

Estimation de l'évapotranspiration à partir des images aéroportées et satellitaires à Montréal

Présentée par
LEKOUCH Imad

Plan

INTRODUCTION

Évapotranspiration (*ETP*)

Landsat-8

MÉTHODOLOGIE

Corrections radiométriques

Algorithmes (*ETP*)

RÉSULTATS

CONCLUSION

PERSPECTIVES

L'évapotranspiration potentielle est un paramètre important du cycle terrestre de l'eau. Elle désigne l'évaporation maximale possible, indépendamment de la quantité d'eau que les plantes ont effectivement à disposition. Elle est considérée comme l'indicateur du développement optimal de la végétation et joue un rôle capital pour l'évaluation des aptitudes climatiques d'une région pour l'agriculture (*Calanca et Holzkämper 2010*)

il n'est pas si simple de définir précisément l'évapotranspiration potentielle car elle dépend non seulement des conditions de l'atmosphère et du sol, mais aussi des caractéristiques de la végétation.

Le concept d'évapotranspiration potentielle a été introduit par Thornthwaite (1948; Brutsaert 1982). Compte tenu des données disponibles à l'époque, il a établi une formule purement empirique, utilisée aujourd'hui encore aux Etats-Unis pour surveiller les cas de sécheresse.

Mais ce sont Penman (1948) et plus tard Monteith (1965), qui ont défini les principes théoriques conduisant au développement d'une méthode de calcul physique. L'équation PM qui porte leur nom (encadré 2) constitue aujourd'hui encore la base des simulations du processus d'évapotranspiration

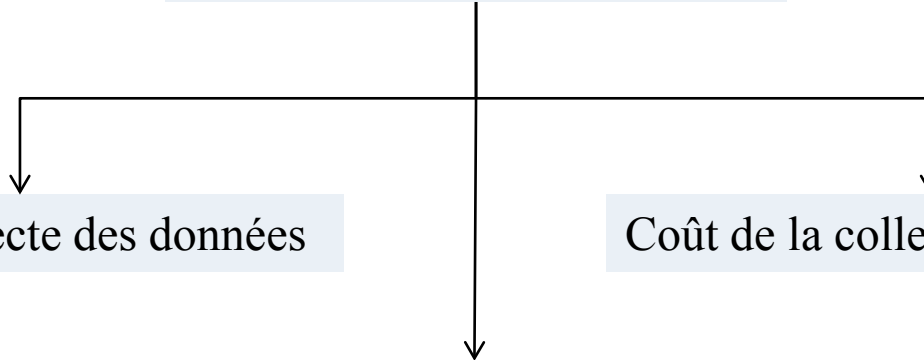
Le recours à la télédétection est devenu de nos jours, quasi-systématique dans les études d'évapotranspiration à grande échelle

En raison de l'économie faite

Temps de collecte des données

Coût de la collecte des données

Images gratuit

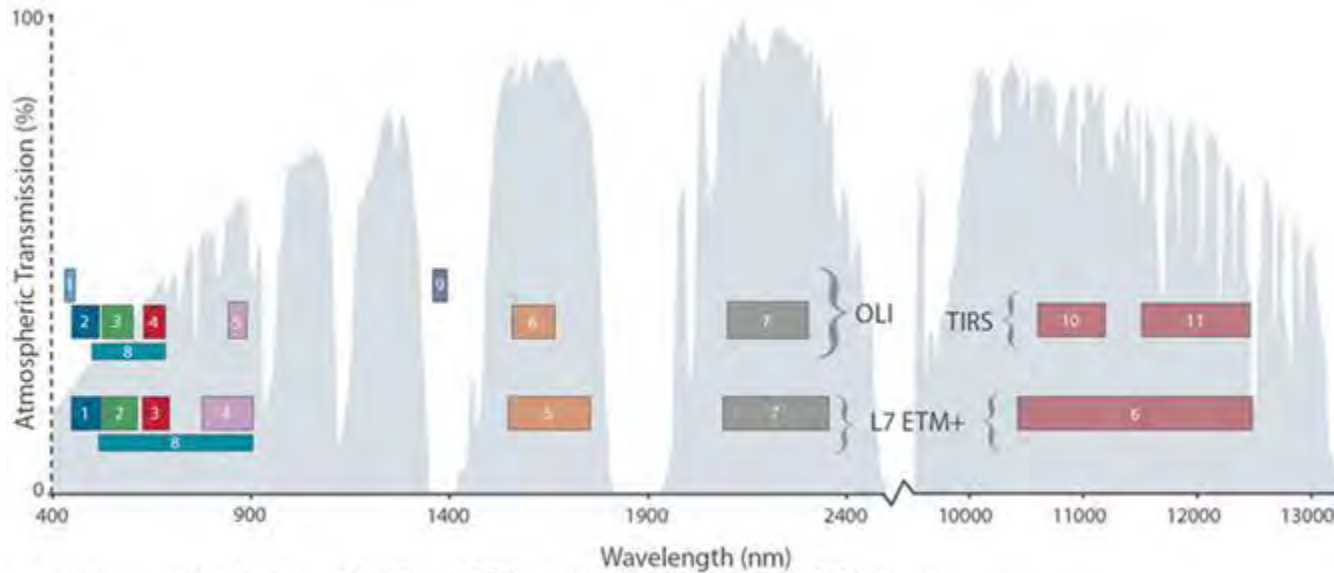


Landsat-8 a été lancé en Février 2013 pour assurer la continuité des données (LDCM : Landsat Data Continuity Mission).

- Landsat-8 porte deux capteurs:
 - ✓ Operational Land Imager (OLI)
 - La résolution spatiale de 30 m
 - 8 bandes dans le visible, le proche infrarouge (VNIR) et dans l'infrarouge (SWIR)
 - ✓ Infrarouge thermique (TIR)
 - La résolution spatiale de 100 m
 - 2 bandes situées dans la fenêtre atmosphérique entre 10-12 um
- L'augmentation d'applications utilisant les données thermiques du Landsat au cours des dernières années a été un facteur clé pour lancer un capteur de *TIR* dans le cadre de LDCM.

Landsat-8 a été lancé en Février 2013 pour assurer la continuité des données (LDCM : Landsat Data Continuity Mission).

- Landsat-8 porte deux capteurs:
 - ✓ Operational Land Imager (OLI)
 - La résolution spatiale de 30 m
 - 8 bandes dans le visible, le proche infrarouge (VNIR) et dans l'infrarouge (SWIR)
 - ✓ Infrarouge thermique (TIR)
 - La résolution spatiale de 100 m
 - 2 bandes situées dans la fenêtre atmosphérique entre 10-12 μm
- L'augmentation d'applications utilisant les données thermiques du Landsat au cours des dernières années a été un facteur clé pour lancer un capteur de *TIR* dans le cadre de LDCM.

