



**HAL**  
open science

## Projet Coolscapes - Compte-rendu final

Ignacio Requena-Ruiz, Xenia Stavropulos-Laffaille, Céline Drozd, Thomas Leduc, Daniel Siret

### ► To cite this version:

Ignacio Requena-Ruiz, Xenia Stavropulos-Laffaille, Céline Drozd, Thomas Leduc, Daniel Siret. Projet Coolscapes - Compte-rendu final: L'espace urbain climatisé: perspectives techniques, spatiales et culturelles. UMR 1563 Ambiances Architectures Urbanités (AAU); Centre de recherche nantais Architectures Urbanités. 2024, pp.160. halshs-04616801

**HAL Id: halshs-04616801**

**<https://shs.hal.science/halshs-04616801>**

Submitted on 19 Jun 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

## Projet ANR-18-CE22-0003

# Coolscapes

Programme JCJC 2018

A	IDENTIFICATION .....	2
B	RESUME CONSOLIDE PUBLIC.....	3
B.1	Résumé consolidé public en français .....	3
B.2	Résumé consolidé public en anglais .....	5
C	MEMOIRE SCIENTIFIQUE .....	6
C.1	Enjeux et problématique, état de l'art .....	6
C.2	Approche scientifique et technique .....	6
C.3	Résultats obtenus .....	9
C.4	Exploitation des résultats .....	10
C.5	Discussion.....	10
C.6	Conclusion .....	11
C.7	Références.....	11
D	LISTE DES LIVRABLES .....	13
E	IMPACT DU PROJET .....	14
E.1	Indicateurs d'impact.....	14
E.2	Liste des publications et communications .....	15
E.3	Liste des éléments de valorisation .....	17
E.4	Bilan et suivi des personnels recrutés en CDD (hors stagiaires) .....	19
F	ANNEXES .....	20
F.1	Annexe 1 : Conception d'espaces publics pour l'adaptation au réchauffement urbain. Analyse à travers les médias d'architecture, urbanisme et paysage.	
F.2	Annexe 2 : Caractérisation de l'environnement thermique du citoyen : état de l'art.	
F.3	Annexe 3 : Métrologie des variables climatiques pour la caractérisation de l'expérience thermique.	
F.4	Annexe 4 : Mise en oeuvre et expérimentation de la démarche de caractérisation de l'expérience thermique.	
F.5	Annexe 5 : Atelier de prospective Fraîcheurs urbaines. Exploration collective de scénarii d'adaptation des espaces publics urbains aux étés caniculaire.	
F.6	Annexe 6 : Posters de présentation du projet Coolscapes.	

## A IDENTIFICATION

Acronyme du projet	COOLSCAPES
Titre du projet	Coolscapes. L'espace urbain climatisé : perspectives techniques, spatiales et culturelles
Coordinateur du projet (société/organisme)	M. Ignacio REQUENA-RUIZ (UMR Ambiances, Architectures, Urbanités)
Période du projet (date de début – date de fin)	01/10/2018 31/03/2023
Site web du projet, le cas échéant	<a href="http://www.coolscapes.net">www.coolscapes.net</a>

Rédacteur de ce rapport	
Civilité, prénom, nom	M. Ignacio REQUENA-RUIZ
Téléphone	02 40 16 02 37
Adresse électronique	<a href="mailto:ignacio.requena@crenau.archi.fr">ignacio.requena@crenau.archi.fr</a>
Date de rédaction	Avril 2023

Si différent du rédacteur, indiquer un contact pour le projet	
Civilité, prénom, nom	
Téléphone	
Adresse électronique	

Liste des partenaires présents à la fin du projet (société/organisme et responsable scientifique)	
---	--

## **B RESUME CONSOLIDE PUBLIC**

### **B.1 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN FRANÇAIS**

#### **Coolscapes étudie l'expérience thermique des lieux frais de la ville pour mieux l'adapter aux étés caniculaires.**

##### *L'aménagement des espaces publics pour l'adaptation au réchauffement urbain*

Les villes et leurs espaces publics sont vulnérables aux effets du réchauffement urbain dû au changement climatique. L'adaptation des espaces publics aux nouvelles conditions d'été est un défi majeur des villes. Certains espaces publics déploient des stratégies de rafraîchissement localisé afin de modifier le ressenti des citoyens et les usages sur place. Le projet Coolscapes étudie ces points frais ou "îlots de fraîcheur" pour mieux comprendre leur pouvoir de rafraîchissement et leur appropriation par les citoyens en périodes de forte chaleur. D'une part, il s'attache à étudier les variables climatiques à l'échelle du corps humain. D'autre part, il interroge ces mesures au regard des usages et comportements des citoyens sur place pour analyser l'expérience thermique des lieux. Enfin, le projet a répertorié, analysé et discuté avec des acteurs du terrain les approches actuelles du rafraîchissement urbain pour identifier les axes de réflexion émergents.

##### *Une approche interdisciplinaire pour étudier l'expérience thermique des aménagements visant le rafraîchissement ponctuel*

La démarche de recherche combine les méthodes de la métrologie climatique mobile et de l'ethnographie urbaine. Une nouvelle station mobile géolocalisée, équipée de capteurs à faible latence d'enregistrement et de haute qualité, a été conçue pour être utilisée conjointement avec une méthode d'observation passive cartographique. Le code pour le traitement de ce type de données et un outil de visualisation des données ont été développés. La méthode a été expérimentée sur six sites à Nantes et Paris pendant les étés 2020 et 2021. Cette démarche favorise des séquences de mesure sur les lieux d'activité, en suivant les parcours réels des citoyens, afin de mieux comprendre l'expérience thermique vécue. Afin de mettre en perspective ces résultats au regard des pratiques d'aménagement, ce projet a établi et analysé un répertoire d'espaces publics intégrant des modes de rafraîchissement urbain au niveau mondial. Enfin, un travail de prospective urbaine avec des acteurs de l'aménagement urbain a permis de soulever les enjeux opérationnels de ces lieux pour contribuer à l'adaptation des populations au climat futur.

