



Städtische Wärmeinsel und thermischer Komfort in der Eurometropole Straßburg: Fallstudie zur Hitzespitze vom 18. bis 20. Juni 2022.

Sacha ROSSET, Fakultät für Geographie und Raumplanung, Straßburg
David PELOT, Ingenieur für Meteorologie, Météo France/Clim'Ability Design

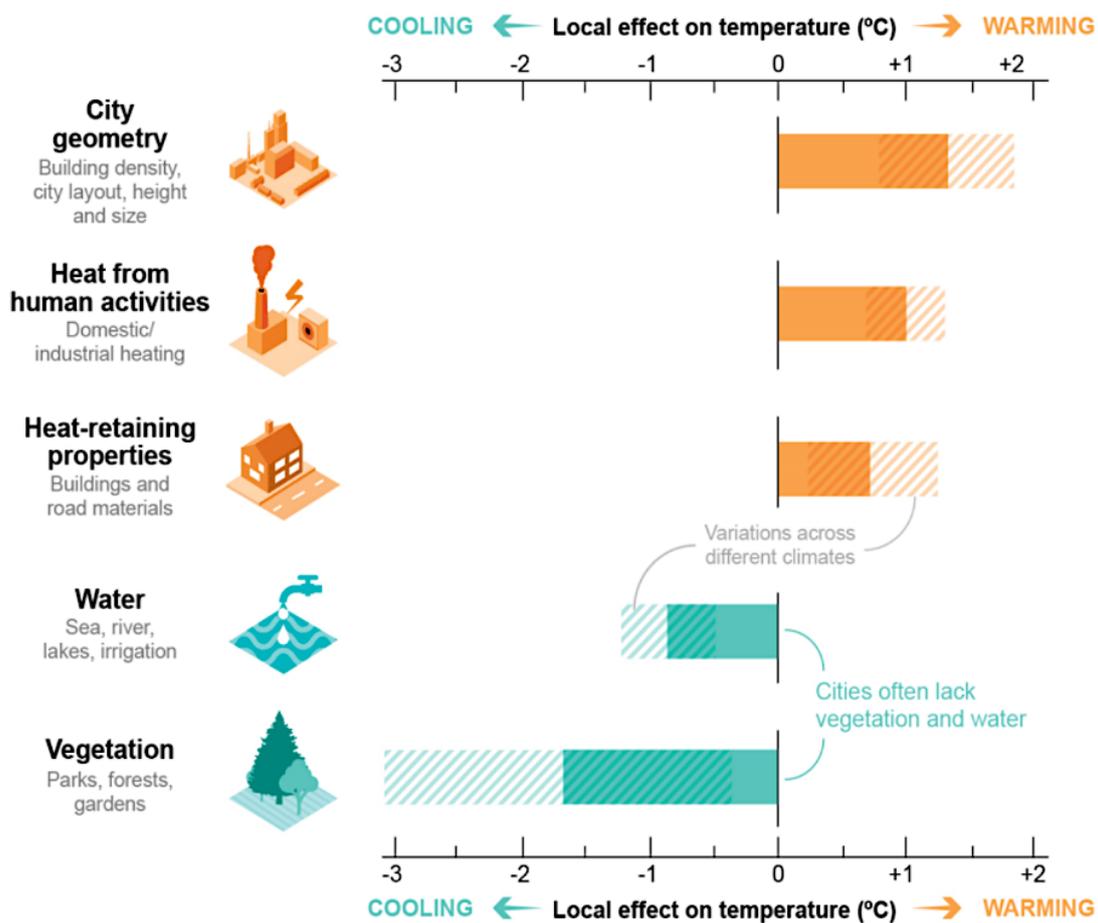


Innovationspark Illkirch

1. Zusammenfassung

Bereits in der ersten Woche des Praktikums, das am 08. Juni 2022 beginnt, kündigt Meteo France die Möglichkeit einer für die Jahreszeit sehr frühen starken Hitzewelle in fast ganz Frankreich an. Da diese Hitzewelle bereits mehrere Tage im Voraus erwartet wurde, konnten wir im Rahmen des Praktikums eine Messkampagne durchführen, um das Phänomen der städtischen Wärmeinsel für einen Teil der Eurometropole Straßburg zu bewerten.

Das Ziel dieses Artikels ist es, in einem ersten Teil dieses Phänomen der städtischen Wärmeinsel (HI) mit kartographischen Werkzeugen zu veranschaulichen, um neue Methoden für die Untersuchung und Analyse vorzuschlagen. Im zweiten Teil geht es um eine Feldstudie, die während des Monats Juni im Innovationspark Illkirch durchgeführt wurde, um das Phänomen der städtischen Wärmeinsel, ihre Auswirkungen und ihre Funktionsdynamik besser zu verstehen. Diese Daten werden mit denen anderer Sensoren in der Eurometropole Straßburg und von Wetterstationen in der Nähe verglichen.



Städte und Klimawandel; IPCC AR6 Kapitel 10

2. Einführung

Die rasante Entwicklung unseres Klimas in den letzten Jahrzehnten hat zu erheblichen Veränderungen in der Häufigkeit, Intensität und Dauer extremer Wetterereignisse geführt. In Frankreich und insbesondere in der Region Elsass bilden Hitzewellen keine Ausnahme: Zwischen 1947 und 1999 wurden 11 Hitzewellen beobachtet, seit Beginn des 21. Jahrhunderts sind es 23. Eine Hitzewelle äußert sich durch ungewöhnlich warme Mindest- und Höchsttemperaturen, die an mehreren aufeinanderfolgenden Tagen auftreten. Sie kann dazu führen, dass der Wetterdienst Météo France eine Wetterwarnung ausgibt.

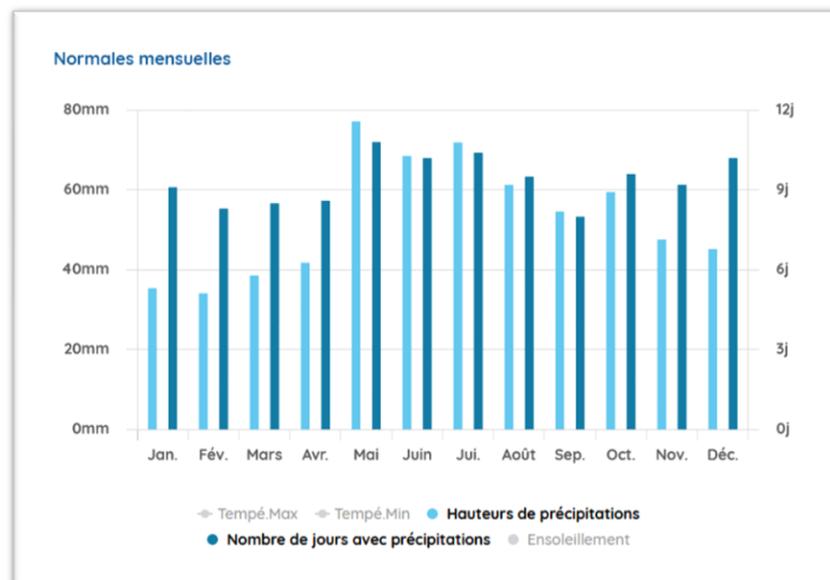
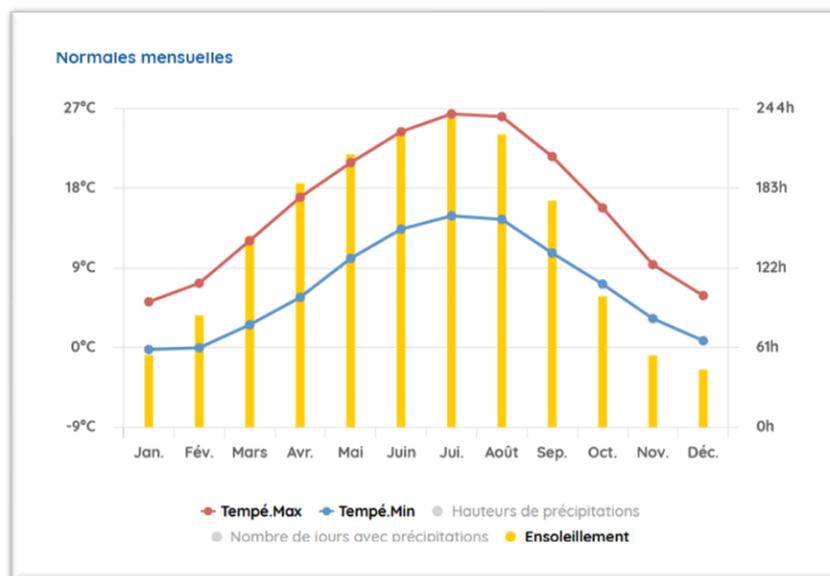
Im Rahmen des Projekts Clim'Ability Design wurde festgestellt, dass diese Hitzewellen in der Sommersaison die Hauptsorge der Unternehmen in der Region sind, wobei alle meteorologischen Unwägbarkeiten, die sich auf sie auswirken können, berücksichtigt wurden. Die Kombination aus großer Hitze am Tag und tropischen Nächten (Temperaturen nicht unter 20°C) ist besonders gesundheitsschädlich, da sie den Hitzestress verstärkt. Betroffen sind vor allem gefährdete Bevölkerungsgruppen, jedoch kann die Gesundheit der gesamten Bevölkerung bei einer schweren Hitzewelle beeinträchtigt werden. Hitzewellen haben starke Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit: Hitzschlag, Müdigkeit, Konzentrationsschwierigkeiten, Dehydrierung. Die Humanressourcen des Unternehmens sind daher von der Zunahme dieses Phänomens stark betroffen und können Auswirkungen auf die Organisation des Unternehmens haben.

Die Auswirkungen von Hitzewellen werden in Städten durch ein Phänomen verschärft, das als "städtische Wärmeinsel" bezeichnet wird. Die städtische Hitzeinsel ist insbesondere auf das Fehlen von Vegetation in der Stadt zurückzuführen. Tagsüber auf dem Land nutzt die Vegetation Wasser und Sonnenenergie für die Photosynthese. Die Vegetation "schwitzt" und verdunstet dabei das in der Tiefe des Bodens vorhandene Wasser. Dank dieser Evapotranspiration speichern Pflanzen und Böden die im Laufe des Tages erhaltene Sonnenenergie nicht. In Städten wird die Sonnenenergie stattdessen in den Materialien der Gebäude und dem Asphalt von Straßen und Parkplätzen gespeichert, da diese undurchlässigen Oberflächen die Verdunstung des Bodenwassers verhindern. Wenn die Nacht anbricht, wird diese Energie an die städtische Atmosphäre abgegeben. Nachts kühlt die Luft über der Stadt daher weniger schnell ab als auf dem Land.

