-2001). Les points indiquent les lacs où l'espèce est absente, maintenue ou nouvellement introduite. Les valeurs numériques représentent la température moyenne de l'air en juillet (1951-1980).

*La figure montre que l'établissement de populations reproductrices est étroitement lié à la température estivale : la probabilité de présence augmente lorsque la température moyenne dépasse environ 16,6 °C. L'étude met ainsi en évidence l'influence du réchauffement climatique sur l'expansion vers le nord de cette espèce de poisson dans les lacs ontariens.*

Ainsi, la littérature mentionne que les espèces d'eau froide pourraient perdre une part importante de leur habitat thermique. Alors que les espèces adaptées aux eaux plus chaudes pourraient étendre leur distribution (Comte et al., 2013; Xu et al., 2024), notamment au Québec (Dulude, 2016). Le contexte du lac Magog et de la rivière Magog est marqué par des projections climatiques indiquant déjà une augmentation progressive des températures et une diminution des cycles de gel et de dégel. Ces évolutions pourraient entraîner une redistribution progressive des espèces et une modification durable de la composition des communautés de poissons. Ces transformations thermiques peuvent également changer les interactions écologiques et la dynamique des réseaux trophiques aquatiques.

### **4.3 Modification du réseau trophique et désynchronisation écologique**

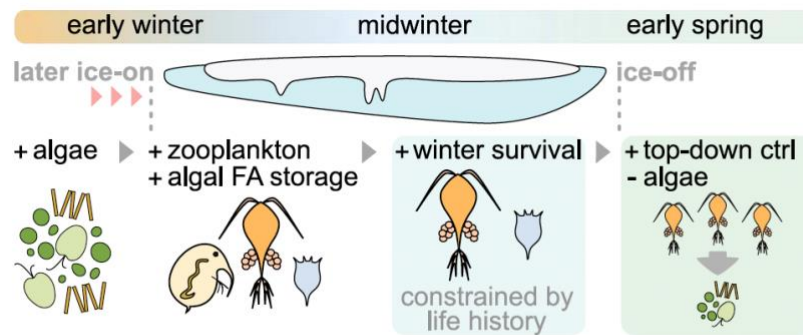
Le troisième impact pour la faune et flore des lacs et rivières concerne la modification du réseau trophique et la désynchronisation écologique. En effet, les changements climatiques peuvent provoquer un décalage temporel entre les pics de production du phytoplancton et ceux du zooplancton. Cela perturbe l'alimentation des organismes situés plus haut dans la chaîne alimentaire au sein des lacs (Hébert et al., 2021; Jeppesen et al., 2014). Le réchauffement accroîtrait également l'activité et la pression de prédation des poissons sur le zooplancton, ce qui altère la régulation du phytoplancton et peut contribuer à amplifier la prolifération d'algues (figure 26) (Jeppesen et al., 2014).



**Fig. 5.** Role of submerged plants in the functioning of currently temperate shallow lakes and ponds; the effects on different physical, chemical and biological processes that ultimately stabilise a clear water state are shown. Note that the benthic-pelagic coupling is included in the scheme in a partial manner. The qualitative effect of each route can be determined by multiplying the signs along the way. +, positive; -, negative; dotted line, occasionally. Modified from Meerhoff and Jeppesen (2009) (originally based on Scheffer *et al.*, 1993). See Tab. 2 for the trends to be expected with climate change and the available evidence as suggested by different research approaches.

**Figure 26 – Interactions écologiques influençant l'état de clarté des lacs tempérés (Jeppesen et al., 2014) :** Ce schéma présente les principales interactions biologiques et physiques qui influencent l'état écologique des lacs tempérés et leur capacité à maintenir une eau claire. Il illustre les relations entre différents compartiments de l'écosystème, notamment le phytoplancton, le zooplancton, les macrophytes submergés, les poissons planctonophages et piscivores, ainsi que les invertébrés et les nutriments. Ces interactions déterminent l'équilibre entre la turbidité de l'eau et la présence de végétation aquatique. La figure met en évidence la complexité des rétroactions écologiques qui structurent les écosystèmes lacustres et souligne que les changements climatiques peuvent modifier ces équilibres en influençant plusieurs de ces processus simultanément.

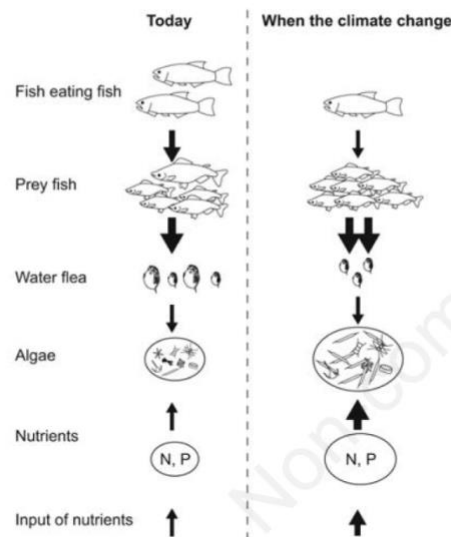
Par ailleurs, la diminution de la durée du couvert de glace et l'augmentation de la température de l'eau participent aux changements dans la dynamique du réseau trophique des lacs. Ces phénomènes modifient les processus écologiques hivernaux et printaniers (figure 27)(Hébert et al., 2021; Woolway et al., 2022). C'est que la diminution de la durée de la glace change les conditions hivernales dans les lacs, en particulier la lumière disponible et la dynamique biologique sous la glace (Hébert et al., 2021).



**Fig. 5.** Schematic summary of potential direct and indirect effects of later ice-cover onset on lake planktonic food webs, from early winter to spring. Positive and negative effects are denoted via "+" and "-" signs; the ice-covered period is illustrated by the ice cover. Short-term effects of later ice-on dates include relatively higher densities of pelagic (algal) resources and primary consumers (zooplankton) in early winter, allowing certain zooplankton taxa to accumulate high-quality, algal-derived fatty acids, such as DHA, during a critical seasonal transition. Algal-derived fat storage may in turn sustain such zooplankton taxa as they (fully or partly) fast in the winter months. Thus, longer-term winter survival in consumers appears to be constrained by their physiological capacities and life-history traits, including building high-quality lipid stores while exhibiting a heightened tolerance to harsh winter environmental conditions, here observed in cyclopoid copepods (*Cyclops*) but not in the cladoceran *Bosmina*. Cross-seasonal effects of consumer overwintering include altered trophic structure after ice breakup. As shown in this study, higher densities of overwintering cyclopoid copepods in spring can exert stronger, earlier top-down control (ctrl) on the spring algal bloom. Reduced food availability for other (nonoverwintering or benthic) primary consumers may have implications for energy transfer to upper trophic levels and food web dynamics over the subsequent open-water season.

**Figure 27 – Schéma démontrant les perturbations sur le réseau trophique du lac à cause d'une modification de la couverture de glace (Hébert et al., 2021) :** Cette figure illustre les effets directs et indirects d'un retard de la formation de la glace (ice-on) sur le fonctionnement du réseau trophique lacustre, de l'hiver jusqu'au printemps. En début d'hiver, un couvert de glace plus tardif entraîne une augmentation de la production algale, car l'eau reste plus longtemps exposée à la lumière. Cette disponibilité accrue de ressources favorise ensuite le zooplancton, qui peut accumuler davantage de réserves énergétiques (notamment des acides gras issus des algues), essentielles à sa survie hivernale. Durant l'hiver, la survie du zooplancton dépend toutefois de contraintes biologiques (traits de vie, capacités physiologiques), ce qui limite les bénéfices à long terme de cette accumulation. Au printemps, ces changements ont des effets en cascade : une plus grande abondance de zooplancton ayant survécu à l'hiver peut exercer un contrôle plus important sur les algues (contrôle top-down), ce qui peut modifier l'intensité du bloom printanier. Ainsi, la figure montre que la modification du régime de glace ne se limite pas à un effet physique, mais entraîne des réorganisations du réseau trophique, avec des impacts potentiels sur la dynamique des blooms algaux et le transfert d'énergie dans l'écosystème.

Ainsi, ces aléas climatiques contribueraient à l'altération des interactions entre les différents niveaux trophiques et engendreraient des cascades trophiques, affectant alors l'ensemble de l'écosystème (figure 28) (Dahal et al., 2025; Nimma et al., 2025).



**Fig. 4.** Conceptual model showing trophic structure in mesotrophic temperate lakes and the suggested changes resulting from climate warming. Today, top-down control by piscivorous fish is medium to low depending on nutrient level, and the abundance of cyprinids feeding on large-bodied zooplankton is, conversely, medium to high. Accordingly, *Daphnia* biomass is moderate to low as is the grazing pressure on phytoplankton. Such lakes are sensitive to additional nutrient loading but somewhat buffered by grazing by zooplankton and other stabilising mechanisms (*sensu* Scheffer *et al.*, 1993) at low nutrient levels. As lakes warm, a variety of processes will lead to increasing dominance by small fish, with less abundant and smaller zooplankton. Accordingly, the lakes will be more sensitive to addition of nutrients and other external stressors, such as changes in water level. Moreover, cyanobacteria will likely be stimulated by both higher temperature and higher external and internal nutrient loading (from Jeppesen *et al.*, 2012b).

**Figure 28– Modèle conceptuel des changements dans la structure trophique des lacs tempérés sous l'effet du réchauffement climatique (Jeppesen et al., 2014) :** Ce schéma conceptuel illustre les modifications attendues dans la structure trophique des lacs tempérés mésotrophes en réponse au réchauffement climatique. Dans les conditions actuelles, les poissons piscivores exercent un contrôle sur les poissons proies, ce qui permet le maintien de populations de zooplancton capables de limiter la croissance des algues. Avec l'augmentation des températures, les petits poissons deviennent plus abondants, ce qui réduit les populations de zooplancton et diminue leur capacité de contrôle sur le phytoplancton. Cette dynamique favorise alors la prolifération des algues, notamment lorsque les apports en nutriments (azote et phosphore) sont élevés, rendant les lacs plus sensibles à l'eutrophisation.

D'après les tendances historiques des lacs tempérés et froids, les périodes d'augmentation de chlorophylle surviennent désormais plus tôt au printemps. Cela suggère un allongement de la saison de croissance et une hausse de la productivité annuelle du phytoplancton (Adams et al., 2022; R. Shrestha et al., 2024). De ce fait, les changements phénologiques altèrent progressivement les interactions trophiques dans les lacs, notamment à travers les modifications du calendrier biologique des organismes aquatiques (Hébert et al., 2021; Woolway et al., 2022). Des observations récentes indiquent aussi que les communautés de poissons peuvent déjà présenter des changements dans leur phénologie et leur composition, reflétant une restructuration des interactions écologiques au sein des réseaux trophiques (Piczak et al., 2025). Dans ce contexte, l'augmentation de certains aléas climatiques pourrait intensifier les perturbations des réseaux trophiques et accentuer les phénomènes de désynchronisation écologique. Par exemple, la littérature spécifie que la perte de glace devrait continuer à s'accélérer dans les lacs nordiques au cours du XXI<sup>e</sup> siècle (Imrit & Sharma, 2021). Les projections climatiques sur les cycles de gel et dégel et la température moyenne pour Magog appuient ce constat. Cela pourrait donc amplifier les impacts sur la biodiversité (Kim et al., 2025). En somme, pour le lac et la rivière Magog, les aléas climatiques pourraient entraîner des changements dans les interactions entre le phytoplancton, le zooplancton et les poissons, susceptibles d'altérer progressivement le fonctionnement écologique du lac.

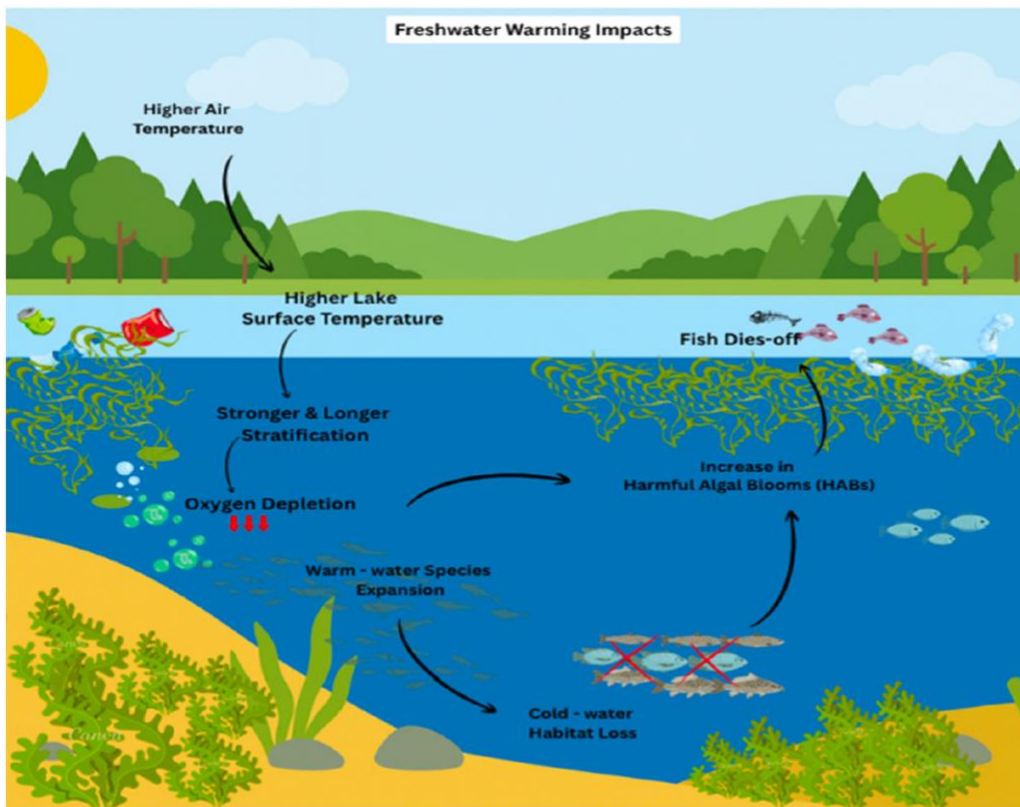
#### **4.4 Altération de la qualité de l'eau**

Un dernier impact associé aux aléas climatiques concerne la dégradation de la qualité de l'eau, en particulier dans les rivières. Les changements climatiques modifient déjà le cycle hydrologique dans plusieurs régions, notamment au Canada (Gouvernement du Canada, 2022), par des transformations des régimes de précipitations, des crues et des débits des rivières. Ces changements influencent directement le transport des nutriments, des sédiments et des contaminants dans les systèmes aquatiques (DeBeer et al., 2016). En outre, les épisodes de précipitations intenses favoriseraient le ruissellement de surface et contribueraient à l'érosion des sols. Cela augmente le transport de nutriments, de polluants et de matières organiques vers les rivières et les lacs (Eekhout et al., 2018; Xia et al., 2014). Les précipitations participeraient donc à la dégradation de la qualité de l'eau et peuvent accentuer les processus d'eutrophisation (Eekhout et al., 2018; Kim et al., 2025; Radhapyari et al., 2021). À l'inverse, les périodes de sécheresse réduiraient le débit des rivières et limiteraient alors la dilution des contaminants. De ce fait, cela augmente les concentrations de nutriments, de métaux et de certains produits chimiques dans les milieux aquatiques (Graham et al., 2024). Ces phénomènes témoignent que les changements hydrologiques associés au climat peuvent amplifier les pressions déjà exercées par les activités humaines sur la qualité de l'eau.

Les observations hydrologiques montrent que, depuis la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle, l'accroissement des températures et les modifications des précipitations ont entraîné des changements dans le

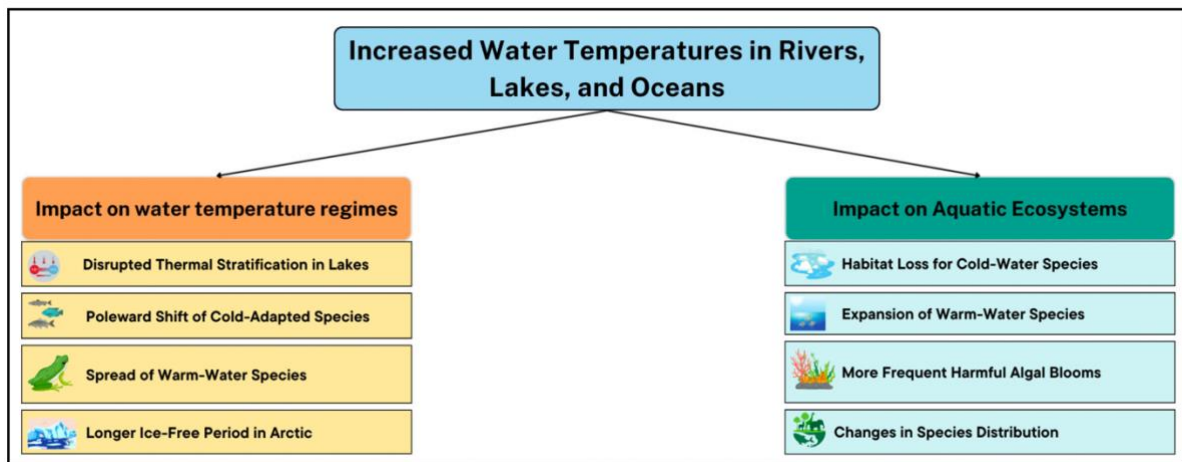
ruissellement, le transport de sédiments et les flux de nutriments dans les bassins versants (DeBeer et al., 2016). Dans le sud du Québec, certaines simulations hydrologiques suggèrent déjà une hausse des débits hivernaux, des crues printanières plus précoces et une diminution des débits estivaux (Gombault et al., 2015). Cela modifie les processus de transport et de dilution des polluants dans les rivières. Concernant les projections, les aléas liés à cet impact, comme les précipitations intenses, tendent à augmenter comme mentionné plus haut. Il est donc possible d'en déduire que ces phénomènes climatiques pourraient accentuer, dans les prochaines années, le ruissellement des nutriments et des contaminants vers les milieux aquatiques tout en réduisant leur dilution durant les périodes de faibles débits. Cela signifie que, pour le lac et la rivière Magog, ces modifications hydrologiques pourraient contribuer à dégrader progressivement la qualité de l'eau.

