

Développement d'une méthode SIG pour identifier les zones potentielles de refroidissement sur les rivières à saumon:

Analyse spatiale appliquée à la rivière Ouelle

Karolane Tremblay Chacon

Finissante à la maîtrise en géographie (profil mémoire), Département de géographie, UQÀM

Direction: Olivier Caron

Photo: Karolane Tremblay Chacon

WEBINAIRE



Plan de la présentation



Introduction



1. Revue de littérature



2. Problématique et objectifs de recherche



3. Refuges thermiques et zones de refroidissement



4. Méthodologie



5. Résultats et validation



6. Discussion



7. Conclusion



Introduction



Espèce sensible

Le saumon atlantique est...

Emblématique

- Essentiel au bien-être écologique, culturel et économique (COSEPAC, 2010).
- Économique: Pêche sportive: 26 M\$ CAD (MELCCFP, 2023).
- Ressource à des fins alimentaires, sociales et culturelles pour plus de 40 Premières Nations et communautés autochtones, (COSEPAC, 2010).

Indicateur de la santé des écosystèmes forestiers et riverains

- Habite dans des eaux « claires, froides et bien oxygénées, avec des pentes faibles à modérées et des fonds de gravier, de galets et de roches » (COSEPAC, 2006)

Ectotherme

- Dépend de la T° de l'eau pour réguler sa T° corporelle.
- T° de l'eau jou un rôle clé dans tous ses stades de vie
- La stabilité thermique ou des variations minimales sont cruciales pour leur survie (FQSA, 2022; CPSEPAC, 2010).

1 Défis & Menaces pour le saumon et son habitat



Changements climatiques

Fluctuations hydro-climatiques et les stressés thermiques (FQSA-DGR, 2012)

- Perturbation du cycle de l'eau
- Augmentation T° de l'eau
- Prolongation des périodes d'étiage et des périodes de canicules



T° de l'eau:

- Facteur abiotique le plus déterminant pour la survie du saumon atlantique (Heggenes et al., 1993)
- T° problématique pour le saumon (tous les stades de vie) entre 14 et 20 °C (FQSA, 2022; COSEPAC, 2006)
- T° létale pour le saumon adulte: proche de 23°C et plus, maximum 3 jours, difficile de se remettre du stress thermique (MPO, 2012)

2 Adaptation aux stressés thermiques



Refuges thermiques (RT)

- Secteurs où la température de l'eau est plus froide que celle du chenal principal (FQSA, 2022).
- Localisation ponctuelle
- Peuvent se trouver dans un zone de refroidissement (Zrf) ou pas
- Utilité écohydrologique



Pressions anthropiques

Diverses activités menacent la qualité de l'habitat

- Surpêche et braconnage
- Industrie forestière:
 - Routes forestières, ponceaux, apport sédimentaire
- Agriculture et pollution
- Obstacles infranchissables (barrages hydroélectriques)

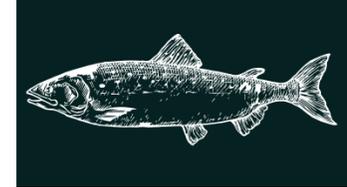


Zones de refroidissement (Zrf)

- Plus large et périmètre peu défini (Fakhari, et al., 2022).
- Aggrégation de plusieurs facteurs qui influencent la T° de l'eau
- Peuvent contenir des refuges thermiques (RT) ou pas
- Si RT: peut contribuer à la stabilité thermique
- La différence de T° n'est pas toujours significative comme le RT

1. Revue de littérature

1.1. Contexte environnemental et défis du bassin versant de la rivière Ouelle



Où?

Région: Bas-Saint-Laurent



Description du bassin versant

Bassin versant et réseau hydrographique

- Superficie du bassin versant: 844 km²
- Cours d'eau principal: 76 km
- 26 km était ouvert à la pêche sportive

Affectation du sol

- 88 % du bassin est couvert de forêt (Furois, 2016)
- Forte présence de champs agricoles à l'embouchure du cours d'eau

Enjeux liés à la qualité de l'habitat

- Érosion et sédimentation : transport de sédiments varie entre 291 et 13 417 tonnes par jour
- Absence de végétation (Groupe SALAR, 1992; Furois, 2016).
- Ensablement de la portion aval : 51 fosses en 1990 à 19 en 2014 (Thibault et al., 1990; Furois, 2016).

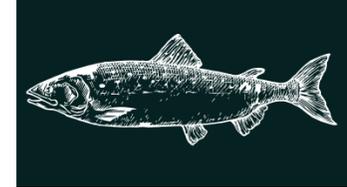
Géomorphologie fluviale

- Pente faible en aval
- Transport efficace des sédiments en amont
- Construction de l'autoroute 20 a modifié le tracé du cours d'eau

Bassin versant de la rivière Ouelle



1. Revue de littérature



1.2. Vulnérabilités des rivières à saumon face aux changements climatiques et aux pressions anthropiques

114 rivières à saumon au Québec: certaines rivières sont plus vulnérables en raison de leur exposition aux changements climatiques et aux pressions anthropiques (April et al., 2023).



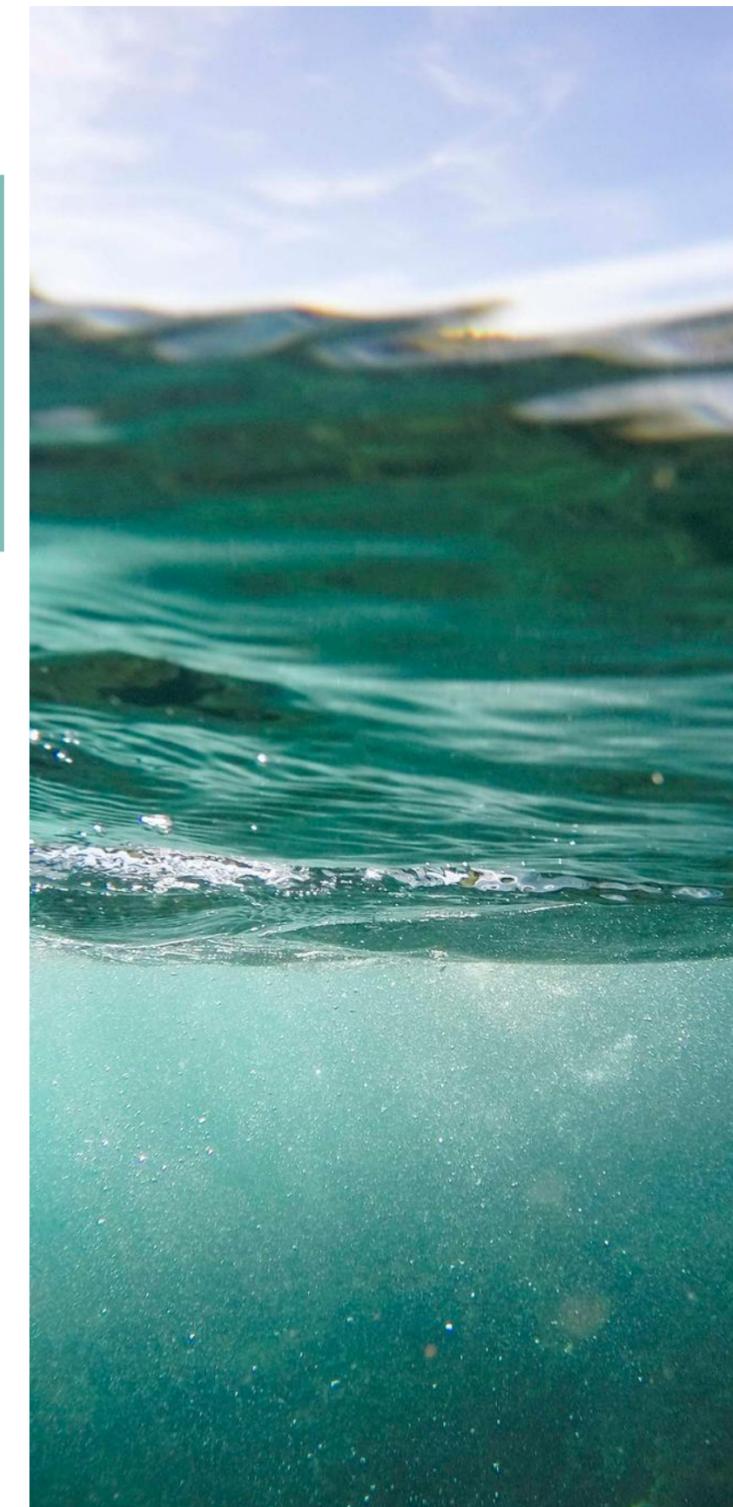
La rivière Ouelle: un exemple de scénario catastrophique

Une des rivières les plus chaudes du Canada = tendance à dépasser les 22 °C, avec une moyenne proche ou supérieure à 28 °C pendant les étés de 2009 à 2012 (Jeong et al., 2012; Dugdale et al., 2013).

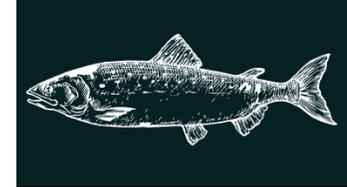
166 RT sur la rivière Ouelle, mais sensibles aux variations spatiotemporelles (Dugdale et al., 2013).



Important d'appréhender la dynamique du bassin versant pour identifier et protéger les RT



I. Revue de littérature



1.2. Vulnérabilités des rivières à saumon face aux changements climatiques et aux pressions anthropiques

Taux élevés de mortalité

1987: la température de l'eau a atteint 34°C pendant quelques heures, dépassant le seuil léthal de 27°C pendant plus de 72 heures consécutives, entraînant la mort de plus de 250 saumons (Thibault et al., 1990; Furois, 2016).

Sommaire de l'exploitation sportive de 1984 à 2023 de la rivière Ouelle

Optimal: 1,634

Zone salmonicole: Q3

No. rivière: 02270000

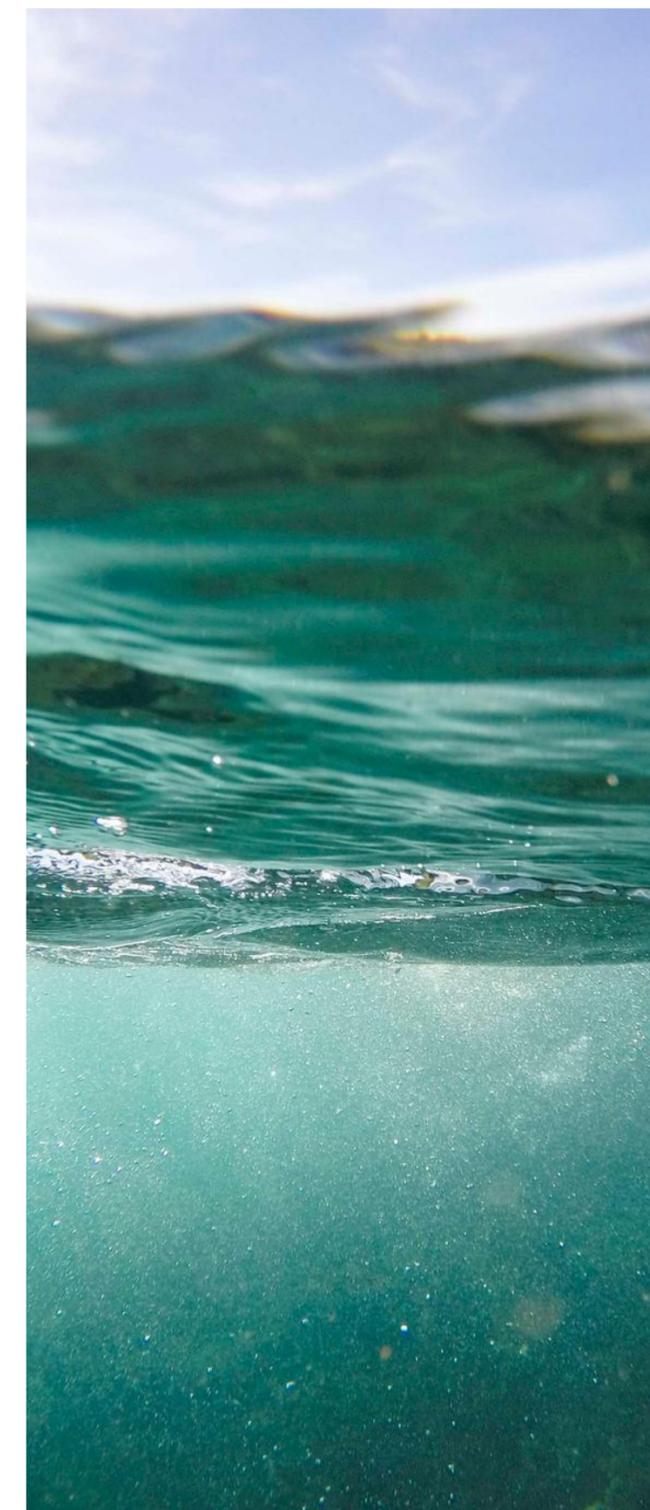
Seuils de conservation (million d'oeufs) Démographique: 0,499

Année	Captures sportives			Remise à l'eau	Jours-pêche	Succès (Cap./j-p.)	Taux (%) Exploitation			Retrait	Prélèvement	Montaison			Reproducteurs			Oeufs déposés (million)
	Petit	Grand	Total				Petit	Grand	Total			Mad.	Réd.	Total	Mad.	Réd.	Total	
1984	76	26	102		617	0,17	29	29	29	30	132	262	90	352			220	
1985	27	39	66		734	0,09	14	14	14	41	107	187	270	457			350	
1986	57	76	133		1 365	0,10	14	14	14	197	330	420	560	980			650	1,09
1987	21	21	42		521	0,08	8	8	8	366	408	270	270	540			132	0,20
1988	94	60	154		1 134	0,14	32	32	32	75	229	297	190	487			258	0,31
1989	104	70	174		1 611	0,11	14	14	14	442	616	722	486	1208			592	0,74
1990	70	208	278		2 291	0,12	20	20	20	271	549	345	1025	1370			821	1,72
1991	26	38	64		940	0,07	13	13	13	160	224	198	290	488			264	0,45
1992	128	60	188		1 237	0,15	11	11	11	22	210	1137	533	1670			1460	2,99
1993	18	29	47		1 140	0,04	9	9	9	22	69	191	309	500			431	0,72
1994	119	18	137		646	0,21	25	25	25	9	146	476	72	548			402	0,42
1995	20	28	48		704	0,07	7	7	7	48	96	302	422	724			628	2,15
1996	230	60	290		926	0,31	25	25	25	8	298	920	240	1160			862	0,95
1997	24	46	70		529	0,13				28	98							
1998	38	31	69		472	0,15				10	79							
1999	38	31	69		731	0,09				21	90							
2000	58	25	83	0	475	0,17	0,17			22	105							
2001	22	39	61	0	588	0,10	0,10			17	78							
2002	17	8	25	0	395	0,06	0,06			10	35							
2003	63	26	89	0	666	0,13	0,13			0	89							
2004	8	49	57	5	518	0,11	0,12			0	57							
2005	23	5	28	0	108	0,26	0,26			0	28							
2006	7	12	19	0	145	0,13	0,13			0	19							

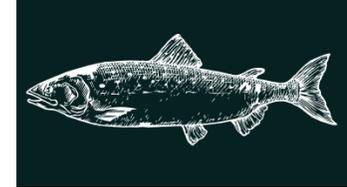


Bilan de l'exploitation du saumon au Québec en 2023

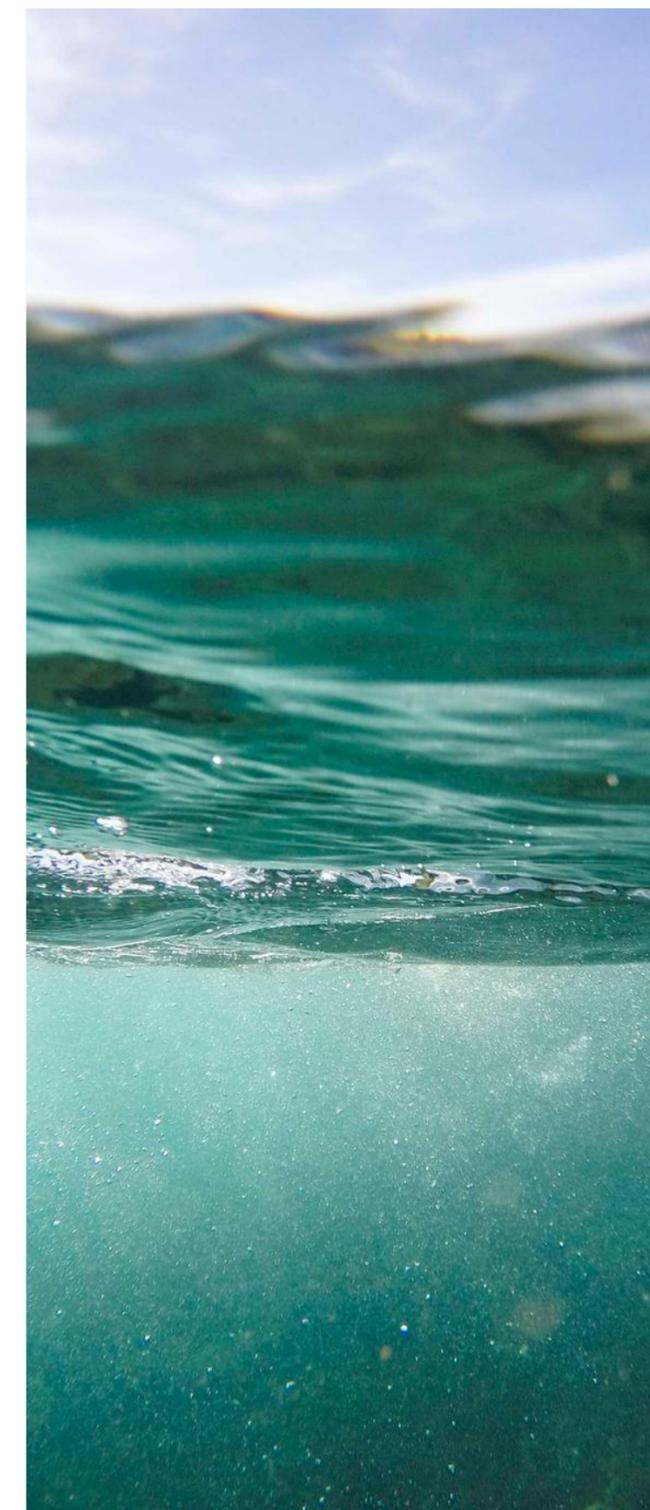
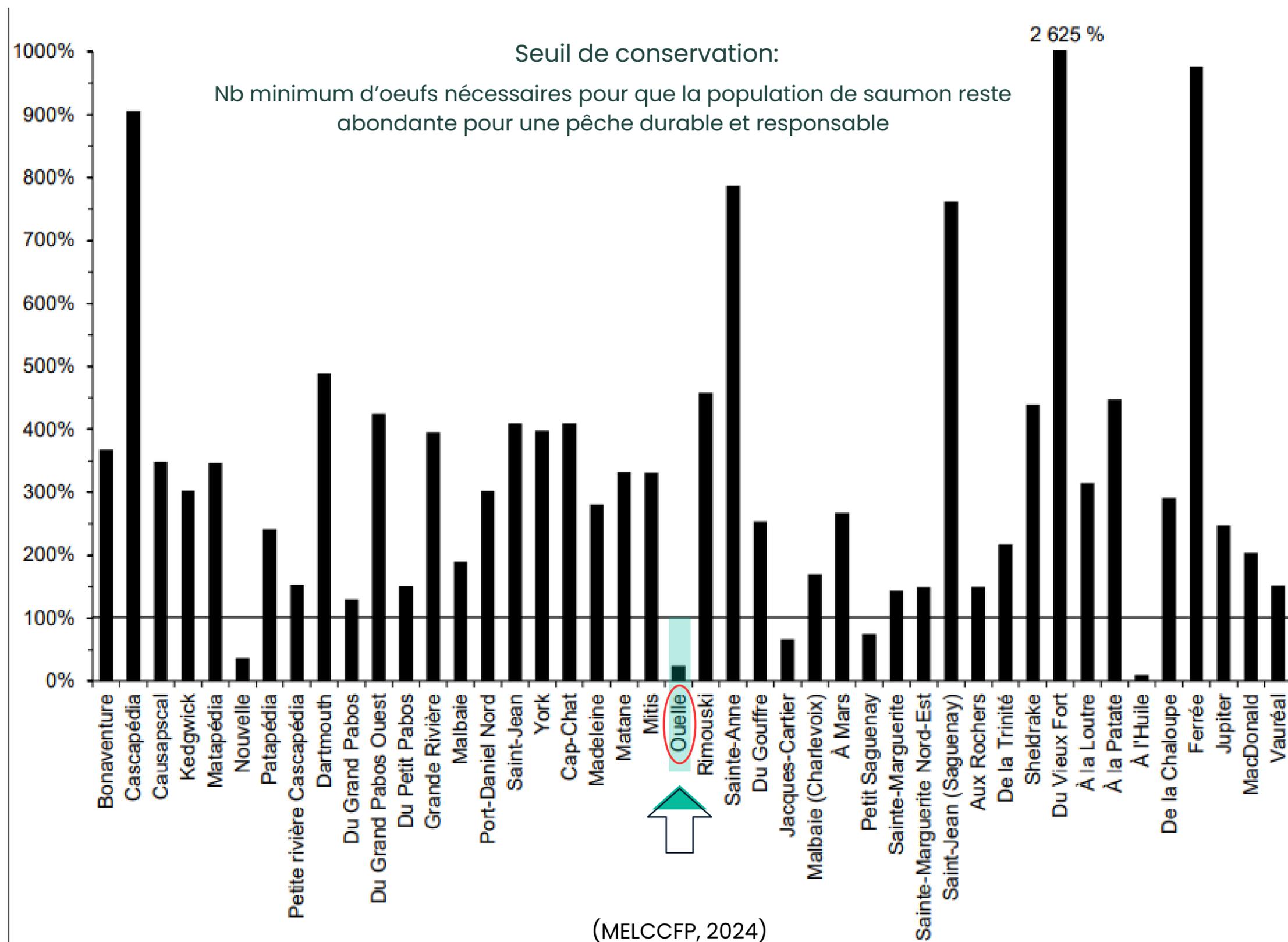
(MELCCFP, 2024)