Der Temperaturunterschied zwischen Stadt und Land ist daher in der Mitte der Nacht am größten. Im Allgemeinen beginnt die städtische Wärmeinsel am späten Nachmittag zu wachsen, nimmt bei Sonnenuntergang zu und erreicht ihr Maximum in der Mitte der Nacht. In ruhigen Nächten entsteht dann eine Art "Wärmeblase" über der Stadt.

3. Klimatischer Hintergrund für die Eurométropole Straßburg

Die Eurometropole Straßburg liegt auf etwa 150 m Höhe im Rheingraben, zwischen den Vogesen im Westen und dem Schwarzwaldmassiv im Osten. In der Region Straßburg herrscht ein halbkontinentales Klima. Die Sommer sind heiß mit ausgeprägten Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht, und die Winter sind manchmal hart mit einer höheren Anzahl an Frost- und Schneetagen als im übrigen Frankreich. Die jährlichen Niederschlagsmengen sind im Vergleich zu den anderen französischen Regionen gering und unregelmäßig. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Vogesenmassiv einen natürlichen Schutz vor den vorherrschenden Westwinden bietet (Föhnwind), insbesondere im Winter, wenn die Niederschläge hauptsächlich auf Störungen vom Atlantik zurückzuführen sind. Im Sommer hingegen regnet es aufgrund der vorherrschenden Gewitter mehr. Die vorherrschenden Winde kommen aus dem Süden und aus dem Norden, also parallel zum Oberrheingraben.



Monatsnormale 1991-2020 für Strasbourg-Entzheim; Météo France

4. Methodik

4.1. Städtische Wärmeinsel in der Eurometropole Straßburg

Dieser Artikel soll bereits durchgeführte Studien zum Phänomen der städtischen Wärmeinsel für die Eurometropole Straßburg ergänzen. Tatsächlich gibt es mehrere Modellierungen der UHK in Straßburg, wie die Arbeiten von ADEUS aus dem Jahr 2019 oder die 2010 erschienenen Arbeiten von Pierre Kastendeuch, Georges Najjar, Pierre Lacarrere und Jérôme Colin.

Diese Arbeiten basieren in der Regel auf dem Konzept der "Local Climate Zones)", von denen die Eurométropole de Strasbourg ein Tool entwickelt hat, mit dem sie auf ihrem Gebiet visualisiert werden können. Dieses System zur Klassifizierung von städtischen und ländlichen Standorten ermöglicht es, homogene räumliche Einheiten nach der Bodenbedeckung und der Art der Bebauung, sofern vorhanden, zu definieren. Jede LCZ erzeugt ein spezifisches Klima auf einer Fläche, die nicht größer als einige Quadratkilometer ist.

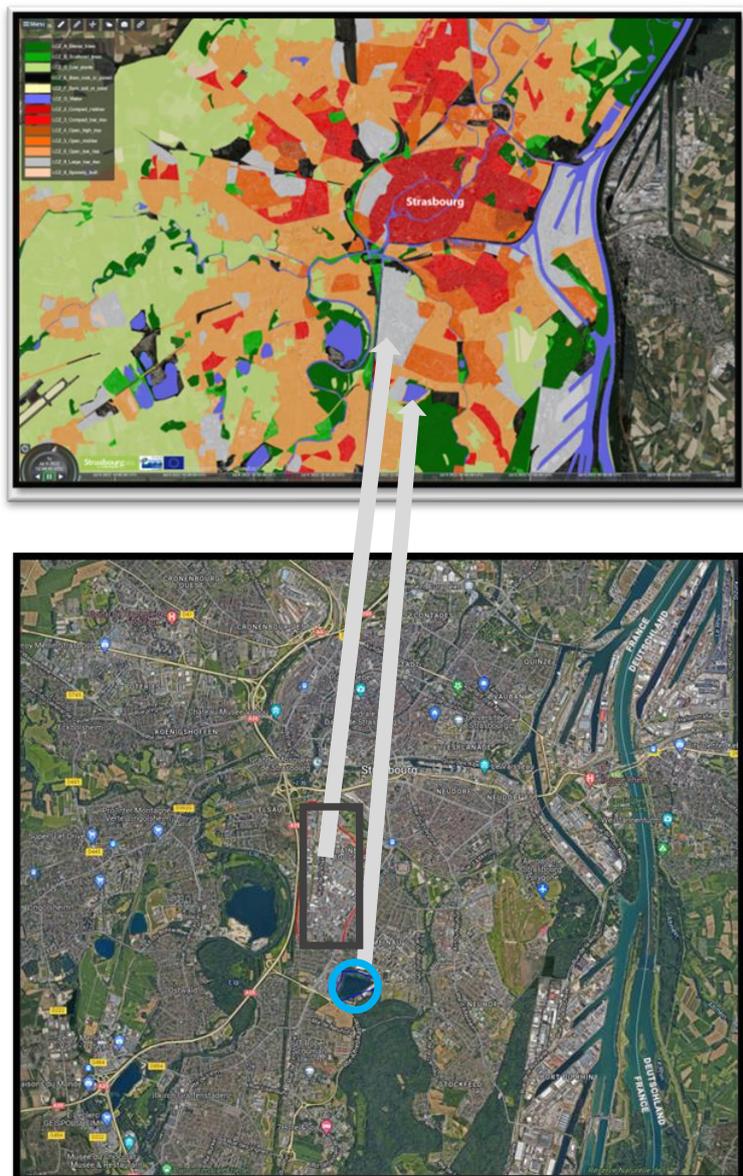
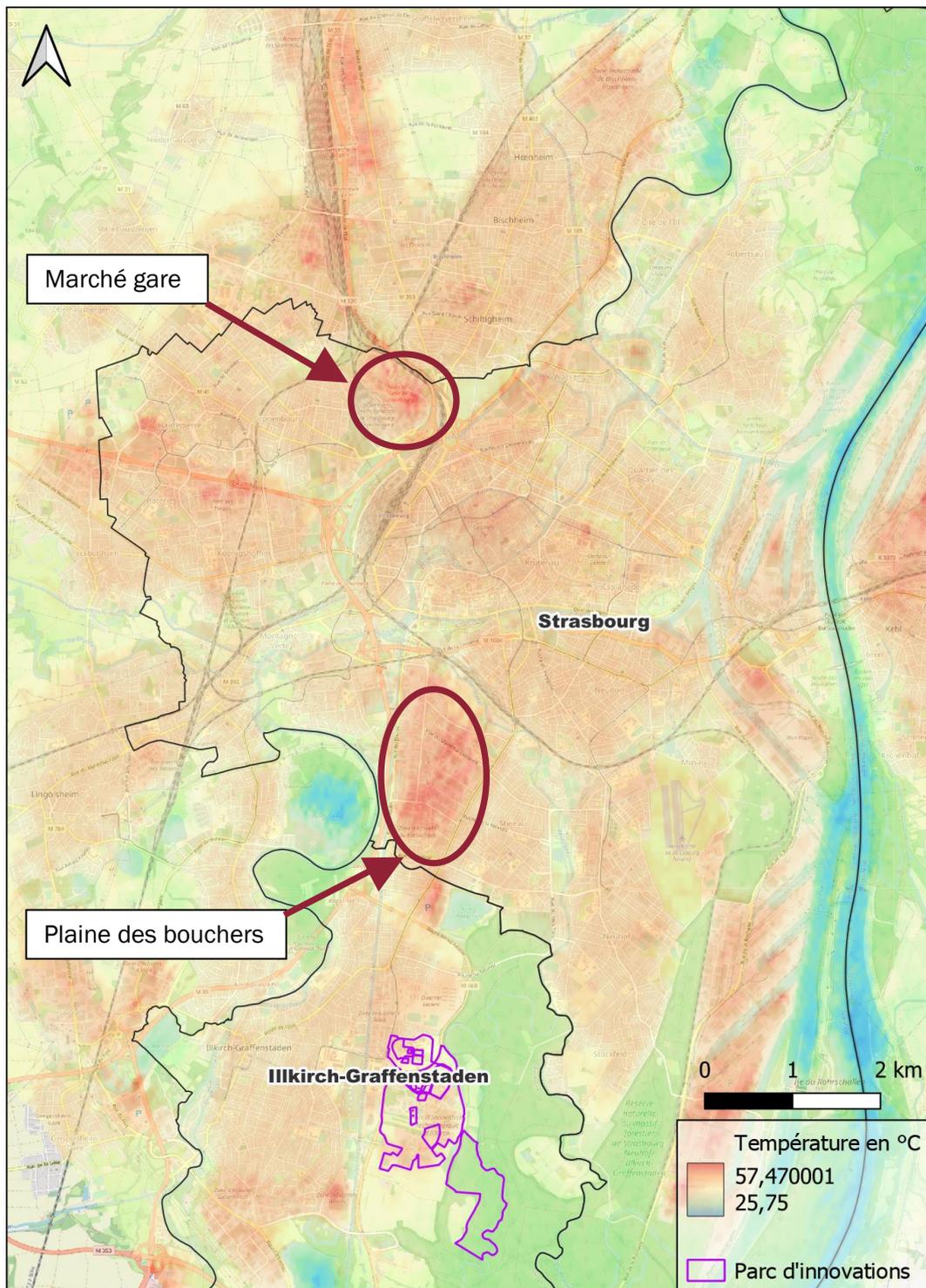


Illustration der LCZ mit der Metzgerebene (vegetationsarmes Industriegebiet mit breiten, aber nicht sehr hohen Gebäuden) und dem Baggersee ; Google Maps