Dans l'ensemble, les impacts présentés montrent que les changements climatiques influencent déjà plusieurs éléments des écosystèmes aquatiques, notamment la productivité primaire, la composition des communautés de poissons, les interactions trophiques et la qualité de l'eau. Ces différents processus sont étroitement interconnectés et peuvent entraîner des rétroactions écologiques qui amplifient les transformations observées dans les lacs et les rivières. Le réchauffement de l'eau, la réduction de la couverture de glace et les modifications du cycle hydrologique contribuent ainsi à altérer le fonctionnement écologique des milieux aquatiques et à accentuer certaines pressions sur la biodiversité. Ces interactions entre les différents impacts illustrent la complexité des réponses des écosystèmes d'eau douce face aux changements climatiques (figure 29 & 30). Ces impacts écologiques soulignent l'importance d'évaluer la vulnérabilité des écosystèmes aquatiques envers les changements climatiques et d'identifier des stratégies d'adaptation adaptées au contexte du lac et de la rivière Magog.



**Figure 3.** Schematic illustration showing the impact of rising temperatures on freshwater systems, leading to stronger stratification, oxygen depletion, harmful algal blooms, and habitat loss. (Conceptual illustration initially AI-generated using OpenAI DALL·E 3 and manually refined in Canva).

**Figure 29 – Impacts du réchauffement des eaux douces sur les écosystèmes lacustres (Dahal et al., 2025) :** Ce schéma conceptuel illustre les principaux impacts du réchauffement climatique sur les écosystèmes d'eau douce. L'augmentation de la température de l'air entraîne un réchauffement de la surface des lacs, ce qui renforce la stratification thermique et peut provoquer une diminution de l'oxygène dans les couches profondes. Ces conditions favorisent la prolifération d'algues nuisibles, notamment les cyanobactéries, et peuvent entraîner des mortalités de poissons. Par ailleurs, le réchauffement modifie les habitats aquatiques en favorisant l'expansion des espèces adaptées aux eaux chaudes, au détriment des espèces d'eau froide.



*Figure 30 – Effets de l’augmentation de la température de l’eau sur les régimes thermiques et les écosystèmes aquatiques (Dahal et al., 2025) : Ce schéma synthétise les principaux effets de l’augmentation de la température de l’eau dans les rivières, les lacs et les océans. Le réchauffement perturbe la stratification thermique des lacs, favorise le déplacement vers le nord des espèces adaptées aux eaux froides et facilite la propagation d’espèces d’eaux plus chaudes. Il entraîne également des modifications de la distribution des espèces et peut accroître la fréquence des proliférations d’algues nuisibles. Ces transformations illustrent les changements écologiques majeurs susceptibles d’affecter les écosystèmes aquatiques sous l’effet du changement climatique.*

#### 4.5 Synthèse des enjeux

En résumé, cette première analyse montre que le lac et la rivière Magog peuvent subir des risques climatiques variés diminuant la qualité de leur eau. Pour clarifier le tout, une carte mentale est réalisée (figure 31).

Clinique en

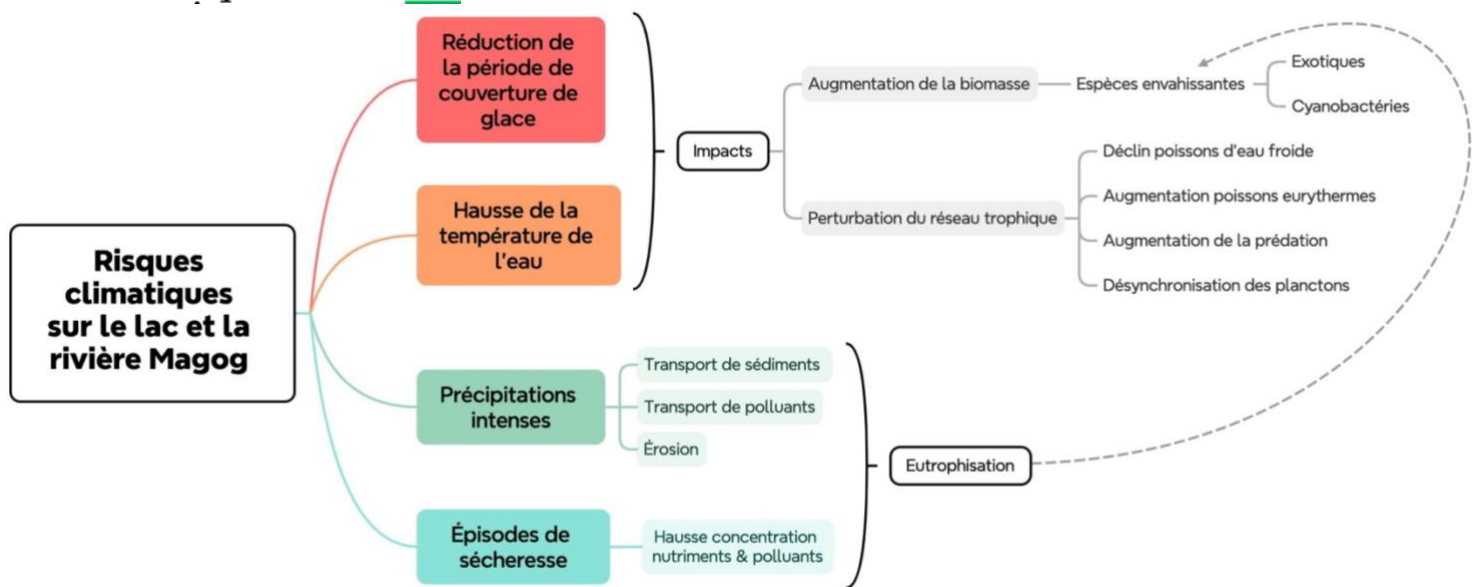


Figure 31 - Carte mentale des premiers résultats de la veille de littérature scientifique sur les risques climatiques pour le lac et la rivière Magog

## 5 PROFIL DE VULNÉRABILITÉ

Conformément au cadre conceptuel du risque climatique présenté précédemment, les profils de vulnérabilité du lac et de la rivière Magog reposent sur l'analyse combinée de leur sensibilité aux impacts climatiques et de leur capacité d'adaptation face à ces perturbations (figure 32). Comprendre ce profil permet par la suite d'identifier les mesures d'adaptation pertinentes face aux changements climatiques.

Impacts	Vulnérabilité	
	Sensibilité	Capacité d'adaptation
<b>Accroissement des algues et des cyanobactéries</b>	Sensibilité élevée liée à la disponibilité en nutriments, à la stratification thermique et aux conditions favorables à la croissance des cyanobactéries, amplifiées par la connectivité du bassin versant	Dépend fortement de la réduction des apports en nutriments à la source et de la gestion intégrée du bassin versant; capacité limitée en l'absence d'actions coordonnées
<b>Modification des communautés de poisson</b>	Sensibilité des espèces aux conditions thermiques, notamment pour les espèces d'eau froide, ainsi qu'aux modifications des habitats et aux interactions biologiques	Dépend de la protection et de la restauration des habitats, ainsi que de la gestion des pressions anthropiques; capacité d'adaptation

		limitée face à des changements rapides
<b>Modification du réseau trophique et déséquilibre écologique</b>	Sensibilité liée à la complexité et à la dépendance des interactions trophiques, ainsi qu'à la simplification du réseau dans les systèmes perturbés	Dépend de la restauration écologique et du maintien de la biodiversité; capacité d'adaptation faible à modérée en raison des délais de réponse des écosystèmes
<b>Altération de la qualité de l'eau</b>	Sensibilité élevée liée aux apports en polluants, à la variabilité hydrologique et à la forte pression anthropique sur le bassin versant	Dépend de la mise en place d'infrastructures de gestion de l'eau et de pratiques territoriales adaptées; capacité variable selon l'intensité des interventions

*Figure 32 – Tableau synthèse des profils de vulnérabilité : Ce tableau synthétise les profils de vulnérabilité en distinguant la sensibilité du système, liée à ses caractéristiques intrinsèques, et la capacité d'adaptation, correspondant aux leviers d'action mobilisables. Elle met en évidence une sensibilité globalement élevée et une capacité d'adaptation variable selon les impacts, orientant ainsi les priorités d'intervention à l'échelle du bassin versant.*

### 5.1 Vulnérabilité des algues et des cyanobactéries

La sensibilité des lacs face aux proliférations des algues et des cyanobactéries dépend principalement de leurs caractéristiques physiques et écologiques, comme leur profondeur (Jeppesen et al., 2014; Woolway et al., 2022). Dans le cas du lac Magog, cette sensibilité s'explique en particulier par sa faible profondeur relative et son état mésotrophe (COGESAF, 2011). Cela favorise un réchauffement rapide de l'eau et une stratification plus stable, ce qui limite le mélange vertical et accentue les conditions propices aux cyanobactéries (INSPQ, 2009; Jiang et al., 2024). Le réchauffement climatique agit comme un facteur révélateur de cette sensibilité en modifiant les conditions physico-chimiques du lac (Zhi et al., 2023). Il allonge la saison de croissance liée à la réduction du couvert de glace (Adams et al., 2022; Hébert et al., 2021), et entraîne des blooms précoces et prolongés (Kim et al., 2025). Dans ce contexte, les systèmes lacustres déjà enrichis en nutriments présentent une sensibilité accrue, puisque le réchauffement amplifie les effets de l'eutrophisation (Garner et al., 2025; Paerl & Otten, 2013). De plus, la forte connectivité avec le bassin versant accentue également cette sensibilité, en rendant le système réactif aux variations hydrologiques (Graham et al., 2024; Xia et al., 2014).

La capacité d'adaptation des systèmes lacustres repose principalement sur la gestion du bassin versant (Lemieux et al., 2014) et la réduction des apports en nutriments (section 6.1). Toutefois, la forte capacité d'adaptation intrinsèque des cyanobactéries, liée à leurs traits écophysologiques, tels que le stockage des nutriments et la flottabilité, leur confère un avantage compétitif dans un contexte de réchauffement (Jeppesen et al., 2014; Paerl & Otten, 2013). Ainsi, ces dynamiques contribuent à la dégradation de la qualité de l'eau et aux déséquilibres écologiques (Dahal et al., 2025; Paerl & Otten, 2013).

## **5.2 Vulnérabilité des communautés de poisson**

Les communautés de poissons sont particulièrement sensibles aux variations de température et d'oxygène dissous (Zhi et al., 2023). En effet, les poissons sont des organismes ectothermes dont la physiologie dépend directement des conditions thermiques du milieu (Poesch et al., 2016; R. Shrestha et al., 2024). Dans le cas du lac et de la rivière Magog, cette sensibilité se manifeste par une forte réactivité aux variations de température et d'oxygène dissous (Barbarossa et al., 2021). Ces variations modifient les conditions thermiques et d'oxygène des habitats, entraînant une réduction de l'habitat disponible pour les espèces d'eau froide (Alofs et al., 2014; Comte et al., 2013). Cette dynamique est d'autant plus préoccupante que les pertes d'habitats pour les espèces froides tendent à être plus importantes que les gains pour les espèces tolérantes à la chaleur (Xu et al., 2024). De plus, cette contrainte est accentuée par la stratification et les épisodes d'hypoxie dans le lac, ainsi que par les faibles débits estivaux en rivière (Graham et al., 2024; Jiang et al., 2024). Ainsi, les communautés de poissons apparaissent particulièrement sensibles aux modifications des conditions physico-chimiques du milieu, qui conditionnent leur distribution, leur reproduction et leur survie.

La capacité d'adaptation dépend en partie de la connectivité des habitats aquatiques et de la possibilité pour les espèces de se déplacer vers des zones plus propices (Lynch et al., 2016; Woolway et al., 2022). Dans le bassin du lac et de la rivière Magog, la fragmentation des habitats et la contrainte spatiale propre aux systèmes d'eau douce peuvent toutefois restreindre cette capacité. Cela réduit les possibilités de déplacement des espèces (Barbarossa et al., 2021; Xu et al., 2024). Cette capacité est également liée aux dynamiques trophiques et à la qualité de l'eau (sections 6). Ainsi, la vulnérabilité des communautés de poissons découle de leur forte sensibilité aux conditions thermiques et oxygénées du milieu, combinée à une capacité d'adaptation limitée face à la rapidité des changements environnementaux.

## **5.3 Vulnérabilité des réseaux trophiques**

Les réseaux trophiques des lacs sont sensibles aux changements de température et à la durée de la couverture de glace, qui influencent la phénologie et les interactions entre les organismes aquatiques (Hébert et al., 2021; Woolway et al., 2022). Dans le cas du lac Magog, cette sensibilité se manifeste par une modification des dynamiques saisonnières. Cela inclut un allongement de la saison de croissance et des transformations dans la productivité primaire liés au réchauffement de l'eau (Adams et al., 2022;

Jeppesen et al., 2014). Ces transformations peuvent entraîner des décalages temporels entre les différents niveaux trophiques, par exemple entre la production du phytoplancton et l'abondance du zooplancton, perturbant alors la disponibilité des ressources alimentaires pour les niveaux supérieurs (Hébert et al., 2021). De plus, les modifications de la composition du phytoplancton, surtout la dominance accrue des cyanobactéries, peuvent altérer la qualité des ressources disponibles et changer les transferts d'énergie au sein du réseau trophique (Garner et al., 2025; Taranu et al., 2015). Ainsi, les réseaux trophiques apparaissent particulièrement sensibles aux changements des conditions physico-chimiques du milieu, qui influencent à la fois la structure des communautés et le fonctionnement global de l'écosystème.

La capacité d'adaptation des réseaux trophiques repose sur la diversité biologique et la complexité des interactions écologiques, qui permettent d'absorber certaines perturbations (Jeppesen et al., 2014; Nimma et al., 2025). Toutefois, cette capacité demeure restreinte lorsque plusieurs pressions s'exercent simultanément sur le système, en particulier le réchauffement, les apports en nutriments et les modifications hydrologiques. Cela peut réduire la résilience des écosystèmes aquatiques (Paquette, 2023; Woolway et al., 2022). Dans le lac Magog, cette dépendance aux conditions environnementales et aux interactions biologiques rend les réseaux trophiques particulièrement vulnérables aux perturbations. En effet, les réseaux trophiques sont très sensibles aux déséquilibres écologiques et leur capacité d'ajustement face à des changements rapides peut s'avérer limitée.

## **5.4 Vulnérabilité de la qualité de l'eau**

La qualité de l'eau est sensible aux modifications du cycle hydrologique et aux conditions climatiques, en raison de la forte connectivité entre les milieux aquatiques et leur bassin versant (Chikhaoui et al., 2015; Xia et al., 2014). Dans le cas du lac et de la rivière Magog, cette sensibilité se manifeste par une forte réactivité aux variations de température, de débit et de ruissellement. Ces facteurs influencent le transport et la concentration des nutriments, des sédiments et des contaminants (Atlas climatique du Canada, s. d.). Le réchauffement de l'eau et les épisodes de sécheresse ou de chaleur contribuent à augmenter la température de l'eau et à réduire l'oxygène dissous, tandis que les pluies intenses favorisent le ruissellement et les apports en nutriments (Graham et al., 2024; Jiang et al., 2024). De plus, les processus de stratification thermique renforcent ces dynamiques, qui limitent le mélange vertical et accentuent les épisodes d'hypoxie dans les milieux lacustres (Dahal et al., 2025; Woolway et al., 2022). La capacité d'adaptation repose principalement sur la gestion du bassin versant et sur la capacité du système à restreindre les apports de nutriments et de contaminants (Eekhout et al., 2018; Graham et al., 2024). Dans le bassin du lac et de la rivière Magog, cette capacité relève notamment du degré de pression anthropique et de la gestion des sources diffuses de pollution. Ces facteurs conditionnent la qualité de l'eau et sa résilience face aux perturbations. Toutefois, cette capacité demeure contrainte par la forte dépendance des milieux aquatiques aux apports externes et par la variabilité hydrologique, ce qui limite leur capacité d'ajustement face à des changements rapides. Ainsi, la vulnérabilité des écosystèmes

aquatiques s'explique par leur sensibilité aux perturbations climatiques et hydrologiques, combinée à une capacité d'adaptation tributaire des pressions exercées à l'échelle du bassin versant. Ces profils de vulnérabilité mettent en évidence le caractère interconnecté des impacts étudiés, où les modifications des conditions physico-chimiques influencent à la fois la qualité de l'eau, les communautés biologiques et le fonctionnement trophique des écosystèmes aquatiques.