Ce projet de recherche a permis d'étudier selon la méthode exposée l'expérience thermique fournie par six espaces publics à Nantes et à Paris. Cette méthode est aujourd'hui en cours d'adaptation à d'autres sites et contribue, par accumulation des données objectivées, aux discussions opérationnelles sur l'adaptation au réchauffement urbain. Le répertoire de projets contribue également à ces discussions, notamment pour les premières phases de conception du projet. Tous deux ont renforcé les compétences du laboratoire AAU en matière de microclimatologie urbaine avec une focale sur l'expérience du citoyen dans l'espace public.

En plus de la valorisation dans des articles scientifiques, des communications en conférences internationales et un blog de la recherche, le projet Coolscapes a été valorisé par un site web dédié au répertoire de projets, par deux partenariats nationaux (Efficacity et Nantes Université), par un partenariat international (Université Santiago Chile) et par de nouveaux contrats de recherche (Nantes Métropole). Cependant, l'apport fondamentale reste l'originalité de l'outillage méthodologique conçu dans le cadre du projet : le prototype de station climatique mobile et les outils informatiques qui l'accompagnent.

Le projet Coolscapes est un projet de recherche fondamentale coordonné par Ignacio Requena-Ruiz. Il associe aussi Céline Drozd, Thomas Leduc, Xénia Stavropoulos-Laffaille et Daniel Siret du laboratoire AAU, équipe CRENAU. Le projet a commencé en décembre 2018 et a duré 54 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 189 403 €.



## **B.2 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN ANGLAIS**

### **Coolscapes explores the thermal experience of urban coolspots to improve adaptation strategies to urban warming**

#### ***Designing public space to make cities more liveable during hot summers***

Adapting public space to the new summer conditions is a major urban challenge. Authorities and planners are nowadays developing public spaces that integrate localised cooling strategies to create thermal respite areas and preserve urban life in summer. The Coolscapes project studies these urban coolspots to understand their cooling potential, the characteristics of their urban life and their role in making urban warming more liveable for city dwellers. To this end, we examine the climatic variables at the level of the human body and their spatial distribution in relation to urban design. By looking at these measurements through the lens of city dwellers' practises and behaviours, we characterise the thermal experience of the public space. Finally, we inventory and analyse current design approaches to urban cooling and discuss their potential and limitations with local actors. An interdisciplinary approach to studying the thermal experience of point cooling developments.

#### ***Investigating the thermal experience through mobile climate measurements and urban ethnography***

Our research approach combines the methods of mobile climate measurement and urban ethnography. A new mobile station, equipped with high quality sensors and an inertial navigation system, was developed and deployed in parallel with passive activity observations. The applications for processing and visualising this type of data were also developed. This approach was tested in the summers of 2020 and 2021 at six urban coolspots of Nantes and Paris. We prioritised measuring the actual paths and sitting locations preferred by city dwellers to get a better characterisation of their thermal experience. This data was put into perspective through our own worldwide database of urban coolspots, first published in 2022. Finally, a study with stakeholders and urban designers enabled a discussion on the operational aspects of urban coolspots as a design strategy to adapt cities to rising temperatures.

Coolscapes made it possible to study the thermal experience created by six public spaces in Nantes and Paris. The research method developed for such cases is now being further developed in other locations and our results contribute with objective data to operational discussions on urban warming adaptation strategies. The inventory of urban coolspots also contributes to the early design phases of these discussions. More generally, this research project has strengthened the AAU Laboratory's expertise in urban microclimatology, with a focus on the thermal experience of citizens in public spaces.

In addition to scientific articles, communications at international conferences and a research blog, Coolscapes has been promoted by a website dedicated to the inventory, two ongoing national partnerships (Efficacity and Nantes Université), an ongoing international partnership (University of Santiago Chile) and new research contracts (Nantes Métropole). However, the fundamental contributions of this project are the original prototype mobile climate station and its associated applications.

Coolscapes is a fundamental research project led by Ignacio Requena-Ruiz. It also involves Céline Drozd, Thomas Leduc, Xénia Stavropoulos-Laffaille and Daniel Siret from the AAU laboratory (CRENAU team). The project started in December 2018 and lasted 54 months. It was awarded an ANR grant of €189,403.

## **C MEMOIRE SCIENTIFIQUE**

**Mémoire scientifique confidentiel** : Non

### **C.1 ENJEUX ET PROBLEMATIQUE, ETAT DE L'ART**

Les villes et leurs espaces publics sont particulièrement vulnérables aux effets du réchauffement climatique, qui se traduisent notamment par une augmentation des températures et un stress thermique accru (IPCC, 2022). L'environnement bâti amplifie ces effets, ce qui entraîne une détérioration du confort thermique des citoyens (Santamouris et Kolokotsa, 2015 ; Stewart et Oke, 2012). Les stratégies d'atténuation, telles que l'augmentation de la canopée végétale ou la déminéralisation, ne seront efficaces que sur le moyen ou le long terme (Aram et al., 2019). Dans l'intervalle, l'adaptation des espaces publics aux conditions d'été pour préserver leur vitalité reste un défi majeur des aménageurs (Tavares et al., 2020). Pour y répondre, des installations éphémères ou des aménagements durables offrant des opportunités de rafraîchissement en ville sont proposées. Appelées « îlots frais », « oasis de fraîcheur », ou « points frais », ces installations se multiplient dans les grandes villes depuis deux décennies pour répondre à des enjeux écologiques, sanitaires et socioéconomiques. Ils interrogent les pratiques sociales et le ressenti des citoyens en saison chaude.