Oberflächentemperaturen gemessen am 15. Juni 2022 um 21 : 23 Uhr; Ecostress

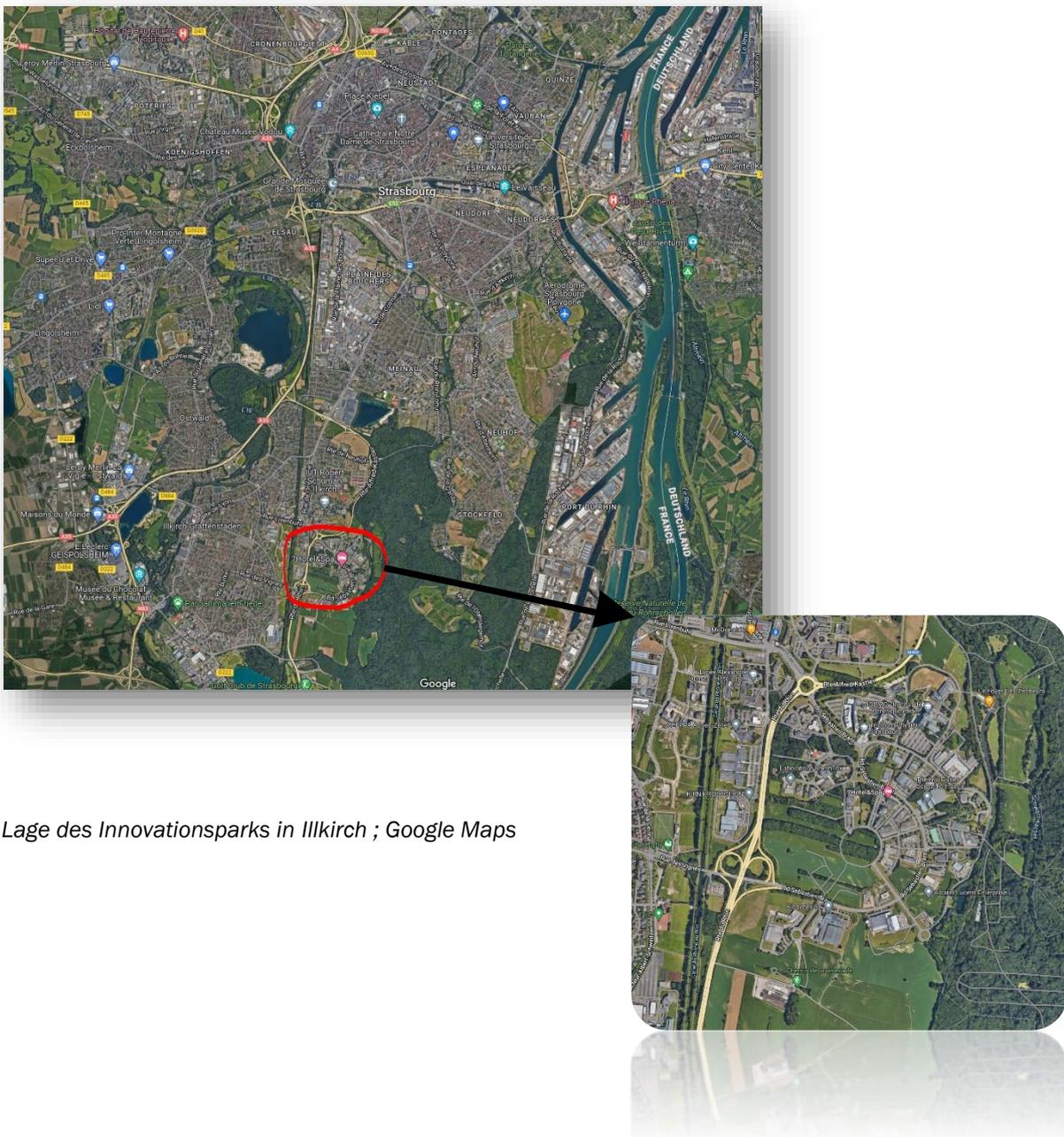
Die obige Karte wurde mithilfe von Daten der wissenschaftlichen ECOSTRESS-Mission erstellt, die vom Jet Propulsion Laboratory der NASA eingerichtet wurde. Die ECOSTRESS-Instrumente an Bord der Internationalen Raumstation ISS liefern genaue und regelmäßig aktualisierte Daten zu den Oberflächentemperaturen. Die Daten wurden anschließend mithilfe der Software QGIS auf einer Hintergrundkarte implementiert.

Für die Erstellung dieser Karte war es relevant, Temperaturdaten zu erhalten, die am frühen Abend gemessen wurden. Daher musste ein aktuelles Bild gefunden werden, das am frühen Abend und ohne Wolkenbedeckung aufgenommen wurde. Das verwendete Bild stammt vom 15. Juni

2022 und wurde um 21:23 Uhr aufgenommen. Der 15. Juni wurde gewählt, da die Tagestemperaturen selbst am späten Nachmittag relativ hoch waren (31,7°C Höchstwert, gemessen an der Wetterstation des Flughafens Entzheim), was ein wichtiges Kriterium für das Auftreten einer städtischen Wärmeinsel ist. Die Wolkendecke war nicht stark, was für zuverlässige Daten zu den Oberflächentemperaturen notwendig ist.

Die Karte hebt die Vegetationszonen und die Hydrographie sowie ihre Rolle bei der Temperatursenkung gut hervor, die durch blaue und grüne Farben dargestellt werden. Im Gegensatz dazu befinden sich die Hotspots auf der Karte in sehr mineralischen Gebieten mit einer hohen Gebäudedichte, wärmeabgebenden anthropogenen Aktivitäten sowie einem Mangel an Wasser und Vegetation. Der Markt am Bahnhof und das Industriegebiet Plaine des Bouchers wurden als die heißesten Orte am frühen Abend identifiziert.

4.2. Fallstudie für den Innovationspark Illkirch

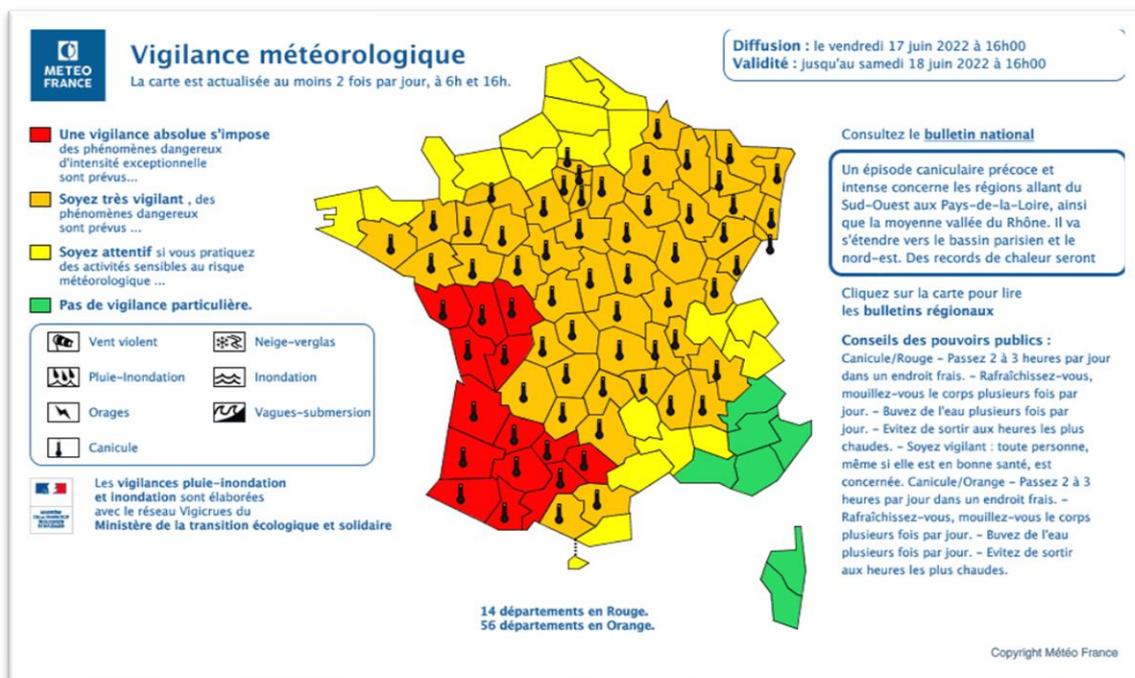


Lage des Innovationsparks in Illkirch ; Google Maps

Der Innovationspark Illkirch befindet sich einige Kilometer südlich des Stadtzentrums von Straßburg in der Gemeinde Illkirch-Graffenstaden. Er erstreckt sich über eine Gesamtfläche von 170 Hektar, wovon 200.000 m² bebaut sind. Auf dem Gelände befinden sich etwa 100 Unternehmen mit einer Gesamtbelegschaft von 8000 Personen vor Ort, davon 3000 abhängig Beschäftigte. Die Tätigkeitsbereiche der Unternehmen liegen überwiegend im Bereich der Biowissenschaften, andere in den Bereichen Informations- und Kommunikationstechnologien, Umwelt oder auch Verkehr.

Die Wahl unserer Studie in diesem Sektor ist also durch die Anwesenheit zahlreicher Unternehmen aus verschiedenen Tätigkeitsbereichen begründet, darunter auch Météo France Nord-Est, das seine Räumlichkeiten im Innovationspark hat. Tatsächlich arbeitet das Projekt Clim'Ability Design mit Unternehmen (ausschließlich Kleinunternehmen und KMU) zusammen, um gemeinsam mit ihnen ihre Verwundbarkeiten im Hinblick auf den Klimawandel zu ermitteln. Die zahlreichen im Rahmen des Projekts durchgeführten Diagnosen haben gezeigt, dass die Mehrheit der Unternehmen am Oberrhein sehr anfällig für Hitzewellen ist.

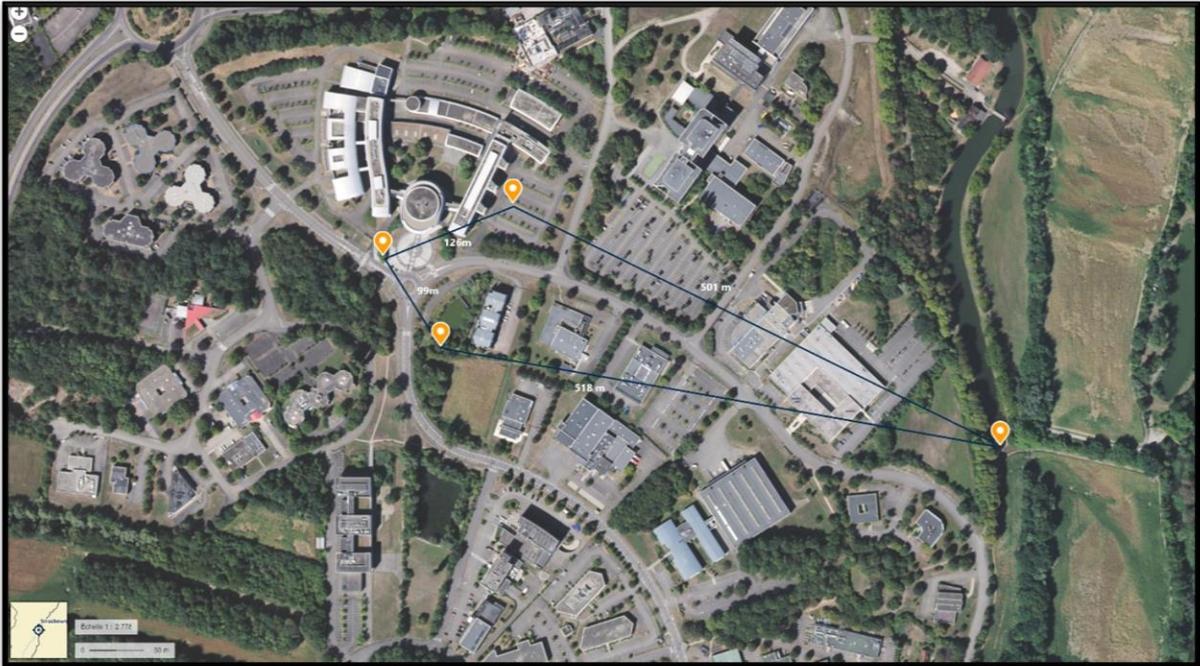
Die Hauptziele bestehen darin, die Auswirkungen einer Hitzewelle auf lokaler Ebene für das Gebiet des Innovationsparks sowie deren Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit zu messen. Zu diesem Zweck wurde eine mehrtägige Messkampagne bei Ankündigung einer Hitzespitze Mitte Juni 2022 durchgeführt. Am Freitag, dem 17. Juni, wurde um 16 Uhr eine orangefarbene Hitzewarnung ausgerufen, die im Elsass eine Hitzespitze mit für die Jahreszeit extrem heißen Temperaturen vorhersagte. Die Wetterlage war also günstig für die Durchführung unserer Studie.