1. Revue de littérature

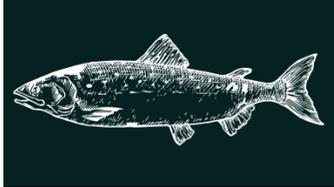


1.2. Vulnérabilités des rivières à saumon face aux changements climatiques et aux pressions anthropiques



1. Revue de littérature

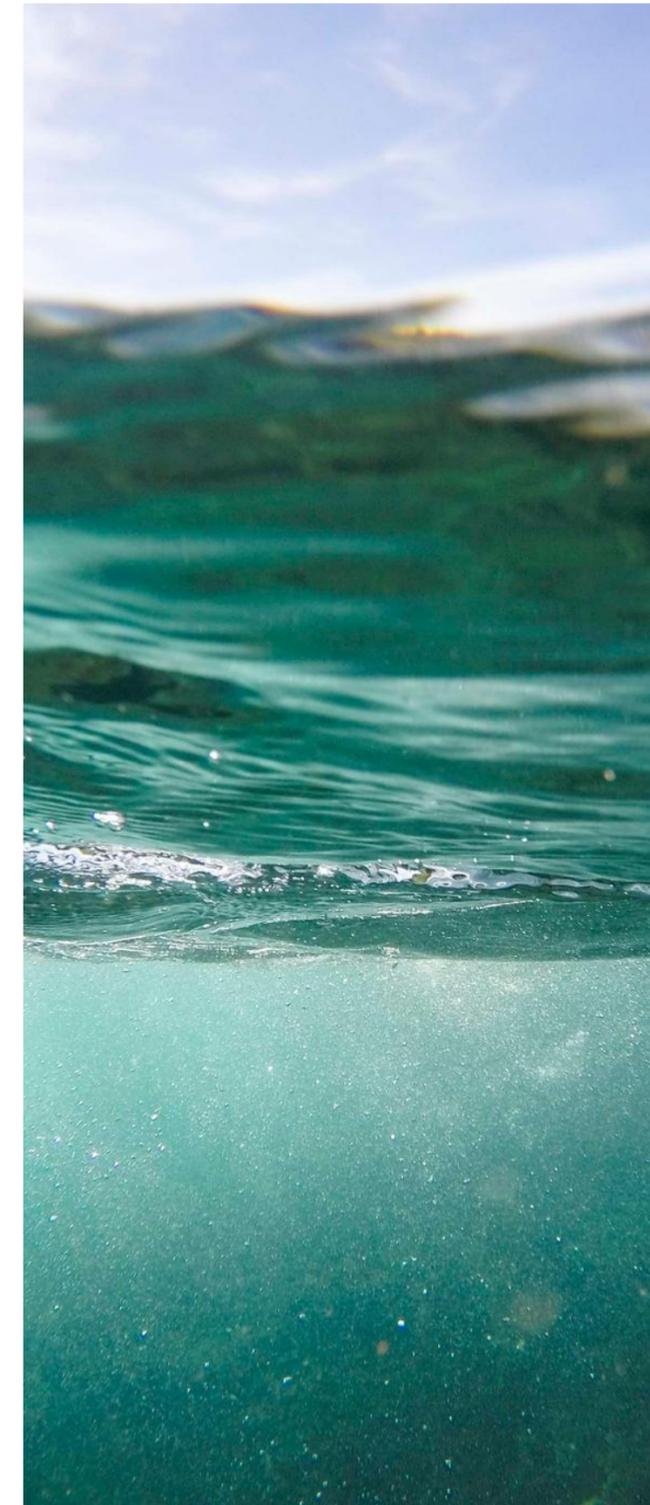
1.2. Vulnérabilités des rivières à saumon face aux changements climatiques et aux pressions anthropiques



T° de l'eau est liée au débit et la T° de l'air

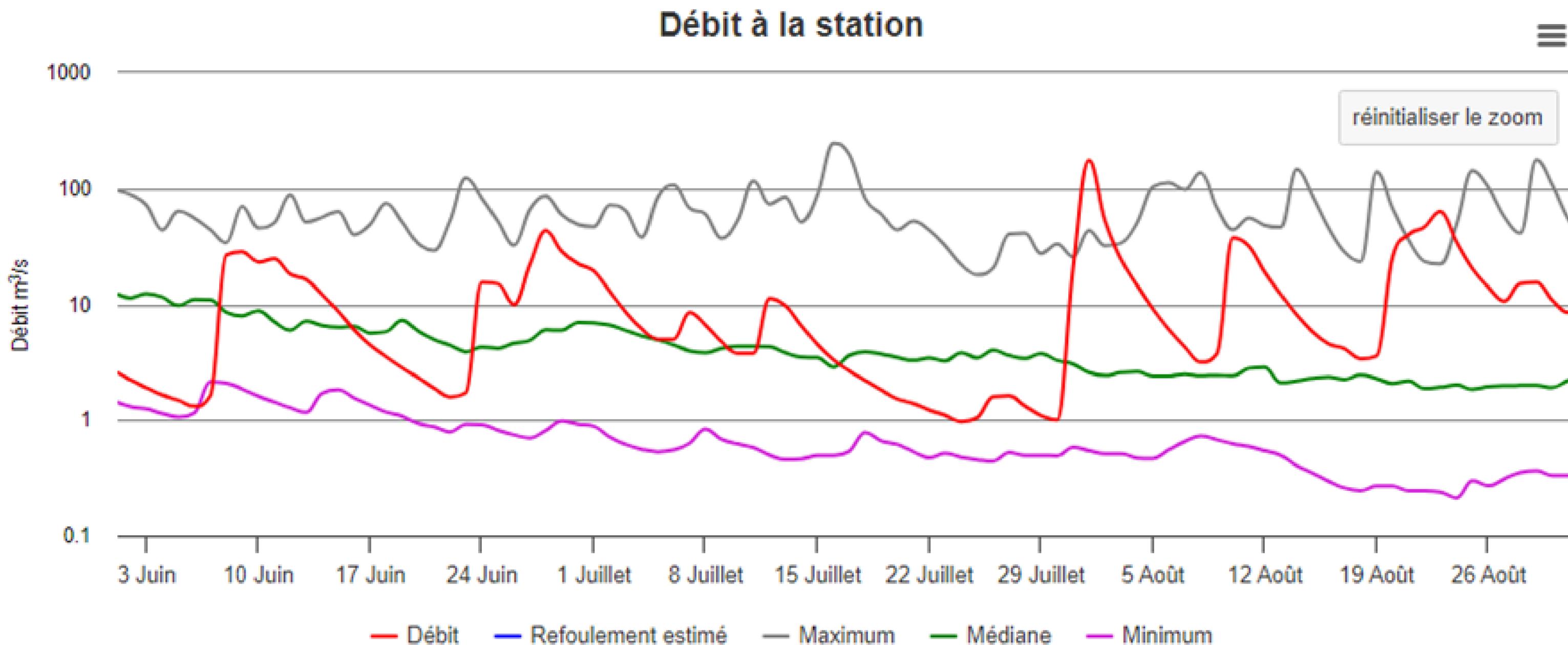
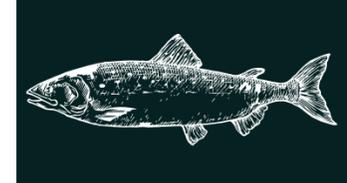
Prévisions de périodes d'étiage et de canicules sévères pour les prochaines années (CEHQ, 2015; Furois, 2016)

Année	Mois	T° moyenne	T° max	T° extrême	Nb de jours dépassant les 23 °C	Nb de jours consécutifs 23 °C ou plus
2020	JN	17	23.4	34.7	17	13
	JL	19.6	25.4	30.3	25	10
	AU	18.6	24.2	31.9	20	16
2021	JN	18.4	24	32.7	16	6
	JL	17.5	22.8	27.7	19	10
	AU	20.2	26.1	31.9	20	5
2022	JN	15.7	21.3	30.8	13	6
	JL	19.7	25.1	30.5	25	15
	AU	19	24.3	30	24	7
2023	JN	15	19.9	32.2	12	5
	JL	20.2	25.2	31.5	25	12
	AU	17.3	22.2	26.3	17	6
2024	JN	17.8	23.9	35.4	21	7
	JL	21.4	26.5	29.8	25	9
	AU	18.5	23.4	31	21	8



1. Revue de littérature

1.2. Vulnérabilités des rivières à saumon face aux changements climatiques et aux pressions anthropiques



Highcharts.com

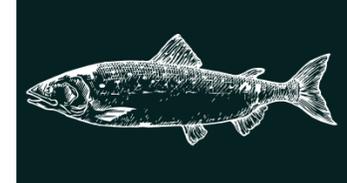
Février 2024 - Octobre 2024

— ou —

Données historiques -> Période de référence de 1982 à 2023 (équivalent à 41 années documentées)

1. Revue de littérature

1.2. Vulnérabilités des rivières à saumon face aux changements climatiques et aux pressions anthropiques

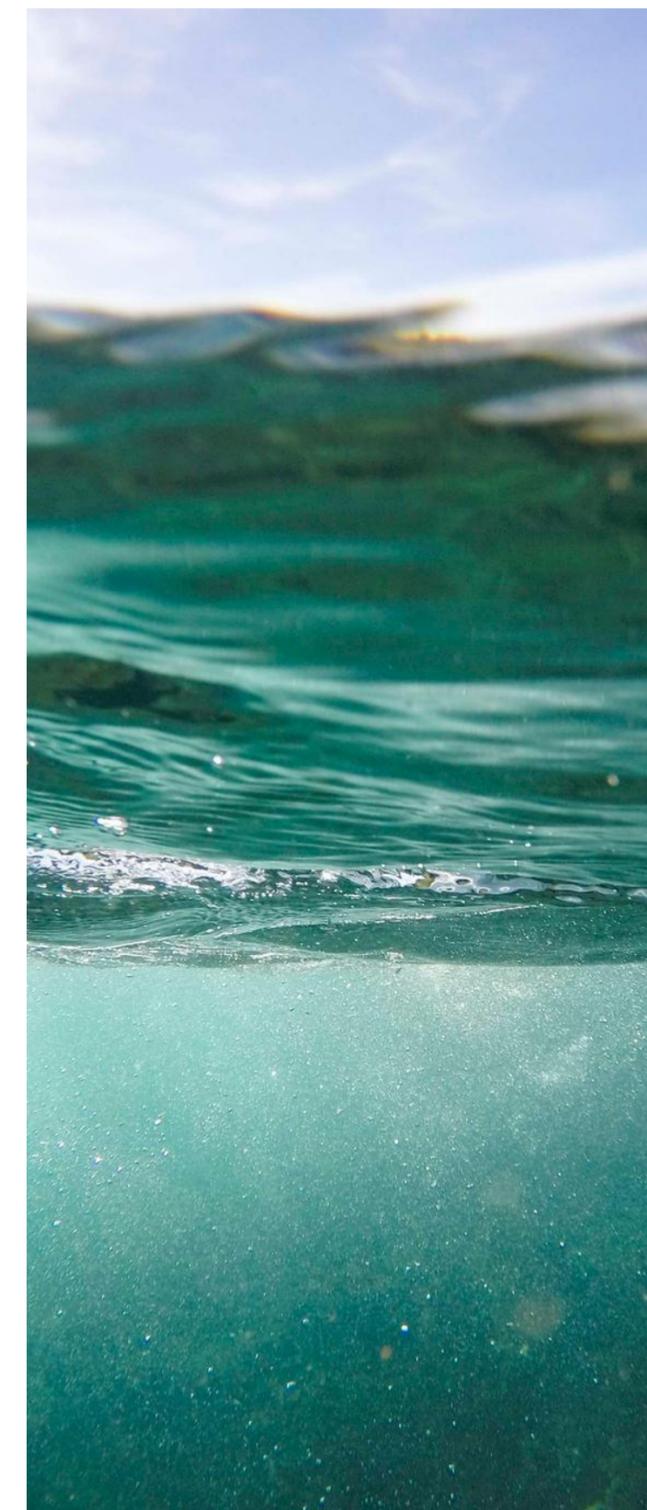


Conséquences des périodes d'étiage et des canicules prolongées:

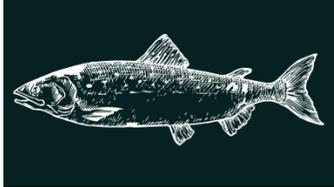
Fermeture définitive des activités de pêche dans la rivière depuis 2020 pour protéger l'espèce



- Cependant, la présence de saumons dans la rivière est presque nulle ou méconnue
- Dernier dénombrement: 2019 - 49 saumons (MELCCFP, 2024)



2. Problématique, question et objectifs de recherche



2.1. Problématique



Enjeux historique: le bassin versant de la rivière Ouelle est confronté à des défis environnementaux majeurs qui menacent la santé de son écosystème, en particulier les populations de saumon atlantique (Thibault et al., 1990; Furois, 2016).

Menaces

- 01 Changements climatiques
- 02 Pressions anthropiques (braconnage, infrastructures infranchissables)
- 03 Érosion et sédimentation
- 04 Pollution



Conséquences sur l'habitat

- 01 Réduction des zones de frai
- 02 Augmentation de la mortalité des poissons
- 03 Dégradation de la qualité de l'habitat
- 04 Disparition des fosses
- 05 Difficulté du retour vers la rivière natale



Urgence de poursuivre les efforts de caractérisation des bassins versants des rivières à saumon
Refuges thermiques et zones de refroidissement = Encore largement méconnus et insuffisamment protégés



Pourquoi choisir la rivière Ouelle, alors que sa population de saumons est faible ou absente ?

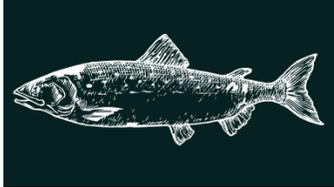
- 01 Disponibilité des données pour la recherche et validation des résultats
- 02 Contexte historique et actuel du bassin versant
- 03 Nombreuses études



Site idéal pour tester la cartographie et l'identification des confluences de facteurs physiques et zones potentielles de refroidissement



2. Problématique, question et objectifs de recherche



2.1. Problématique

Méthodes couramment utilisées

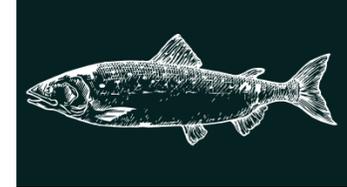
- 1 Acquisition et analyse d'images thermiques
- 2 Statistiques avancées pour analyser les phénomènes écologiques
 - Modèle Additif Généralisé (GAM)
 - Modèle de Régression Multivariée par Splines Adaptatifs (MARS)
- 3 Modèles géostatistiques dans un espace mathématique bidimensionnel:
 - Outils multivariés
 - Analyse en Composantes Principales (ACP)
 - l'Analyse Canonique des Corrélations (ACC)

Enjeux de recherche

- 1 Identifier et comprendre la variabilité spatiotemporelle des RT et des Zrf à plus grande échelle =
 - intérêt fondamental pour comprendre la vulnérabilité des habitats
 - Difficile à traiter à grande échelle
- 2 Accès aux données
 - Coûts élevés pour l'acquisition d'imagerie thermique (TIR)
 - Difficile à traiter à grande échelle



2. Problématique, question et objectifs de recherche



Approche d'analyse spatiale accessible et reproductible, en utilisant des données ouvertes et des logiciels SIG

2.2. Question de recherche



Comment l'analyse spatiale par systèmes d'information géographique (SIG), en mettant en relation et en agrégeant des facteurs physiques environnementaux, permet-elle de représenter spatialement leur dynamique complexe, de cartographier les zones de refroidissement (ZRf) dans la rivière Ouelle et d'identifier des zones critiques pour les refuges thermiques afin d'orienter les actions de conservation ?

2.3. Objectifs de recherche



Objectif principal

Développer une méthode SIG pour cartographier et identifier la dynamique des facteurs physiques influençant la thermie de l'eau, permettant de localiser des zones potentielles de refroidissement et de réchauffement dans la rivière Ouelle.



Objectif 1

Développer une méthode d'identification des zones de refroidissement dans la rivière Ouelle

↳ **Sous-objectif 1.1**
Modéliser les facteurs physiques de refroidissement (une couche spatiale par facteur)

↳ **Sous-objectif 1.2**
Identifier les confluences des facteurs physiques de refroidissement.



Objectif 2

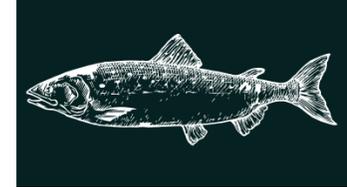
Cartographier et valider les zones potentielles de refroidissement et de réchauffement

↳ **Sous-objectif 2.1**
Cartographier les zones de refroidissement et de réchauffement en fonction de leur importance selon l'Analyse Multi-Critères (AMC).