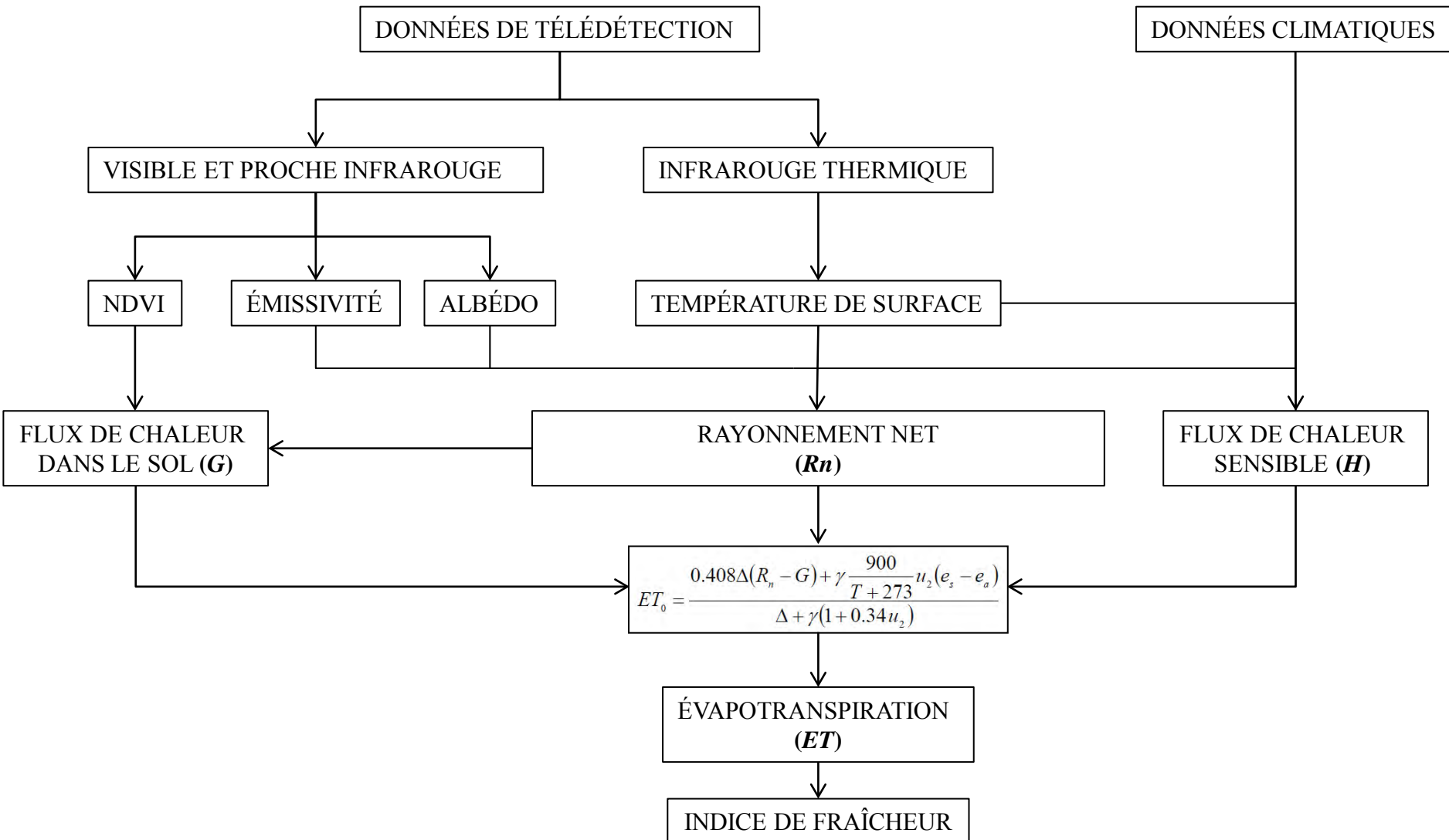


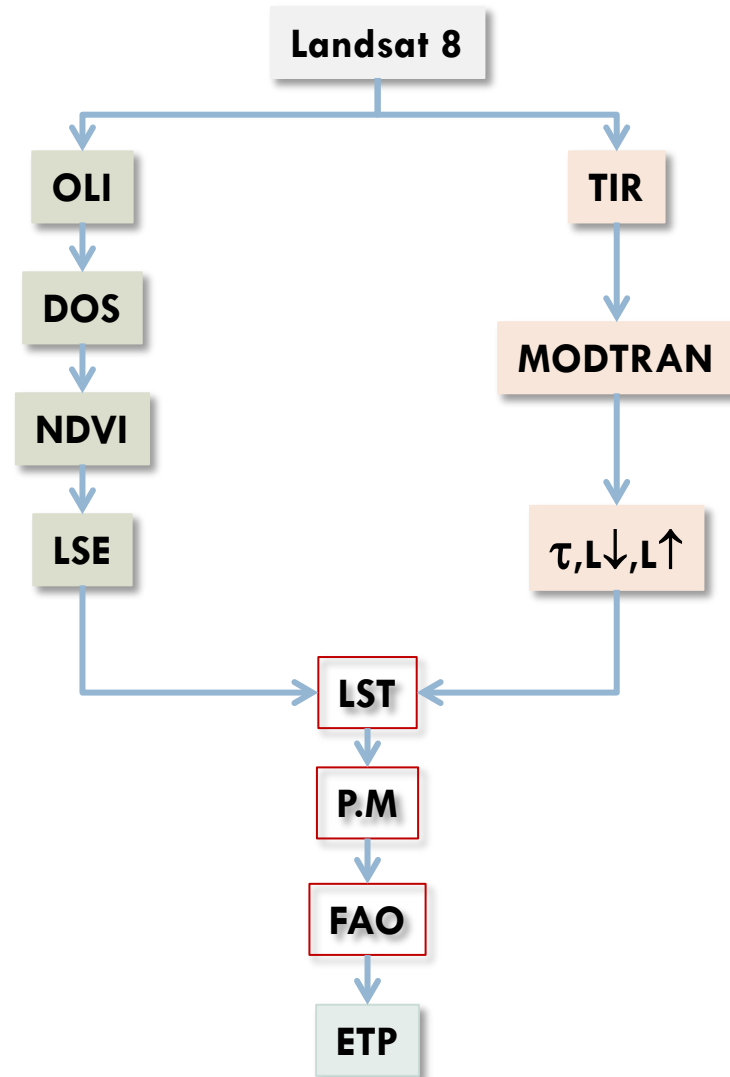
Bandpass wavelengths for Landsat 8 OLI and TIRS sensor, compared to Landsat 7 ETM+ sensor
Note. atmospheric transmission values for this graphic were calculated using MODTRAN for a summertime mid-latitude hazy atmosphere (circa 5 km visibility).

Deux nouvelles bandes spectrales:

- Coastal aérosol (Bande 1) → Ressources en eau et des zones côtières.
- Cirrus (Bande 9), un nouveau canal → cirrus nuages.

Méthodologie





Convertir les comptes numériques en luminance au niveau du capteur satellitaire en utilisant les gains absolus fournis avec Landsat8

$$L_{SAT} = (VN - VN_{MIN}) * \frac{L_{MAX} - L_{MIN}}{VN_{MAX} - VN_{MIN}} + L_{MIN} \quad [Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}]$$

où,

L_{SAT} = La luminance mesurée par le capteur

VN = La valeur numérique correspondant

L_{MAX} = La luminance maximale mesurable par le capteur

L_{MIN} = La luminance minimale mesurable par le capteur

VN_{MAX} = La valeur numérique correspondant à L_{MAX}

VN_{MIN} = La valeur numérique correspondant à L_{MIN}

Extraire de cette nouvelle variable les effets atmosphériques afin d'aboutir à une mesure physique de la réflectance au niveau de la surface

La méthode utilisée est dite dark object subtraction (*DOS*), elle se base sur la soustraction des faibles comptes numériques de l'histogramme de fréquence d'une image

Les indices de végétation sont des combinaisons de réflectances dans différentes bandes de longueurs d'onde.

90% de l'information spectrale sur un couvert végétal est contenue dans les bandes rouges et proche infrarouge

$$NDVI = \frac{RIR - R}{PIR + R}$$

Les valeurs du NDVI sont comprises entre -1 et +1

La neige, l'eau ou les nuages

Négatives

Les sols nus

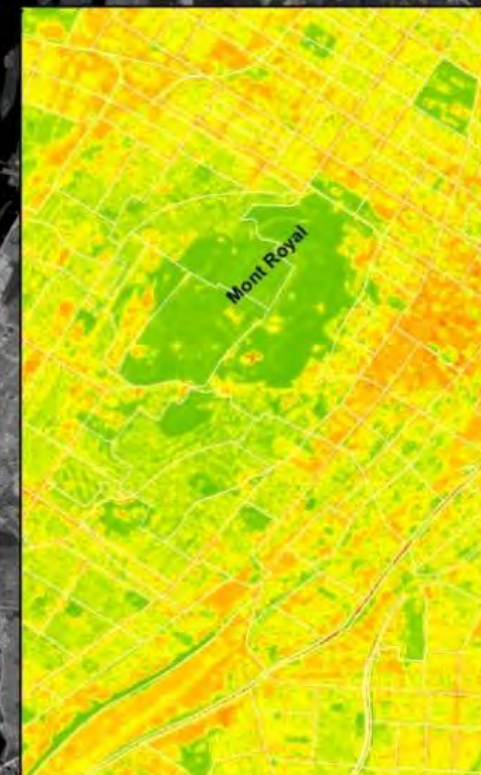
Proches de 0

La végétation

Comprises entre 0,1 et 0,7



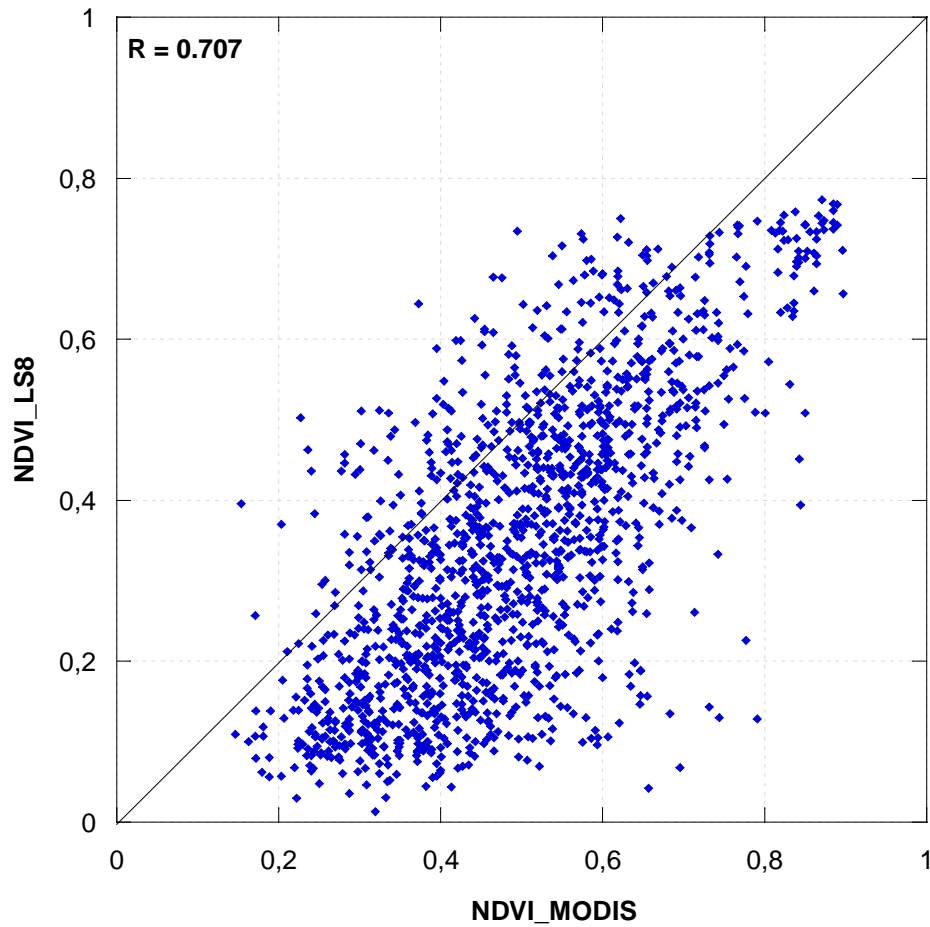
Indice de végétation par différence normalisé (NDVI) dans la ville de Montréal en août 2013



Projection: NAD83 MTM Zone 8
Réalisation: Imad Lekouch

Résultats

Validation NDVI



250 m de résolution

Résultats

Émissivité (ε)

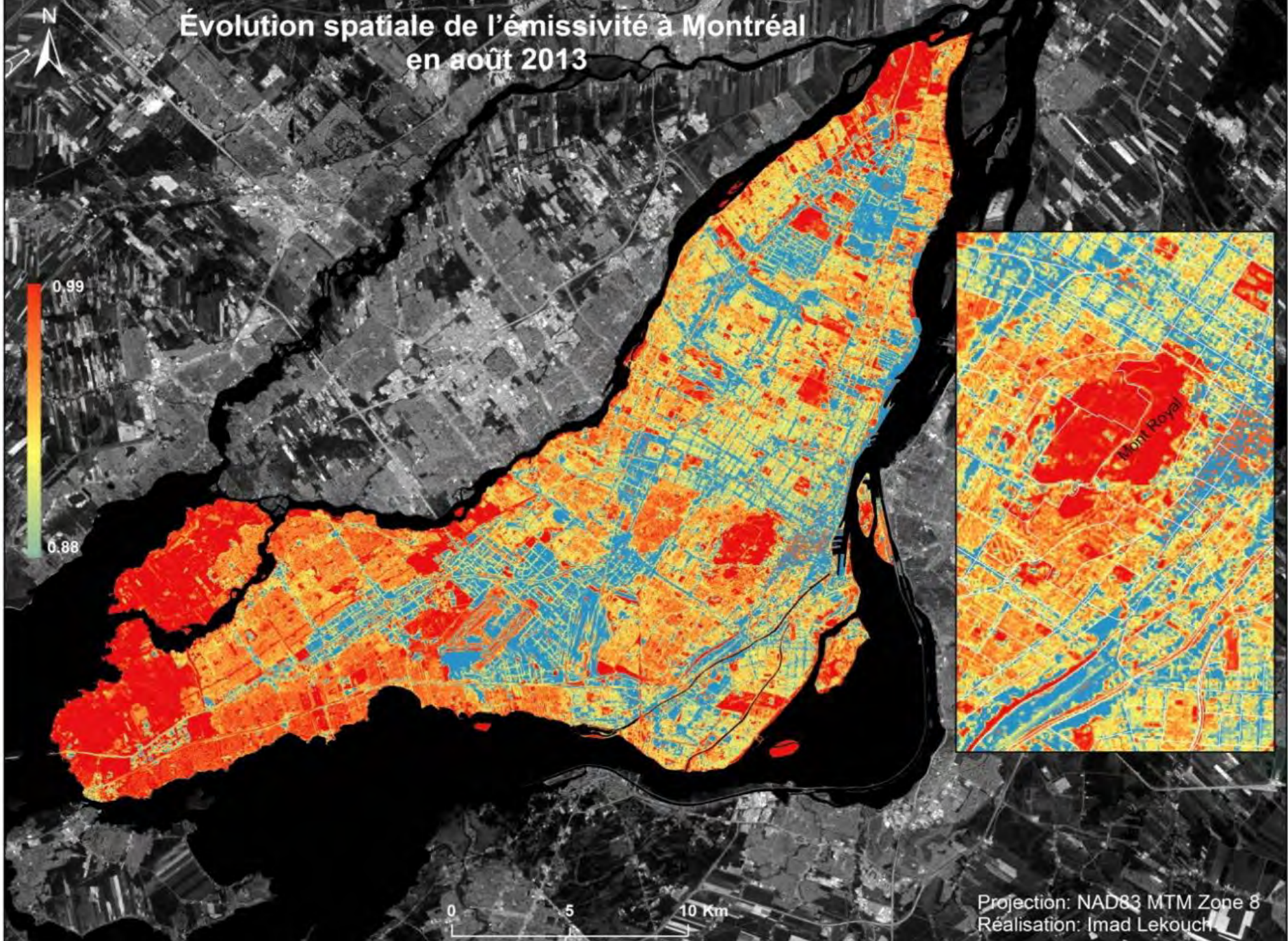
Se situe sensiblement dans la gamme 0.90-1.00 pour la plupart des surfaces naturelles