## 6 SOLUTIONS D'ADAPTATION

L'analyse des solutions d'adaptation met en évidence la pertinence de privilégier une approche intégrée de gestion du bassin versant, combinée à des solutions fondées sur la nature (SfN)(figure 33). Cela permet de répondre aux impacts observés dans le lac et la rivière Magog. Cette approche permet d'agir directement sur les causes des perturbations, en particulier les apports en nutriments et les modifications hydrologiques, tout en intégrant les vulnérabilités à l'échelle du territoire et en mobilisant les acteurs dans un processus adaptatif (Lemieux et al., 2014).



**Figure 33 – Schéma explicatif des solutions fondées sur la nature (UICN Comité Français, s. d.) :** Cette figure illustre le rôle des solutions fondées sur la nature dans la gestion des enjeux environnementaux, en s'appuyant sur les fonctions des écosystèmes pour répondre aux défis climatiques et sociétaux. Ces approches permettent de concilier protection de la biodiversité, bien-être humain et

gestion durable du territoire, tout en générant des co-bénéfices et en renforçant la résilience face aux changements climatiques.

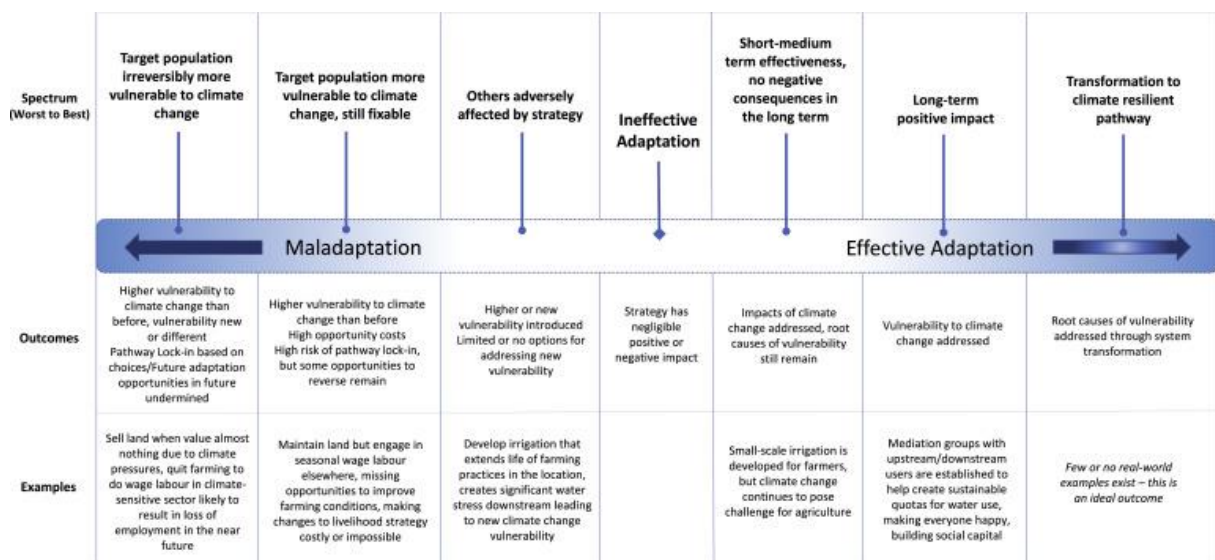
Dans un bassin versant connecté comme celui de la rivière Magog, l’approche assure une cohérence des interventions à différentes échelles spatiales. En outre, elle favorise aussi la génération de co-bénéfices, tels qu’en matière de biodiversité et de qualité de l’eau (Jones & Doberstein, 2022)(figure 34).

Co-benefits Scorecard I – Project Co-benefits Evaluation											
		Sacrifices	Hinders	Maintains	Improves	Expands	Not Applicable	Not Considered	Impact Score	Co-Benefit Weight	Impact * Weight
	<i>Impact Score Values</i>	-2	-1	0	1	2	0	-1		1-3	
<b>A</b>	<b>Climate Change Mitigation</b>										
A1	GHG emissions reduction										
A2	Carbon sequestration										
	<i>Weighted Impact Subtotal</i>										
	<i>Number of Applicable Co-benefits</i>										2
	<i>Climate Change Mitigation – Theme Impact Score</i>										
<b>B</b>	<b>Multi-Hazard Protection</b>										
B1	Downstream hazard mitigation										
B2	Additional hazard mitigation										
	<i>Weighted Impact Subtotal</i>										
	<i>Number of Applicable Co-benefits</i>										2
	<i>Multi-Hazard Protection – Theme Impact Score</i>										
<b>C</b>	<b>Human Health</b>										
C1	Aesthetics										
C2	Recreation										
C3	Livability										
	<i>Weighted Impact Subtotal</i>										
	<i>Number of Applicable Co-benefits</i>										3
	<i>Human Health – Theme Impact Score</i>										
<b>D</b>	<b>Economy</b>										
D1	Energy security										
D2	Livelihood and income										
D3	Food and water security										
	<i>Weighted Impact Subtotal</i>										
	<i>Number of Applicable Co-benefits</i>										3
	<i>Economics – Theme Impact Score</i>										
<b>E</b>	<b>Society &amp; Culture</b>										
E1	Equity and accessibility										
E2	Public engagement										
E3	Teaching and research										
E4	Cultural, heritage, or spiritual value										
E5	Institutional collaboration										
	<i>Weighted Impact Subtotal</i>										
	<i>Number of Applicable Co-benefits</i>										5
	<i>Society &amp; Culture – Theme Impact Score</i>										
<b>F</b>	<b>Environmental Health</b>										
F1	Biodiversity & habitat protection										
F2	Ecosystem services										
F3	Air, water, and soil quality										
	<i>Weighted Impact Subtotal</i>										
	<i>Number of Applicable Co-benefits</i>										3
	<i>Environmental Health – Theme Impact Score</i>										

Figure 34 – Grille d’évaluation des co-bénéfices des mesures d’adaptation (Jones & Doberstein, 2022) : Cette figure présente une grille d’analyse permettant d’évaluer les co-bénéfices associés aux mesures d’adaptation selon différentes dimensions, notamment climatiques, environnementales,

sociales et économiques. Elle repose sur une approche multicritère visant à apprécier les effets positifs ou négatifs d'une intervention sur plusieurs enjeux simultanément, en attribuant des scores en fonction de leur contribution. Cet outil permet ainsi de comparer les options d'adaptation et d'orienter la prise de décision vers des solutions générant des bénéfices multiples, en cohérence avec les principes d'approche intégrée et de solutions fondées sur la nature.

Elle s'inscrit également dans une logique de solution sans regret, en privilégiant des mesures flexibles, robustes face aux incertitudes climatiques et présentant un bon potentiel de coût-efficacité (Ommer et al., 2025). Cette robustesse est avant tout pertinente dans un contexte de variabilité hydrologique accrue (Chikhaoui et al., 2015; Johnson et al., 2022). À l'inverse, certaines approches plus techniques peuvent comporter des risques de maladaptation en aggravant la vulnérabilité à long terme (Higuera Roa et al., 2025; Schipper, 2020)(figure 35), ce qui est un point de vigilance.



**Figure 35 – Continuum maladaptation et adaptation efficace (Schipper, 2020) :** Cette figure illustre le continuum entre maladaptation et adaptation efficace, en fonction des effets des mesures sur la vulnérabilité aux changements climatiques. Elle montre que certaines interventions peuvent, à court terme, sembler bénéfiques tout en augmentant la vulnérabilité à long terme (maladaptation), notamment lorsqu'elles créent des dépendances ou ne traitent pas les causes profondes. À l'inverse, les stratégies d'adaptation efficaces sont celles qui réduisent durablement la vulnérabilité, génèrent des bénéfices à long terme et contribuent à des transformations structurelles du système.

Ainsi, les solutions sont sélectionnées selon quatre critères : (1) co-bénéfices, (2) coût-efficacité, (3) robustesse face aux incertitudes climatiques et (4) faible risque de maladaptation. Leur mise en œuvre

nécessite une coordination entre les acteurs du bassin versant et un arrimage avec les outils de planification existants. Ces critères impliquent des arbitrages entre efficacité à court terme et robustesse à long terme, justifiant une approche combinée et évolutive. Dans cette logique, les solutions sont structurées selon trois leviers complémentaires : la réduction des apports en nutriments à la source, la gestion hydrologique tendant à limiter leur transport, et la restauration écologique visant à renforcer la résilience du système aquatique.

## 6.1 Réduction des apports de nutriments à la source

Pour commencer, la réduction des apports en nutriments constitue l'axe d'intervention prioritaire pour répondre aux impacts dans le lac et la rivière Magog, notamment la prolifération des cyanobactéries et la dégradation du réseau trophique (figure 36). En agissant directement sur la cause principale des perturbations, ce levier est surtout structurant dans des systèmes fortement influencés par les apports issus du bassin versant, où le phosphore et l'azote jouent un rôle central dans les dynamiques d'eutrophisation (Rigosi et al., 2014; Wang et al., 2025). Dans un contexte marqué par la coexistence de pressions agricoles et urbaines (COGESAF, 2011), ainsi que par l'intensification du ruissellement liée aux changements climatiques (Zhang et al., s. d.), la réduction des nutriments demeure indispensable malgré l'influence des conditions climatiques sur les blooms (Favot et al., 2023; Paerl & Otten, 2013). À noter qu'une priorisation spatiale des interventions, ciblant les sous-bassins les plus contributifs, apparaît essentielle pour maximiser leur efficacité.

Solutions	Impacts concernés	Critères			
		Co-bénéfices	Coût-efficacité	Robustesse	Maladaptation
<b>Optimisation de la fertilisation</b>	Cyanobactéries, qualité de l'eau, réseau trophique	Réduction des apports diffus agricoles dans le bassin versant de la rivière Magog, amélioration des sols	Élevée, particulièrement dans les zones agricoles contributrices du bassin	Moyenne : efficacité réduite lors d'événements de fortes pluies en Estrie	Risque si mesures non adaptées aux périodes de ruissellement intense

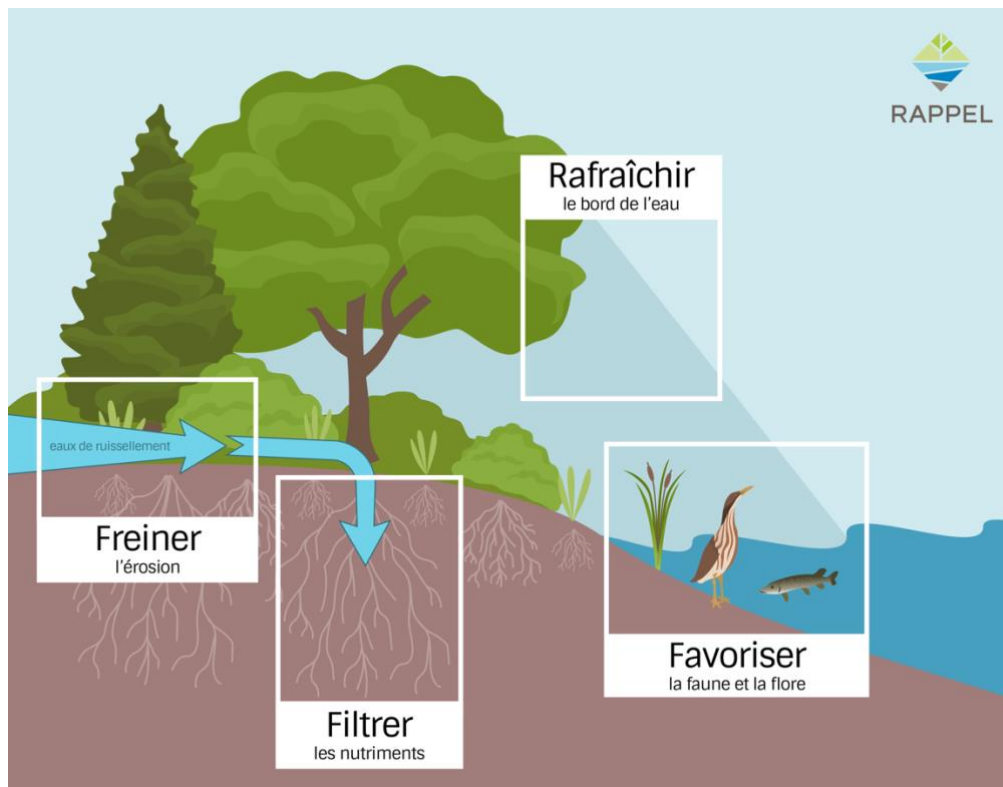
<b>Cultures de couverture</b>	Qualité de l'eau, réseau trophique	Réduction de l'érosion dans les secteurs agricoles du bassin, amélioration de la structure des sols	Élevée à long terme dans les zones sensibles à l'érosion	Bonne, mais dépend des conditions climatiques locales	Risque limité
<b>Bandes riveraines élargies</b>	Cyanobactéries, qualité de l'eau, poissons	Filtration des nutriments avant leur entrée dans la rivière Magog et le lac, stabilisation des berges	Élevée si priorisée le long des tributaires les plus contributifs	Bonne, mais efficacité variable lors de crues intenses ou en contexte de gel-dégel	Risque si largeur insuffisante ou implantation discontinue

*Figure 36 – Tableau synthèse des mesures d'adaptation pour la réduction des apports en nutriments à la source*

Plusieurs pratiques agricoles permettent d'agir à la source de cet apport en nutriment. L'optimisation des intrants, l'ajustement des fertilisants, l'implantation de cultures de couverture et la réduction du travail du sol permettent de diminuer les flux de nutriments et de sédiments, tout en générant des co-bénéfices sur la santé des sols (Johnson et al., 2022; Withers et al., 2014). Leur efficacité demeure globalement élevée dans un contexte de changements climatiques, bien qu'en partie atténuée par l'augmentation du ruissellement (Mehdi et al., 2015), ce qui souligne un enjeu de robustesse face aux conditions futures. Cependant, leur déploiement dépend de leur adoption à grande échelle, ce qui nécessite des mécanismes d'accompagnement adaptés. Au Québec, des initiatives comme les plans d'accompagnement agroenvironnemental (PAA) ou les clubs-conseils agricoles permettent d'appuyer l'adoption de ces pratiques, en combinant soutien financier et expertise technique (MAPAQ, s. d.-b). Concrètement, ces mesures peuvent être mises en œuvre tout en ciblant les exploitations situées dans les sous-bassins les plus contributifs afin d'augmenter leur coût-efficacité. Par ailleurs, la littérature souligne que ces approches incrémentales peuvent atteindre certaines limites face à des changements climatiques plus marqués, ce qui constitue un risque de maladaptation si elles ne sont pas intégrées dans une planification à long terme (Bartlett & Dedekorkut-Howes, 2022).

En complément, les bandes riveraines jouent un rôle déterminant en interceptant les nutriments avant leur entrée dans les cours d'eau par des processus de filtration et de sédimentation (Dosskey et al., 2010; Mayer et al., 2007). En diminuant le ruissellement et en favorisant l'infiltration, elles limitent les apports diffus issus des zones agricoles adjacentes (Melland et al., 2018)(figure 37). En tant que solutions

fondées sur la nature, elles contribuent également à améliorer la biodiversité et à réguler la température de l'eau (Cole et al., 2020), générant ainsi des co-bénéfices multiples et renforçant la résilience des systèmes hydriques (González-García et al., 2025). Leur efficacité dépend toutefois de leur largeur, de leur continuité et des conditions hydrologiques, avec des largeurs minimales de 10 à 15 m recommandées pour assurer une rétention efficace (Mayer et al., 2007), ce qui conditionne leur performance et leur coût-efficacité. De plus, en climat froid ou lors d'événements extrêmes, elles peuvent devenir une source de phosphore dissous, ce qui représente un risque de maladaptation si elles sont mal dimensionnées (Nsenga Kumwimba et al., 2023). Leur mise en œuvre peut s'appuyer sur des cadres réglementaires existants (MELCCFP, s. d.), renforçant leur faisabilité à l'échelle du bassin versant.



**Figure 37 – Schéma sur le rôle des bandes riveraines (RAPPEL, s. d.) :** Cette figure illustre les fonctions clés des bandes riveraines dans la protection des milieux aquatiques. En interceptant le ruissellement, elles permettent de filtrer les nutriments, de limiter l'érosion des sols et de réduire les apports vers les cours d'eau. Elles contribuent également au maintien de la biodiversité et à la régulation thermique, en rafraîchissant l'eau. Ces fonctions en font une mesure particulièrement efficace pour réduire les pressions à la source dans le bassin versant du lac et de la rivière Magog.