Wetterwarnung ausgegeben am Freitag, 17. Juni 2022 um 16 Uhr ; Météo France

Während der gesamten Messkampagne sammelten wir die Daten von 2 meteorologischen Parametern: Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit. Die Messungen begannen am Freitag, den 17. Juni um 12 Uhr und endeten am Montag, den 20. Juni um 12 Uhr, mit einem Zeitschritt von einer Minute zwischen den einzelnen Messungen. Insgesamt wurden 4 Sensoren im Innovationspark an Orten aufgestellt, an denen sich die Landnutzung und die Umgebung um die Sensoren herum ziemlich voneinander unterschieden. Die Wahl der Sensorstandorte wurde auch durch die regelmäßige Anwesenheit von Personen motiviert, die potenziell Hitzestress ausgesetzt sind.

Die verwendeten Sensoren waren TESTO 174H Datenlogger mit einer Genauigkeit der Temperatur- und Feuchtigkeitsmessung von $\pm 0,5$ °C bzw. ± 3 %rF. Sie wurden an schattigen Orten aufgestellt, idealerweise vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt, dem Wind ausgesetzt und etwa 1,5 m über dem Boden. Die Sensoren lagen mit weniger als 100 m Abstand relativ nah beieinander, abgesehen von dem Sensor, der 500 m weiter entfernt am Chemin du Routoir platziert war.



Standorte der 4 Sensoren auf dem Innovationspark ; Geoportal

Ein erster Sensor wurde in der Nähe der Picknicktische im baumbestandenen Bereich der Räumlichkeiten von Météo-France Nord-Est installiert. Er wurde in einem Baum etwa 2 Meter über dem fast nackten Boden am Boulevard Gonthier d'Andernach, 67400 Illkirch-Graffenstaden (48° 31' 28.31" N 7° 44' 17.6" E) platziert.



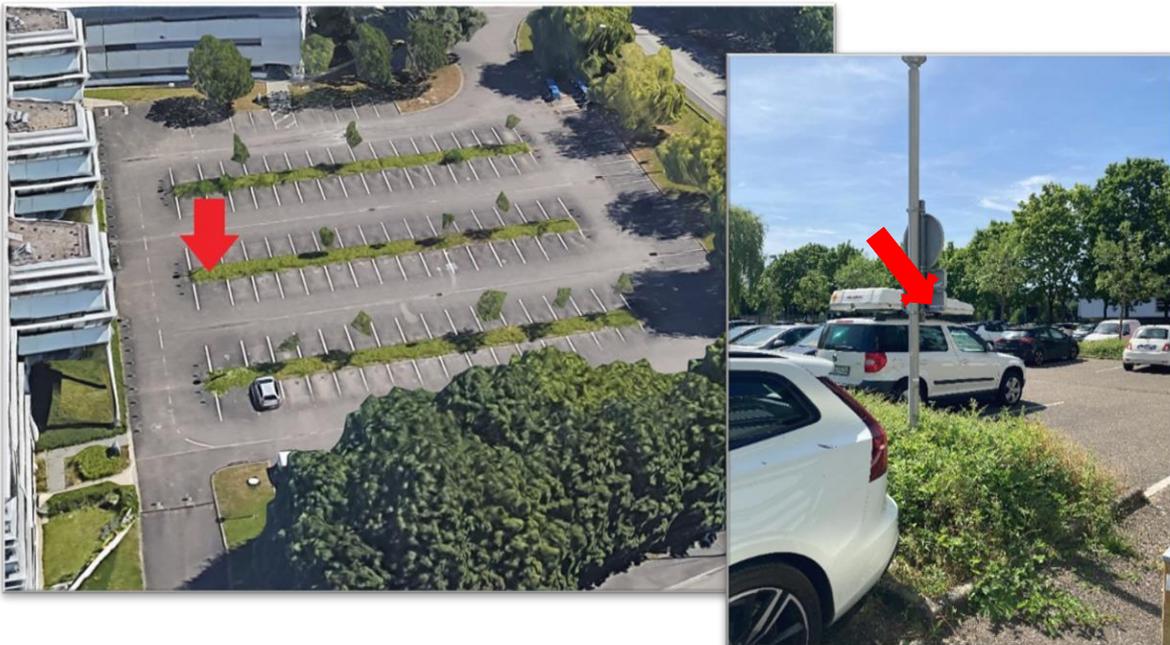
Standort des Sensors bei Météo France ; Google Earth

Ein zweiter Sensor wurde auf dem Vorplatz von Télécom Physique Strasbourg in einem Baum in etwa 2 m Höhe und über einem kleinen, von Beton umgebenen Grasfeld installiert. Die Adresse lautet: pôle API boulevard Sébastien Brant, 67400 Illkirch-Graffenstaden (48° 31' 31.19" N 7° 44' 14.31" E).



Standort des Sensors bei Télécom Physique ; Google Earth

Ein dritter Sensor wurde auf dem Parkplatz der École Supérieure de Biotechnologie de Strasbourg (ESBS) an einem Metallschild installiert, das auf einem hohen Grasweg etwa 1,5 Meter über dem Boden angebracht war, Pôle API, 300 boulevard Sébastien Brant, 67400 Illkirch-Graffenstaden (48° 31' 32.84" N 7° 44' 19.67" E).



Standort des Sensors auf dem ESBS-Parkplatz ; Google Earth

Der vierte und letzte Sensor wurde in einem Wäldchen am Ufer eines Gewässers in einem Baum in 1 m Höhe auf dem chemin du Routoir, 67400 Illkirch-Graffenstaden (48° 31' 25.83" N 7° 44' 42.23" E) installiert.



Standort des Sensors chemin du Routoir ; Google Earth

5. Analyse der Ergebnisse

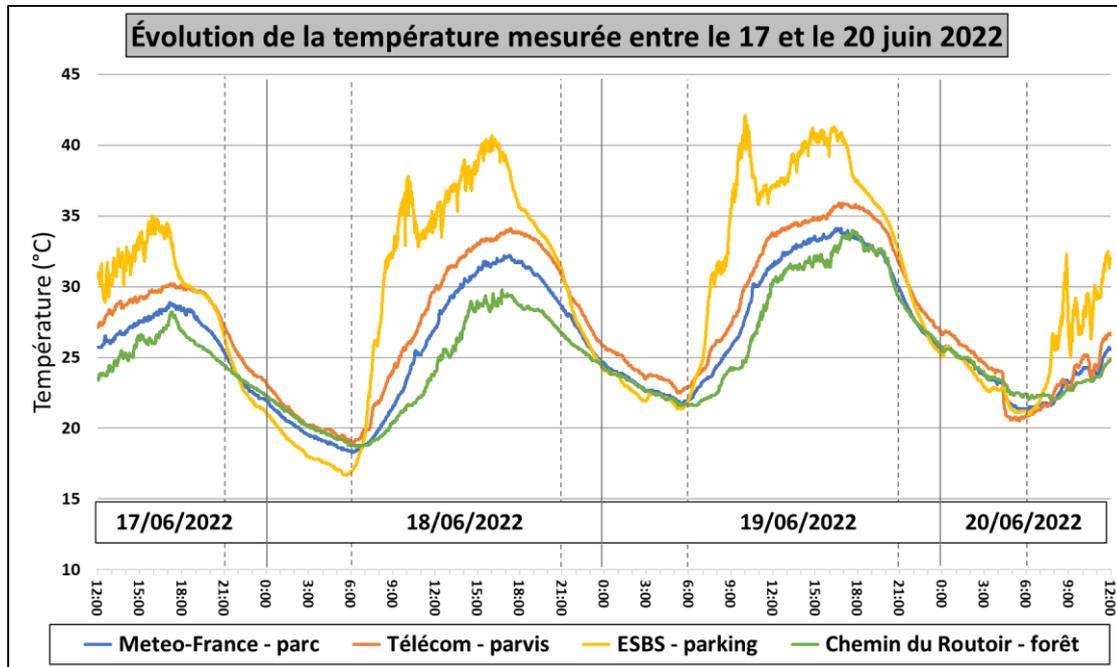
5.1. Temperaturen

In diesem Kapitel stellen wir die wichtigsten Ergebnisse der Messkampagne vor, die im Innovationspark durchgeführt wurde. Die Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsdaten werden zunächst zwischen den Sensoren verglichen und dann in Relation zu anderen Messdaten gesetzt.

Die folgende Grafik zeigt die Entwicklung der von den vier Sensoren gemessenen Temperaturen zwischen dem 17. Juni 2022 um 12 Uhr und dem 20. Juni 2022 um 12 Uhr (Ortszeit). Wir stellen fest, dass mit Ausnahme der Temperaturentwicklung des Sensors, der an einer Tafel auf Höhe des ESBS-Parkplatzes angebracht ist, die anderen Kurven relativ gleichmäßig verlaufen und mit dem Tag- und Nachtzyklus übereinstimmen. Am 18. Juni verzeichnete dieser Sensor mit Temperaturen zwischen 17 °C am Morgen und 40 °C am Nachmittag die größten Temperaturschwankungen.