Calculée à partir de la segmentation de l'indice normalisé de végétation (*NDVI*)

Nous classons ε en quatre groupes distincts en fonction de cet indice :

	<i>NDVI</i>	Émissivité comprises entre 0.90-1.00
Eau	inférieur ou égale à 0,1	0,97
Sols nus (béton, asphalte ...)	inférieur à 0,15	0,88
Végétation	entre 0,15 et 0,7	$\varepsilon = 1.00 + 0.05 \text{ Ln } (NDVI)$
Végétation dense	supérieur à 0.7	0,985

Évolution spatiale de l'émissivité à Montréal en août 2013



Transformation des valeurs numériques en luminances dans la bande infrarouge thermique

$$L_{SAT} = (VN - VN_{MIN}) * \frac{L_{MAX} - L_{MIN}}{VN_{MAX} - VN_{MIN}} + L_{MIN} \text{ [Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}\text{]}$$

où,

L_{SAT} = La luminance mesurée par le capteur

VN = La valeur numérique correspondant

L_{MAX} = La luminance maximale mesurable par le capteur

L_{MIN} = La luminance minimale mesurable par le capteur

VN_{MAX} = La valeur numérique correspondant à L_{MAX}

VN_{MIN} = La valeur numérique correspondant à L_{MIN}

Transformation des luminances en températures apparentes au niveau du capteur

$$T_{sat} = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{sat}} + 1\right)}$$

Calcul des températures des objets

$$L(T_s) = \left[\frac{L_{sat} - L_{ATM}^{\uparrow}}{\tau} - (1 - \varepsilon)L_{ciel} \right] / \varepsilon$$

ε : l'émissivité spectrale

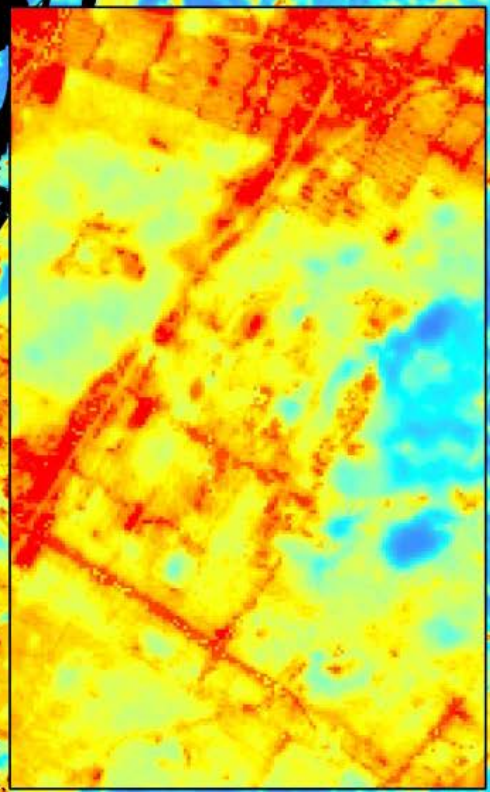
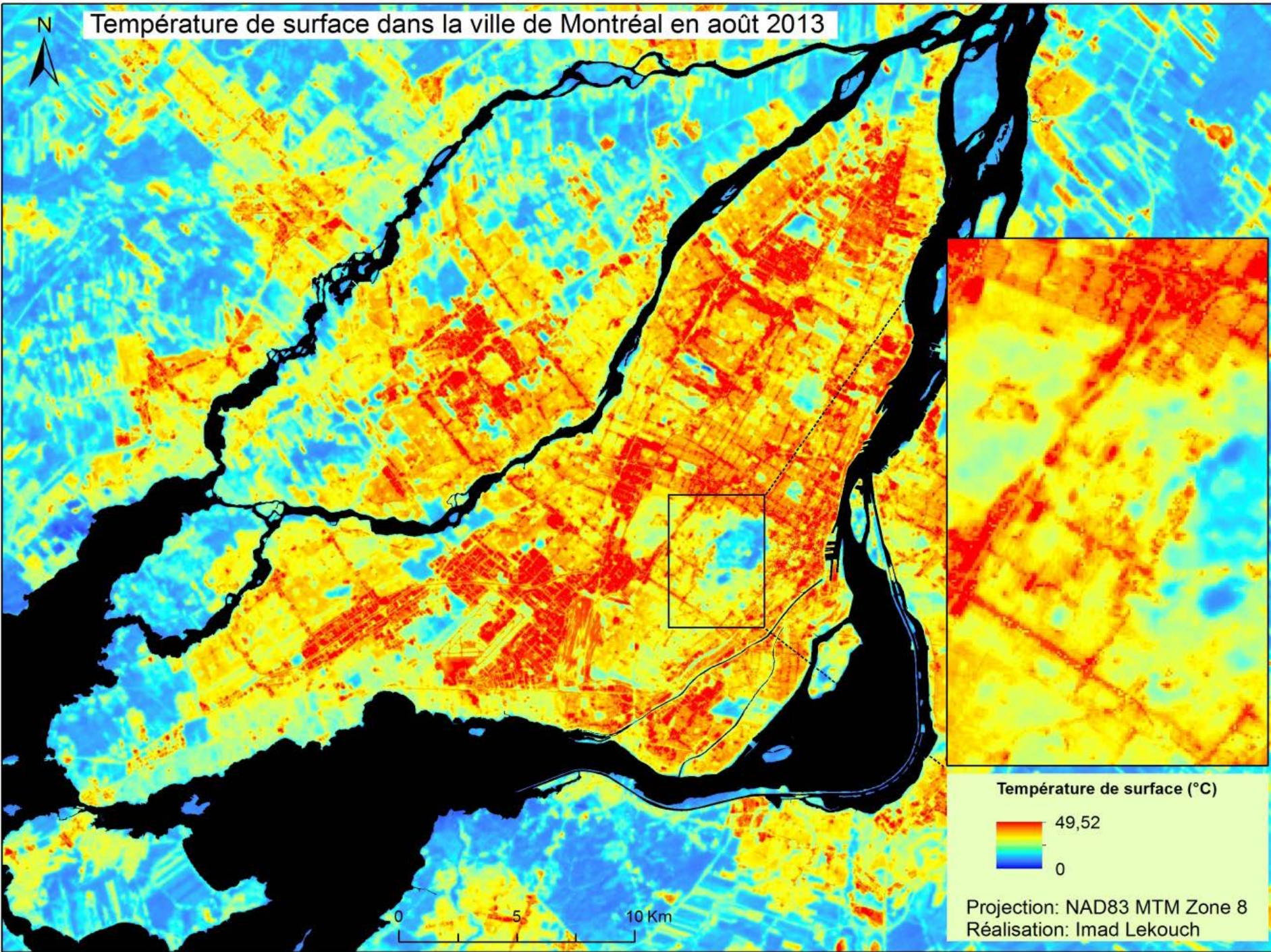
L_{sat} : la luminance mesurée par le capteur

L_{ATM}^{\uparrow} : la luminance de parcours atmosphérique

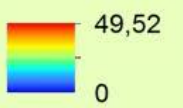
L_{ciel} : la luminance du ciel dirigée vers la surface

τ : la transmittance atmosphérique

Température de surface dans la ville de Montréal en août 2013



Température de surface (°C)

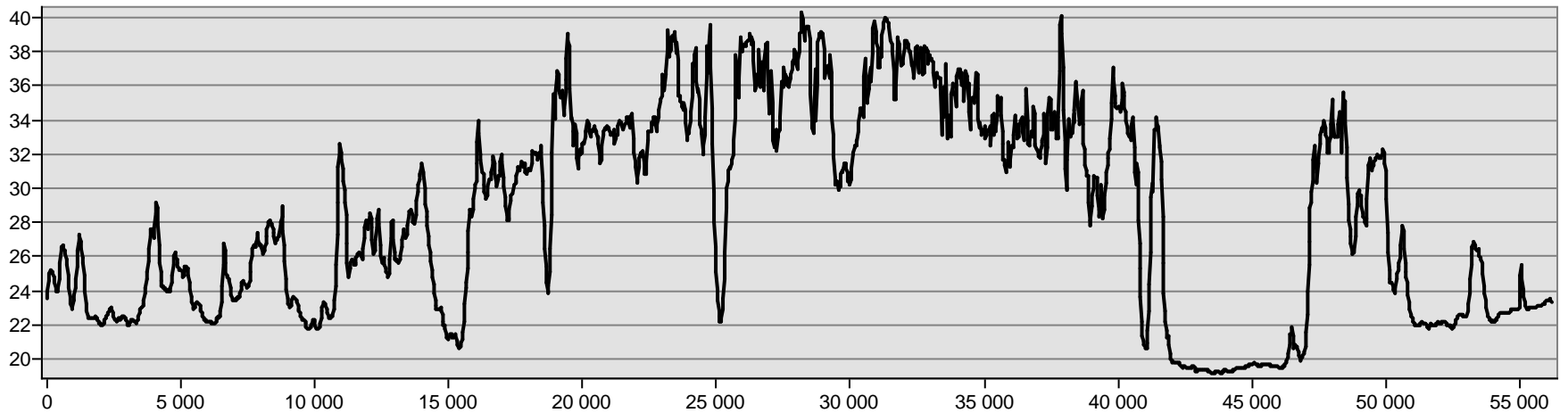


Projection: NAD83 MTM Zone 8
Réalisation: Imad Lekouch

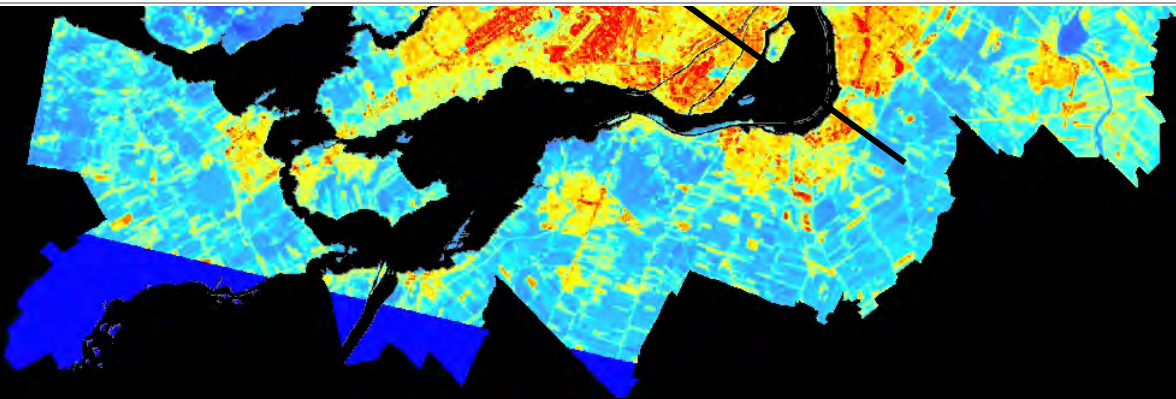
Résultats

Tsurf pour le 20 août 2013

Profile Graph Title



Profile Graph Subtitle



Résultats

Évapotranspiration



$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a$$

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.256}$$

$$\gamma = \frac{c_p P}{\epsilon \lambda} = 0.665 \times 10^{-3} P$$

$$T_{\text{mean}} = \frac{T_{\text{max}} + T_{\text{min}}}{2}$$

$$RH = 100 \frac{e_a}{e^{\circ}(T)}$$

$$e^{\circ}(T) = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27T}{T + 237.3} \right]$$

$$e_a = \frac{e^{\circ}(T_{\text{min}}) \frac{RH_{\text{max}}}{100} + e^{\circ}(T_{\text{max}}) \frac{RH_{\text{min}}}{100}}{2}$$

$$\Delta = \frac{4098 \left[0.6108 \exp \left(\frac{17.27T}{T + 237.3} \right) \right]}{(T + 237.3)^2}$$

$$R_s = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r \left[\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s) \right]$$

$$\delta = 0.409 \sin \left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39 \right)$$

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{\text{max}}^4 + T_{\text{min}}^4}{2} \right] \left[0.34 - 0.14 \sqrt{e_a} \right] \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right)$$

$$\omega_s = \arccos \left[-\tan(\varphi) \tan(\delta) \right]$$

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)}$$

$$d_r = 1 + 0.033 \cos \left(\frac{2\pi}{365} J \right)$$

Parmi les formules théoriques proposées pour le calcul de l'évapotranspiration de référence, on trouve celle proposée par la *FAO*

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

ET_0 : évapotranspiration en [mm/j],

Δ : pente de la courbe de pression de vapeur à la température moyenne de l'air, en [kPa/°C],

γ : constante psychrométrique en [kPa/°C].