↳ **Sous-objectif 2.2**
Valider la cartographie en comparant les zones identifiées avec les refuges thermiques géolocalisés et la collecte de données terrain



3. Refuges thermiques et zones de refroidissement



Source d'eau	Type de mécanisme	Description du mécanisme	Type de refuge thermique associé	Description du refuge thermique	Sources
Eaux de surface	Refuges de confluence	Formés lorsque l'eau plus froide d'un tributaire rencontre celle de la rivière principale, créant un panache thermique distinct.	<i>Refuge de confluence</i> <i>Tributary confluence plume</i>	Zone à l'embouchure du tributaire où l'eau froide se mélange avec l'eau plus chaude de la rivière principale, créant une zone fraîche.	
Eaux souterraines	Refuges d'eau souterraine	Créés par l'apport d'eau souterraine qui remonte le long des berges ou du lit de la rivière, nécessitant un débit élevé et une protection contre le mélange rapide avec l'eau chaude de la rivière.	<i>Refuge de suintement latéral</i> <i>Lateral seep</i>	Zone allongée le long de la berge où l'eau souterraine rejoint directement le cours d'eau.	Dugdale, et al. (2013); Bergeron, et al. (2020)
			<i>Refuge de source</i> <i>Springbrook</i>	Arrivée d'eau froide d'une source ou d'un marais près de la rivière.	
			<i>Bras latéral froid</i> <i>Cold side channel</i>	Chenal secondaire principalement inondé pendant les crues.	
			<i>Alcôve froide</i> <i>Cold alcove</i>	Accumulation d'eau souterraine dans des zones de contre-courant créées par la forme irrégulière de la berge.	
	Résurgence hyporhéique	Se forme dans les sédiments sous et autour d'une rivière, où l'eau de surface se mélange avec l'eau souterraine, créant une zone fraîche.	<i>Refuge de résurgence hyporhéique</i> <i>Hyporheic upwelling</i>	Zone fraîche formée lorsque l'eau souterraine ressort dans la rivière après avoir circulé sous la surface.	
Refuge d'écoulement hypodermique	Se crée lorsque le ruissellement souterrain atteint une paroi verticale, formant un refuge de paroi.	<i>Refuge de paroi</i> <i>Wall-base channel</i>	Source d'eau froide le long de la paroi d'une berge ou d'un talus, issue d'un ruissellement souterrain.		
Refuge de fond de fosse	Se forment au fond des fosses profondes d'une rivière, souvent par résurgence d'eau souterraine ou stratification thermique.	<i>Refuge de fond de fosse</i>	Zone fraîche au fond de la fosse créée par la résurgence d'eau souterraine ou la stratification thermique, souvent non visible en surface.	Dugdale, et al. (2013); Frechette, et al. (2018); Bergeron, et al. (2020)	

On distingue les RT par leur **différence de température significative** par rapport au cours d'eau principal et son **utilité écologique** (Sullivan, et al., 2021).

Mesure d'adaptation face à des stressés thermiques (Sullivan, et al., 2021).

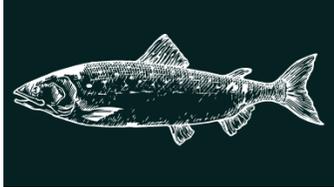
Définition dans le mémoire

Refuges thermiques d'eau froide, contrôlés par des mécanismes liés à des facteurs physiques (biotiques et abiotiques).

4 grandes catégories de refuges thermiques et de mécanismes qui expliquent leur **dynamique et leur variabilité spatio-temporelle** (Bergeron et al., 2020; Berthiaume et al., 2022). Puis une 5e catégorie: les refuges de fond de fosse, de plus en plus étudiés.

(Dugdale, et al., 2013; Sullivan, et al., 2021)

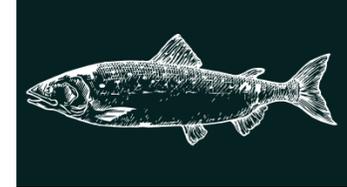
3. Refuges thermiques et zones de refroidissement



Refuge	Références	Schéma	Exemple: image optique	Exemple: image TIR
Confluence	Torgersen et al., 2012			
Suintement latéral	Biby, 1984			
	Ebersole et al., 2003a			
Source	Stanford and Ward, 1993			
	Ebersole et al., 2003a			
Bras latéral froid	Ebersole et al., 2003a			
	Stevens and DuPont, 2011			
Alcôve froide	Ozaki, 1988			
	Ebersole et al., 2003a			
Résurgence hyporhéique	Brunke and Gonser, 1997			
	Poole and Berman, 2001			
	Burkholder et al., 2008			
De paroi	Peterson and Reid, 1984			
	Torgersen et al., 2012			

(Dugdale, et al., 2013; Sullivan, et al., 2021)

3. Refuges thermiques et zones de refroidissement



01

Terminologie

Généralement utilisées comme synonymes des refuges thermiques

02

Zones de refroidissement dans le cadre du mémoire

- Secteurs surfaciques plus vastes qui englobent l'agrégation des mécanismes des facteurs physiques contribuant au refroidissement du cours d'eau
- La différence de T° n'est pas toujours significative comme le RT
- Pas nécessairement un rôle écohydrologique pour l'espèce



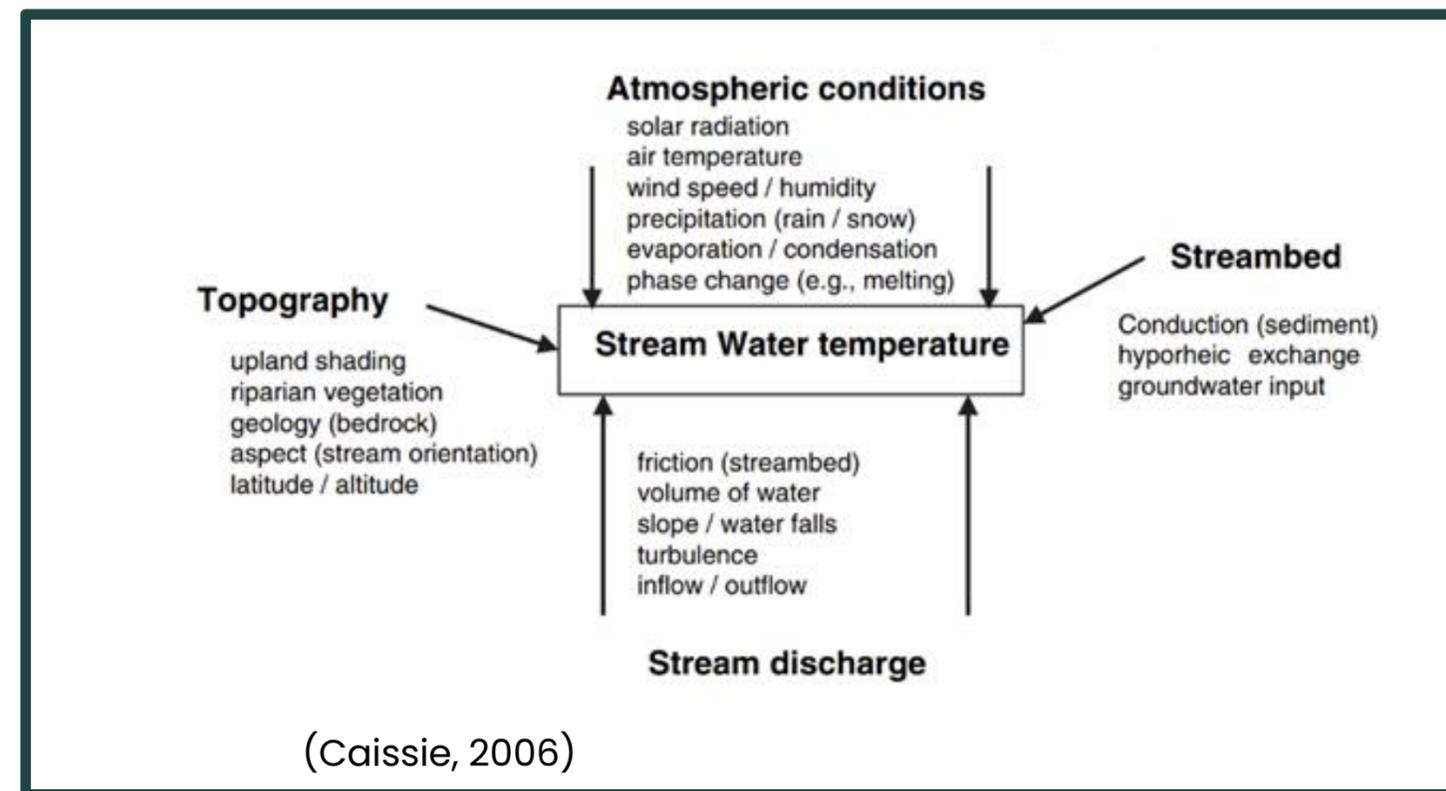
Similitudes

Les RT et Zrf partagent certains mécanismes physiques (Caissie, 2006; Dugdale, et al., 2013; Sullivan, et al., 2021)



Principales familles des facteurs physiques d'influence thermique

- Hydrographique
- Hydrogéologique
- Géologique
- Géomorphologique
- Forestier
- Atmosphérique



03

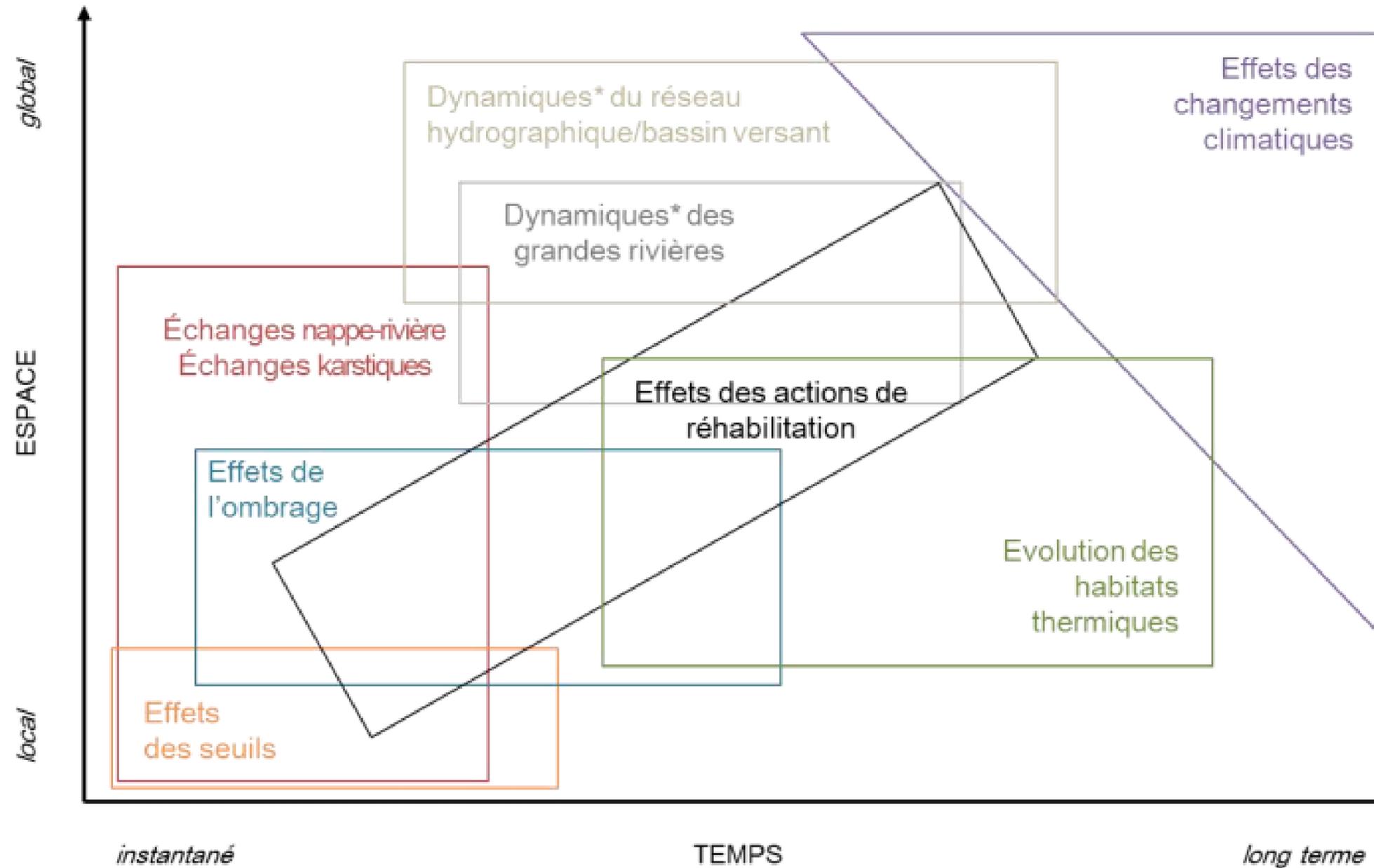
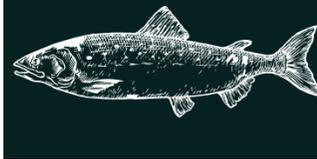
Différences

- Certains facteurs identifiés ne sont pas associés aux RT, mais peuvent avoir un effet sur la T° de l'eau
 - Par exemple, le facteur forestier ne contrôle pas les RT, mais l'ombrage de la canopée a un effet significatif sur la T° de l'eau lors des périodes de canicule et/ou d'étiage



Les RT se distinguent principalement des Zrf par leur **rôle écohydrologique**. La contribution des Zrf à la stabilité thermique de l'eau peut être limitée, et ses effets, lorsqu'ils se manifestent, peuvent prendre plus de temps à se faire sentir. Ils restent tout de même importants dans une perspective de conservation et de protection de l'habitat.

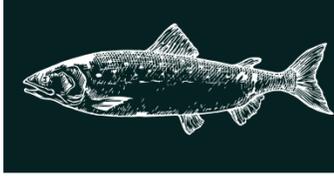
3. Refuges thermiques et zones de refroidissement



(Marteau, et al., 2023)

4. Méthodologie

4.1. Zone d'étude et justification



Pour développer notre méthode:

Preuve de concept

01 Assurer la validation du modèle

02 Réduire au maximum les incertitudes

Délimitation de la zone d'étude

01 Disponibilité et densité des données

02 Répartition spatiale des données

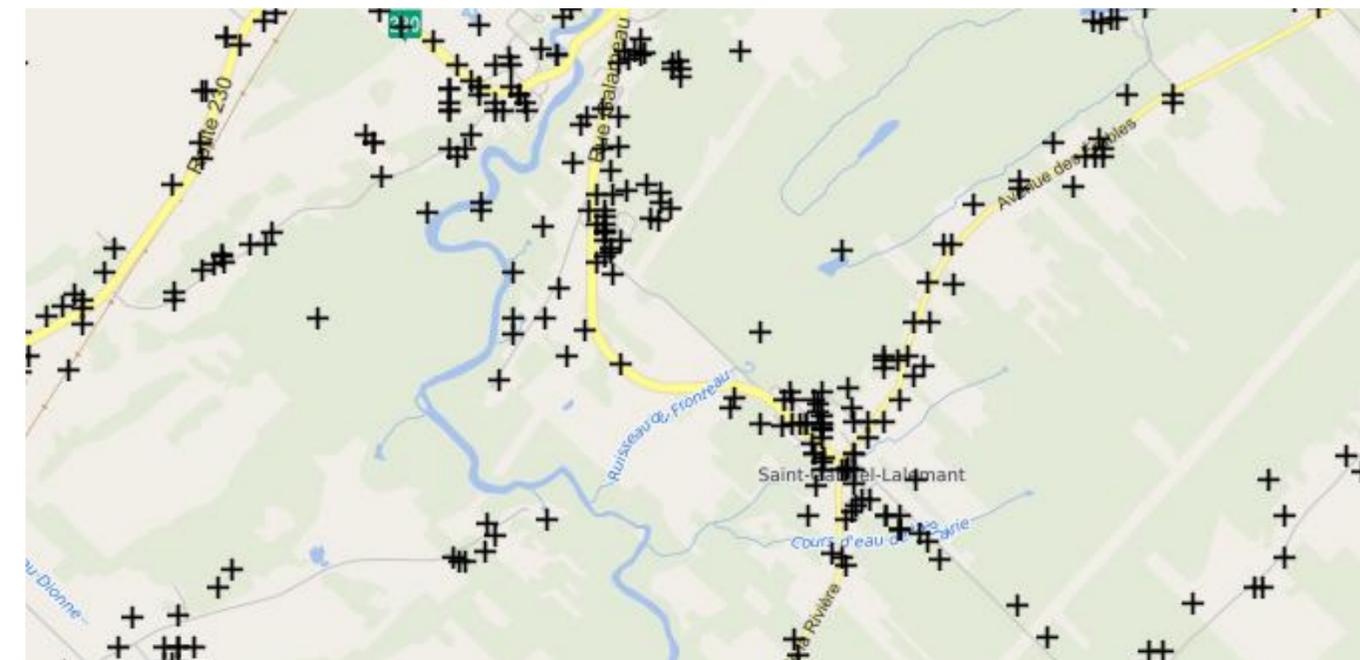
Description de la zone d'étude

- Superficie de 30 km²,
- En aval du bassin versant : municipalité de Saint-Pacôme
- À 0.75 km en amont de la confluence de la Grande Rivière (tributaire principal) et de la rivière Ouelle
- Grande diversité d'utilisation du sol: forestier et agricole

116 refuges thermiques identifiés dans la zone d'étude

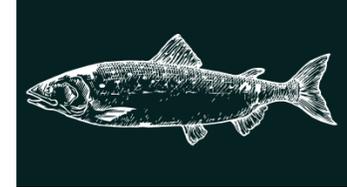
Facteurs clé

Disponibilité et la répartition des données de forages issues du Système d'Information Hydrogéologique (SIH)

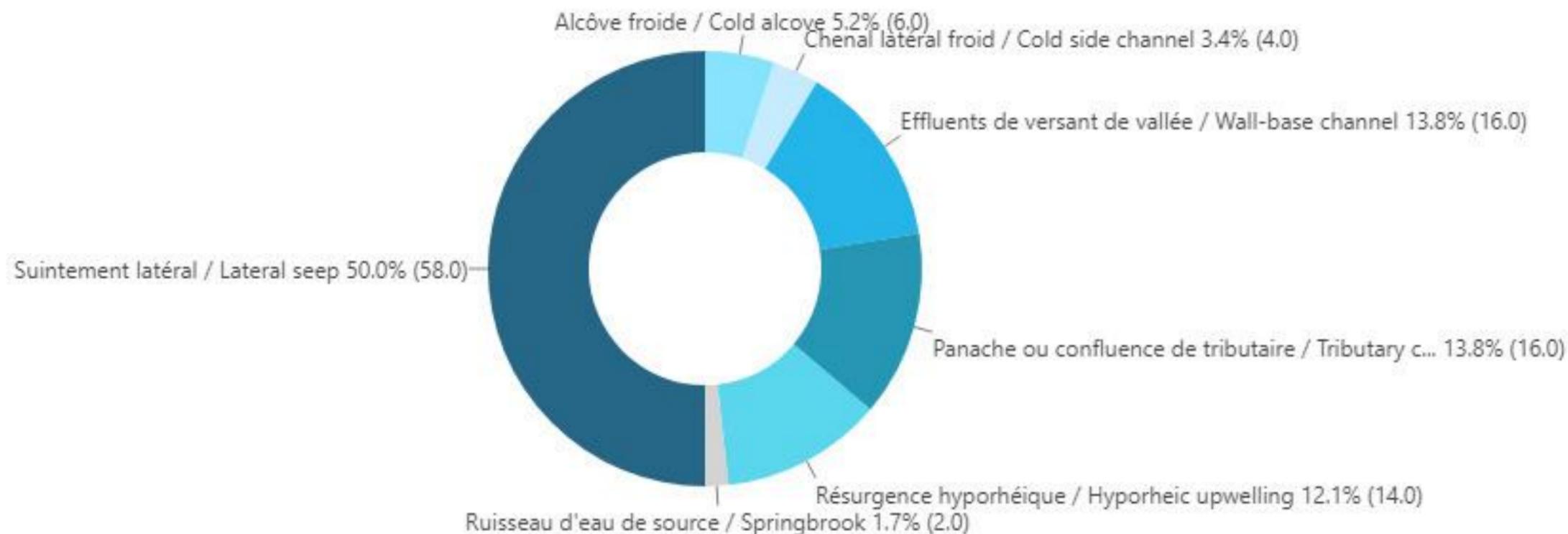


4. Méthodologie

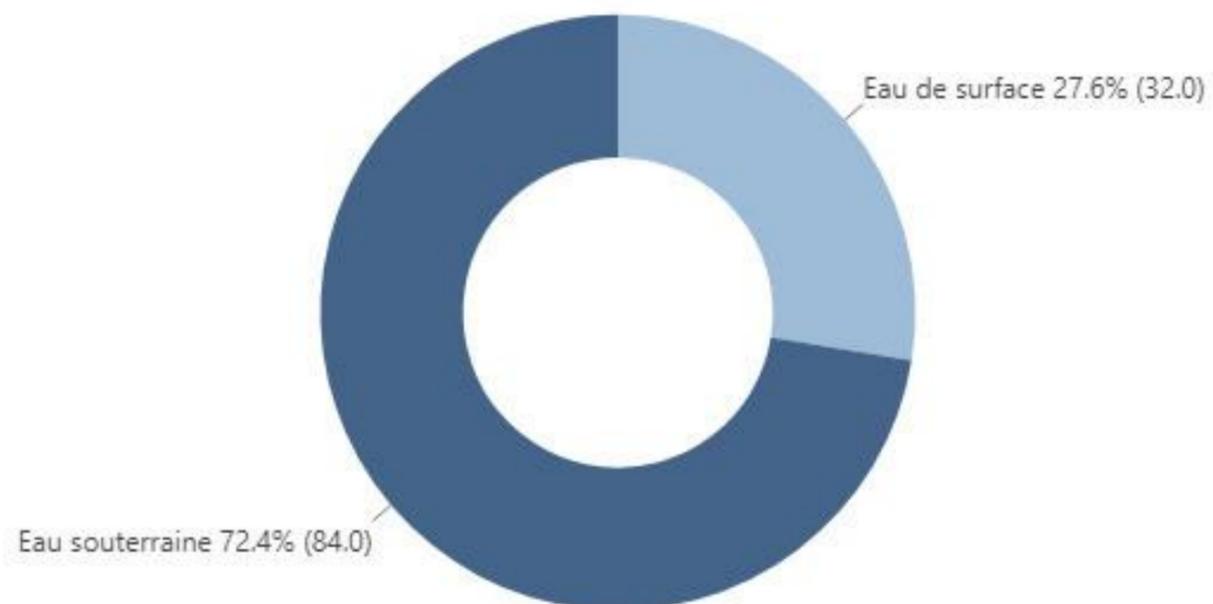
4.1. Zone d'étude et justification



Types des refuges thermiques dans la zone d'étude (Rivière Ouelle)

