

Refuges thermiques dans un contexte de changements climatiques: caractérisation, modélisation et gestion

Ilias Hani, Al Mahdi Saadi, Zouhir Dichane, Nour el-Houda Bejaoui, Normand Bergeron, Eva

Enders, Carole-Anne Gillis, Taha Ouarda, André St-Hilaire

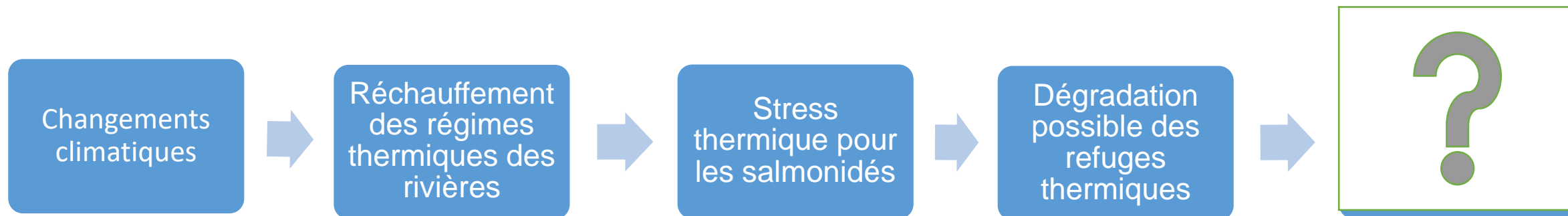
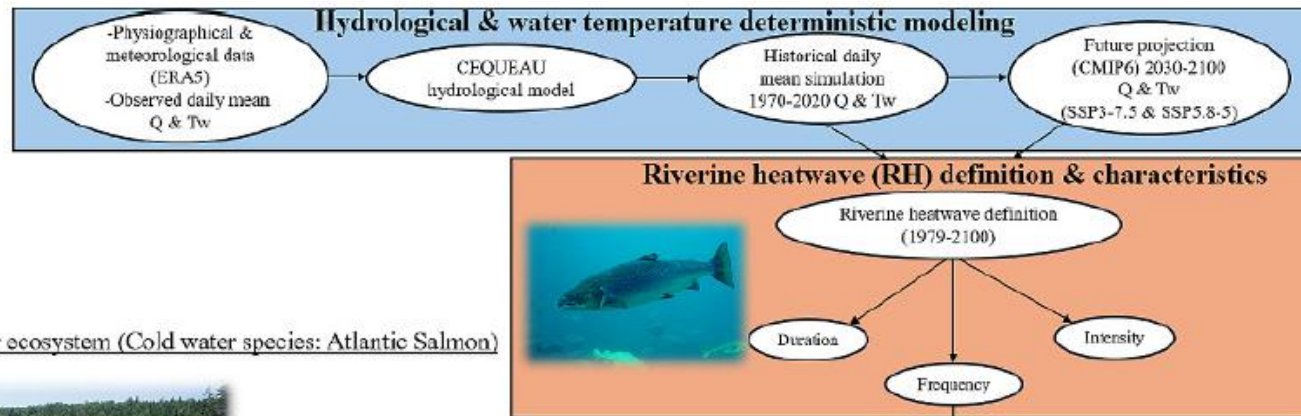


Figure 1 : Aggrégation d'omble de fontaine (Wilbur, 2010)

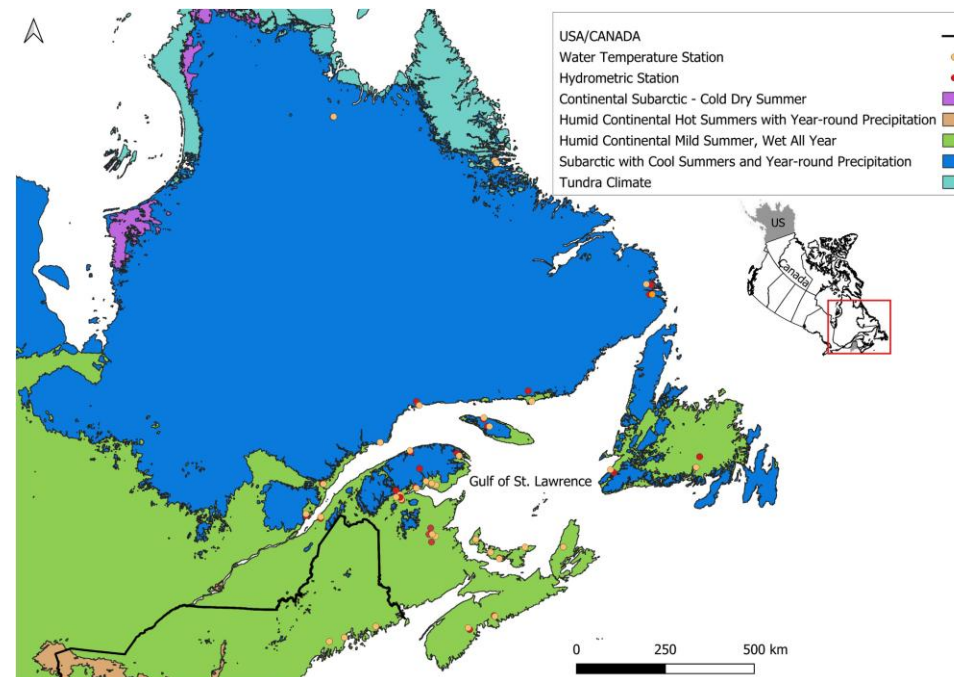
Température critique (°C)		
	Salmo Salar	Salvelinus fontinalis
Croissance optimale	16	14
Létale initiale	27.8	25.3
Limite supérieure d'alimentation	22-28	22
Létale ultime	30-33	29
Réaction comportementale observée	22-24	

Table 1 : Température limite critique supérieur pour la survie et l'alimentation du Saumon Atlantique et l'omble fontaine (Elliott and Elliott (2010), Jonsson and Jonsson (2009) and Breau et al. (2011)).

Changements Climatiques (Hani et al.)

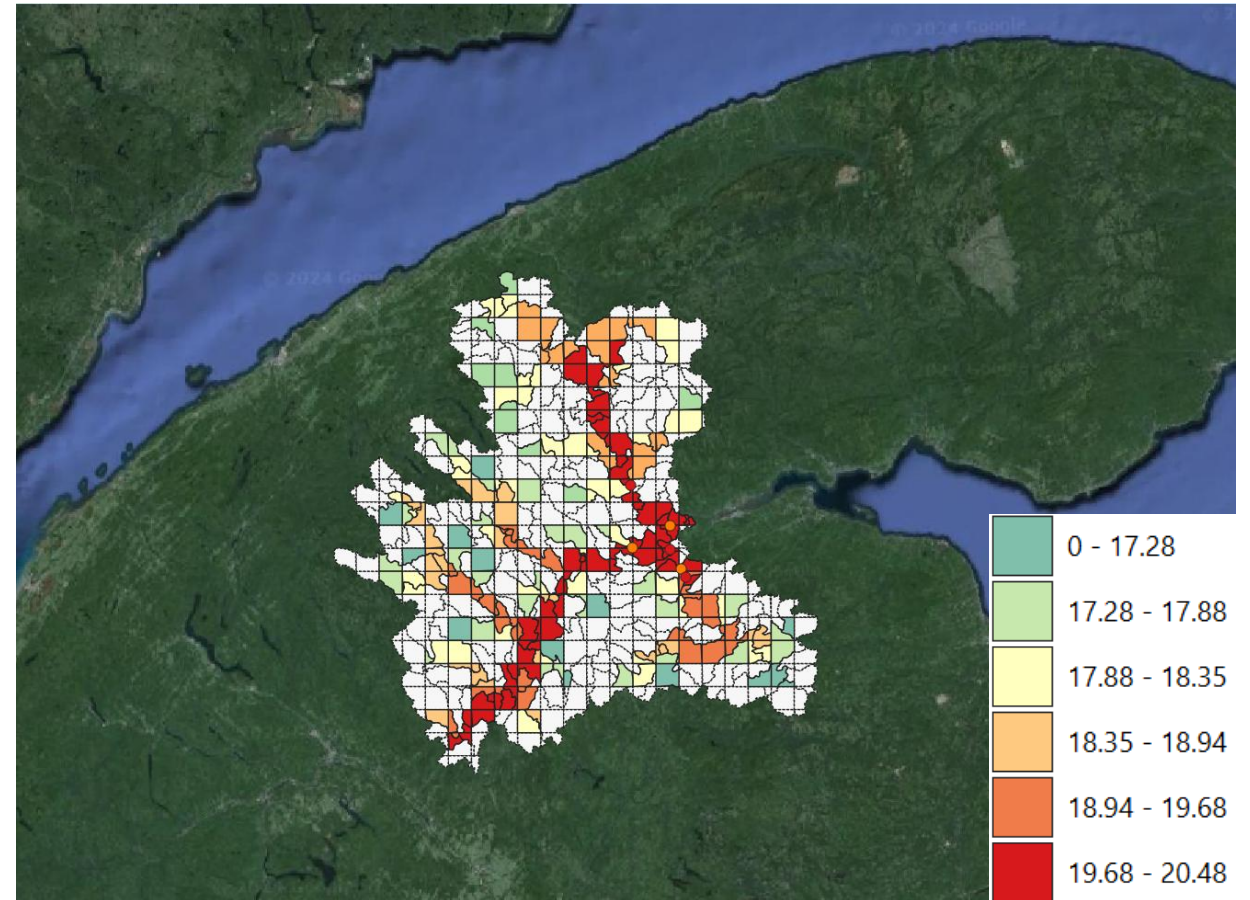
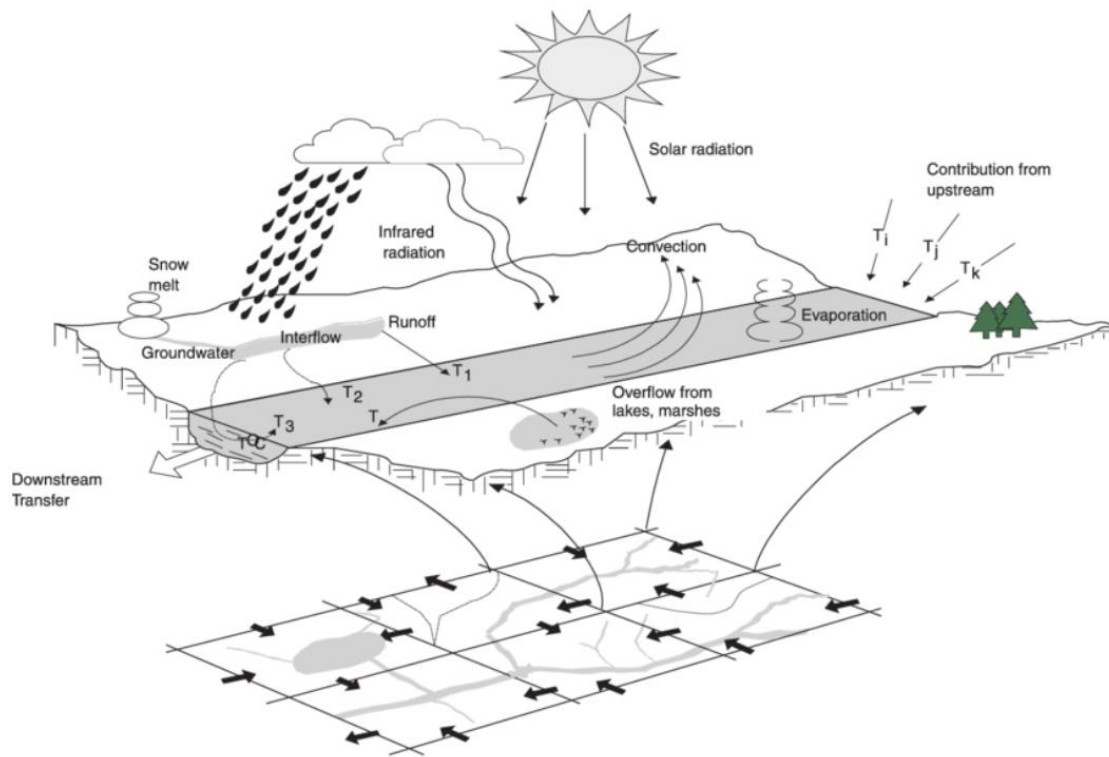