R_n : (W/m^2) le rayonnement net

G : (W/m^2) le flux de chaleur du sol

T : Température moyenne journalière à la hauteur 2m [°C],

u_2 : Vitesse du vent à 2m de hauteur [m/s],

e_s : Pression de vapeur saturante de l'air [kPa],

e_a : Pression de vapeur réelle [kPa],

En effet, le rayonnement net (R_n) dépend de T_s et ε

$$R_n = (1 - a) R_G + R_A - \varepsilon \sigma T_s^4$$

Rayonnement global R_G et atmosphérique R_A sont des paramètres généralement peu variables au niveau d'une région, et pourraient être mesurés par les stations météorologiques ou estimés à partir des données climatiques

L'albédo (a) est défini comme étant une réflectance de surface dans le domaine de l'énergie solaire (0,3-3 μm).

$$a = 0,35r_2 + 0,13r_4 + 0,373r_5 + 0,085r_6 + 0,072r_7 - 0,0018$$

Résultats

Évapotranspiration

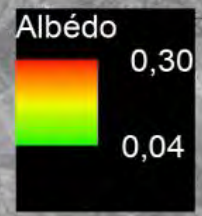
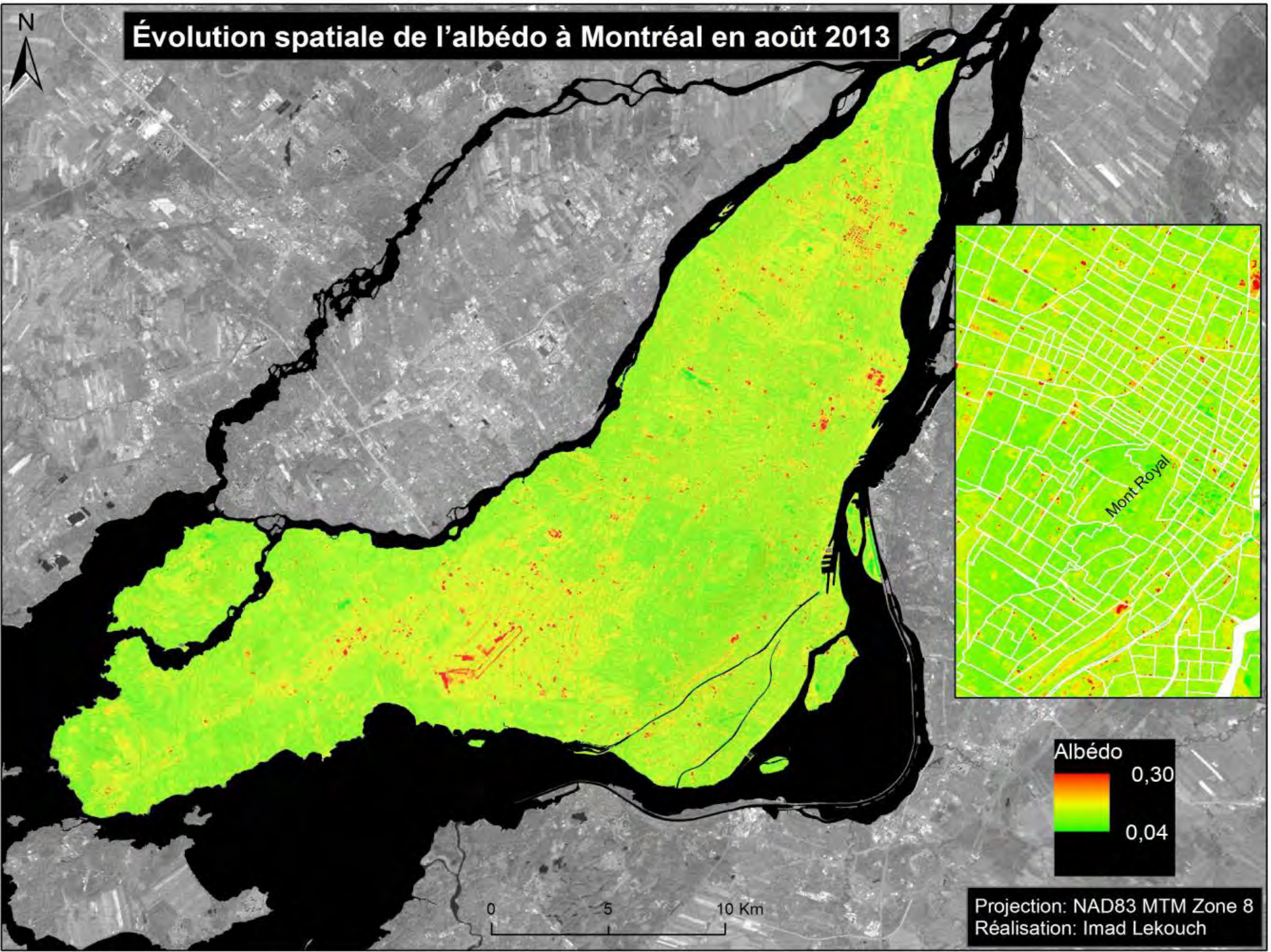
Les données météorologiques au moment de l'acquisition de l'image *ETM+* de *Landsat-7* du 8 juin 2013 à 15h 30GMT

Variable météorologique	Elliot Trideau	St. Hubert	Mirabel	Montréal Est	Moyenne
Latitude	45°28'00,000" N	45°31'00,000" N	45°40'00,000" N	45°38'00,000" N	
Longitude	73°45'00,000" O	73°25'00,000" O	77°02'00,000" O	73°33'00,000" O	
Altitude (m)	36	27,4	82,6	50,4	49.10
Température de l'air (°C)	23,8	23	24,5	23,6	23,73
Vitesse du vent (m/s)	2,5	1,67	6,1	0,56	2,71
Humidité relative (%)	33	31	27	25	29
Pression de saturation (KPa)	100,46	100,54	99,91	pas de données	100,3

Pour estimer le flux de chaleur par conduction dans le sol G , nous avons utilisé la formule de Moran et al., (1989) :

$$G = 0.583 * \exp(-2.13NDVI) * R_n$$

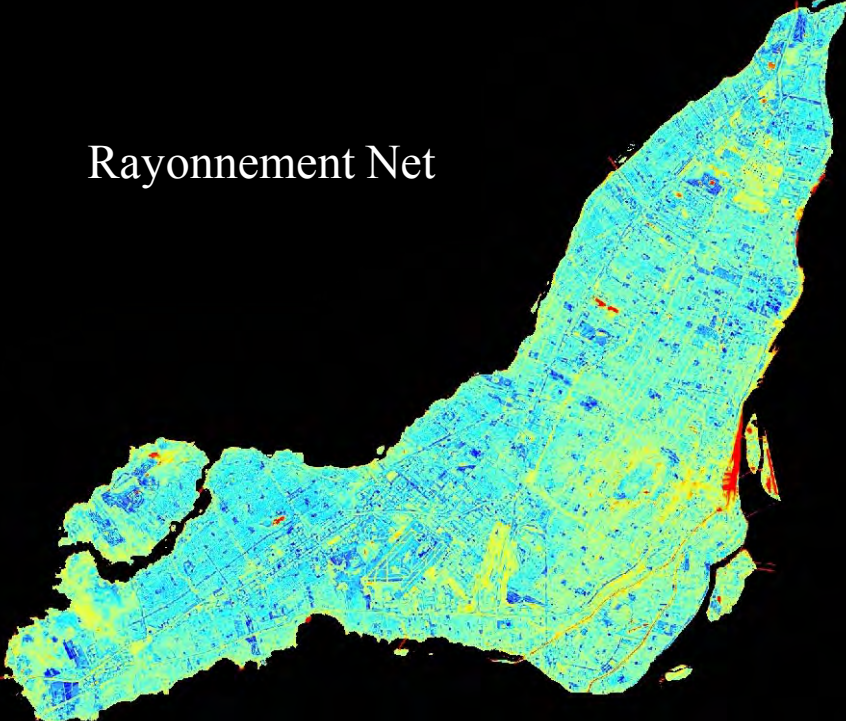
Évolution spatiale de l'albédo à Montréal en août 2013