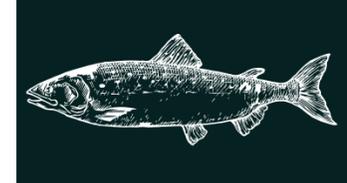


Répartition des types de sources d'eau (souterraines et de surface) pour les refuges thermiques dans la zone d'étude (Rivière Ouelle)



4. Méthodologie

4.2. Types de données utilisées et traitement



Facteur physique	Variables	Indicateurs	Données	Méthodes	Source des données (input)
Hydrographique	Confluence de tributaire froid	Réseau hydrographique	Polylignes (vectoriel)	Caractérisation des polylignes en fonction des refuges thermiques déjà identifiés et des thermographes Grille de distance de la confluence	GRHQ
		Refuges thermiques géolocalisés	Points (vectoriel)		Dugdale, et al. 2013
		Thermographes	Tables et points (vectoriel)		RivTemp
	Milieus humides	Indice d'humidité topographique (TWI - Topographic Wetness Index)	TWI (matriciel)	N/A	Forêt ouverte
Hydrogéologique	Résurgences d'eau souterraine	Topographie du substrat rocheux	Forages : Tables et points (vectoriel)	Structuration des tables Visualisation des points Interpolation	SIH
		Piézométrie			
Géologie	Dépôts meubles	Classification des dépôts	Relief ombragé / Forages: tables et points (vectoriel)	Photo interpretation	Forêt ouverte
	Épaisseur des dépôts meubles	Carte Isopaque			
Géomorphologie	Pente du cours d'eau	Gradient de pente du cours d'eau	MNT (matriciel)	Calcul du gradient de pente du cours d'eau: altitude et distance entre des points sur le cours d'eau	Forêt ouverte
Forestier	Santé de la forêt	NDVI	Sentinel-2 : Bandes 08 (NIR) et 04 (Rouge) (imagerie satellite)	Formules de télédétection Calculatrice matricielle	Copernicus
	Densité de la couverture forestière	FCD (Forest canopy density)	AVI: Sentinel-2: Bandes 08 (NIR) et 04 (Rouge) (imagerie satellite)		
			BSI: Sentinel-2: Bandes 08 (NIR), 04 (Rouge), 02 (Bleu), 11 (SWIR) (imagerie satellite)		
			SI: Sentinel-2: Bandes 02 (Bleu), 03 (Vert), et 04 (Rouge) (imagerie satellite)		
Ombrage riparien	Ombrage riparien pixel par pixel	MHC / Hillshade MHC	Calculatrice matricielle et outil Hillshade dans ArcGIS Pro	Forêt ouverte	
Atmosphérique	Radiation solaire	Insolation solaire	MNT	Outil Solar radiation dans ArcGIS Pro	Forêt ouverte



Données ouvertes

Types de données

- Produits dérivés du LiDAR
- Imagerie satellite
- Vectoriel
- Tables

Traitement de données

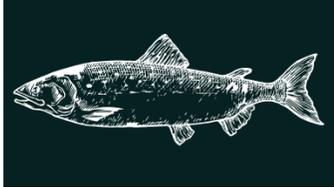
- Interpolation
- Analyse spatiale
- Calcul d'indices
- Télédétection
- Calculatrice matricielle
- Reclassification



Données primaires pour transformer en indicateurs

4. Méthodologie

4.3. Choix méthodologique



Approche d'AMC pondérée (AMCp):

01

Fondée sur une méthodologie de pondération des facteurs

02

Appliquée à la cartographie et à l'identification des zones de refroidissement (Zrf) et de réchauffement (Zrc)

03

Permet d'illustrer la complexité des processus physiques impliqués et la diversité des facteurs influençant la température des eaux dans la zone d'étude.



Prise en compte de la **multiplicité des facteurs physiques**

Capacité à intégrer des variables multiples, hétérogènes, et à les hiérarchiser en fonction de leur importance relative



Gestion des **interactions complexes** entre les facteurs

Localise de manière précise les zones critiques pour la gestion des habitats aquatiques



Facilitation de l'intégration des données spatiales

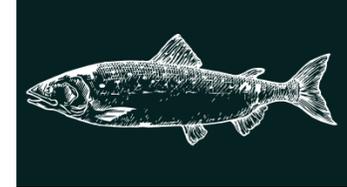
Approche rigoureuse et flexible qui tient compte de l'ensemble des variables d'influence sur la T° de l'eau



Adaptabilité de la méthodologie

Modélisation adaptée aux objectifs de conservation et de gestion des milieux aquatiques dans la zone d'étude.

4. Méthodologie



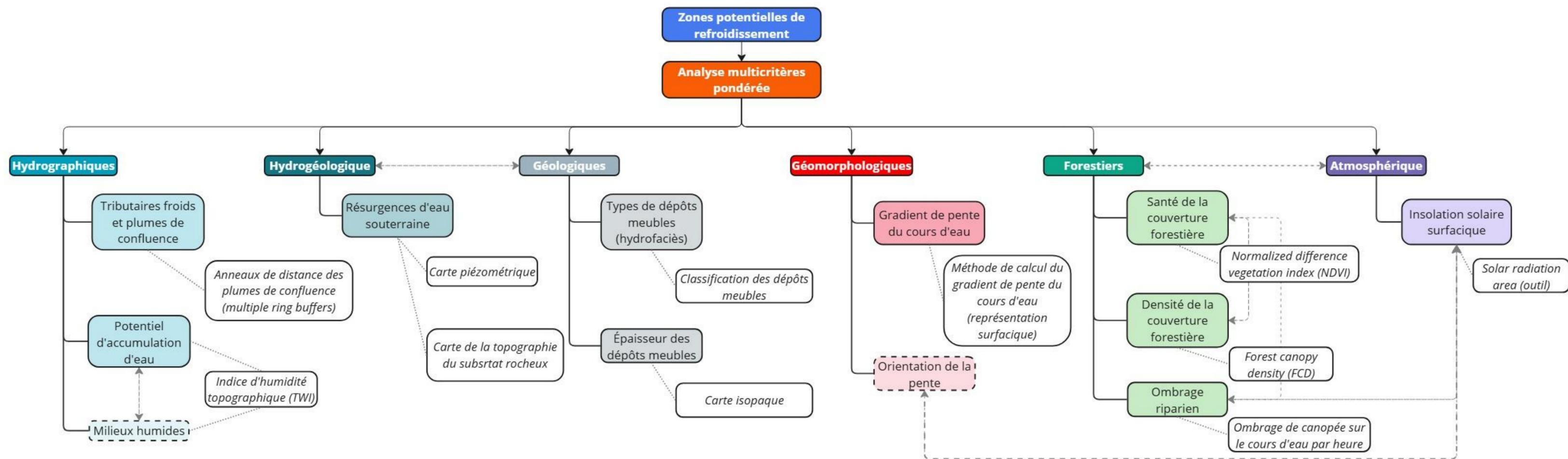
4.4. Modélisation des facteurs physiques: variables et indicateurs

Préparation pour l'AMCp

1. Identification des variables qui permettent de représenter et de mesurer les facteurs physiques
2. Modélisation des variables des facteurs physiques
3. Normalisation des valeurs

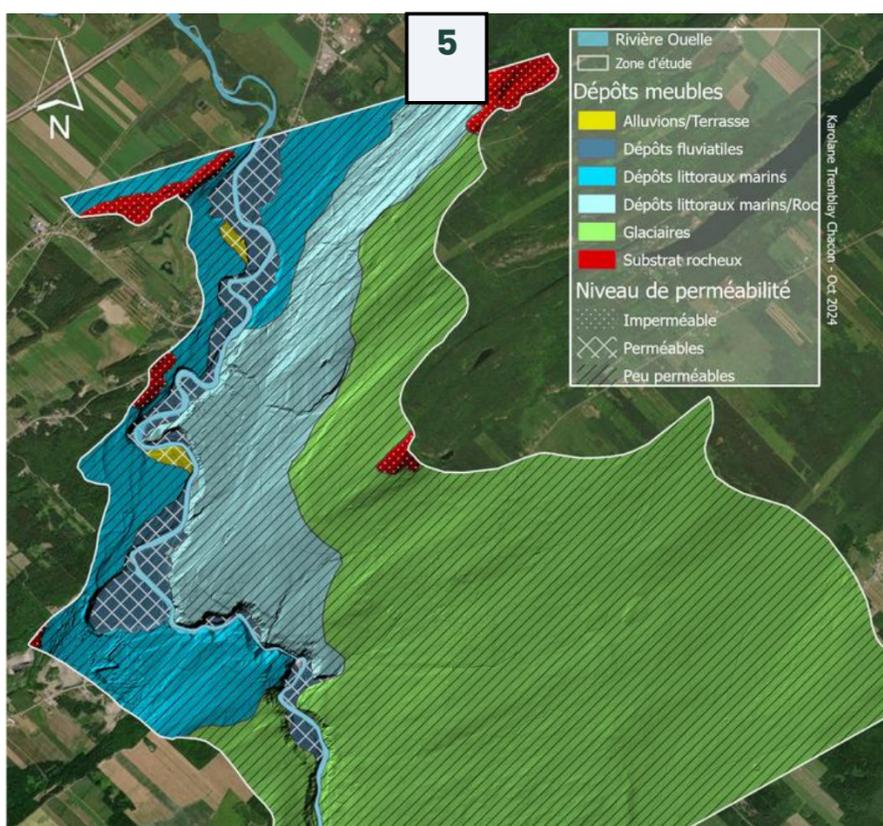
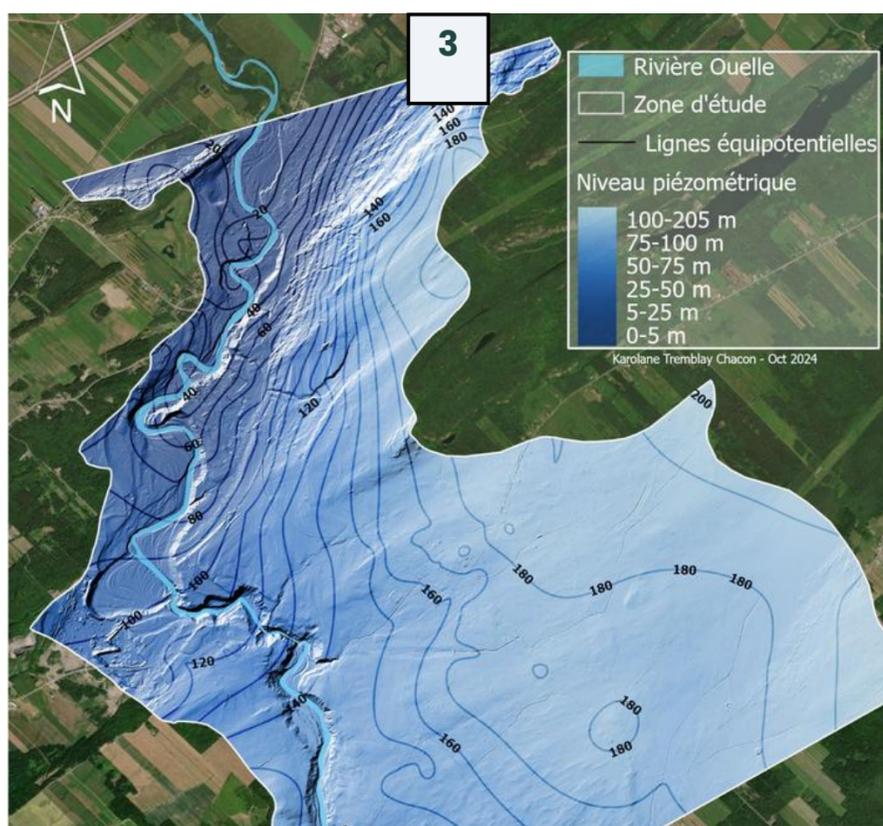
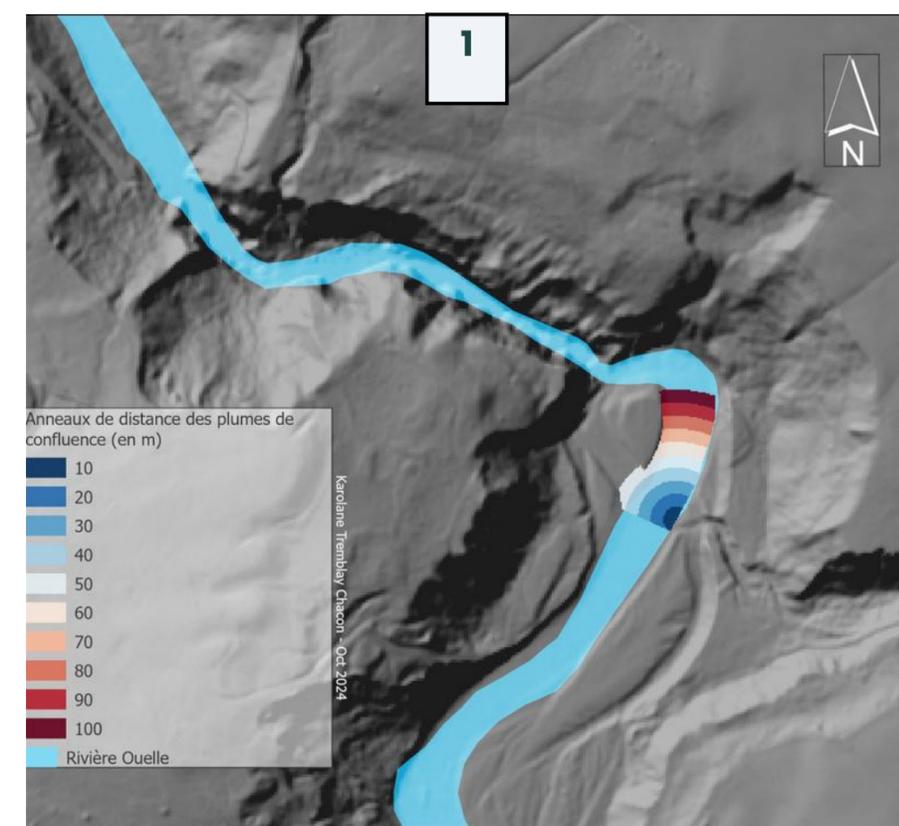
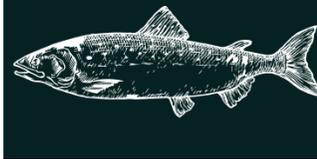