Freshwater ecosystem (Cold water species: Atlantic Salmon)

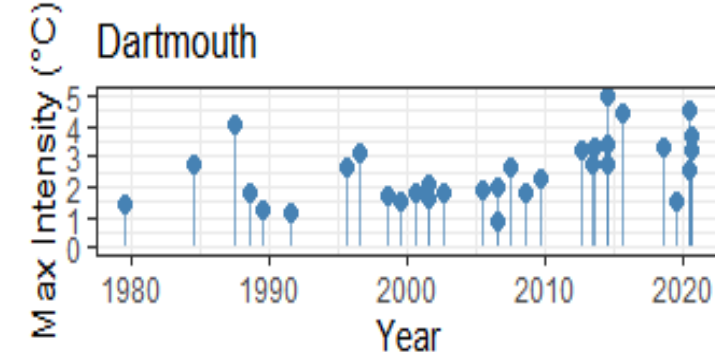
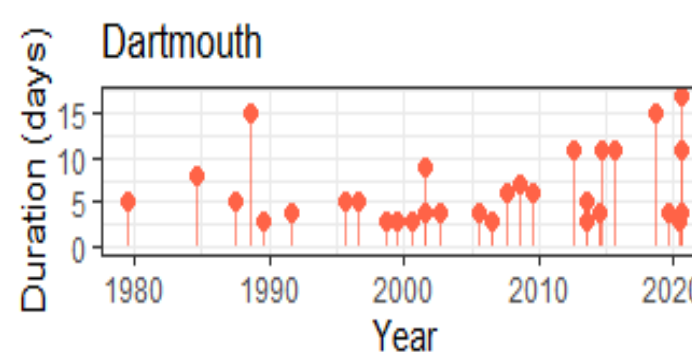
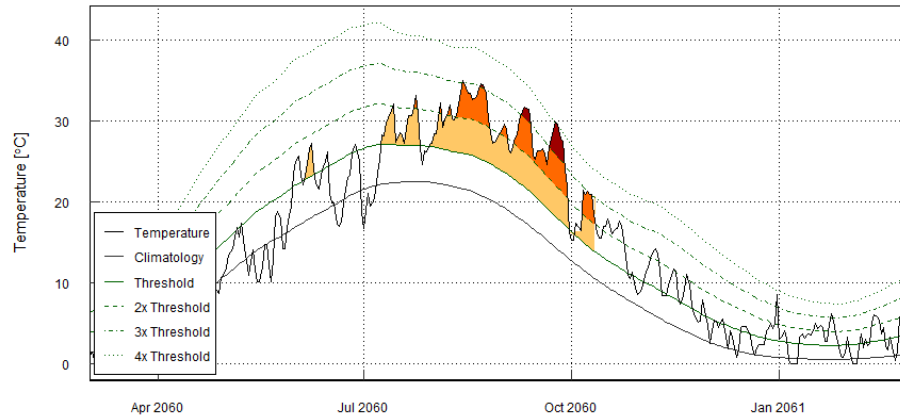


Changements Climatiques

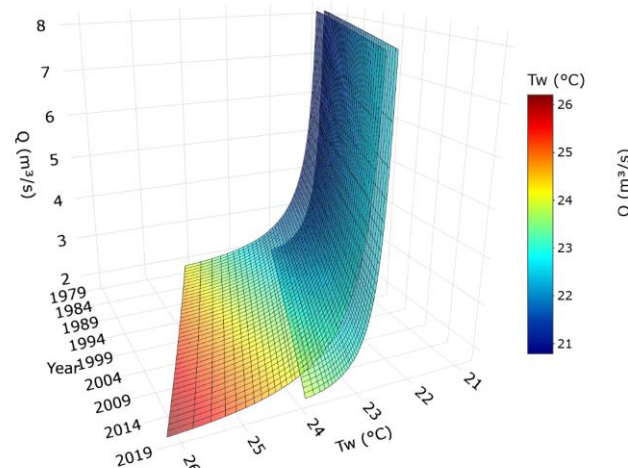
CEQUEau



Changements Climatiques: vagues de chaleur

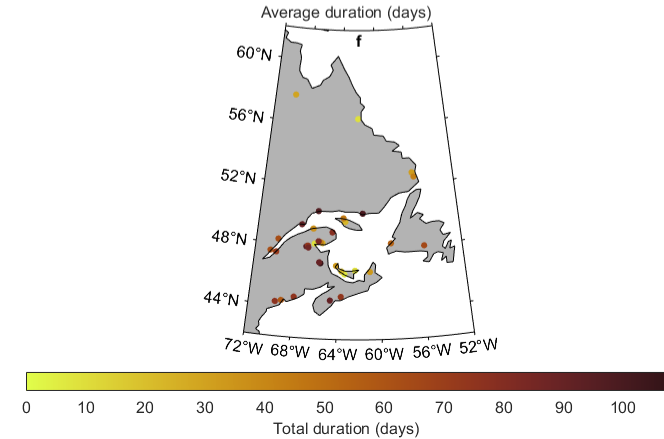
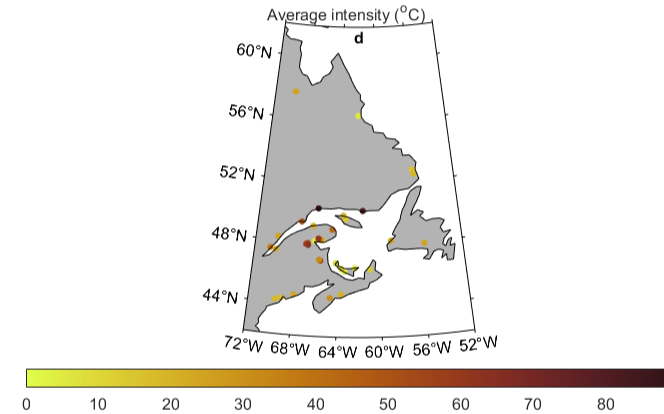
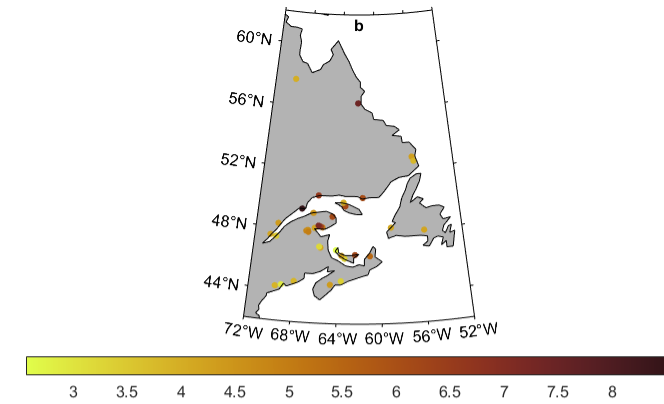
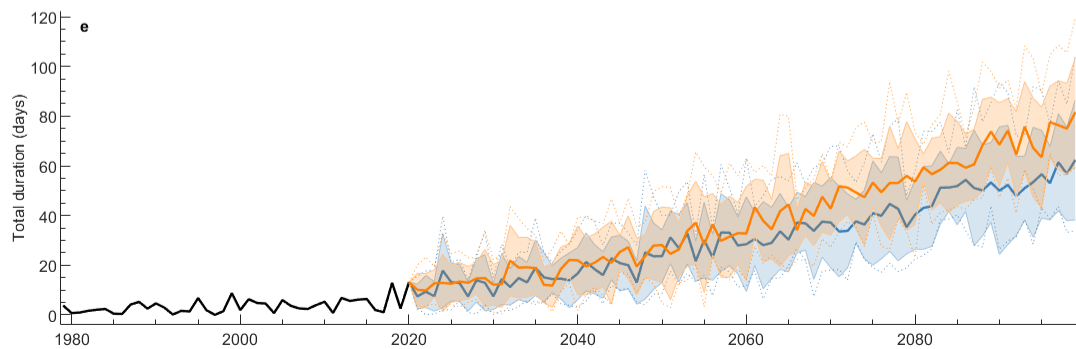
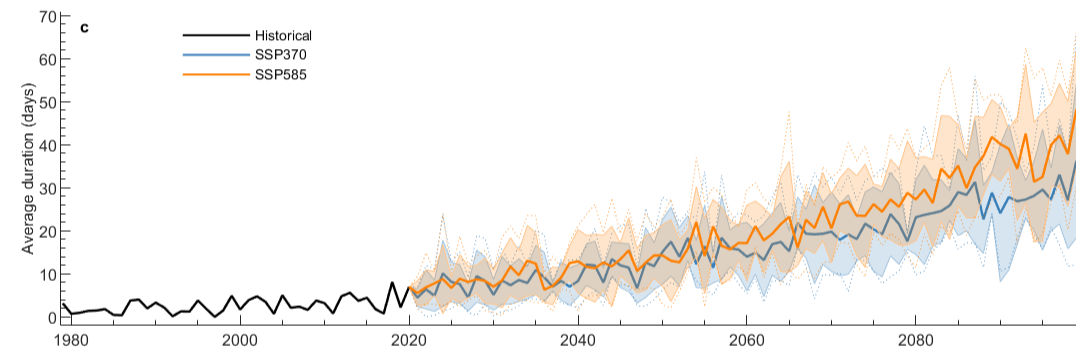
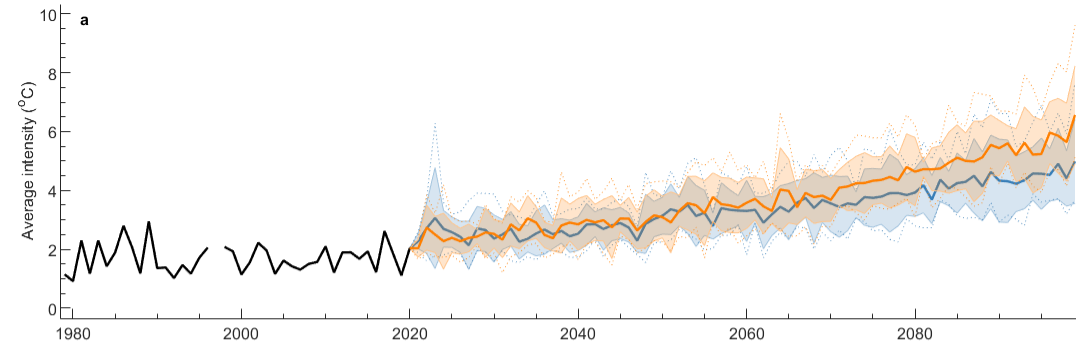


Heatwave Duration and Maximum intensity historical time series

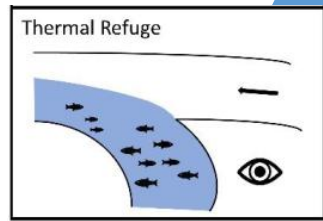


Dartmouth Bivariate (T_w , Q) estimated quantile curves (right panels) and associated 3D surface corresponding to $p = 0.75$ using $G_{270}(Tw11_{LN}, Q00_{LN})$

Changements Climatiques: tendances des vagues de chaleur



Refuges: Mise en contexte (Hani et al.)