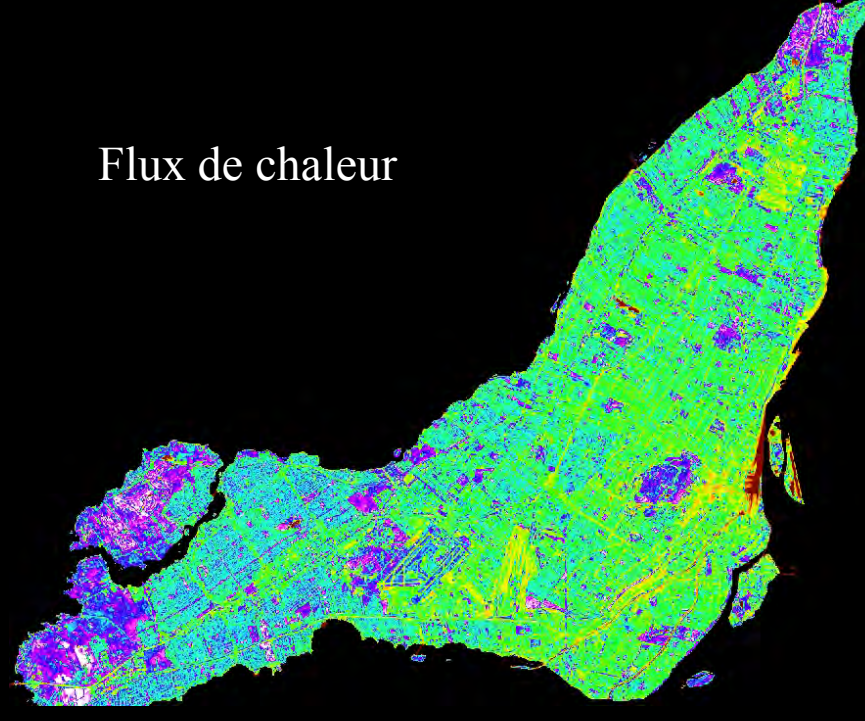
0 5 10 Km

Projection: NAD83 MTM Zone 8
Réalisation: Imad Lekouch

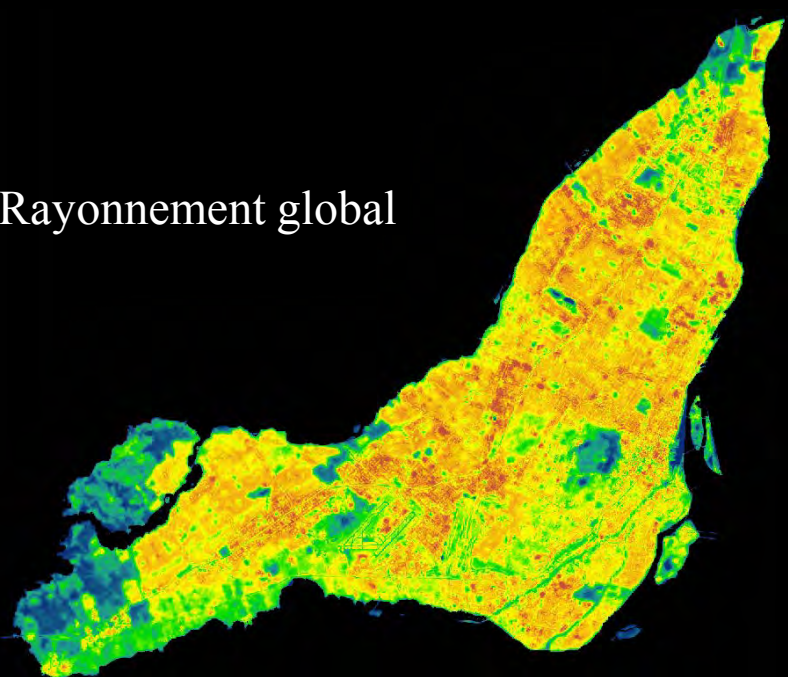
Rayonnement Net



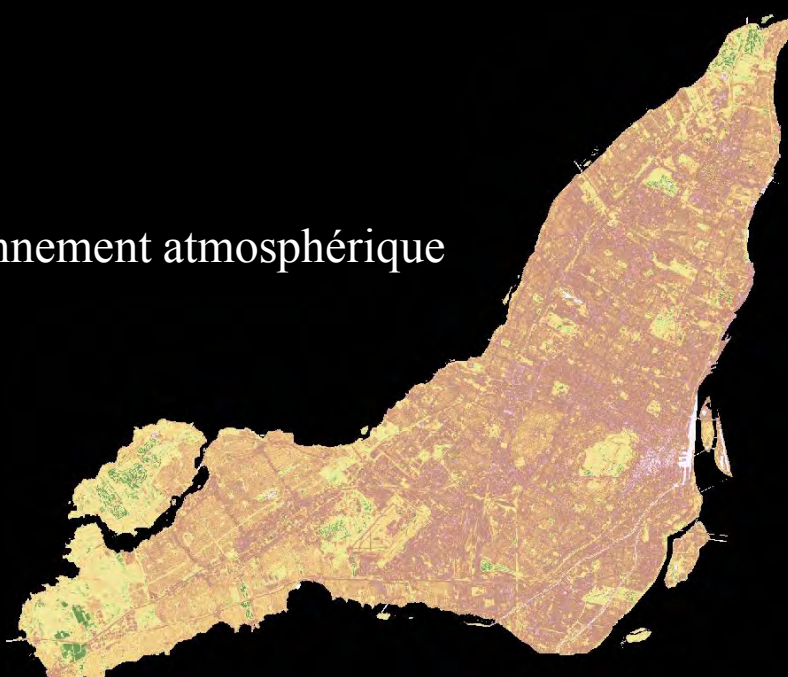
Flux de chaleur



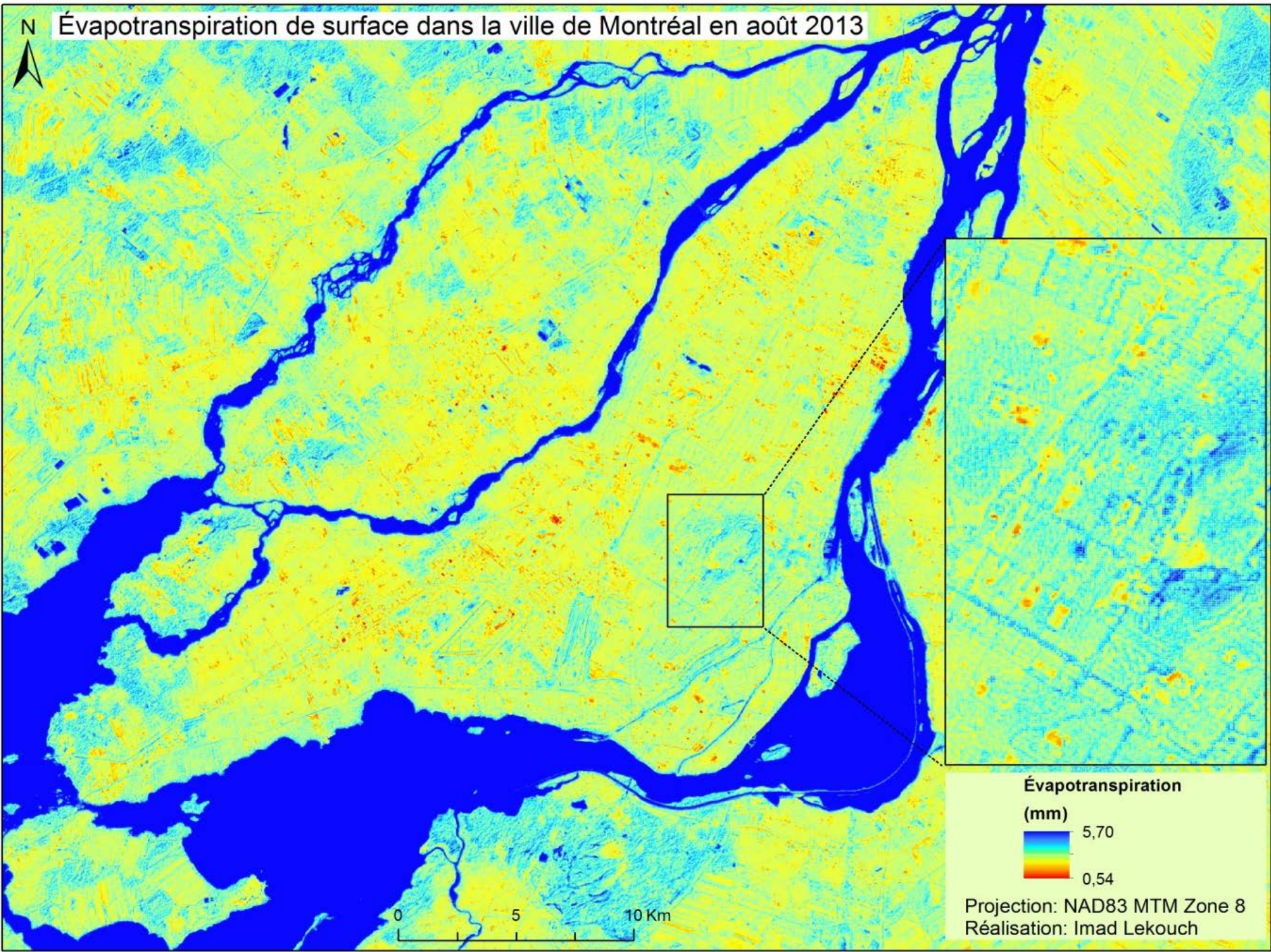
Rayonnement global



Rayonnement atmosphérique



Évapotranspiration de surface dans la ville de Montréal en août 2013



Évapotranspiration
(mm)