L'exemple du lac Érié met en évidence l'importance d'une approche coordonnée à l'échelle du bassin versant. Des objectifs de réduction d'environ 40 % des apports en phosphore ont été mis en place afin de limiter les blooms de cyanobactéries (Scavia et al., 2014). Malgré ces efforts, la persistance de blooms souligne l'influence déterminante des conditions climatiques, notamment les précipitations intenses et les épisodes de ruissellement, ainsi que la nécessité d'adapter les mesures dans le temps (Stumpf et al., 2016). Cet exemple illustre que des actions isolées ou sectorielles sont insuffisantes et doivent être conjuguées dans une approche intégrée à l'échelle du bassin versant. Par conséquent, dans le contexte du lac et de la rivière Magog, ces résultats confirment la pertinence de privilégier des solutions « sans regret », combinant co-bénéfices, robustesse et coût-efficacité lorsqu'elles sont ciblées spatialement. Leur efficacité repose toutefois sur une mise en œuvre coordonnée et une adaptation continue aux conditions futures, ce qui renforce la nécessité d'une gestion intégrée des ressources en eau (Sebesvari et al., 2017).

## 6.2 Gestion hydrologique pour limiter le transport de nutriments

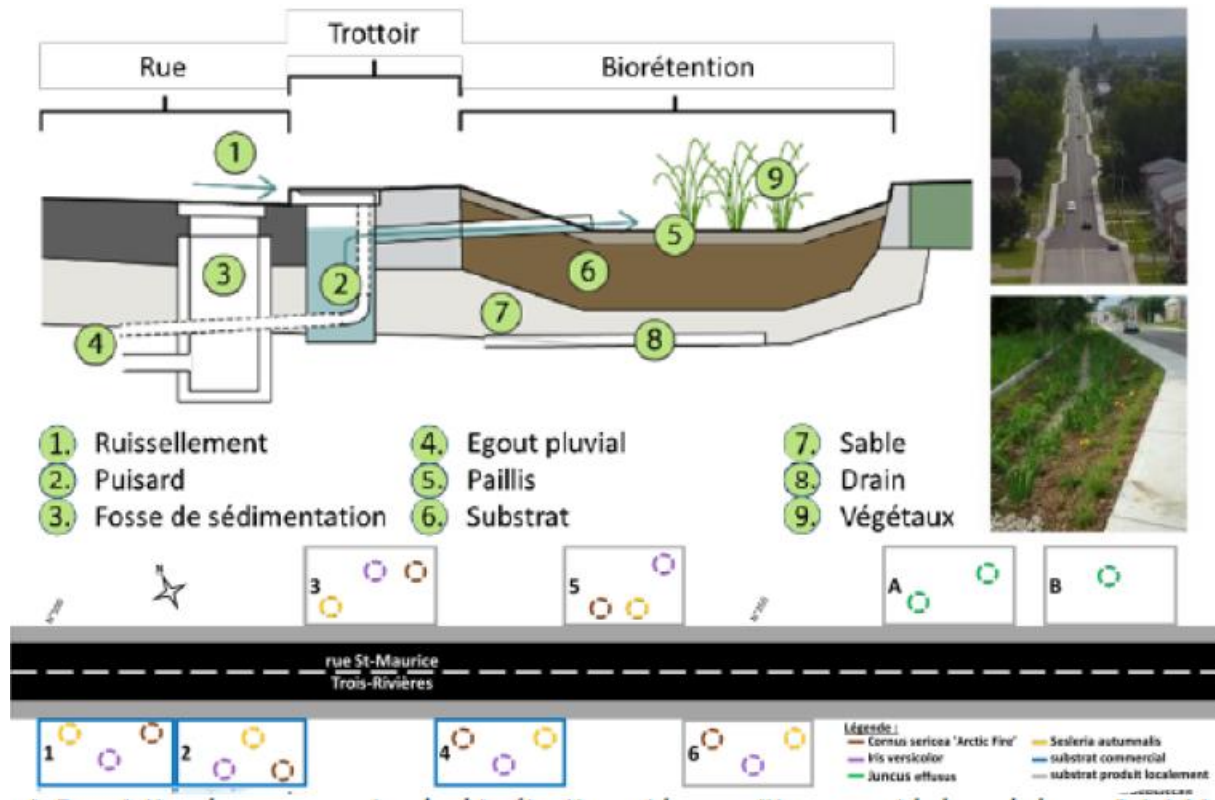
La gestion hydrologique et l'adaptation des infrastructures constituent un axe d'intervention complémentaire visant à limiter le transport des nutriments, en agissant sur les processus hydrologiques amplifiés par les changements climatiques. L'intensification des précipitations et des événements extrêmes augmente le ruissellement et l'érosion (Caretta et al., 2022), favorisant le transfert rapide de nutriments vers les milieux aquatiques (Eekhout et al., 2018; Rigosi et al., 2014). Dans le bassin versant de la rivière Magog, caractérisé par une forte connectivité entre milieux agricoles et urbains, ces dynamiques accentuent l'accroissement des algues, l'altération de la qualité de l'eau et les déséquilibres du réseau trophique. Cela justifie des interventions visant à ralentir les écoulements et à reconnecter les processus naturels (figure 38).

Solutions	Impacts concernés	Critères			
		Co-bénéfices	Coût-efficacité	Robustesse	Maladaptation
<b>Noues végétalisées</b>	Qualité de l'eau, cyanobactéries	Réduction du ruissellement urbain dans les secteurs urbanisés de Magog, amélioration de la qualité des eaux rejetées	Modérée à élevée à long terme en milieu urbain	Bonne si dimensionnées pour les précipitations extrêmes en Estrie	Risque si sous-dimensionnement face aux épisodes pluvieux intenses

<b>Bassins de rétention</b>	Qualité de l'eau, cyanobactéries	Réduction des apports ponctuels lors d'événements de pluie dans le bassin versant	Modérée (investissements initiaux élevés)	Bonne si intégrée à une stratégie à l'échelle du bassin	Risque de dépendance à des infrastructures rigides
<b>Surfaces perméables</b>	Qualité de l'eau	Réduction du ruissellement dans les zones urbanisées de Magog, infiltration locale	Élevée à long terme	Bonne face à la variabilité hydrologique	Risque faible
<b>Zones tampons humides</b>	Cyanobactéries, qualité de l'eau, réseau trophique	Rétention des nutriments en amont du lac Magog, soutien à la biodiversité	Élevée à long terme	Très bonne dans un contexte de variabilité hydrologique	Risque faible

**Figure 38 - Tableau synthèse des mesures d'adaptation pour la réduction des apports en nutriments à la source**

Dans ce contexte, la gestion à la source des eaux pluviales apparaît pertinente en milieu urbain, en particulier dans les secteurs de Magog marqués par une forte imperméabilisation du sol (Côté, 2021). Concrètement, cela se traduit par l'implantation de bassins de rétention et d'infiltration, de noues végétalisées (bioswales) et de surfaces perméables dans les stationnements et voiries (figure 39). Ces installations permettent de diminuer les volumes de ruissellement, de favoriser la rétention des eaux pluviales et d'amoindrir le transport des nutriments vers les cours d'eau (Ahiablame et al., 2012; Fletcher et al., 2015). Ces approches, regroupées sous les systèmes de drainage urbain durable (SuDS), participent aussi à atténuer les pics de débit et à améliorer la qualité de l'eau (Charlesworth & Booth, 2016). De plus, en réduisant les pics de débit, ces dispositifs limitent l'érosion des berges et contribuent à la préservation des habitats aquatiques (Walsh et al., 2012). Leur mise en œuvre peut être intégrée dans les règlements d'urbanisme ou les plans de gestion des eaux pluviales municipaux (MDDLECC, s. d.), surtout lors de projets de développement ou de requalification urbaine (MDDEFP & MAMROT, s. d.).



**Figure 39 – Schéma sur la description des composantes des biorétentions et leur le positionnement le long d'une rue à Trois-Rivières (Ouranos, s. d.) :** Cette figure illustre le fonctionnement d'un système de biorétention implanté le long d'une rue à Trois-Rivières. Elle montre comment les eaux de ruissellement provenant des surfaces imperméables (rue, trottoir) sont captées, filtrées et infiltrées à travers différentes couches (substrat, sable, drain) et une végétation adaptée. Ce type d'infrastructure permet de réduire les volumes de ruissellement, de limiter les apports en polluants vers les milieux aquatiques et de favoriser une gestion durable des eaux pluviales en milieu urbain.

Toutefois, leur efficacité dépend également de leur intégration à l'échelle du quartier ou du sous-bassin, ce qui rend indispensable une planification à cette échelle afin d'assurer la cohérence des interventions. En milieu rural, qui occupe une part importante du bassin versant de la rivière Magog, l'adaptation des ouvrages hydrauliques et des systèmes de drainage constitue un complément essentiel pour réguler les débits et limiter les transferts de polluants. L'ajustement des ponceaux, la gestion des fossés agricoles et l'intégration de zones tampons humides permettent de ralentir les écoulements et de réduire les apports en nutriments vers le lac (Blann et al., 2009; MAPAQ, s. d.-a). Par exemple, les milieux humides naturels ou construits jouent un rôle considérable en stockant l'eau et en favorisant la sédimentation du phosphore, tout en offrant des co-bénéfices en matière de biodiversité (Vymazal, 2011). Ces solutions fondées sur la nature présentent également une bonne robustesse face aux incertitudes climatiques, en raison de leur capacité à s'adapter aux variations hydrologiques (Caretta et al., 2022; Vymazal, 2011).

Malgré ces bénéfices, l'efficacité de ces interventions dépend beaucoup de leur dimensionnement et de leur intégration à l'échelle du bassin versant. Dans le contexte de Magog, des infrastructures sous-dimensionnées ou conçues selon des conditions climatiques passées peuvent vite devenir inefficaces face à l'intensification des précipitations (Bartlett & Dedekorkut-Howes, 2022; Johnson et al., 2022). Elles peuvent même entraîner des situations de maladaptation en déplaçant les impacts en aval (Eekhout et al., 2018; Schipper, 2020). À l'inverse, des infrastructures bien implantées offrent une plus grande robustesse et génèrent des co-bénéfices multiples, en particulier en matière de biodiversité et de régulation hydrologique (Johnson et al., 2022; Vymazal, 2011). Leur coût-efficacité est généralement favorable à long terme et s'inscrit dans une logique « sans regret ». Toutefois leur mise en œuvre peut être contrainte par la disponibilité de l'espace en milieu urbain et par des coûts initiaux plus élevés (Johnson et al., 2022; Ommer et al., 2025).

Par ailleurs, leur performance repose sur un entretien régulier, sans lequel leur efficacité peut diminuer, augmentant aussi le risque de maladaptation (Ahiablame et al., 2012; MDDEFP & MAMROT, s. d.). À titre d'exemple, les bassins de rétention et les dispositifs d'infiltration nécessitent un entretien régulier (curage, gestion de la végétation, inspection des structures) afin de maintenir leur efficacité hydraulique et leur capacité de rétention des polluants (MDDLECC, s. d.). Dans l'ensemble, ces mesures apparaissent particulièrement pertinentes dans le contexte du lac et de la rivière Magog. Elles permettent de réduire les pressions liées au transport des nutriments tout en offrant des co-bénéfices importants, une bonne robustesse face aux changements climatiques et un coût-efficacité favorable à long terme. Elles demeurent pertinentes lorsqu'elles sont mises en œuvre de manière coordonnée à l'échelle du bassin versant. Néanmoins, certaines infrastructures peuvent entrer en compétition pour l'usage de l'espace ou engendrer des coûts d'implantation initiaux élevés, ce qui peut constituer un frein à leur déploiement à grande échelle.

### **6.3 Restauration écologique et renforcement de la résilience du système aquatique**

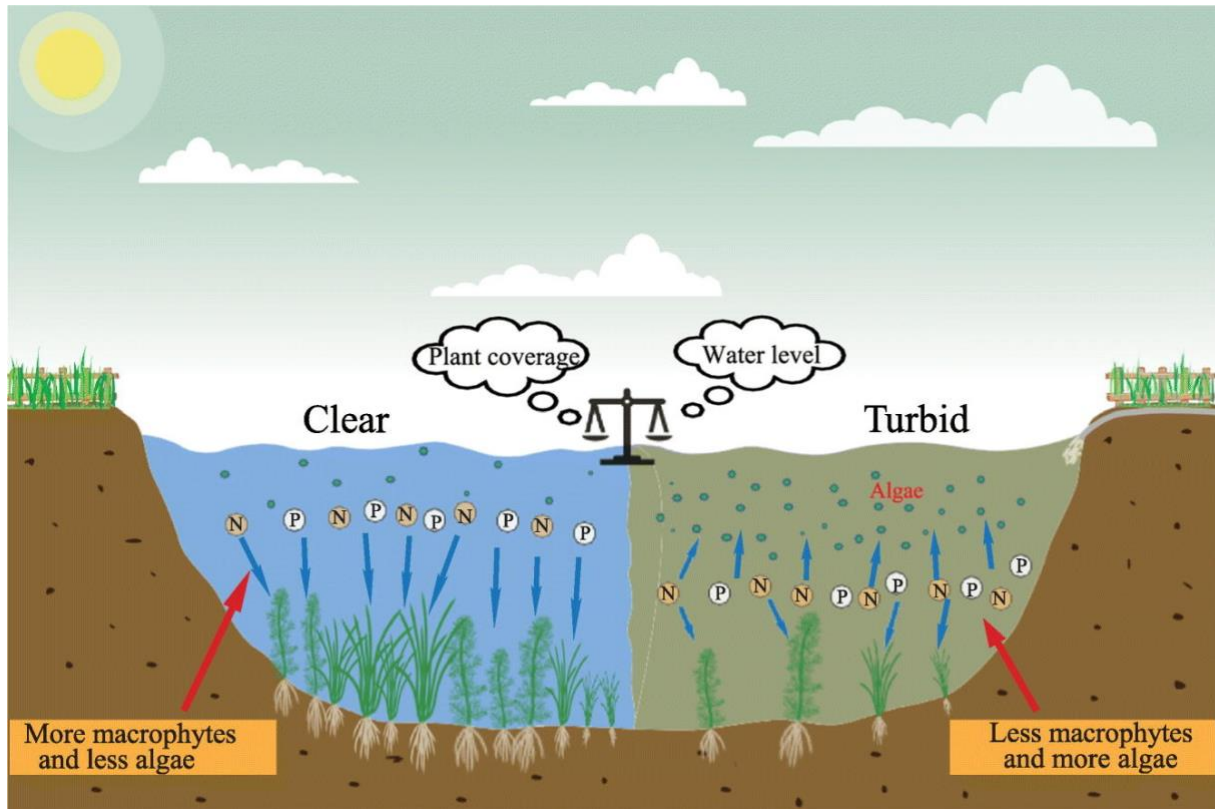
La restauration écologique du lac et de la rivière Magog constitue un dernier axe essentiel pour atténuer les impacts liés à la prolifération des cyanobactéries, à la modification des communautés de poissons et aux déséquilibres du réseau trophique (figure 40). Contrairement aux mesures agissant sur les sources ou le transport des nutriments, ces approches ciblent le fonctionnement écologique du système, en améliorant sa capacité d'autorégulation. Dans les systèmes eutrophes, la dégradation des habitats et la simplification, des réseaux trophiques favorisent les blooms algaux et les déséquilibres biologiques (Jeppesen et al., 2014; Rigosi et al., 2014). Les changements climatiques accentuent ces dynamiques, participant à une perte de résilience (Hautier et al., 2015; Woolway et al., 2022). Dans le contexte du lac et de la rivière Magog, ces interventions doivent être priorisées dans les secteurs les plus dégradés, en particulier les zones littorales anthropisées ou soumises à des apports élevés en nutriments (MELCC, 2021), ce qui permet d'en maximiser le coût-efficacité.

Solutions	Impacts concernés	Critères			
		Co-bénéfices	Coût-efficacité	Robustesse	Maladaptation
<b>Restauration des macrophytes</b>	Cyanobactéries, réseau trophique, qualité de l'eau	Amélioration de la qualité de l'eau du lac Magog, stabilisation des sédiments littoraux	Faible à court terme	Bonne si les apports en nutriments sont contrôlés	Risque si conditions trophiques trop dégradées
<b>Restauration des habitats littoraux</b>	Poissons, biodiversité, réseau trophique	Amélioration des habitats dans les zones littorales anthropisées du lac	Modérée	Bonne à long terme	Risque faible
<b>Gestion des populations de poissons</b>	Réseau trophique, cyanobactéries	Rééquilibrage trophique dans le lac Magog	Variable	Incertaine	Risque élevé si interventions mal calibrées
<b>Protection d'habitats refuges</b>	Poissons, biodiversité	Maintien des espèces sensibles dans les zones profondes ou ombragées du lac et de la rivière	Élevée à long terme	Très bonne face au réchauffement	Risque faible

*Figure 40 – Tableau synthèse des mesures d'adaptation pour la restauration écologique et résilience*

La restauration des macrophytes et des habitats littoraux constitue une mesure centrale (figure 41). Les plantes aquatiques jouent un rôle clé dans la régulation des nutriments en les assimilant directement, tout en stabilisant les sédiments et en limitant leur remise en suspension, ce qui concourt à réduire la turbidité et les conditions favorables aux cyanobactéries (Hilt et al., 2018). Elles encouragent aussi le maintien d'états d'eau claire en entrant en compétition avec le phytoplancton (Jeppesen et al., 2014). De plus, les zones littorales incarnent un rôle structurant pour la biodiversité et les fonctions écologiques du système (Davidson et al., 2018; Strayer & Findlay, 2010). Elles génèrent ainsi des co-bénéfices considérables au-delà de la seule amélioration de la qualité de l'eau. Concrètement, ces interventions incluent la replantation de macrophytes indigènes, la stabilisation des substrats et la protection des herbiers, en particulier par la limitation de certains usages (ex. activités nautiques dans certaines zones sensibles)(Hilt et al., 2018; MELCC, 2021). Leur efficacité dépend toutefois de seuils écologiques,

surtout en lien avec la turbidité et les concentrations en nutriments, ce qui représente une limite importante en termes de robustesse dans des contextes fortement dégradés.