Eine Überhitzung ist bei diesem Sensor aufgrund der Metallplatte, auf der er angebracht ist, sehr wahrscheinlich. Das Phänomen ist zwischen 8 und 18 Uhr besonders deutlich sichtbar, wenn die Sonnenstrahlen den Rahmen erreichen, auf dem der Kollektor steht. Die Temperatur steigt am 18. und 19. Juni innerhalb von 2 Stunden (zwischen 7 und 9 Uhr morgens) um mehr als 10 °C an. Die Messungen sind daher tagsüber kaum auswertbar. In Bezug auf die Nacht stellen wir umgekehrt fest, dass es sich um den Sensor handelt, der die niedrigsten Temperaturen vor Sonnenaufgang misst. Dieser Unterschied ist hauptsächlich auf die nähere Umgebung um den Sensor zurückzuführen: Auf dem Parkplatz steht der Sensor auf einer Metalloberfläche, die eine hohe Wärmeleitfähigkeit besitzt. Diese hohe thermische Diffusivität von Metall äußert sich in seiner Fähigkeit, durch verschiedene physikalische Prozesse gespeicherte Wärme schnell zu speichern oder umgekehrt wieder abzugeben. Tagsüber absorbiert die Metalloberfläche einen Teil der einfallenden Sonnenstrahlung und heizt sich dadurch schnell auf. In der Nacht gibt die gleiche Oberfläche die tagsüber gespeicherte Wärme wieder ab, auch hier relativ schnell im Vergleich zu

anderen Materialien. Die anderen drei Kollektoren wurden in Bäumen platziert, die eine wesentlich geringere thermische Diffusivität besitzen als die Oberfläche des Panels auf dem Parkplatz. In der weiteren Analyse wird dieser Sensor nicht berücksichtigt, obwohl es sich hierbei ohne großen Zweifel um den Bereich handelt, der von den 4 für diese Messkampagne ausgewählten Bereichen vor allem tagsüber am wärmsten ist.



Tagsüber sind die niedrigsten Temperaturen in der Chemin du Routoir zu beobachten, da es dort viele ausreichend große Bäume gibt, die das Eindringen von Sonnenstrahlen einschränken, sowie eine Wasserfläche. Dadurch wird die Temperatur in diesem Gebiet reguliert und der Anstieg der Temperaturen am Nachmittag begrenzt. Im Gegensatz dazu werden die höchsten Tagestemperaturen auf dem betonierte Vorplatz vor Telekom Physik mit wenig Vegetation gemessen.

Die folgende Tabelle zeigt einige Schlüsselwerte der Lufttemperaturen, die von diesen 3 Sensoren gemessen wurden. Die Beobachtungen um 21 Uhr an den 3 Abenden der Messkampagne zeigen einen deutlichen Unterschied in der Lufttemperatur zwischen dem Chemin du Routoir als kühlestem Bereich und dem Vorplatz vor Télécom Physique als wärmstem Bereich. Am 18. Juni um 21 Uhr wurden 26,7 °C auf dem Chemin du Routoir und 30,7 °C auf dem Vorplatz von Télécom Physique gemessen, wobei die Luftlinie 500 Meter auseinander liegt. Auf dem Betonvorplatz, der die tagsüber gespeicherte Wärme an die Umgebungsluft abgibt, sinkt die Temperatur nicht so leicht, aber auf dieser lokalen Ebene gleicht sich der Temperaturunterschied relativ schnell aus. So wird er nach Mitternacht zwischen den drei ausgewählten Standorten sogar vernachlässigbar.

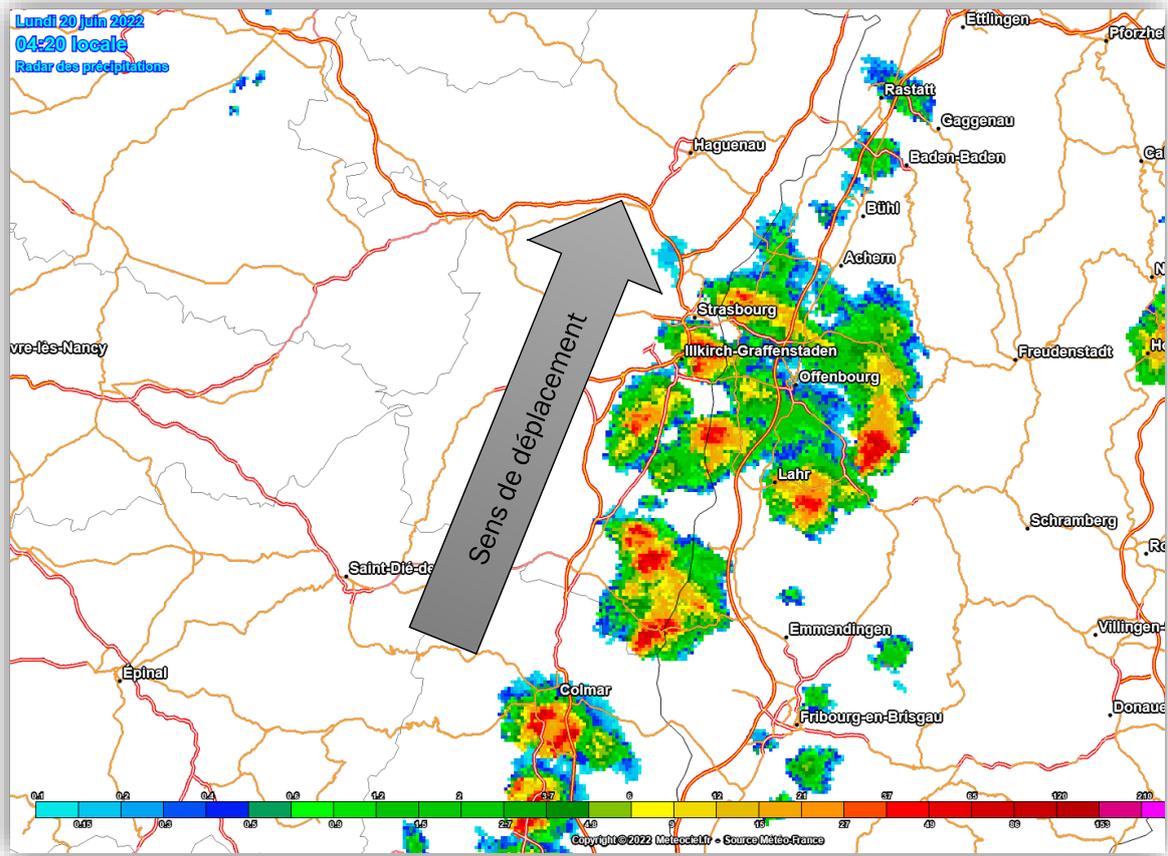
Am Nachmittag des 18. Juni wurden die größten Unterschiede zwischen den Sensoren während der gesamten Messkampagne festgestellt. Um 18 Uhr betrug der Unterschied zwischen Chemin du Routoir und Télécom Physique 5°C. Dies ist vor allem auf die geringen Windgeschwindigkeiten zurückzuführen, mit Böen, die an der Referenzwetterstation des Flughafens Entzheim nicht mehr als 20 km/h erreichten. Der Wind bewirkt nämlich, dass die Luft durchmischt wird und somit die Temperaturen zumindest auf lokaler Ebene gleichmäßiger werden. Dies ist auch am nächsten Tag für den 19. Juni der Fall, wo diesmal die Windböen am Nachmittag am Flughafen Entzheim die 40 km/h-Marke überschreiten. Dadurch werden die Temperaturunterschiede zwischen den Sensoren im Vergleich zum Vortag verringert, obwohl sie immer noch sichtbar sind.

		Chemin du Routoir	Météo France	Télécom Physique
17.06	12h	23.5	25.7	27.2
	15h	26.3	27.5	29.3
	18h	26.9	28.5	30
	21h	24.4	25.4	27.2
18.06	00h	22.3	22	23.2
	03h	20.1	19.5	20.1
	06h	18.8	18.4	19
	09h	20.4	21.5	24
	12h	24	27.1	29.9
	15h	28.9	31.1	33
	18h	28.6	31.7	33.8
	21h	26.7	28.6	30.7
	19.06	00h	24.3	24.6
03h		22.7	22.6	23.6
06h		21.7	22	22.9
09h		24.2	25.7	27.3
12h		30.5	31.5	33.7
15h		31.9	33.3	34.8
18h		33.7	33.4	35.6
21h		29.1	29.8	31.6
20.06		00h	25.6	25.4
	03h	23.8	23.8	24.6
	06h	22.4	21.4	20.8
	09h	22.8	23.2	22.9
	12h	24.9	25.6	26.7

Temperaturen (°C) für 3 Standorte zwischen dem 17.06. 12 Uhr und dem 20.06. 12 Uhr

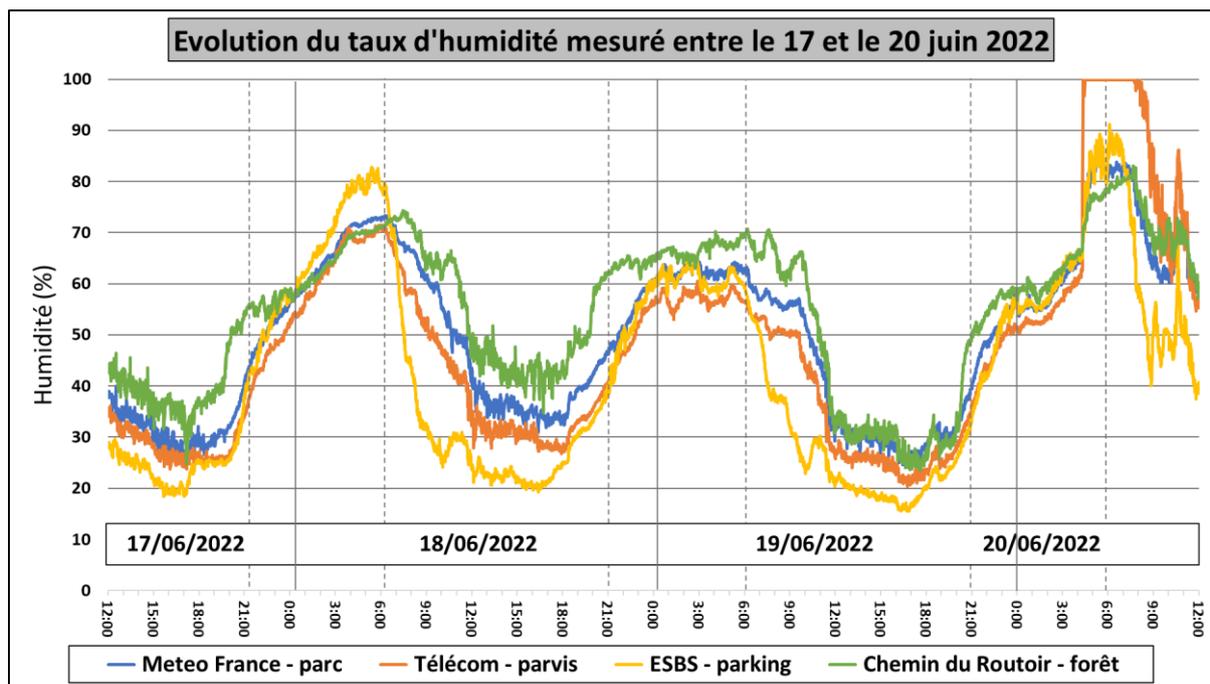
Die Nächte vom 18. auf den 19. und vom 19. auf den 20. Juni können als "Tropennächte" bezeichnet werden, was einer Mindesttemperatur entspricht, die nicht unter 20 °C fällt. In diesen beiden Tropennächten, die auf zwei sehr heiße Tage folgten, verringerte sich der Temperaturunterschied zwischen dem Chemin du Routoir und Télécom Physique nicht so schnell wie in der Nacht vom 17. auf den 18. Juni. Die Wärmemenge, die der Betonvorplatz von Télécom Physique speichert, ist am 18. und 19. Juni größer, da die Tagestemperaturen höher sind als am 17. Juni.