5,70

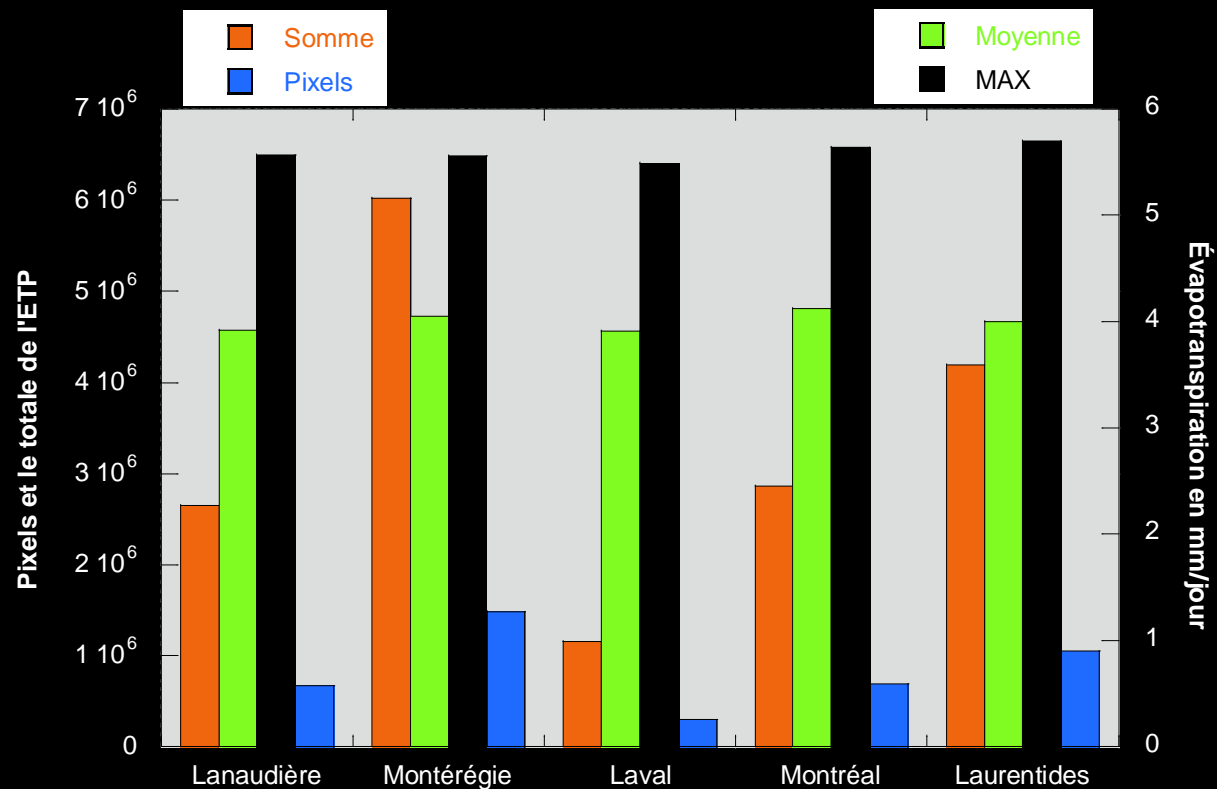
0,54

Projection: NAD83 MTM Zone 8
Réalisation: Imad Lekouch

0 5 10 Km

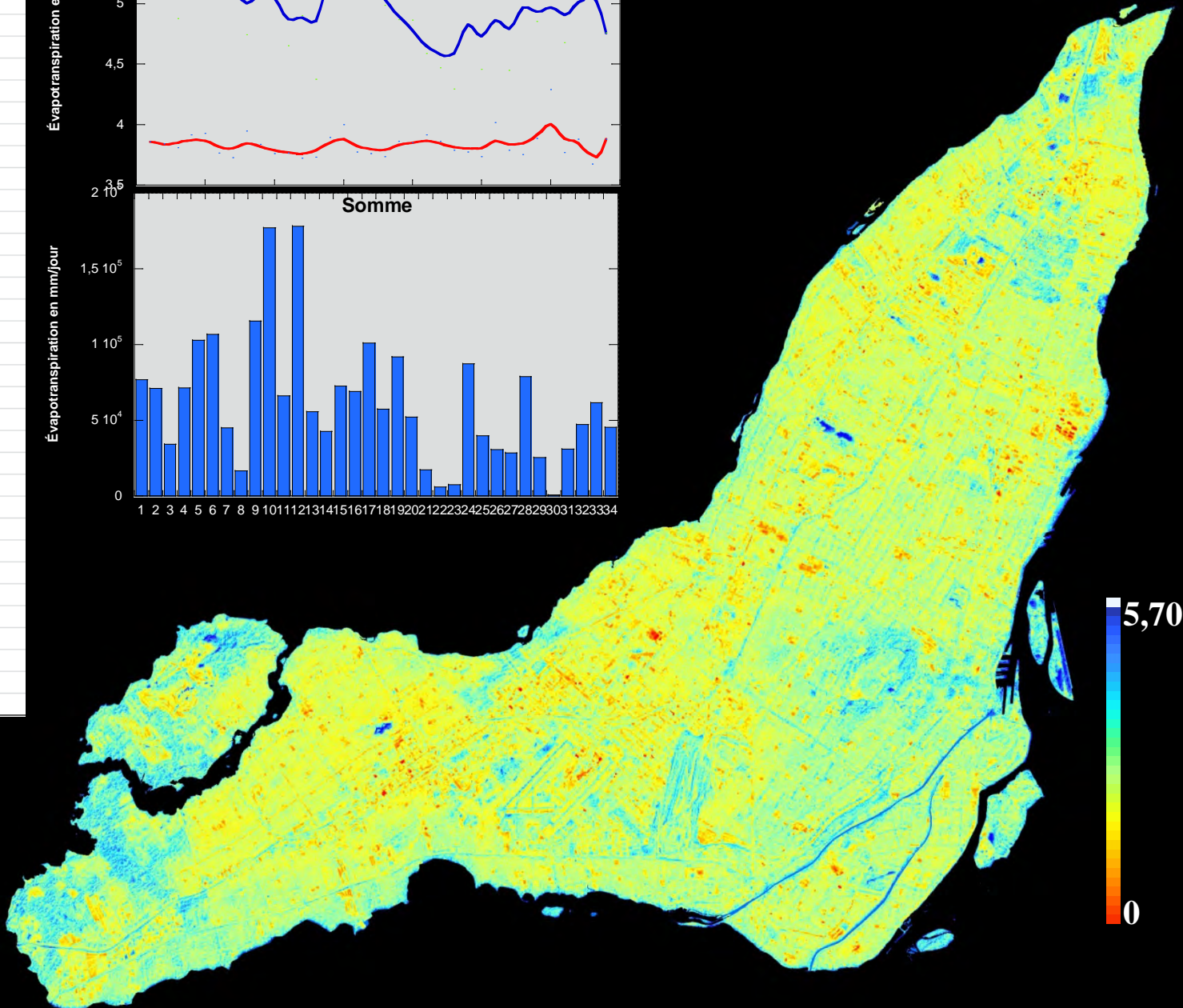
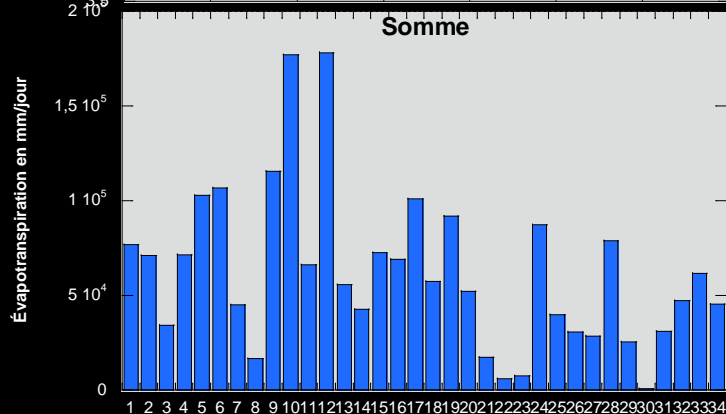
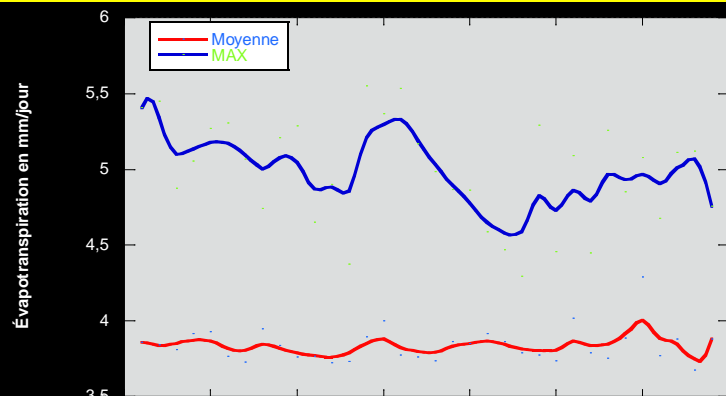
Résultats

Évapotranspiration

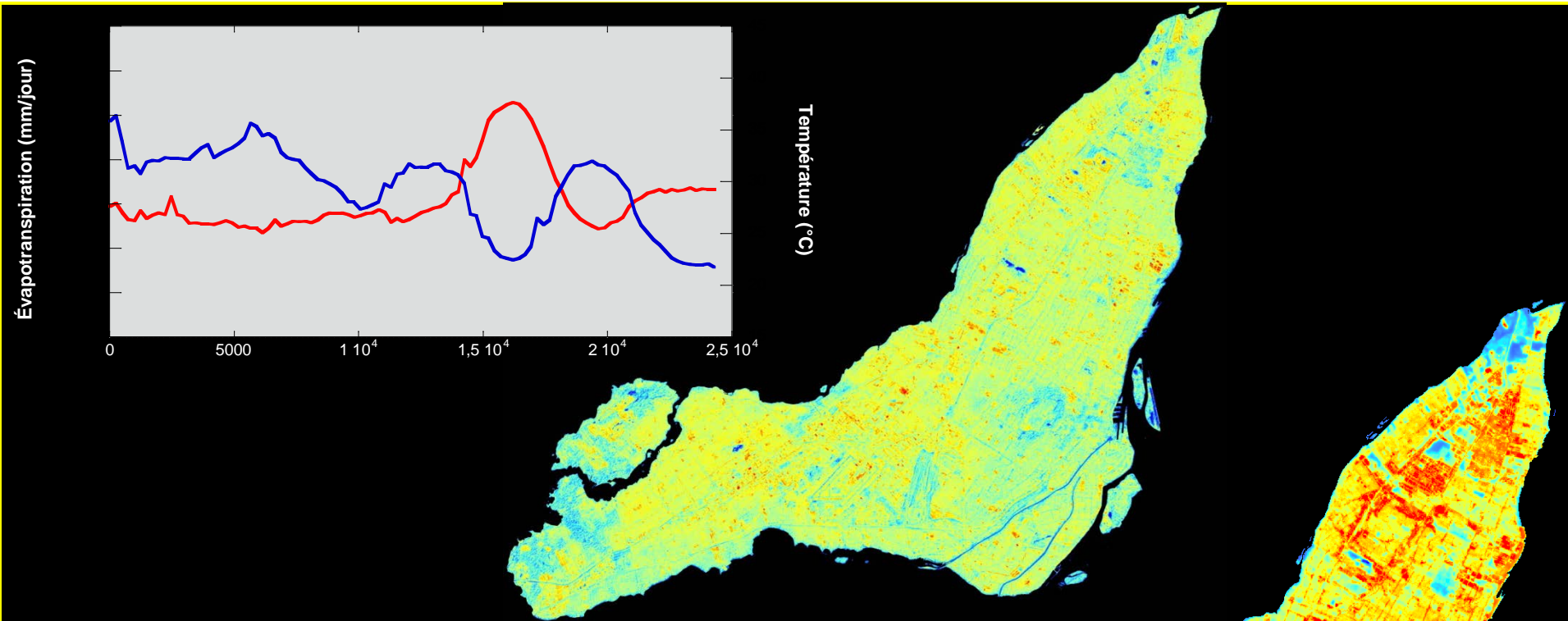


Région	Superficie	MIN	MAX	Moyenne	Ecart-Type	Somme
Lanaudière	607660224	0,92	5,57	3,92	0,35	2645669,75
Montérégie	1338004864	2,63	5,56	4,05	0,56	6019804,00
Laval	266778896	2,07	5,49	3,91	0,42	1158959,13
Montréal	624888000	2,30	5,64	4,12	0,67	2863044,50
Laurentides	944645376	1,14	5,70	4,00	0,37	4195639,00

ID	NOM_ARRONDISSEMENT
1	Lachine
2	LaSalle
3	Le Plateau-Mont-Royal
4	Le Sud-Ouest
5	L'Île-Bizard_Sainte-Genève
6	Mercier_Hochelaga-Maisonneuve
7	Montréal-Nord
8	Outremont
9	Pierrefonds_Roxboro
10	Rivière-des-Prairies_Pointe-aux-Trembles
11	Rosemont_La Petite-Patrie
12	Saint-Laurent
13	Saint-Léonard
14	Verdun
15	Ville-Marie
16	Villeray_Saint-Michel_Parc-Extension
17	Ahuntsic-Cartierville
18	Anjou
19	Côte-des-Neiges_Notre-Dame-de-Grâce
20	Montréal-Est
21	Westmount
22	Montréal-Ouest
23	Hampstead
24	Dorval
25	Kirkland
26	Senneville
27	Côte-Saint-Luc
28	Pointe-Claire
29	Baie-D'Urfé
30	L'Île-Dorval
31	Mont-Royal
32	Beaconsfield
33	Dollard-Des Ormeaux
34	Sainte-Anne-de-Bellevue



