



Vue de la ville de Fribourg, du pont de Zaehringen et de la Sarine  
Adobe Stock

# Localisation des îlots de chaleur

Une nouvelle technique de classification pour détecter les Îlots de chaleur

**Victor Zuccone**

Juin 2023

Faculté des sciences de la société

Certificat Complémentaire en Géomatique

Directeur : Docteur Gregory Giuliani

Expert : Docteur Jens Ingensand

Experte : Docteure Maryam Lotfian



**UNIVERSITÉ  
DE GENÈVE**



## Résumé

Un îlot de chaleur urbain (ICU) est une différence importante de température en ville, que ce soit en journée ou durant la nuit, par rapport à la campagne périphérique. Les conséquences de ces îlots sur la santé des habitants peuvent être multiples. Il est donc important de pouvoir les éliminer et pour cela il faut les localiser.

Ce travail propose de développer une nouvelle classification et une technique pour détecter les îlots de chaleur avec l'aide d'images satellites. Le développement de cette nouvelle technique se base sur d'autres techniques existantes comme la Local Climate Zone (LCZ), la Land Surface Temperature (LST) et le logiciel GeoClimate. Cette nouvelle classification intègre également des données des utilisateurs du territoire étudié. Le terrain d'étude est l'agglomération de Fribourg et le Lac de Schiffenen. Nous avons choisi cette zone pour sa proximité ville-campagne.

Finalement, cette technique de classification, pour détecter les îlots de chaleur, reprend la technique de base de la LCZ et utilise de nouvelles classes axées sur les îlots de chaleur et le besoin d'action :

1. Îlots de chaleur non accessibles, sans intervention nécessaire
2. Îlots de chaleur accessibles, intervention recommandée
3. Zone non considérée comme un îlot de chaleur selon la définition, mais qui nécessiterait une intervention dû au ressenti de la température
4. Zone non considérée comme un îlot de chaleur selon la définition et où l'action n'est pas nécessaire

Cette classification utilise une combinaison de toutes les bandes produites par les satellites Landsat 8 ou 9 et la méthode de classification « Random Forest » (ou « Random Trees » sous ArcGIS Pro).

En conclusion, cette nouvelle classification fonctionne bien, mais demande encore quelques ajustements, car certains pixels sont encore classés dans les mauvaises classes. Ainsi, l'utilisation d'images avec une meilleure résolution, d'autres données et/ou de l'aide de l'IA permettraient d'améliorer la classification du territoire.

## Remerciements

La réalisation de ce mémoire de certificat a été possible grâce aux conseils et à l'aide de plusieurs personnes que je tiens à remercier sincèrement.

Je remercie Monsieur Gregory Giuliani, Docteur et Professeur à l'Université de Genève, qui m'a encadré durant ce travail et qui m'a aidé, conseillé et encouragé.

Je remercie Madame Maryam Lotfian, Docteure et collaboratrice scientifique à la Haute École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, qui m'a apporté son aide pour ce travail de certificat en me conseillant, en m'aidant, en m'encourageant et sans qui je n'aurais pu avoir accès au script qu'elle a développé.

Je remercie Monsieur Jens Ingensand, Docteur et Professeur Haute École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud de m'avoir conseillé et aidé durant tout le processus de ce travail.

Je remercie toutes les personnes qui ont participé à l'enquête.

## Table des matières

1.	Introduction.....	5
2.	Contexte et Théorie.....	7
2.1.	Température de la Suisse et de Fribourg .....	7
2.2.	Îlots de chaleur .....	8
2.3.	Image satellite, Landsat 8 OLI et Landsat 9 OLI.....	9
3.	Problématique.....	10
4.	Données, Méthodologie et Théorie .....	11
4.1.	Données.....	11
4.2.	Les étapes pour la création d’une nouvelle technique .....	12
4.3.	Les techniques de classifications existantes.....	13
4.3.1.	Locale Climate Zone (LCZ) .....	13
4.3.2.	GeoClimate .....	15
4.3.3.	Land Surface Temperature LST.....	15
4.4.	Enquête en ligne.....	16
5.	Analyse .....	17
5.1.	Analyse historique.....	17
5.2.	Analyse pour l’année 2022.....	19
5.2.1.	L’analyse carte par carte .....	19
5.2.2.	L’analyse comparative.....	22
5.2.3.	L’enquête en ligne .....	22
5.2.4.	Synthèse .....	24
5.3.	La nouvelle technique de classification.....	25
6.	Conclusion .....	30
6.1.	Retour sur la question de recherche.....	30
6.2.	Comparaison avec les études précédentes.....	31
6.2.1.	Genève.....	31
6.2.2.	Yverdon-les-Bains.....	31
6.2.3.	Fribourg .....	31
6.3.	Limites et suite .....	32
7.	Bibliographie.....	33
8.	Annexe.....	36

## 1. Introduction

C'est en 1896 que le concept de changements climatiques apparait pour la première fois. Bien que ces changements furent considérés comme positifs au début, car ils permettaient de réchauffer les régions froides et donc de les exploiter, ils furent perçus comme négatifs à partir de 1988 lorsque le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a été créé (Andrew Revkin 2018).

Les îlots de chaleur font partie des changements climatiques. Ceux-ci sont compris comme des microclimats apparaissant en ville où les températures sont particulièrement plus élevées que ce soit la journée ou la nuit par rapport à la campagne avoisinante. Le concept est d'ailleurs apparu avant le concept de changements climatiques, car c'est le pharmacien Luke Howard, entre 1818-1820, qui en parle pour la première fois pour nommer ce phénomène dans la ville de Londres (Îlot de chaleur urbain — Wikipédia 2023).

La problématique des îlots de chaleur est devenue de plus en plus importante. Elle fait désormais partie des plans climats développés par différentes entités, visant à agir sur ce phénomène et à le maîtriser. On peut citer, par exemple, le plan climat du canton de Neuchâtel (Baran Yesiltas 2023).

Ce travail propose de se pencher sur les îlots de chaleur et leur détection à l'aide d'images satellites et le ressenti des utilisateurs du territoire d'étude. Son objectif est de trouver une nouvelle classification pour les détecter, afin d'aider les différentes entités à les localiser et, en fin de compte, à cibler les îlots de chaleur sur lesquels il faut concentrer en priorité les efforts et les ressources. L'étude se concentre sur la zone de l'agglomération de Fribourg en Suisse, en étendant l'analyse au lac de Schiffenen :

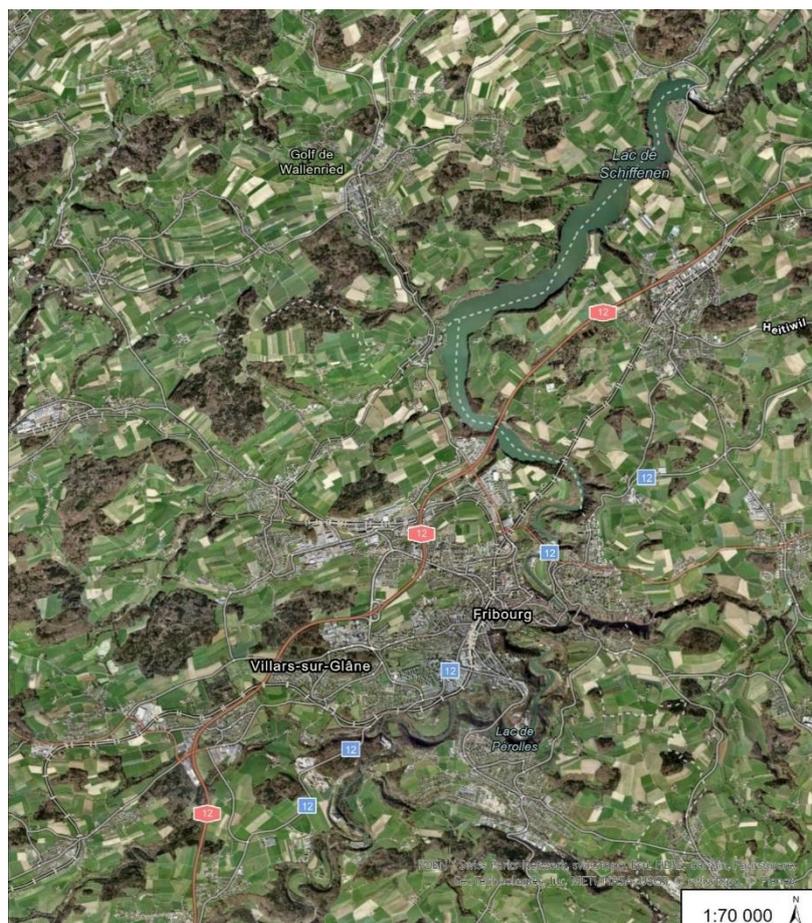


Figure 1 Périmètre d'étude

Ce périmètre présente l'avantage de combiner la ville, la campagne, un lac et des forêts. Le choix de cette zone d'étude repose sur plusieurs arguments :

- Le canton est principalement rural et possède une agglomération proche de la campagne, ainsi qu'une réserve naturelle appelée « La réserve naturelle du Lac de Pérolles » située dans la ville de Fribourg. Cette proximité permet de mettre en évidence les différences de chaleur entre la campagne et la ville, ainsi que l'influence de cette réserve naturelle sur la ville.
- Une étude similaire a déjà été réalisée sur le canton de Genève (Maryam Lotfian et al. 2019) , mais à notre connaissance, aucune étude scientifique n'a été menée sur les îlots de chaleur dans l'agglomération de Fribourg. Il convient toutefois de noter qu'une étude a été publiée sur la ville de Fribourg en avril 2023 (Ville de Fribourg 2021; NCCS 2023). Il serait donc intéressant de comparer cette étude à celle de Genève.
- Nous connaissons bien le territoire de l'agglomération de Fribourg et de ses environs. Cela facilite la mise en place de l'étude, la collecte des données et leur analyse.

Ce travail est fait en partenariat avec la Haute-Ecole d'Ingénierie et de Gestion du canton de Vaud (HEIG-VD). Il se découpe de la manière suivante :

- Tout d'abord, nous aborderons certains éléments de contexte, tels que l'évolution de la température en Suisse et à Fribourg, l'histoire des îlots de chaleur, ainsi que l'utilisation des images satellites, notamment celles des satellites Landsat 8 et 9.
- Ensuite, nous présenterons les objectifs de ce travail en exposant la problématique.
- Puis, nous nous attarderons sur les données utilisées et sur les différents éléments de méthodologie et de théorie.
- Nous procéderons ensuite à l'analyse des différents éléments produits pour répondre à notre question de recherche.
- Enfin, nous conclurons en répondant aux objectifs de ce travail.

## 2. Contexte et Théorie

### 2.1. Température de la Suisse et de Fribourg

Le changement climatique est une notion largement reconnue aujourd'hui et fait partie des différents rapports du GIEC. Ces changements climatiques entraînent une modification à long terme des modèles météorologiques et des températures (Nations United 2023).

En Suisse, selon les scénarios élaborés par la Confédération suisse, qui s'appuie sur les travaux du GIEC, les températures pourraient augmenter en moyenne jusqu'à 5,9°C d'ici la fin du siècle en cours. Elles ont déjà augmenté de 2°C par rapport à la période de référence 1981-2010. Cette augmentation des températures serait encore plus marquée en été, avec une hausse pouvant atteindre +7,2°C (Admin.ch 2023b). Les graphiques ci-dessous illustrent ces évolutions selon les différents scénarios RCP 2.6 et RCP 8.5 :

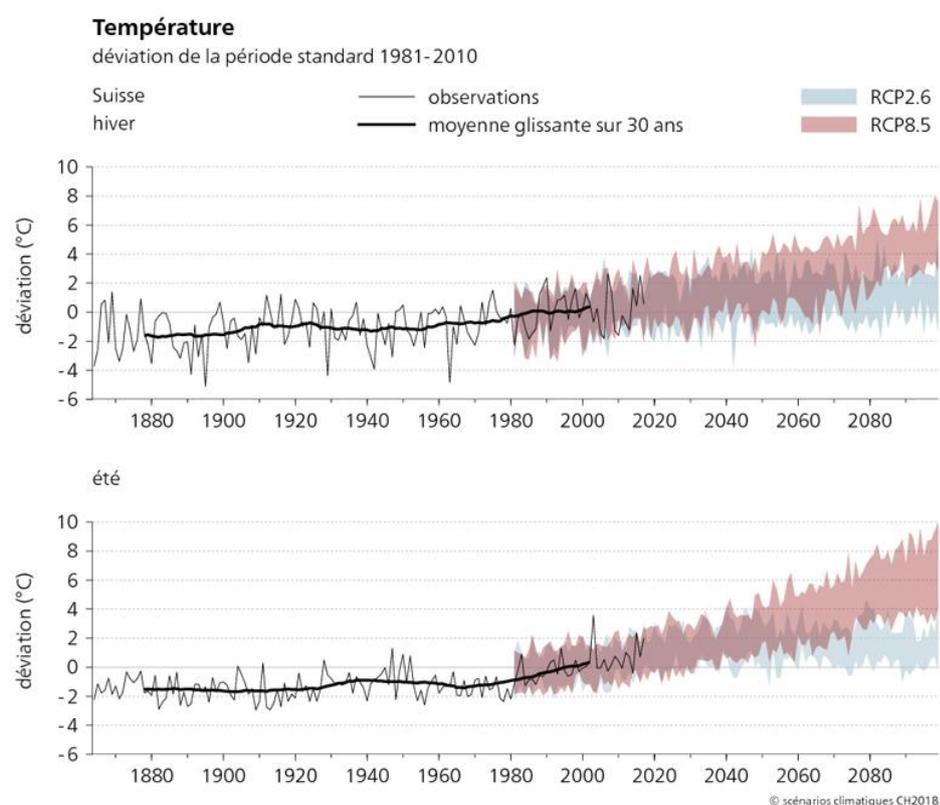
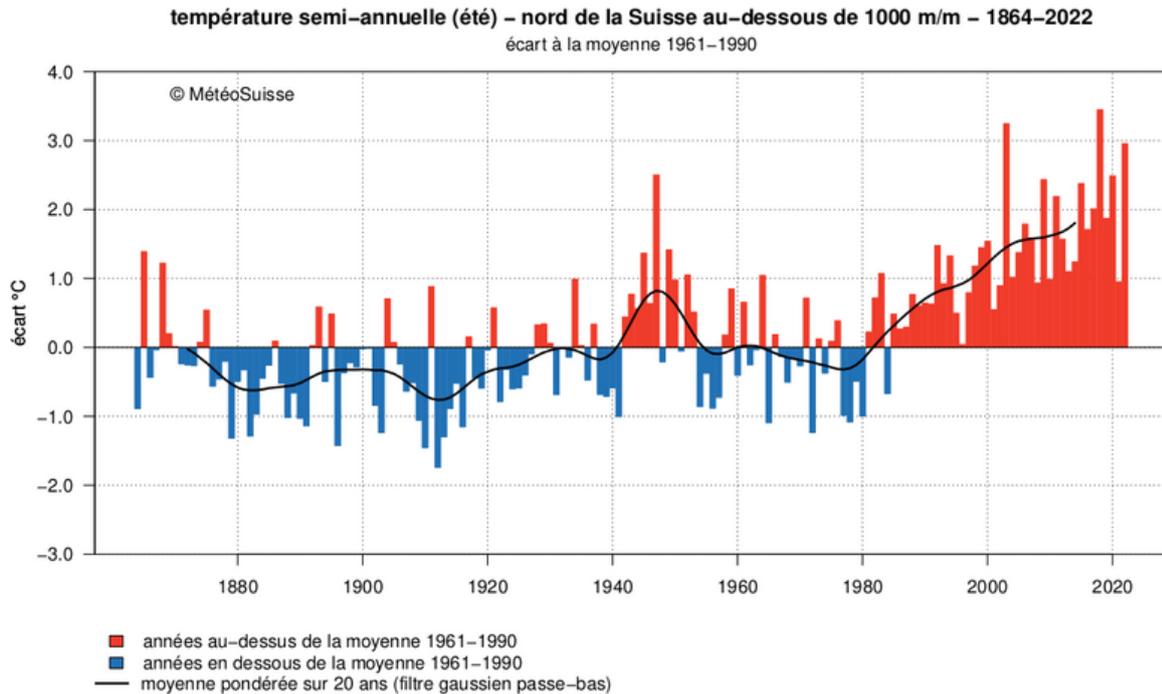


Figure 2 Scénarios de l'évolution des températures en Suisse en été et en hiver (Admin.ch 2023b)

Dans le canton de Fribourg, selon les mêmes scénarios que précédemment, les températures pourraient augmenter en moyenne jusqu'à 5,7°C d'ici la fin du siècle en cours. Elles ont déjà augmenté de 2°C, tout comme dans le reste de la Suisse, par rapport à la période de référence 1981-2010. Cette augmentation des températures pourrait être encore plus prononcée en été, avec une hausse pouvant atteindre +6,2°C (Admin.ch 2023a).

Le graphique suivant montre, par année, les écarts à la moyenne des températures par rapport à la période 1961-1990, sur les températures moyennes annuelles pendant le semestre d'été (avril, mai, juin, juillet, août et septembre). Ces données correspondent à la région nord de la Suisse, en dessous de 1000 mètres d'altitude. Nous pouvons observer qu'à partir de 1984, les écarts sont de plus en plus élevés et continuent d'augmenter :



homogvalLevel 5.0.1 / 16.10.2022, 04:05 CEST

Figure 3 Écarts à la moyenne des températures pour la période 1961-1990 sur les températures moyennes annuelles pendant le semestre d'été dans la région nord de la Suisse, en dessous de 1000 mètres d'altitude (MétéoSuisse 2023)

## 2.2. Îlots de chaleur

Les îlots de chaleur, ou îlots de chaleur urbains (ICU) se réfèrent à l'élévation des températures enregistrées sur un point précis dans les zones urbaines par rapport aux zones rurales ou forestières avoisinantes, et donc par rapport à la température moyenne de la région périphérique (îlot de chaleur urbain — Wikipédia 2023).

L'apparition des îlots de chaleur est due à une accumulation accrue de chaleur dans le tissu urbain, ce qui entraîne un réchauffement des villes pendant la journée et un refroidissement plus lent la nuit. Ceci est dû à des facteurs tels que les rues étroites des villes qui entravent la circulation de l'air, les sols imperméables qui retiennent la chaleur et la pollution humaine qui réduit le rayonnement thermique (Chaleur en milieu urbain - MétéoSuisse 2023).

Les causes de l'apparition des îlots de chaleur sont des activités humaines plus intenses et localisées, telles que les usines, les moteurs de véhicules et la climatisation, qui génèrent beaucoup de chaleur dans les rues avoisinantes, ainsi que les modifications des sols avec des surfaces plus sombres (asphalte, bâtiments vitrés, etc.) qui absorbent davantage de chaleur et réchauffent l'air, et enfin l'aménagement urbain qui réduit la circulation des vents (îlot de chaleur urbain — Wikipédia 2023).

Cependant, un autre facteur est à prendre en compte pour déterminer s'il s'agit d'îlot de chaleur. Il s'agit du ressenti des individus. En effet, il est possible de détecter un îlot de chaleur par les températures élevées, mais d'autres facteurs tels que le vent, l'humidité de l'air, l'exposition au rayonnement solaire et la sensibilité individuelle doivent également être étudiés (Rachel Thomson 2016).

Les îlots de chaleur posent des problèmes pour la santé humaine (par exemple, des troubles respiratoires et une diminution des fonctions pulmonaires), le confort (par exemple, une moins bonne récupération pendant la nuit) et l'environnement naturel (Rachel Thomson 2016). Avec l'augmentation des températures actuelles et futures qui sont prévues, les différentes conséquences des îlots de chaleur risquent de s'accroître fortement et d'autres pourraient apparaître. Nous pouvons citer notamment le taux de mortalité qui est plus important en ville chez les personnes âgées après de fortes chaleurs (NCCS 2023). Leur étude est donc importante. Il faut ainsi pouvoir les détecter pour pouvoir lutter contre eux.

Il existe ainsi différentes actions pour lutter contre les îlots de chaleur (Rachel Thomson 2016) :

- Améliorer la ventilation : Il s'agit de modifier l'espace urbain de manière à favoriser une meilleure circulation de l'air. Par exemple, une action possible est d'orienter les bâtiments dans le sens des vents dominants pour permettre une meilleure ventilation, ou encore abaisser la hauteur des bâtiments construits près des cours d'eau et des parcs, cette mesure peut également faciliter la circulation de l'air et amener des fraîcheurs.
- Réduire le stockage de chaleur : L'objectif est d'éviter que la chaleur ne s'accumule à certains endroits. Des mesures telles que la création d'ombre à l'aide d'arbres ou d'autres plantes peuvent contribuer à atténuer l'effet de chaleur. Il est également possible d'agir sur l'albédo, c'est-à-dire la capacité d'une surface à réfléchir la lumière du soleil, en utilisant des matériaux réfléchissants ou des revêtements de sol clairs.
- Augmenter les sources de fraîcheur : Cette approche vise à diffuser des températures plus basses dans l'air ambiant. Deux solutions couramment utilisées sont la végétalisation des espaces urbains et l'augmentation des sources d'eau. Planter des arbres et des plantes dans les espaces urbains permet de bénéficier de l'ombre et de l'évapotranspiration, ce qui contribue à rafraîchir l'environnement. L'ajout de fontaines, de plans d'eau ou d'autres éléments aquatiques peut également avoir un effet rafraîchissant.

Ces actions visent à réintroduire et à promouvoir quatre éléments qui sont souvent présents à la campagne mais qui ont été réduits, voire ont disparus, en milieu urbain : le vent, l'albédo, l'eau et la végétation. Il est important de noter que des actions et des études sont en cours pour mettre en œuvre ces mesures, et que ces éléments recommencent progressivement à prendre de l'importance dans les zones urbaines.

### 2.3. Image satellite, Landsat 8 OLI et Landsat 9 OLI

Une image satellite est une image prise par un satellite artificiel de la surface terrestre. Développés d'abord à des fins militaires, ces satellites et leurs images ont été mises à disposition à de fins civiles et notamment scientifiques.

Les images satellites sont des outils précieux pour l'analyse de la surface terrestre, notamment dans le domaine de la télédétection. Les satellites captent différentes images ou bandes spectrales qui sont prises selon la longueur d'onde de la lumière. Ainsi, ces bandes peuvent capter par exemple l'infrarouge, l'ultraviolet, le spectre visible (rouge, bleu, vert) ou encore les spectres thermiques. Les satellites prennent des photos de la terre avec une certaine résolution, pour une certaine orbite, pour une certaine portion de la terre à observer, à une certaine altitude et selon une certaine période de révolution (Images satellites/Introduction — Wikiversité 2023).

Le programme Landsat, lancé dans les années 1960, est le premier programme civil de télédétection. Il est géré par la NASA en collaboration avec l'USGS (l'Institut des études géologiques américaines) et le département de l'agriculture des États-Unis (Programme Landsat - Wikipédia 2023). Les satellites

Landsat 8 OLI (lancé en 2013) et Landsat 9 OLI (lancé en 2021) font partie de ce programme. Ils capturent des images de la surface terrestre avec une résolution de 15, 30 ou 100 mètres en fonction des bandes et possèdent deux bandes thermiques spécifiques (une avec une longueur d'onde de 10600 – 11190 nm et l'autre avec une longueur d'onde de 11500 – 12510 nm), ce qui les rend particulièrement utiles pour détecter les îlots de chaleur. Ils ont une périodicité de 16 jours, prennent des photos le matin à 10h00 et sont à 705 km d'altitude (Github 2023; Programme Landsat - Wikipédia 2023).