Le projet Coolscapes visait à répondre à plusieurs constats et enjeux. Tout d'abord, la caractérisation des variables physiques du microclimat urbain à l'échelle du piéton est essentielle pour mieux comprendre l'expérience thermique de la ville et l'effet des mesures d'adaptation proposées (Parkinson et de Dear, 2015 ; Peng et al., 2022). Cependant, en raison de la complexité spatio-temporelle du phénomène étudié, l'échelle du piéton est à la limite des approches de la simulation, de la météorologie physique et de la biométrie trouvées dans l'état de l'art (Mirzaei, 2015).

Ensuite, le passage entre l'évaluation météorologique et l'étude de l'expérience thermique reste un champ ouvert en conditions réelles. Les conditions d'usage des espaces publics et les formes d'appropriation des citoyens restaient peu étudiées dans le champ des études du microclimat urbain (Sharifi et Boland, 2020). Pourtant, leurs singularités climatiques sont reconnues comme étant essentielles pour leur pouvoir d'attraction et leur capacité à transformer les usages de la ville en saison chaude (Fraser et al., 2017 ; Lim, 2013).

Enfin, la compréhension de l'impact des travaux scientifiques dans ce champ sur le quotidien des pratiques d'aménagement des espaces publics restait peu abordée. Par conséquent, il était important de tisser des liens entre le monde des « solutions de rafraîchissement » et celui de la conception des espaces publics pour mieux adapter les villes au climat futur.

Le projet Coolscapes s'est donné pour ambition de contribuer à la connaissance de ces « points frais » en étudiant leur pouvoir de rafraîchissement et leur appropriation par les citoyens en périodes de forte chaleur. Le projet s'est fixé trois objectifs scientifiques : (1) caractériser et spatialiser les paramètres climatiques d'ambiance à l'échelle du piéton ; (2) caractériser l'expérience thermique des points frais par l'étude des usages de l'espace et des formes d'appropriation déployées par les citoyens ; et (3) analyser les pratiques de "climatisation urbaine" actuelles et identifier les axes de réflexion émergents.

### **C.2 APPROCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE**

Coolscapes s'est appuyé sur une démarche expérimentale interdisciplinaire et une démarche d'état des lieux et de prospective. La première fait appel aux méthodes spécifiques de la mesure climatique mobile et de l'ethnographie urbaine, tandis que la deuxième mobilise les méthodes de la veille, l'analyse des données qualitatives et la prospective urbaine.

## C.2.1 APPROCHE EXPERIMENTALE : METROLOGIE MOBILE ET ETHNOGRAPHIE URBAINE

Pendant les étés de 2020 et 2021, six terrains accueillant des dispositifs de rafraîchissement urbain ont été caractérisés selon les méthodes décrites ci-dessous. Le tableau qui suit synthétise les campagnes d'expérimentation.

Site	période	nb j.	plage horaire	nb obs.	T <sub>air</sub> (moy.)
Quai de plantes	5/2020-7/2020	9 j.	11h20-17h00	39	25.2 (20.6-30.2)
Carrière Miséry	7/2020	7 j.	11h20-18h00	31	25.9 (20,2-29,7)
Rideau Place Graslin	9/2020	6 j.	11h50-18h30	24	27.2 (21,5-32,7)
Estrade rafraîchissante	7/2021+9/2021	6 j.	11h00-17h15	24	27.1 (25,4-28,5)
Îlot frais	7/2021+9/2021	8 j.	11h20-17h35	32	27.1 (25,4-28,5)
Parc	7/2021+9/2021	8 j.	11h50-18h10	32	27,1
<b>TOTAL</b>		<b>44 j.</b>		<b>182</b>	

### C.2.1.1 Caractérisation des paramètres physiques

Une station mobile embarquée par un piéton a été conçue et réalisée dans le cadre de cette étude. Les critères du choix de capteurs (ex., temps de réponse, précision) et d'assemblage (ex., masques, hauteur piéton) sont issus d'un état de l'art de 20 stations mobiles (Requena-Ruiz et al., 2019). La station se présente sous la forme d'un chariot climatique équipé de : 1 sonde HMP155A Vaisala sous abri (T<sub>air</sub> et Hr) ; 2 thermocouples type T (T<sub>air</sub>) à hauteur des chevilles et de la nuque ; 1 anémomètre ultrasonique 2D WindSonic1 (W<sub>dir</sub> et W<sub>speed</sub>) ; et 3 radiomètres net NR01 de Hukseflux chacun composé d'un couple de pyranomètres et de pyrgéomètres pour le bilan d'énergie des rayonnements à onde courte et à grande longueur d'onde dans 6 directions (Stavropoulos-Laffaille et al., 2021). Les mesures sont horodatées et enregistrées toutes les 2 secondes.

La station est localisée dans l'espace avec une précision décimétrique grâce à un capteur inertiel Osmium MIMU22 (Gupta et al., 2015) attaché au pied de la personne qui conduit la station mobile. Ce capteur évalue la position relative à un point initial géolocalisé. Suite à un post-traitement des données spatiales, nous joignons les coordonnées GNSS aux mesures. Afin d'assurer la précision de la localisation et des lectures climatiques, un protocole combinant des mesures en mouvement à faible vitesse ( $V_{moy} = 0,50$  m/s) à des mesures en stop-and-go (T<sub>arrêt</sub> ≥ 50 sec.) (Qi et al., 2021) a été mise en œuvre. Les jeux de données résultants sont traités au moyen d'un ensemble d'outils numériques développés en Python dans le plug-in t4gpd qui reprend et étend des fonctionnalités standard de Pandas, Shapely, GeoPandas et Matplotlib.