Résultats



CORRELATION MATRIX

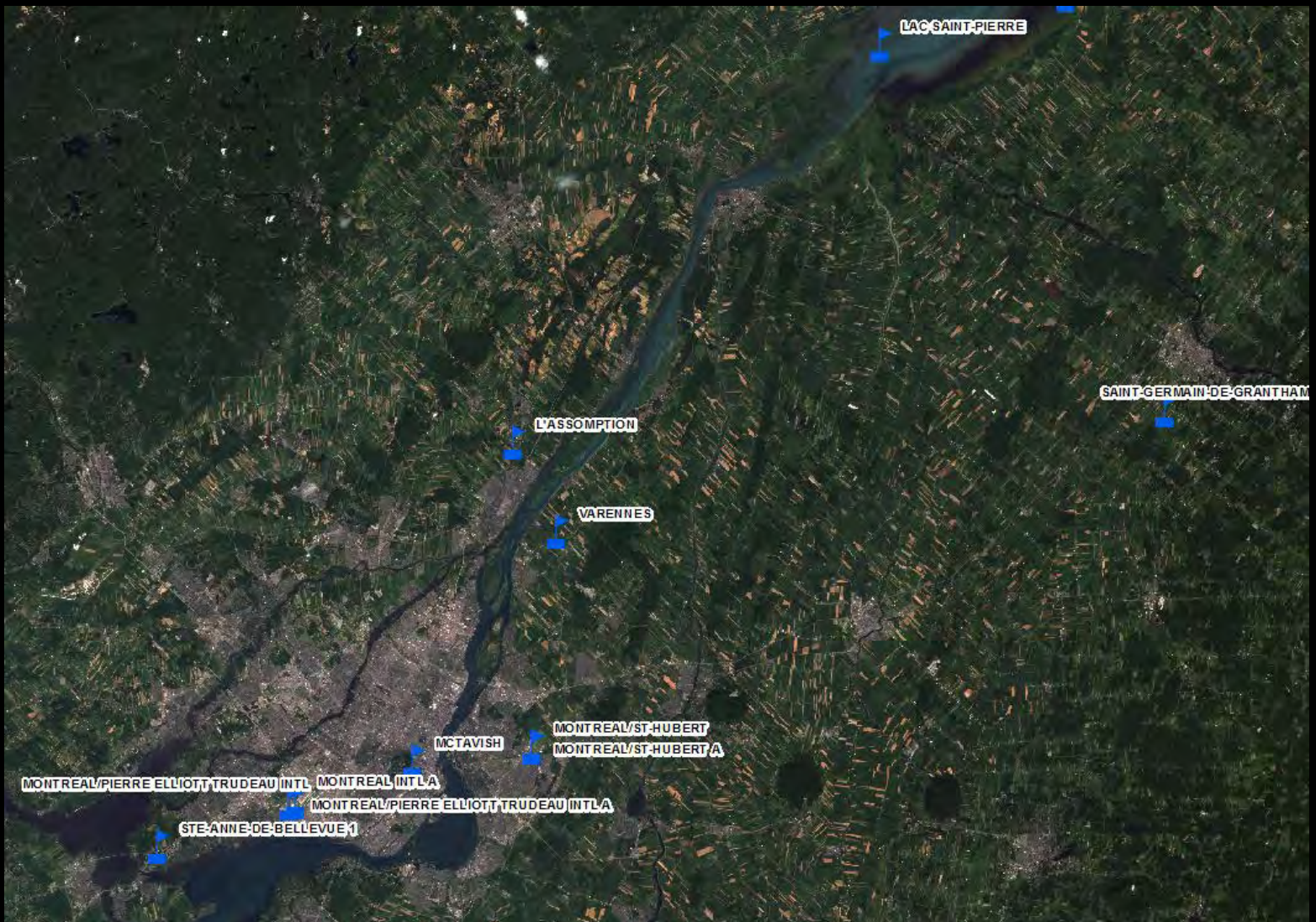
Layer	1	2
1	1,00000	-0,63916
2	-0,63916	1,00000

STATISTICS of INDIVIDUAL LAYERS

Layer	MIN	MAX	MEAN	STD
1	17,1116	48,3199	27,4364	5,2551
2	2,0664	5,7026	4,0763	0,5946

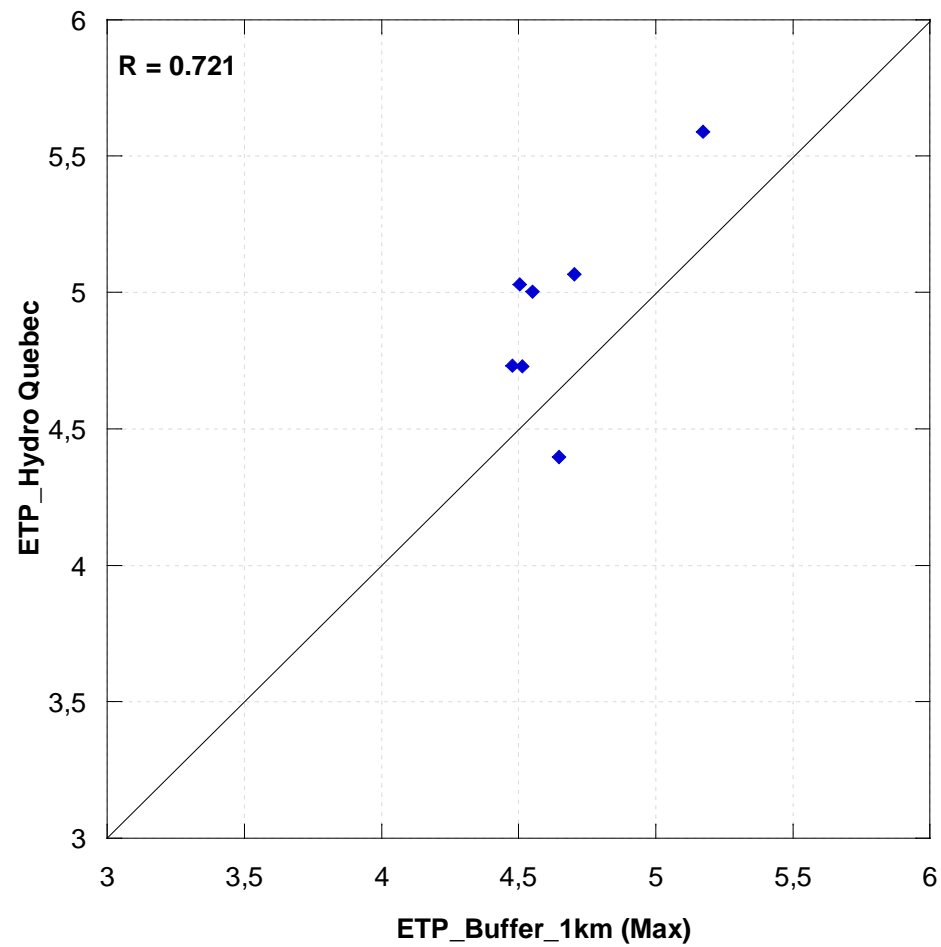
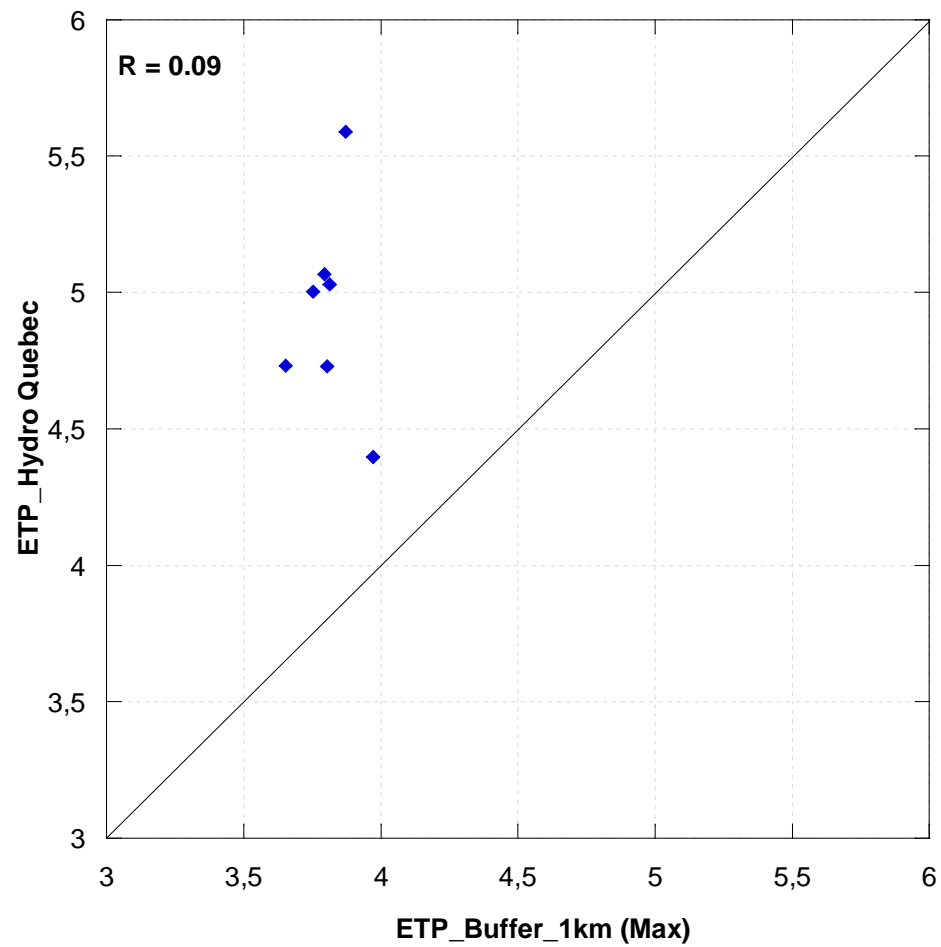
Résultats