**Figure 41 – Schéma sur le rôle des macrophytes dans la restauration des lacs eutrophes (Chao et al., 2022) :** Cette figure illustre les dynamiques écologiques d'un lac eutrophe en opposant un état clair, dominé par les macrophytes, à un état turbide dominé par les algues. Elle met en évidence le rôle central des plantes aquatiques dans la régulation des nutriments (azote et phosphore), la stabilisation des sédiments et la limitation de la croissance algale. La restauration des macrophytes apparaît ainsi comme une mesure clé permettant de favoriser un retour vers un état d'eau claire, en renforçant les processus d'autorégulation du système et en réduisant les conditions propices aux blooms algaux

Le rééquilibrage du réseau trophique constitue un autre levier permettant de renforcer les contrôles biologiques sur les algues. Les changements dans la composition des communautés de poissons sous l'effet du réchauffement, peuvent favoriser certaines espèces au détriment d'autres, entraînant des cascades trophiques qui influencent directement la dynamique du phytoplancton (Comte et al., 2013; Woolway et al., 2022). À l'inverse, le maintien d'une structure trophique diversifiée permet d'augmenter les contrôles biologiques exercés sur les algues et de stabiliser le système (Jeppesen et al., 2014). Sur le plan opérationnel, ces approches peuvent inclure des interventions ciblées sur certaines espèces (ex. gestion des populations de poissons dominants), mais nécessitent une expertise écologique approfondie

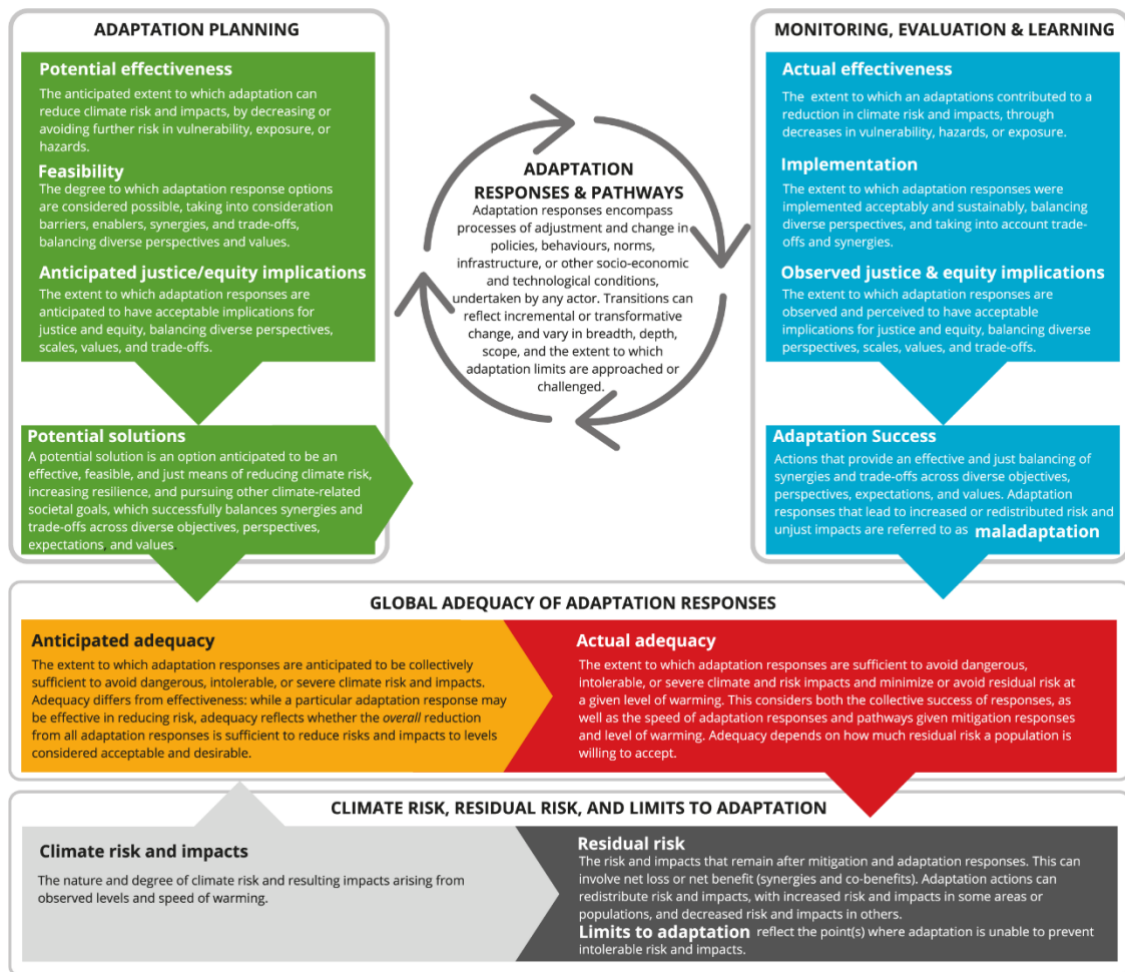
afin d'éviter des effets non souhaités sur les équilibres du système (Jeppesen et al., 2014). Des stratégies complémentaires consistent également à identifier et protéger des habitats refuges (zones profondes, secteurs ombragés ou végétalisés), permettant de soutenir la persistance des espèces face aux perturbations climatiques et de renforcer la résilience des communautés aquatiques (Walters et al., 2024), participant ainsi à la robustesse du système envers les changements climatiques.

Ces approches présentent des co-bénéfices importants en matière de biodiversité et de qualité des habitats, tout en contribuant à la robustesse du système face aux changements climatiques. Toutefois, leur efficacité dépend considérablement des conditions initiales et des délais de réponse, souvent longs, ce qui peut limiter leur acceptabilité sociale (OECD, s. d.) et réduire leur coût-efficacité à court terme. Elles comportent également des incertitudes liées à la complexité des processus écologiques, ce qui peut entraîner des résultats variables à court terme (Bartlett & Dedekorkut-Howes, 2022; Hautier et al., 2015), soulignant la nécessité d'une approche adaptative pour restreindre les risques de maladaptation. Ainsi, la restauration écologique doit être envisagée comme un levier de renforcement à long terme, complémentaire aux mesures de réduction des nutriments et de gestion hydrologique. Lorsqu'elles sont intégrées à l'échelle du bassin versant, ces solutions offrent une bonne robustesse, des co-bénéfices significatifs et une contribution durable à la résilience du système, tout en exigeant un suivi écologique pour ajuster les actions dans une logique de gestion adaptative (Hautier et al., 2015; Jeppesen et al., 2014).

## **7 RECOMMANDATIONS POUR LA MISE EN ŒUVRE**

La priorisation des mesures d'adaptation repose sur une approche de gestion des risques climatiques considérant l'adaptation comme un processus itératif intégrant évaluation, mise en œuvre, suivi et ajustement (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023a). Dans cette perspective, les décisions ne sont pas linéaires, mais s'inscrivent dans une dynamique d'apprentissage continu, où les interventions sont ajustées en fonction des résultats observés et de l'évolution des conditions climatiques (figure 42). Les solutions ont ainsi été hiérarchisées selon quatre critères : les co-bénéfices, la coût-efficacité, la robustesse face aux incertitudes climatiques et le faible risque de maladaptation, tout en tenant compte de leur capacité à agir sur les causes des perturbations et de leur faisabilité à l'échelle du bassin versant.

Assessing adaptation solutions and success



**Figure 42 – Processus d’évaluation et de mise en œuvre des solutions d’adaptation (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023b) :** Cette figure illustre le processus d’adaptation comme une démarche itérative intégrant l’évaluation, la mise en œuvre, le suivi et l’ajustement des mesures. Elle met en évidence que les solutions doivent être évaluées en fonction de leur efficacité, de leur faisabilité et de leur équité, et que leur succès repose sur un processus continu d’apprentissage. Cette approche est particulièrement pertinente dans le contexte du lac et de la rivière Magog, où les incertitudes climatiques et le manque de données locales nécessitent un ajustement progressif des interventions.

La méthodologie de priorisation repose sur une logique d’intervention séquentielle et complémentaire, inspirée des approches de gestion intégrée du risque. Les mesures agissant à la source sont privilégiées en premier lieu, puisqu’elles permettent de réduire directement les pressions à l’origine des impacts, tout en offrant un meilleur coût-efficacité à long terme. Les mesures agissant sur le transport des pressions sont ensuite mobilisées afin de limiter leur propagation dans le système. Enfin, les mesures

agissant sur le fonctionnement écologique sont considérées comme des interventions de renforcement, dont les effets sont généralement plus diffus et à plus long terme. Cette hiérarchisation permet d'éviter des interventions inefficaces ou redondantes, tout en maximisant la complémentarité entre les solutions. Dans ce contexte, trois champs d'actions prioritaires se dégagent.

En premier lieu, la réduction des apports en nutriments à la source constitue la priorité d'intervention, notamment par l'optimisation des pratiques agricoles et l'implantation de bandes riveraines élargies. Ces mesures permettent d'agir directement sur la cause principale des impacts, tout en présentant un fort coût-efficacité lorsqu'elles sont ciblées spatialement et en générant des co-bénéfices importants. En second lieu, la gestion hydrologique intégrée, notamment par le déploiement d'infrastructures en milieu urbain et l'aménagement de zones tampons en milieu rural, permet de limiter le transport des nutriments et d'atténuer les effets des événements extrêmes. Enfin, la restauration écologique des habitats littoraux et du réseau trophique constitue un levier complémentaire à plus long terme, essentiel pour renforcer la résilience du système, bien que son efficacité soit conditionnée par des délais plus longs et des incertitudes plus élevées.

La mise en œuvre de ces mesures doit s'accompagner d'un dispositif de suivi et d'évaluation, essentiel dans un contexte d'incertitude climatique et de manque de données locales (Goodwin & Olazabal, 2025). Ce suivi doit reposer sur des indicateurs simples et réalistes à collecter, tels que les concentrations en phosphore et en azote, la fréquence des blooms de cyanobactéries, la superficie des bandes riveraines ou la proportion de surfaces perméables en milieu urbain. Des indicateurs écologiques, comme la diversité des communautés de poissons ou la couverture en macrophytes, permettent également d'évaluer l'état du système et l'efficacité des mesures. Ce suivi s'inscrit dans une logique de gestion adaptative, permettant d'ajuster les interventions en fonction des résultats observés. En outre, la définition de seuils de qualité de l'eau apparaît également essentielle pour assurer la protection de la biodiversité aquatique. Ces seuils constituent des repères pour évaluer l'efficacité des mesures de restauration (Menone et al., 2022).

Pour finir, la réussite de la mise en œuvre repose sur plusieurs conditions clés. Elle nécessite une coordination entre les acteurs du bassin versant et un arrimage avec les outils de planification existants, afin d'éviter des interventions fragmentées. De plus, l'efficacité de ces mesures repose sur leur adoption à grande échelle, ce qui peut constituer un défi en raison de contraintes économiques et sociales. Cela souligne l'importance d'intégrer des incitatifs financiers, des mécanismes de sensibilisation et des outils de gouvernance adaptés afin de favoriser leur mise en œuvre à l'échelle du bassin versant (OECD, 2012). L'intégration d'un processus itératif de décision et d'apprentissage est essentielle pour faire face aux incertitudes et améliorer l'efficacité des actions dans le temps (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023a). Dans cette perspective, une approche intégrée, flexible et évolutive apparaît indispensable pour assurer une réduction durable des risques climatiques dans le lac et la rivière Magog.

## CONCLUSION

L'analyse du lac et de la rivière Magog a permis de mettre en évidence la forte interdépendance entre les aléas climatiques, les dynamiques écologiques et les pressions anthropiques à l'échelle du bassin versant. En s'appuyant sur le cadre conceptuel du risque climatique, ce travail a permis de structurer l'analyse des aléas, des impacts et des profils de vulnérabilité, mettant en évidence la sensibilité particulière des écosystèmes aquatiques aux apports en nutriments, aux modifications hydrologiques et au réchauffement de l'eau. Ces interactions expliquent l'intensification attendue de phénomènes, tels que les blooms de cyanobactéries, la transformation des communautés de poissons et l'altération du fonctionnement trophique. Dans ce contexte, les solutions proposées reposent sur une approche intégrée combinant la réduction des apports en nutriments, la gestion hydrologique et la restauration écologique. Cette structuration permet d'agir à la fois sur les causes, les mécanismes de propagation et les effets des perturbations. L'analyse a également montré que les mesures les plus pertinentes sont celles qui présentent des co-bénéfices, une bonne robustesse face aux incertitudes climatiques et un faible risque de maladaptation, tout en étant adaptées au contexte spécifique du bassin versant de la rivière Magog. La priorisation des interventions met ainsi en évidence le rôle central des actions à la source, complétées par des mesures de gestion et de restauration à plus long terme. La mise en œuvre de ces recommandations repose toutefois sur plusieurs conditions déterminantes. Elle nécessite une coordination entre les acteurs du territoire, un arrimage avec les outils de planification existants et une capacité à déployer les mesures à une échelle suffisante pour en assurer l'efficacité. L'intégration d'un suivi basé sur des indicateurs simples et pertinents, dans une logique de gestion adaptative, apparaît également essentielle pour ajuster les actions dans le temps et faire face aux incertitudes climatiques. Sans ces conditions, les interventions risquent de demeurer fragmentées et moins efficaces. Ainsi, au-delà des solutions identifiées, ce travail souligne que l'enjeu principal réside dans la capacité à agir de manière cohérente, coordonnée et évolutive à l'échelle du bassin versant. Dans un contexte de changements climatiques, cette approche constitue un levier essentiel pour préserver durablement la qualité de l'eau et la résilience des écosystèmes du lac et de la rivière Magog. Elle ouvre également la voie à une réflexion plus large sur l'intégration conjointe de la gestion de la qualité et de la quantité de l'eau, désormais reconnue comme un enjeu central pour l'adaptation des systèmes hydriques (Baccour et al., 2024). L'impact des changements climatiques sur l'usage récréotouristique du lac et de la rivière Magog serait également à considérer (annexe 1).