15 indicateurs



4. Méthodologie

4.4. Modélisation des facteurs physiques: variables et indicateurs

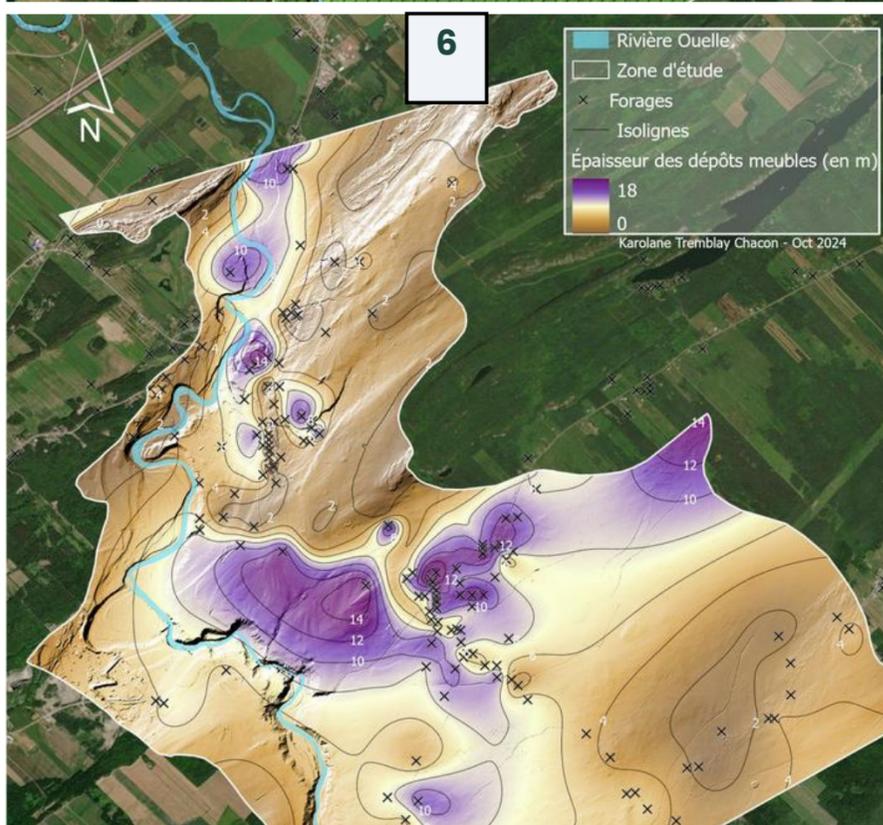
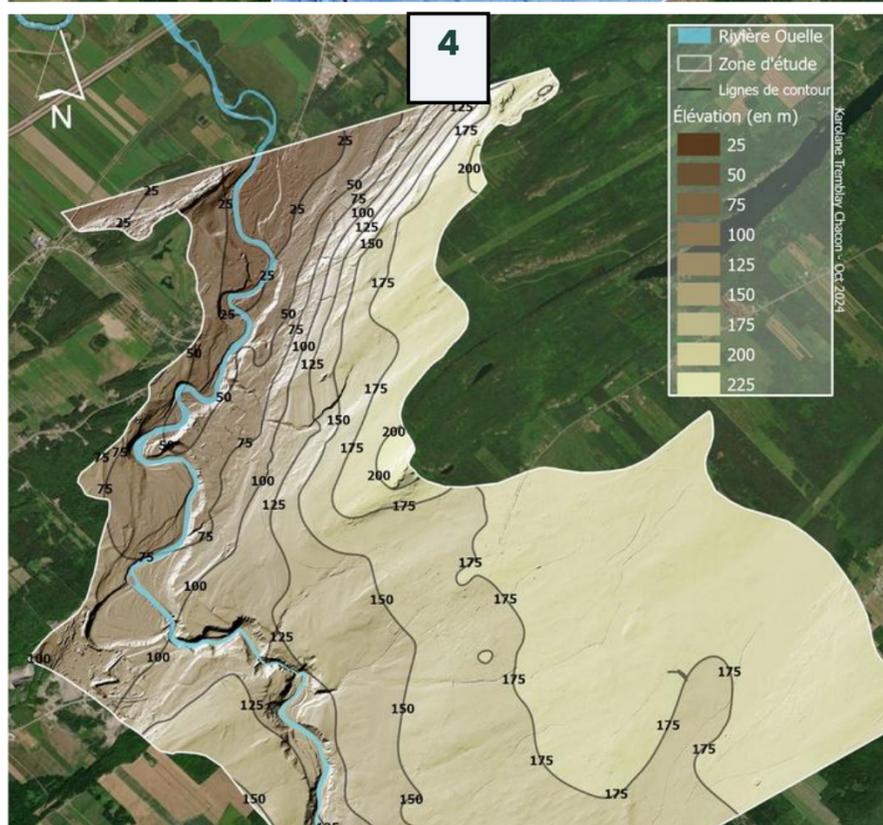
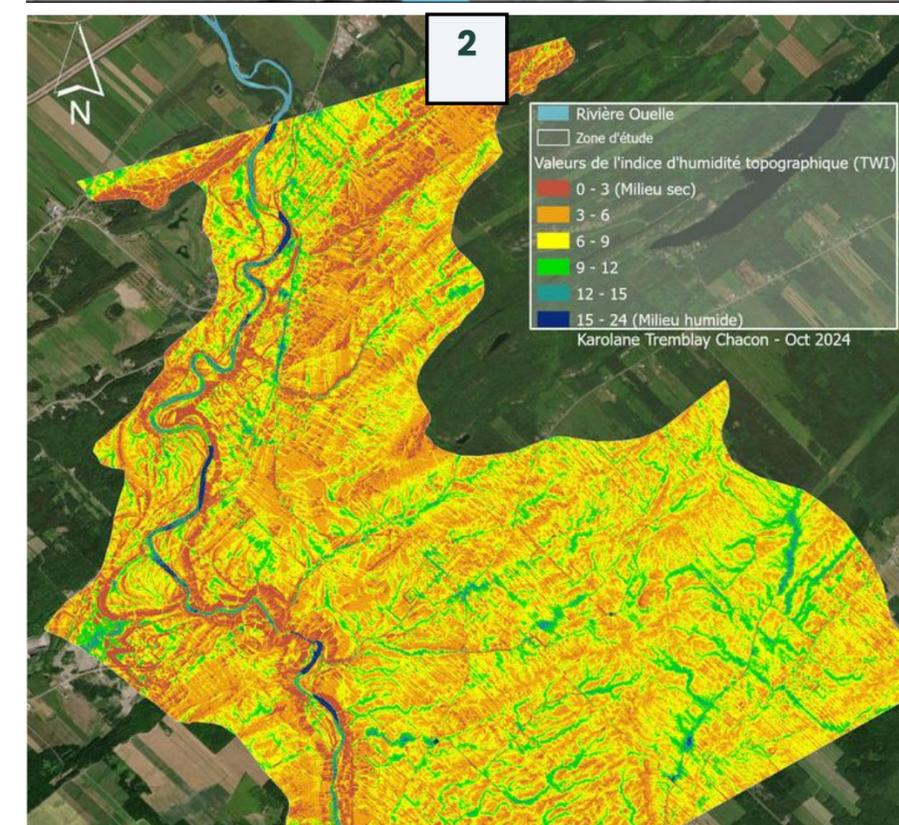


Hydrographique

1. Anneaux de distance des plumes de confluence
2. Topographie Wetness Index (TWI)

Hydrogéologie

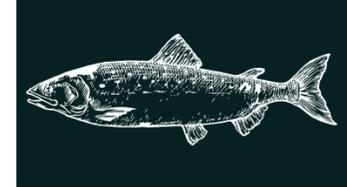
3. Carte piézométrique
4. Carte de la topographie du substrat rocheux



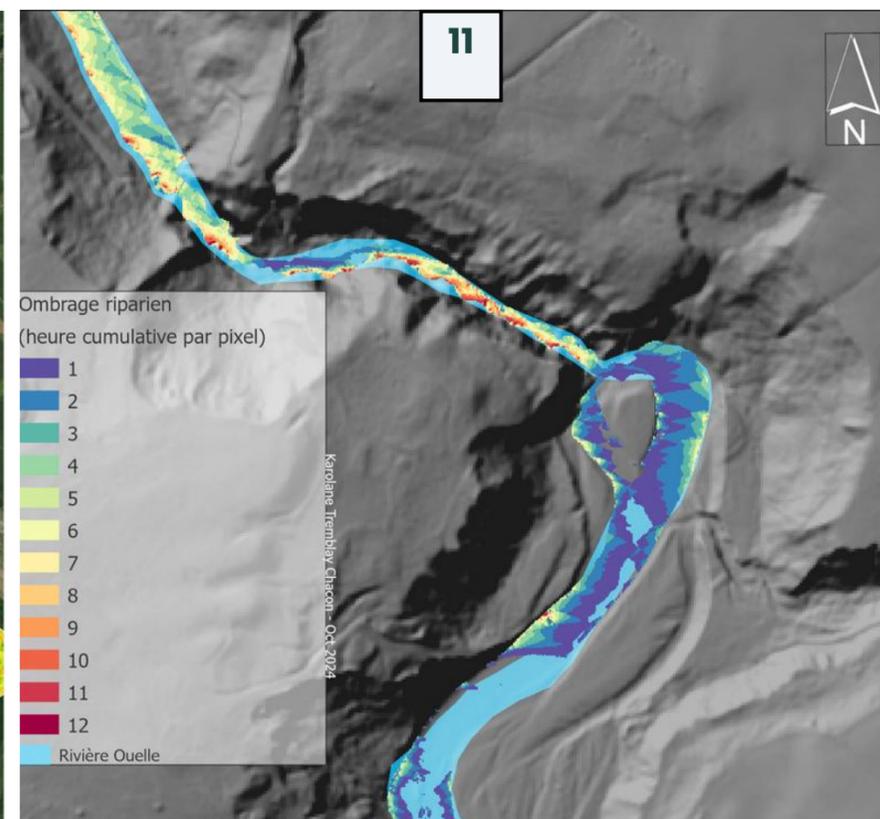
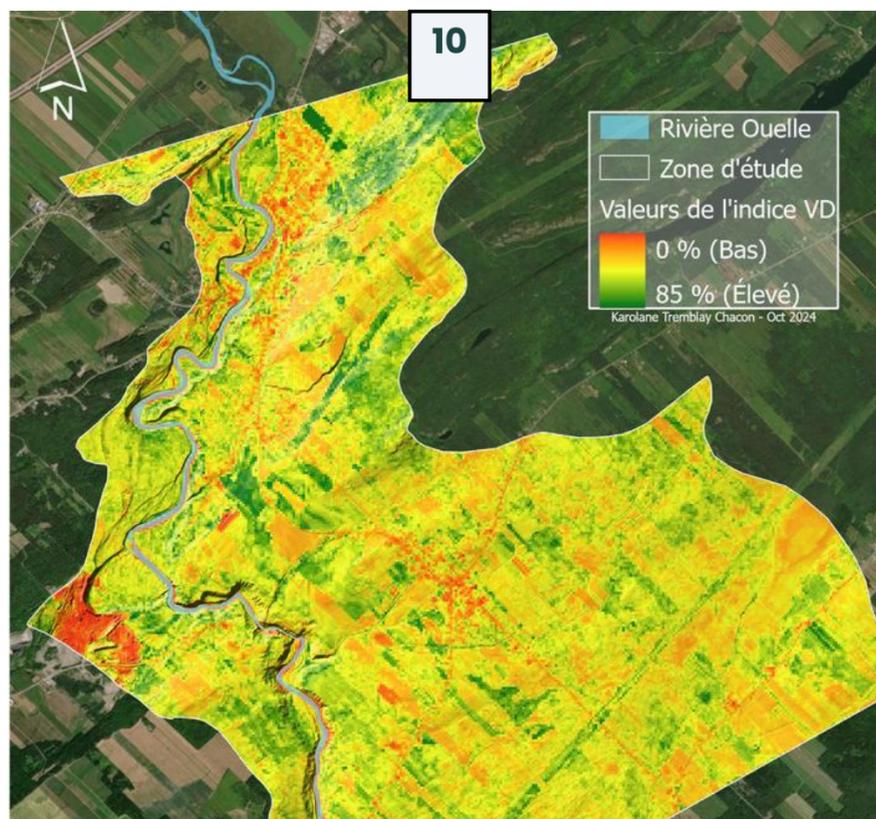
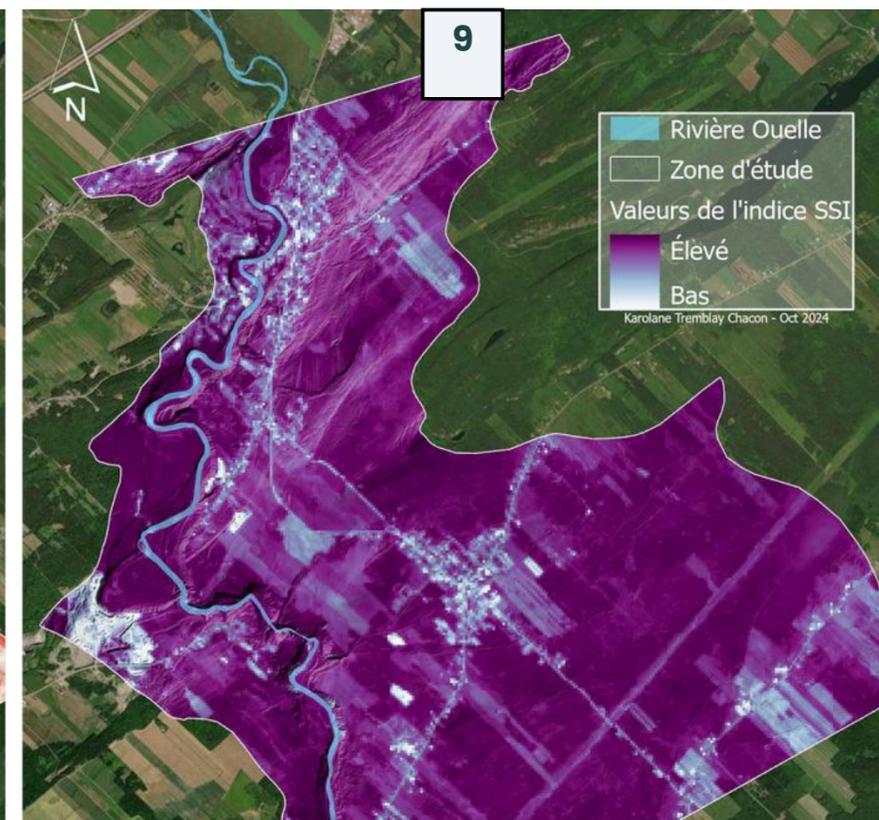
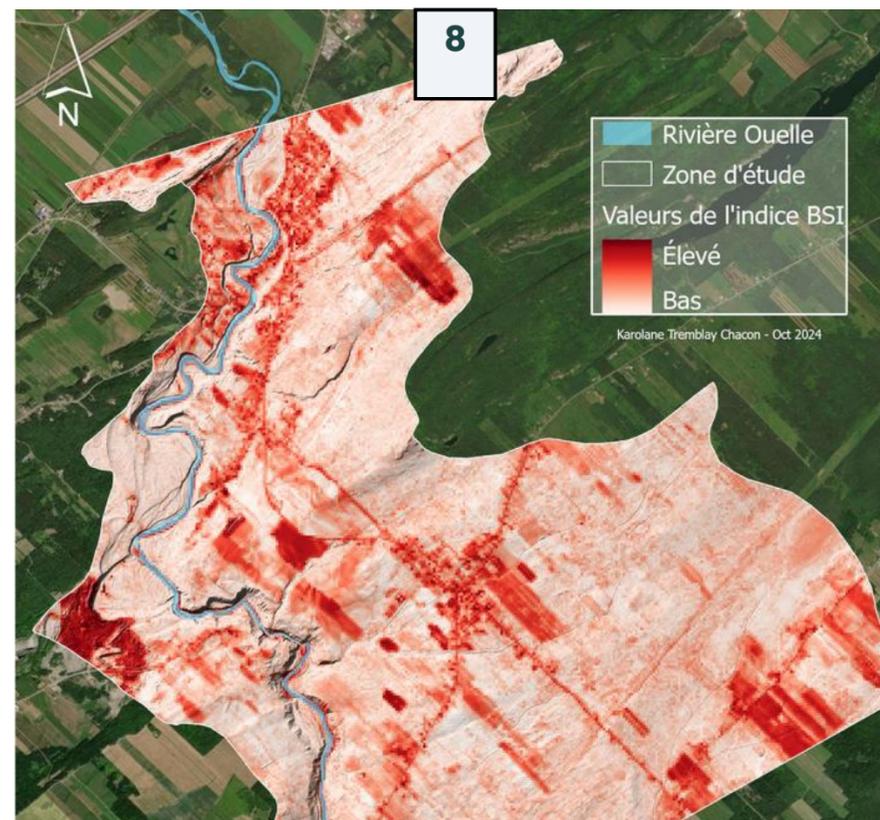
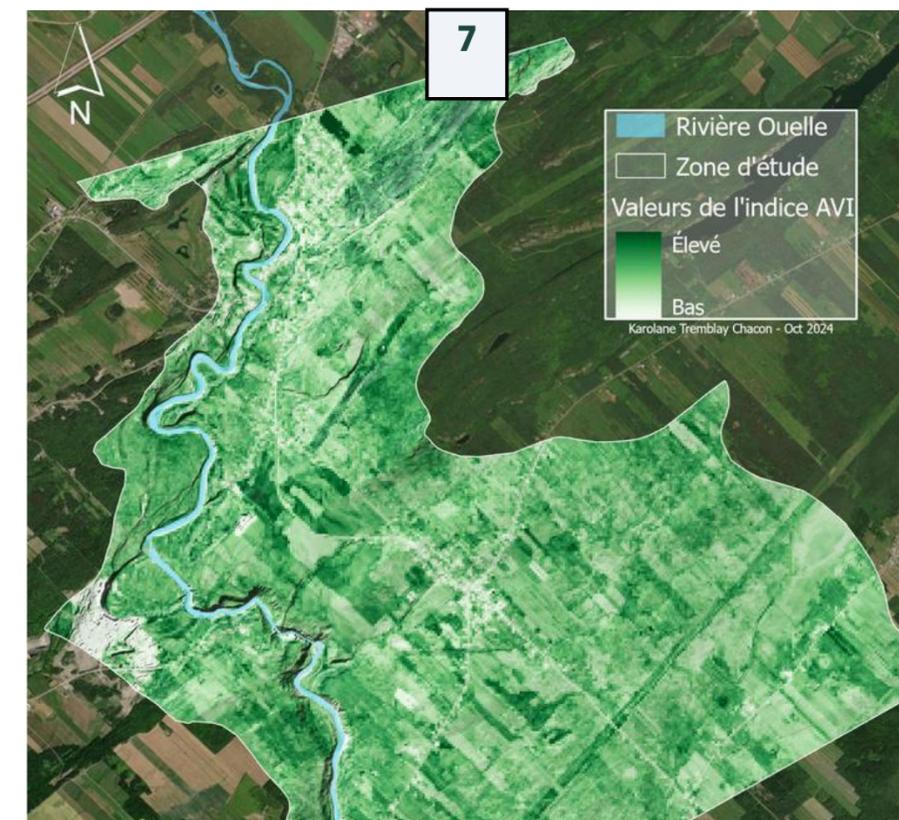
Géologie du Quaternaire

5. Hydrofaciès: classification des dépôts meubles
6. Carte isopaque: épaisseur des dépôts meubles

4. Méthodologie OP 3 par facteur physique



4.4. Modélisation des facteurs physiques: variables et indicateurs

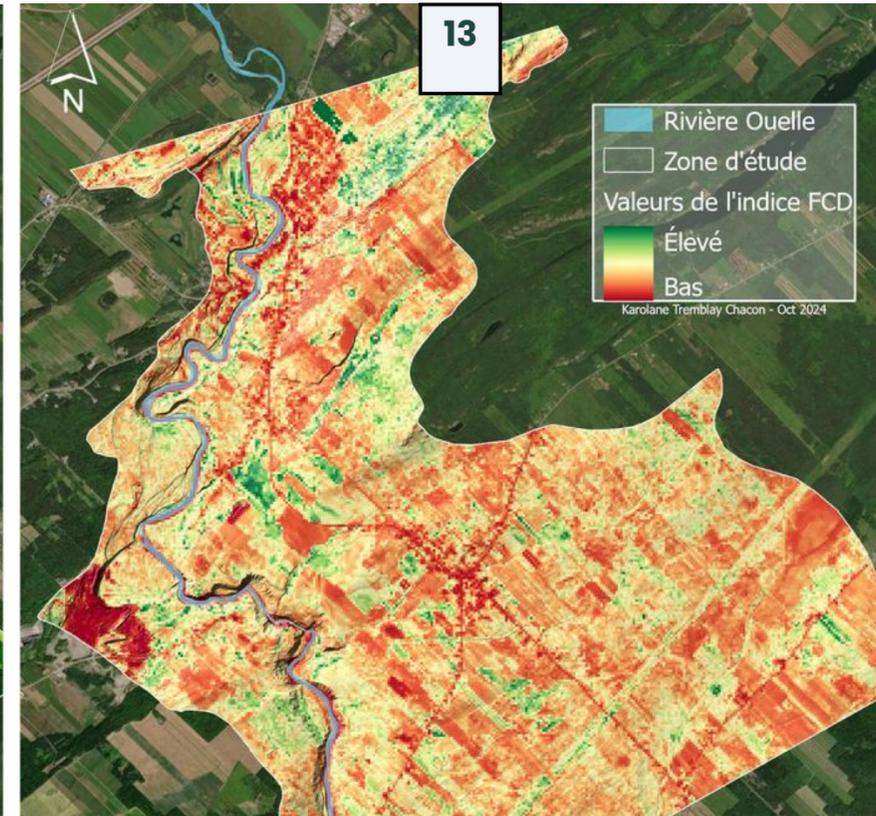
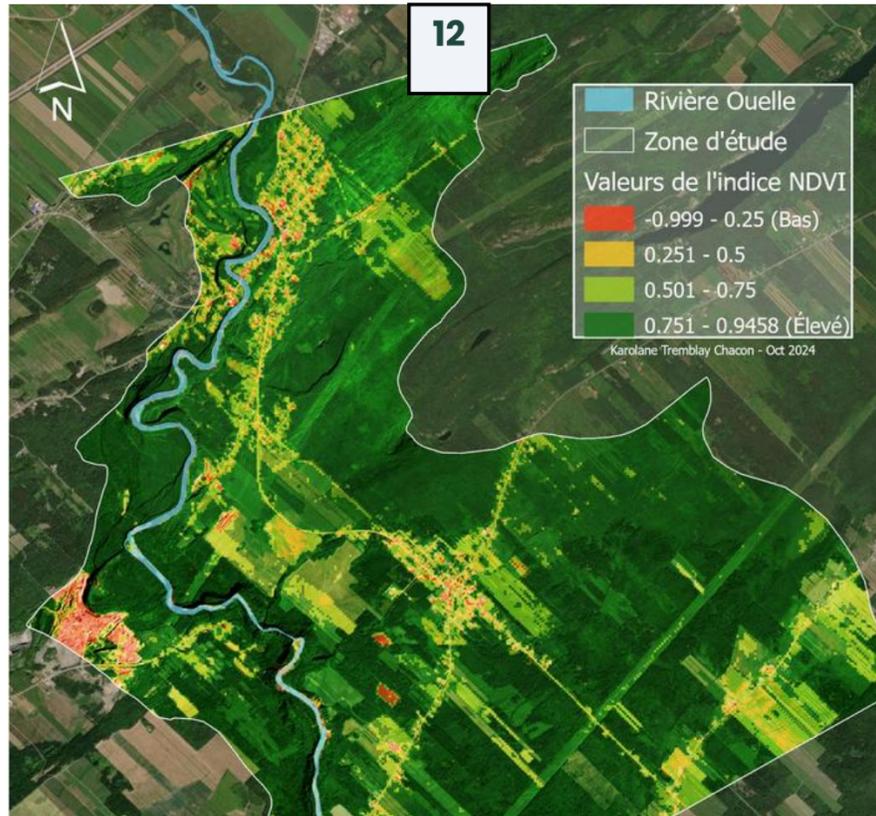
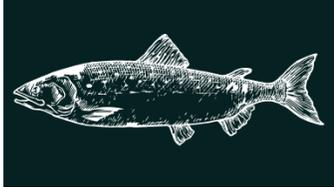