Cependant, il convient de noter que l'utilisation de satellites pour étudier les îlots de chaleur à l'échelle des villes peut présenter des limites en raison de l'altitude, de l'orbite, de la période de révolution et de la largeur de la zone observée par le satellite. Ces paramètres ne sont pas nécessairement optimaux pour une étude fine des îlots de chaleur urbains. Malgré cela, l'utilisation de satellites reste plus pratique que le déploiement de drones dans les zones urbaines (Nicolas 2012, 20–32).



Figure 4 Landsat 8 OLI et Landsat 9 OLI (Landsat 8 - Wikipédia 2023; Landsat 9 - Wikipédia 2023)

### 3. Problématique

Dans le contexte d'une augmentation inévitable des températures à venir, la lutte contre les îlots de chaleur urbains devient de plus en plus importante pour prévenir les conséquences néfastes qui en découlent. Avant de pouvoir agir contre ces îlots de chaleur, il est essentiel de pouvoir les détecter de manière précise et rapide.

À notre connaissance, il existe deux méthodes de détection des îlots de chaleur. La première consiste à utiliser les données des températures des stations météo, ce qui permet d'obtenir des résultats précis mais nécessite du temps. La deuxième méthode repose sur l'analyse d'images satellites et la télédétection. Nous postulons ainsi que grâce aux bandes spectrales thermiques des satellites Landsat 8 et 9, il est possible de télédétecter les îlots de chaleur. Bien que moins précise actuellement, cette méthode présente l'avantage d'être plus rapide.

Ainsi, cette recherche se concentrera sur la deuxième méthode. Il serait intéressant de non seulement détecter les îlots de chaleur, mais également de distinguer ceux sur lesquels il serait peu intéressant d'intervenir, ceux qui nécessiteraient une action prioritaire et les zones où les températures élevées, bien que ne constituant pas des îlots de chaleur, sont perçues comme problématiques par les utilisateurs du territoire et nécessitent également une intervention. Nous avons ainsi posé la question suivante :

**« Comment la télédétection peut-elle être utilisée pour détecter les îlots de chaleur et les zones de fortes chaleurs où l'action est nécessaire ? »**

L'objectif de cette étude est de développer une technique utilisant des données satellites pour mesurer la température de la surface terrestre et détecter les îlots de chaleur ainsi que les zones où une intervention est nécessaire en raison de fortes chaleurs.

Il existe déjà différentes techniques développées pour la télédétection des îlots de chaleur, notamment celle de la « Locale Climate Zone (LCZ) ». Cette dernière se base sur la détection du type d'environnement urbain et naturel pour déduire l'emplacement des îlots de chaleur. Ce travail se concentrera sur l'exploration de différentes techniques de télédétection et proposera une nouvelle approche spécifique à la détection des îlots de chaleur. Une comparaison entre cette nouvelle approche et les différentes techniques permettra d'évaluer l'intérêt de la technique développée dans ce travail.

## 4. Données, Méthodologie et Théorie

Ce chapitre présente les données utilisées, la méthodologie entreprise pour répondre à la problématique et la théorie qui l'accompagne. Tout d'abord, nous présenterons les données. Ensuite, nous exposerons les étapes pour créer la nouvelle méthode. Puis, nous nous attarderons sur les techniques de détection des îlots de chaleur déjà existantes. Nous finirons par la présentation de l'enquête en ligne.

### 4.1. Données

Les principales données utilisées proviennent des satellites Landsat 8 OLI et Landsat 9 OLI de la NASA. Ils possèdent tous les deux les bandes spectrales (abrégiées par la lettre « B ») suivantes :

DESCRIPTION	STANDARD	LONGUEUR D'ONDE (NM)	NUMÉRO DE LA BANDE
<b>AÉROSOLS</b>	A	400 - 455	B1
<b>BLEU</b>	B	450 - 530	B2
<b>VERT</b>	G	510 - 600	B3
<b>ROUGE</b>	R	620 - 690	B4
<b>PROCHE INFRAROUGE (NIR)</b>	N	760 - 900	B5
<b>VAGUE COURTE INFRAROUGE 1 (SWIR 1)</b>	S1	1550 - 1750	B6
<b>VAGUE COURTE INFRAROUGE 2 (SWIR 2)</b>	S2	2080 - 2350	B7
<b>THERMIQUE 1</b>	T1	10600 - 11190	B10
<b>THERMIQUE 2</b>	T2	11500 - 12510	B11

Figure 5 Description des bandes spectrales des satellites Landsat 8 OLI et Landsat 9 OLI

Il s'agit des bandes spectrales des satellites suivants :

- Landsat 8 : bandes spectrales du 14 juillet 2013
- Landsat 8 : bandes spectrales du 22 août 2018
- Landsat 9 : bandes spectrales du 16 juillet 2022

L'année 2013 correspond à l'année la plus froide (figure 3) depuis que les satellites Landsat 8 ou 9 prennent des photos. L'année 2018 correspond à l'année la plus chaude et 2022 à l'année où l'été est le plus proche de la date où ce dossier est écrit. Comme chaque technique n'utilise pas les mêmes données, il a fallu choisir des dates où les données existaient à chaque fois.

Ce travail s'intéresse à l'agglomération de Fribourg et au lac de Schiffenen. Le périmètre d'étude couvre ainsi un rectangle visible sur la figure 1.

Pour créer les cartes selon la classification de la Locale Climate Zone (chapitre 4.3.1) ainsi que pour la carte de la classification développée dans ce travail (chapitre 5.3), nous avons exploité les données satellites décrites ci-dessus.

Nous avons également utilisé d'autres données dans ce travail. Pour calculer le LST (Land Surface Temperature (chapitre 4.3.3)), il s'agit de données accessibles sur Google Earth Engine qui utilise les données Landsat.

Pour le calcul de GeoClimate (chapitres 4.3.2), les données sont tirées de OpenStreetMap au moment où le logiciel est lancé, soit le 20 octobre 2022 (Er mida et al. 2020; Github 2023; LandsatLook 2023; EarthExplorer 2023).

## 4.2. Les étapes pour la création d'une nouvelle technique

À partir des cartes générées par les différentes techniques de classification et des résultats de l'enquête, qui sont présentés dans les chapitres suivants, il est possible de déduire l'emplacement des îlots de chaleur urbains et des zones où des actions sont nécessaires pour atténuer les effets de la chaleur.

Voici les différentes étapes qui permettent de créer une nouvelle technique de classification, qui se concentre spécifiquement sur les îlots de chaleur urbains et qui répond à l'objectif final de l'étude :

1. Utilisation des différentes techniques de classification existantes : À l'aide des données et des différentes techniques, générer des cartes des emplacements des îlots de chaleur sur le territoire.
2. Analyse des résultats : Examiner les cartes générées par les techniques de classification existantes (LCZ, GeoClimate et LST) et identifier les îlots de chaleur urbains.
3. Comparaison des différentes cartes : Comparer les données des différentes techniques de classification pour identifier les zones des îlots de chaleur qui se chevauchent.
4. Mise en place d'une enquête en ligne : Comparer avec les résultats obtenus précédemment les résultats de l'enquête qui prend en compte le ressenti des utilisateurs.
5. Analyse des facteurs contribuant aux îlots de chaleur urbains : Examiner les caractéristiques physiques et urbaines des zones identifiées comme des îlots de chaleur urbains et les zones de fortes chaleurs ressenties par les utilisateurs du territoire, telles que la densité de construction, la hauteur des bâtiments, la couverture végétale, la présence d'espaces verts, etc. Ceci permet de déterminer les facteurs qui contribuent le plus à la formation des îlots de chaleur.
6. Définition de nouveaux critères : En se basant sur les résultats de l'analyse des facteurs, définir de nouveaux critères spécifiques pour la classification des îlots de chaleur urbains. Ces critères peuvent inclure des seuils spécifiques de densité de construction, de hauteur des bâtiments, de couverture végétale, etc.
7. Test de la nouvelle technique : Utiliser les critères définis pour classer l'ensemble de la zone d'étude en identifiant les îlots de chaleur urbains, des zones de fortes chaleurs et en les distinguant des autres zones.
8. Validation et ajustements : Valider les résultats de la nouvelle technique en les comparant avec les données des techniques de classification existantes et les résultats de l'enquête.

La création de cette nouvelle technique de classification axée sur les îlots de chaleur urbains permet de mieux cibler les actions et les interventions pour atténuer les effets de la chaleur dans les zones les

plus affectées. Cela peut contribuer à l'élaboration de stratégies urbaines et de politiques de planification plus efficaces en matière d'aménagement urbain, de conception de bâtiments et de gestion des espaces verts pour réduire l'impact des îlots de chaleur urbains et améliorer le confort thermique des habitants.

### 4.3. Les techniques de classifications existantes

Différentes techniques existantes permettent de classifier les images satellites. Nous allons, dans ce travail, en utiliser 3 : Locale Climate Zone (LCZ), GeoClimate et Land Surface Temperature (LST).

#### 4.3.1. Locale Climate Zone (LCZ)

Cette technique développée par I. D. Stewart et T. R. Oke en 2012 catégorise la couverture terrestre en 17 classes différentes qui structurent l'image en fonction de différentes caractéristiques dont le bâti et le non-bâti (Stewart and Oke 2012) :

Built types	Definition	Land cover types	Definition
<p>1. Compact high-rise</p> 	Dense mix of tall buildings to tens of stories. Few or no trees. Land cover mostly paved. Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	A. Dense trees	Heavily wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
<p>2. Compact midrise</p> 	Dense mix of midrise buildings (3–9 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	B. Scattered trees	Lightly wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
<p>3. Compact low-rise</p> 	Dense mix of low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	C. Bush, scrub	Open arrangement of bushes, shrubs, and short, woody trees. Land cover mostly pervious (bare soil or sand). Zone function is natural scrubland or agriculture.
<p>4. Open high-rise</p> 	Open arrangement of tall buildings to tens of stories. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	D. Low plants	Featureless landscape of grass or herbaceous plants/crops. Few or no trees. Zone function is natural grassland, agriculture, or urban park.
<p>5. Open midrise</p> 	Open arrangement of midrise buildings (3–9 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	E. Bare rock or paved	Featureless landscape of rock or paved cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert (rock) or urban transportation.
<p>6. Open low-rise</p> 	Open arrangement of low-rise buildings (1–3 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Wood, brick, stone, tile, and concrete construction materials.	F. Bare soil or sand	Featureless landscape of soil or sand cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert or agriculture.
<p>7. Lightweight low-rise</p> 	Dense mix of single-story buildings. Few or no trees. Land cover mostly hard-packed. Lightweight construction materials (e.g., wood, thatch, corrugated metal).	G. Water	Large, open water bodies such as seas and lakes, or small bodies such as rivers, reservoirs, and lagoons.
<p>8. Large low-rise</p> 	Open arrangement of large low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Steel, concrete, metal, and stone construction materials.	<b>VARIABLE LAND COVER PROPERTIES</b>	
<p>9. Sparsely built</p> 	Sparse arrangement of small or medium-sized buildings in a natural setting. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees).	b. bare trees	Leafless deciduous trees (e.g., winter). Increased sky view factor. Reduced albedo.
<p>10. Heavy industry</p> 	Low-rise and midrise industrial structures (towers, tanks, stacks). Few or no trees. Land cover mostly paved or hard-packed. Metal, steel, and concrete construction materials.	s. snow cover	Snow cover >10 cm in depth. Low admittance. High albedo.
		d. dry ground	Parched soil. Low admittance. Large Bowen ratio. Increased albedo.
		w. wet ground	Waterlogged soil. High admittance. Small Bowen ratio. Reduced albedo.

Figure 6 Classes de la Locale Climate Zone (LCZ) (Stewart and Oke 2012)

Avec l'aide, du script de Maryam Lotfian, qui utilise la méthode de classification « Random Forest Classifier » et avec l'aide des bandes des satellites Landsat 8 et 9, nous avons pu classer la surface de l'agglomération de Fribourg et du lac de Schiffenen selon la technique LCZ. Nous pouvons tirer les observations suivantes : Les classes ayant les bâtiments les plus hauts et les plus serrés, ainsi que les

industries seraient celles qui auraient potentiellement le plus de chances d’avoir des îlots de chaleur urbain (Maryam Lotfian et al. 2019).

#### 4.3.2. GeoClimate

Geoclimate est un logiciel (Geoclimate 2023) qui produit des indicateurs géographiques se basant sur la technique LCZ pour caractériser les spécificités d’un territoire donné. Il se base sur OpenStreetMap et sur la hauteur des bâtiments. Ainsi, les zones avec les bâtiments les plus élevés correspondraient aux zones où sont situés le plus probablement les îlots de chaleur urbains. La classification utilisée dans ce travail pour GeoClimate est la suivante (Bocher et al. 2021) :

<b>ZONE CLIMATIQUE LOCALE</b>	<b>TYPE DE BÂTIMENTS</b>
Ensemble de tours compactes	Bâtiment d’activité
Ensemble d’immeubles compacts	Bâtiment de grande hauteur
Ensemble de maisons compactes	Immeuble continu sur îlot fermé
Ensemble de tours espacées	Immeuble continu sur îlot ouvert
Ensemble d’immeubles espacés	Immeuble discontinu
Ensemble de maisons espacées	Local
Construction légère	Pavillon continu sur îlot fermé
Grandes emprises tertiaires bâties bas	Pavillon continu sur îlot ouvert
Maisons éparses, construction isolée	Pavillon discontinu
Industrie lourde	Pavillon semi-continu
Dense trees	Inconnu
Arbres épars	
Buissons, broussaille	
Pelouses, prairies, cultures	
Roche nue, pavés, macadam	
Terrain nu ou sable	
Eau	
Inconnu	

Figure 7 Classes utilisées dans GeoClimate

#### 4.3.3. Land Surface Temperature LST

La Land Surface Temperature (LST) sert à identifier les températures du sol et ainsi à détecter les potentiels îlots de chaleur. La LST a été calculé, dans ce travail, grâce à un code sur Google Earth Engine qui utilise les images satellites Landsat (Ermida et al. 2020).

Une carte de la température de l’air à deux mètres permettrait de détecter les îlots de chaleur de manière plus précise, mais la réalisation serait trop compliquée et trop longue à produire dans le cadre de ce travail. Il serait possible d’estimer la température de l’air à deux mètres à partir des mesures de la LST, mais comme la différence de température change beaucoup en fonction des types de surfaces, de la saison et de l’heure (voir dans les annexes), nous choisissons les mesures de la LST, ce qui est suffisant pour ce travail.

#### 4.4. Enquête en ligne

Pour compléter les différentes techniques de détection des îlots de chaleur vues précédemment et pour connaître le ressenti des utilisateurs de la région de Fribourg, nous avons entrepris une enquête en ligne avec le logiciel ArcGIS Survey123. Comme vous pouvez le voir sur le tableau ci-dessous, les personnes interrogées ont d'abord été invitées à situer les lieux où il fait le plus chaud selon elles. Ensuite, elles ont indiqué les raisons de ce choix :

QUESTIONS	TYPE	DE COMMENTAIRES
QUESTIONS	QUESTIONS	QUESTIONS
Quel est le lieu, dans l'agglomération fribourgeoise (Fribourg et les communes à proximité), où il fait le plus chaud selon vous ?	geopoint	Premier lieu d'îlot de chaleur Les questions se répètent trois fois. Le répondant voyait une carte du monde (orthophoto ou plan) centré sur le lieu d'étude.
Quelle(s) est/sont la/les raison(s) du choix de ce lieu ? (plusieurs réponses possibles) (1)	select_multiple raisons	Réponses possibles : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Expérience personnelle</li> <li>• Déduction : par exemple lieux bétonnés, arbre ni ombre</li> <li>• Lecture dans la presse ou dans des scientifiques</li> <li>• Autres</li> </ul>
Autres, précisions (1) :	text	Si « autres » a été sélectionné à la question précédente
Remarques	text	Pour ajouter d'autres remarques

Figure 8 Liste de questions de l'enquête en ligne

## 5. Analyse

### 5.1. Analyse historique

Pour commencer notre analyse, nous nous sommes intéressés à une analyse historique de l'évolution des températures de la zone d'étude. Comme mentionné dans le chapitre « 4.1 Données », nous avons sélectionné 3 années : 2013, 2018 et 2022 (figures 9 et 10).

La figure 9 présente la LCZ (Locale Climate Zone) sur ces différentes années. Nous constatons principalement une augmentation des classes « Compact Midrise », « Open Midrise », « Lightweight Lowrise » et « Industry », notamment du côté de l'agglomération de Fribourg. Ceci confirme l'évolution de Fribourg et de son agglomération qui est l'une des plus actives du canton (NCCS 2023). Les forêts et l'eau sont quant à eux plus ou moins similaires entre les différentes années. Il existe également quelques imprécisions qui faussent légèrement l'analyse. Nous pouvons citer par exemple le coin supérieur gauche de la carte de 2018.

### Cartes de la LCZ de l'agglomération de Fribourg et du lac de Schiffenen sur trois années.

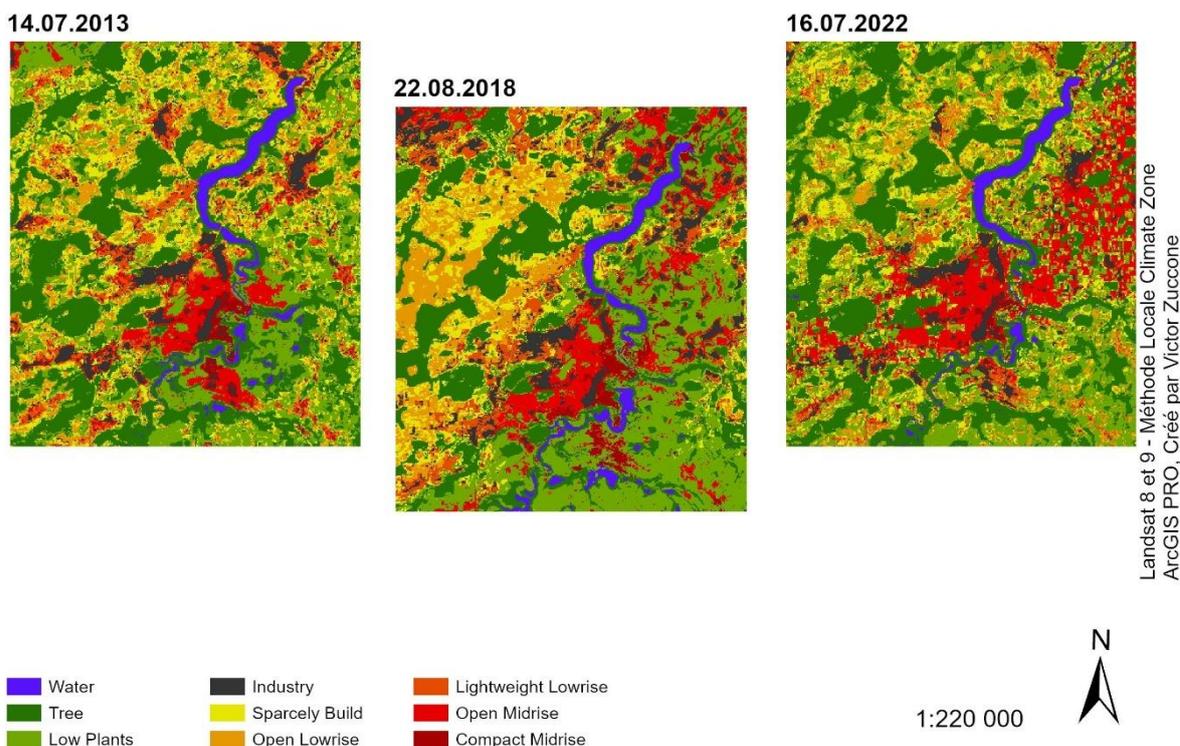


Figure 9 LCZ sur les années 2013, 2018 et 2022

La seconde figure, la figure 10, montre quant à elle, l'évolution des températures du sol entre les années 2013, 2018 et 2022. Pour rappel, ces années avaient été sélectionnées en fonction de leurs températures : l'année 2013 étant la plus froide captée par les satellites Landsat 8 et 9, 2018 la plus chaude et 2022 la plus actuelle. En les comparant, nous constatons que l'année 2013 est bien la plus froide et la 2018 la plus chaude, les zones de fraîcheurs, les cours d'eau, le lac de Schiffenen et les forêts sont effectivement les zones les plus froides sur les différentes cartes. Les lieux où l'étalement urbain existe sont les zones les plus chaudes, et, pour finir, l'année 2022 a des températures similaires à l'année 2018.

## Cartes de la LST dans l'agglomération de Fribourg et sur le lac de Schiffenen sur trois années

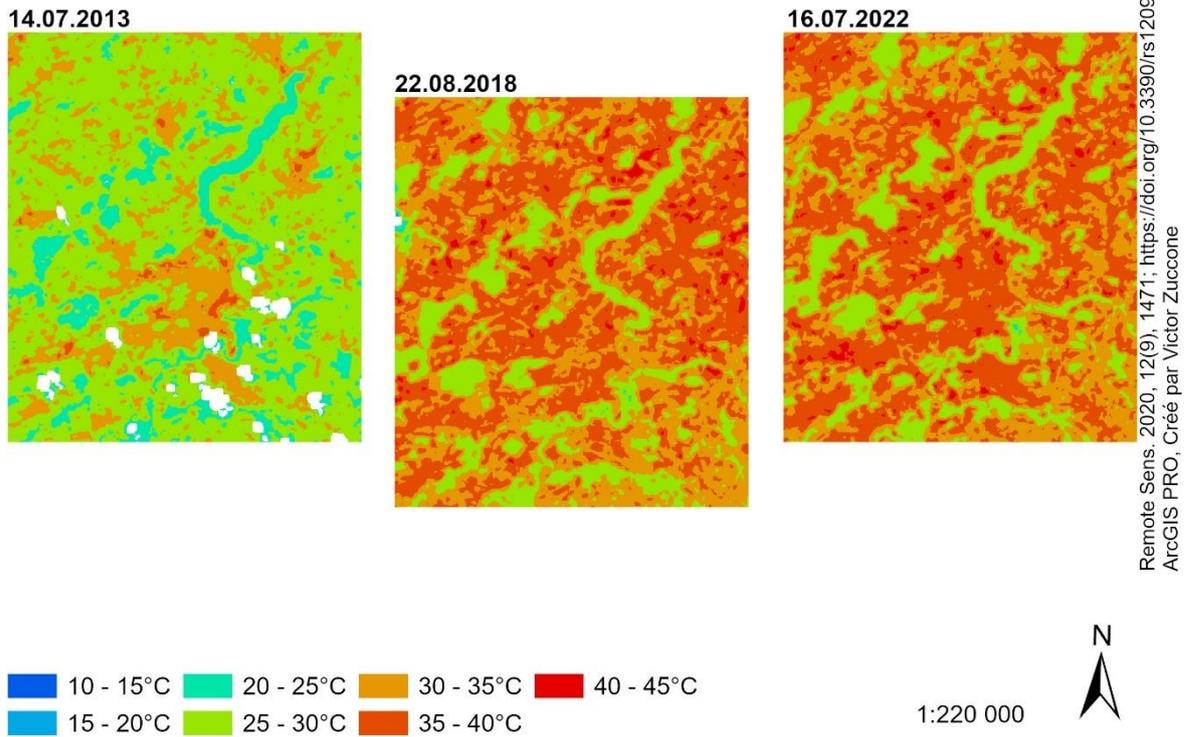


Figure 10 LST sur les années 2013, 2018 et 2022

En comparant maintenant les cartes de la LCZ et de la LST (figures 9 et 10), nous pouvons observer que les zones où les températures sont les plus élevées, selon la LST, correspondent aux classes « Compact Midrise », « Open Midrise », « Lightweight Lowrise » et « Industry » de la LCZ. Les zones fraîches où les températures sont donc les plus froides se calquent assez bien sur les classes « Tree » et « Water ».