Refuge physiologique

(J.Sullivan et al., 2021)

(Greer et al., 2019)

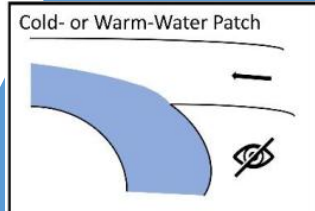
Une parcelle d'eau dont la température est inférieure à un seuil biologique critique 21°C (plutôt qu'une différence thermique avec le cours d'eau principal).

Refuge thermique

(J.Sullivan et al., 2021)

(Brewitt et al., 2014).

Un panache d'eau froide qui est utilisé par les espèces poïkilothermes pour éviter les températures élevées.



Panache d'eau froide

(J.Sullivan et al., 2021)

(Ebersole et al., 2003a)

Une superficie d'au moins 0.5 m² où la température de l'eau est inférieure à celle du cours d'eau principale immédiatement en amont (2-10 °C).

Types de refuges (Dugdale et al.)

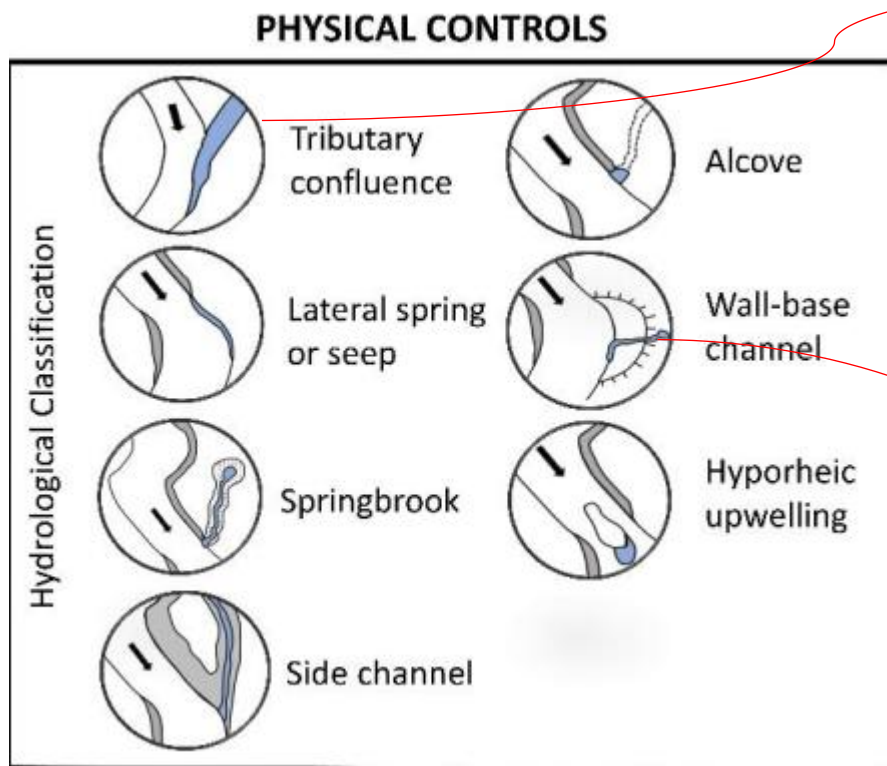


Figure 2 : Classification des refuges thermiques (Sullivan et al., 2021)

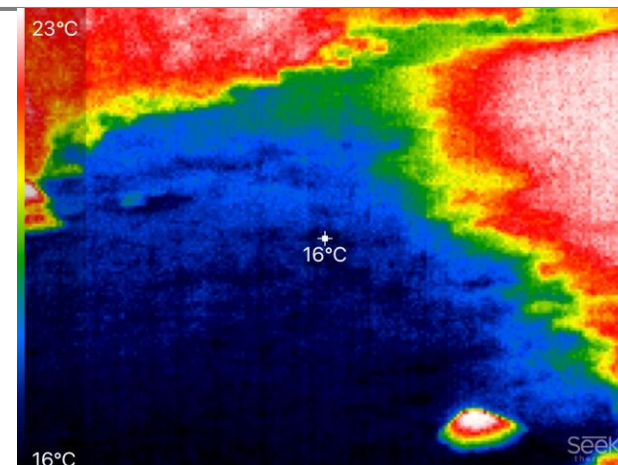


Figure 3 : Image thermique de Panache de tributaire (Al Mahdi Saadi, 2019)

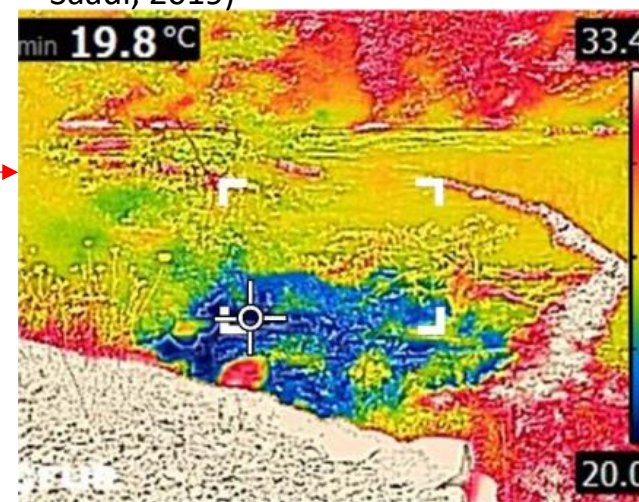


Figure 4 : Image thermique de suintement latéral (M.Humphreys 2020)

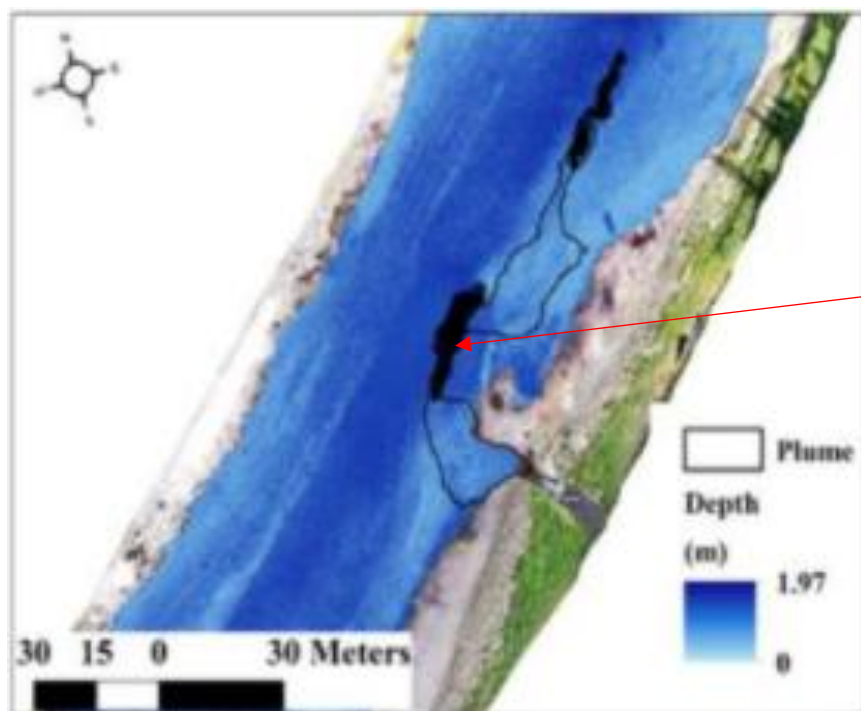
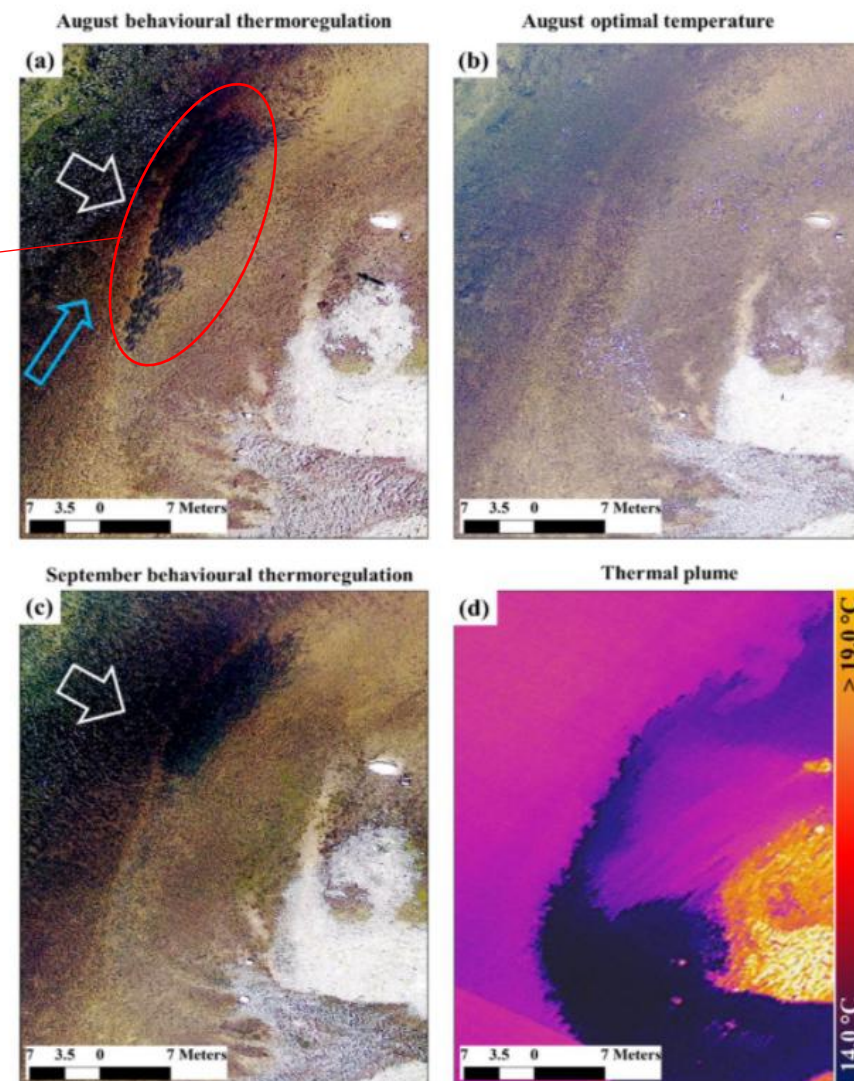
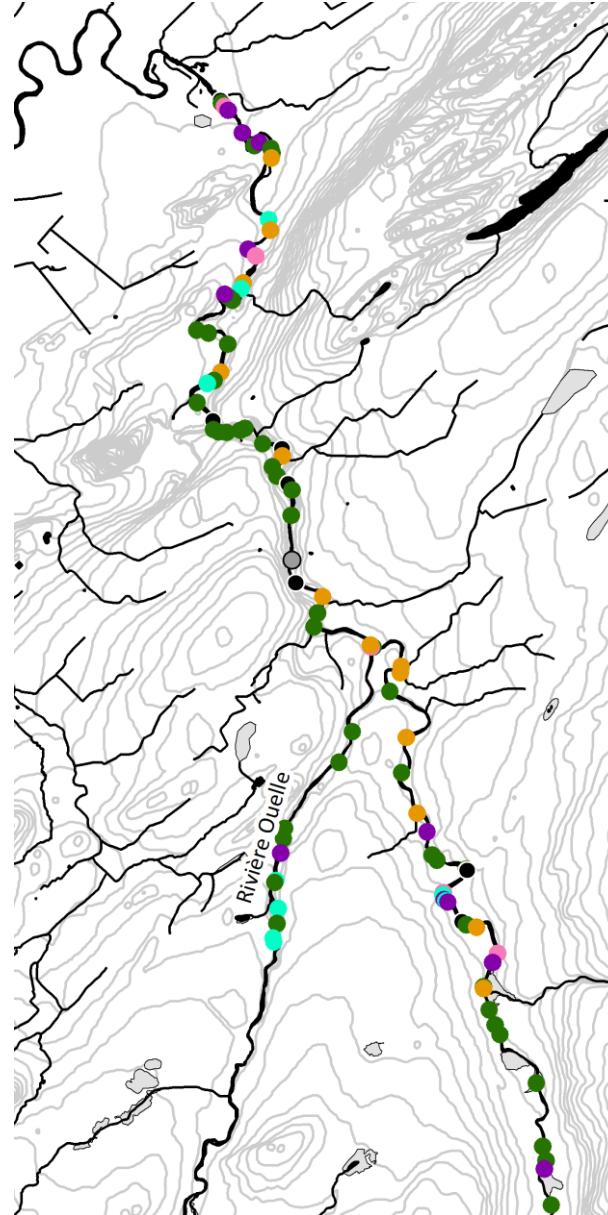