Am 20. Juni kam es gegen 4 Uhr morgens zu einem sehr schnellen Temperaturabfall, der mit dem Durchzug mehrerer kurzer, aber intensiver Regenschauer einherging, wie das Radarbild der Niederschläge unten zeigt. Dieser Gewitterschauer führte zu einem Rückgang der Lufttemperatur um fast 2 Grad innerhalb weniger Dutzend Minuten, abgesehen vom Sensor am Chemin du Routoir, wo der Rückgang mit etwa 0,5°C relativ gering ausfiel. Es ist durchaus schlüssig, einen Temperaturabfall beim Durchzug des Regens zu beobachten, da der Regenfall eine kältere Luftmasse mit sich zieht. Die Umgebung des Sensors Chemin du Routoir ist aufgrund der großen Anzahl an Bäumen geeignet, plötzliche Temperaturschwankungen zu begrenzen. Dennoch kann man auch vermuten, dass die anderen Sensoren möglicherweise Regentropfen ausgesetzt waren, die direkt auf die Messgeräte fielen. Die Temperatur dieser Regentropfen sowie ihre Verdunstung auf den Sensoren könnte zu einer stärkeren Abkühlung führen, da der Sensor Chemin du Routoir der einzige ist, der vollständig vor Regen geschützt ist. Schließlich könnte auch der Wind zu einem Temperaturrückgang geführt haben, der sich in der Chemin du Routoir weniger stark bemerkbar machte, da der Sensor dort besser geschützt ist. Die Messdaten des Flughafens Entzheim können wir jedoch nicht betrachten, da der Regenschauer diesen Bereich verschont hat.



Radarbild der Niederschläge am 20. Juni um 4:20 Uhr Ortszeit ; Météociel

5.2 Luftfeuchtigkeit und thermische Behaglichkeit



Die vorherige Grafik zeigt die Entwicklung der relativen Luftfeuchtigkeit der 4 Sensoren während der Messkampagne im Innovationspark. Tagsüber sehen wir, dass die Luftfeuchtigkeit bei Vegetation und Wasserflächen höher ist, wie im Fall des Chemin du Routoir. Im Gegensatz dazu ist sie an asphaltierten Standorten wie dem Vorplatz von Télécom Physique niedriger. Die niedrigste Luftfeuchtigkeit wurde am Nachmittag des 19. Juni beobachtet, was vor allem auf die hohen Temperaturen in Verbindung mit Südwindböen von 40 km/h zurückzuführen ist, die die Luftmasse im Innovationspark austrockneten. Die Zunahme der Windböen am späten Vormittag wird durch den plötzlichen Rückgang der Luftfeuchtigkeit an allen Sensorstandorten gut veranschaulicht.

Die Luftfeuchtigkeit stieg am 20. Juni um 4 Uhr morgens abrupt an, als sich die gewittrigen Schauer näherten, die über die Gegend zogen und Niederschlag brachten. Der Sensor auf dem Vorplatz von Telecom Physique war nicht ausreichend geschützt, was dazu führte, dass eine Luftfeuchtigkeit von 100 % gemessen wurde, da wahrscheinlich Regentropfen auf dem Sensor verblieben, bevor sie gegen 9 Uhr verdunsteten.

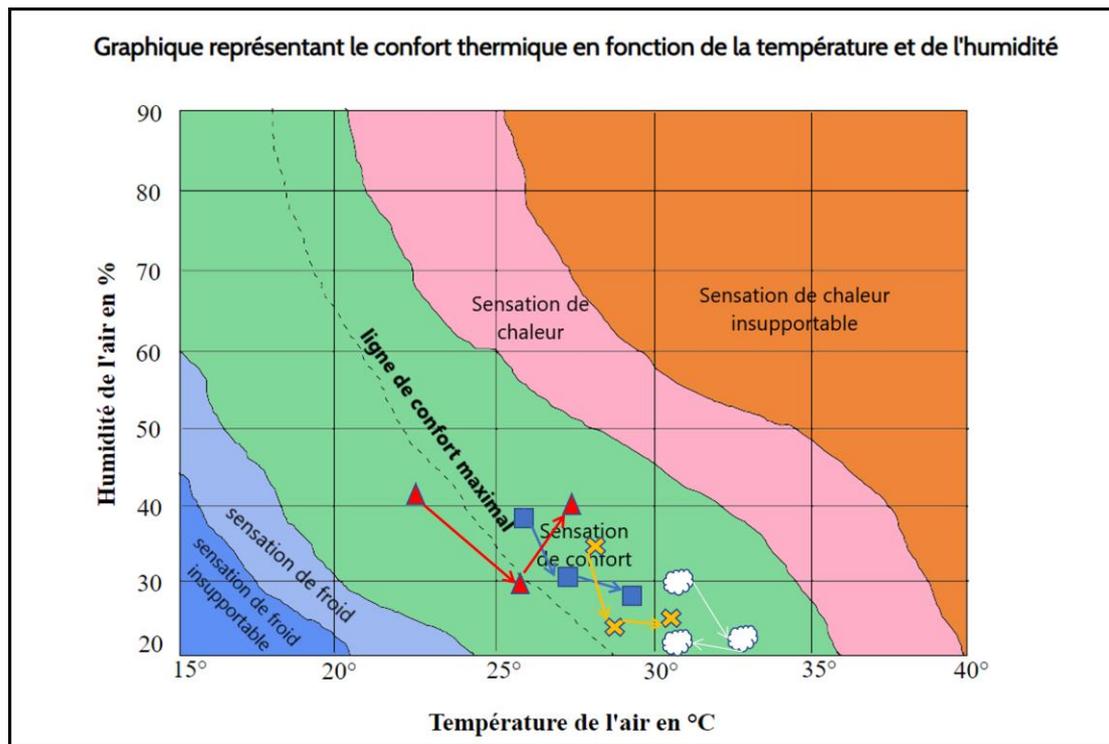
Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden wir diese Messungen der Luftfeuchtigkeit mit den Temperaturmessungen in Beziehung setzen, um die Auswirkungen der lokalen Umgebung auf den thermischen Komfort der Nutzer zu untersuchen. Wir werden untersuchen, ob diese Hitzespitze Auswirkungen auf die Arbeit der Mitarbeiter des Innovationsparks hatte, indem wir den Hitzestress bewerten, dem sie während dieser wenigen Tage mit großer Hitze ausgesetzt waren. Hitzestress bezeichnet einen Wärmestau im Körper, der es dem Arbeitnehmer unmöglich macht, eine normale Körpertemperatur aufrechtzuerhalten. Die Auswirkungen starker Hitze hängen auch von der Luftfeuchtigkeit ab: Bei gleicher Temperatur ist feuchte Hitze, die vor allem an stürmischen Tagen auftritt, viel schwerer zu ertragen als trockene Hitze.

Die Temperatur- und Feuchtigkeitsdaten der Sensoren wurden daher in ein Diagramm übertragen, das die thermische Behaglichkeit einer Person in Abhängigkeit von diesen beiden Parametern darstellt. Diese Grafiken sind nach dem Muster aufgebaut, das man in dem von Jean-Louis Vallée verfassten Buch "Techniguide de la météo" finden kann. Die Grafiken bestehen auf der Abszisse aus den Temperaturen und auf der Ordinate aus der Luftfeuchtigkeit. Anschließend werden anhand der Empfindungen der befragten Personen Bereiche des thermischen Komforts erstellt. Es handelt sich also nicht um gemessene Daten, sondern um die Wahrnehmung der Personen hinsichtlich ihres thermischen Komforts in Abhängigkeit von diesen beiden Parametern. Es können erhebliche Unterschiede zwischen den Bevölkerungen verschiedener Länder und sogar von Person zu Person festgestellt werden. Darüber hinaus ist auch der Wind ein wichtiger Parameter, den es zu berücksichtigen gilt: Ein mäßiger Wind führt im Vergleich zu windstillen Situationen zu weniger Hitzestress.

	Sensor chemin du Routoir
	Sensor Météo France
	Sensor Télécom Physique
	Sensor Parkplatz ESBS

In jeder Grafik sind die oben genannten Symbole dreimal abgebildet und durch Pfeile miteinander verbunden. Diese 3 Symbole stehen für 3 Messzeitpunkte: 12 Uhr, 15 Uhr und 18 Uhr, wobei 12 Uhr für das erste Symbol und 15 Uhr und 18 Uhr für die Symbole am Ende der Pfeile stehen.

Die erste Grafik unten zeigt den thermischen Komfort der Individuen für den 17. Juni um 12 Uhr, 15 Uhr und 18 Uhr und an den vier für die Messkampagne ausgewählten Standorten. Trotz der recht hohen Temperaturen sorgte die geringe Luftfeuchtigkeit dafür, dass der physiologische Komfort während des gesamten Nachmittags und in allen Bereichen des Innovationsparks erhalten blieb.