## 5.2. Analyse pour l'année 2022

Maintenant que nous avons fait une comparaison entre ces trois années, nous allons, dans ce chapitre, nous attarder plus spécifiquement sur l'année 2022. Nous analyserons et comparerons ainsi la carte de la LCZ, la carte de la LST, la carte produite à partir de GeoClimate et la carte produite avec l'enquête en ligne. Remarque : Les deux dernières cartes (GeoClimate et enquête en ligne) ne pouvaient être produites que pour l'année 2022.

### 5.2.1. L'analyse carte par carte

La carte représentant la Locale Climate Zone (LCZ) de l'année 2022 (figure 11) fait bien ressortir l'agglomération de Fribourg du reste du territoire fribourgeois ainsi que le lac de Schiffenen et la Sarine. Notons également quelques erreurs du logiciel sur la carte, par exemple la partie Est autour de Düdingen. Cette carte a été créée manuellement avec un script de Maryam Lotfian, l'image composée de toutes les bandes satellites et un fichier d'entraînement visible en annexe.

Carte de la classification des zones climatiques de l'agglomération de Fribourg le 16.07.2022

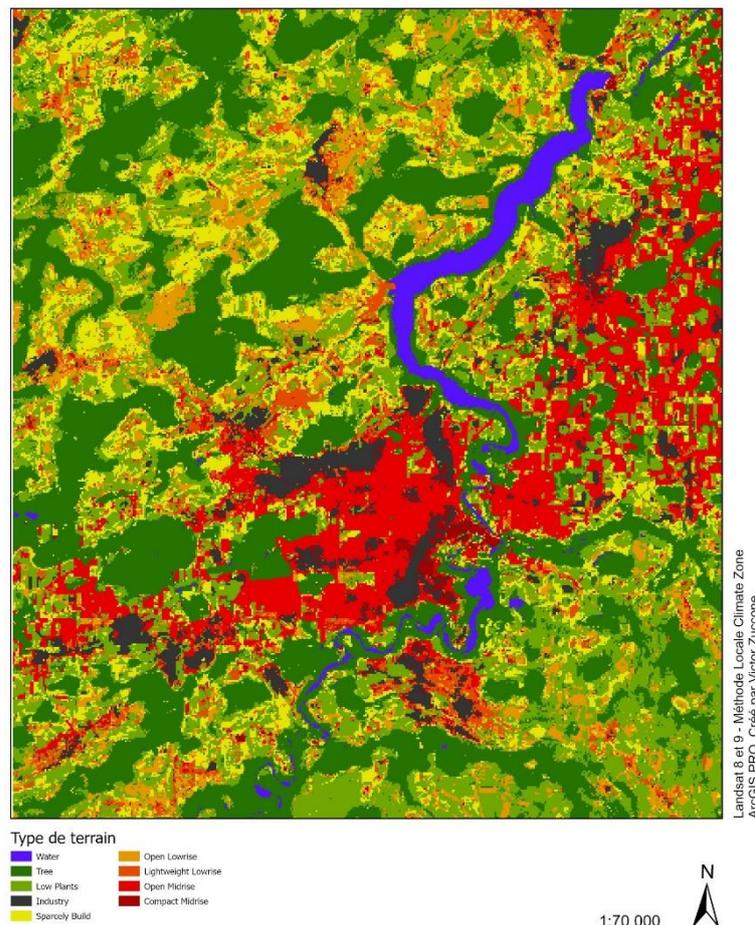


Figure 11 LCZ de l'année 2022 (voir annexe pour la taille réelle)

Nous trouvons sur la figure 12 le résultat produit avec le logiciel GeoClimate. Cette carte reprend les différentes classes de la LCZ, mais en se basant sur la hauteur des bâtiments inscrits dans OpenStreetMap. La carte de GeoClimate a beaucoup de ressemblance avec celle de la LCZ. Par contre, les zones de bâtiments les plus élevés et compacts se situent essentiellement sur Fribourg. Elles se trouvent sur le Boulevard de Pérolles et s'étendent jusqu'à la vieille ville en passant par la gare. La zone industrielle du nord que nous voyons bien sur la carte de la LCZ est moins visible sur la carte de GeoClimate.

Carte de la classification des zones climatiques selon la hauteur des bâtiments de l'agglomération de Fribourg 2022

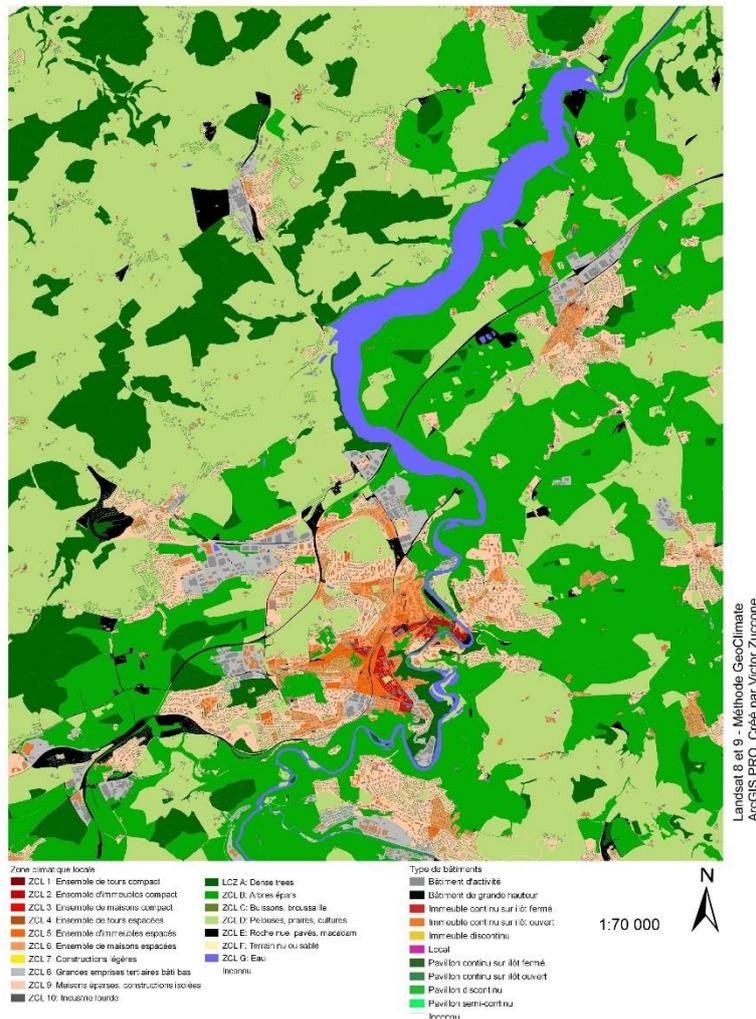


Figure 12 LCZ sur l'année 2022 selon GeoClimate (voir annexe pour la taille réelle)

## Localisation des îlots de chaleur

Sur la carte de la LST (figure 13), les zones froides sont celles des forêts, des cours d'eau et du lac, et les chaudes celles des zones bâties comme vues précédemment dans l'analyse historique. La température du sol est d'ailleurs très similaire entre les forêts, les cours d'eau et le lac. Les zones les plus chaudes sont relativement bien réparties sur tout le territoire étudié avec une concentration plus importante sur celui de l'agglomération de Fribourg. Nous remarquons aussi que les zones de champs de la campagne fribourgeoise ne sont pas beaucoup plus froides que celle des zones bâties.

Températures du sol dans l'agglomération de Fribourg le 16.07.2022

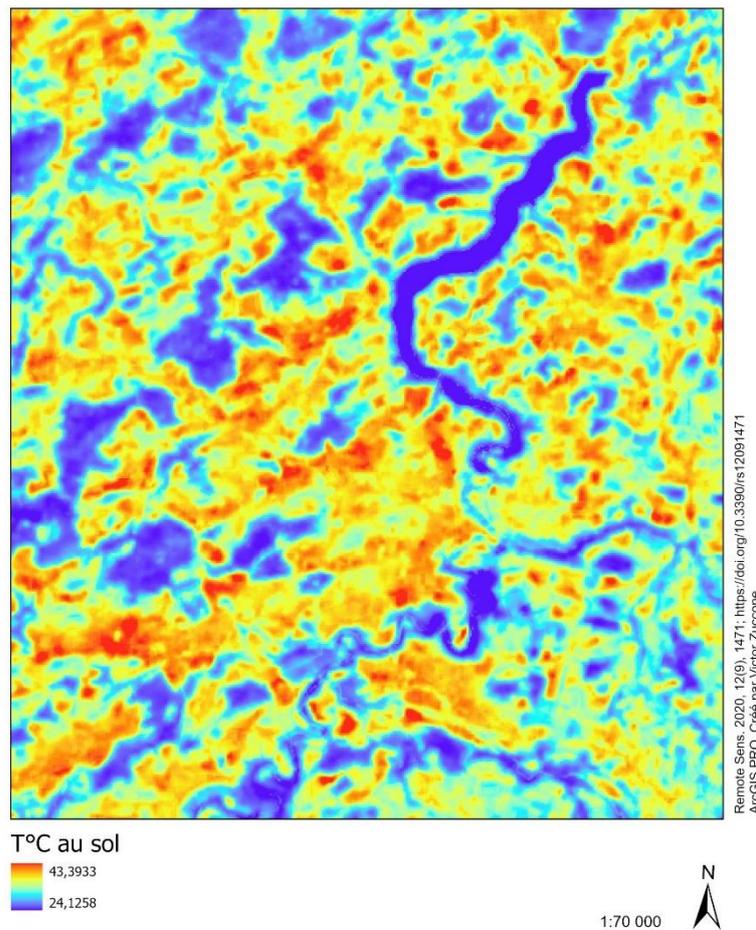


Figure 13 LST sur l'année 2022 (voir annexe pour la taille réelle)

### 5.2.2. L'analyse comparative

En comparant ces différentes cartes (figures 11, 12 et 13), nous remarquons trois faits intéressants :

- Geoclimate/LCZ : Les cartes sont très similaires. Probablement, car elles utilisent les mêmes classes. Il y a cependant quelques différences, dont la zone industrielle du nord de l'agglomération de Fribourg qui apparaît plus distinctement sur la carte de la LCZ.
- LCZ/LST : Les zones chaudes de la LST correspondent bien aux classes « Compact Midrise », « Open Midrise », « Lightweight Lowrise » et « Industry » de la LCZ et les zones froides de la LST se superposent avec les classes « Tree » et « Water » de la LCZ.
- GeoClimate/LST : Il existe, comme dans la comparaison LCZ/LST, une bonne superposition entre les zones chaudes et les bâtiments élevés, et les zones froides et l'eau et les arbres. Cependant, la carte de la LCZ se superpose mieux avec la carte de la LST qu'avec celle de GeoClimate.

Nous utiliserons donc, dans les prochaines étapes du travail, la technique de la LCZ. La technique de la LST ne permet pas de faire ressortir les îlots de chaleur urbains comme une carte des températures de l'air à deux mètres. Il y a peu de différence de températures entre les champs et les zones bâties. La carte de GeoClimate semble moins précise que la technique de la LCZ.

### 5.2.3. L'enquête en ligne

Il nous manque encore une information à prendre en compte dans cette analyse. Nous avons vu que la carte de la LCZ et donc la télédétection permet de dire où se situent les zones froides et chaudes et donc les îlots de chaleur et de fraîcheur.

Cependant, cela ne signifie pas nécessairement qu'il s'agit des zones où il faudrait agir pour diminuer les températures. En effet, le ressenti des utilisateurs du territoire est très important, il faut en tenir compte. Des zones d'îlots de chaleur très peu fréquentés par les usagers ne demandent pas ou peu d'intervention et à l'inverse des zones notées plus fraîches et très fréquentées, peuvent être ressenties comme trop chaudes et donc demandent une intervention de réduction des températures.

Nous avons ainsi pu produire les cartes des figures 16 et 17. La première carte représente le résultat de l'enquête sur la carte de la LCZ et l'autre sur une orthophoto. Ces cartes nous confirment ainsi les idées citées auparavant. Nous voyons, par exemple, que ces zones inaccessibles et donc non citées dans l'enquête sont les voies de chemin de fer, proches de la gare de Fribourg. Pour les zones relevées par le résultat de la LST comme plus fraîches, et qui ne nécessiteraient pas d'intervention, sont ressenties comme trop chaudes par les usagers, un aménagement serait nécessaire, par exemple, dans les parcs avec peu d'arbres comme le parc des Grands Places.

Il est à noter que l'enquête a eu un problème majeur : les questions sur la localisation d'un 2<sup>ème</sup> et d'un 3<sup>ème</sup> lieu n'ont pas été enregistrées, ceci est dû à un défaut lors de la conception du questionnaire. Malgré ce manquement, il a été enregistré tout de même suffisamment de lieux, 25 au total.

Avec les graphiques suivants (figures 14 et 15), nous voyons que les réponses sont principalement dues à des expériences personnelles et des déductions. Il est également à noter que sur les cartes des résultats de l'enquête (figures 16 et 17), il n'y a pas eu des lieux pointés par déduction se situant sur des lieux inaccessibles.

## Localisation des îlots de chaleur

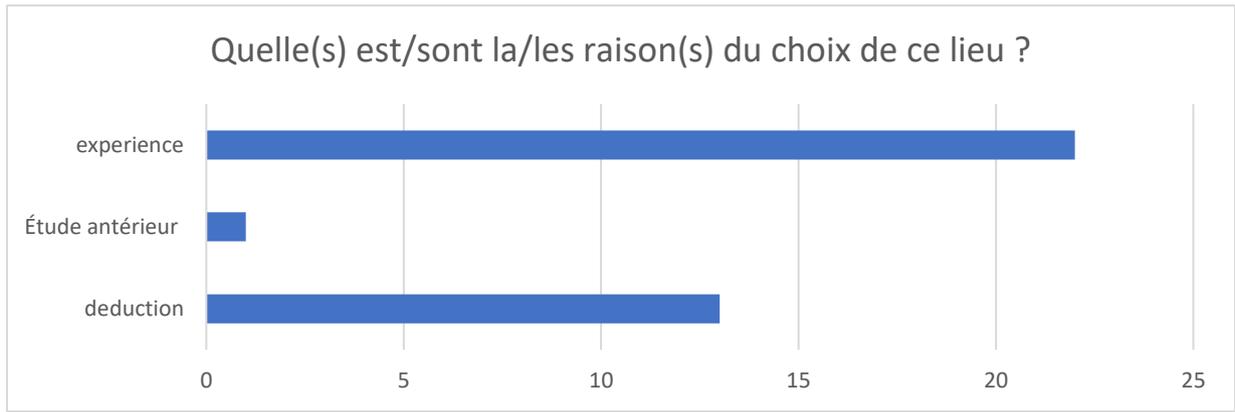


Figure 14 Graphique : Quelle(s) est/sont la/les raison(s) du choix de ce lieu ? - une réponse

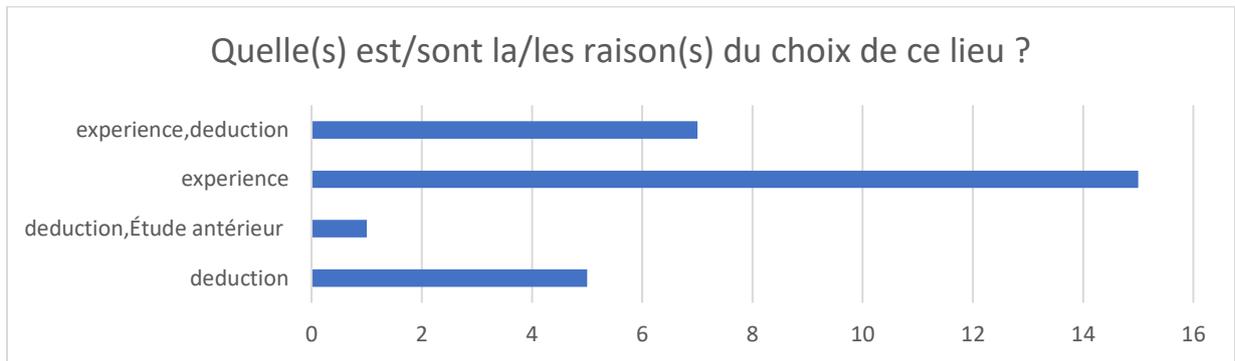
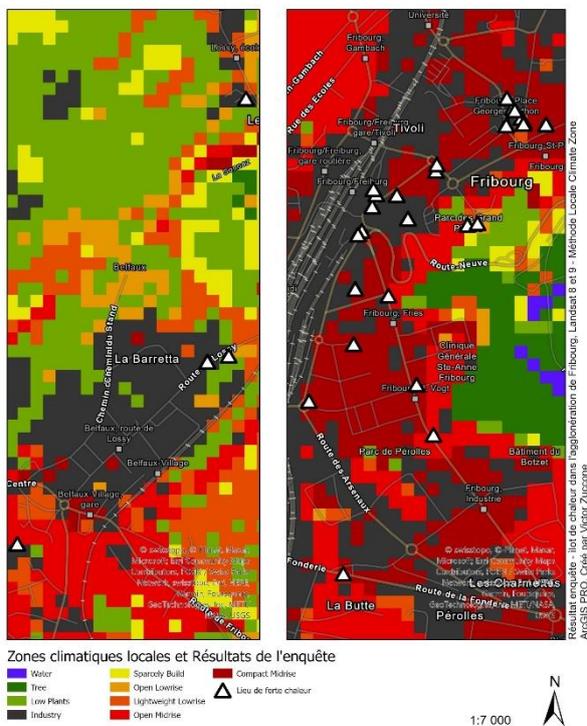


Figure 15 Graphique : Quelle(s) est/sont la/les raison(s) du choix de ce lieu ? - plusieurs réponses

Carte : Résultat de l'enquête en ligne sur les îlot de chaleur dans l'agglomération de Fribourg avec les zones climatiques locales



Carte : Résultat de l'enquête en ligne sur les îlot de chaleur dans l'agglomération de Fribourg



Figure 17 Résultat de l'enquête en ligne avec la carte de la LCZ Figure 16 Résultats de l'enquête avec orthophoto (voir annexe pour la taille réelle)

#### 5.2.4. Synthèse

Avec toutes ces informations, il y a plusieurs points à retenir :

- La télédétection des îlots de chaleur est possible et est suffisamment précise comme le prouve le test avec la technique de la LCZ.
- Une variante de la LCZ avec des classes différentes qui s'intéresse aux îlots de chaleur spécifiquement est à créer.
- Pour connaître les lieux où il faudrait agir en priorité pour enlever les conséquences néfastes des îlots de chaleur, la température ne suffit pas. Il faut prendre en compte également les ressentis sur place des utilisateurs du territoire. Il faut faire la différence entre les zones chaudes où il faut agir et celles où il n'est pas intéressant d'agir, et les zones plus fraîches où il faudrait agir et celles ne demandant pas d'intervention.
- Le script de Maryam Lotfian a bien fonctionné pour la création de la carte de la LCZ. Il peut donc être utilisé pour la création de la nouvelle technique pour détecter les îlots de chaleur.
- GeoClimate sera mis de côté, car il est moins utile que le script de Maryam Lotfian
- Nous devons tenir compte d'un dernier point qui n'a pas été discuté précédemment. Les facteurs qui accentuent et diminuent les îlots de chaleur, à savoir le vent, l'albédo, l'eau et la végétation, trois des facteurs sont facilement visibles depuis une image satellite : l'albédo avec la couleur des surfaces, l'eau et la végétation. Le dernier, le vent, est « invisible » aux yeux des images satellites. Comment prendre en compte le vent dans cette nouvelle méthode ? Pour notre étude nous allons ignorer ce facteur, car d'une part, pour que le vent ait un impact important sur la température, il faudrait qu'il soit constant et relativement important (Rachel Thomson 2016). Par exemple, il a un bon impact dans le désert de Gobi qui présente relativement peu d'obstacle. Et d'autre part, il est le facteur qui rafraîchit le moins, l'eau étant celui qui a le plus grand impact de refroidissement.

### 5.3. La nouvelle technique de classification

En prenant en compte les informations vues précédemment. Nous pouvons créer une nouvelle classification avec 4 classes :

1. Îlots de chaleur sans intervention nécessaire
2. Îlots de chaleur avec intervention nécessaire
3. Zones avec intervention nécessaire
4. Zones sans intervention nécessaire

Cependant, comme les programmes pour classer une zone se basent sur une image, il faut communiquer au programme quel type de terrain naturel et bâti correspond à telle classe. Nous nous sommes ainsi basés sur les classes de la classification de la LCZ et avons réparti chaque classe de la LCZ dans chaque nouvelle classe. Nous avons ainsi créé cette nouvelle classification :

1. *Îlots de chaleur non accessible, sans intervention nécessaire*
  - 1.1. *Toit de bâtiment (Usine, habitation...) et zone d'usine*
  - 1.2. *Zone non accessible, car dédiée à d'autres mobilités que la mobilité active (Rail, autoroute et piste d'avion)*
  - 1.3. *Zone particulière non accessible aux publics (caserne militaire, zone gouvernementale, ...)*
2. *Îlots de chaleur accessible, intervention recommandée*
  - 2.1. *Lieu d'activités humaines (Route, chemin, place, ...)*
  - 2.2. *Lieu d'habitation, de travail et de loisir (entre ces bâtiments)*
3. *Zone non considérée comme un îlot de chaleur selon la définition, mais qui nécessiterait une intervention dû au ressenti de la température*
  - 3.1. *Étendues d'herbe, de goudron, de pierres ou de sable avec un manque de végétation (et principalement les arbres), d'eau, de vent et d'albédo et donc proche des bâtiments et des activités humaines*
4. *Zone non considérée comme un îlot de chaleur selon la définition et où l'action n'est pas nécessaire*
  - 4.1. *Champs*
  - 4.2. *Forêt*
  - 4.3. *Eau*
  - 4.4. *Étendu d'herbe, de pierre ou de sable avec de la végétation (et principalement les arbres), de l'eau, du vent et de l'albédo et donc éloignés des bâtiments et des activités humaines*

Nous avons ensuite testé cette nouvelle classification avec le logiciel ArcGIS PRO, selon différentes méthodes de classification qui sont : « Random Trees », « Maximum Likelihood » et « Support Vector Machine » et avec différentes images composites. Nous avons choisi trois images composites (voir les annexes) : une première composée par les bandes 11, 10 et 7, une avec les bandes 4, 3 et 2, et la dernière avec les bandes 10, 4 et 5.