Figure : le comportement du saumon atlantique adulte au cours de deux événements de thermorégulation : (a) le 24 août 2020 et (c) le 11 septembre 2020 . Les agrégations sont délimitées par les flèches blanches et la direction du flux par la flèche bleue. (b) Durant un non-événement de stress thermique, les saumons adultes sont largement dispersés sans agrégations. (d) refuge thermique, d'environ 14 °C, créé par l'affluent adjacent entrant dans la rivière principale. (O'Sullivan et al., 2021)

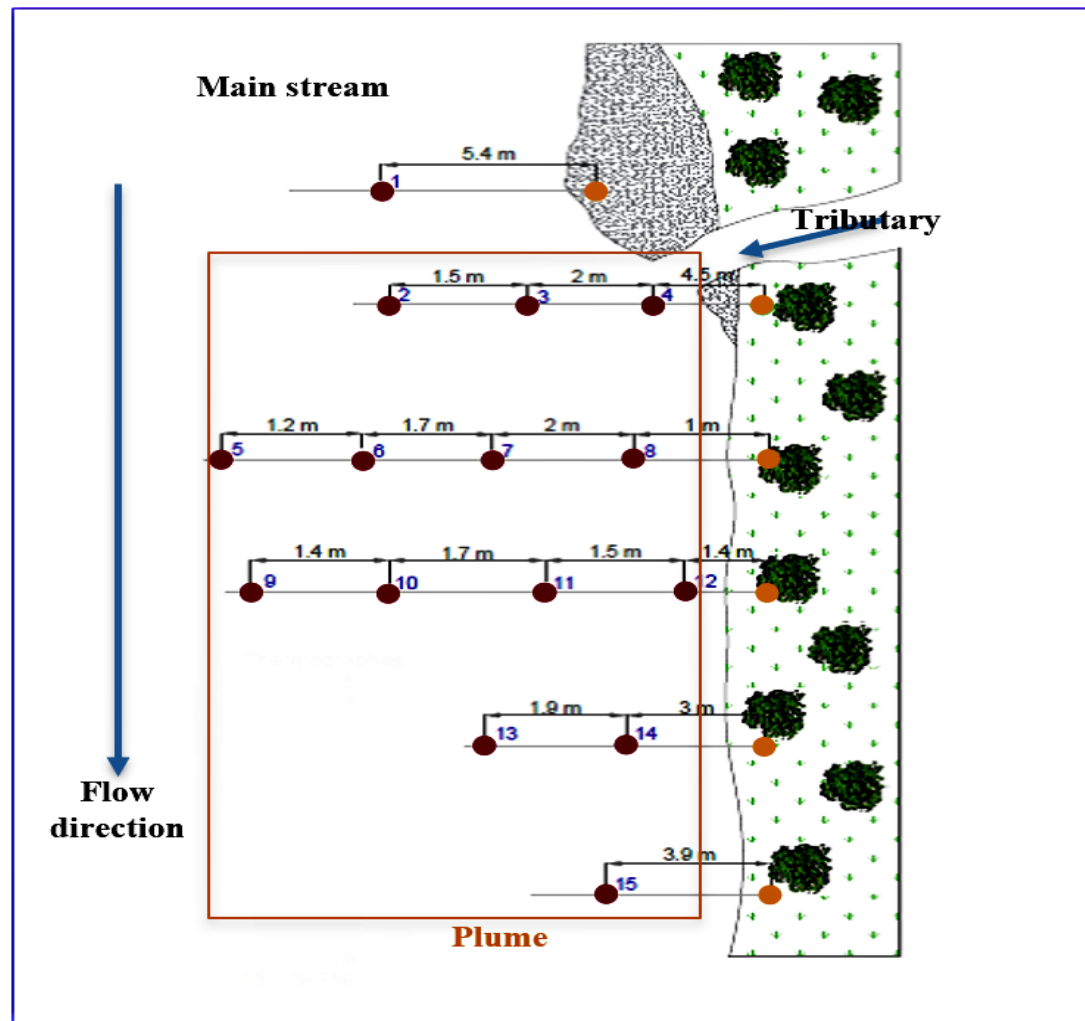


Identification des refuges (S. Dugdale et al.)



- Wall-base channel
- Cold side channel
- Hyporheic upwelling
- Cold alcove
- Springbrook
- Confluence plume
- Lateral seep

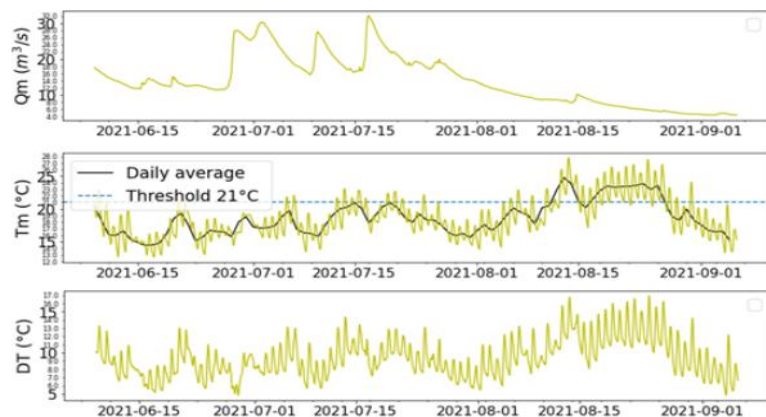
Mesures de la surface/volume (Saadi et al.)



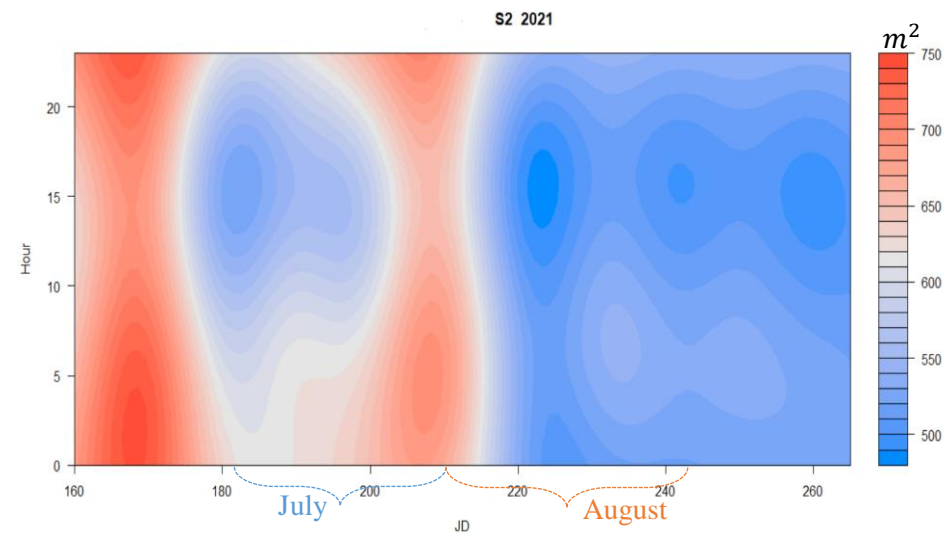
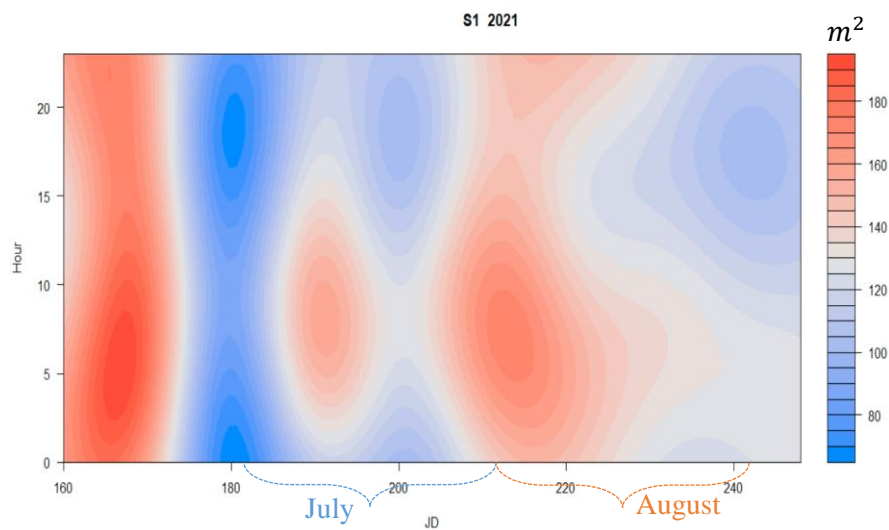
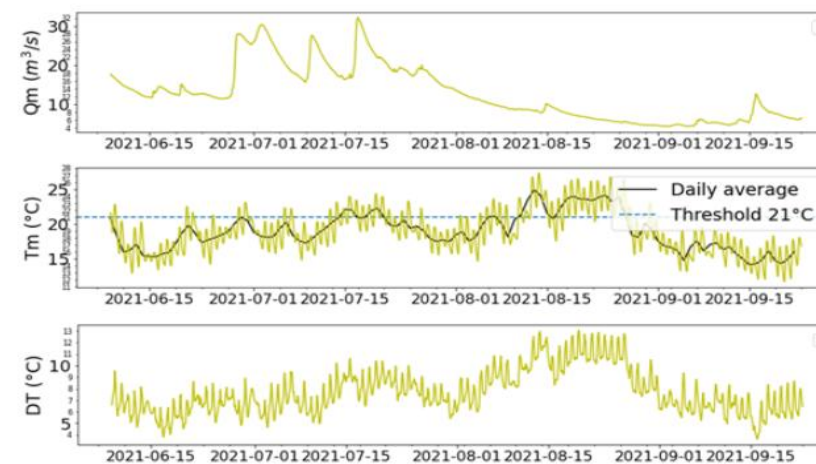
Exemple de déploiement des thermographes

Variabilité saisonnière et diurne de la surface (Hani et al.)