## BIBLIOGRAPHIE

- Action lac Magog. (s. d.). *Le lac et son bassin versant*. Action lac Magog. Consulté 29 janvier 2026, à l'adresse <https://www.actionlacmagog.ca/le-lac-et-son-bassin-versant/>
- Adams, H., Ye, J., Persaud, B., Slowinski, S., Kheyrollah Pour, H., & Van Cappellen, P. (2022). Rates and timing of chlorophyll-a increases and related environmental variables in global temperate and cold-temperate lakes. *Earth System Science Data*. <https://doi.org/10.5194/essd-14-5139-2022>
- Ahiablame, L. M., Engel, B. A., & Chaubey, I. (2012). Effectiveness of Low Impact Development Practices : Literature Review and Suggestions for Future Research. *Water, Air, & Soil Pollution*, 223(7), 4253-4273. <https://doi.org/10.1007/s11270-012-1189-2>
- Alofs, K. M., Jackson, D. A., & Lester, N. P. (2014). Ontario freshwater fishes demonstrate differing range-boundary shifts in a warming climate. *Diversity and Distributions*, 20(2), 123-136. <https://doi.org/10.1111/ddi.12130>
- Aquaportail, A. (2023). *Bloom : Définition et explications*. AquaPortail. <https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/422/bloom>
- Atlas climatique du Canada. (s. d.). *Maladies hydriques et changements climatiques*. Consulté 13 avril 2026, à l'adresse <https://atlasclimatique.ca/maladies-hydriques-et-changements-climatiques>
- Baccour, S., Goelema, G., Kahil, T., Albiac, J., van Vliet, M. T. H., Zhu, X., & Stokal, M. (2024). Water quality management could halve future water scarcity cost-effectively in the Pearl River Basin. *Nature Communications*, 15(1), 5669. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-49929-z>
- Barbarossa, V., Bosmans, J., Wanders, N., King, H., Bierkens, M., Huijbregts, M., & Schipper, A. (2021). Threats of global warming to the world's freshwater fishes. *Nature Communications*, 12. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21655-w>
- Bartlett, J., & Dedekorkut-Howes, A. (2022). Adaptation strategies for climate change impacts on water quality : A systematic review of the literature. *Journal of Water and Climate Change*, 14, 651-675. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.279>

- Blann, K. L., Anderson, J. L., Sands, G. R., & Vondracek, B. (2009). Effects of Agricultural Drainage on Aquatic Ecosystems : A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 39(11), 909-1001. <https://doi.org/10.1080/10643380801977966>
- Boulanger, Y., Puigdevall, J. P., Bélisle, A. C., Bergeron, Y., Brice, M.-H., Cyr, D., De Grandpré, L., Fortin, D., Gauthier, S., Grondin, P., Labadie, G., Leblond, M., Marchand, M., Splawinski, T. B., St-Laurent, M.-H., Thiffault, E., Tremblay, J. A., & Yamasaki, S. H. (2023). A regional integrated assessment of the impacts of climate change and of the potential adaptation avenues for Quebec's forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 53(8), 556-578. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2022-0282>
- Caretta, M. A., Mukherji, A., Arfanuzzaman, M., Betts, R. A., Gelfan, A., Hirabayashi, Y., Lissner, T. K., Liu, J., Lopez Gunn, E., Morgan, R., Mwangi, ., S. and, & Supratid, S. (2022). *Water. In : Climate Change 2022 : Impacts, Adaptation and Vulnerability*. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.006>
- Chao, C., Lv, T., Wang, L., Li, Y., Han, C., Yu, W., Yan, Z., Ma, X., Zhao, H., Zuo, Z., Zhang, C., Tao, M., Yu, D., & Liu, C. (2022). The spatiotemporal characteristics of water quality and phytoplankton community in a shallow eutrophic lake : Implications for submerged vegetation restoration. *Science of The Total Environment*, 821, 153460. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153460>
- Charlesworth, S. M., & Booth, C. A. (Éds.). (2016). *Sustainable Surface Water Management : A Handbook for SUDS*. Wiley Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9781118897690>
- Chikhaoui, M., Gombault, Madramootoo, Michaud, A., Beaudin, I., Sottile, M.-F., & Ngwa, M. (2015). *Impacts of climate change on nutrient losses from the Pike River watershed of southern Quebec*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.5106.8241>
- COGESAF. (2011). *Analyse du bassin versant de la rivière Magog*. Conseil de gouvernance de l'eau des bassins versants de la rivière Saint-François. [https://www.actionlacmagog.ca/wp-content/uploads/2025/02/Analyse-bassin-riviere-Magog\\_COGESAF-2.pdf](https://www.actionlacmagog.ca/wp-content/uploads/2025/02/Analyse-bassin-riviere-Magog_COGESAF-2.pdf)

- Cole, L. J., Stockan, J., & Helliwell, R. (2020). Managing riparian buffer strips to optimise ecosystem services : A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 296, 106891. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106891>
- Comte, L., Buisson, L., Daufresne, M., & Grenouillet, G. (2013). Climate-induced changes in the distribution of freshwater fish : Observed and predicted trends. *Freshwater Biology*, 58, 625-639. <https://doi.org/10.1111/fwb.12081>
- Côté, J.-N. (2021). *Plan d'adaptation aux changements climatiques pour la ville de Magog*.
- Côté, J.-N. (2026). *Méthodologie, recherche documentaire et recommandations en environnement* [Interne].
- Côté, J.-N., Germain, M., Levac, E., & Lavigne, É. (2023). *Vulnerability assessment of heat waves within a risk framework using artificial intelligence*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169355>
- Côté, J.-N., Levac, E., Germain, M., & Lavigne, E. (2024). Projected risk and vulnerability to heat waves for Montreal, Quebec, using Gaussian processes. *Sustainable Cities and Society*, 116, 105907. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105907>
- Dahal, D., Bhattarai, N., Silwal, A., Shrestha, S., Shrestha, B., Poudel, B., & Kalra, A. (2025). A Review on Climate Change Impacts on Freshwater Systems and Ecosystem Resilience. *Water*, 17(21). <https://doi.org/10.3390/w17213052>
- Davidson, N. C., Fluet-Chouinard, E., & Finlayson, C. M. (2018). Global extent and distribution of wetlands : Trends and issues. *Marine and Freshwater Research*, 69, 620. <https://doi.org/10.1071/MF17019>
- De pierrepont, A., Teyssier, E., & Brin, A. (2018). *Réseau trophique* [INRAE Dictionnaire d'Agroécologie]. <https://doi.org/10.17180/fgwm-jr58>
- DeBeer, C. M., Wheeler, H. S., Carey, S. K., & Chun, K. P. (2016). Recent climatic, cryospheric, and hydrological changes over the interior of western Canada : A review and synthesis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(4), 1573-1598. <https://doi.org/10.5194/hess-20-1573-2016>

Desta, B. N., Tustin, J., Sanchez, J. J., Sekercioglu, F., Jardine, R., Thaivalappil, A., & Young, I. (2025).

Risk perceptions and behaviours of recreational water users in Canada toward cyanobacteria blooms in freshwater beaches : A qualitative study. *Journal of Environmental Management*, 387, 125859. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125859>

Dicks, L. V., Walsh, J. C., & Sutherland, W. J. (2014). Organising evidence for environmental

management decisions : A '4S' hierarchy. *Trends in Ecology & Evolution*, 29(11), 607-613. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2014.09.004>

Données Climatiques. (s. d.). *Comprendre les trajectoires communes d'évolution socio-économique*

(SSP). Consulté 9 mars 2026, à l'adresse <https://donneesclimatiques.ca/ressource/comprendre-les-trajectoires-communes-devolution-socioeconomique-ssp/>

DonneesClimatiques.ca. (s. d.). *Cartes*. Consulté 12 mars 2026, à l'adresse

[https://donneesclimatiques.ca/cartes/?var=hottest\\_day&th=tx\\_max&dataset=216&dataOpacity=100&labelOpacity=100&lat=62.53259&lng=-98.52539&zoom=4](https://donneesclimatiques.ca/cartes/?var=hottest_day&th=tx_max&dataset=216&dataOpacity=100&labelOpacity=100&lat=62.53259&lng=-98.52539&zoom=4)

Dosskey, M., Vidon, P., Gurwick, N., Allan, C., Duval, T., & Lowrance, R. (2010). *The Role of Riparian*

*Vegetation in Protecting and Improving Chemical Water Quality in Streams*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2010.00419.x>

Dulude, A.-M. (2016). *Impacts du réchauffement climatique sur le lac Saint-Pierre*.

[https://belsp.uqtr.ca/id/eprint/1382/1/Dulude\\_r%C3%A9chauffement\\_climatique\\_portrait\\_2016\\_A.pdf](https://belsp.uqtr.ca/id/eprint/1382/1/Dulude_r%C3%A9chauffement_climatique_portrait_2016_A.pdf)

Eekhout, J. P. C., Hunink, J. E., Terink, W., & De Vente, J. (2018). Why increased extreme precipitation

under climate change negatively affects water security. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 5935-5946. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5935-2018>

Favot, E. J., Holeton, C., DeSellas, A. M., & Paterson, A. M. (2023). Cyanobacterial blooms in Ontario,

Canada : Continued increase in reports through the 21st century. *Lake and Reservoir Management*, 39(1), 1-20. <https://doi.org/10.1080/10402381.2022.2157781>

Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., Trowsdale, S., Barraud, S.,

Semadeni-Davies, A., Bertrand-Krajewski, J.-L., Mikkelsen, P. S., Rivard, G., Uhl, M.,

- Dagenais, D., & Viklander, M. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, 12(7), 525-542. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>
- Garner, R. E., Taranu, Z. E., Higgins, S. N., Paterson, M. J., Gregory-Eaves, I., & Walsh, D. A. (2025). Eutrophication and Warming Drive Algal Community Shifts in Synchronised Time Series of Experimental Lakes. *Environmental Microbiology*, 27(7), e70159. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.70159>
- Ghanbari, H., Gregory-Eaves, I., Aulard, C., Baud, A., Zilkey, D., Fradette, M., Keller, P., Del Giorgio, P., Smol, J., Huot, Y., & Antoniadou, D. (2025). Widespread 20th-century increases in Canadian lake primary production and the roles of climate warming, solar irradiance and human impacts: *Communication earth & environment*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s43247-025-02569-7>
- Gombault, C., Sottile, M.-F., Ngwa, F. F., Madramootoo, C. A., Michaud, A. R., Beaudin, I., & Chikhaoui, M. (2015). Modelling climate change impacts on the hydrology of an agricultural watershed in southern Québec. *Canadian Water Resources Journal*, 40(1), 71-86. <https://doi.org/10.1080/07011784.2014.985509>
- González-García, A., Palomo, I., Codemo, A., Rodeghiero, M., Dubo, T., Vallet, A., & Lavorel, S. (2025). Co-benefits of nature-based solutions exceed the costs of implementation. *Cell Reports Sustainability*, 2(3). <https://doi.org/10.1016/j.crsus.2025.100336>
- Goodwin, S., & Olazabal, M. (2025). Revisiting the Challenges to Monitoring, Evaluation, Reporting, and Learning for Climate Adaptation. *Environmental Science & Policy*, 172, 104199. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2025.104199>
- Gouvernement du Canada. (2016, mai 20). *Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat* [Transparence - autre]. <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/organisation/affaires-internationales/partenariats-organisations/groupe-experts-intergouvernemental-changements-climatiques.html>

- Gouvernement du Canada. (2022). *La santé des Canadiens et des Canadiennes dans un climat en changement : Faire progresser nos connaissances pour agir*. <https://changingclimate.ca/health-in-a-changing-climate/fr/chapter/5-0-2/>
- Gouvernement du Québec. (s. d.). *Identifier et caractériser les aléas potentiels*. Consulté [https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/securite-publique/publications-adm/publications-secteurs/securite-civile/soutien-municipalites/fiches-actions-gestion-risques/fiche\\_6\\_caracterisation\\_aleas\\_2.pdf](https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/securite-publique/publications-adm/publications-secteurs/securite-civile/soutien-municipalites/fiches-actions-gestion-risques/fiche_6_caracterisation_aleas_2.pdf)
- Graham, D. J., Bierkens, M. F. P., & van Vliet, M. T. H. (2024). Impacts of droughts and heatwaves on river water quality worldwide. *Journal of Hydrology*, 629. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130590>
- Guilbert, J., Beckage, B., M. Winter, J., M. Horton, R., Perkins, T., & Bombliès, A. (2014). Impacts of Projected Climate Change over the Lake Champlain Basin in Vermont. *Journal of applied meteorology and climatology*, 53. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-13-0338.1>
- Hautier, Y., Tilman, D., Isbell, F., Seabloom, E. W., Borer, E. T., & Reich, P. B. (2015). Plant ecology. Anthropogenic environmental changes affect ecosystem stability via biodiversity. *Science*, 348(6232), 336-340. <https://doi.org/10.1126/science.aaa1788>
- He, J., Enomana, H., Dupras, J., Kermagoret, C., & Poder, T. (2019). Measuring Recreation Benefit Loss under Climate Change with Revealed and Stated Behavior Data : The Case of Lac Saint-Pierre World Biosphere Reserve (Québec, Canada). *Environmental Management*, 64. <https://doi.org/10.1007/s00267-019-01219-x>
- Hébert, M.-P., Beisner, B. E., Rautio, M., & Fussmann, G. F. (2021). Warming winters in lakes : Later ice onset promotes consumer overwintering and shapes springtime planktonic food webs. *PNAS*, 118(48). <https://doi.org/https://doi.org/10.1073/pnas.2114840118>
- Hewer, M. J., & Gough, W. A. (2018). Thirty years of assessing the impacts of climate change on outdoor recreation and tourism in Canada. *Tourism Management Perspectives*, 26, 179-192. <https://doi.org/10.1016/j.tmp.2017.07.003>

- Higuera Roa, O., Walz, Y., & Nehren, U. (2025). How to avoid the risk of maladaptation? From a conceptual understanding to a systematic approach for analyzing potential adverse effects in adaptation actions. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 30(4), 27. <https://doi.org/10.1007/s11027-025-10217-w>
- Hilt, S., Alirangues Nuñez, M. M., Bakker, E. S., Blindow, I., Davidson, T. A., Gillefalk, M., Hansson, L.-A., Janse, J. H., Janssen, A. B. G., Jeppesen, E., Kabus, T., Kelly, A., Köhler, J., Lauridsen, T. L., Mooij, W. M., Noordhuis, R., Phillips, G., Rücker, J., Schuster, H.-H., ... Sayer, C. D. (2018). Response of Submerged Macrophyte Communities to External and Internal Restoration Measures in North Temperate Shallow Lakes. *Frontiers in Plant Science, Volume 9-2018*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00194>
- Imrit, M. A., & Sharma, S. (2021). Climate Change is Contributing to Faster Rates of Lake Ice Loss in Lakes Around the Northern Hemisphere. *JGR Biogeosciences*. <https://doi.org/10.1029/2020JG006134>
- INSPQ. (2009). *Changements climatiques au Québec méridional—Conséquences des changements climatiques sur le comportement et la prolifération des cyanobactéries au Québec*. [https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/publications/1000\\_changclimaprolycyano.pdf](https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/publications/1000_changclimaprolycyano.pdf)
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Éd.). (2023a). Decision-Making Options for Managing Risk. In *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability : Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 2539-2654). Cambridge University Press. Cambridge Core. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.026>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Éd.). (2023b). Decision-Making Options for Managing Risk. In *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability : Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 2539-2654). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.026>

- IPCC. (2014). Technical Summary. In C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, & L. L. White (Éds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.  
[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-TS\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-TS_FINAL.pdf)
- IPCC. (2022a). Glossary. In H. O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, & B. Rama (Éds.), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 33). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.029>
- IPCC. (2022b). *Summary for Policymakers* (N° 6; p. 6). Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.001>
- Jeppesen, E., Meerhoff, M., A. Davidson, T., Trolle, D., Sondergaard, M., L. Lauridsen, T., Meryem, B., Brucet, S., Volta, P., Gonzalez-Bergonzoni, I., & Nielsen, A. (2014). Climate change impacts on lakes: An integrated ecological perspective based on a multi-faceted approach, with special focus on shallow lakes. *Journal of Limnology*, 88-111. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2014.844>
- Jiang, Y., Guo, G., Su, F., Xu, W., Ma, L., Cui, L., & Mi, C. (2024). Climate warming effects on temperature structure in lentic waters: A bibliometric analysis from the recent 20 years. *Ecological Indicators*, (167). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112740>
- Johnson, T., Butcher, J., Santell, S., Schwartz, S., Julius, S., & LeDuc, S. (2022). A review of climate change effects on practices for mitigating water quality impacts. *Journal of water and climate change*, 13, 1684-1705. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.363>
- Jones, D., & Doberstein, B. (2022). Encouraging co-benefits in climate-affected hazard adaptation: Developing and testing a scorecard for project design and evaluation. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 74, 102915. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.102915>

- Kim, M., Jang, M., Earn Choong, C., & Han, J. (2025). Historical and future water quality risks driven by climate change : Strategic management and overcoming challenges. *Water Research*, (288).  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.124774>
- Lemieux, C. J., Gray, P. A., Douglas, A. G., Nielsen, G., & Pearson, D. (2014). From science to policy : The making of a watershed-scale climate change adaptation strategy. *Environmental Science & Policy*, 42, 123-137. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2014.06.004>
- Low, Y., Gyakum, J. R., & Atallah, E. (2022). Extreme Winter Precipitation Regimes in Eastern North America : Synoptic-Scale and Thermodynamic Environments. *Monthly Weather Review*, 150(7), 1833-1850. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-21-0255.1>
- Lynch, A. J., Embke, H. S., Nyboer, E. A., Wood, L. E., Thorpe, A., Phang, S. C., Viana, D. F., Golden, C. D., Milardi, M., Arlinghaus, R., Baigun, C., Beard, T. D., Cooke, S. J., Cowx, I. G., Koehn, J. D., Lyach, R., Potts, W., Robertson, A. M., Schmidhuber, J., & Weyl, O. L. F. (2024). Inland recreational fisheries contribute nutritional benefits and economic value but are vulnerable to climate change. *Nature Food*, 5(5), 433-443. <https://doi.org/10.1038/s43016-024-00961-8>
- Lynch, A. J., Myers, B. J. E., Chu, C., Eby, L. A., Falke, J. A., Kovach, R. P., Krabbenhoft, T. J., Kwak, T. J., Lyons, J., Paukert, C. P., & Whitney, J. E. (2016). Climate Change Effects on North American Inland Fish Populations and Assemblages. *Fisheries*, 41(7), 346-361.  
<https://doi.org/10.1080/03632415.2016.1186016>
- MAPAQ. (s. d.-a). *Drainage : Des interventions qui se planifient*. MAPAQ. Consulté 13 avril 2026, à l'adresse  
<https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Regions/chaudiereappalaches/autresarticles/Drainage/Pages/interventions.aspx>
- MAPAQ. (s. d.-b). *Prime-Vert 2018-2023*. MAPAQ. Consulté 13 avril 2026, à l'adresse  
<https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Productions/md/programmesliste/agroenvironnement/Pages/Prime-Vert-2018-2023.aspx>