Validation



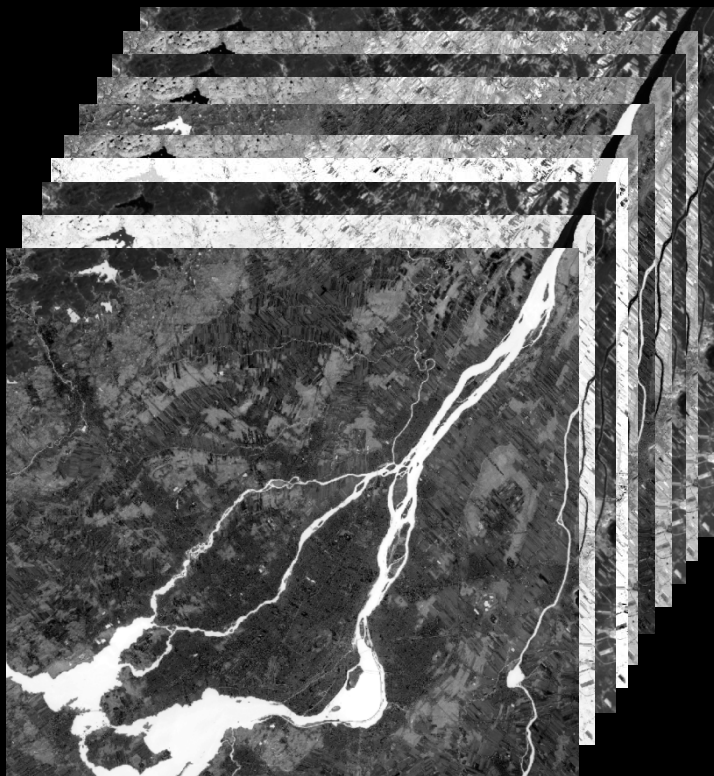
Résultats

Validation

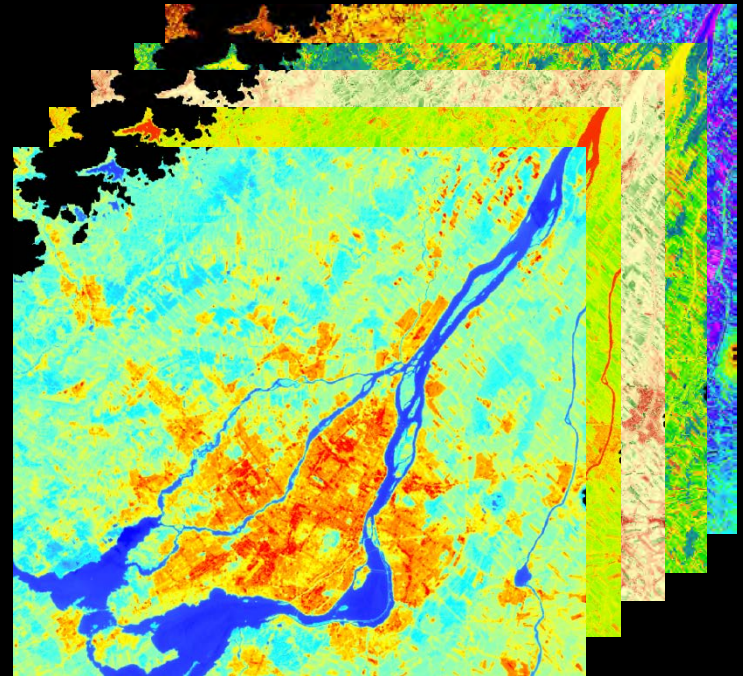


Résultats

Indice de fraîcheur



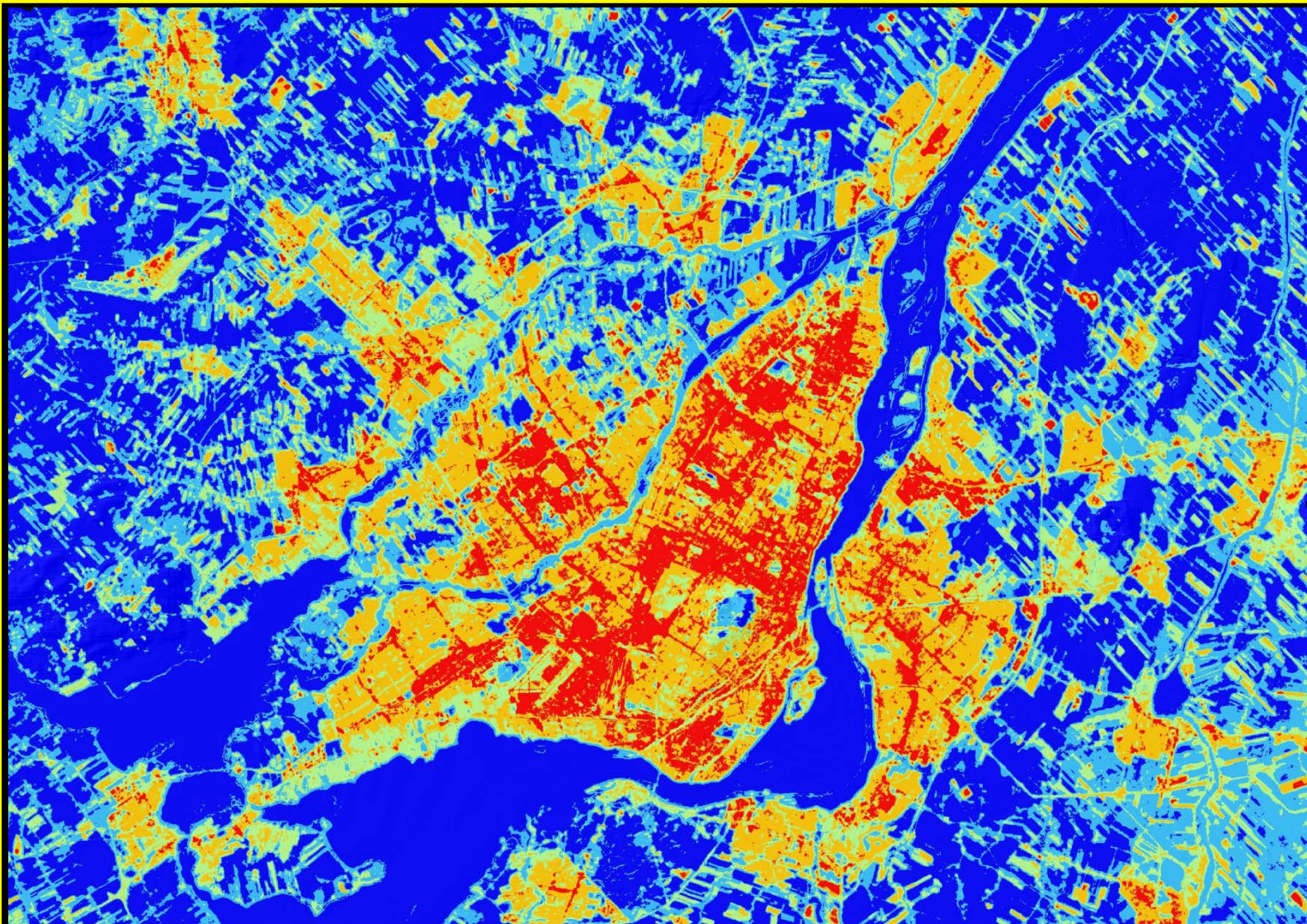
ACP



PERCENT AND ACCUMULATIVE EIGENVALUES			
PC Layer	EigenValue	Percent of EigenValues	Accumulative of EigenValues
1	2,318831e+001	59,0100	59,0100
2	1,580813e+001	40,2288	99,2388
3	2,219786e-001	0,5649	99,8037
4	6,923986e-002	0,1762	99,9799
5	7,891045e-003	0,0201	100,0000

Résultats

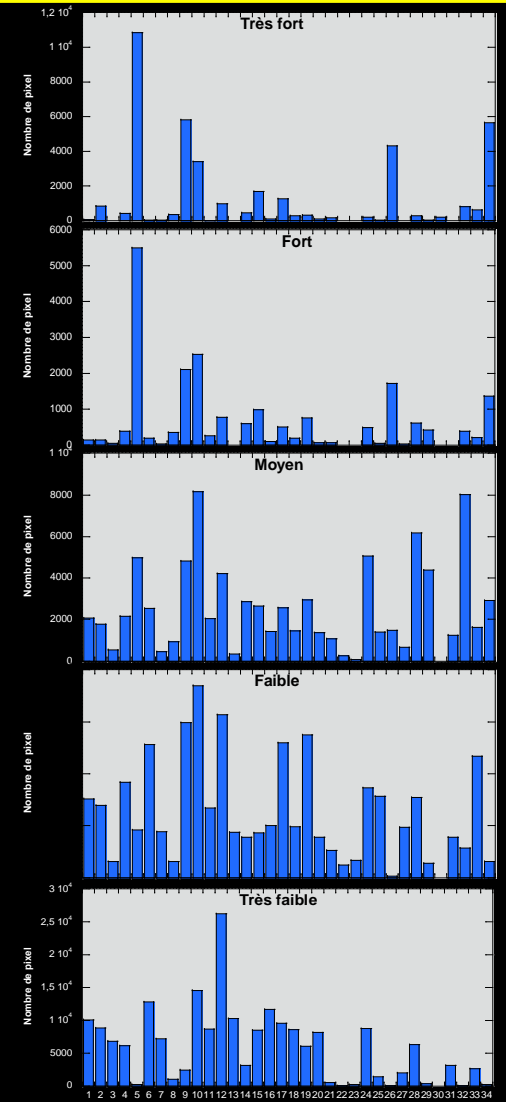
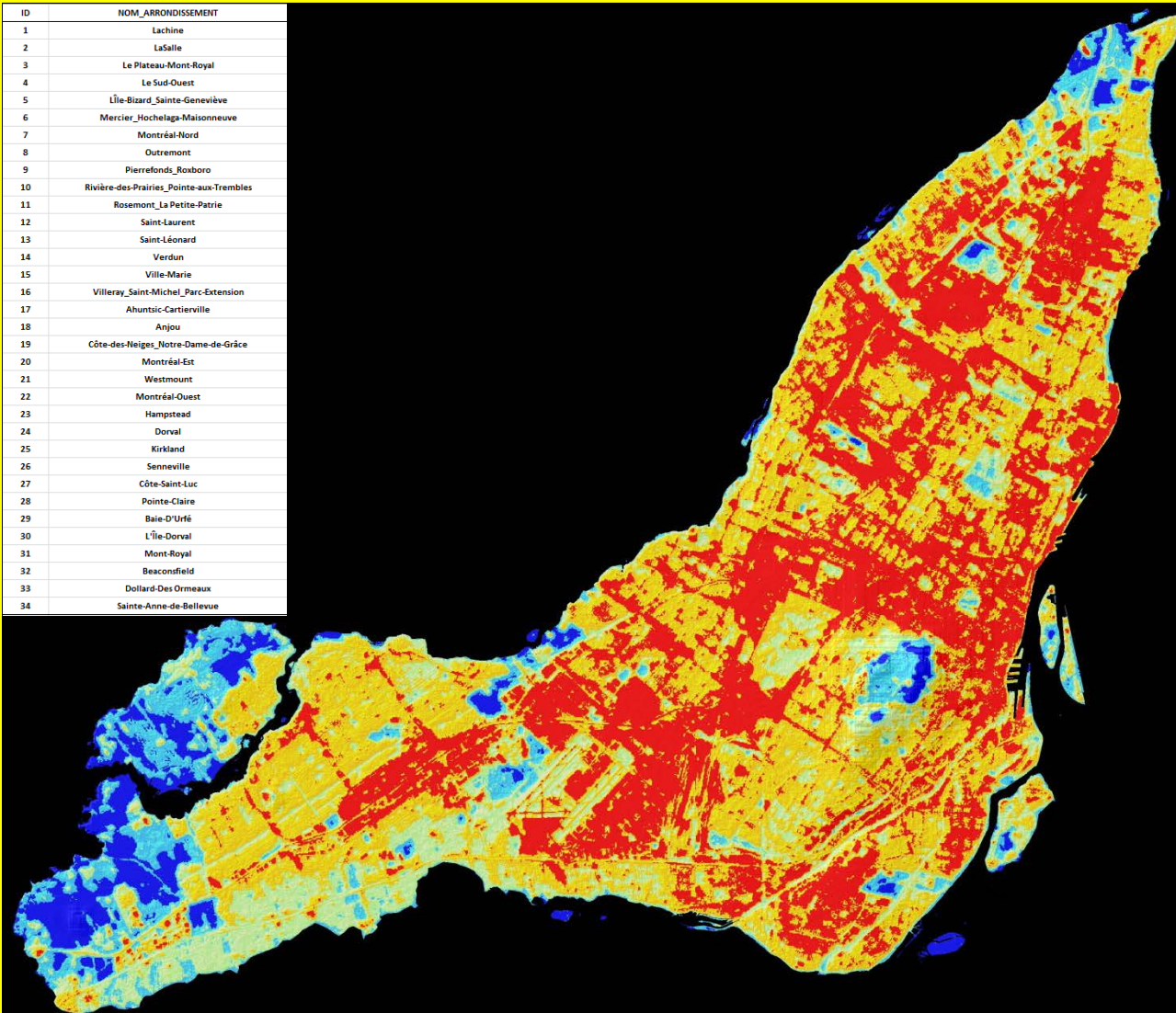
Indice de fraîcheur



Résultats

Indice de fraîcheur

ID	NOM_ARRONDISSEMENT
1	Lachine
2	LaSalle
3	Le Plateau-Mont-Royal
4	Le Sud-Ouest
5	Île-Bizard_Sainte-Genève
6	Mercier_Hochelaga-Maisonneuve
7	Montréal-Nord
8	Outremont
9	Pierrefonds_Roxboro
10	Rivière-des-Prairies_Pointe-aux-Trembles
11	Rosemont-La Petite-Patrie
12	Saint-Laurent
13	Saint-Léonard
14	Verdun
15	Ville-Marie
16	Villeray_Saint-Michel_Parc-Extension
17	Ahuntsic-Cartierville
18	Anjou
19	Côte-des-Neiges_Notre-Dame-de-Grâce
20	Montréal-Est
21	Westmount
22	Montréal-Ouest
23	Hampstead
24	Dorval
25	Kirkland
26	Senneville
27	Côte-Saint-Luc
28	Pointe-Claire
29	Baie-D'Urfé
30	L'Île-Dorval
31	Mont-Royal
32	Beaconsfield
33	Dollard-Des Ormeaux
34	Sainte-Anne-de-Bellevue



Perspectives

- Construction d'un modèle prédisant les zones de fraîcheurs à partir de plusieurs variables
- Exploitation d'autres modèles pour estimer ETP
- Application du modèle à l'ensemble de la province du Québec