S1_(2021)



S2_(2021)



Modèles locaux: Moyenne journalière (Saadi et al.)

Fosse 1 (2018)															
GAM								MARS							
Δt	Variable	RMSE	rRMSE	Nash	AIC	BIAS	rBIAS	Δt	Variable	RMSE	rRMSE	Nash	AIC	BIAS	rBIAS
Univarié								Univarié							
$\Delta t > 1$	Delta T	25,97	12,8%	0,8719	1285,9	-0,0944	-0,05%	$\Delta t > 1$	Delta T	22,48	10,9%	0,8726	1022,4	-0,0779	-0,04%
Multivarié (Toutes les variables)								Multivarié (Toutes les variables)							
$\Delta t > 1$	Q, Delta T, T air, T amont, T pan	16,83	8,61%	0,9436	1251,1	0,3375	0,17%	$\Delta t > 1$	Q, Delta T, T air, T amont, T pan	14,21	6,93%	0,9455	929,97	0,2141	0,11%
Multivarié (4 variables)								Multivarié (4 variables)							
$\Delta t > 1$	Q, Delta T, T air, T pan	16,64	8,51%	0,9428	1251,03	0,1458	0,07%	$\Delta t > 1$	Q, Delta T, T air, T pan	14,06	6,86%	0,9429	930,96	0,1169	0,06%

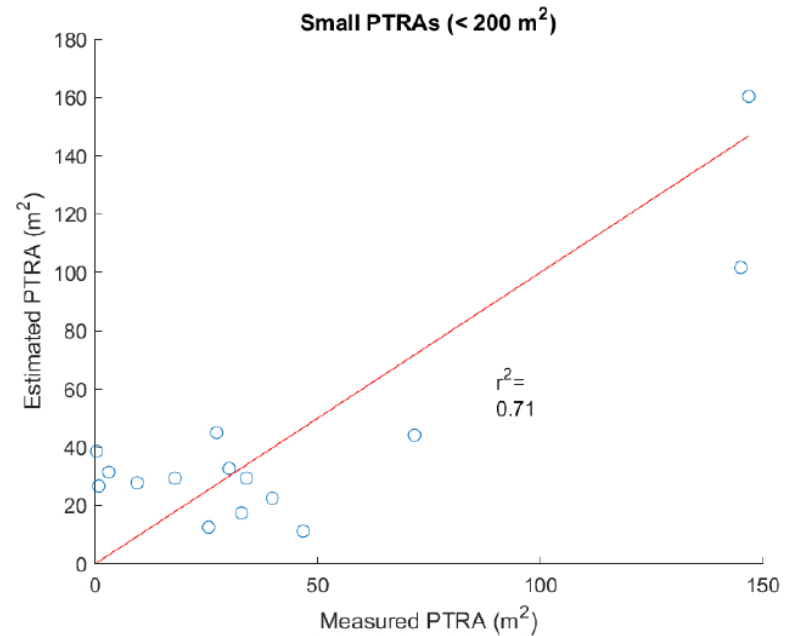
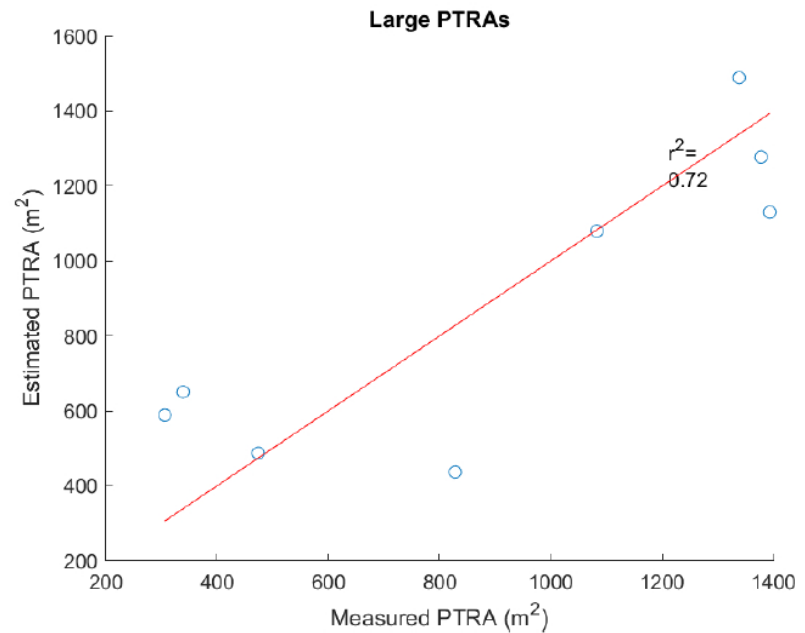
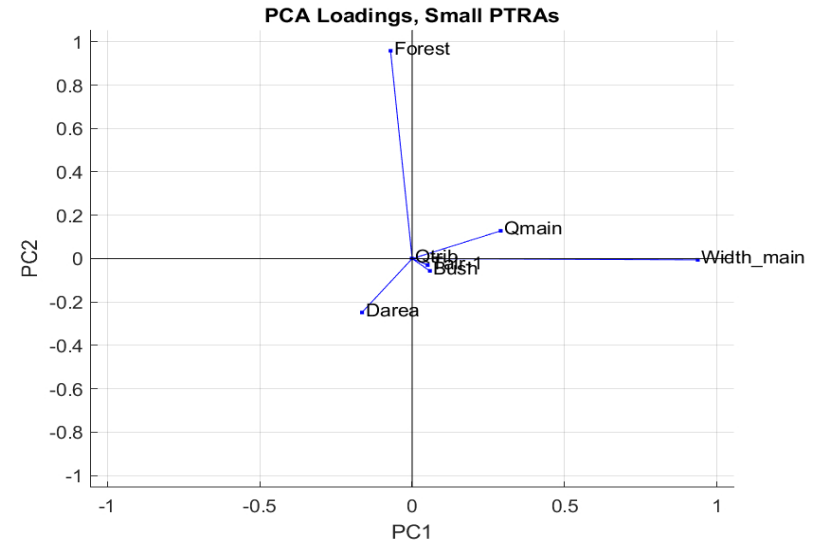
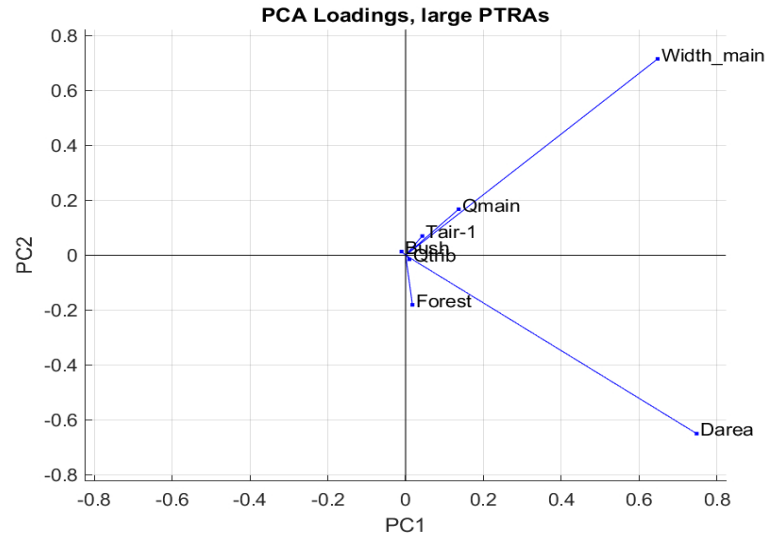
Modèles locaux: Moyenne horaire (Hani et al.)

Model	Sites	Best performing input subset	rRMSE	RMSE (m ²)	rBias	Bias (m ²)	Nash
GAM	Site 1	<u>Qm, DT, Tt, Tm, Ta</u>	23.63%	27.02	0%	0	0.85
	Site 2	<u>Qm, DT, Tt, Tm, Ta</u>	20.27%	88.84	0%	0	0.78
	Mean	NA	21.95%	57.93	0%	0	0.81
MARS	Site 1	<u>Qm, DT, Tm, Ta</u>	23.27%	26.65	0%	0.001	0.86
	Site 2	<u>Qm, DT, Tm</u>	20.57%	90.16	0%	0	0.78
	Mean	NA	21.92%	58.4	0%	0	0.82
SVM	Site 1	<u>Qm, DT, Tt, Ta</u>	20.83%	23.86	-1.8%	-2	0.89
	Site 2	<u>Qm, DT, Tt, Ta</u>	18.57%	81.39	-2.4%	-10.41	0.83
	Mean	NA	19.70%	52.62	-2.1%	-6.2	0.86
RF	Site 1	<u>Qm, DT, Ta, Tt</u>	14.41%	16.5	0%	-0.01	0.94
	Site 2	<u>Qm, DT, Ta, Tt</u>	11.88%	52.11	-0.2%	-0.68	0.92
	Mean	NA	13.14%	34.30	-0.2%	-0.68	0.93

Modèle regional ou multi-site (St-Hilaire et al.)