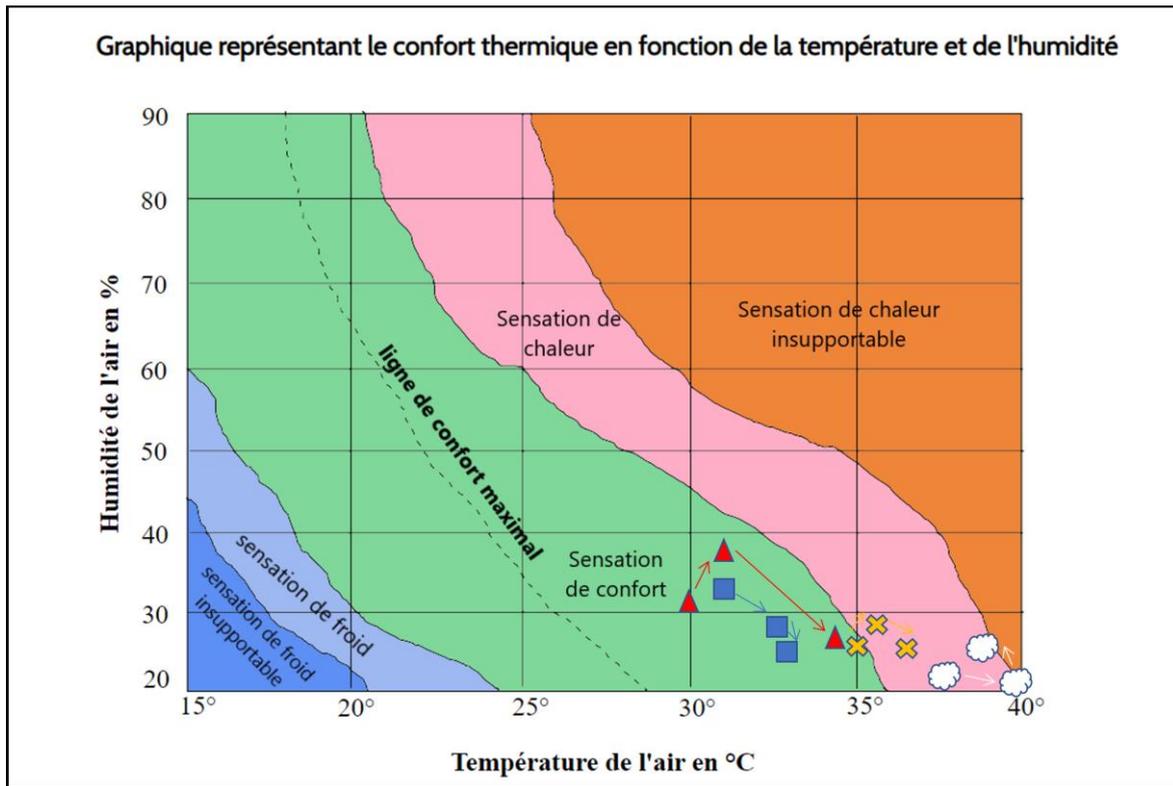


Thermischer Komfort am 17. Juni 2022 um 12:00, 15:00 und 18:00 Uhr für alle 4 Sensoren

Für den Tag des 19. Juni auf der zweiten Grafik waren die Höchsttemperaturen viel höher und die Luftfeuchtigkeit blieb den ganzen Nachmittag über niedrig. Die Sensoren, die in bewachsenen Umgebungen und in der Nähe von Gewässern positioniert waren, sorgten für ein recht angenehmes Gefühl trotz der Temperatur, die um 17 Uhr an der Referenzwetterstation des Flughafens Entzheim 37,7 °C erreichte. Der Unterschied ist mit 4 °C weniger auf dem Chemin du Routoir oder auch im Park bei Météo France im Vergleich zum Flughafen, der stark der Sonneneinstrahlung ausgesetzt ist, bemerkenswert. Die Begrenzung dieser einfallenden Sonnenstrahlung durch Bäume ermöglicht es somit, die Temperatur in der näheren Umgebung deutlich zu senken und somit Hitzestress für die Bevölkerung zu vermeiden.

Im Gegensatz dazu litten die Sensoren in stark mineralhaltigen Umgebungen stärker unter der großen Hitze des 19. Juni. Menschen, die an diesen Standorten der prallen Sonne ausgesetzt sind, sind potenziell einem hohen Hitzestress ausgesetzt, der sich sehr schnell in gesundheitlichen Problemen äußern kann. Aufgrund der Überhitzung des Sensors auf dem ESBS-Parkplatz ist es nicht möglich, die Temperatur an diesem Ort genau zu ermitteln, aber wir können uns gut vorstellen, dass eine Person in der prallen Sonne auf diesem Parkplatz zweifellos ein unerträgliches Hitzegefühl hatte, das mit den thermischen Komfortbedingungen auf dem 500 Meter weiter gelegenen Chemin du Routoir zu vergleichen ist, die weitaus angenehmer waren.

Der 20. Juni war feuchter als die vorangegangenen Tage, doch der Wind wehte mäßig aus nördlicher Richtung, was die empfundene Unannehmlichkeit an diesem Tag in Grenzen hielt. Der Nordwind im Elsass, der auch als Bise bezeichnet wird, wird oft mit kühleren Luftmassen in Verbindung gebracht als der Südwind.



Thermischer Komfort am 19. Juni 2022 um 12:00, 15:00 und 18:00 Uhr für alle 4 Sensoren

5.3 Illustration der UHI während der Messkampagne

Um die städtische Wärmeinsel in der Eurometropole Straßburg während dieser Hitzespitze zu messen, wurden weitere Sensoren im Stadtzentrum von Straßburg installiert, einem besonders exponierten Bereich, um das Phänomen zu beobachten. Es handelt sich um dieselben Sensoren, die auch im Innovationspark eingesetzt wurden, für denselben Messzeitraum.

Ein erster Sensor wurde in einem Innenhof im Stadtteil Krutenau im Stadtzentrum von Straßburg an einer bewachsenen Wand in etwa 2 m Höhe installiert.



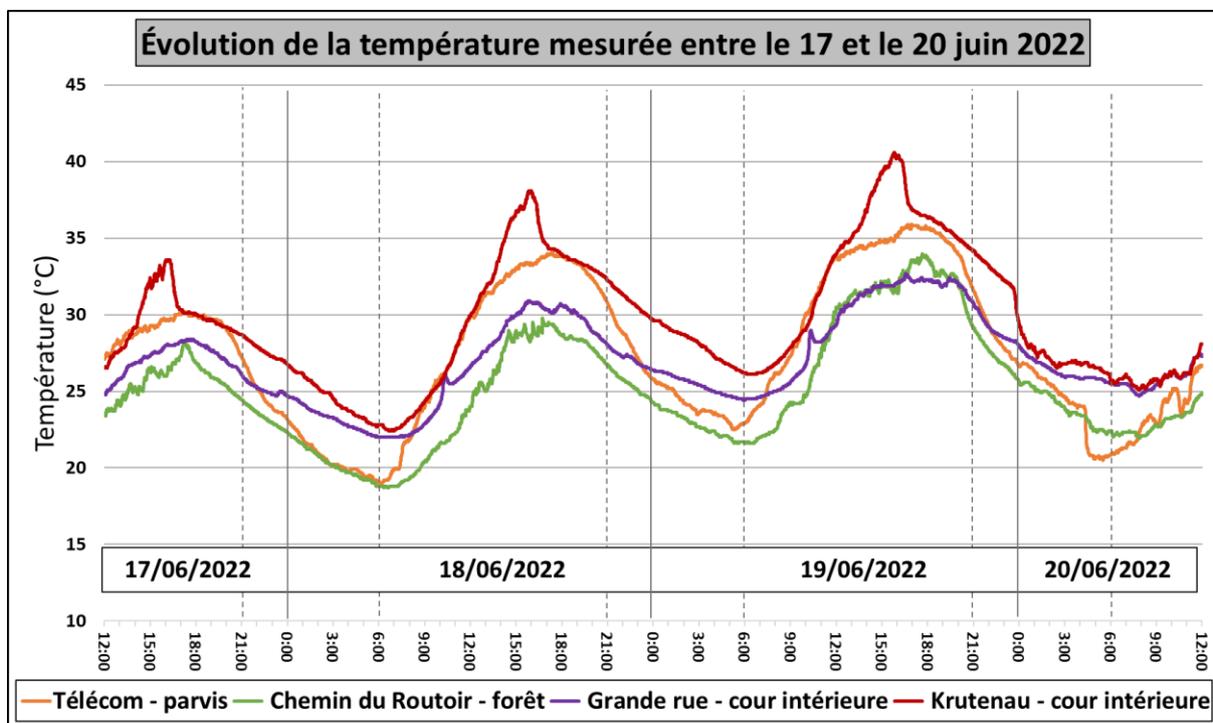
Standort des Sensors in der Krutenau ; Google Earth

Ein zweiter Sensor wurde in einem Innenhof Grande Rue im Stadtzentrum von Straßburg an einer Mauer mit Kletterpflanzen in etwa 1,5 Metern Höhe angebracht.



Standort des Sensors Grande Rue ; Google Earth

Die folgende Grafik zeigt die Temperaturentwicklung für die beiden Sensoren im Stadtzentrum von Straßburg sowie die Temperaturen auf dem Routoir-Weg und auf dem Vorplatz von Télécom Physique im Innovationspark. Die wichtigsten Messwerte sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.



		Chemin du Routoir	Télécom Physique	Grande Rue	Krutenau
17.06	12h	23.5	27.2	24.8	26.5
	15h	26.3	29.3	27.3	32.3
	18h	26.9	30	28.2	30
	21h	24.4	27.2	26.1	28.7
18.06	00h	22.3	23.2	24.7	26.8
	03h	20.1	20.1	23.3	24.5
	06h	18.8	19	22	22.8
	09h	20.4	24	22.9	24.3
	12h	24	29.9	26.6	29.9
	15h	28.9	33	30	36.8
	18h	28.6	33.8	30.6	33.9
	21h	26.7	30.7	28	32.2
19.06	00h	24.3	25.8	26.4	29.7
	03h	22.7	23.6	25.4	28.1
	06h	21.7	22.9	24.4	26.2
	09h	24.2	27.3	25.6	27.9
	12h	30.5	33.7	29.4	34
	15h	31.9	34.8	32	39.2
	18h	33.7	35.6	32.3	36.4
	21h	29.1	31.6	30.7	34.2
20.06	00h	25.6	26.6	28	29.4
	03h	23.8	24.6	25.9	26.8
	06h	22.4	20.8	25.5	25.6
	09h	22.8	22.9	25.4	25.8
	12h	24.9	26.7	27.3	28.1

Temperaturen (°C) für 4 Standorte zwischen dem 17.06. 12 Uhr und dem 20.06. 12 Uhr

Die Nachttemperaturen unterscheiden sich notorisch zwischen der Straßburger Innenstadt und dem Innovationspark Illkirch, die etwa 6,5 Kilometer voneinander entfernt liegen. Das Phänomen der städtischen Wärmeinsel ist zwischen Mitternacht und 6 Uhr morgens besonders deutlich sichtbar, unabhängig von der Nacht zwischen dem 17. und 20. Juni. Die Temperaturen im Stadtzentrum sinken nur schwer, selbst in der Nacht vom 19. auf den 20. Juni, als mehrere Gewitterschauer aufeinander folgten.