Pour la première image composite, nous l'avons choisie, car, après plusieurs tests, c'est celle qui semblait la plus pertinente visuellement. Elle prenait notamment les 2 bandes thermiques du satellite Landsat 9. Pour la seconde, il était intéressant de pouvoir faire une comparaison avec une image sans bande thermique et avec juste les bandes du visible. Pour la troisième, il s'agit des bandes utilisées par Maryam Lotfian pour faire sa carte de LST du territoire du canton de Genève (Maryam Lotfian et al. 2019).

Nous avons également fait un test avec le script de Maryam Lotfian qui utilise la méthode de classification « Random Forest » et toutes les bandes existantes des satellites Landsat 8 ou 9.

Nous ne remarquons pas beaucoup de différences entre les méthodes de classification « Random Forest » et « Random Trees ». La première est plus couramment utilisée et la seconde apparaît seulement dans ArcGIS Pro (Random forest 2023; Train Random Trees Classifier (Spatial Analyst)—ArcGIS Pro | Documentation 2023). La dénomination « Random Trees » est probablement la même méthode de classification que « Random Forest ».

Le tableau suivant présente les différentes constatations de ces différentes classifications. Les cartes produites se trouvent dans les annexes :

MÉTHODES	BANDES	COMMENTAIRES
<b>MAXIMUM LIKELIHOOD</b>		Méthode la moins intéressante. Elle ne produit dans aucun des cas une bonne répartition des classes.
	4,3,2	Les pixels sont répartis de manière qu'il n'y ait que très peu de blocs des classes 1 et 2. Nous ne voyons ainsi pas les grands éléments ressortir de ces deux classes.
	10,4,5	La meilleure classification de cette méthode, mais les pixels sont encore répartis de manière aléatoire.
<b>RANDOM TREES</b>	11,10,7	Les pixels sont répartis en forme de blocs aléatoires sans faire vraiment ressortir les grands éléments du territoire. La méthode qui semble le mieux fonctionner pour cette classification. Elle présente le moins d'erreurs.
	4,3,2	Idem que sur la méthode précédente : Maximum Likelihood
	10,4,5	Méthode et image composite qui semblent très bien fonctionner ensemble. Elle semble mieux fonctionner qu'avec l'image composite 11,10,7.
<b>SUPPORT VECTOR MACHINE</b>	11,10,7	Fonctionne bien, mais moins bien que l'image composite 10,4,5
		Une méthode qui fonctionne très bien, mais qui a l'air moins précise que Random Trees.
	4,3,2	Idem que sur les deux méthodes précédentes bien qu'elle semble mieux fonctionner
<b>RANDOM FOREST</b>	10,4,5	Semble bien représenter le territoire, mais avec des erreurs notamment sur les champs.
	11,10,7	Semble également bien représenter le territoire, mais avec des erreurs notamment sur les champs.
	Toutes les bandes	Malgré des erreurs, cette méthode semble être la meilleure pour représenter le territoire. Les champs sont ainsi pour la plupart bien considérés comme de la classe 4 et font le mieux ressortir également les grands éléments des trois premières classes.

Figure 18 Comparaison entre les différentes méthodes de classification et les différentes images composites

## Localisation des îlots de chaleur

En résumé : la meilleure méthode pour classifier le territoire avec ces nouvelles classes est celle utilisant la « Random Forest » (ou « Random Trees » avec ArcGIS Pro) avec toutes les bandes satellites. Parmi les autres, c'est la même méthode de classification avec l'image composite 10,4,5 qui fonctionne le mieux. Nous pouvons voir sur la carte en figure 20, la carte de la méthode sélectionnée. La précision semble aussi bonne selon la matrice de confusion (figure 19) :

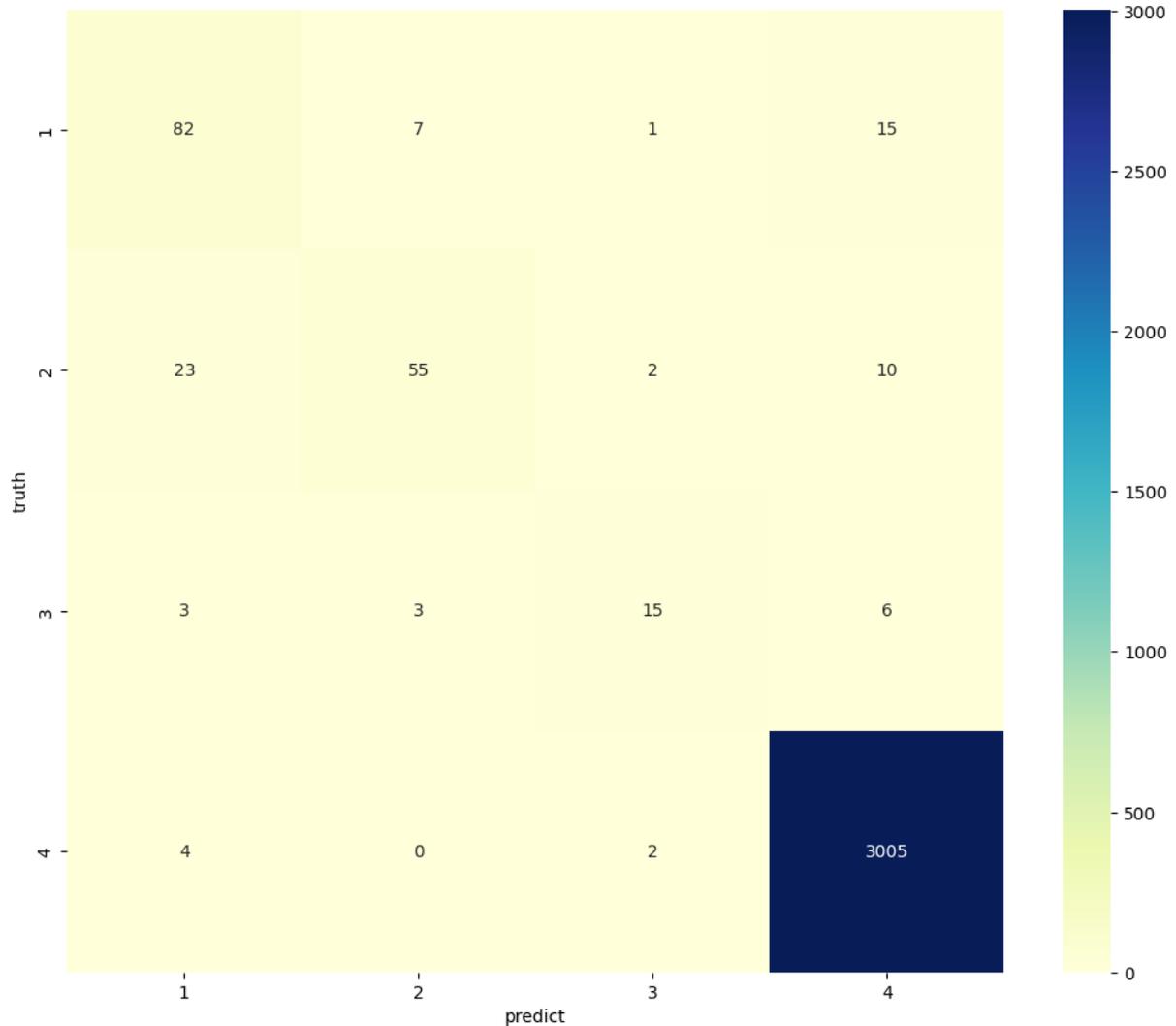


Figure 19 Matrice de confusion

Pour faire cette matrice de confusion, 15% des pixels ont été utilisés pour tester la méthode de classification « Random Forest ». Les 85% restants sont donc utilisés pour entraîner l'algorithme « Random Forest ».

L'axe Y « truth » est la vérité terrain, ou en d'autres termes, il s'agit des pixels qui sont étiquetés avec précision comme données de référence pour valider l'algorithme. L'axe X « predict » représente les pixels classifiés par l'algorithme. Ainsi, si nous calculons l'Overall Accuracy =  $\frac{\text{Somme des pixels bien classés}}{\text{Somme totale des pixels}}$ , un des indices pour contrôler l'efficacité de l'algorithme, nous obtenons

Overall Accuracy =  $\frac{(82+55+15+3005)}{(82+7+1+15+23+55+2+10+3+3+15+6+4+2+3005)} = 0,9764924218991649$ . Ce qui signifie que l'algorithme a bien fonctionné à 97%.

Cependant, la précision globale n'est pas toujours un indice robuste pour évaluer l'algorithme, en particulier lorsqu'il y a un grand déséquilibre entre les classes, comme ici où nous avons un grand nombre de pixels dans la classe 4. L'algorithme est donc performant sur cette classe et pas sur les autres. Dans ce cas, il est préférable de prendre en compte d'autres indices tels que l'AUC, le Kappa, etc. (Maryam Lotfian 2016, 2022).

Si nous analysons la carte de la méthode qui a le mieux fonctionné (figure 20) et la comparons avec les techniques précédentes (figures 11, 12 et 13 représentant la LCZ, GeoClimate et la LST), nous voyons que les champs, les forêts, les cours d'eau et le lac sont la plupart du temps dans la classe 4 (Zone non considérée comme un îlot de chaleur selon la définition et où l'action n'est pas nécessaire). Il s'agit de la classe la plus représentée. Cela prouve que la méthode fonctionne bien, car la campagne est plus présente que la ville.

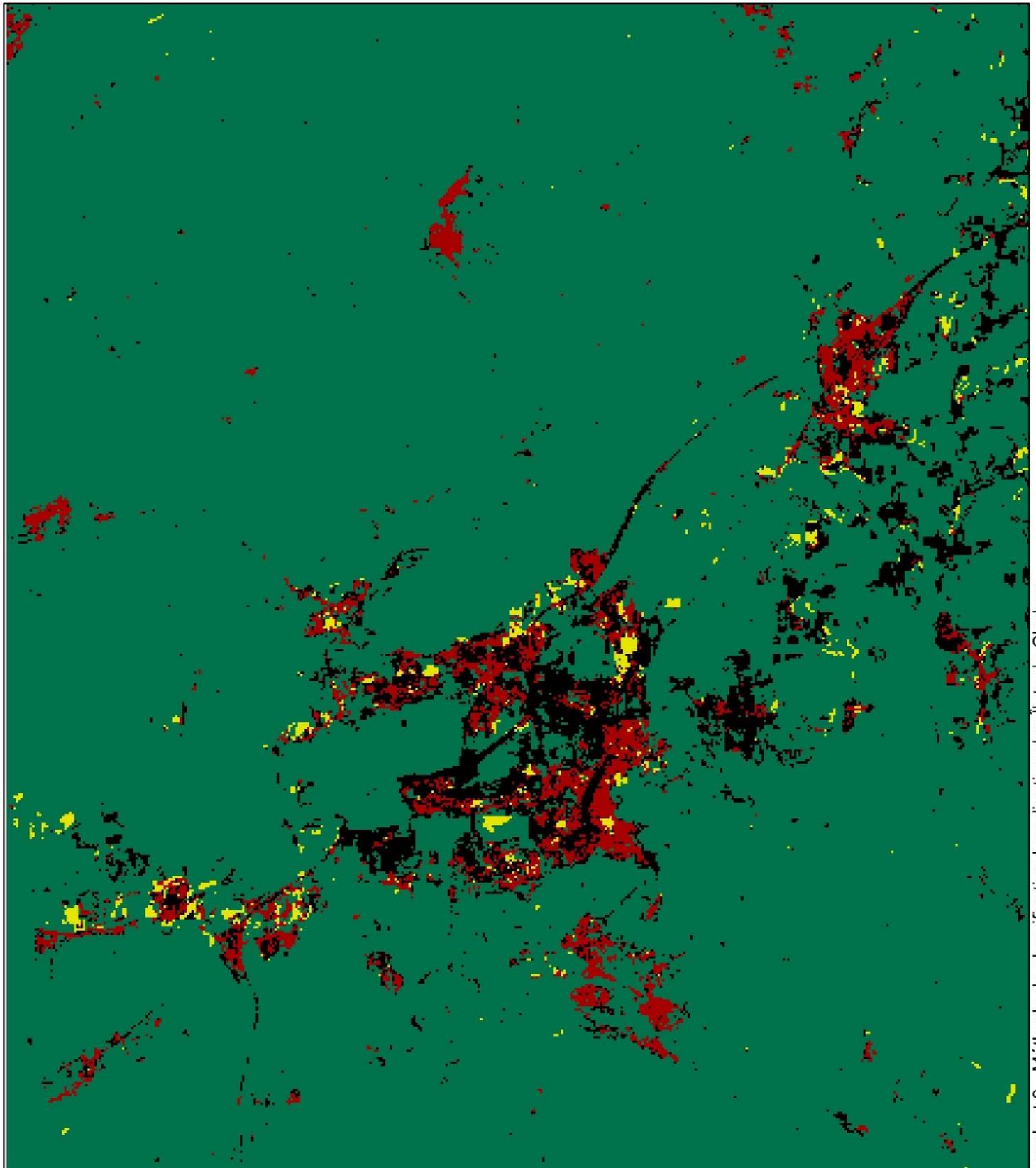
La classe 1 (îlots de chaleur non accessible, sans intervention nécessaire) est quant à elle surreprésentée. Elle se retrouve trop souvent sur le territoire. Les toits des bâtiments se retrouvent dans cette classe, mais, afin de ne pas fausser les résultats, car le niveau de résolution des pixels est de 30X30 mètres, seuls les toits des grands bâtiments et situés dans les zones d'usines ont été indiqués dans le logiciel comme faisant partie de cette classe. Nous voyons quand même certains éléments importants de cette classe qui ressortent comme l'autoroute et son échangeur ou encore la zone de voies de chemin de fer proche de la gare.

Concernant la classe 2 (îlots de chaleur accessible, intervention recommandée), elle est représentée au bon endroit sur les zones de bâti. Ainsi elle se retrouve en grande partie dans l'agglomération de Fribourg. Il faut tout de même noter que beaucoup de pixels de la classe 1 devraient être de la classe 2. Certains espaces importants appartenant à cette classe sont cependant corrects comme l'espace devant la gare de Fribourg.

Pour finir avec la classe 3 (Zone non considérée comme un îlot de chaleur selon la définition, mais qui nécessiterait une intervention dû au ressenti de la température), elle a bien fonctionné. Il s'agit des zones d'herbe proche du bâti. Notons notamment le parc des Grands Places, le parc du Domino ou encore les terrains de foot et le stade d'athlétisme. Cette classe se retrouve très rarement éloignée des classes 1 et 2.

Pour conclure, cette nouvelle technique de classification, mettant l'accent sur les îlots de chaleur, fonctionne relativement bien. Les classes 3 et 4 sont celles qui sont le plus précises. Il y a quelques éléments à modifier et à améliorer, mais la technique et la classification dans l'ensemble semblent être bonnes. Nous reviendrons sur tout cela dans le prochain chapitre « Conclusion ».

# Carte de la classification de Localisation des Îlots de Chaleur de l'agglomération de Fribourg le 16.07.2022



Landsat 9 - Méthode de classification Localisation des îlots de Chaleur  
ArcGIS PRO - Script Maryam Lotfian, Créé par Victor Zuccone

## Classes

-  Ilots de chaleur non accessible, sans intervention nécessaire
-  Ilots de chaleur accessible, intervention recommandée
-  Zone non considérée comme un îlot de chaleur selon la définition, mais qui nécessiterait une intervention dû au ressenti de la température
-  Zone non considérée comme un îlot de chaleur selon la définition et où l'action n'est pas nécessaire

Figure 20 Carte avec la nouvelle classification - Script Maryam Lotfian - image composite composée de toutes les bandes du satellite 1:70 000



## 6. Conclusion

### 6.1. Retour sur la question de recherche

Revenons à la question de recherche :

**« Comment la télédétection peut-elle être utilisée pour détecter les îlots de chaleur et les zones de fortes chaleurs où l'action est nécessaire ? »**

La réponse est la suivante : la télédétection est utilisée pour détecter les îlots de chaleur et les zones de fortes chaleurs où l'action est nécessaire en se basant sur les caractéristiques de revêtements du sol bâti et naturel et sur des images captant la fréquence d'onde thermique.

Mais, ici, nous ne touchons qu'une partie de la réponse. Il est nécessaire de connaître en plus quel revêtement est plus susceptible d'avoir ces zones de fortes chaleurs en se basant sur des données de techniques déjà existantes et sur l'expérience des utilisateurs. Ainsi, la classification qui a été faite dans ce travail permet de faire une distinction entre ces revêtements, en les classant selon 4 classes différentes. Ce qui donne ceci :

1. *Îlots de chaleur non accessible, sans intervention nécessaire*
  - 1.1. *Toit de bâtiment (Usine, habitation...) et zone d'usine*
  - 1.2. *Zone non accessible, car dédiée à d'autres mobilités que la mobilité active (Rail, autoroute et piste d'avion)*
  - 1.3. *Zone particulière non accessible aux publics (caserne militaire, zone gouvernementale ...)*
2. *Îlots de chaleur accessible, intervention recommandée*
  - 2.1. *Lieu d'activités humaines (Route, chemin, place, ...)*
  - 2.2. *Lieu d'habitation, de travail et de loisir (entre ces bâtiments)*
3. *Zone non considérée comme un îlot de chaleur selon la définition, mais qui nécessiterait une intervention dû au ressenti de la température*
  - 3.1. *Étendues d'herbe, de goudron, de pierres ou de sable avec un manque de végétation (et principalement les arbres), d'eau, de vent et d'albédo et donc proche des bâtiments et des activités humaines*
4. *Zone non considérée comme un îlot de chaleur selon la définition et où l'action n'est pas nécessaire*
  - 4.1. *Champs*
  - 4.2. *Forêt*
  - 4.3. *Eau*
  - 4.4. *Étendu d'herbe, de pierre ou de sable avec de la végétation (et principalement les arbres), de l'eau, du vent et de l'albédo et donc éloignés des bâtiments et des activités humaines*

Ensuite, concernant les bandes et la méthode de classification, ces classes fonctionnent mieux si toutes les bandes de Landsat 8 ou 9 sont utilisées avec la méthode de classification « Random Forest » (ou « Random Trees » avec ArcGIS Pro). Cette même méthode de classification semble également bien fonctionner avec les bandes 10,4,5.

Les étapes à suivre sont les suivantes pour une réalisation manuelle de l'analyse :

1. Récupérer les images satellites d'un satellite possédant des bandes thermiques de la période et de l'endroit souhaités pour l'analyse
2. Compiler les différentes bandes pour créer une image unique
3. Créer un fichier d'entraînement indiquant au programme le type de terrain de chacune des quatre classes de la nouvelle classification :

- 3.1. *Îlots de chaleur non accessible, sans intervention nécessaire*
- 3.2. *Îlots de chaleur accessible, intervention recommandée*
- 3.3. *Zone non considérée comme un îlot de chaleur selon la définition, mais qui nécessiterait une intervention dû au ressenti de la température*
- 3.4. *Zone non considérée comme un îlot de chaleur selon la définition et où l'action n'est pas nécessaire*
4. Utiliser la méthode de classification « Random Forest » (ou « Random Trees » avec ArcGIS Pro) en utilisant le fichier de bandes compilé et le fichier d'entraînement
5. Contrôler le résultat
6. Modifier le fichier d'entraînement et/ou changer les images satellites jusqu'à ce que le résultat soit convaincant

## 6.2. Comparaison avec les études précédentes

Présenter précédemment, il convient de comparer ce travail avec trois études qui ont aidé à la réalisation de ce travail. À savoir : l'étude de Maryam Lotfian sur le canton de Genève, celle de Rachel Thomson sur la ville d'Yverdon-les-Bains et celle de Marc Vonlanthen, Jerome Kaempf, Anthony Di Blasi et Donatien Burin des Rozières sur la ville de Fribourg.

### 6.2.1. Genève

Le processus de réalisation est presque le même : réalisation d'une carte avec la méthode LCZ et d'une autre carte sur la LST. Si le programme pour réaliser la carte de la classification (LCZ ou celle de ce travail) est le même, celle de la LST est différente. L'étude entreprise dans ce dossier utilise et reprend en grande partie ce qui a été réalisé pour l'étude de Genève. Ce qui est normal, car ce travail s'en inspire. Les différences proviennent principalement du lieu d'étude, pour l'un le canton de Genève et pour le second l'agglomération de Fribourg et le lac de Schiffenen, et de l'utilisation, pour ce travail, d'une nouvelle classification pour l'étude du territoire et des îlots de chaleur (Maryam Lotfian et al. 2019).

### 6.2.2. Yverdon-les-Bains

La principale différence importante avec le travail de Rachel Thomson est que l'étude sur Yverdon-les-Bains utilise un drone avec caméra thermique comme outil pour capter les îlots de chaleur. Ainsi, la résolution des images est beaucoup plus précise et donc les pixels beaucoup plus petits. Elle se base uniquement sur les températures pour détecter les îlots de chaleur et non sur les ressentis. L'analyse d'une grande zone avec un drone est cependant plus longue qu'avec un satellite (Rachel Thomson 2016).

### 6.2.3. Fribourg

L'étude de Fribourg n'utilise aucune image. Elle s'appuie sur une base de données informant sur les caractéristiques 3D de la ville de Fribourg et notamment, elle donne des informations sur les vitrages, le type de surface, la réflectance des surfaces, le taux d'infiltration, le fichier climatique et la présence ou absence d'un objet de simulation (arbres, sols et bâtiments). Les cartes sont ainsi plus précises, mais le travail beaucoup plus long à produire. Les routes et les places minéralisées comme le secteur de la gare de Fribourg ressortent beaucoup plus. Cette étude s'intéresse aussi aux évolutions futures des températures.

L'objectif de ce travail est différent de l'étude fribourgeoise. Il permet une classification des zones et la méthode de récolte des données est plus rapide pour une vue d'ensemble des îlots de chaleur présents sur un territoire plus grand (NCCS 2023).

### 6.3.Limites et suite

Chacune des études décrites ci-dessus est un bon complément à l'étude actuelle. Elles montrent des limites au travail et des compléments possibles. Nous pouvons proposer les améliorations suivantes :

- Tout d'abord, la précision des données est à améliorer. Nous avons vu qu'il y a eu quelques erreurs de classification notamment dans les classes 1 et 2. Il existerait plusieurs solutions à cela. Nous pourrions améliorer la résolution des images, notamment grâce à un drone ou à des satellites plus performants, mais cela pourrait rallonger le temps d'analyse. Il serait aussi possible de se baser sur l'intelligence artificielle. L'IA ferait ainsi plusieurs tests, afin de capter les erreurs et d'améliorer la qualité de la classification, notamment, la classe 3 et 4 pourrait apparaître plus souvent en ville qu'actuellement. Le fichier d'entraînement qui permet au logiciel de calculer et placer les classes sur le territoire pourrait également être modifié ce qui permettrait peut-être d'améliorer la précision. Il serait également intéressant d'ajouter de nouvelles données plus locales comme celle de l'étude sur la ville de Fribourg ou encore des données sur les vents, afin d'ajouter de la précision.
- Ensuite, il serait intéressant de se pencher sur les scénarios futurs des températures de la zone d'étude, ainsi qu'aux différences jour-nuit et des saisonnalités. En effet, ce travail s'est beaucoup intéressé à connaître les endroits où il serait nécessaire d'agir pour réduire les températures. Une étude prospective sur la nuit et le jour et en fonction des saisons ne peuvent qu'aider à répondre à cette problématique.
- Pour finir, il serait intéressant d'automatiser la nouvelle méthode de localisation des îlots de chaleur développée dans ce travail. Bien sûr, cette automatisation pourrait être faite avec une IA, mais produire un Workflow automatisé grâce un Model Builder par exemple serait déjà bien efficace et permettrait de rendre cette classification plus utilisable par le plus grand nombre d'utilisateurs.