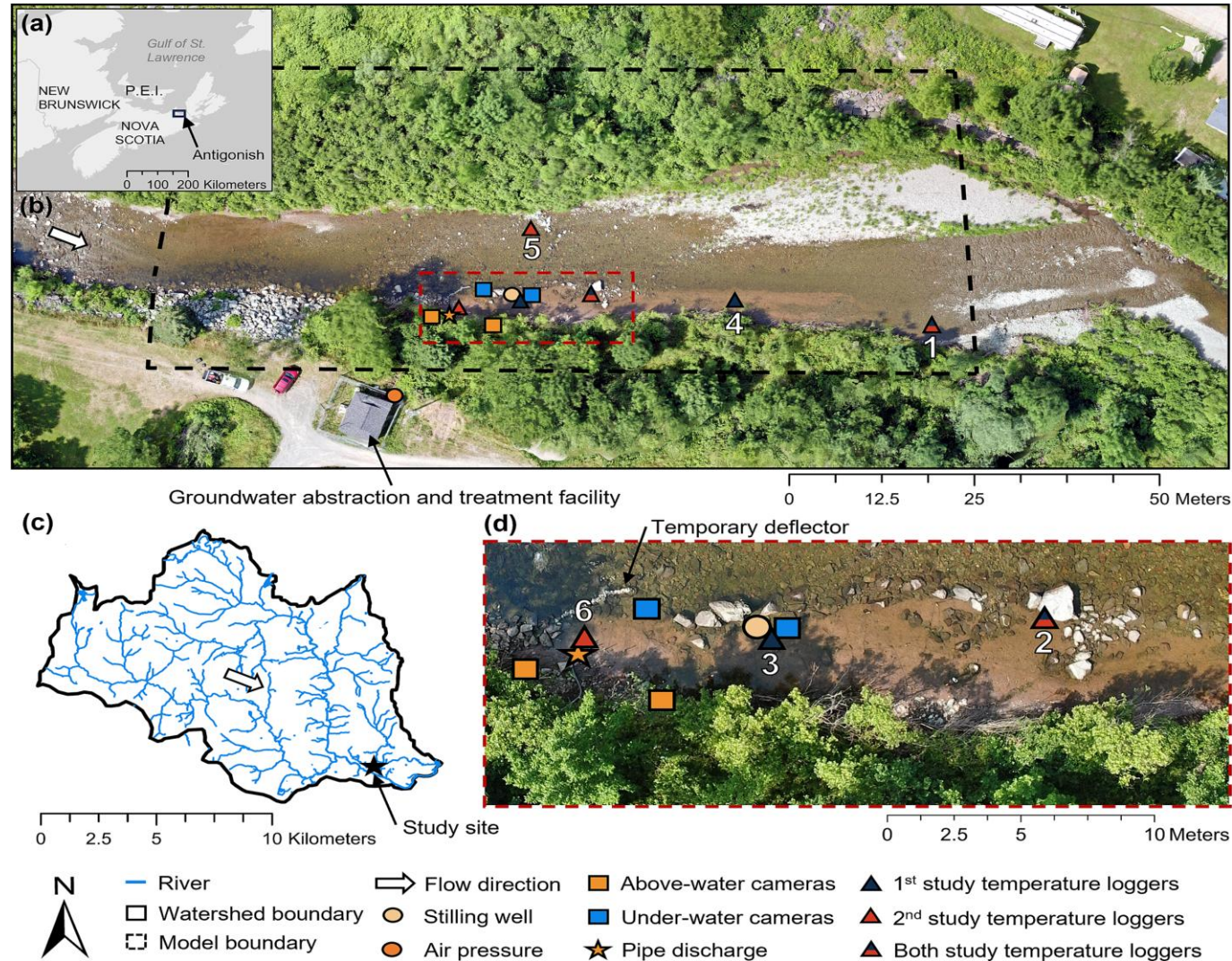
River	Darea	Slope	Bush	Exposed	Forest	Marsh	Water	Width_trib	Width_main	Angle	Qtrib	Tw_trib	Tw_main	Qmain	Tair	Tair-1	Tair-2	DeltaT	Qratio	Area
	km ²	%	%	%	%	%	%	m	m	Deg	m ³ /s	°C	°C	m ³ /s	°C	°C	°C	°C		m ²
Ste-Marg	33.36	9.39	0.26	0.14	88.70	0.03	10.87	9.00	42.00	60.00	0.57	17.80	18.72	8.73	23.71	18.58	22.56	0.92	0.065	0.30
Ste-Marg	5.02	14.95	0.55	1.02	90.02	0.00	8.41	20.00	36.00	120.00	0.07	17.27	18.80	11.60	24.28	16.88	22.56	1.53	0.006	0.83
Ouelle	1.50	8.17	2.48	44.64	52.83	0.06	0.00	5.00	45.00	110.00	0.01	17.65	28.01	2.73	32.16	26.30	22.14	10.36	0.004	3.08
Ouelle	6.39	8.36	1.50	5.33	89.85	0.15	3.16	4.00	35.00	130.00	0.02	15.69	19.39	17.08	24.28	16.88	22.56	3.70	0.001	9.42
Ste-Marg	25.00	11.78	1.15	0.27	93.90	0.01	4.68	14.00	33.00	63.00	0.70	19.02	19.06	13.00	18.85	14.06	19.34	0.04	0.054	17.96
Ouelle	3.98	3.11	1.27	1.69	96.87	0.00	0.17	8.50	24.00	55.00	0.02	20.73	28.00	1.66	29.97	19.46	20.96	7.27	0.012	25.49
Matapédia	54.63	4.37	8.04	23.38	68.23	0.00	0.35	10.50	45.00	170.00	0.19	15.74	21.17	1.52	16.61	16.16	23.74	5.43	0.125	27.33
Matapédia	2.18	1.92	1.11	7.70	91.11	0.00	0.08	4.00	46.00	90.00	0.00	15.85	23.63	1.61	29.97	19.46	20.96	7.78	0.001	30.10
Matapédia	5.04	3.32	1.34	72.82	25.75	0.04	0.05	3.50	30.50	80.00	0.02	13.61	17.47	1.96	16.32	16.09	17.67	3.86	0.010	32.89
Matapédia	9.61	7.62	3.85	17.07	79.06	0.01	0.02	5.00	38.00	52.00	0.03	9.60	17.58	10.23	16.61	16.16	23.74	7.98	0.003	34.02
Ste-Marg	16.53	5.42	3.28	7.09	89.07	0.03	0.53	8.00	30.50	97.00	0.08	11.56	22.26	4.27	16.61	16.16	23.74	10.70	0.019	39.79
Matapédia	57.46	6.40	7.20	15.60	75.80	1.30	0.01	12.00	8.50	30.00	0.28	15.84	17.53	0.58	16.32	16.09	17.67	1.69	0.483	46.71
Ste-Marg	1.88	10.70	1.58	6.60	90.96	0.03	0.82	3.00	53.00	103.00	0.06	10.66	21.55	19.14	20.03	14.01	17.08	10.89	0.003	71.75
Restigouche	7.33	8.76	6.76	11.08	82.16	0.00	3.17	8.00	110.00	80.00	0.07	17.63	23.89	25.54	26.77	22.55	23.24	6.26	0.003	145.08
Restigouche	5.40	11.03	13.07	22.15	64.78	0.00	0.00	3.50	165.00	99.00	0.05	13.12	25.22	50.09	24.96	23.86	22.83	12.10	0.001	146.87
Matapédia	13.41	7.51	7.66	3.29	89.02	0.00	0.02	3.00	51.00	92.00	0.05	12.50	19.00	10.64	16.73	16.60	16.32	6.50	0.005	306.20
Matapédia	10.50	9.40	3.20	2.65	90.23	0.00	3.92	12.00	60.00	90.00	0.01	13.00	18.34	19.49	18.85	14.06	19.34	5.34	0.001	338.95
Restigouche	11.02	9.19	4.61	0.18	95.21	0.00	0.00	5.00	75.00	100.00	0.06	16.18	25.97	16.02	24.96	23.86	22.83	9.79	0.004	474.10
Matapédia	23.27	8.76	2.09	0.56	97.35	0.00	0.00	9.00	76.00	74.00	0.22	13.40	18.96	11.31	16.73	16.60	16.32	5.56	0.019	827.95
Restigouche	24.05	8.12	5.55	11.64	82.71	0.04	0.06	6.00	83.00	105.00	0.16	11.08	24.02	31.37	22.83	22.72	24.52	12.94	0.005	1082.48
Restigouche	108.14	9.86	4.74	4.19	90.95	0.03	0.09	17.00	151.00	55.00	1.12	17.71	25.54	32.51	22.83	22.72	24.52	7.83	0.034	1338.36
Restigouche	73.50	10.22	1.65	0.47	97.80	0.02	0.06	7.00	71.00	75.00	1.37	13.34	22.41	24.88	26.77	22.55	23.24	9.07	0.055	1377.70
Restigouche	25.46	10.29	4.83	15.61	79.57	0.00	0.00	12.00	75.00	45.00	0.18	17.53	24.85	28.34	24.96	23.86	22.83	7.32	0.006	1393.39

Modèle regional ou multi-site



Gestion/aménagement (Kurylyk et al.)

Pumping Groundwater to Create Cold-Water Thermal Refuges in Warming Rivers



Gestion/aménagement: résultats pompage eau souterraine.

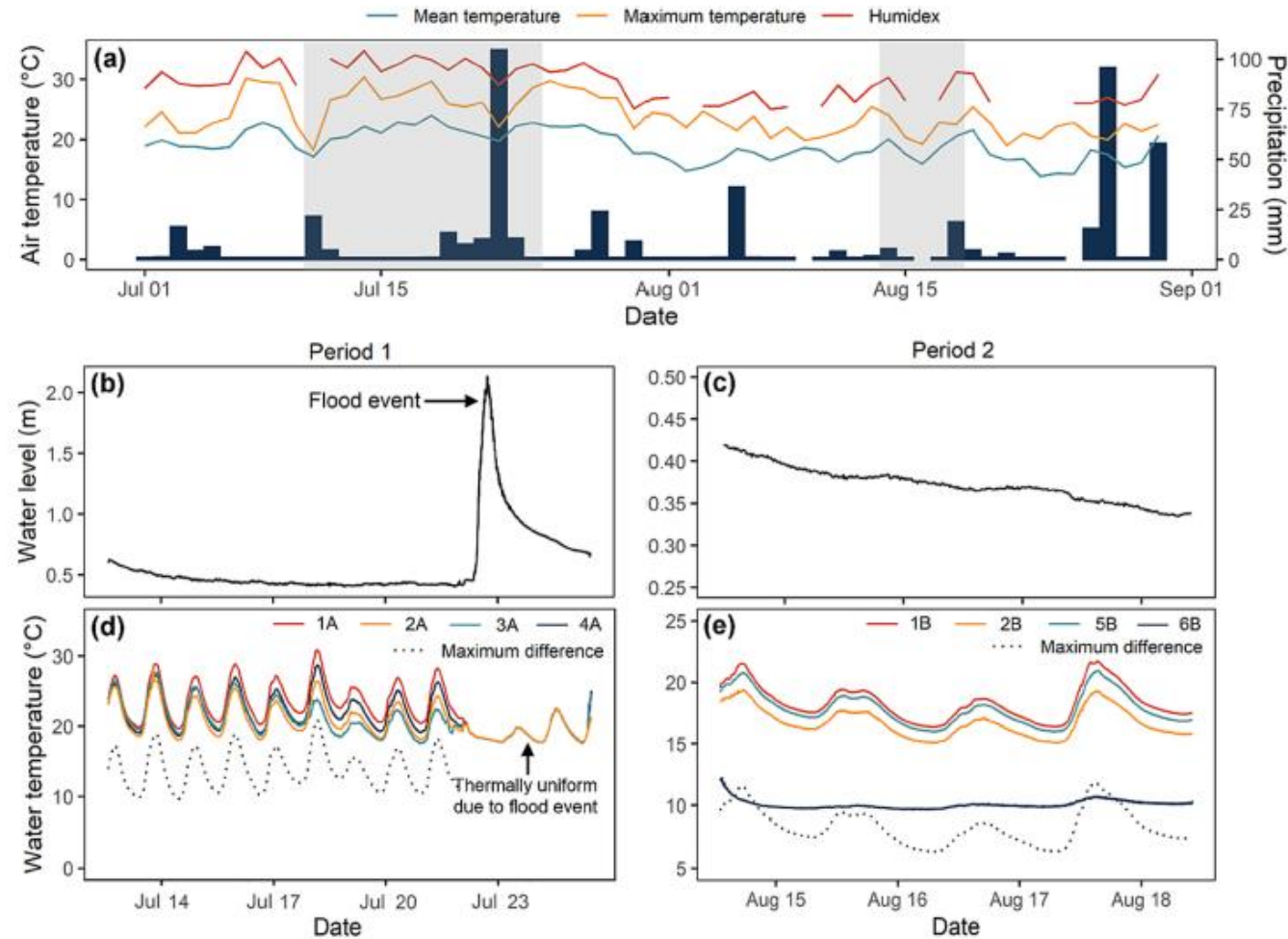
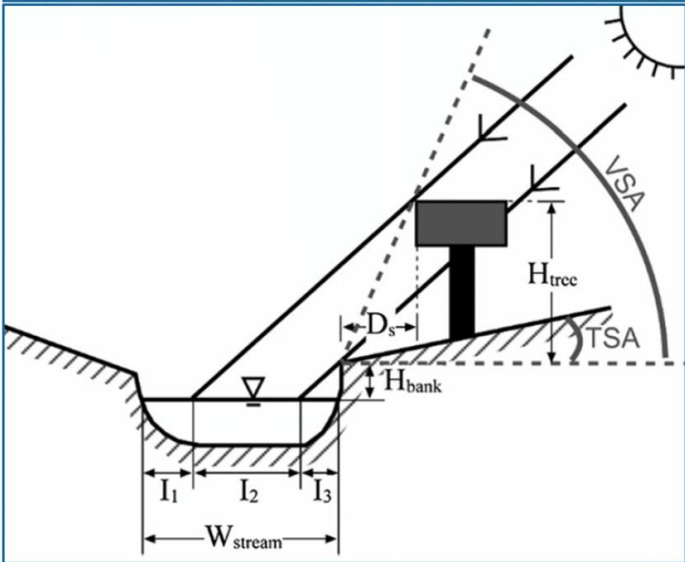