- Mayer, P. M., Reynolds Jr., S. K., McCutchen, M. D., & Canfield, T. J. (2007). Meta-Analysis of Nitrogen Removal in Riparian Buffers. *Journal of Environmental Quality*, 36(4), 1172-1180. <https://doi.org/10.2134/jeq2006.0462>
- MDDEFP & MAMROT. (s. d.). *Guide de gestion des eaux pluviales—Stratégies d'aménagement, principes de conception et pratiques de gestion optimales pour les réseaux de drainage en milieu urbain.*
- MDDLECC. (s. d.). *Guide de gestion des eaux pluviales.* Consulté 13 avril 2026, à l'adresse <https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/pluviales/guide.htm>
- Mehdi, B., Lehner, B., Gombault, C., Michaud, A., Beaudin, I., Sottile, M.-F., & Blondlot, A. (2015). Simulated impacts of climate change and agricultural land use change on surface water quality with and without adaptation management strategies. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 213, 47-60. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.07.019>
- MELCC. (2021). *Guide d'élaboration d'un projet de restauration ou de création de milieux humides ou hydriques.* <https://environnement.gouv.qc.ca/eau/milieux-humides/guide-elaboration-projet-restauration-creation-milieux-humideshydriques.pdf>.
- MELCCFP. (s. d.). *-Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables.* Consulté 13 avril 2026, à l'adresse <https://www.legisquebec.gouv.qc.ca/fr/document/rc/Q-2,%20r.%2035>
- Melland, A. R., Fenton, O., & Jordan, P. (2018). Effects of agricultural land management changes on surface water quality : A review of meso-scale catchment research. *Environmental Science & Policy*, 84, 19-25. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.02.011>
- Menone, M. L., Iturburu, F. G., Demetrio, P. M., Venturino, A., Pedrozo, F. L., Temporetti, P. F., Rodríguez, A., Amé, M. V., Quaini, K. P., & Collins, P. A. (2022). Calidad del agua y niveles guía para la protección de la biodiversidad acuática. Interacción entre ciencia y gestión. *Ecología Austral*, 32(1-bis), 245-257. <https://doi.org/10.25260/EA.22.32.1.1.1722>
- M.Peterson, A., M.Rühland, K., V.Anstey, C., & P.Smol, J. (2017). *Climate as a driver of increasing algal production in Lake of the Woods, Ontario, Canada.* <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/10402381.2017.1379574>

- Nimma, D., Devi, O. R., Laishram, B., Ramesh, J. V. N., Boddupalli, S., Ayyasamy, R., Tirth, V., & Arabi, A. (2025). Implications of climate change on freshwater ecosystems and their biodiversity. *Desalination and Water Treatment*, 321, 100889. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100889>
- Nsenga Kumwimba, M., Huang, J., Dzakpasu, M., De Silva, K., Ohore, O. E., Ajibade, F. O., Li, X., Jingjun, S., Muyembe, D. K., & Kaixuan, H. (2023). An updated review of the efficacy of buffer zones in warm/temperate and cold climates : Insights into processes and drivers of nutrient retention. *Journal of Environmental Management*, 336, 117646. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117646>
- OECD. (s. d.). *Water governance*. OECD. Consulté 13 avril 2026, à l'adresse <https://www.oecd.org/en/topics/water-governance.html>
- OECD. (2012). Water Quality and Agriculture : Meeting the Policy Challenge. *OECD Studies on Water*, 2012. <https://doi.org/10.1787/9789264168060-en>
- Office québécois de la langue française. (1974). *Stratification thermique*. <https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/8482511/stratification-thermique>
- Office québécois de la langue française. (1997). *Paléolimnologie*. <https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/8387447/paleolimnologie>
- Office québécois de la langue française. (2011a). *Cyanobactérie*. <https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/8868986/cyanobacterie>
- Office québécois de la langue française. (2011b). *Production primaire*. <https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/26516847/production-primaire>
- Office québécois de la langue française. (2012). *Mésotrophe*. <https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/26521643/mesotrophe>
- Office québécois de la langue française. (2014). *Écosystème*. <https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/8401121/ecosysteme>
- Office québécois de la langue française. (2016). *Chlorophylle*. <https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/8426958/chlorophylle>

Office québécois de la langue française. (2019a). *Espèce envahissante.*

<https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/8362960/espece-envahissante>

Office québécois de la langue française. (2019b). *Hypoxie.*

<https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/26556948/hypoxie>

Office québécois de la langue française. (2021). *Bassin hydrographique.*

<https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/26512680/bassin-hydrographique>

Office québécois de la langue française. (2024a). *Bassin versant.*

<https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/8364875/bassin-versant>

Office québécois de la langue française. (2024b). *Espèce exotique.*

<https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/26579451/espece-exotique>

Office québécois de la langue française. (2024c). *Macrophyte.*

<https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/26575921/macrophyte>

Office québécois de la langue française. (2024d). *Photosynthétique.*

<https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/26576212/photosynthetic>

Office québécois de la langue française. (2025a). *Biomasse.*

<https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/8395619/biomasse>

Office québécois de la langue française. (2025b). *Eutrophisation.*

<https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/8349362/eutrophisation>

Office québécois de la langue française. (2025c). *Phytoplancton.*

<https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/26516467/phytoplancton>

Office québécois de la langue française. (2025d). *Plancton.*

<https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/26521785/plancton>

Office québécois de la langue française. (2025e). *Zooplancton.*

<https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/26518754/zooplancton>

Ommer, J., Kalas, M., Neumann, J., Blackburn, S., & Cloke, H. L. (2025). A No-Regrets Framework for Sustainable Individual and Collective Flood Preparedness Under Uncertainty. *Sustainability*, 17(13). <https://doi.org/10.3390/su17135828>

Ouranos. (s. d.). *Performances des infrastructures vertes de gestion des eaux pluviales (IVGEP)*.

Ouranos. Consulté 15 avril 2026, à l'adresse <https://www.ouranos.ca/fr/projets-publications/performances-des-infrastructures-vertes-de-gestion-des-eaux-pluviales-ivgep>

Paerl, H. W., & Otten, T. G. (2013). Harmful Cyanobacterial Blooms : Causes, Consequences, and Controls. *Microbial Ecology*, 65(4), 995-1010. <https://doi.org/10.1007/s00248-012-0159-y>

Paquette, C. (2023). *Impacts et risques des changements climatiques sur les lacs du Québec*.

Piczak, M. L., Sergio, A. J. A., Lennox, R. J., Theysmeyer, T., Bowman, J. E., Midwood, J. D., & Cooke, S. J. (2025). Climate Change Impacts on the Phenology of Laurentian Great Lakes Fishes. *Global Change Biology*, 31(8), e70436. <https://doi.org/10.1111/gcb.70436>

Poesch, M. S., Chavarie, L., Chu, C., Pandit, S. N., & Tonn, W. (2016). Climate Change Impacts on Freshwater Fishes : A Canadian Perspective. *Fisheries*, 41(7), 385-391. <https://doi.org/10.1080/03632415.2016.1180285>

Radhapyari, K., Datta, S., Dutta, S., & Barman, R. (2021). Impacts of global climate change on water quality and its assessment. *Water Conservation in the Era of Global Climate Change*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820200-5.00011-7>

RAPPEL. (s. d.). Bande riveraine et aménagements artificiels. *RAPPEL*. Consulté 15 avril 2026, à l'adresse <https://rappel.qc.ca/fiches-informatives/bande-riveraine/>

Réseau de surveillance volontaire des lacs. (2020). *Lac Magog (0671A)—Suivi de la qualité de l'eau*. [https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/rsvl/relais/fiches-bilans/2020/Magog,%20Lac\\_0671A\\_2020\\_SA\\_SM.html](https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/rsvl/relais/fiches-bilans/2020/Magog,%20Lac_0671A_2020_SA_SM.html)

Rigosi, A., Carey, C. C., Ibelings, B. W., & Brookes, J. D. (2014). The interaction between climate warming and eutrophication to promote cyanobacteria is dependent on trophic state and varies among taxa. *Limnology and Oceanography*, 59(1), 99-114. <https://doi.org/10.4319/lo.2014.59.1.0099>

Rutty, M., Hower, M., Knowles, N., & Ma, S. (2024). Tourism & climate change in North America : Regional state of knowledge. *Journal of Sustainable Tourism*, 32(9), 1924-1947. <https://doi.org/10.1080/09669582.2022.2127742>

Salomão, A. (2023, juin 8). L'importance du cadre conceptuel dans la recherche. *Mind the Graph Blog*.

<https://mindthegraph.com/blog/fr/cadre-conceptuel-de-la-recherche/>

Scavia, D., David Allan, J., Arend, K. K., Bartell, S., Beletsky, D., Bosch, N. S., Brandt, S. B., Briland, R. D., Daloğlu, I., DePinto, J. V., Dolan, D. M., Evans, M. A., Farmer, T. M., Goto, D., Han, H., Höök, T. O., Knight, R., Ludsins, S. A., Mason, D., ... Zhou, Y. (2014). Assessing and addressing the re-eutrophication of Lake Erie : Central basin hypoxia. *Journal of Great Lakes Research*, 40(2), 226-246. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2014.02.004>

Schipper, E. L. F. (2020). Maladaptation : When Adaptation to Climate Change Goes Very Wrong. *One Earth*, 3(4), 409-414. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.09.014>

Scott, D. (2010). Climate Change and Tourism in the Great Lakes Region : A Summary of Risks and Opportunities. *Tourism in Marine Environments*, 6, 119-132. <https://doi.org/10.3727/154427310X12682653195087>

Sebesvari, Z., Rodrigues, S., & Renaud, F. (2017). Mainstreaming ecosystem-based climate change adaptation into integrated water resources management in the Mekong region. *Regional Environmental Change*, 17(7), 1907-1920. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1161-1>

Shrestha, R., Pesklevits, J., Bonsal, B., Brannen, R., Guo, T., & Hoffman, S. (2024). *Rising summer river water temperature across Canada : Spatial patterns and hydroclimatic controls* [Environmental Research Letters]. <https://doi.org/https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad365f>

Shrestha, R. R., & Pesklevits, J. C. (2023). Modelling spatial and temporal variability of water temperature across six rivers in Western Canada. *River Research and Applications*, 39, 200-213. <https://doi.org/10.1002/rra.4072>

Soltani, K., Amiri, A., Ebtehaj, I., Cheshmehghasabani, H., Fazeli, S., Gumiere, S. J., & Bonakdari, H. (2024a). Advanced Forecasting of Drought Zones in Canada Using Deep Learning and CMIP6 Projections. *Climate*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/cli12080119>

Soltani, K., Amiri, A., Ebtehaj, I., Cheshmehghasabani, H., Fazeli, S., Gumiere, S. J., & Bonakdari, H. (2024b). Advanced Forecasting of Drought Zones in Canada Using Deep Learning and CMIP6 Projections. *Climate*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/cli12080119>

- Statistique Canada. (2025, décembre 9). *Série « Perspective géographique », Recensement de 2021—Magog*. <https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2021/as-sa/fogs-spg/page.cfm?lang=f&topic=1&dguid=2021A00052445072>
- Strayer, D. L., & Findlay, S. E. G. (2010). Ecology of freshwater shore zones. *Aquatic Sciences*, 72(2), 127-163. <https://doi.org/10.1007/s00027-010-0128-9>
- Stumpf, R. P., Johnson, L. T., Wynne, T. T., & Baker, D. B. (2016). Forecasting annual cyanobacterial bloom biomass to inform management decisions in Lake Erie. *Journal of Great Lakes Research*, 42(6), 1174-1183. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2016.08.006>
- Taranu, Z. E., Gregory-Eaves, I., Leavitt, P. R., Bunting, L., Buchaca, T., Catalan, J., Domaizon, I., Guilizzoni, P., Lami, A., McGowan, S., Moorhouse, H., Morabito, G., Pick, F. R., Stevenson, M. A., Thompson, P. L., & Vinebrooke, R. D. (2015). Acceleration of cyanobacterial dominance in north temperate-subarctic lakes during the Anthropocene. *Ecology Letters*, 18(4), 375-384. <https://doi.org/10.1111/ele.12420>
- Tourisme Memphremagog. (s. d.). Quoi faire. *Tourisme Memphremagog*. Consulté 8 février 2026, à l'adresse <https://tourisme-memphremagog.com/quoi-faire/>
- UICN Comité Français. (s. d.). *Les solutions fondées sur la nature*. Consulté 15 avril 2026, à l'adresse <https://uicn.fr/ecosystemes/solutions-fondees-sur-la-nature/>
- Ville de Sherbrooke. (s. d.). *La ville de Sherbrooke : Portrait de la ville*. Ville de Sherbrooke. Consulté 29 janvier 2026, à l'adresse <https://www.sherbrooke.ca/fr/services-a-la-population/immigrer-et-vivre-a-sherbrooke/la-ville-de-sherbrooke>
- Vymazal, J. (2011). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment : Five Decades of Experience. *Environmental Science & Technology*, 45(1), 61-69. <https://doi.org/10.1021/es101403q>
- Walsh, C. J., Fletcher, T. D., & Burns, M. J. (2012). Urban Stormwater Runoff : A New Class of Environmental Flow Problem. *PLOS ONE*, 7(9), e45814. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0045814>

- Wang, Y., Zhao, D., Woolway, R. I., Yan, H., Paerl, H. W., Zheng, Y., Zheng, C., & Feng, L. (2025). Global elevation of algal bloom frequency in large lakes over the past two decades. *National Science Review*, 12(3), nwaf011. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwaf011>
- Wikipédia. (2026a). Cascade trophique. [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Cascade\\_trophique&oldid=232265743](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Cascade_trophique&oldid=232265743)
- Wikipédia. (2026b). Ectotherme. In Wikipédia. <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Ectotherme&oldid=233059097>
- Willwerth, J., Sheahan, M., Chan, N., Fant, C., Martinich, J., & Kolian, M. (2023). *The Effects of Climate Change on Outdoor Recreation Participation in the United States : Projections for the Twenty-First Century*. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-22-0060.1>
- Withers, P. J. A., Neal, C., Jarvie, H. P., & Doody, D. G. (2014). Agriculture and Eutrophication : Where Do We Go from Here? *Sustainability*, 6(9), 5853-5875. <https://doi.org/10.3390/su6095853>
- Woolway, I., Sharma, S., & P. Smol, J. (2022). *Lakes in Hot Water : The Impacts of a Changing Climate on Aquatic Ecosystems*. *BioScience*, 72(11). <https://doi.org/https://doi.org/10.1093/biosci/biac052>
- Xia, X. H., Wu, Q., Mou, X. L., & Jai, Y. J. (2014). Potential Impacts of Climate Change on the Water Quality of Different Water Bodies. *Journal of Environmental Informatics*. <https://doi.org/10.3808/jei.201400263>
- Xu, L., Feiner, Z. S., Frater, P., Hansen, G. J. A., Ladwig, R., Paukert, C. P., Verhoeven, M., Wszola, L., & Jensen, O. P. (2024). Asymmetric impacts of climate change on thermal habitat suitability for inland lake fishes. *Nature Communications*, 15(1), 10273. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-54533-2>
- Young, I., Sanchez, J. J., Sekercioglu, F., Desta, B. N., Holeton, C., Lyng, D., Peczulis, V., Renwick, S., Brooks, T., & Tustin, J. (2024). Burden of recreational water illness due to exposure to cyanobacteria and their toxins in freshwater beaches in Canada : Protocol of a prospective cohort study. *BMJ Open*, 14(6), e085406. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2024-085406>

Zhang, X., Flato, G., Kirchmeier-Young, M., Vincent, L., Wan, H., Wang, X., Rong, R., Fyfe, J., Li, G.,  
& Kharin, V. (s. d.). *Les changements de température et de précipitations au Canada.*

Zhi, W., Klingler, C., Liu, J., & Li, L. (2023). Widespread deoxygenation in warming rivers. *Nature  
Climate Change*, 13(10), 1105-1113. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01793-3>

## ANNEXE

### Annexe 1 - Impacts des changements climatiques sur le tourisme et les usages récréatifs

Les usages récréatifs et touristiques du lac et de la rivière Magog constituent une composante importante de l'attractivité du territoire et reposent directement sur les conditions climatiques ainsi que sur la qualité des écosystèmes aquatiques. Dans ce contexte, les changements climatiques influencent à la fois la nature des activités pratiquées, leur accessibilité et leur valeur socio-économique. Le climat joue un rôle structurant dans la définition des saisons touristiques et du confort des usagers (Scott, 2010). Ainsi, l'augmentation des températures et l'allongement de la saison estivale pourraient favoriser certaines activités de plein air, notamment les activités nautiques et la fréquentation des espaces naturels (Willwerth et al., 2023), tandis que les activités hivernales apparaissent particulièrement vulnérables en raison de la réduction de la couverture de neige et de glace, entraînant une diminution de leur durée et de leur viabilité (Hewer & Gough, 2018). Plus largement, ces transformations s'inscrivent dans une reconfiguration du système touristique à l'échelle nord-américaine, où les changements climatiques modifient à la fois l'offre et la demande d'activités (Rutty et al., 2024).