Une analyse périodique des îlots de chaleur d'un territoire souhaité pour créer des données toujours à jour et évolutive avec l'aide d'une IA ou d'un programme qui automatiserait l'analyse serait très intéressante à mettre en place. Cette nouvelle classification décrite dans ce travail avec sa technique pourrait notamment être intégrée au sein du Swiss Data Cube pour faire cette analyse périodique.

En conclusion, il subsiste des points d'amélioration et des limites, mais la technique pour détecter les îlots de chaleur que ce travail a développée est très bonne. Elle remplit les objectifs souhaités, détection rapide et niveau d'intervention de détection des îlots de chaleur, et elle permet d'ouvrir la réflexion vers une nouvelle façon d'interroger le territoire.

## 7. Bibliographie

A global comparison between station air temperatures and MODIS land surface temperatures reveals the cooling role of forests - Mildrexler - 2011 - Journal of Geophysical Research: Biogeosciences - Wiley Online Library. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2010JG001486> (last accessed 14 April 2023).

Admin.ch. 2023a. Fribourg. <https://www.nccs.admin.ch/nccs/fr/home/regions/cantons/fribourg.html> (last accessed 14 April 2023).

———. 2023b. Températures. <https://www.nccs.admin.ch/nccs/fr/home/changement-climatique-et-impacts/scenarios-climatiques-suisse/faits-et-chiffres/temperatures.html> (last accessed 14 April 2023).

Andrew Revkin. 2018. On parle du changement climatique depuis plus de 30 ans. Pourquoi n'avons-nous rien fait ? *National Geographic*. <https://www.nationalgeographic.fr/environnement/on-parle-du-changement-climatique-depuis-plus-de-30-ans-pourquoi-navons-nous-rien-fait> (last accessed 24 May 2023).

Baran Yesiltas. 2023. Canton de Neuchâtel: une étude lancée pour identifier les îlots de chaleur. *ARCInfo* 2 May. <https://www.arcinfo.ch/neuchatel-canton/canton-de-neuchatel-une-etude-lancee-pour-identifier-les-ilots-de-chaleur-1284611> (last accessed 24 May 2023).

Bocher, E., J. Bernard, E. Wiederhold, F. Leconte, G. Petit, S. Palominos, and C. Noûs. 2021. GeoClimate: a Geospatial processing toolbox for environmental and climate studies. *Journal of Open Source Software* 6 (65):3541.

Chaleur en milieu urbain - MétéoSuisse. 2023. <https://www.meteosuisse.admin.ch/climat/climat-de-la-suisse/chaleur-en-milieu-urbain.html> (last accessed 16 April 2023).

EarthExplorer. 2023. <https://earthexplorer.usgs.gov/> (last accessed 16 April 2023).

Ermida, S. L., P. Soares, V. Mantas, F.-M. Göttsche, and I. F. Trigo. 2020. Google Earth Engine Open-Source Code for Land Surface Temperature Estimation from the Landsat Series. *Remote Sensing* 12 (9):1471.

Geoclimate. 2023. <https://github.com/orbisgis/geoclimate> (last accessed 14 April 2023).

Github. 2023. GitHub - awesome-spectral-indices/awesome-spectral-indices: A ready-to-use curated list of Spectral Indices for Remote Sensing applications. <https://github.com/awesome-spectral-indices/awesome-spectral-indices> (last accessed 16 April 2023).

Good, E. J., D. J. Ghent, C. E. Bulgin, and J. J. Remedios. 2017. A spatiotemporal analysis of the relationship between near-surface air temperature and satellite land surface temperatures using 17 years of data from the ATSR series. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 122 (17):9185–9210.

Îlot de chaleur urbain — Wikipédia. 2023. [https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%8Elot\\_de\\_chaleur\\_urbain#cite\\_ref-1](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%8Elot_de_chaleur_urbain#cite_ref-1) (last accessed 16 April 2023).

Images satellites/Introduction — Wikiversité. 2023. [https://fr.wikiversity.org/wiki/Images\\_satellites/Introduction](https://fr.wikiversity.org/wiki/Images_satellites/Introduction) (last accessed 16 April 2023).

Landsat 8 - Wikipédia. 2023. *Wikipédia*.  
[https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Landsat\\_8&oldid=203553967](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Landsat_8&oldid=203553967) (last accessed 26 May 2023).

Landsat 9 - Wikipédia. 2023. *Wikipédia*.  
[https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Landsat\\_9&oldid=204600729](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Landsat_9&oldid=204600729) (last accessed 26 May 2023).

LandsatLook. 2023. *LandsatLook*. <https://landsatlook.usgs.gov/explore> (last accessed 6 July 2022).

Maryam Lotfian. 2016. Urban climate modeling: case study of Milan city. <https://www.politesi.polimi.it/handle/10589/125023> (last accessed 24 June 2023).

— — —. 2022. Integration of machine learning and citizen science to address the challenges of public engagement and data validation. <https://www.politesi.polimi.it/handle/10589/183676> (last accessed 24 June 2023).

Maryam Lotfian, Jens Ingensand, Sarah Composto, Monia Elisa Molinari, and Politecnico di Milano. 2019. The relationship between land surface temperature and local climate zone classification: A case study of the canton Geneva, Switzerland. *AGILE*.

MétéoSuisse. 2023. Evolution de la température et de la précipitation - MétéoSuisse. <https://www.meteosuisse.admin.ch/services-et-publications/applications/ext/climate-evolution-series-public.html> (last accessed 16 April 2023).

Nations United. 2023. En quoi consistent les changements climatiques ? | Nations Unies. *United Nations*. <https://www.un.org/fr/climatechange/what-is-climate-change> (last accessed 16 April 2023).

NCCS, N. C. for C. S. 2023. A.13 Ilots de chaleur en ville de Fribourg. <https://www.nccs.admin.ch/nccs/fr/home/massnahmen/pak/projektephase2/pilotprojekte-zur-anpassung-an-den-klimawandel--cluster--umgang-/a-13-hitzeinseln-in-der-stadt-freiburg.html> (last accessed 14 April 2023).

Nicolas, J. M. 2012. Les Bases de l'Imagerie Satellitaire.

Programme Landsat - Wikipédia. 2023. *Wikipédia*.  
[https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Programme\\_Landsat&oldid=202625034](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Programme_Landsat&oldid=202625034) (last accessed 16 April 2023).

Rachel Thomson. 2016. Utilisation de l'imagerie aéroportée pour la cartographie thermique et la caractérisation du climat urbain.

Random forest. 2023. *Wikipedia*.  
[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Random\\_forest&oldid=1160091469](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Random_forest&oldid=1160091469) (last accessed 24 June 2023).

Stewart, I. D., and T. R. Oke. 2012. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93 (12):1879–1900.

Train Random Trees Classifier (Spatial Analyst)—ArcGIS Pro | Documentation. 2023. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/train-random-trees-classifier.htm> (last accessed 24 June 2023).

Ville de Fribourg. 2021. A la traque aux îlots de chaleur | Ville de Fribourg. <https://www.ville-fribourg.ch/actualites/a-la-traque-aux-ilots-de-chaleur> (last accessed 24 May 2023).



## 8. Annexe

8.1. Différences entre températures du sol et températures de l'air à deux mètres en fonction du type de terrain.....	37
8.2. Cartes analysées dans ce travail (LCZ, GeoClimate, LST et enquête en ligne) en taille réelle 39	
8.3. Autres cartes des classifications.....	45
8.4. Résultats de l'enquête.....	55
8.5. Images composites et fichier d'entraînement .....	59

### 8.1. Différences entre températures du sol et températures de l'air à deux mètres en fonction du type de terrain

La différence entre la température du sol maximale et la température de l'air à deux mètres ( $LST_{max}/T_{amax}$ ) (A global comparison between station air temperatures and MODIS land surface temperatures reveals the cooling role of forests - Mildrexler - 2011 - Journal of Geophysical Research: Biogeosciences - Wiley Online Library n.d.) :

**Zones stériles :**

- Désert froid : différence proche de 0°C
- Désert chaud : différence entre 10 et 20 °C

**Zone de prairie :**

- Prairie : différence entre 10 et 20 °C

**Zones de savanes :**

- Savanes boisées (10-30% d'arbre) : différence entre 0 et 12 °C
- Savanes non boisées (30-60% d'arbre) : différence entre 0 et 10 °C

**Zones d'arbustes :**

- Toundra : différence proche de 0°C
- Désert avec arbustes : différence entre 10 et 25 °C (évapotranspiration)

**Zones cultivées :**

- Zones cultivées irriguées : différence proche de 0°C
- Zones cultivées non irriguées : différence entre 10 et 20 °C
- Plus de différence dans l'hémisphère sud que nord

**Zones de forêts (60-100% d'arbres) :**

- Forêts de feuillus persistants : différence proche de 0°C
- Forêts de feuillus caduques : différence proche de 0°C
- Forêts d'aiguilles persistantes : différence proche de 0°C
- Forêts d'aiguilles caduques : différence proche de 0°C
- Forêts mixtes : différence proche de 0°C

**Zone urbaine :**

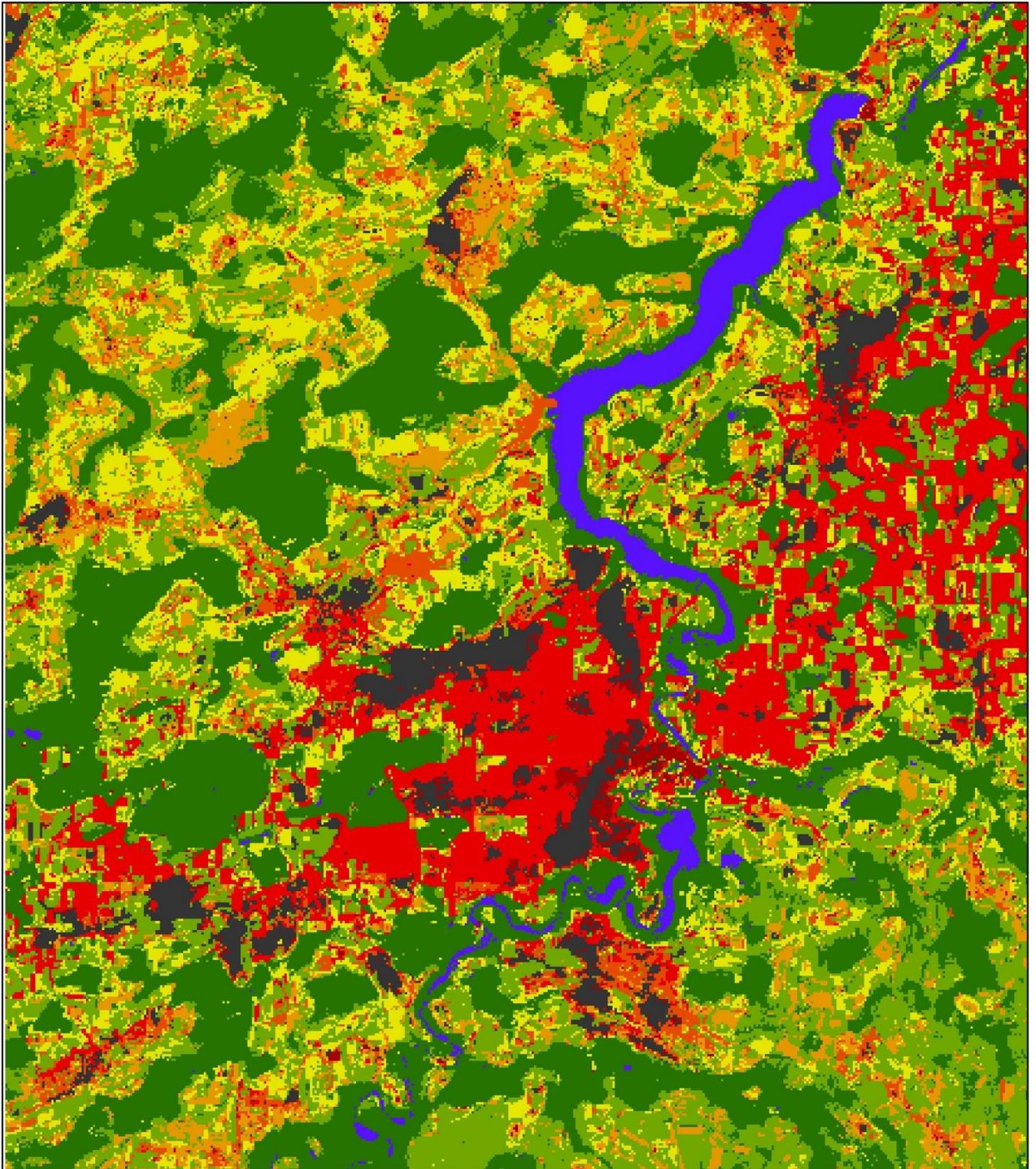
- Non connu, mais comme les températures sont plutôt retenues dans les zones urbaines et qu'elles sont accentuées par les activités humaines, nous supposons que la différence peut être comprise entre -10 et 0°C (la LST est plus fraîche que la température de l'air à deux mètres dans les zones urbaines)

Une différence intervient également s'il s'agit de la température du jour (de 10h00 à 21h59) ou celle de la nuit (22h00-9h59) et si le calcul se fait l'été ou l'hiver (Good et al. 2017) :

- LSTnuit - Température minimum de l'air à 2 mètres = 1,8°C
- LSTjour - Température maximale de l'air à 2 mètres = 8,1°C
- En été, la différence est plus grande qu'en hiver dû à l'ensoleillement plus important.

8.2. Cartes analysées dans ce travail (LCZ, GeoClimate, LST et enquête en ligne) en taille réelle

# Carte de la classification des zones climatiques de l'agglomération de Fribourg le 16.07.2022



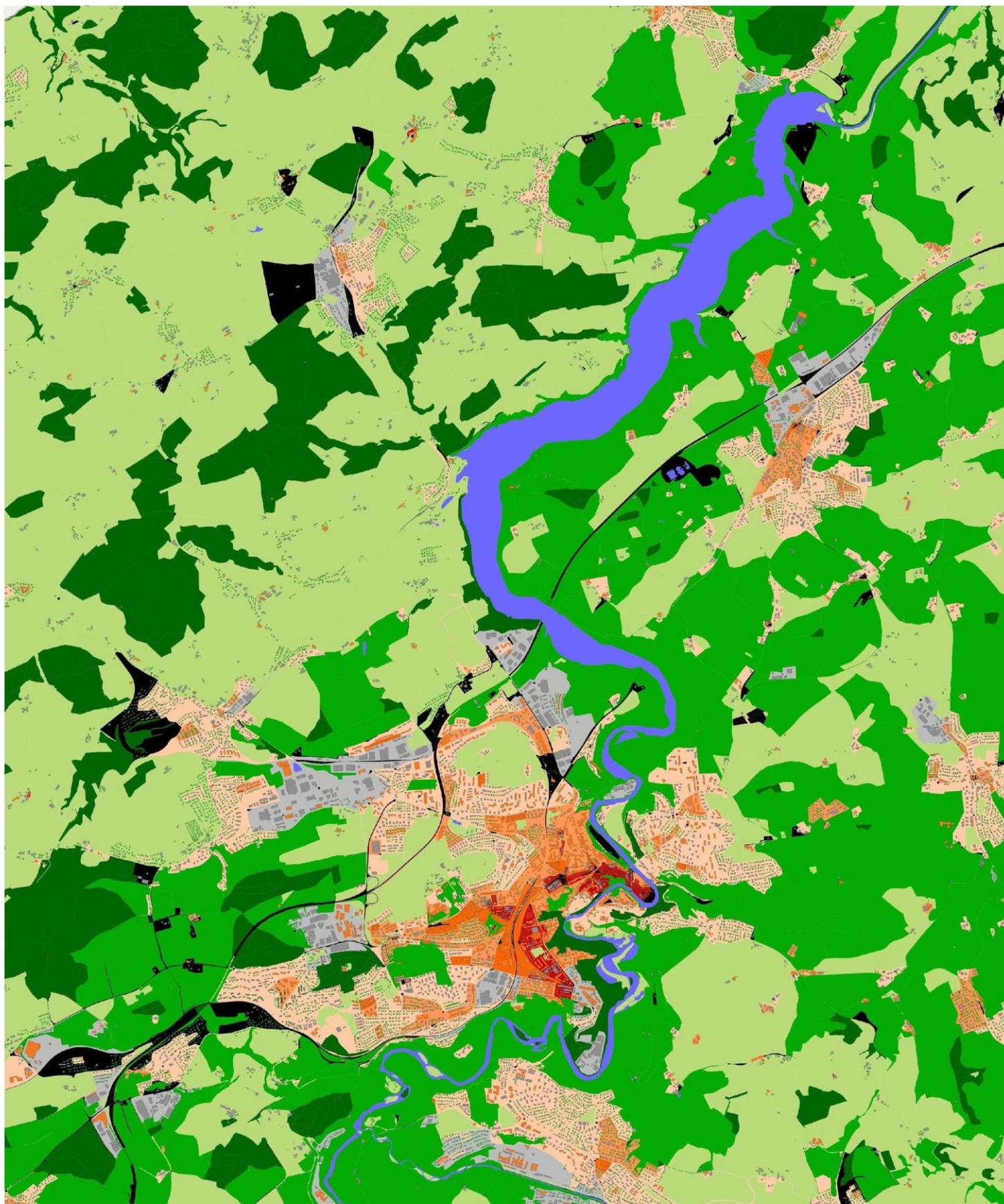
## Type de terrain

 Water	 Open Lowrise
 Tree	 Lightweight Lowrise
 Low Plants	 Open Midrise
 Industry	 Compact Midrise
 Sparcelly Build	

1:70 000



# Carte de la classification des zones climatiques selon la hauteur des bâtiments de l'agglomération de Fribourg 2022



## Zone climatique locale

- ZCL 1: Ensemble de tours compact
- ZCL 2: Ensemble d'immeubles compact
- ZCL 3: Ensemble de maisons compact
- ZCL 4: Ensemble de tours espacées
- ZCL 5: Ensemble d'immeubles espacés
- ZCL 6: Ensemble de maisons espacées
- ZCL 7: Constructions légères
- ZCL 8: Grandes emprises tertiaires bâti bas
- ZCL 9: Maisons éparses, constructions isolées
- ZCL 10: Industrie lourde

- LCZ A: Dense trees
- ZCL B: Arbres épars
- ZCL C: Buissons, broussaille
- ZCL D: Pelouses, prairies, cultures
- ZCL E: Roche nue, pavés, macadam
- ZCL F: Terrain nu ou sable
- ZCL G: Eau
- Inconnu

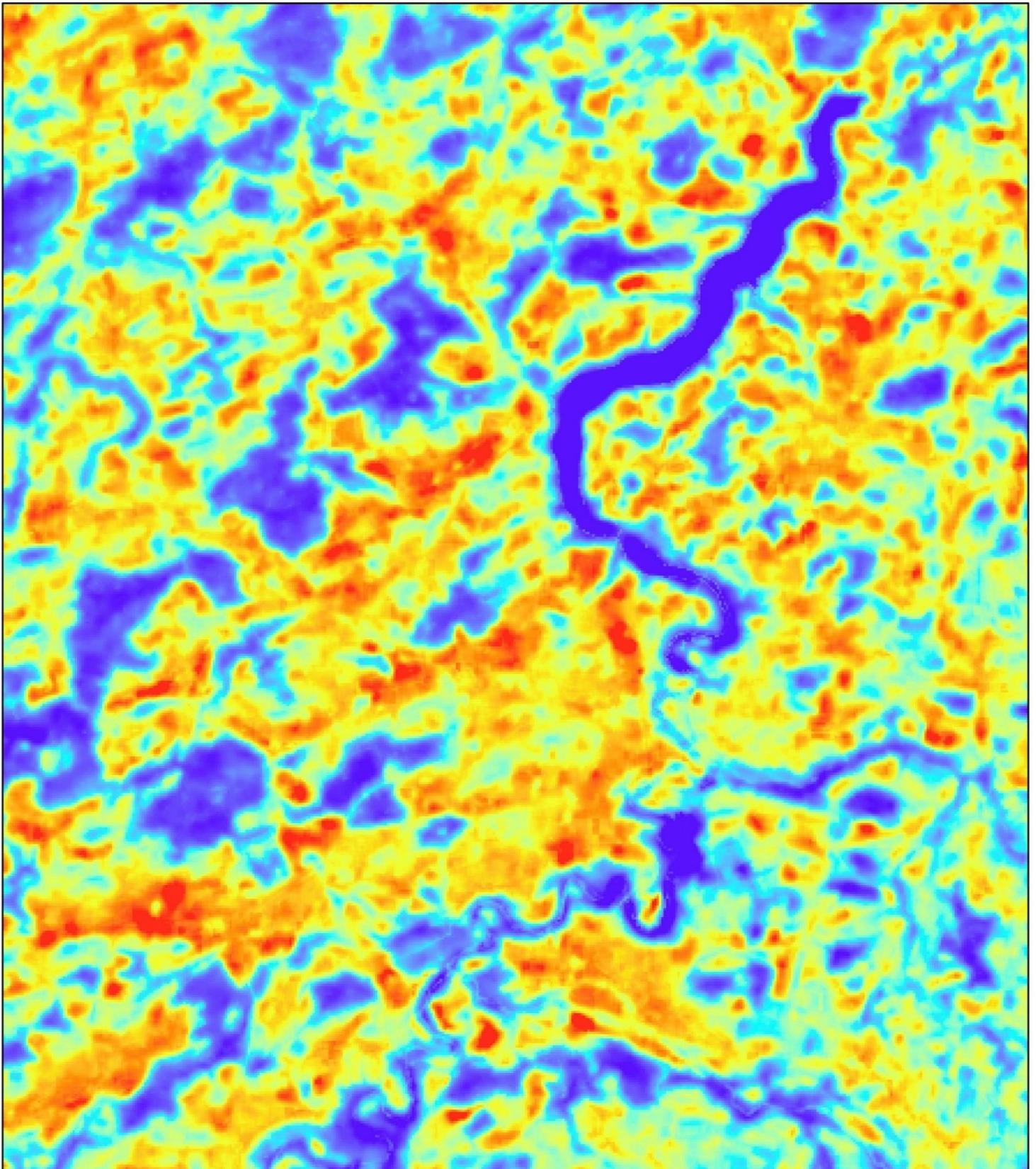
## Type de bâtiments

- Bâtiment d'activité
- Bâtiment de grande hauteur
- Immeuble continu sur îlot fermé
- Immeuble continu sur îlot ouvert
- Immeuble discontinu
- Local
- Pavillon continu sur îlot fermé
- Pavillon continu sur îlot ouvert
- Pavillon discontinu
- Pavillon semi-continu
- Inconnu