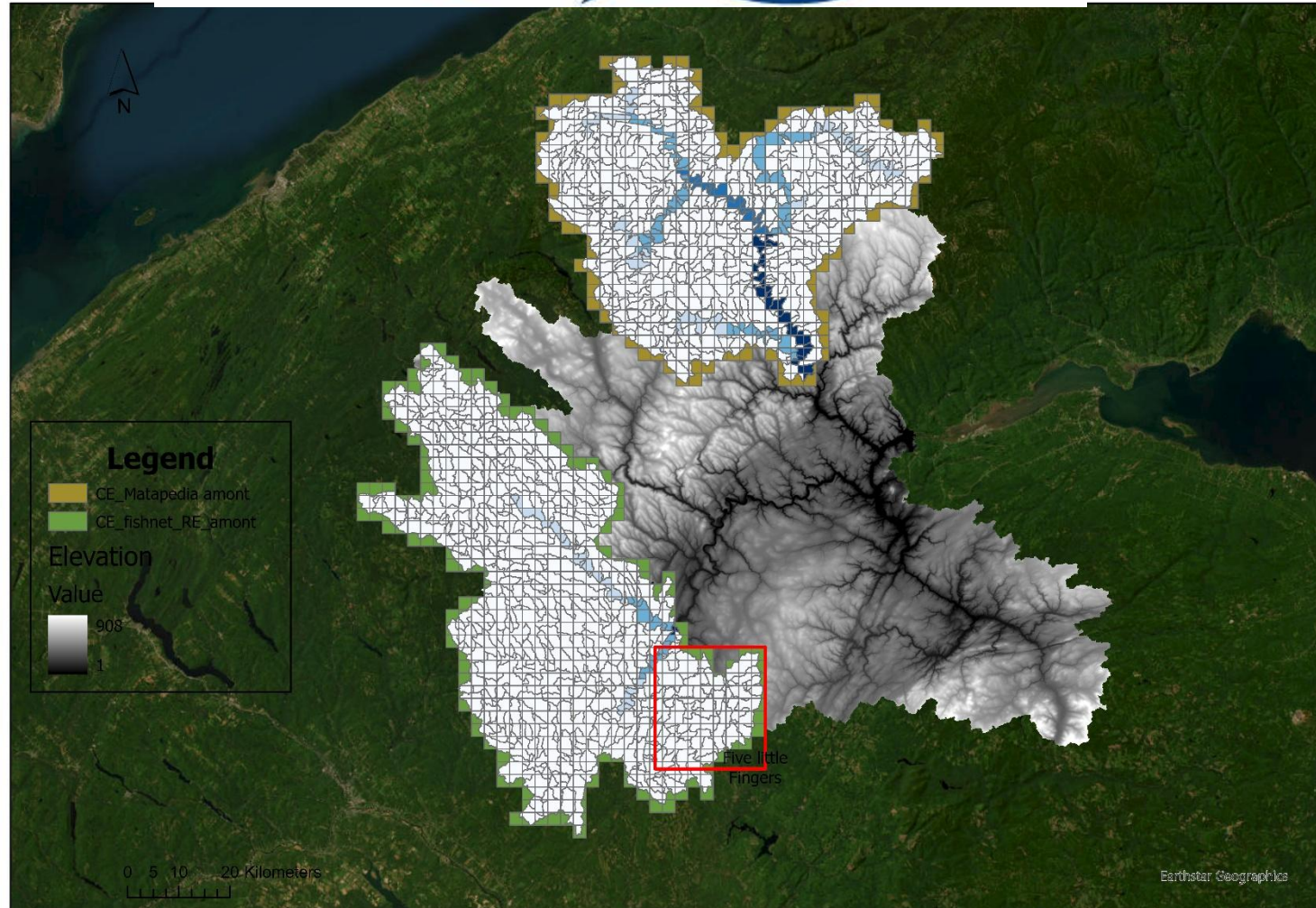
FIGURE 3 | (a) Daily air temperature and precipitation recorded from the Collegeville Auto weather station (45.4912°, -62.0150°; ECCC 2023) (grey bands indicate Study Periods 1 and 2). Water level during (b) Study Period 1 and (c) Study Period 2. Measured water temperatures during (d) Study Period 1 and (e) Study Period 2. The maximum difference indicates the offset between groundwater and the highest river temperatures at any point in time. 'A' refers to the first study period, and 'B' refers to the second study period. Numbers correspond to logger locations shown in Figure 1.

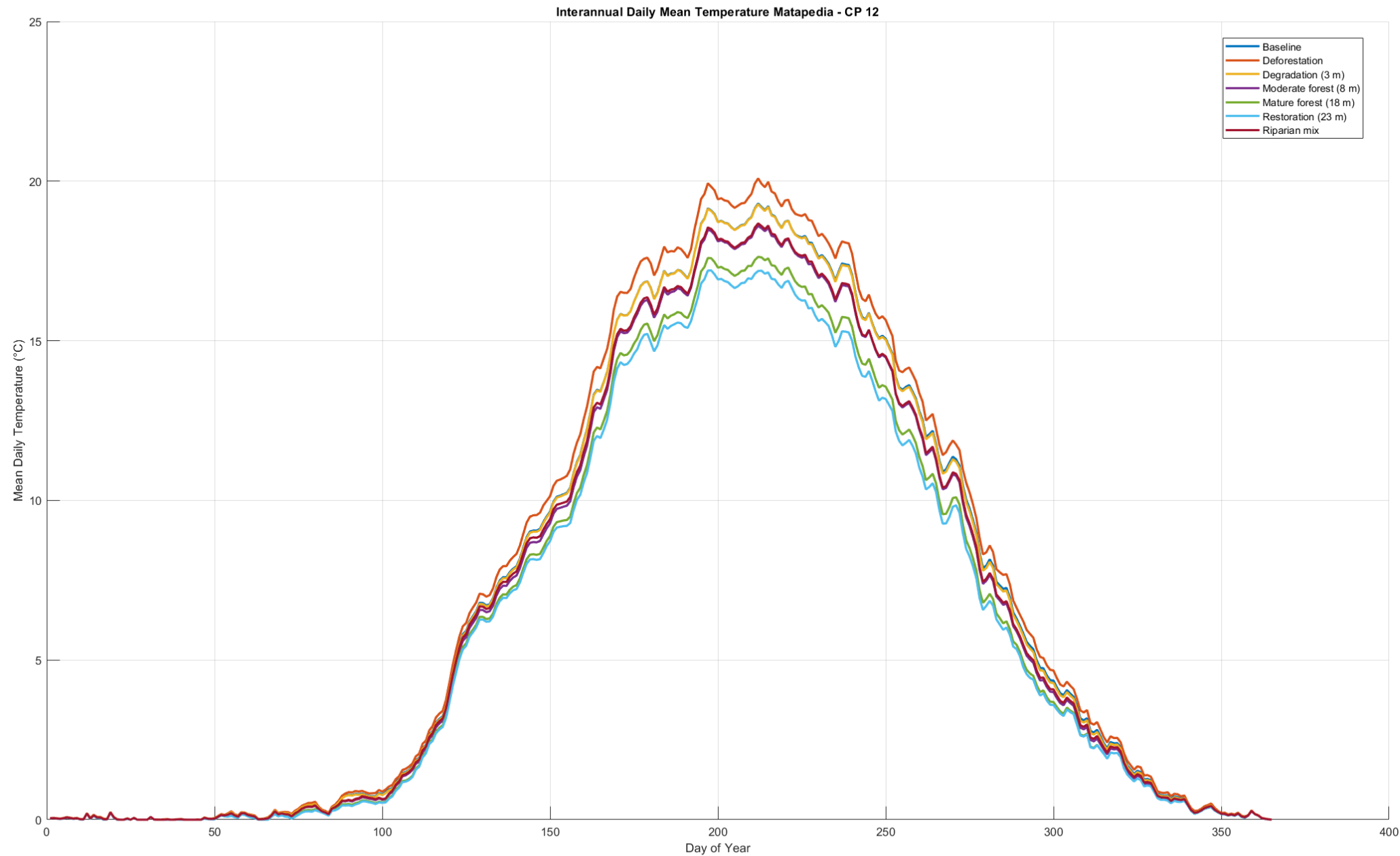
Gestion/aménagement: Ombrage

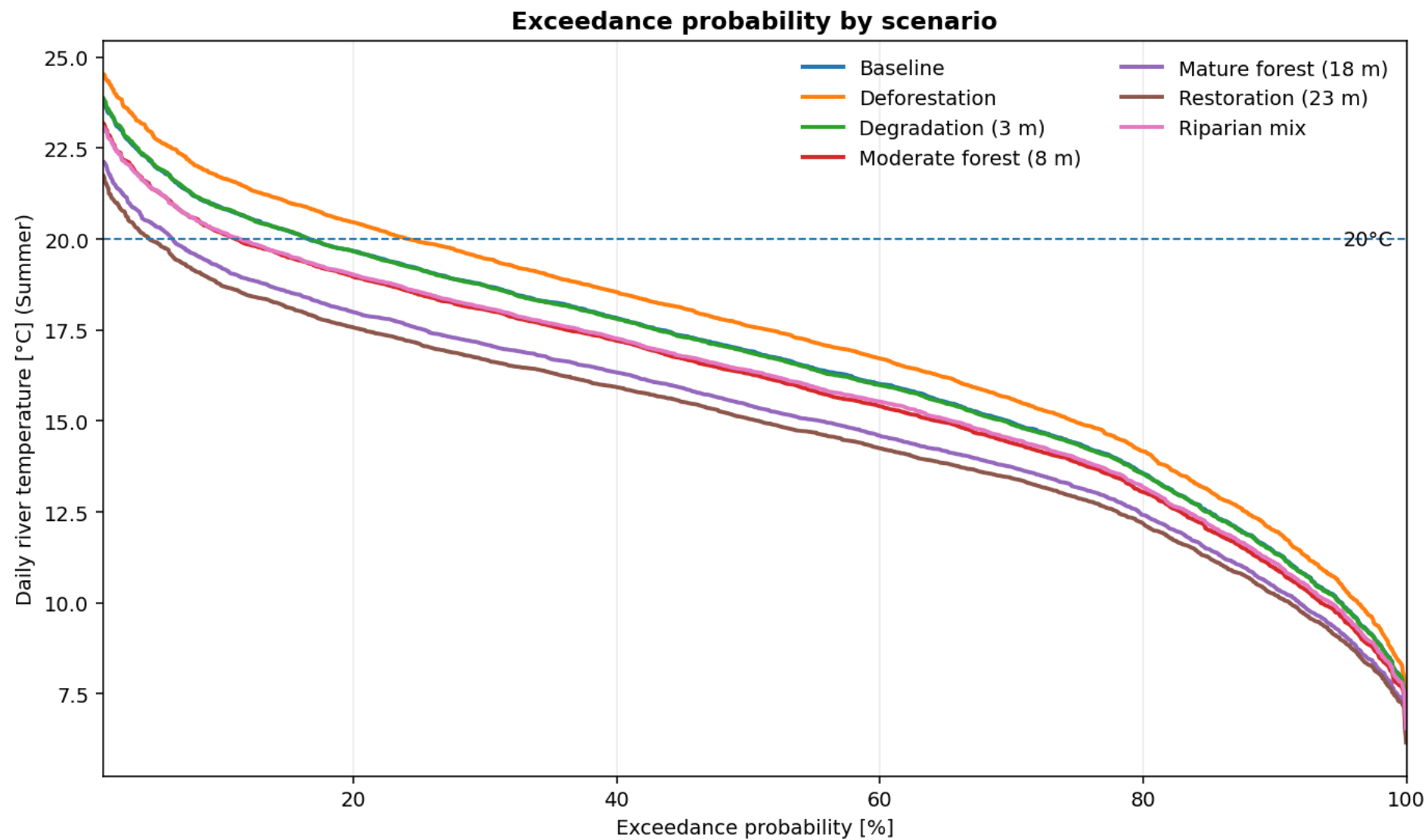


Gestion/aménagement: Module d'ombrage de CEQUEAU sur la Restigouche (Z. Dijane)