Les outils qui ont été développés spécifiquement pour la lecture, la mise en forme, le traitement et l'exploration des données du projet Coolscapes ont été intégrés au plug-in t4gpd dans le double objectif d'une facilitation du déploiement et d'une mutualisation des efforts de maintenance. Ils consistent plus précisément en :

- Un ensemble d'outils de lecture des données de mesure. Ces outils permettent principalement de convertir les csv hétérogènes issus des stations de mesures climatiques statiques et mobiles, des données inertielles et autres données telles celles de Météo France en un ensemble de DataFrame pandas. Ces conversions s'accompagnent d'un ensemble de traitements de conversion et d'alignement des données (notamment d'horodatage) mais aussi d'un ensemble de tests visant par exemple à garantir l'indispensable croissance monotone de l'horodatage ;
- Une phase de recalage des données inertielles sur une trace théorique en intégrant les contraintes d'un ensemble de jalons (i.e. points de passage obligés),
- Une phase de jointure temporelle (au plus proche voisin) permettant d'associer, à toute position issue du recalage des données inertielles, un ensemble de mesures climatiques mobiles,
- Une phase de calcul des indices du confort thermique (T<sub>mrt</sub>, PET, UTCI, etc.),
- La production d'un ensemble de planches graphiques présentant une cartographie thématique du cheminement dans son contexte aux côtés d'un ensemble de chroniques de mesures (ou d'indicateurs dérivés) en fonction du temps.

La douzaine de classes python embarquées dans le plug-in t4gpd et développées spécifiquement dans le cadre du projet Coolscapes représente un peu plus de 600 lignes d'instructions. Pour en faciliter l'utilisation, ce développement a été encapsulé dans un serveur d'application web (technologie Flask) dédié exclusivement à la mise en forme des données de mesure.

Le contrôle des conditions extérieures de la mesure mobile a été effectué à l'aide d'une station Kestrel Instruments Heat stress tracker 5400, placée sur un trépied à l'extérieur de l'aire d'influence, et des données des stations de référence Météo France les plus proches, Nantes-Bouguenais pour Nantes et Roissy pour Paris La Défense.

Pour la visualisation des données acquises, un outil spécifique a été conçu et développé par l'équipe de recherche. Il s'agit d'un outil interactif, accessible depuis un navigateur web, permettant de visualiser les données climatiques sous forme de cartes et de séries temporelles.

### *C.2.1.2 Caractérisation de l'expérience thermique*

Les méthodes d'observation des usages et des interactions effectives des dispositifs de rafraîchissement étudiés dans leur environnement ont permis de renseigner sur l'efficacité de ces dispositifs et sur leur appropriation par les citoyens. Ceux-ci ont révélé les lieux de séjour des citoyens dans l'espace public, les modes de regroupement, les trajectoires de déplacement et les attitudes des citoyens sur place. Le choix a été fait de s'orienter vers des méthodes permettant une analyse spatiale et temporelle des phénomènes afin de faciliter les croisements avec la mesure réalisée en parallèle.

Il s'agit d'une part, de l'observation passive par les techniques de « mapping » pour les situations statiques et de « tracking » pour les flux de déplacements (Alexandra et al., 2009 ; Gehl et al., 2013 ; Sharifi et Boland, 2020), à l'aide d'un outil cartographique sur tablette numérique basé sur la solution libre de droits QField. Le chercheur note pendant les séquences d'observation (15-20 min.) les trajectoires de déplacement, les postures et activités apparentes des passants, ainsi que les éventuels lieux et temps d'arrêt.

D'autre part, l'observation passive des comportements et attitudes individuels nous éclaire sur les formes d'interaction et d'appropriation proposées par un dispositif spécifique (Aletta et al., 2016 ; Ng, 2016 ; Popovic, 2017), ici notamment lorsqu'il fait chaud. L'observateur note des situations d'interaction et enregistre des séquences vidéo générales selon le cadre légal. Celles-ci sont complétées par des entretiens courts. Ces séquences sont annotées à l'aide du logiciel MaxQDA selon un processus de codage qualitatif in vivo afin d'en faire ressortir les tendances et les singularités propres à chaque dispositif.

## C.2.2 ÉTAT DE LIEUX ET PROSPECTIVE URBAINE

### *C.2.2.1 Répertoire de dispositifs spatio-climatiques*

Tout au long de la recherche, nous avons mené un travail de veille des médias d'architecture, urbanisme et paysage afin de repérer des projets d'espaces publics agissant sur le rafraîchissement urbain. En intégrant les stratégies de rafraîchissement dans un cadre de projet plus global, ces médias contribuent à diffuser et normaliser l'adaptation des espaces publics au réchauffement climatique (Cortés et al., 2020, 2016). La veille a été enrichie par une campagne d'entretiens auprès d'acteurs (concepteurs, aménageurs, industriels) du rafraîchissement urbain. Un répertoire de 182 références a ainsi été constitué entre janvier 2019 et mars 2022. Il a permis de comprendre le contexte géographique, les environnements urbains d'insertion, les principaux acteurs et les techniques de rafraîchissement les plus récurrentes. Ensuite, une approche par codage qualitatif, à l'aide du logiciel MaxQDA®, des caractéristiques spatiales, climatiques et d'usage a permis une analyse typologique semi-automatisée pour en dégager les principales tendances.

### C.2.2.2 Atelier de prospective urbaine

Afin de mieux comprendre le rôle des points frais dans l'avenir des espaces publics en villes à climat tempéré, nous avons organisé un atelier de prospective urbaine en décembre 2022. Il a réuni une dizaine de professionnels du monde de l'aménagement urbain avec des profils complémentaires autour de la thématique : la conception urbaine et paysagère ; les techniques de rafraîchissement et stratégies d'adaptation aux changements climatiques ; et la stratégie urbaine et politique d'aménagement. La méthode appliquée a été celle du World Café en trois tours, avec un temps de restitution finale permettant un débat collectif. Celui-ci nous a permis d'apporter des éléments de réponse sur trois questions : (1) Quelles sont les incidences du rafraîchissement localisé des espaces publics sur les visions territoriales ? ; (2) Quelles peuvent être les modalités de rafraîchissement localisé pour l'avenir des espaces publics ; et (3) Comment penser les espaces de rafraîchissement localisés à travers les imaginaires et représentations de la fraîcheur en ville ?