Forestie

- 7. Advanced Vegetation Index (avi)
- 8. Bare Soil Index (BSI)
- 9. Scaled Shadow Index (SSI)
- 10. Vegetation Density (VD)
- 11. Ombrage de canopée sur le cours d'eau

4. Méthodologie OP 3 par facteur physique

4.4. Modélisation des facteurs physiques: variables et indicateurs

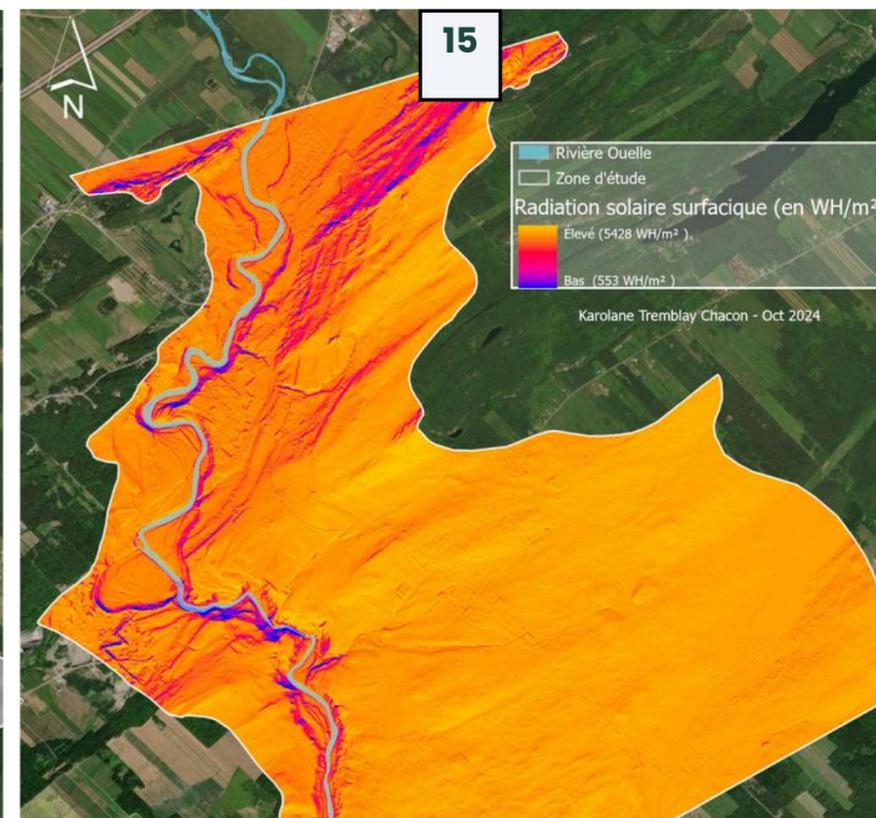
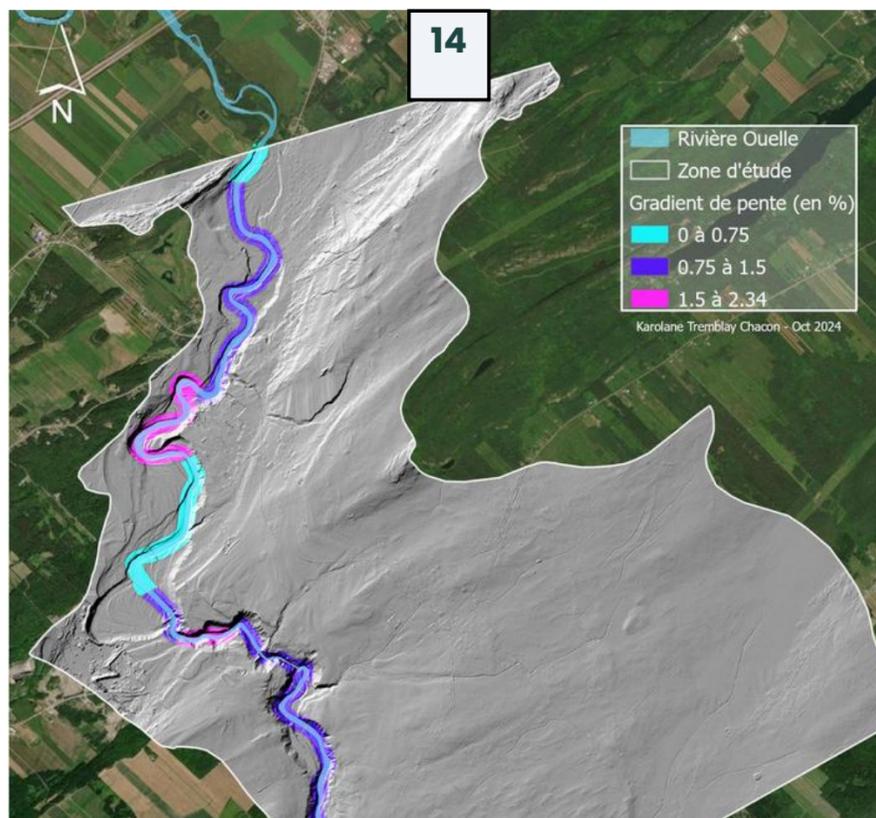


Forestie

- 12. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)
- 13. Forest Canopy Density (FCD)

Géomorphologique

- 14. Gradient de pente du cours d'eau

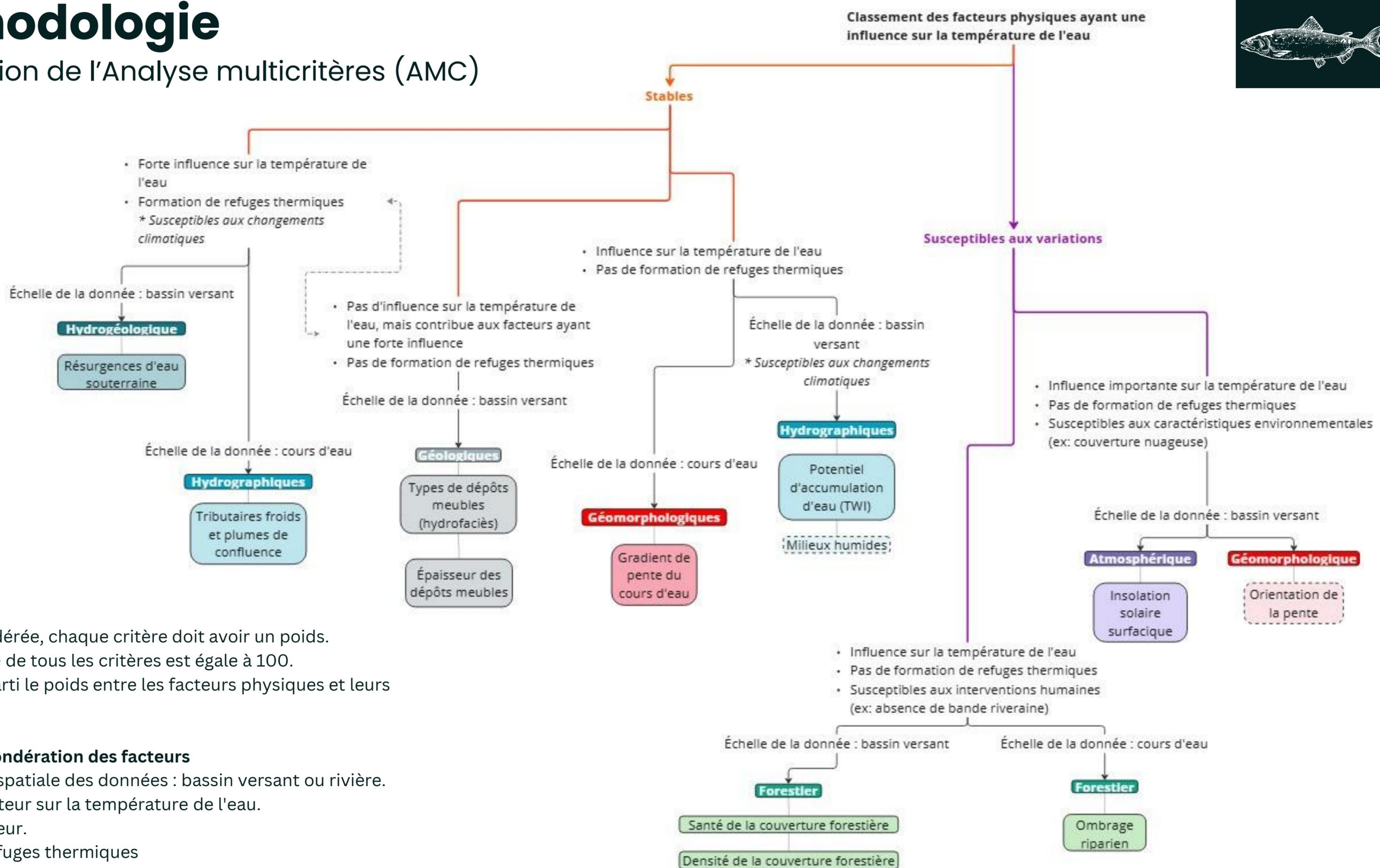
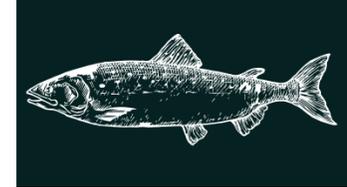


Atmosphérique

- 15. Solar radiation area

4. Méthodologie

4.5. Application de l'Analyse multicritères (AMC)



AMC pondérée

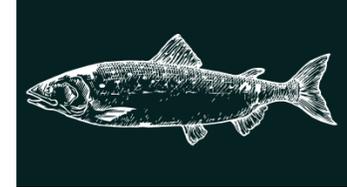
- Pour l'AMC pondérée, chaque critère doit avoir un poids.
- La somme totale de tous les critères est égale à 100.
- Nous avons réparti le poids entre les facteurs physiques et leurs variables

Réflexion pour la pondération des facteurs

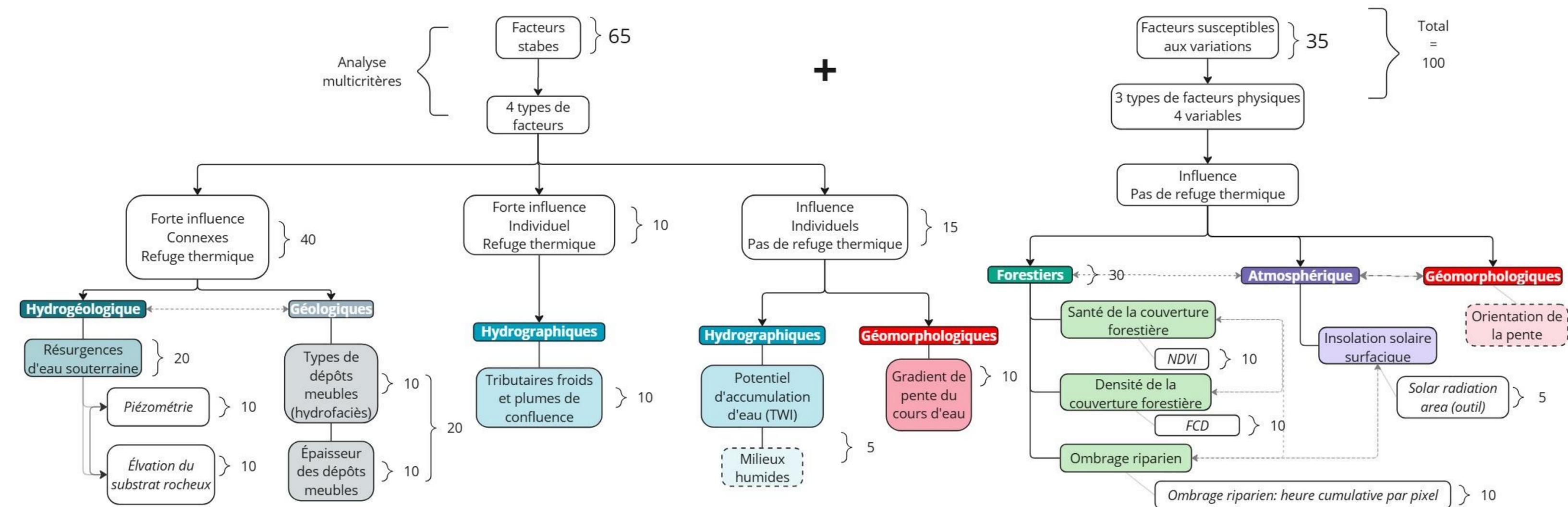
- Représentation spatiale des données : bassin versant ou rivière.
- Influence du facteur sur la température de l'eau.
- Stabilité du facteur.
- Formation de refuges thermiques

4. Méthodologie

4.5. Application de l'Analyse multicritères (AMC)

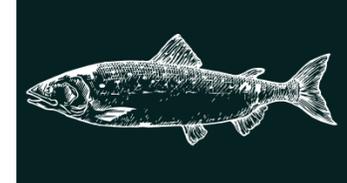


Pondération des facteurs et indicateurs



4. Méthodologie

4.6. Analyse de sensibilité des paramètres

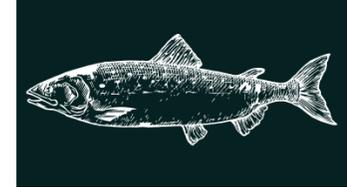


Étalon		Scénario 1		Scénario 2		Scénario 3	
Pondération des indicateurs	Facteurs	Pondération des variables	Facteurs	Pondération des variables	Facteurs	Pondération des variables	Facteurs
9	Hydrogéologique = 18	8	Hydrogéologique = 16	14	Hydrogéologique = 24	8	Hydrogéologique = 16
9		8		8			
9	Hydrographique = 18	14	Hydrographique = 28	8	Hydrographique = 16	8	Hydrographique = 16
9		14		8			
9	Géologique = 18	8	Géologique = 16	8	Géologique = 16	14	Géologique = 24
9		8		8			
9	Géomorphologique = 9	8	Géomorphologique = 8	8	Géomorphologique = 8	8	Géomorphologique = 8
9	Forestier = 27	8	Forestier = 24	8	Forestier = 24	8	Forestier = 24
9		8		8			
9		8		8			
9	Atmosphérique = 9	8	Atmosphérique = 8	8	Atmosphérique = 8	8	Atmosphérique = 8
	99		100		100		100

Le but de l'analyse de sensibilité des paramètres est de déterminer quels paramètres influencent le plus les résultats de l'analyse, afin d'ajuster les valeurs de la pondération finale si nécessaire.

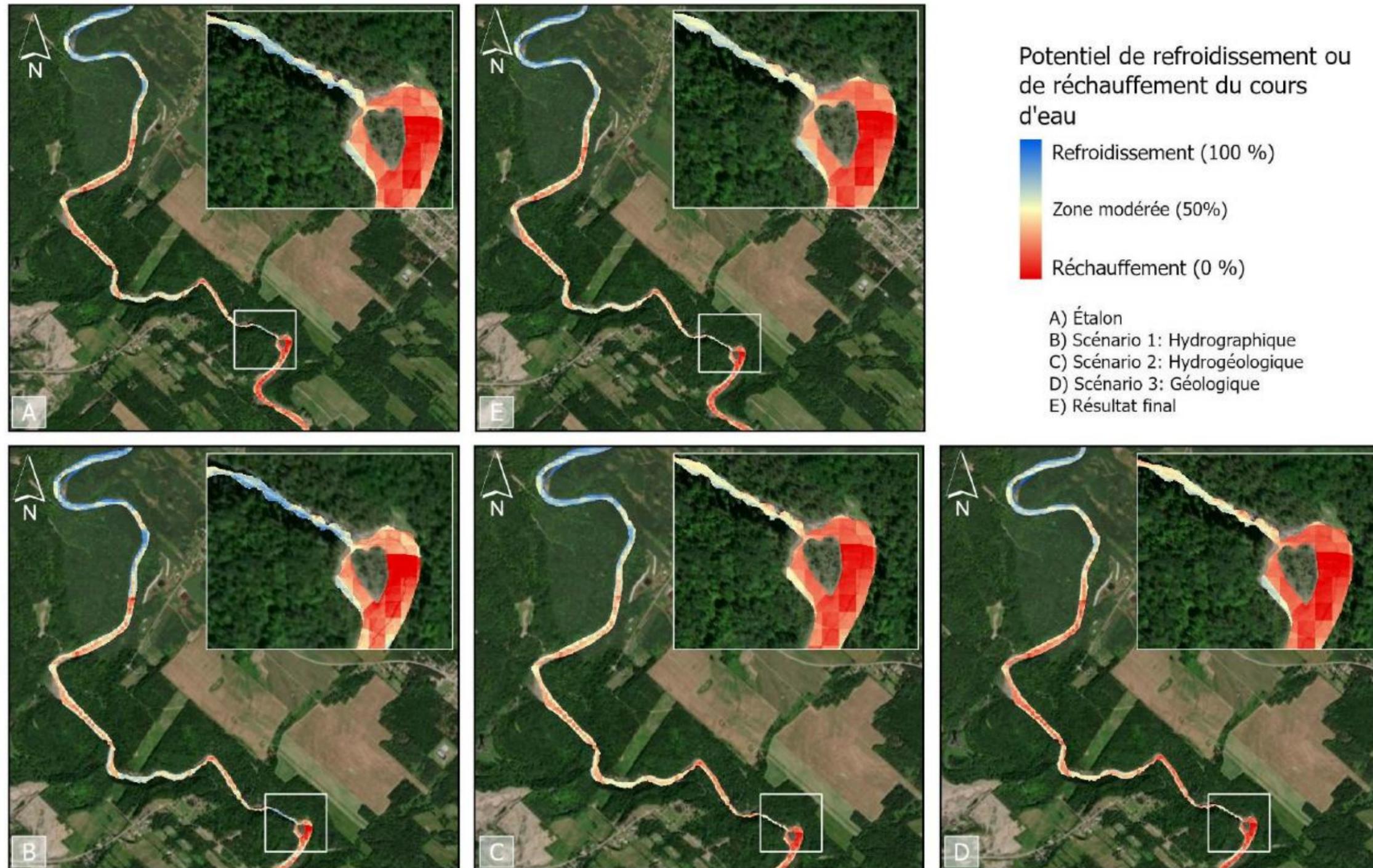
- Chaque facteur a un nombre de variables variant de 1 à 3.
- Nous avons élaboré trois scénarios avec un facteur principal pour assurer leur comparabilité.
- Les facteurs choisis (hydrologique, hydrogéologique et géologique) comptent chacun deux variables = scénario comparable
- Cette première analyse de sensibilité vise à accorder plus de poids à un seul facteur pour observer son effet sur les résultats de l'AMC

5. Résultats, validation et interprétation



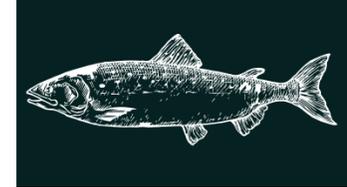
5.1. Résultats de l'analyse de sensibilité