CEQUEAU



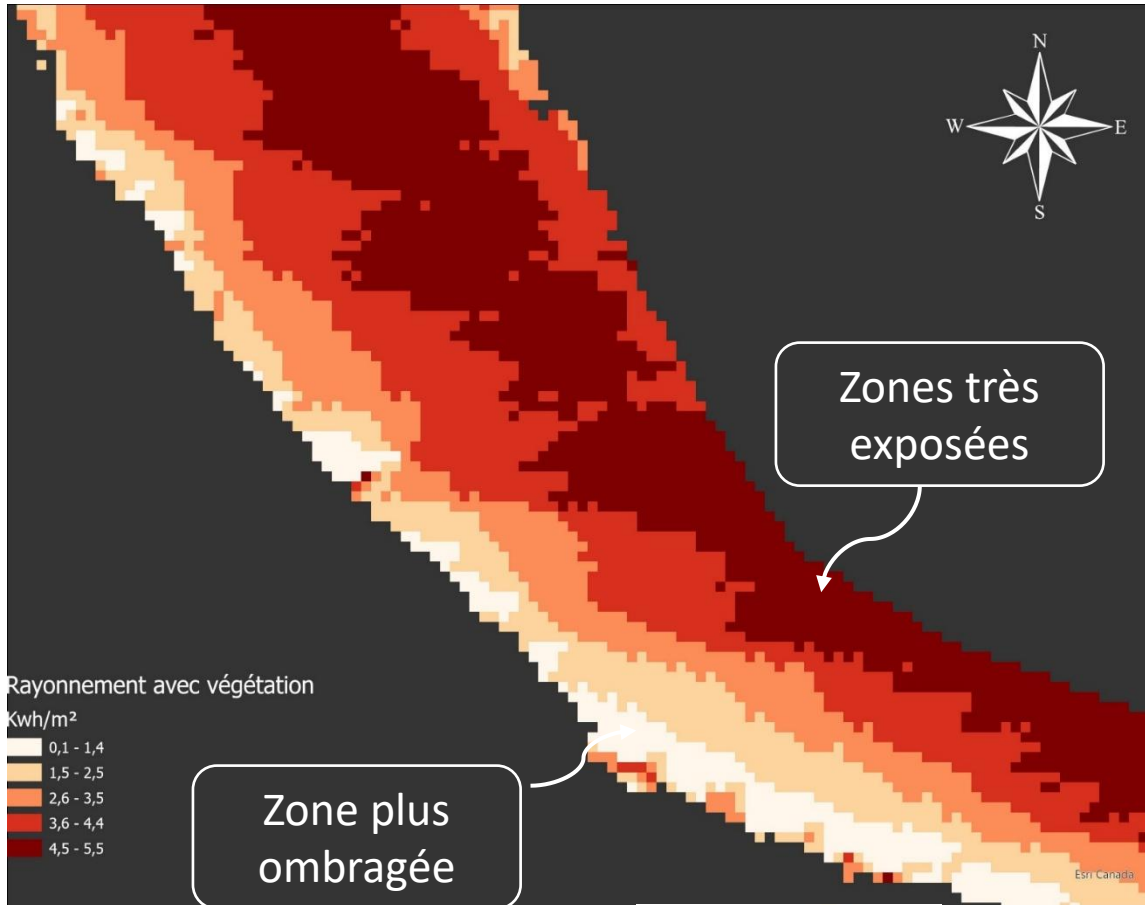




Gestion/aménagement: Inclusion de l'ombrage à échelle spatiale plus fine avec SIG (Bejaoui et al.)

Variation spatiale du rayonnement solaire brut

Brut par pixel
(1 m²)



Brut par transect
(5 m de long x largeur mouillée)



Variation spatiale du rayonnement solaire unitaire

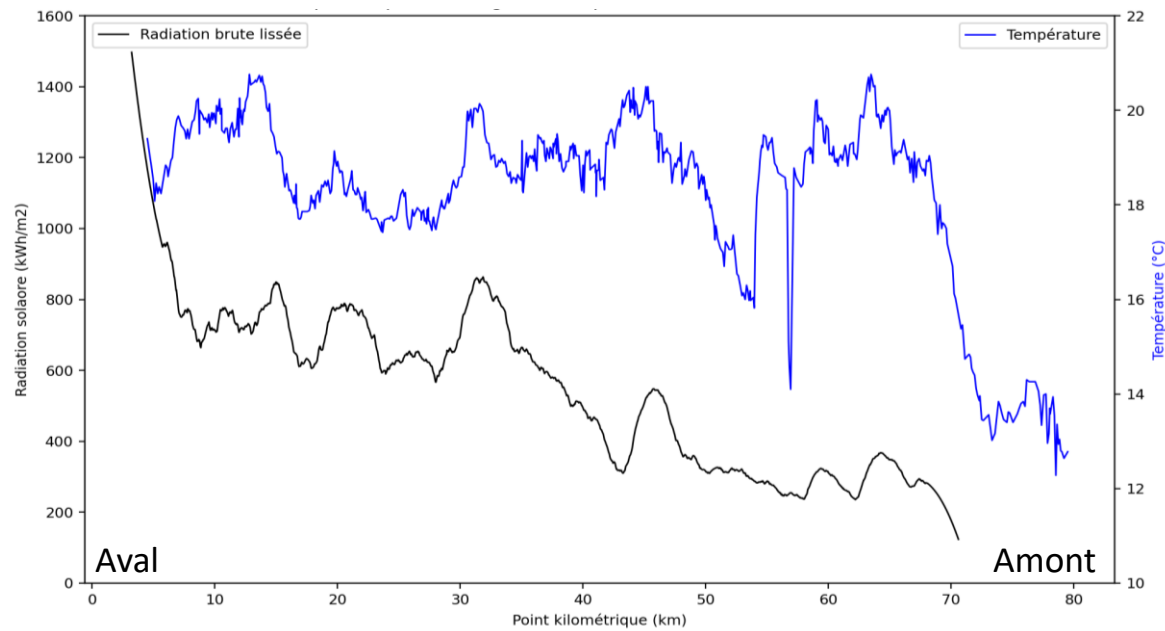
Unitaire par transect
(5 m de long x largeur mouillée)

- Rayonnement brut total par transect / Volume d'eau sous le transect pendant la période simulée
- Volume d'eau est actuellement mesuré à l'aide d'images optiques prises le 19 juillet 2025
- Volume d'eau peut être estimé avec: profil en long de la surface d'eau (LiDAR), largeur mouillée estimée sur images Google Earth, estimation de la résistance à l'écoulement (Manning's n)

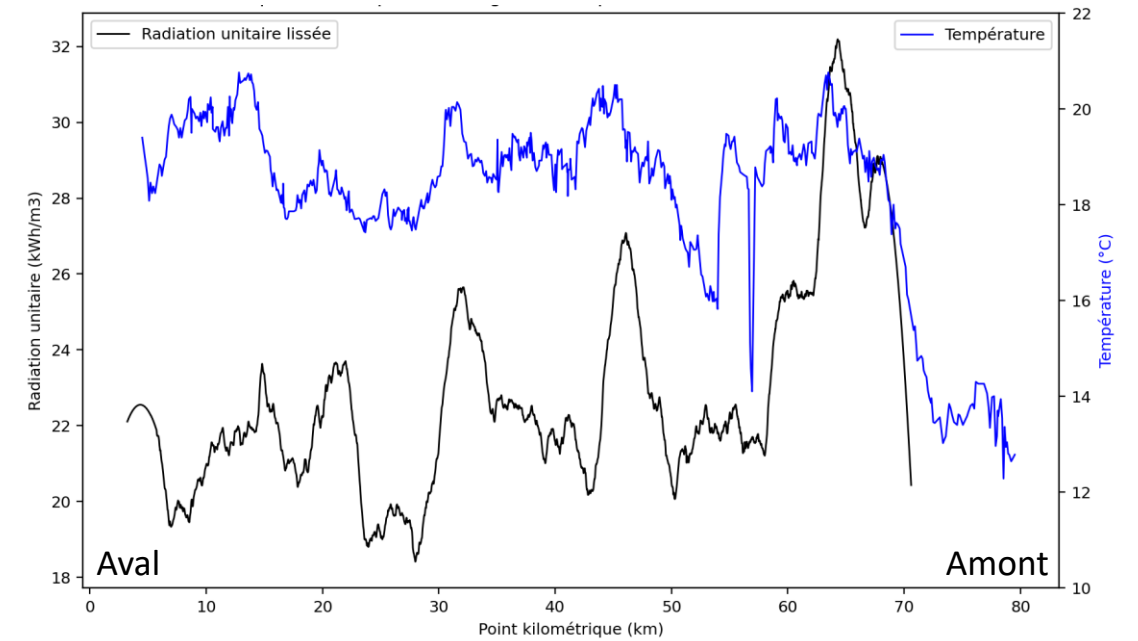


Comparaison profils en long: température de l'eau vs rayonnement solaire (brut et unitaire)

Rayonnement solaire brut



Rayonnement solaire unitaire



Premier exemple de simulation de l'effet d'ajouter une végétation riveraine d'une hauteur donnée sur le rayonnement solaire reçu

Modification de la couche LiDAR hauteur de canopée (HC) : si $HC < 12$ m mettre $HC = 12$ m

Sans modifications



Avec modifications



Conclusions

- Les températures des rivières, en Gaspésie comme ailleurs sont à la hausse
- Dans ce contexte, et surtout dans les rivières à salmonidés peu tolérants à l'eau chaude, les refuges thermiques sont et vont devenir des habitats critiques.
- Ces refuges doivent être identifiés, caractérisés et protégés.
 - La protection des refuges passe en partie par celle des bandes riveraines
- Dans certains cas, des aménagements peuvent être réalisés pour aider à pérenniser les refuges.
- Les outils de modélisation peuvent servir à chacune de ces étapes.