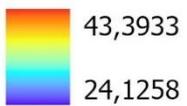
1:70 000



# Températures du sol dans l'agglomération de Fribourg le 16.07.2022



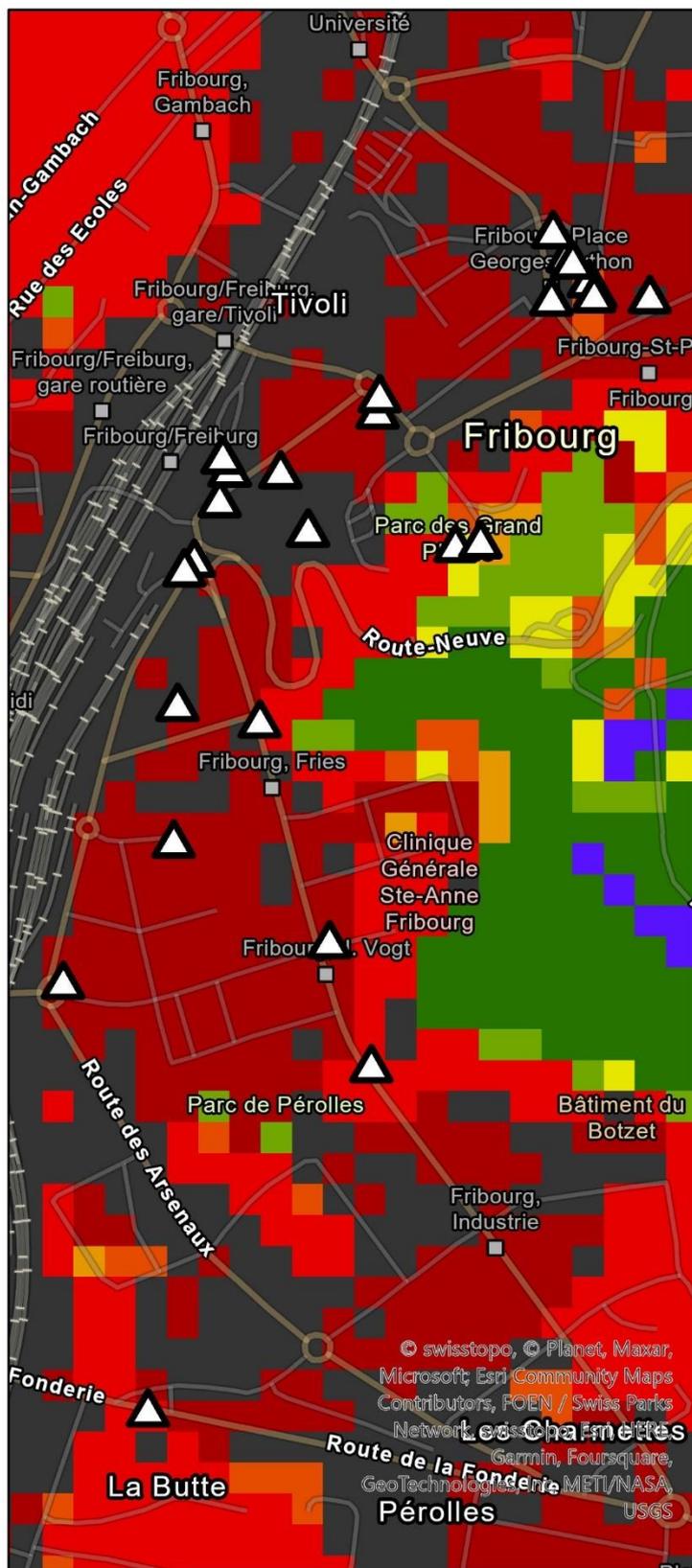
T°C au sol



1:70 000



# Carte : Résultat de l'enquête en ligne sur les îlot de chaleur dans l'agglomération de Fribourg avec les zones climatiques locales



Résultat enquête - îlot de chaleur dans l'agglomération de Fribourg, Landsat 8 et 9 - Méthode Locale Climate Zone ArcGIS PRO, Créé par Victor Zuccone

## Zones climatiques locales et Résultats de l'enquête

- |   |   |   |
|---|---|---|
|  Water      |  Sparcely Build      |  Compact Midrise       |
|  Tree       |  Open Lowrise        |  Lieu de forte chaleur |
|  Low Plants |  Lightweight Lowrise |   |
|  Industry   |  Open Midrise        |   |

1:7 000



# Carte : Résultat de l'enquête en ligne sur les îlot de chaleur dans l'agglomération de Fribourg



Résultat enquête - îlot de chaleur dans l'agglomération de Fribourg, Orthophoto hybride ArcGIS PRO  
ArcGIS PRO, Créé par Victor Zuccone

## Zones climatiques locales et Résultats de l'enquête

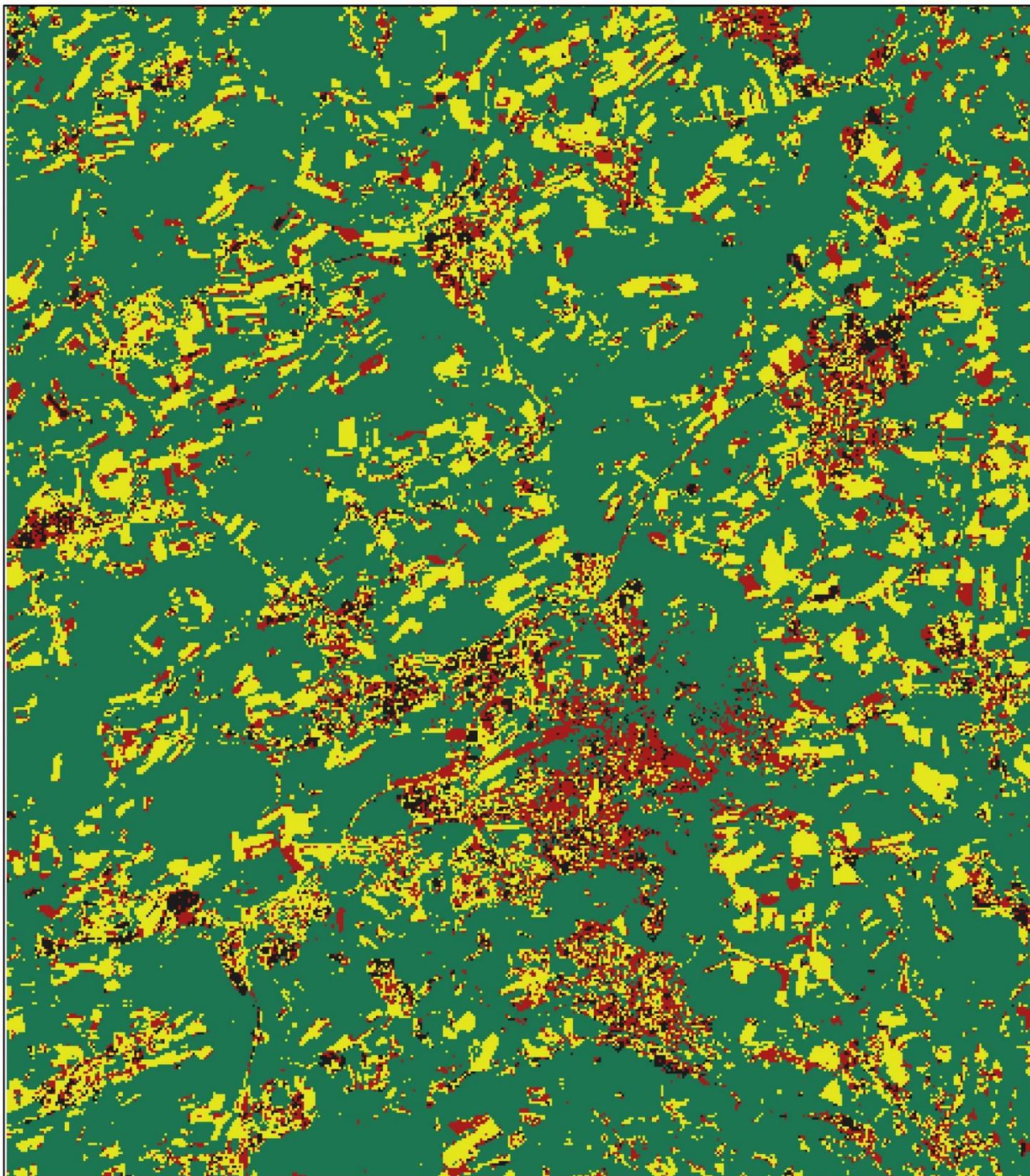
▲ Lieu de forte chaleur

1:7 000



### 8.3. Autres cartes des classifications

# Carte de la classification de Localisation des Îlots de Chaleur de l'agglomération de Fribourg le 16.07.2022



Landsat 9 - Bandes 4,3,2 - Méthode de classification Localisation des îlots de Chaleur  
ArcGIS PRO - Support Vector Machine, Créé par Victor Zuccone

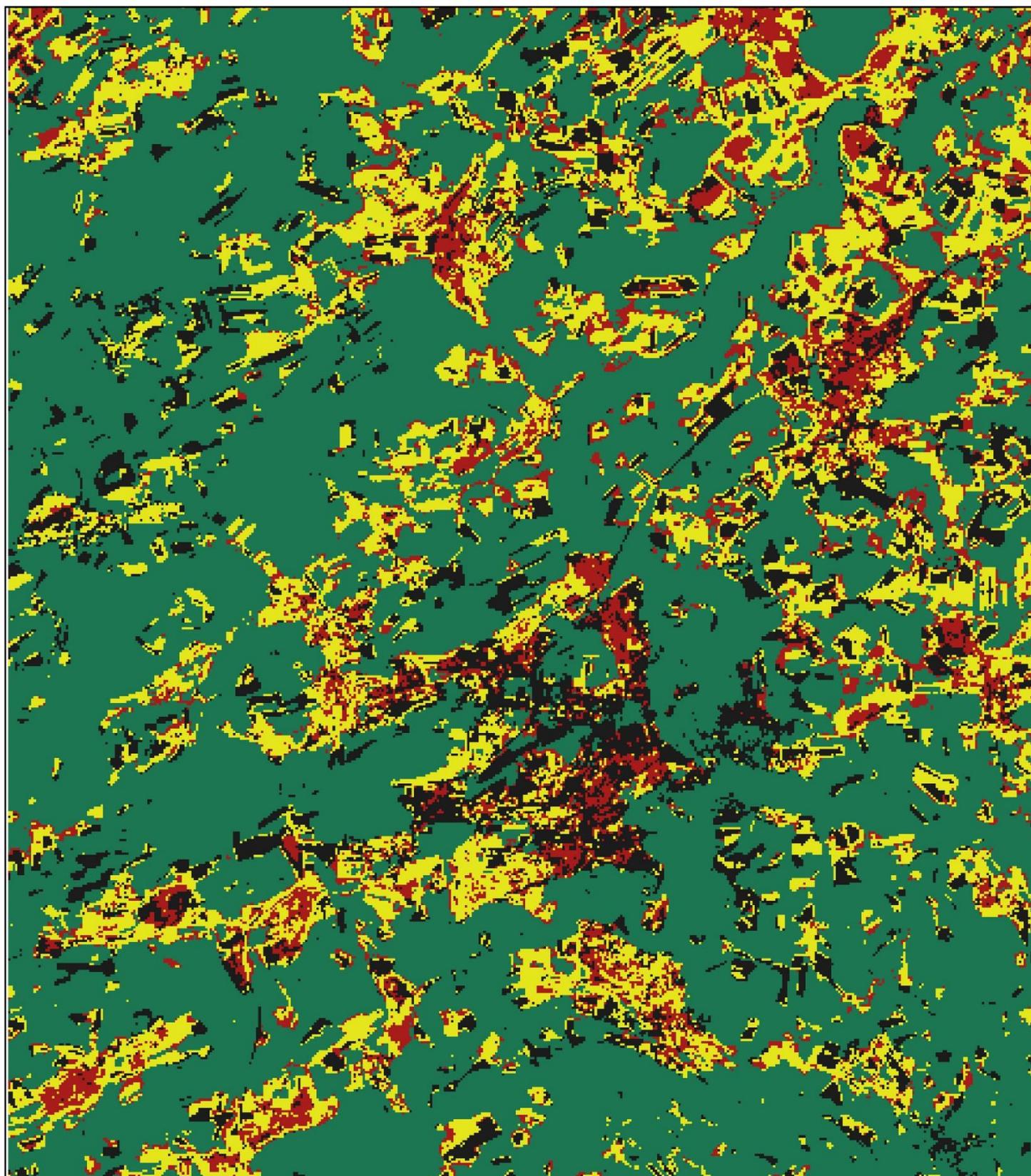
## Classes

-  Ilots de chaleur non-accessible, sans intervention nécessaire
-  Ilots de chaleur accessible, intervention recommandée
-  Zone non-consideré comme un îlot de chaleur selon la définition, mais qui nécessiterait une intervention dû au ressenti de la température
-  Zone non-consideré comme un îlot de chaleur selon la définition et où l'action n'est pas nécessaire

1:70 000



# Carte de la classification de Localisation des Îlots de Chaleur de l'agglomération de Fribourg le 16.07.2022



LandSat 9 - Bandes 10,4,5 - Méthode de classification Localisation des îlots de Chaleur  
ArcGIS PRO - Maximum Likelihood, Créé par Victor Zuccone

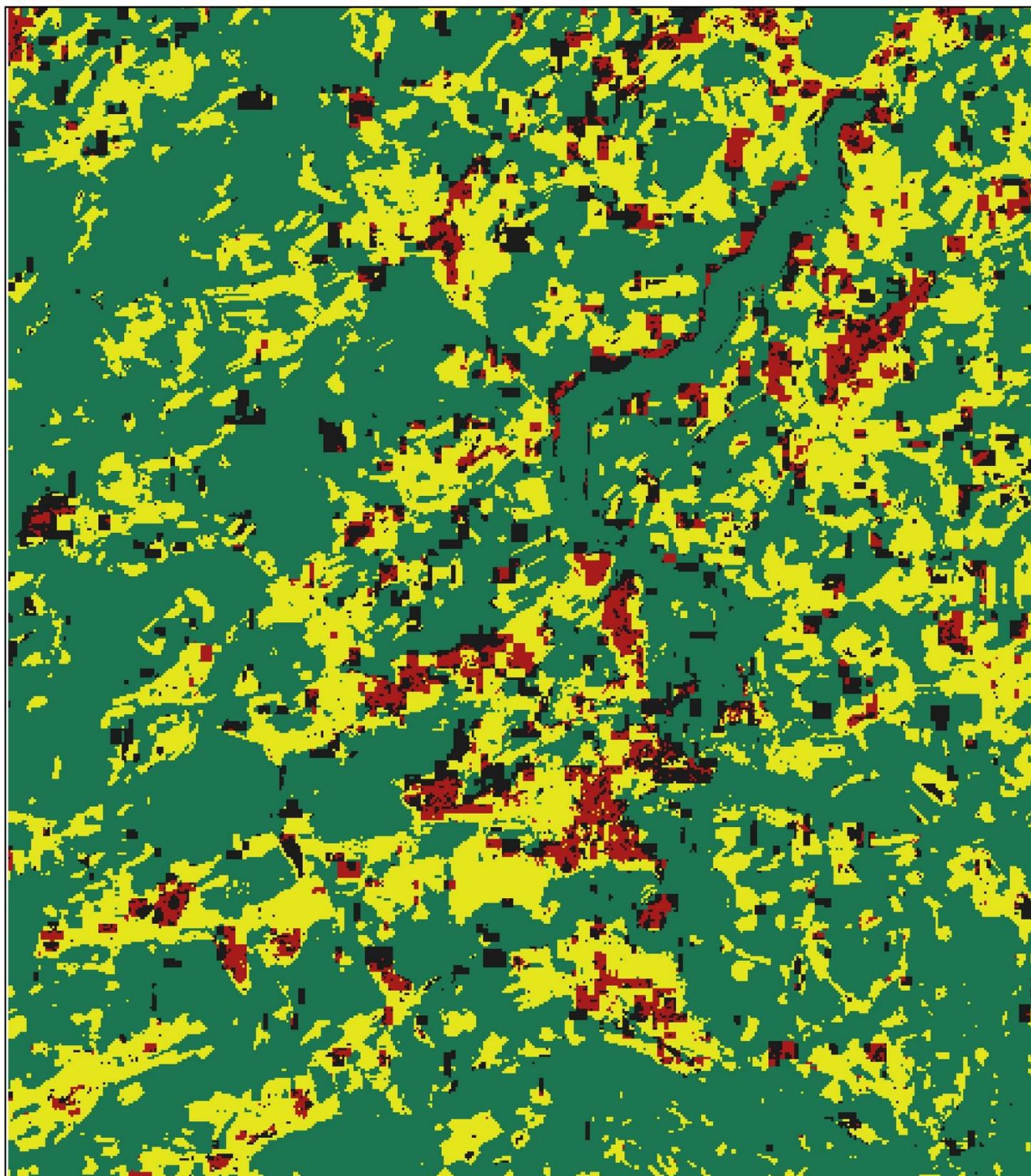
## Classes

-  Ilots de chaleur non-accessible, sans intervention nécessaire
-  Ilots de chaleur accessible, intervention recommandée
-  Zone non-consideré comme un îlot de chaleur selon la définition, mais qui nécessiterait une intervention dû au ressenti de la température
-  Zone non-consideré comme un îlot de chaleur selon la définition et où l'action n'est pas nécessaire

1:70 000



# Carte de la classification de Localisation des Îlots de Chaleur de l'agglomération de Fribourg le 16.07.2022



Landsat 9 - Bandes 11, 10, 7 - Méthode de classification Localisation des îlots de Chaleur  
ArcGIS PRO - Random Trees, Créé par Victor Zuccone

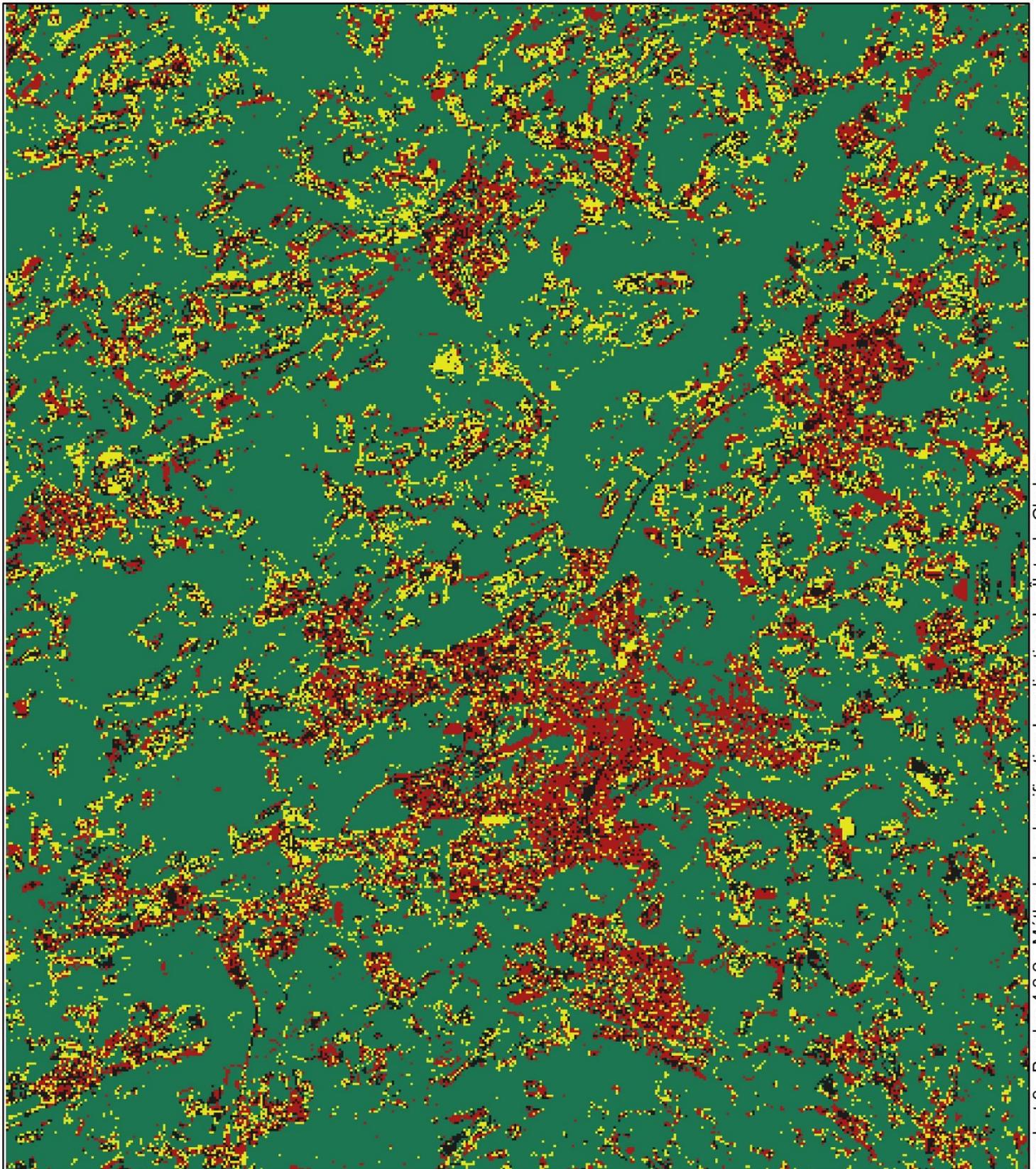
## Classes

-  Ilots de chaleur non-accessible, sans intervention nécessaire
-  Ilots de chaleur accessible, intervention recommandée
-  Zone non-consideré comme un îlot de chaleur selon la définition, mais qui nécessiterait une intervention dû au ressenti de la température
-  Zone non-consideré comme un îlot de chaleur selon la définition et où l'action n'est pas nécessaire

1:70 000



# Carte de la classification de Localisation des Îlots de Chaleur de l'agglomération de Fribourg le 16.07.2022



Landsat 9 - Bandes 4,3,2 - Méthode de classification Localisation des îlots de Chaleur  
ArcGIS PRO - Random Trees, Créé par Victor Zuccone