## C.3 RESULTATS OBTENUS

La démarche de recherche du projet Coolscapes repose sur une approche métrologique et d'observations spatialisées des phénomènes, ce qui a permis de renforcer les compétences du laboratoire AAU en matière de microclimatologie urbaine et d'étude des espaces publics.

Premièrement, la construction du chariot climatique et les chaînes de traitement des données associées ont contribué au niveau international aux domaines de la biométéorologie et des études du microclimat urbain avec une approche centrée sur l'expérience de l'espace public (Chokhachian et al., 2018 ; Gallinelli et al., 2017 ; Middel et Krayenhoff, 2019). Nous avons développé une analyse spatiale et temporelle des données climatiques à l'échelle du piéton en suivant une méthode d'acquisition guidée par l'étude des usages. Cette démarche fait écho aujourd'hui aux questionnements des acteurs de l'aménagement dans leur objectif de mieux comprendre l'impact de leurs politiques et de leurs réalisations. Les annexes 2 et 3 détaillent les résultats de ce volet. Dans la suite de cette expérience, une deuxième station de métrologie climatique mobile, plus maniable et transportable, a été initiée dans le cadre de ce projet. Son développement actuellement en cours permettra d'augmenter la capacité de recherche de l'équipe dans ce domaine et de rester au meilleur niveau de l'état de l'art.

Deuxièmement, la mise en œuvre de cette méthode sur six terrains d'expérimentation a permis d'affiner l'approche méthodologique et de développer des méthodes d'analyse qui ont contribué au débat scientifique, notamment sur la diversité thermique d'un espace public ou d'un parcours urbain (Nikolopoulou et Steemers, 2003 ; Peng et al., 2022) et sur le potentiel alliesthésique des lieux en conditions d'usage réelles (Lam et al., 2021 ; Lau et al., 2019). L'analyse comparée des mesures dans les six terrains a permis de commencer à calibrer le potentiel de rafraîchissement de différents aménagements, contribuant à des études qui étaient auparavant réalisées sous conditions contrôlées (Santamouris et al., 2017 ; Santos Nouri et al., 2018). L'annexe 4 détaille les résultats de ce volet.

Troisièmement, la veille concernant les dispositifs de rafraîchissement et le répertoire résultant a permis d'établir un premier état des lieux de leurs situations géographiques, des acteurs concernés et des approches techniques les plus plébiscitées. L'analyse du répertoire a conduit à une typologie en 4 types et 11 sous-types, caractérisant les manières dont le rafraîchissement urbain est intégré aux dimensions spatiales et matérielles pour l'aménagement des espaces publics. Un site web dédié à cette analyse a été créé ([www.coolscapes.net](http://www.coolscapes.net)). Il présente l'ensemble des exemples répertoriés et peut accueillir de nouveaux exemples issus d'une contribution libre. Ce site a vocation à devenir une référence sur la question des dispositifs de rafraîchissement urbains. L'annexe 1 détaille les résultats de ce volet.

Enfin, la démarche de prospective urbaine a mis en perspective les enjeux opérationnels des résultats obtenus. Elle a notamment permis de mieux comprendre le rôle du rafraîchissement dans la stratégie urbaine, les temporalités du projet urbain convoquées, les matérialités des espaces publics associées, ainsi que les représentations et imaginaires mobilisés. L'annexe 5 détaille ce volet.

## C.4 EXPLOITATION DES RESULTATS

Outre les publications scientifiques et les actions de valorisation, chaque volet du projet a fait l'objet d'une exploitation spécifique :

- Le chariot climatique et les chaînes de traitement des données associées dans leur version actuelle ont été valorisés comme élément central de notre méthode d'étude de l'expérience thermique des espaces publics. Une deuxième version du chariot est actuellement phase d'étude pour améliorer sa mobilité. La chaîne de traitement des données est publiée sous licence libre dans le cadre du plug-in t4gpd. L'ensemble de jeux de données de mesures produits dans le cadre du projet Coolscapes a également été publié sous licence libre avec DOI 10.34847/nkl.36ac9k92.
- La démarche de recherche interdisciplinaire a été expérimentée auprès de deux collectivités (Paris La Défense et Nantes Métropole). En effet, ces acteurs manquent d'outils pour évaluer leurs initiatives en matière d'aménagement des espaces publics ou d'expérimentations urbaines visant le rafraîchissement du citadin. Le partenariat avec Nantes Métropole a été prolongé dans le cadre d'une nouvelle convention au-delà du projet Coolscapes.
- Le répertoire de dispositifs a été intégré en mars 2023 dans un site web dédié. L'objectif est de constituer une plateforme de partage de pratiques et de diffusion des savoirs. La version de mars 2022 a également été publiée comme un jeu de données sous licence libre avec DOI 10.5281/zenodo.4646959.
- L'atelier de prospective urbaine, son rapport associé et la mini-exposition conçue à cet effet, sont la base d'un réseau d'acteurs sur le rafraîchissement urbain.

## C.5 DISCUSSION

La mise en place de la station climatique mobile a été l'enjeu technique majeur de Coolscapes. Le choix des capteurs et leur assemblage répondent à des enjeux de temps de réponse court et de précision de la mesure, de spatialisation des variables du point de vue du corps humain et de localisation précise de la station dans l'espace public. Malgré le potentiel de la station développée, plusieurs limites persistent :

- Le caractère ponctuel des mesures, du fait de l'existence d'une seule station et d'un corpus de données encore relativement restreint. La multiplication du nombre de stations réalisant des mesures en parallèle et l'augmentation du nombre de campagnes sur plusieurs saisons permettraient de mieux comprendre par comparaison les seuils et les valeurs de chaque mesure.
- L'adaptation du protocole de mesure au temps de réponse des capteurs a été ici prise en compte, mais reste un enjeu principal pour la qualité de la mesure selon l'état de l'art.
- La mesure de la température de l'air à une fréquence temporelle élevée tout en évitant l'effet du rayonnement solaire reste à approfondir (mise sous abris adaptée aux capteurs).
- Le nombre et la taille des capteurs pour obtenir une mesure de qualité ne permettent pas actuellement de trouver des solutions plus transportables et manœuvrables. L'enjeu principal est notamment la caractérisation fine de la température radiante moyenne.