Die Temperaturunterschiede zwischen dem Stadtzentrum und dem Innovationspark betragen am Ende der Nacht mehr als 3 °C, was signifikant ist. In den Stadtteilen Krutenau und auf der großen Insel in Straßburg sank die Temperatur am Morgen des 19. Juni nicht unter 25 °C, was die Nächte für die Bewohner unangenehm machte. Das Phänomen der städtischen Wärmeinsel hat also ganz unterschiedliche Auswirkungen zwischen dem Stadtzentrum und Standorten in den Vororten wie dem Innovationspark, ist aber auch in größerem Maßstab sichtbar. Météo France verfügt über ein Netz von sehr genauen Messstationen, von denen sich zwei in der Eurometropole Straßburg befinden. Eine befindet sich am Flughafen Entzheim, 10 km vom Stadtzentrum Straßburgs entfernt, und die andere im Botanischen Garten der Stadt Straßburg, einige hundert Meter vom Stadtzentrum entfernt. So betrug die Tiefsttemperatur am 19. Juni am Flughafen Entzheim 19,7 °C, während die Wetterstation im Botanischen Garten 22,1 °C Tiefsttemperatur maß, was einem Unterschied von 2,4 °C entspricht.

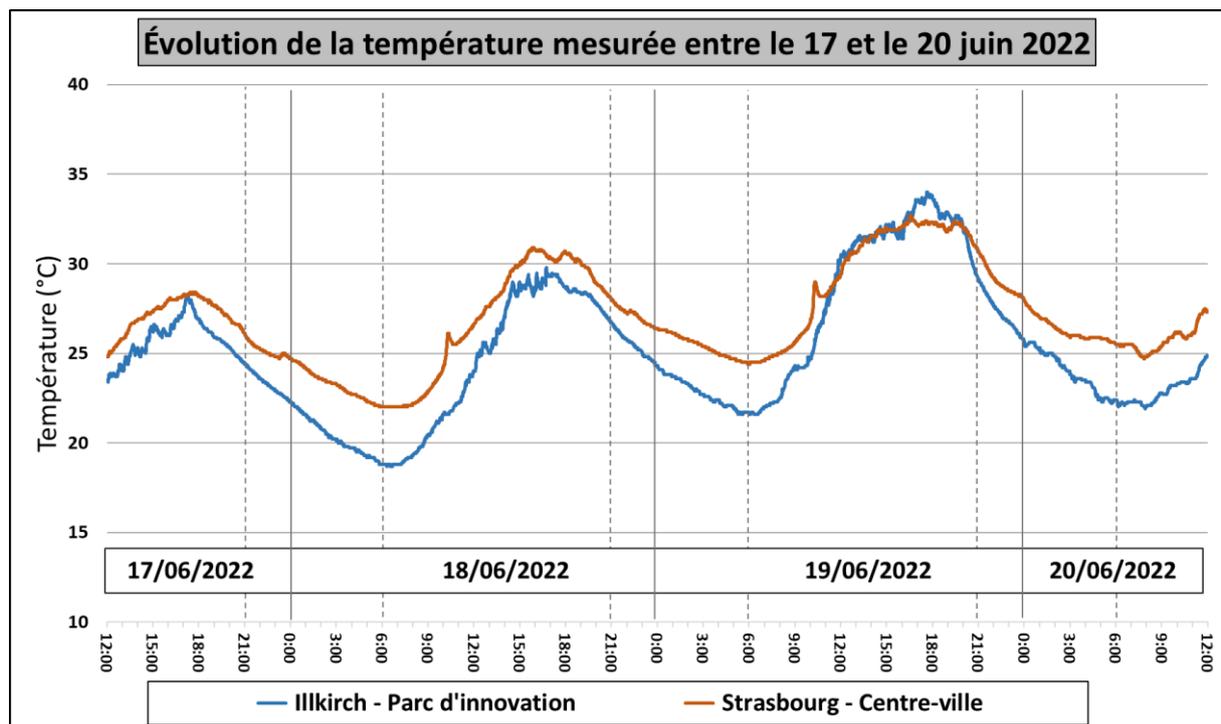
Tagsüber hängen die Temperaturen stark von der einfallenden Sonnenstrahlung ab. Der Innenhof an der Hauptstraße ist relativ klein, vollständig von hohen und alten Gebäuden umgeben und mit verschiedenen Pflanzen geschmückt. Aufgrund dieser Eigenschaften bleibt er den ganzen Tag über relativ kühl, mit Tagestemperaturen, die denen des Chemin du Routoir im Innovationspark

ähneln. Der Innenhof im Stadtteil Krutenau ist größer, stärker der Sonne ausgesetzt und der Boden ist größtenteils mit Asphalt bedeckt, weshalb die Temperaturen an diesem Standort im Vergleich zum Innenhof auf der Hauptstraße deutlich höher sind.

Der Sensor quartier de la Krutenau ist außerdem am Nachmittag teilweise der Sonne ausgesetzt, was die hohe Temperaturspitze erklärt, die auf der Kurve zwischen 15 und 18 Uhr zu beobachten ist. Es ist also wichtig, den sehr ausgeprägten Erwärmungseffekt zu beachten, wenn wir direkt den Sonnenstrahlen ausgesetzt sind, insbesondere während einer Hitzewelle, wenn die Temperaturen im Schatten bereits sehr hoch sind. Dieses Phänomen kann zusammen mit dem Phänomen der nächtlichen städtischen Wärmeinsel zu schwierigen gesundheitlichen Bedingungen für die exponierten Personen, insbesondere für die am stärksten gefährdeten, führen.

Die folgende Abbildung zeigt die Daten der vorherigen Grafik mit dem Sensor am Chemin du Routoir im Innovationspark Illkirch und dem Sensor in einem Innenhof in der Grande Rue im Stadtzentrum von Straßburg. Trotz der recht ähnlichen Tagestemperaturen zwischen der Innenstadt und den Vororten in der Vegetationszone fällt das Thermometer keineswegs mit der gleichen Geschwindigkeit, wenn die Nacht anbricht.

Diese bemerkenswert frühe und intensive Hitzespitze vor der Sommersonnenwende dauerte in der Region Elsass glücklicherweise nur drei Tage. Dennoch deuten die künftigen Klimaprojektionen auf eine Zunahme der Hitzeextreme und insbesondere der Hitzewellen hin, die somit häufiger, aber auch intensiver und länger auftreten werden. Das Phänomen der städtischen Hitzeinsel könnte sich unter diesen Wetterbedingungen noch verschärfen, wenn zu wenig Maßnahmen ergriffen werden, um wirksam dagegen vorzugehen.



Schlussfolgerung

Die Intensivierung des Klimawandels verschärft die bereits sichtbaren Auswirkungen auf die Eurometropole Straßburg, vor allem die warmen Extreme, die in den Städten durch das Phänomen der städtischen Wärmeinsel verschärft werden. Obwohl die Stadt Straßburg nicht die am stärksten von diesem Phänomen betroffene Stadt in Frankreich zu sein scheint, zeigt die im Rahmen dieses Artikels durchgeführte Messkampagne einen signifikanten Unterschied in den Nachttemperaturen zwischen dem Stadtzentrum von Straßburg und weniger dicht besiedelten und stärker begrünten Stadtgebieten.

Dieser Temperaturunterschied zwischen Stadt und Land lässt sich durch mehrere Faktoren begründen: Die Topografie der Städte mit vielen großen Gebäuden, die die tagsüber gespeicherte Wärme aufnehmen und speichern und die natürliche Belüftung einschränken. Hinzu kommen Wärmequellen, die in großer Zahl in städtischen Gebieten vorhanden sind, und schließlich Baumaterialien, die die Tageswärme speichern, um sie nachts wieder abzugeben.

Die Messkampagne für den Innovationspark Illkirch zeigt, dass die meteorologischen Parameter auf lokaler Ebene nicht unerheblich variieren, wenn die Sensoren in einigen hundert Metern Entfernung angebracht sind. Das Vorhandensein von Grünflächen und Wasserflächen führt zu einem schnelleren Temperaturrückgang im Laufe des Abends und zu niedrigeren Tiefsttemperaturen als in stark mineralisierten Gebieten.

Der thermische Komfort eines Arbeitnehmers in einem Unternehmen ist daher stark von den Temperaturen am Tag und in der Nacht abhängig. Tagsüber sind Arbeitnehmer, die der Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind, einem oft unangenehmen oder sogar gesundheitsgefährdenden Hitzegefühl ausgesetzt, vor allem in unbelüfteten Räumen und bei feuchter Hitze. Nachts müssen Menschen, die in Städten wohnen, mit den in Hitzeperioden besonders hohen Nachttemperaturen zurechtkommen, die zu einer Verschlechterung der Gesundheit dieser Bewohner führen können.

Diese Studie, die während einer intensiven Hitzespitze durchgeführt wurde, soll den ganzen Nutzen von Grünflächen und Wasserflächen, selbst in kleinem Maßstab, veranschaulichen. So können die Beschäftigten eine Pause an einem kühleren Ort in unmittelbarer Nähe ihrer Unternehmen genießen, wie z. B. am Chemin du Routoir am Rande des Innovationsparks, wo es mehrere Wanderwege gibt. Der baumbestandene Bereich auf dem Gelände von Météo France Nord-Est, der im Übrigen von einem Wasserspiegel in einigen Metern Entfernung profitiert, ist ebenfalls eine Möglichkeit, seinen Mitarbeitern einen schattigen und kühleren Ort zur Verfügung zu stellen. Andernfalls sind stark mineralisierte Orte wie Parkplätze sehr hohen Tagestemperaturen ausgesetzt, die das thermische Wohlbefinden der in der Nähe arbeitenden Menschen verschlechtern können. Sie tragen auch dazu bei, die am Tag gespeicherte Wärme wieder abzugeben und so den Temperaturabfall am Abend zu begrenzen.

Um die städtische Wärmeinsel wirksam zu bekämpfen, müssen die Überlegungen schließlich auf der Ebene der gesamten Stadt und der umliegenden Ballungsräume angestellt werden. Nur einen Monat nach dieser Messkampagne wurde Frankreich Mitte Juli von einer zweiten Hitzewelle heimgesucht, die auch die Region Elsass betraf. Während das Thermometer am 20. Juli am Flughafen Entzheim 17,2 °C als Minimum anzeigte, zeigte das Thermometer im Botanischen Garten im Stadtzentrum von Straßburg 21,1 °C an. Das wiederholte Auftreten dieser extremen Hitzewellen muss uns vor der Notwendigkeit warnen, die Auswirkungen des Klimawandels auf unser Gebiet abzuschwächen und uns bereits jetzt daran anzupassen.

Weiterführende Informationen

Vallée J-L., 2004. Techniguide de la Météo

Adaptation au dérèglement climatique, Les notes de l'ADEUS, n° 280, novembre 2019

Kastendeuch P., Najjar G., Lacarrere P., Colin J., Modélisation de l'îlot de chaleur urbain à Strasbourg, Climatologie, 7 (2010) 21-37, <https://doi.org/10.4267/climatologie.361>

How to map your urban heat island, <http://urbancanopy.io/tutorial>

ECOSTRESS, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, https://ecostress.jpl.nasa.gov/gmap/eco_map2