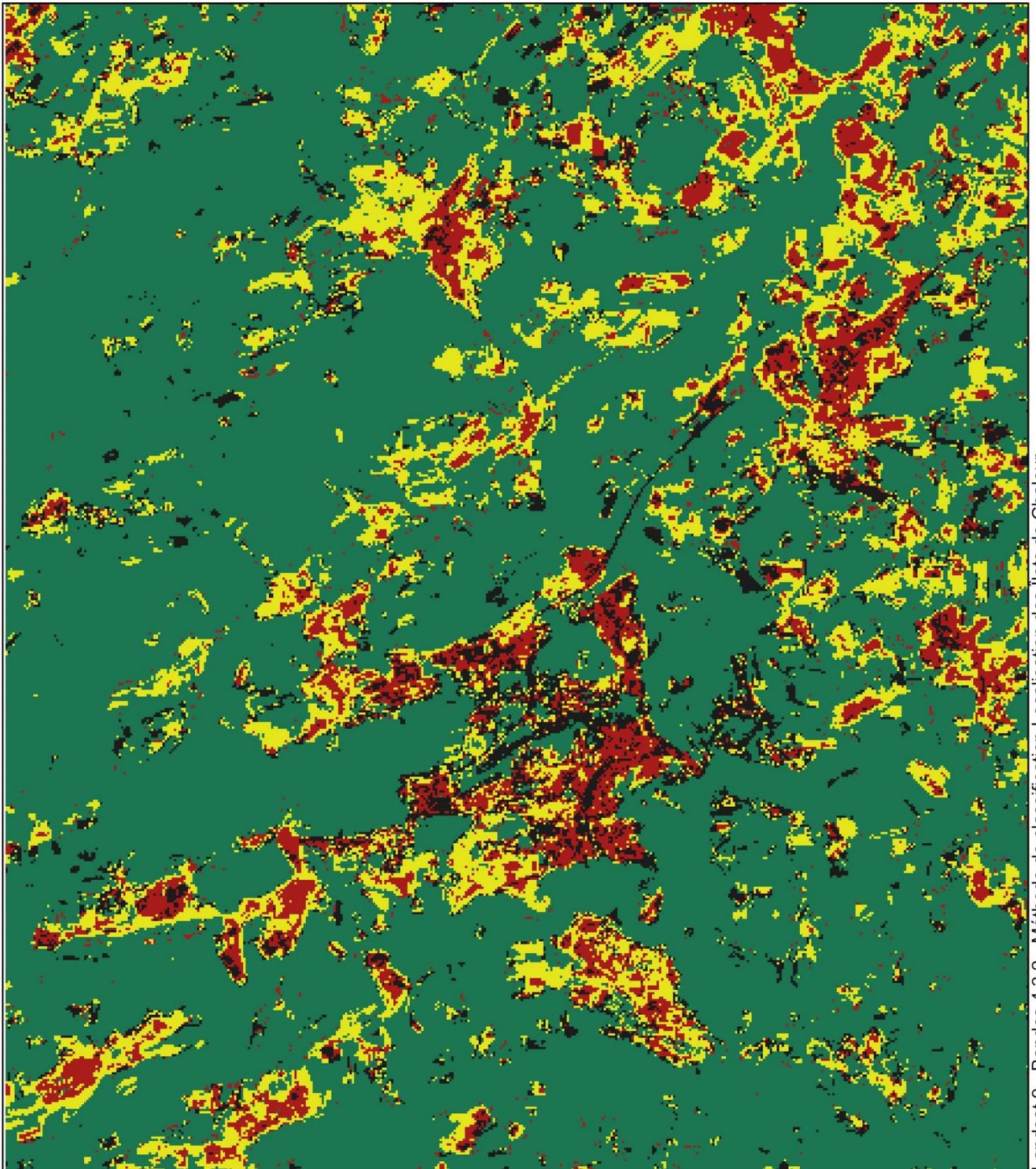
## Classes

-  Ilots de chaleur non-accessible, sans intervention nécessaire
-  Ilots de chaleur accessible, intervention recommandée
-  Zone non-consideré comme un îlot de chaleur selon la définition, mais qui nécessiterait une intervention dû au ressenti de la température
-  Zone non-consideré comme un îlot de chaleur selon la définition et où l'action n'est pas nécessaire

1:70 000



# Carte de la classification de Localisation des Îlots de Chaleur de l'agglomération de Fribourg le 16.07.2022



Landsat 9 - Bandes 4,3,2 - Méthode de classification Localisation des îlots de Chaleur  
ArcGIS PRO - Random Trees; Créé par Victor Zuccone

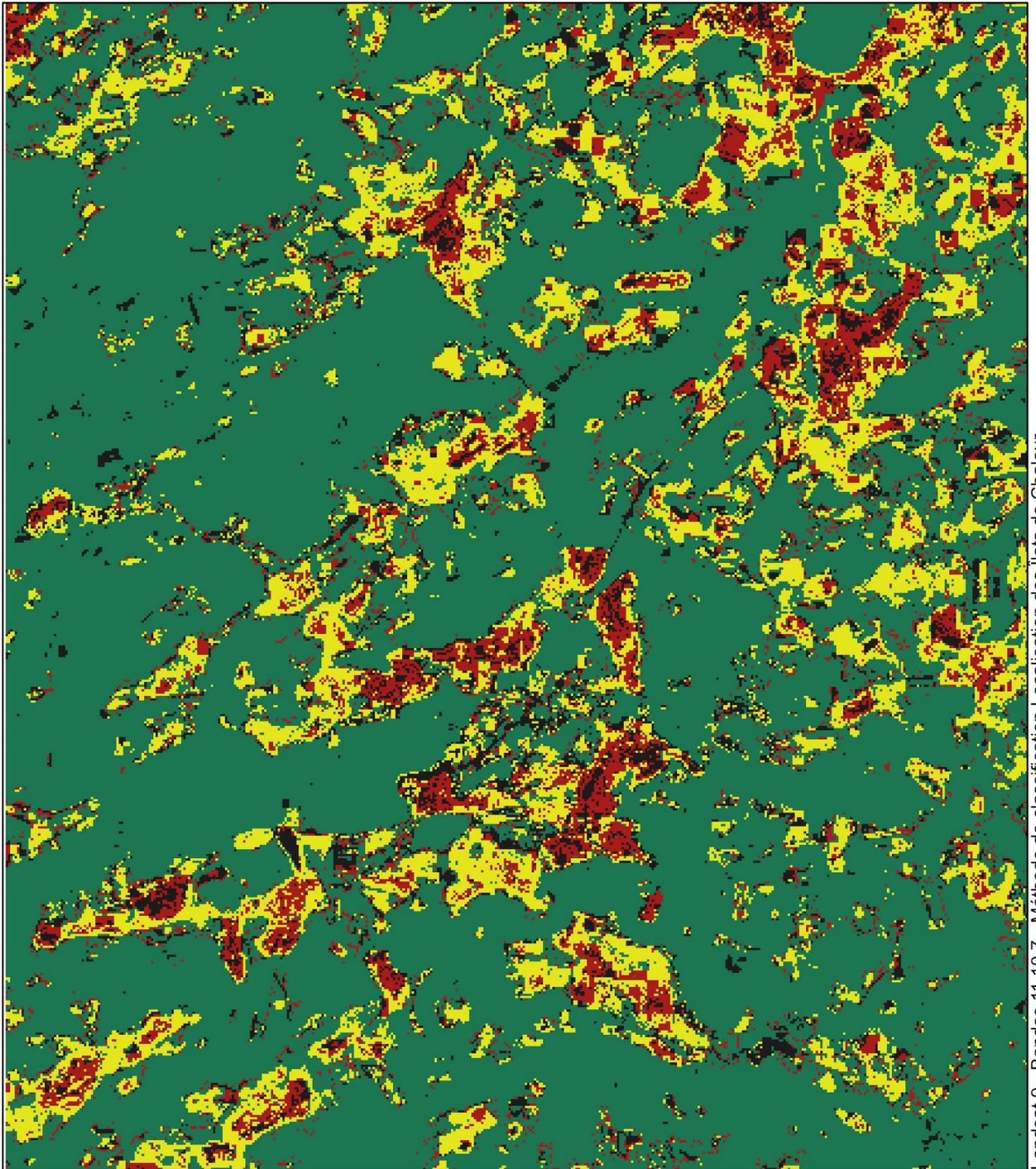
## Classes

-  Ilots de chaleur non-accessible, sans intervention nécessaire
-  Ilots de chaleur accessible, intervention recommandée
-  Zone non-consideré comme un îlot de chaleur selon la définition, mais qui nécessiterait une intervention dû au ressenti de la température
-  Zone non-consideré comme un îlot de chaleur selon la définition et où l'action n'est pas nécessaire

1:70 000



# Carte de la classification de Localisation des Îlots de Chaleur de l'agglomération de Fribourg le 16.07.2022



Landsat 9 - Bandes 11, 10, 7 - Méthode de classification Localisation des Îlots de Chaleur  
ArcGIS PRO - Random Trees, Créé par Victor Zuccone

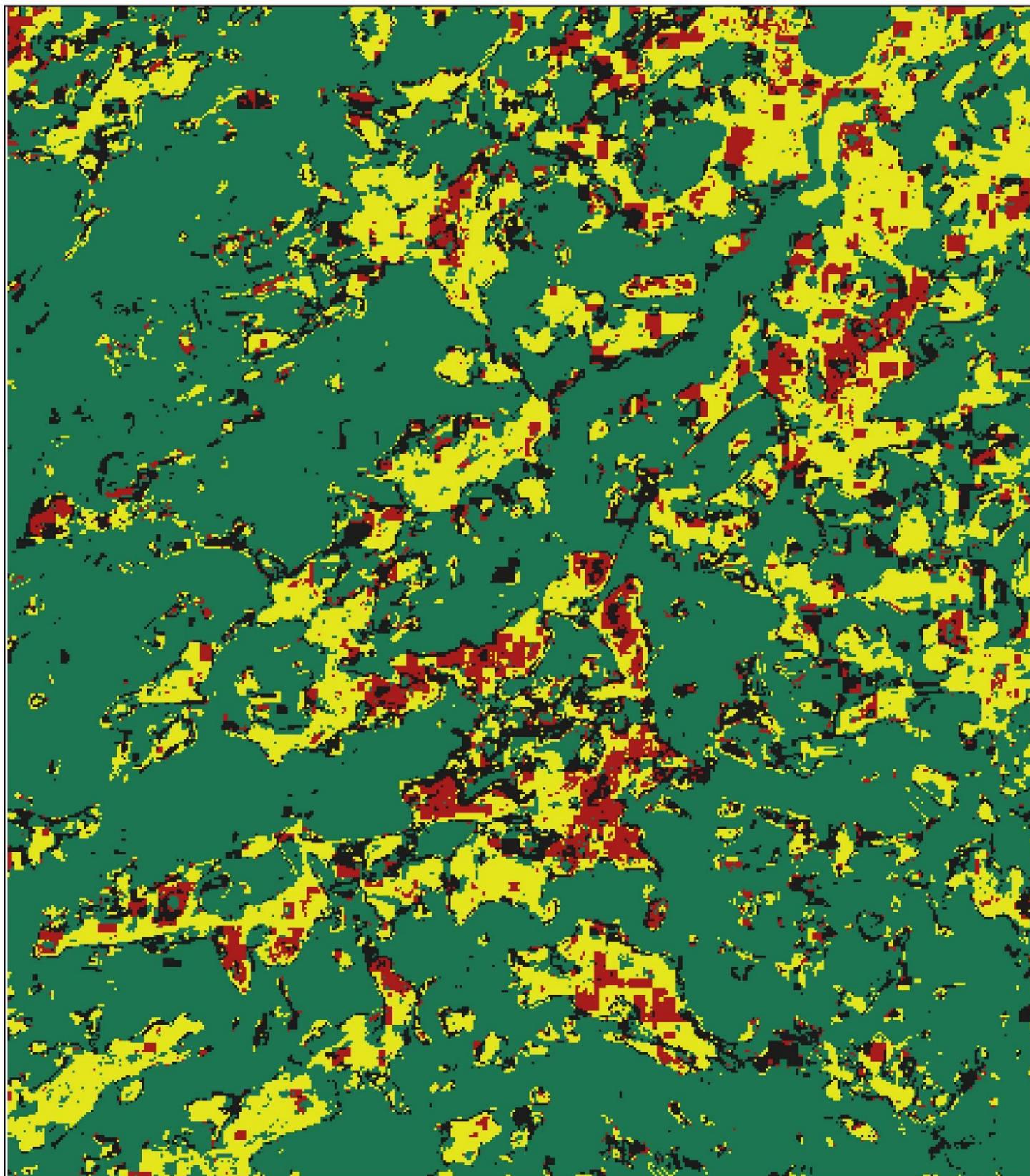
## Classes

-  Ilots de chaleur non-accessible, sans intervention nécessaire
-  Ilots de chaleur accessible, intervention recommandée
-  Zone non-consideré comme un îlot de chaleur selon la définition, mais qui nécessiterait une intervention dû au ressenti de la température
-  Zone non-consideré comme un îlot de chaleur selon la définition et où l'action n'est pas nécessaire

1:70 000



# Carte de la classification de Localisation des Îlots de Chaleur de l'agglomération de Fribourg le 16.07.2022



Landsat 9 - Bandes 11,10,7 - Méthode de classification Localisation des îlots de Chaleur  
ArcGIS PRO - Support Vector Machine, Créé par Victor Zuccone

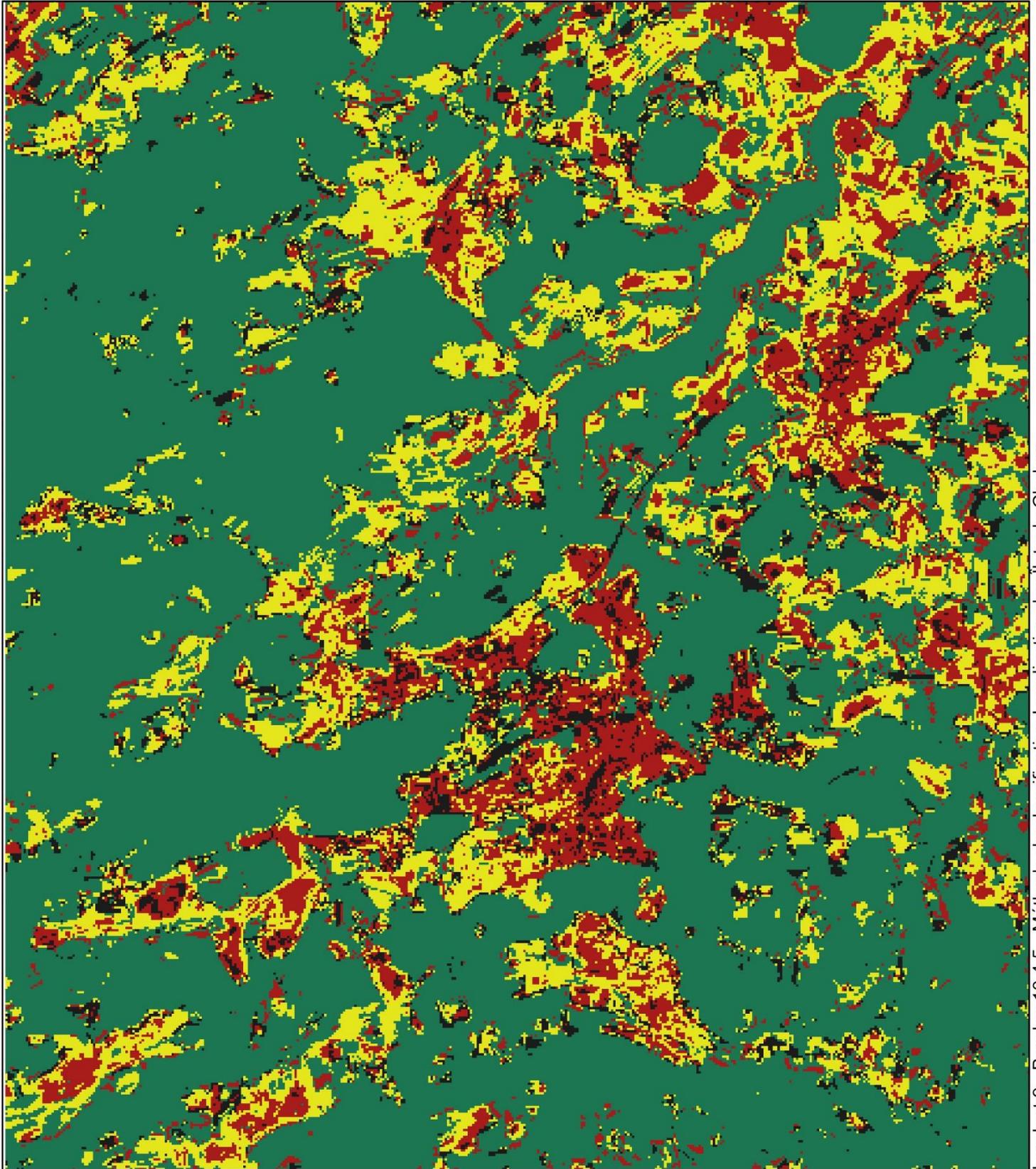
## Classes

-  Ilots de chaleur non-accessible, sans intervention nécessaire
-  Ilots de chaleur accessible, intervention recommandée
-  Zone non-consideré comme un îlot de chaleur selon la définition, mais qui nécessiterait une intervention dû au ressenti de la température
-  Zone non-consideré comme un îlot de chaleur selon la définition et où l'action n'est pas nécessaire

1:70 000



# Carte de la classification de Localisation des Îlots de Chaleur de l'agglomération de Fribourg le 16.07.2022



Landsat 9 - Bandes 10,4,5 - Méthode de classification Localisation des îlots de Chaleur  
ArcGIS PRO - Support Vector Machine, Créé par Victor Zuccone

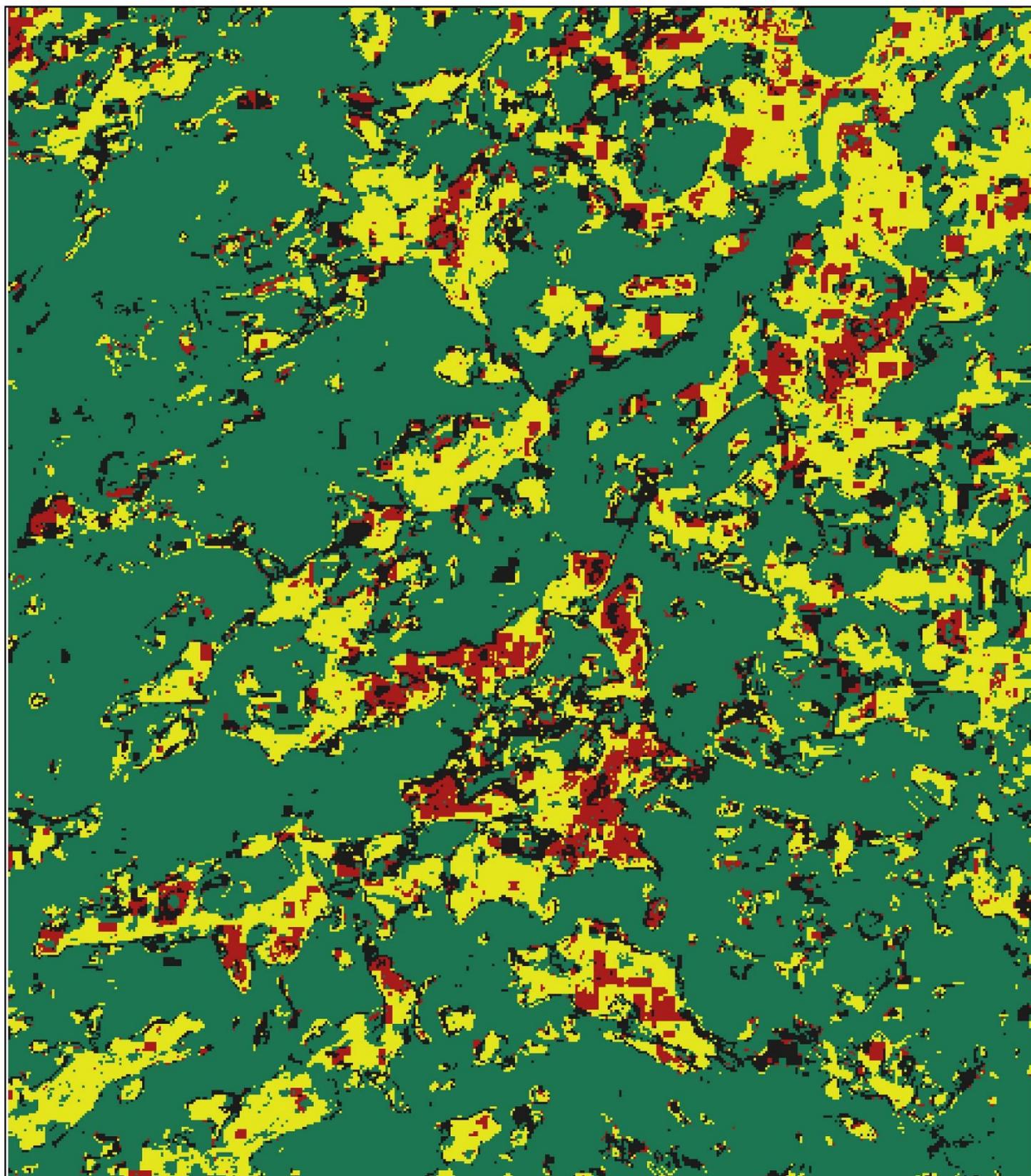
## Classes

-  Ilots de chaleur non-accessible, sans intervention nécessaire
-  Ilots de chaleur accessible, intervention recommandée
-  Zone non-consideré comme un îlot de chaleur selon la définition, mais qui nécessiterait une intervention dû au ressenti de la température
-  Zone non-consideré comme un îlot de chaleur selon la définition et où l'action n'est pas nécessaire

1:70 000



# Carte de la classification de Localisation des Îlots de Chaleur de l'agglomération de Fribourg le 16.07.2022



Landsat 9 - Bandes 11, 10, 7 - Méthode de classification Localisation des îlots de Chaleur  
ArcGIS PRO - Maximum Likelihood, Créé par Victor Zuccone

## Classes

-  Ilots de chaleur non-accessible, sans intervention nécessaire
-  Ilots de chaleur accessible, intervention recommandée
-  Zone non-consideré comme un îlot de chaleur selon la définition, mais qui nécessiterait une intervention dû au ressenti de la température
-  Zone non-consideré comme un îlot de chaleur selon la définition et où l'action n'est pas nécessaire

1:70 000



#### 8.4. Résultats de l'enquête

ObjectID,GlobalID,Quelle(s) est/sont la/les raison(s) du choix du/des lieu(x)  
 ?,Remarques,CreationDate,Creator,EditDate,Editor,Quelle(s) est/sont la/les raison(s) du choix de ce  
 lieu ? (Plusieurs réponses possibles) (1),"Autres, précisions (1) :",Quelle(s) est/sont la/les raison(s) du  
 choix de ce lieu ? (Plusieurs réponses possibles) (2),"Autres, précisions (2) :",Quelle(s) est/sont la/les  
 raison(s) du choix de ce lieu ? (Plusieurs réponses possibles) (3),"Autres, précisions (3)  
 :","Remarques,x,y

1,b8e8d3c5-8808-4038-8825-57491bf76534,,,4/3/2023 4:35:58 PM,,4/3/2023 4:35:58  
 PM,,"experience,deduction",,"experience,deduction",,experience,,,7.15154114638766,46.80291317  
 71463

2,90978454-126c-4036-843f-272d733c20ea,,,4/3/2023 4:46:47 PM,,4/3/2023 4:46:47  
 PM,,"experience,deduction",,"experience,deduction",,,,,7.15350441479024,46.8037165417796

3,e4051840-48cd-490f-84ba-db28c14ffdc1,,,4/3/2023 4:49:32 PM,,4/3/2023 4:49:32  
 PM,,"experience,deduction",,"experience,deduction",,deduction,, "J'imagine que lieux chauds sont  
 principalement les lieux bétonnés, sans arbres et sans ombre.  
 ",7.15621527492987,46.8048128003764

4,0959bc21-5642-481f-8cf7-759d68fe8fae,,,4/3/2023 5:06:38 PM,,4/3/2023 5:06:38  
 PM,,"experience,deduction",,"experience,deduction",,,,,7.15585645786631,46.8051192161288

5,570ff149-8fb8-4d4d-8ed8-8abb1743b9a0,,,4/3/2023 5:22:19 PM,,4/3/2023 5:22:19  
 PM,,"experience,deduction",,"experience,deduction",,Peu d'ombre et/ou de  
 verdure,"experience,deduction",,,,7.15266478424938,46.8026732085652

6,448dcc6f-0a49-413c-8d3a-99d0c4277299,,,4/3/2023 5:44:02 PM,,4/3/2023 5:44:02  
 PM,,deduction,,deduction,,experience,,,7.15107277758788,46.80112678586