Le travail d'expérimentation nous a permis de comprendre le rôle de chaque méthode dans l'ensemble de la démarche pour l'étude de l'expérience thermique. La multiplication des travaux de terrain et leur analyse nous permettent de formuler plusieurs limites à cette étude :

- Les résultats de la recherche offrent une lecture de six dispositifs de rafraîchissement urbain dans le cadre de deux étés (2020 et 2021) où les températures n'ont pas été extrêmes. Outre l'évaluation des dispositifs en termes absolus, ce contexte a été positif pour l'étude au niveau météorologique (les conditions d'été tempéré ont permis d'étudier des dynamiques spatio-temporelles et des effets thermiques nuancés) et au niveau des observations (les espaces sont toujours restés relativement utilisés).
- Le choix des techniques d'observation passive pour l'étude des conditions de l'expérience thermique a favorisé une proximité spatio-temporelle des données quantitatives et qualitatives pour

explorer leur croisement. La méthode des parcours commentés (abandonnée finalement du fait de la complexité de recrutement des participants dans les conditions météorologiques requises par la mesure) aurait permis une approche par la qualification des effets climatiques repérés et les modalités d'expression du ressenti thermique.

- L'été 2020, dans le cadre de la crise sanitaire de la Covid-19, reste peu représentatif des pratiques collectives dans l'espace public.

Le croisement des données météorologiques et d'observation reste encore un champ à explorer. D'une part, nos observations ont conditionné la manière de mesurer et nous ont éclairés sur la compréhension des conditions de mesure. D'autre part, la visualisation croisée des données par la cartographie et le transect s'est avérée efficace dans une mise en parallèle des informations, mais reste peu pratique pour l'analyse de grands corpus de données. Des approches systématiques sur des jeux de données croisés sont en cours d'étude afin de comprendre les tendances et singularités des configurations spatio-climatiques de chaque site.

Le travail de veille et de prospective urbaine, développé tel que prévu dans le projet, constitue aujourd'hui une base à approfondir à plusieurs niveaux :

- Une ouverture du répertoire des dispositifs vers une plateforme de partage de pratiques de rafraîchissement urbain. Ceci vise à combler les manques actuels du répertoire en intégrant des dispositifs provenant d'autres régions climatiques peu représentées dans le corpus ainsi que des dispositifs et pratiques plus quotidiennes, mais probablement plus répandues en dehors du focus des médias.
- Le travail de prospective urbaine reste limité par la géographie des acteurs, ainsi que par le nombre d'itérations permettant de tirer des traits de généralité plus forte. Cependant, son impact auprès des aménageurs et concepteurs locaux a permis un premier transfert des connaissances vers l'urbanisme opérationnel.

## C.6 CONCLUSION

Le projet Coolscapes a constitué un effet de levier pour le laboratoire AAU, l'équipe CRENAU et le porteur du projet. Il a permis d'associer des notions théoriques et des méthodes pour l'étude et la théorisation de la dimension climatique des ambiances urbaines. Le laboratoire est désormais repéré pour une approche renouvelée sur le climat urbain orientée vers la caractérisation de l'expérience thermique à l'échelle du corps humain. Ceci a ouvert des portes à des nouveaux partenariats scientifiques et opérationnels. La contribution de Coolscapes à cette dynamique de recherche au sein d'AAU a été soulignée par le rapport HCERES livré l'année 2021. Il a favorisé notamment la création du groupe de recherche Climats, qui organise les activités de trois chercheurs titulaires en lien avec cinq autres chercheurs du laboratoire et structure les relations du laboratoire avec des réseaux nationaux et internationaux sur la thématique.

## C.7 REFERENCES

Aletta, F., Lepore, F., Kostara-Konstantinou, E., Kang, J., Astolfi, A., 2016. An Experimental Study on the Influence of Soundscapes on People's Behaviour in an Open Public Space. *Applied Sciences* 6, 276. DOI 10.3390/app6100276

Alexandra, M., Norbert, B., Markus, R., Dietmar, B., Stefan, van der S., 2009. Pedestrian Behaviour Monitoring: Methods and Experiences. *Ambient Intelligence and Smart Environments* 11-42. DOI 10.3233/978-1-60750-048-3-11

Aram, F., Higuera García, E., Solgi, E., Mansournia, S., 2019. Urban green space cooling effect in cities. *Heliyon* 5, e01339. DOI [10.1016/j.heliyon.2019.e01339](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01339)

Chokhachian, A., Ka-Lun Lau, K., Perini, K., Auer, T., 2018. Sensing transient outdoor comfort: A georeferenced method to monitor and map microclimate. *Journal of Building Engineering* 20, 94-104. DOI [10.1016/j.jobee.2018.07.003](https://doi.org/10.1016/j.jobee.2018.07.003)

Cortésao, J., Alves, F.B., Corvacho, H., Rocha, C., 2016. Retrofitting public spaces for thermal comfort and sustainability. *Indoor and Built Environment* 25, 1085-1095. DOI 10.1177/1420326X16659326

Cortésao, J., Lenzholzer, S., Mülder, J., Klok, L., Jacobs, C., Kluck, J., 2020. Visual guidelines for climate-responsive urban design. *Sustainable Cities and Society* 60, 102245. DOI [10.1016/j.scs.2020.102245](https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102245)