RIVIÈRE OUELLE: COMPARAISON DES RÉSULTATS DE L'ANALYSE MULTI-CRITÈRES PONDÉRÉE



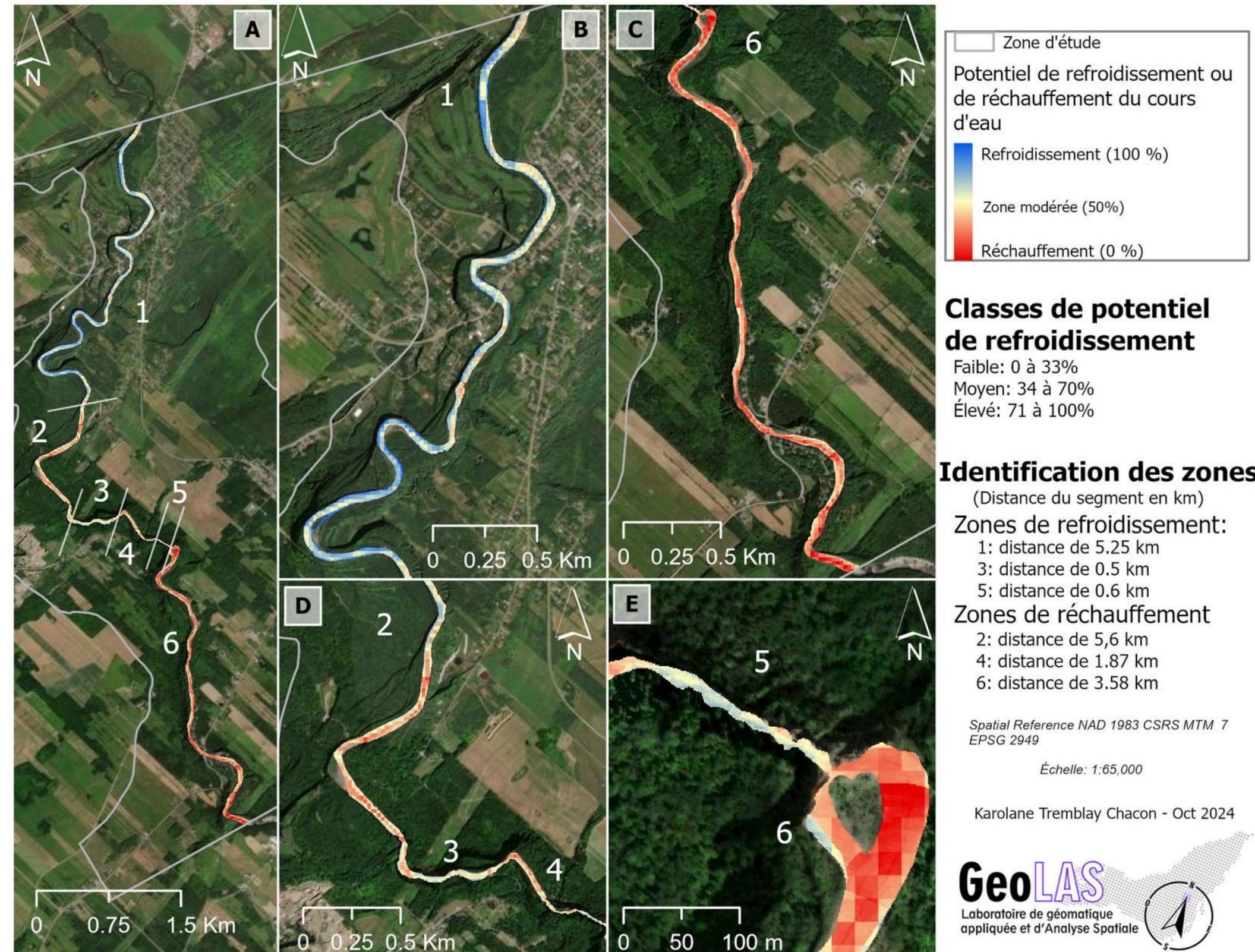
- Le résultat de l'AMC génère une couche raster.
- Chaque pixel reflète le potentiel de refroidissement en fonction de l'agrégation des facteurs.
- Plus les facteurs sont concentrés pixel par pixel, plus le potentiel de refroidissement est théoriquement élevé.

5. Résultats, validation et interprétation



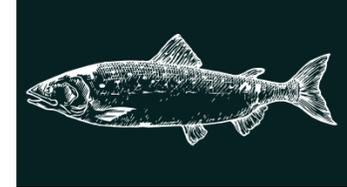
5.2. Résultats de la pondération retenue

RIVIÈRE OUELLE: IDENTIFICATION DES ZONES POTENTIELLES DE REFROIDISSEMENT ET DE RÉCHAUFFEMENT SUR LE COURS D'EAU



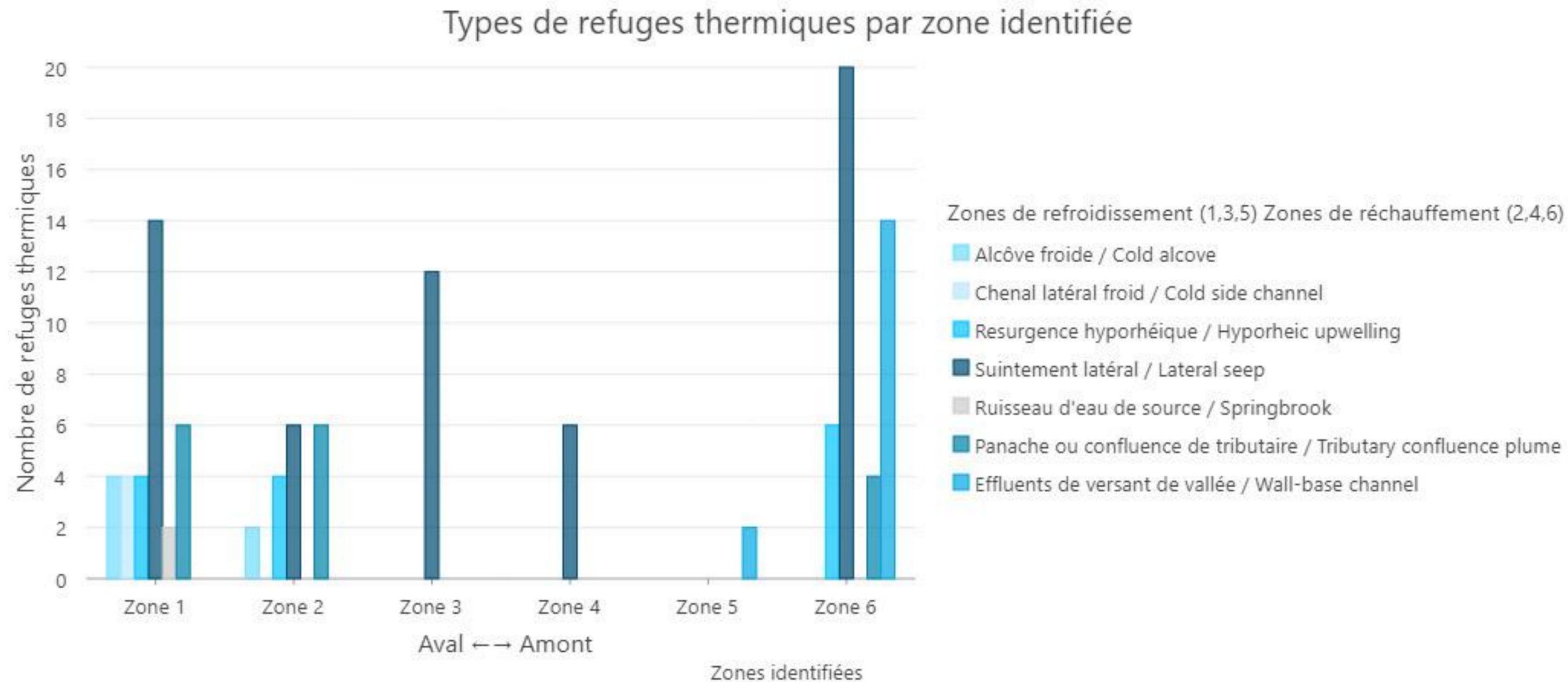
- Nous avons identifié 6 zones:
 - 3 zones de refroidissement (en bleu)
 - 3 zones de réchauffement (en rouge)
- À l'intérieur de ces zones nous observons des zones modérées (en jaune)
- Le résultat final reflète la pondération retenue des indicateurs

5. Résultats, validation et interprétation

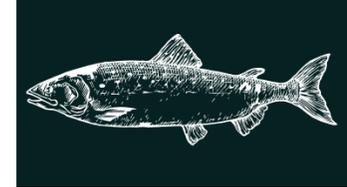


5.2. Résultats de la pondération retenue

- La plupart des RT se trouvent dans la Zrc 6 = suggère qu'ils sont potentiellement plus sensibles

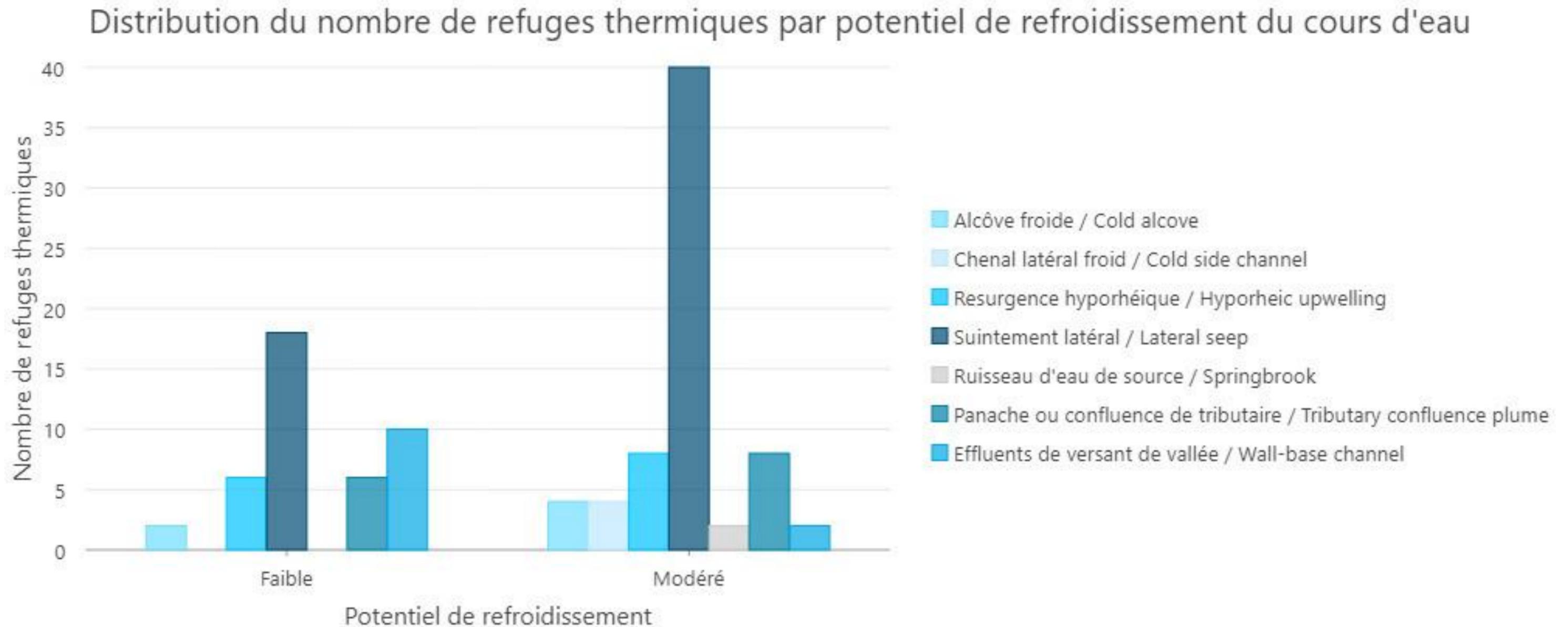


5. Résultats, validation et interprétation

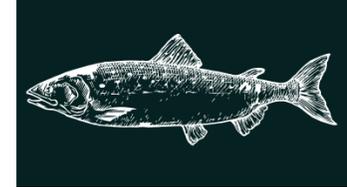


5.2. Résultats de la pondération retenue

- Malgré que certains refuges se trouvent dans une zone de refroidissement, les valeurs extraites des résultats indiquent que la plupart se trouvent dans la catégorie modérée au sein des zones de refroidissement ou de réchauffement

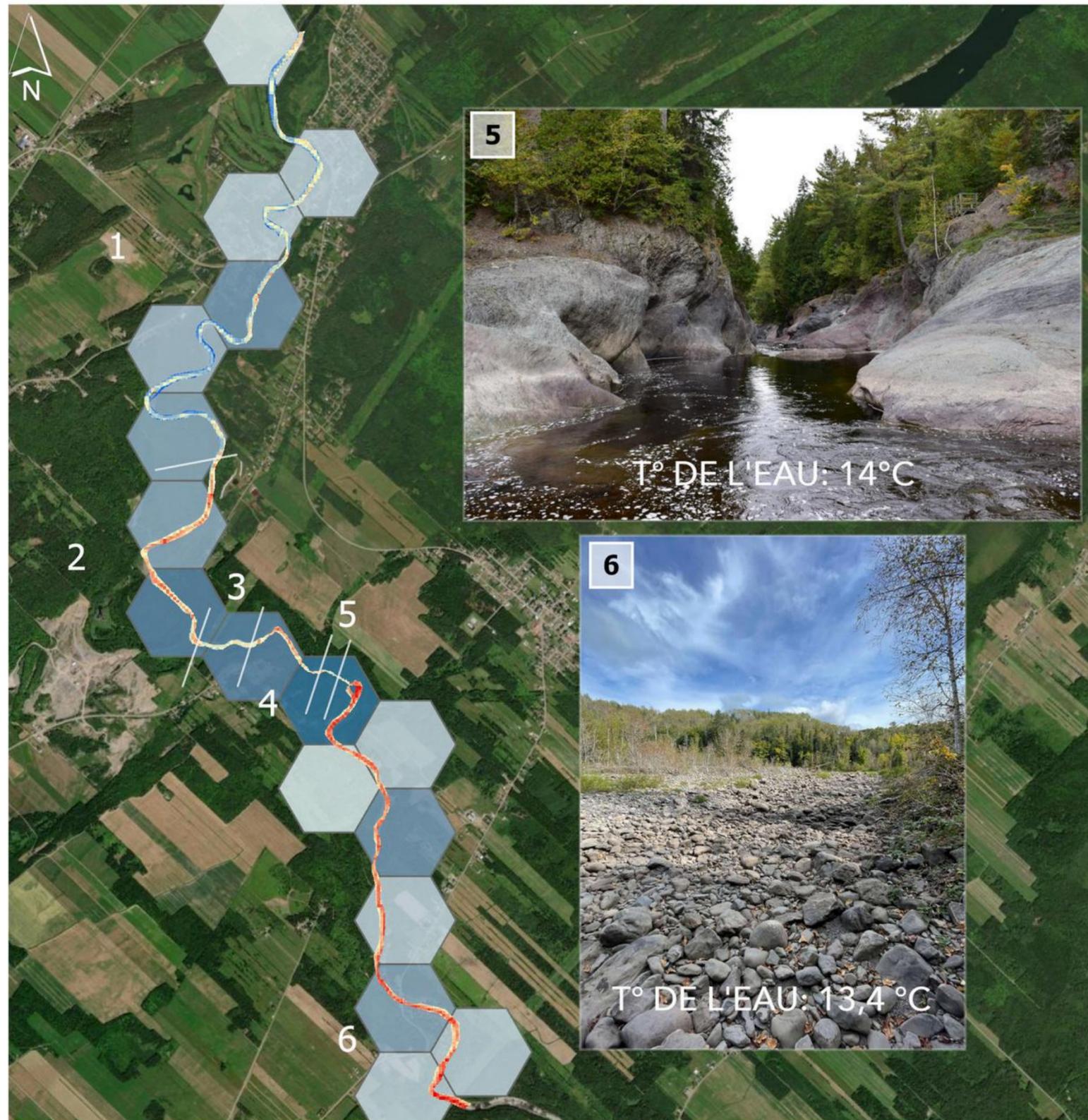


5. Résultats, validation et interprétation

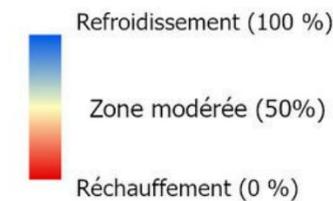


5.3. Synthèse des résultats

RIVIÈRE OUELLE: DISTRIBUTION DES AGRÉGATS DE REFUGES THERMIQUES PAR RAPPORT AUX ZONES POTENTIELLES DE REFROIDISSEMENT ET DE RÉCHAUFFEMENT



Potentiel de refroidissement ou de réchauffement du cours d'eau



Agrégation des refuges thermiques



Classes de potentiel de refroidissement

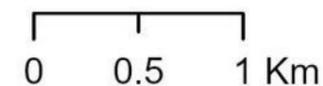
Faible: 0 à 33%
Moyen: 34 à 70%
Élevé: 71 à 100%

Zones de refroidissement: 1, 3, 5

Zones de réchauffement: 2, 4, 6

Spatial Reference NAD 1983 CSRS MTM 7
EPSG 2949

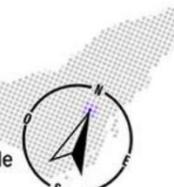
Échelle: 1:50,000



Karolane Tremblay Chacon - Mars 2025

GeoLAS

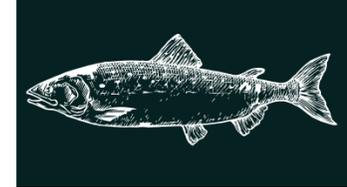
Laboratoire de géomatique
appliquée et d'Analyse Spatiale



- Permet de dresser un portrait du niveau de sensibilité des RT en fonction de la zone dans laquelle ils se trouvent
- Offre une compréhension de la dynamique des facteurs sur le cours d'eau
- Facilite l'orientation des efforts terrain et d'intervention
- Ne prédit pas le nb de RT dans une zone
- Le nb de RT ne dépend pas de du type de zone (Zrf ou Zrc)
- Ne prédit pas la T° de l'eau