7,4ecc66b4-9b39-45d5-8f51-bedf27df6e8a,,,4/3/2023 5:50:38 PM,,4/3/2023 5:50:38  
 PM,,deduction,Beaucoup de trafic,experience,,deduction,,,7.15566324438348,46.8047379807632

8,8be76d22-8a17-4f10-8091-c9a278853844,,,4/3/2023 5:56:51 PM,,4/3/2023 5:56:51  
 PM,,deduction,,deduction,,deduction,,,0,0

9,c5c1445f-4f48-4d96-8e1b-9d69d1d94341,,,4/3/2023 6:35:58 PM,,4/3/2023 6:35:58  
 PM,,experience,,experience,,experience,,,7.15613216727781,46.8049047221586

10,3641cc66-4576-4eb9-8ad5-c5b932d3832e,,,4/3/2023 6:52:20 PM,,4/3/2023 6:52:20  
 PM,,deduction,,deduction,,deduction,,,7.15352730878078,46.8038593069103

11,3eb915a3-d6de-4a80-8105-e6ef920eaeeb,,,4/4/2023 8:39:53 AM,,4/4/2023 8:39:53  
 AM,, "deduction,autre",Étude antérieur , "deduction,autre",Étude antérieure, "deduction,autre",Étude  
 antérieure,,0,0

12,485c5009-72f2-4904-8731-94bd2b552fd7,,,4/4/2023 11:10:55 AM,,4/4/2023 11:10:55  
 AM,,"experience,deduction",,"experience,deduction",,"experience,deduction",,,,7.15165988846725,4  
 6.8031815927855

13,11687ac7-0373-4503-856e-fb1e1050ea85,,,4/4/2023 12:58:18 PM,,4/4/2023 12:58:18  
 PM,,experience,,experience,,experience,, "souvent dans les lieux bien ouverts et où il n'y a que très  
 peu de végétation, donc peu d'ombre ou de fraîcheur",7.15091094098819,46.7949697671837

## Localisation des îlots de chaleur

14,6b416f56-fa12-4ece-88a2-119336edf928,,,4/7/2023 7:27:13 AM,,4/7/2023 7:27:13 AM,,experience,,deduction,,deduction,,,7.15690211021205,46.8047796751753

15,8222ca8c-6262-40b5-8911-96123931b764,,,4/15/2023 3:40:30 PM,,4/15/2023 3:40:30 PM,,experience,,experience,,experience,,,7.15566273386847,46.8053265053658

16,0a5cd678-b173-4801-85b4-f1381347b772,,,4/18/2023 11:59:19 AM,,4/18/2023 11:59:19 AM,,deduction,,deduction,,deduction,, "Il fait chaud aux endroits peu protégés par l'ombre, en l'occurrence les routes. Mais je ne peux pas dire quels sont les lieux les communes les plus chaudes car ça prend trop de temps de regarder l'aménagement de chaque commune et de les comparer",0,0

17,e9b4b325-d1f0-4b74-8d28-97e6a3bb06db,,,4/19/2023 5:19:21 AM,,4/19/2023 5:19:21 AM,,experience,,deduction,,experience,Place en face de la sortie de Fribourg Centre ,,7.15106390454244,46.7999348583063

18,84119225-f467-4e6f-84ef-a9097a0802f5,,,4/19/2023 4:15:22 PM,,4/19/2023 4:15:22 PM,,experience,"De manière générale, tout le Boulevard Pérolles est très chaud et je ne me rappelle plus où c'était le pire. Vers la gare ou vers le parc du Domino ?",experience,,experience,,,7.15211505155186,46.8009991004298

19,06fac2d6-5ced-41b7-899e-446775971e81,,,4/23/2023 6:21:45 AM,,4/23/2023 6:21:45 AM,,experience,, "experience,deduction" ,, "experience,deduction,lecture" ,,,7.11120812328597,46.8247965476579

20,645dcada-8848-46cb-82cc-d21de8fb2b04,,,4/23/2023 4:51:34 PM,,4/23/2023 4:51:34 PM,, "experience,deduction" ,,experience,,,,,7.10541281398774,46.8207644616355

21,983dc549-3f26-48b4-8303-dfc811968adb,,,4/26/2023 9:58:30 AM,,4/26/2023 9:58:30 AM,, "experience,deduction,lecture" ,,,,,,0,0

22,57560dbf-f4c6-46c9-8a2c-19f32b7bfb0b,,,4/26/2023 9:59:56 AM,,4/26/2023 9:59:56 AM,,experience,,,,,,0,0

23,2280f26a-1c5d-4174-8a2d-46e9fce1cd55,,,4/26/2023 10:02:34 AM,,4/26/2023 10:02:34 AM,, "experience,deduction" ,,,,,,0,0

24,be16e480-dfe7-4776-877f-ea8d3da9bb8a,,,4/26/2023 11:27:04 AM,,4/26/2023 11:27:04 AM,,experience,,,,,,0,0

25,758bd1cf-6ee2-466a-8642-019a46ec85fc,,,4/26/2023 11:27:44 AM,,4/26/2023 11:27:44 AM,,experience,,,,,,0,0

26,68ec24e9-1e48-426d-8a8a-54b8dd7f15d3,,,4/26/2023 11:29:22 AM,,4/26/2023 11:29:22 AM,,experience,,,,,,0,0

27,f987cc66-2697-4ae2-888c-1d6fcd8b07,,,4/26/2023 11:30:27 AM,,4/26/2023 11:30:27 AM,,experience,,,,,,0,0

28,cde08536-5567-4d92-8f11-9deff4073b9c,,,4/26/2023 11:32:01 AM,,4/26/2023 11:32:01 AM,,experience,,,,,,0,0

29,311b3cb2-d536-47d4-830b-324e746dfcc4,,,4/26/2023 12:11:42 PM,,4/26/2023 12:11:42 PM,,experience,,,,,,7.15156780153702,46.8032929509063

30,b7d1890d-5250-4ec5-8cf2-5672e454b4d5,,,4/26/2023 12:12:35 PM,,4/26/2023 12:12:35 PM,,experience,,,,,,,,7.15362110577658,46.7980172346194

31,ef240940-66a9-46d6-85ab-f79891558164,,,4/26/2023 12:13:10 PM,,4/26/2023 12:13:10 PM,,experience,,,,,,,,7.15452667591703,46.8025680045256

32,e92d2023-7dd0-438e-8123-3e0bcf2fc447,,,4/26/2023 12:14:01 PM,,4/26/2023 12:14:01 PM,,experience,,,,,,,,7.14971391775652,46.7986820732081

33,a6baeaeab-4107-4419-89f9-0b5caedc014c,,,4/26/2023 12:14:43 PM,,4/26/2023 12:14:43 PM,,experience,,,,,,,,7.11186899146089,46.8249364114499

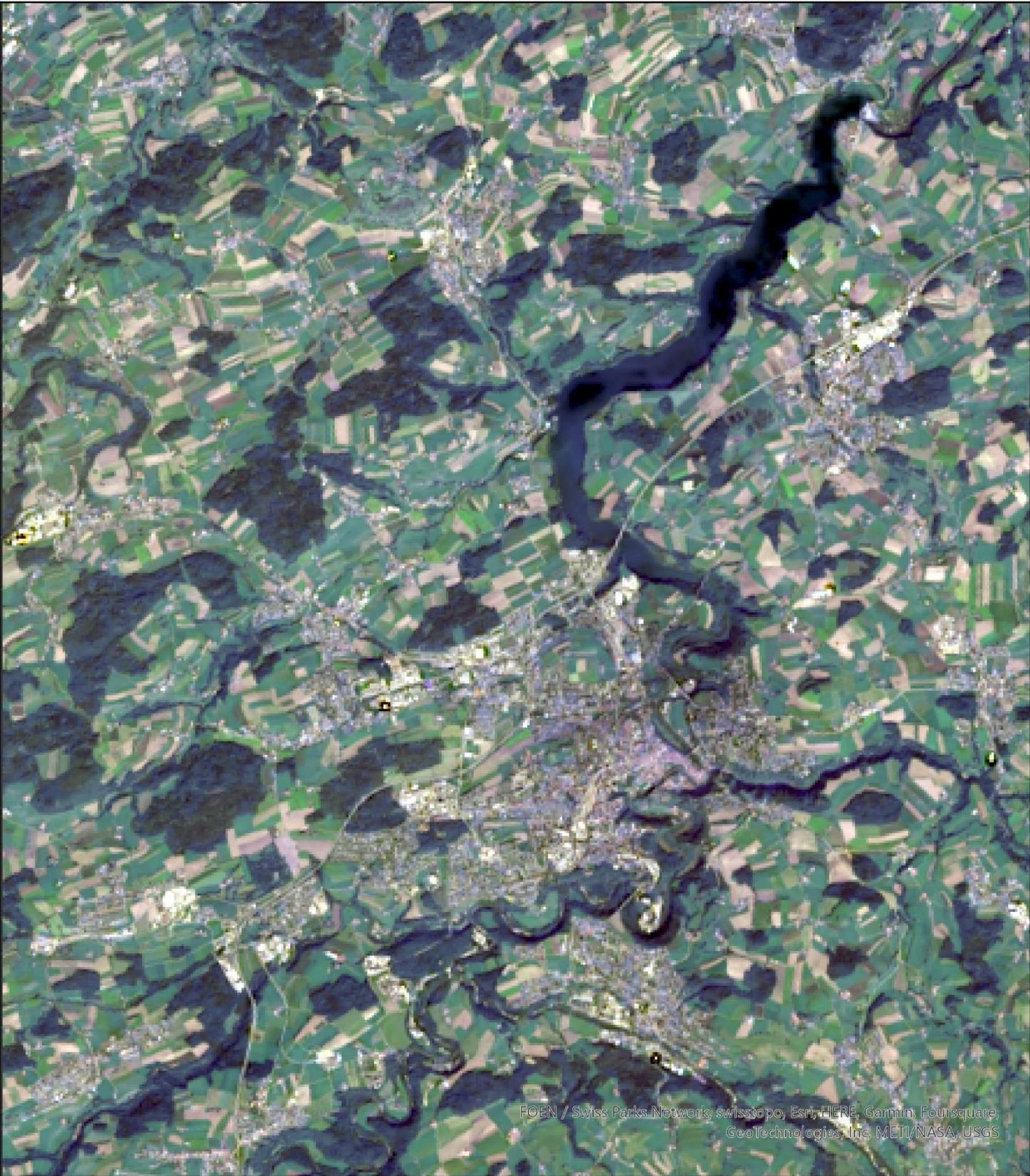
34,e114321d-5c75-419c-8149-32f873fe67dd,,,4/26/2023 12:15:28 PM,,4/26/2023 12:15:28 PM,,experience,,,,,,,,7.11221394868565,46.8305026411157

35,490542ce-a15b-40b0-8719-eb5e26e47181,,,4/26/2023 12:16:14 PM,,4/26/2023 12:16:14 PM,,experience,,,,,,,,7.1548403328168,46.8026082403335

36,885a0867-54db-4b1d-8fd0-0b063da8a26d,,,4/26/2023 12:17:48 PM,,4/26/2023 12:17:48 PM,,experience,,,,,,,,7.15305709246575,46.79908889196

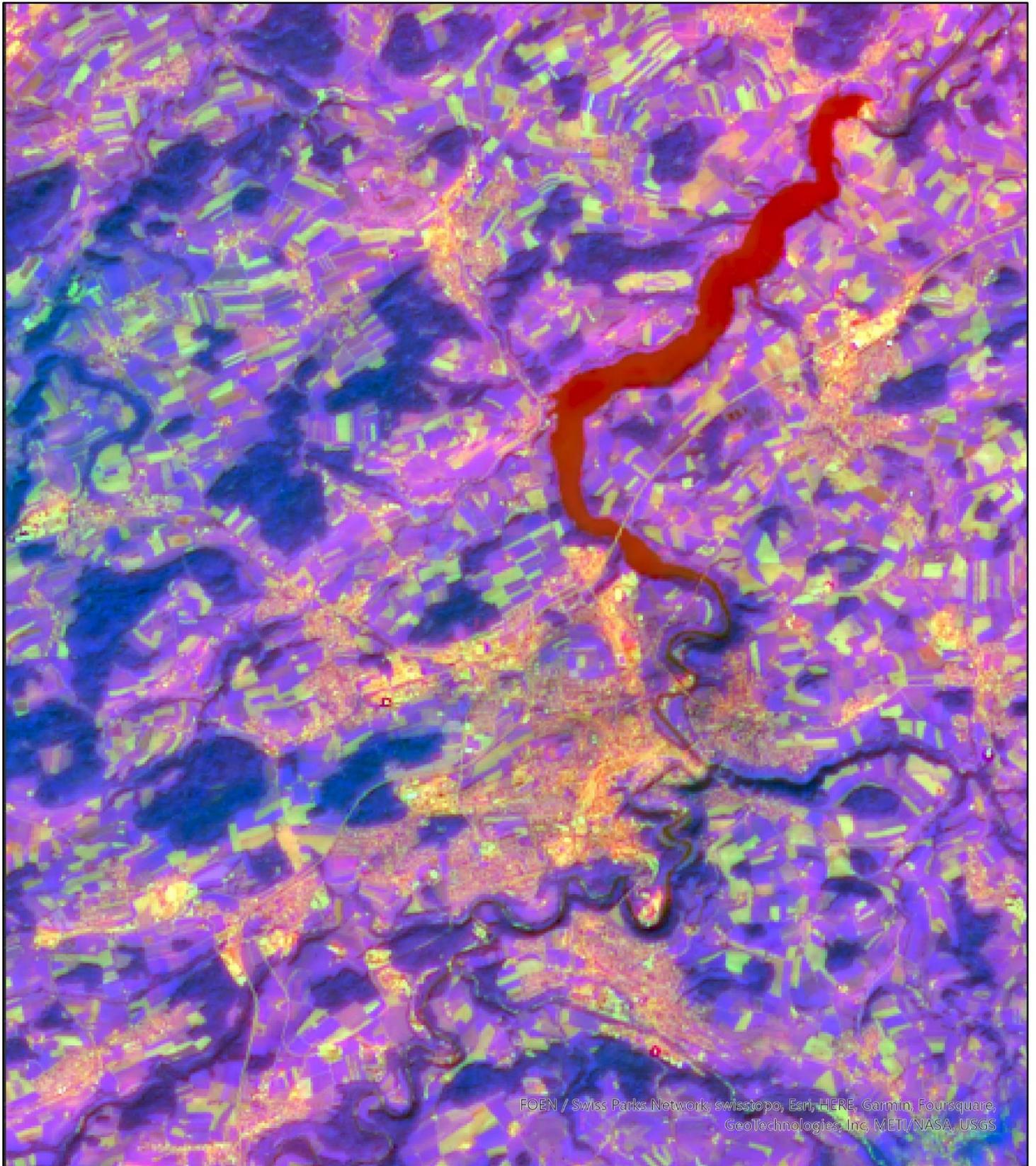
## 8.5. Images composites et fichier d'entraînement

# Image Composite 4,3,2



FOEN / Swiss Parks Network, swisstopo, Esri, HERE, Garmin, Foursquare, GeoTechnologies, Inc, METI/NASA, USGS

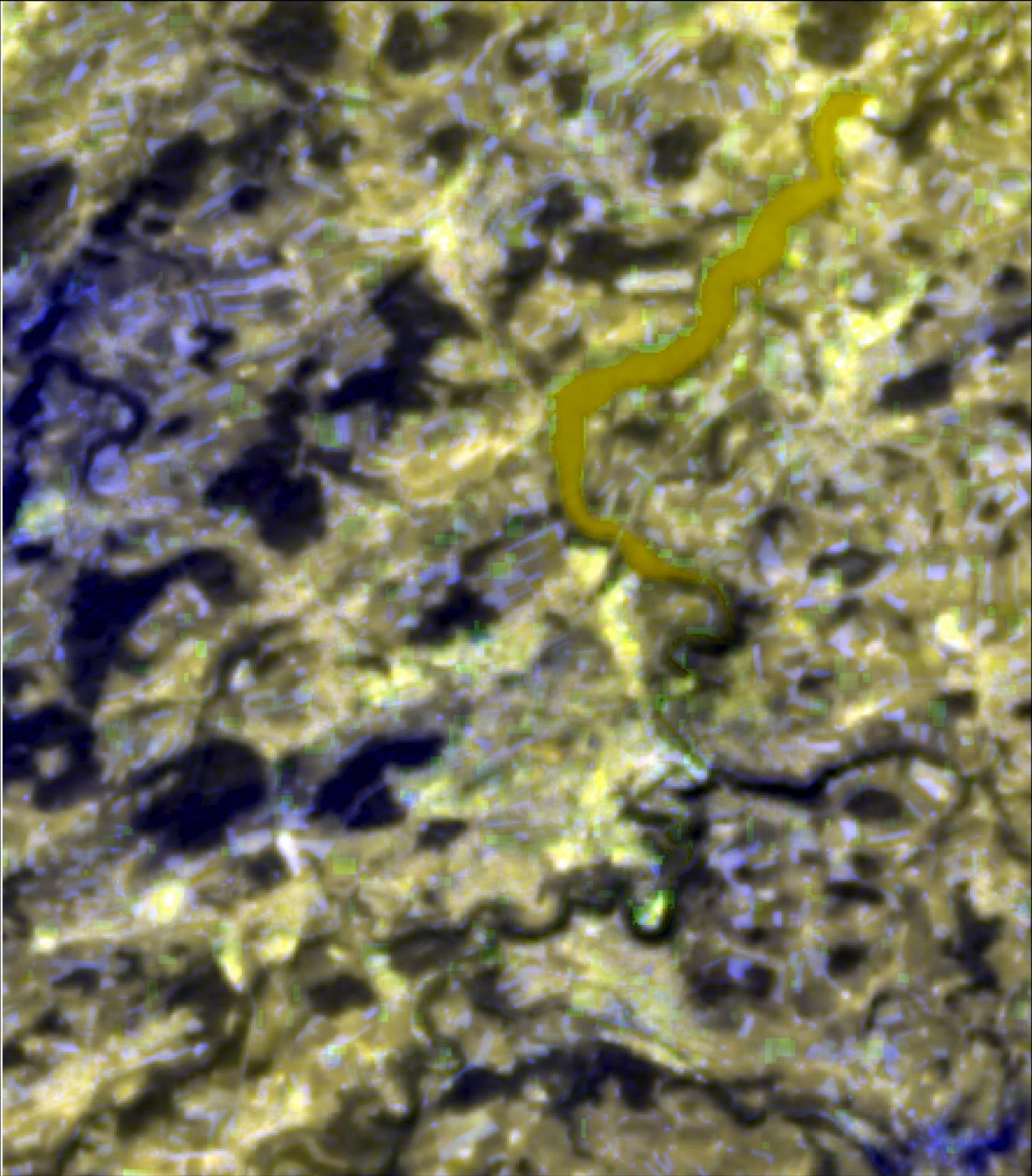
# Image Composite 10,4,5



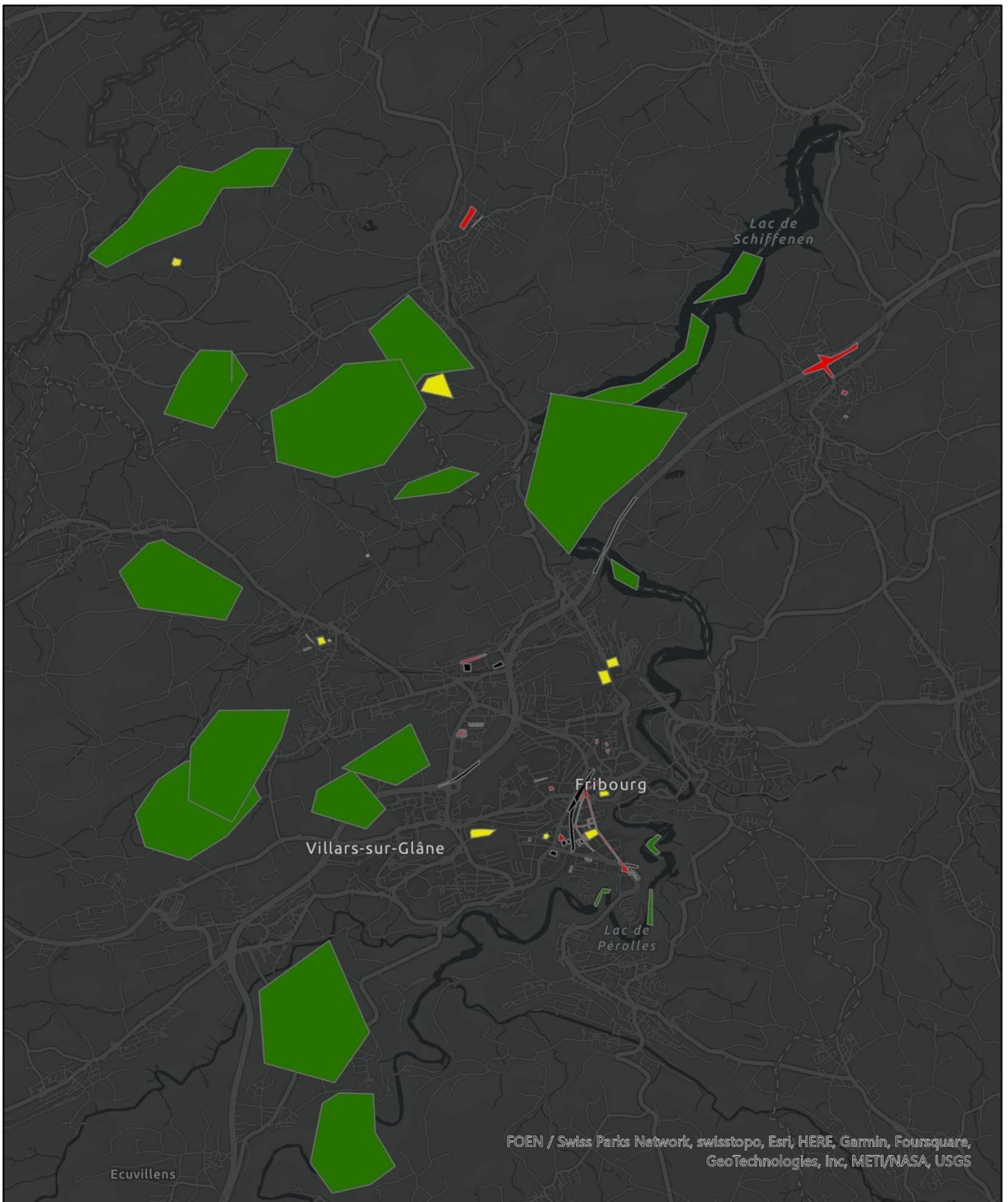
1:70 000



Image Composite 11,10,7



# Carte du fichier d'entrainement pour les différentes méthodes de classifications



-  Ilots de chaleur non accessibles, sans intervention nécessaire
-  Ilots de chaleur accessibles, intervention recommandée
-  Zone non considérée comme un îlot de chaleur selon la définition, mais qui nécessiterait une intervention dû au ressenti de la température
-  Zone non considérée comme un îlot de chaleur selon la définition et/ou l'action n'est pas nécessaire

1:70 000



FOEN / Swiss Parks Network, swisstopo, Esri, HERE, Garmin, Foursquare, GeoTechnologies, Inc, METI/NASA, USGS