- Fraser, A.M., Chester, M.V., Eisenman, D., Hondula, D.M., Pincetl, S.S., English, P., Bondank, E., 2017. Household accessibility to heat refuges: Residential air conditioning, public cooled space, and walkability. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science* 44, 1036-1055. DOI [10.1177/0265813516657342](https://doi.org/10.1177/0265813516657342)
- Gallinelli, P., Camponovo, R., Guillot, V., 2017. CityFeel – micro climate monitoring for climate mitigation and urban design. *Energy Procedia* 122, 391-396. DOI [10.1016/j.egypro.2017.07.427](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.427)
- Gehl, J., Svarre, B., Steenhard, K.A., 2013. *How to study public life: Methods in Urban Design*. Island Press, Washington, DC.
- Gupta, A.K., Skog, I., Händel, P., 2015. Long-term Performance Evaluation of a Foot-mounted Pedestrian Navigation Device. New Delhi, India. DOI [10.1109/INDICON.2015.7443478](https://doi.org/10.1109/INDICON.2015.7443478)
- IPCC, 2022. *Climate Change 2022. Mitigation of Climate Change. Full report (No. 6)*. IPCC.
- Lam, C.K.C., Cui, S., Liu, J., Kong, X., Ou, C., Hang, J., 2021. Influence of acclimatization and short-term thermal history on outdoor thermal comfort in subtropical South China. *Energy and Buildings* 231, 110541. DOI [10.1016/j.enbuild.2020.110541](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110541)
- Lau, K.K.-L., Shi, Y., Ng, E.Y.-Y., 2019. Dynamic response of pedestrian thermal comfort under outdoor transient conditions. *Int J Biometeorol* 63, 979-989. DOI [10.1007/s00484-019-01712-2](https://doi.org/10.1007/s00484-019-01712-2)
- Lim, W.S.W., 2013. *Public Space in Urban Asia*. World Scientific Publishing, Singapore.
- Middel, A., Kravenhoff, E.S., 2019. Micrometeorological determinants of pedestrian thermal exposure during record-breaking heat in Tempe, Arizona: Introducing the MaRTy observational platform. *Science of The Total Environment* 687, 137-151. DOI [10.1016/j.scitotenv.2019.06.085](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.085)
- Mirzaei, P.A., 2015. Recent challenges in modeling of urban heat island. *Sustainable Cities and Society* 19, 200-206. DOI [10.1016/j.scs.2015.04.001](https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.04.001)
- Ng, C.F., 2016. Behavioral Mapping and Tracking, in: *Research Methods for Environmental Psychology*. John Wiley & Sons, Ltd, p. 29-51. DOI [10.1002/9781119162124.ch3](https://doi.org/10.1002/9781119162124.ch3)
- Nikolopoulou, M., Steemers, K., 2003. Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces. *Energy and Buildings* 35, 95-101. DOI [10.1016/S0378-7788\(02\)00084-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00084-1)
- Parkinson, T., de Dear, R., 2015. Thermal pleasure in built environments: physiology of alliesthesia. *Building Research & Information* 43, 288-301. DOI [10.1080/09613218.2015.989662](https://doi.org/10.1080/09613218.2015.989662)
- Peng, Z., Bardhan, R., Ellard, C., Steemers, K., 2022. Urban climate walk: A stop-and-go assessment of the dynamic thermal sensation and perception in two waterfront districts in Rome, Italy. *Building and Environment* 221, 109267. DOI [10.1016/j.buildenv.2022.109267](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109267)
- Popovic, M., 2017. *Potential des événements climatiques à l'échelle « pico » pour l'amélioration du confort thermique piétonnier (PhD Thesis)*. École Centrale de Nantes, Nantes.
- Qi, Q., Meng, Q., Wang, J., Ren, P., 2021. Developing an optimized method for the « stop-and-go » strategy in mobile measurements for characterizing outdoor thermal environments. *Sustainable Cities and Society* 69, 102837. DOI [10.1016/j.scs.2021.102837](https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102837)
- Requena-Ruiz, I., Drozd, C., Leduc, T., Rodler, A., Servièrès, M., Siret, D., 2019. A Review on interdisciplinary methods for the characterization of thermal perception in public spaces. *J. Phys.: Conf. Ser.* 6. DOI [10.1088/1742-6596/1343/1/012007](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1343/1/012007)
- Santamouris, M., Ding, L., Fiorito, F., Oldfield, P., Osmond, P., Paolini, R., Prasad, D., Synnefa, A., 2017. Passive and active cooling for the outdoor built environment – Analysis and assessment of the cooling potential of mitigation technologies using performance data from 220 large scale projects. *Solar Energy* 154, 14-33. DOI [10.1016/j.solener.2016.12.006](https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.006)
- Santamouris, M., Kolokotsa, D., 2015. On the impact of urban overheating and extreme climatic conditions on housing, energy, comfort and environmental quality of vulnerable population in Europe. *Energy and Buildings* 98, 125-133. DOI [10.1016/j.enbuild.2014.08.050](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.08.050)
- Santos Nouri, A., Costa, J., Santamouris, M., Matzarakis, A., 2018. Approaches to Outdoor Thermal Comfort Thresholds through Public Space Design: A Review. *Atmosphere* 9, 108. DOI [10.3390/atmos9030108](https://doi.org/10.3390/atmos9030108)
- Sharifi, E., Boland, J., 2020. Passive activity observation (PAO) method to estimate outdoor thermal adaptation in public space: case studies in Australian cities. *Int J Biometeorol* 64, 231-242. DOI [10.1007/s00484-018-1570-y](https://doi.org/10.1007/s00484-018-1570-y)
- Stavropoulos-Laffaille, X., Requena-Ruiz, I., Drozd, C., Leduc, T., Servièrès, M., Siret, D., 2021. Urban cooling strategies as interaction opportunities in the public space: a methodological proposal. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2042, 012128. DOI [10.1088/1742-6596/2042/1/012128](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2042/1/012128)
- Stewart, I.D., Oke, T.R., 2012. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 93, 1879-1900. DOI [10.1175/BAMS-D-11-00019.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1)
- Tavares, S., Sellars, D., Mews, G., Dupré, K., Cândido, C., Towle, S. (Éd.), 2020. Public health and well-being in public open spaces through climate responsive urban planning and design. *International Journal of Public Space* 1-6. DOI [10.32891/jps.v5i2.1279](https://doi.org/10.32891/jps.v5i2.1279)