Par ailleurs, la qualité de l'eau constitue un déterminant central des usages récréatifs, particulièrement dans les milieux lacustres. La prolifération accrue des cyanobactéries, favorisée par le réchauffement des eaux et les apports en nutriments, représente un enjeu majeur pour les activités de contact avec l'eau. Ces blooms peuvent produire des toxines entraînant des risques pour la santé humaine et animale, notamment lors de la baignade ou des sports nautiques (Young et al., 2024), ce qui peut conduire à des fermetures de plages et à une réduction de l'accessibilité aux plans d'eau. De plus, la perception du risque par les usagers influence fortement les comportements et la fréquentation, d'autant plus que les connaissances sur ces phénomènes restent limitées chez une partie de la population (Desta et al., 2025). Les changements climatiques affectent également des activités spécifiques comme la pêche récréative, en modifiant les conditions écologiques et les populations de poissons, ce qui peut altérer l'expérience des usagers et l'attractivité de cette pratique (Lynch et al., 2024).

Enfin, ces transformations environnementales se traduisent par des impacts économiques liés à la dégradation des services écosystémiques culturels. Les activités récréatives génèrent des bénéfices importants, mais la détérioration des conditions environnementales peut entraîner une diminution de la fréquentation et une perte de valeur économique. Des études menées au Québec montrent notamment que les changements climatiques peuvent réduire significativement les visites et les bénéfices associés aux activités récréatives, entraînant des pertes économiques substantielles pour les territoires concernés (He et al., 2019). Ainsi, les changements climatiques induisent une reconfiguration des usages récréatifs à travers des effets à la fois directs, liés aux conditions climatiques, et indirects, via la dégradation des

## Clinique en environnement

Centre universitaire de formation en environnement et en développement durable (CUFE)

écosystèmes, ce qui souligne l'importance d'intégrer ces enjeux dans les stratégies d'adaptation afin de préserver l'attractivité et les retombées socio-économiques du territoire.

## **LEXIQUE**

**Adaptation :**

Dans les systèmes humains, processus d'adaptation au climat réel ou prévu et à ses effets, afin d'atténuer les dommages ou d'exploiter les opportunités bénéfiques. Dans les systèmes naturels, processus d'adaptation au climat réel et à ses effets ; l'intervention humaine peut faciliter l'adaptation au climat prévu et à ses effets .

**Aléas :**

La survenue potentielle d'un événement ou d'une tendance physique naturelle ou d'origine humaine susceptible d'entraîner des pertes en vies humaines, des blessures ou d'autres effets sur la santé, ainsi que des dommages et des pertes pour les biens, les infrastructures, les moyens de subsistance, la prestation de services, les écosystèmes et les ressources environnementales (IPCC, 2022a).

**Bassin hydrographique :**

Surface d'alimentation d'une partie ou de la totalité d'un ou de plusieurs cours d'eau déterminés (Office québécois de la langue française, 2021).

**Bassin versant :**

Portion de territoire où toutes les eaux s'écoulent par gravité vers un exutoire commun. [...]. Les eaux qui convergent vers l'exutoire peuvent notamment se déverser dans un lac, une rivière, un fleuve, un océan ou un réservoir (naturel ou artificiel) (Office québécois de la langue française, 2024a).

**Biomasse :**

Ensemble de matières organiques d'origine biologique récente. La biomasse inclut les organismes vivants ou qui étaient récemment vivants, ainsi que leurs dérivés. Elle exclut la matière organique d'origine fossile. Selon le contexte, la biomasse peut correspondre plus précisément à la quantité totale d'organismes présents dans un milieu donné à un moment donné (en écologie) ou à la matière organique utilisable pour la production d'énergie ou à d'autres fins, telle la production d'engrais ou de matériaux divers (en énergie et dans divers domaines d'application)(Office québécois de la langue française, 2025a).

**Bloom :**

Prolifération pélagique phytoplanctonique ou encore une poussée phytoplanctonique (bloom phytoplanctonique). Le phénomène de forte prolifération phytoplanctonique dans le milieu aquatique

résulte de la conjonction de facteurs du milieu comme température, éclairage, concentration en sels nutritifs (Aquaportail, 2023).

Cadre conceptuel :

Un cadre conceptuel est une structure qui fournit une base théorique ou conceptuelle à la recherche, permettant aux chercheurs d'examiner et d'analyser des phénomènes complexes. C'est un outil que les chercheurs utilisent pour guider le processus de recherche en définissant les concepts, idées et théories clés qui sous-tendent leur étude. Le cadre conceptuel peut aider à identifier les questions de recherche, les variables qui seront étudiées et les relations entre elles. Il peut également permettre de visualiser le problème de recherche, de clarifier la méthodologie de recherche et d'expliquer les résultats de la recherche (Salomão, 2023).

Capacité d'adaptation :

La capacité des systèmes, des institutions, des êtres humains et d'autres organismes à s'adapter à des dommages potentiels, à tirer parti d'opportunités ou à réagir aux conséquences (IPCC, 2022a).

Cascade trophique :

En écologie, les cascades trophiques sont des cascades qui découlent d'interactions prédateur-proie qui affectent l'abondance, la biomasse ou la productivité de plus d'un niveau au sein d'un réseau trophique. Cela se produit lorsqu'un prédateur réduit l'abondance ou modifie le comportement de sa proie, ce qui diminue la prédation sur le prochain niveau trophique inférieur (Wikipédia, 2026a).

Changement climatique :

Changement de l'état du climat qui peut être identifié (par exemple à l'aide de tests statistiques) par des modifications de la moyenne et/ou de la variabilité de ses propriétés et qui persiste pendant une période prolongée, généralement plusieurs décennies ou plus. Le changement climatique peut être dû à des processus internes naturels ou à des forçages externes, tels que les modulations des cycles solaires, les éruptions volcaniques et les changements anthropiques persistants dans la composition de l'atmosphère ou dans l'utilisation des sols. Il convient de noter que la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC), dans son article 1, définit le changement climatique comme « un changement du climat attribué directement ou indirectement à l'activité humaine qui modifie la composition de l'atmosphère mondiale et qui s'ajoute à la variabilité climatique naturelle observée au cours de périodes comparables ». La CCNUCC établit ainsi une distinction entre le changement climatique attribuable aux activités humaines qui modifient la composition de l'atmosphère et la variabilité climatique attribuable à des causes naturelles (IPCC, 2022a).

Chlorophylle :

Pigment élaboré par le chloroplaste des cellules végétales, qui est responsable de la couleur verte des plantes et qui permet d'assurer la photosynthèse (Office québécois de la langue française, 2016) .

Co-bénéfice :

Effet positif qu'une politique ou une mesure visant un objectif donné produit sur un autre objectif, augmentant ainsi le bénéfice global pour la société ou l'environnement. Les co-bénéfices sont également appelés « avantages indirects » (IPCC, 2022a).

Coût-efficacité :

Évaluation financière de l'ensemble des impacts négatifs et positifs liés à une action donnée. L'analyse coûts-efficacité permet de comparer différentes interventions, investissements ou stratégies et met en évidence les retombées d'un investissement ou d'une mesure politique pour une personne, une entreprise ou un pays en particulier. Les analyses coûts-efficacité qui reflètent le point de vue de la société jouent un rôle important dans la prise de décision en matière de changement climatique, mais il est difficile d'agrèger les coûts et les avantages entre les différents acteurs et sur différentes échelles de temps (IPCC, 2022a).

Cyanobactérie :

Bactérie photosynthétique que l'on trouve principalement en milieu aquatique. Les cyanobactéries se présentent sous la forme de cellules individuelles ou de filaments pouvant se grouper en colonies; on les trouve dans les eaux douces comme dans les eaux salées de même qu'à la surface des sols humides, et dans tous les types de climats (Office québécois de la langue française, 2011a)

Écosystème :

Ensemble dynamique formé des organismes vivants et de l'environnement non vivant dans lequel ils évoluent, leur interaction constituant l'unité fonctionnelle de base de l'écologie. Les dimensions de l'écosystème sont très variables; il peut s'agir d'un océan entier comme de la souche d'un arbre (Office québécois de la langue française, 2014).

Ectotherme :

Les organismes ectothermes sont des organismes ne produisant pas ou peu de chaleur. C'est le cas notamment des insectes, des reptiles et des poissons. Ces organismes sont à opposer aux organismes endothermes qui, eux, produisent de la chaleur (les mammifères et les oiseaux par exemple)(Wikipédia, 2026b).

Espèce envahissante :

Organisme vivant, généralement transporté par l'humain, qui s'établit dans un écosystème qui n'est pas le sien et qui s'y développe au détriment des espèces indigènes. Une espèce nouvelle dans un écosystème peut devenir envahissante si elle n'y trouve pas de prédateur ou de parasite, si le milieu est déjà perturbé par des activités humaines ou par d'autres facteurs, ou encore, s'il s'agit d'une espèce qui se reproduit rapidement et qui s'adapte à différentes conditions environnementales. Plusieurs espèces envahissantes s'adaptent plus rapidement aux changements climatiques que les espèces indigènes (Office québécois de la langue française, 2019a).

Espèce exotique :

Espèce faunique ou floristique présente hors de son aire de répartition naturelle en raison de son introduction, intentionnelle ou accidentelle, par l'activité humaine (Office québécois de la langue française, 2024b).

Eutrophisation :

Accumulation graduelle de nutriments dans un milieu aquatique, se traduisant par une prolifération d'hydrophytes ou de cyanobactéries, et par une diminution de la teneur en oxygène des eaux profondes. L'eutrophisation se produit le plus souvent dans les milieux aquatiques où la circulation d'eau est réduite, comme les lacs et les estuaires. Le phosphore et l'azote sont les principaux nutriments responsables de l'eutrophisation (Office québécois de la langue française, 2025b)

Exposition :

La présence de personnes, de moyens de subsistance, d'espèces ou d'écosystèmes, de fonctions, de services et de ressources environnementaux, d'infrastructures ou d'actifs économiques, sociaux ou culturels dans des lieux et des environnements susceptibles d'être affectés négativement (IPCC, 2022a).

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) : Le GIEC est le principal organisme international effectuant l'évaluation des changements climatiques. Il a comme objectif d'effectuer des évaluations d'intérêt pour les politiques sur : le fondement scientifique des changements climatiques; les impacts et les risques liés aux changements climatiques; les options pour l'adaptation et l'atténuation. Les évaluations du GIEC fournissent aux décideurs de l'information scientifique pertinente, mais neutre, pour l'élaboration de politiques (Gouvernement du Canada, 2016).

Hypoxie :

État d'un milieu naturel caractérisé par une faible concentration en oxygène. L'hypoxie peut être observée notamment dans un milieu aquatique, dans un sol et en altitude. Pour désigner l'état d'un milieu

naturel caractérisé par l'absence ou la quasi-absence d'oxygène, on emploie plutôt le terme anoxie (Office québécois de la langue française, 2019b).

## Impact :

Conséquences des risques réalisés sur les systèmes naturels et humains, lorsque ces risques résultent des interactions entre les aléas climatiques (y compris les phénomènes météorologiques ou climatiques extrêmes), l'exposition et la vulnérabilité. Les impacts désignent généralement les effets sur les vies, les moyens de subsistance, la santé et le bien-être, les écosystèmes et les espèces, les actifs économiques, sociaux et culturels, les services (y compris les services écosystémiques) et les infrastructures. Les impacts peuvent être qualifiés de conséquences ou de résultats, et peuvent être négatifs ou bénéfiques (IPCC, 2022a).

## Macrophyte :

Plante qui pousse dans un milieu aquatique, dans l'eau ou près de l'eau, à l'état d'émersion, de submersion ou de flottaison (Office québécois de la langue française, 2024c).

## Maladaptation :

Les actions susceptibles d'accroître le risque de conséquences négatives liées au climat, notamment par une augmentation des émissions de gaz à effet de serre (GES), une vulnérabilité accrue ou modifiée face au changement climatique, des conséquences plus inéquitables ou une détérioration du bien-être, aujourd'hui ou à l'avenir. Le plus souvent, la mauvaise adaptation est une conséquence involontaire (IPCC, 2022a).

## Mésotrophe :

Qui se rapporte à un état intermédiaire, se produisant naturellement ou dû à un enrichissement moyen en nutriments, entre eutrophie et oligotrophie (Office québécois de la langue française, 2012).

## Paléolimnologie :

Science qui étudie les caractères géologiques et les phénomènes anciens qui ont contribué à la formation des lacs (Office québécois de la langue française, 1997).

## Plancton :

Ensemble des organismes, le plus souvent microscopiques, qui vivent en suspension dans un milieu aquatique et se déplacent au gré des courants. Le plancton est notamment constitué du phytoplancton et du zooplancton (Office québécois de la langue française, 2025d).

Photosynthétique :

Qui se rapporte à la photosynthèse (Office québécois de la langue française, 2024d).

Phytoplancton :

Ensemble des organismes photosynthétiques qui vivent en suspension dans un milieu aquatique et se déplacent au gré des courants. Le phytoplancton correspond essentiellement à la partie végétale du plancton. Il se compose surtout de microorganismes, dont des microalgues (p. ex. diatomées, dinoflagellés) et des cyanobactéries (Office québécois de la langue française, 2025c).

Réseau trophique :

Un réseau trophique représente l'ensemble des interactions d'ordre alimentaire entre les êtres vivants d'un écosystème. Parmi ces interactions on retrouve, par exemple, la prédation, le parasitisme, la décomposition de la matière organique ou encore la consommation de plantes (De pierrepont et al., 2018).

Producteur primaire :

Production, sous toutes les formes possibles, des plantes, aussi appelées producteurs primaires (Office québécois de la langue française, 2011b).

Risques climatiques :

Le potentiel de conséquences négatives pour les systèmes humains ou écologiques, en tenant compte de la diversité des valeurs et des objectifs associés à ces systèmes. Dans le contexte du changement climatique, les risques peuvent découler des impacts potentiels du changement climatique ainsi que des réponses humaines au changement climatique. Les conséquences négatives pertinentes comprennent celles qui touchent les vies, les moyens de subsistance, la santé et le bien-être, les actifs et les investissements économiques, sociaux et culturels, les infrastructures, les services (y compris les services écosystémiques), les écosystèmes et les espèces. Dans le contexte des impacts du changement climatique, les risques résultent des interactions dynamiques entre les aléas climatiques et l'exposition et la vulnérabilité des systèmes humains ou écologiques concernés à ces aléas. Les aléas, l'exposition et la vulnérabilité peuvent tous être soumis à des incertitudes en termes d'ampleur et de probabilité de survenue, et chacun peut évoluer dans le temps et dans l'espace en raison des changements socio-économiques et des décisions humaines. Dans le contexte des réponses au changement climatique, les risques résultent de la possibilité que ces réponses n'atteignent pas les objectifs visés, ou de compromis potentiels avec d'autres objectifs sociétaux, tels que les objectifs de développement durable (ODD), ou d'effets secondaires négatifs sur ceux-ci. Les risques peuvent provenir, par exemple, de l'incertitude quant à la mise en œuvre, à l'efficacité ou aux résultats des politiques climatiques, des investissements

liés au climat, du développement ou de l'adoption de technologies et des transitions systémiques (IPCC, 2022a).

**Robustesse :**

Capacité d'une mesure d'adaptation à maintenir son efficacité dans différents scénarios climatiques, malgré les incertitudes et la variabilité des conditions environnementales. Une mesure robuste est donc moins sensible aux erreurs de projection ou aux changements inattendus (IPCC, 2014).

**Sensibilité :**

Mesure dans laquelle un système ou une espèce est affecté, de manière négative ou positive, par la variabilité ou le changement climatique. L'effet peut être direct (par exemple, une modification du rendement des cultures en réponse à un changement de la moyenne, de l'amplitude ou de la variabilité de la température) ou indirect (par exemple, les dommages causés par une augmentation de la fréquence des inondations côtières due à l'élévation du niveau de la mer) (IPCC, 2022a).

**Solutions fondées sur la nature :**

Mesures visant à protéger, à gérer de manière durable et à restaurer les écosystèmes naturels ou modifiés, qui permettent de relever les défis sociétaux de manière efficace et adaptative, tout en contribuant au bien-être humain et à la biodiversité (IPCC, 2022a).

**Stratification thermique :**

Formation de couches de températures différentes dans des masses d'eau (Office québécois de la langue française, 1974).

**Vulnérabilité :**

La propension ou la prédisposition à subir des effets négatifs. La vulnérabilité englobe divers concepts et éléments, notamment la sensibilité ou la susceptibilité aux dommages et l'incapacité à faire face et à s'adapter (IPCC, 2022a)

**Zooplancton :**

Ensemble des animaux qui vivent en suspension dans un milieu aquatique et se déplacent au gré des courants. Le zooplancton regroupe tous les organismes du plancton qui appartiennent au règne animal. Il se compose notamment de crustacés (p. ex. copépodes, krill), de larves et de méduses (Office québécois de la langue française, 2025e).