5. Résultats, validation et interprétation

5.4. Campagne terrain



01 Site de validation

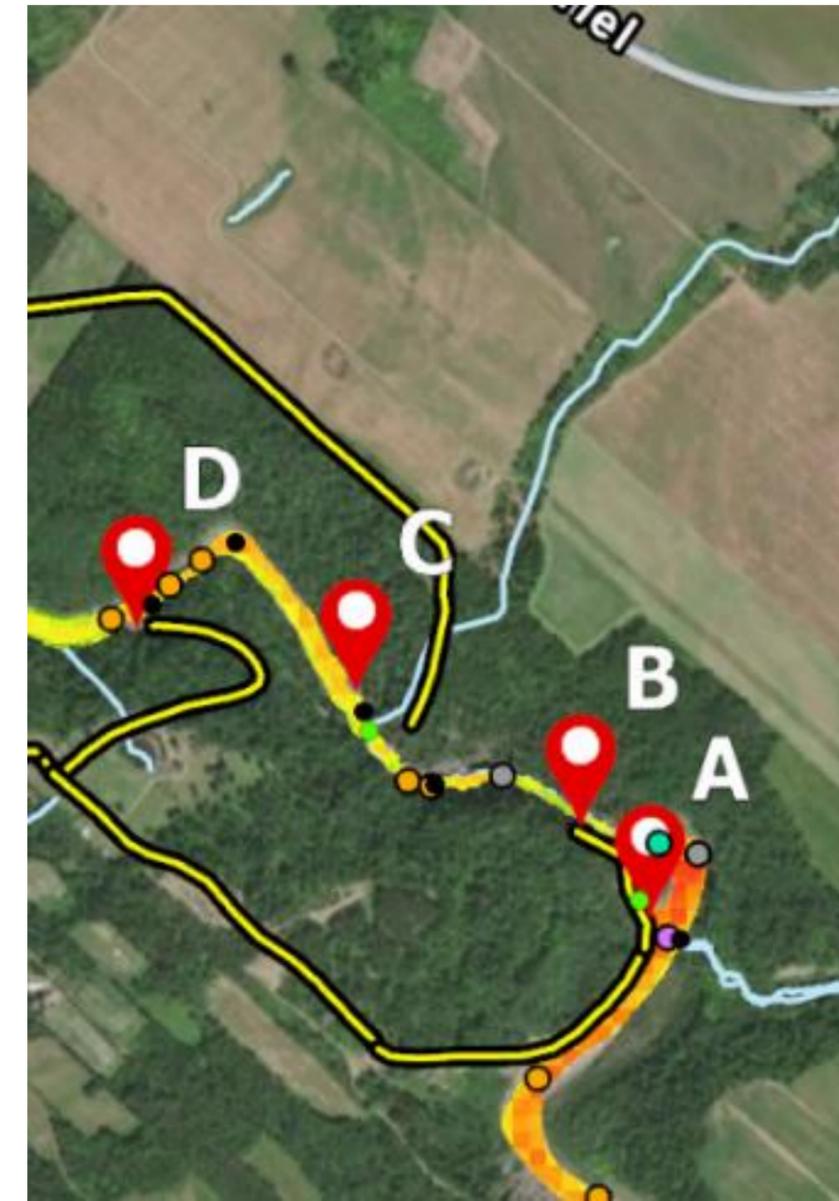


02 Données des refuges thermiques



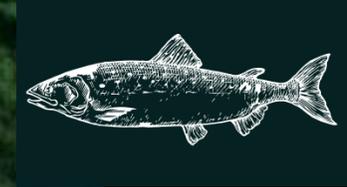
03 Visite sur le terrain

Outils
ProDSS multisonde: prise de température
AvenzaMaps



5. Résultats, validation et **interprétation**

5.5. Interprétation des résultats et observations terrain



Validation des résultats

- Deux secteurs
 - Potentiel de réchauffement
 - à découvert, colonne d'eau peu profonde (50 cm), pente plus prononcée, compétence d'eau s'élève
 - $T^{\circ} : 13,4^{\circ}\text{C}$
 - Potentiel de refroidissement
 - forme de canyon, couverture forestière dense, colonne d'eau profonde (1 m), pente moins prononcée, petites chutes, compétence d'eau diminuée
 - $T^{\circ} : 14^{\circ}\text{C}$

Explication

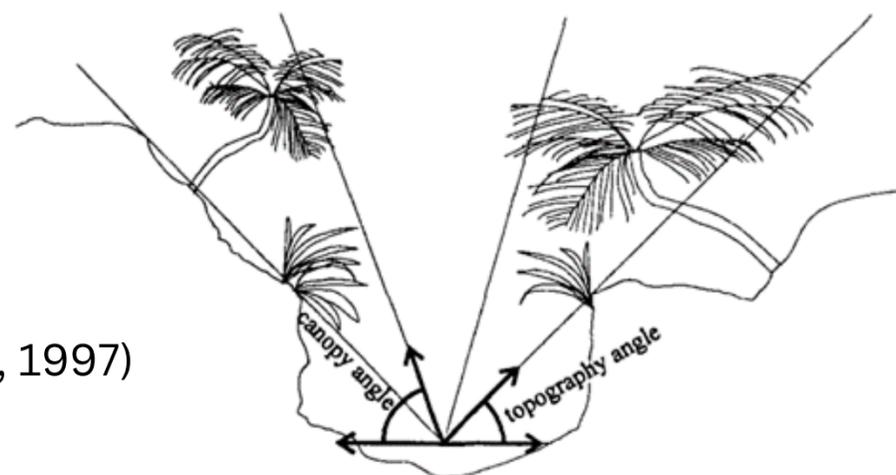
- Zrc: la pente a un impact sur la compétence de l'eau = réduction du temps d'exposition au soleil
- Zrf: protégée du rayonnement solaire par la couverture forestière

Refuges thermiques :

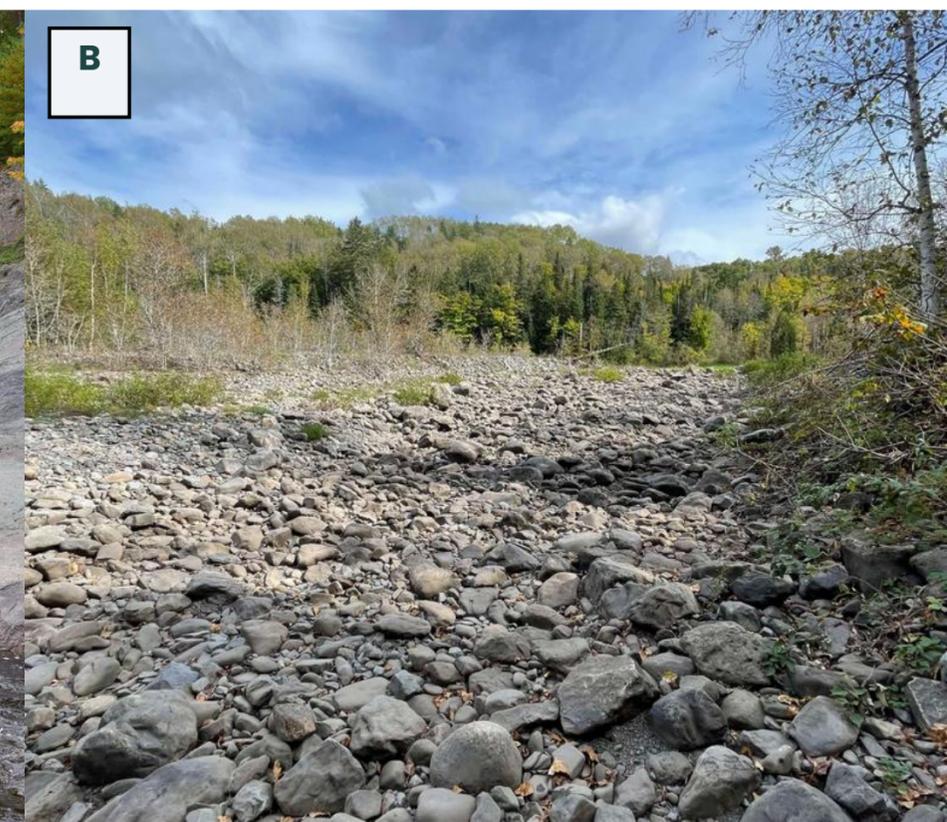
- Zrc : refuges provenant de la confluence de tributaires, non observés sur le terrain en raison de conditions hydrométéorologiques
- Zrf : refuges de résurgence d'eau souterraine

Stabilité spatiotemporelle des refuges thermiques :

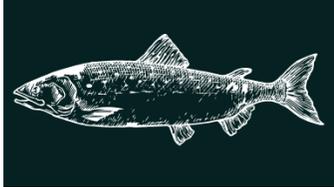
- RT dans la Zrc = moins stable (peu ou pas de végétation et faible débit)
- RT dans la Zrf = plus stable (plus de végétation)



(Rutherford et al., 1997)



6. Discussion



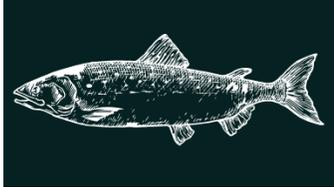
Constats AM Cp

- Les résultats obtenus sont satisfaisants et **offrent une bonne capacité d'interprétation**
- **Propose un cadre méthodologique** pour identifier des secteurs présentant un potentiel de refroidissement ou de réchauffement
- Un **outil de prise de décision**:
 - Ciblage optimal du **déploiement de thermographes**
 - Identification des **zones prioritaires pour des interventions** de conservation ou de restauration écologique
- **Analyse intégrée et spatialisée**
 - Mets en évidence l'interaction complexe entre les facteurs physiques influençant la T° de l'eau:
- **Adaptabilité de la méthode**
 - Au besoin certains critères peuvent être retirés de l'analyse; elle peut être appliquée dans d'autres logiciels SIG



Concordance entre modélisation et réalité terrain

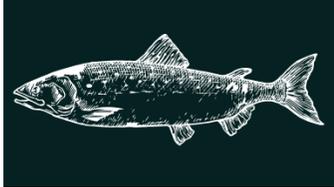
6. Discussion



Défis AM Cp

- **Choix de pondération** implique un niveau de subjectivité qui dépend de:
 - La disponibilité et la qualité des données
 - La représentation spatiale des phénomènes
 - Le niveau de précision et l'échelle des données utilisées
- **Harmonisation des données** de différentes échelles spatiales et temporelles
- **Normalisation des indicateurs**

7. Conclusion



Apports de la méthode

1. Identifie des zones potentielles de refroidissement et de réchauffement.
2. Optimise le déploiement stratégique des thermographes pour le suivi des températures.
3. Identifie les zones à conserver ou à restaurer.
4. Cible les refuges thermiques potentiellement plus vulnérables.

Ouverture

- Avec la FQSA nous allons continuer:
 - La caractérisation des cours d'eau et des bassins versants des rivières à saumon
 - Le déploiement ciblé des thermographes sur le terrain
 - Les efforts de conservation et de restauration des sites des rivières à saumon.
- Avec plus de temps et de ressources, la méthode pourra être améliorée.

Remerciements



Directeur

Olivier Caron

Famille et amis

Équipe de la FQSA

Département de géographie, UQÀM

Chercheurs

Normand Bergeron

Stephen Dugdale

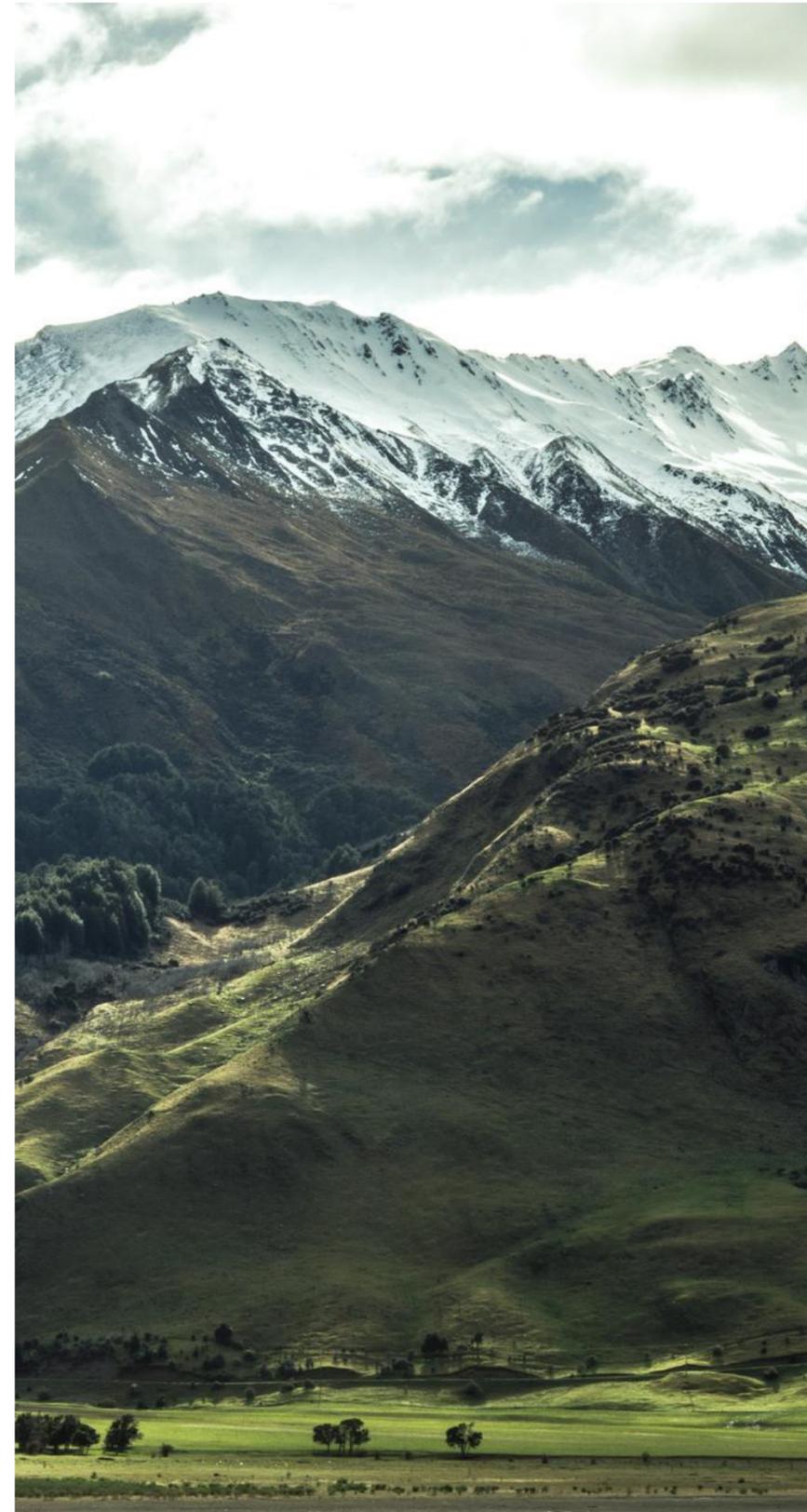
André Saint-Hilaire

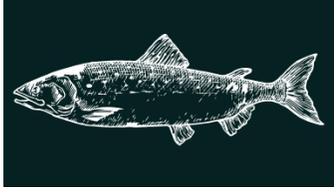
Hoskin Scientific

Équipe du GeoLAS

OBAKIR

Et bien plus!





Merci pour votre temps!

Références

April, J., Bujold, V., Cauchon, V., Doucet-Caron, J., Gagnon, K., Guérard, M., Le Breton, S., Nadeau, V., Plourde-Lavoie, P. et Bujold, J-N. (2023). Information sur le saumon atlantique (*Salmo salar*) au Québec pour la préparation du deuxième rapport de situation du Comité sur la situation des espèces en péril au Canada [En ligne], Ministère des Pêches et des Océans Canada. (MPO). (<https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/library-bibliotheque/41117517.pdf>)

Caissie, D. (2006). The thermal regime f rivers: a review, *Freshwater Biology*, [En ligne]. (https://www.waterboards.ca.gov/waterrights/water_issues/programs/bay_delta/california_waterfix/exhibits/docs/Stockton/part2rebuttal/stkn_64.pdf). Page consultee le 26 août 2024.

Comité sur la situation des espèces en péril au Canada (COSEPAC) (2006a) (Page consultée le 15 décembre 2023). Assessment and Update Status Report on the Atlantic Salmon *Salmo salar* Inner Bay of Fundy populations in Canada, [En ligne]. (https://www.sararegistry.gc.ca/virtual_sara/files/cosewic/sr_atlantic_salmon_inner_bay_e.pdf).

Comité sur la situation des espèces en péril au Canada (COSEPAC) (2006b) (Page consultée le 15 décembre 2023). Assessment and Status Report on the Atlantic Salmon *Salmos alar* – Lake Ontario population in Canada, [En ligne]. (https://www.registrelp-sararegistry.gc.ca/virtual_sara/files/cosewic/sr_atlantic_salmon_lake_ont_e.pdf)

Comité sur la situation des espèces en péril au Canada (COSEPAC) (2011) (Page consultée le 06 juillet 2023). Rapport annuel du COSEPAC, [En ligne]. (https://wildlife-species.az.ec.gc.ca/species-risk-registry/virtual_sara/files//cosewic/CESCC_2010_2011_fra.pdf).

Dugdale, S. J., Bergeron, N. E., St-Hilaire, A. (2013) Temporal variability of thermal refuges and water temperature patterns in an Atlantic salmon river, *Remote Sensing of Environment*, [En ligne]. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425713001727?via%3Dihub>). Page consultée le 25 juillet 2024.

Fakhari, M., Raymond, J., Martel, R., Dugdale, S., Bergeron, Normand., (2022). Identification of Thermal Refuges and Water Temperature Patterns in Salmonid-Bearing Subarctic Rivers of Northern Quebec, *Geographies*, [En ligne]. (<https://espace.inrs.ca/id/eprint/13091/1/P4183.pdf>). Page consultée le 15 décembre

Fédération québécoise pour le saumon atlantique (FQSA) (2012). (Page consultée le 15 décembre 2023). Développement de stratégies et de modalités de protection de l’habitat du saumon dans un contexte de gestion intégrée forêt-faune, [En ligne]. (<https://www.saumonquebec.com/media/2377/de-veloppement-des-strate-gies-et-de-modalite-s-de-protection-de-l-habitat-du-saumon-2012.pdf>).

Fédération québécoise pour le saumon atlantique (FQSA) (2022a). (Page consultée le 15 décembre 2023). Mémoire sur les enjeux, préoccupations et pistes de solution sur l’adaptation de l’industrie de la pêche au saumon du Québec face aux changements climatiques, [En ligne]. (https://www.salmonconservation.ca/wp-content/uploads/2022/07/Memoire-eau-chaude-et-changements-climatiques_VP-002.pdf).

Fédération québécoise pour le saumon atlantique (FQSA) (2022b). (Page consultée le 25 août 2024). Plan de conservation du saumon atlantique et de développement durable de la pêche sportive sur la rivière Nouvelle, [En ligne]. (https://www.salmonconservation.ca/wp-content/uploads/2022/07/Memoire-eau-chaude-et-changements-climatiques_VP-002.pdf).

Furois, V. (2016). Plan stratégique de développement durable de la pêche au saumon atlantique de la rivière Ouelle, Organisme de bassins versants de Kamouraska, L’Islet et Rivière-du-Loup (OBAKIR). [En ligne] (<https://www.st-pacome.ca/wp-content/uploads/2016/04/Plan-conservation-Ouelle-2016-vers-final1.pdf>). Page consultée le 23 juin 2024.

Janssen, R., Rietveld, P. (1990). Multicriteria analysis and geographical information systems: an application to agricultural land use in the netherlands. In: Scholten, H.J., Stillwell, J.C.H. (eds) *Geographical Information Systems for Urban and Regional Planning*. The GeoJournal Library, vol 17. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-1677-2_12

Jeong, D., St-Hilaire, A. (2013) Development of a Stochastic Water Temperature Model And Projection of Future Water Temperature And Extreme Events In The Ouelle River Bassin in Québec, Canada, *River Research and Applications*, [En ligne]. (https://www.researchgate.net/publication/235225673_Development_of_a_Stochastic_Water_Temperature_Model_And_Projection_of_Future_Water_Temperature_And_Extreme_Events_In_The_Ouelle_River_Basin_In_Qubec_Canada). Page consultée le 25 juillet 2024.

O’Sullivan, A., Linnansaari, T., Curry, R. A. (2019a). Ice Cover Exists (ICE): A quick method to delineate groundwater inputs in running waters for cold and temperate regions, *Hydrological Processes*, [En ligne]. (https://www.researchgate.net/publication/334768781_Ice_Cover_Exists_ICE_A_quick_method_to_delineate_groundwater_inputs_in_running_waters_for_cold_and_temperate_regions). Page consultée le 12 janvier 2024.

Québec. Ministère de l’Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) (2024a). Bilan de l’exploitation du saumon au Québec en 2023, [En ligne]. Québec. (<https://mffp.gouv.qc.ca/documents/faune/peche/bilan-exploitation-saumon-2023.pdf>). Page consultée le 26 décembre 2024.

Rutherford, J. C., Blackett, S., Blackett, C., Saito, L., Davies-Colley, R. J. (1997). Predicting the effects of shade on water temperature in small streams, *New Zeland Journal of Marine and Freshwater Research*. [En ligne]. (<https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00288330.1997.9516801>). Page consultée le 8 septembre 2024.

Sullivan, C., Vokoun, J., Helton, A., Briggs, M., Kurylyk, B. (2021). An ecohydrological typology for thermal refuges in streams and rivers, *Ecohydrology*, [En ligne]. (<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/eco.2295>). Page consultée le 15 décembre 2023.