## D LISTE DES LIVRABLES

Date de livraison	N°	Titre	Nature	Partenaires	Commentaires
7-2019	1.1	Répertoire dispositifs spatio-climatiques	Données	AAU-CRENAU	10.5281/zenodo.4646959
4-2023	1.2	Conception d'espaces publics pour l'adaptation au réchauffement urbain. Analyse à travers les médias d'architecture, urbanisme et paysage	Rapport	AAU-CRENAU	Annexe 1
9-2021	2.1	Caractérisation de l'environnement thermique du citoyen : état de l'art	Rapport	AAU-CRENAU	Annexe 2
11-2019	2.2	Métrologie des variables climatiques pour la caractérisation de l'expérience thermique	Rapport	AAU-CRENAU	Annexe 3 (mise à jour avril 2023)
2-2020	2.3	Station de mesures climatiques mobile v.1	Instrument	AAU-CRENAU	
3-2023	2.4	Étude d'un prototype de station de mesures v.2	Rapport	AAU-CRENAU	
4-2020	2.5	Projet pour application SIG sur tablette pour l'observation ethnographique dans l'espace public	Logiciel	AAU-CRENAU	
5-2021	2.6	Scripts de traitement des données pour une station de mesures mobile	Logiciel	AAU-CRENAU	
11-2022	2.7	Méthodologie d'analyse des dispositifs de rafraîchissement estival à destination des municipalités	Rapport	AAU-CRENAU	
2-2023	2.8	Datascope : plateforme en ligne pour la visualisation des données	Plateforme	AAU-CRENAU	
4-2023	3.1	Mise en œuvre et expérimentation de la démarche de caractérisation de l'expérience thermique	Rapport	AAU-CRENAU	Annexe 4
4-2023	3.2	Jeux de données des mesures micro-climatiques	Données	AAU-CRENAU	10.34847/nkl.36ac9k92
4-2023	3.3	Jeux de données des observations ethnographiques	Données	AAU-CRENAU	10.34847/nkl.4540o25d
4-2023	4.1	Atelier de prospective urbaine "Fraîcheurs urbaines. Exploration collective de scénarii d'adaptation des espaces publics urbains aux étés caniculaire"	Rapport	AAU-CRENAU	Annexe 5
12-2022	5.1	Blog suivi du projet	Site web	AAU-CRENAU	coolscapes.hypotheses.org
12-2022	5.2	Panneaux de présentations de la recherche	Panneaux	AAU-CRENAU	Annexe 6
3-2023	5.3	Site web du répertoire	Site web	AAU-CRENAU	www.coolscapes.net

## E IMPACT DU PROJET

### E.1 INDICATEURS D'IMPACT

#### *Nombre de publications et de communications (à détailler en E.2)*

		Publications multipartenaires	Publications monopartenaires
International	Revue à comité de lecture		3
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage		0
	Communications (conférence)		2
France	Revue à comité de lecture		2
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage		0
	Communications (conférence)		1
Actions de diffusion	Articles vulgarisation		0
	Conférences vulgarisation		3
	Autres		18

#### *Autres valorisations scientifiques (à détailler en E.3)*

	Nombre, années et commentaires
Brevets internationaux obtenus	0
Brevets internationaux en cours d'obtention	0
Brevets nationaux obtenus	0
Brevets nationaux en cours d'obtention	0
Licences d'exploitation (obten- tion/cession)	0
Créations d'entreprises ou essaimage	0
Nouveaux projets collaboratifs	3
Colloques scientifiques	0
Autres (préciser)	
Logiciels	2
Prototypes	2
Site web, plateforme	2
Ouverture à l'international	2

## E.2 LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

### E.2.1 INTERNATIONAL

#### E.2.1.1 Revues à comité de lecture

1. Requena-Ruiz, I., Siret, D., Stavropoulos-Laffaille, X., et Leduc, T. 2022. « Designing thermally sensitive public spaces: an analysis through urban design media ». *Journal of Urban Design*. DOI [10.1080/13574809.2022.2062312](https://doi.org/10.1080/13574809.2022.2062312).
2. Stavropoulos-Laffaille, X., Requena-Ruiz, I., Drozd, C., Leduc, T., Servières, M., et Siret, D. 2021. « Urban cooling strategies as interaction opportunities in the public space: a methodological proposal ». *Journal of Physics: Conference Series* 2042 (1): 012128. DOI [10.1088/1742-6596/2042/1/012128](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2042/1/012128).
3. Requena-Ruiz, I., Drozd, C., Leduc, T., Rodler, A., Servières, M., et Siret, D. 2019. « A Review on interdisciplinary methods for the characterization of thermal perception in public spaces ». *Journal of Physics: Conference Series*, n° 1343: 6. DOI [10.1088/1742-6596/1343/1/012007](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1343/1/012007).

#### E.2.1.2 Communications (conférence)

1. Stavropoulos-Laffaille, X., Requena-Ruiz, I., Drozd, C., Leduc, T., Servières, M., Siret, D. 2021. Urban cooling strategies as interaction opportunities in the public space: a methodological proposal, in: CISBAT 2021. Presented at the *CISBAT 2021 Climate Resilient Cities - Energy Efficiency & Renewables in the Digital Era*, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne.
2. Requena-Ruiz, I., Drozd, C., Leduc, T., Rodler, A., Servières, M., Siret, D., 2019. A Review on interdisciplinary methods for the characterization of thermal perception in public spaces, in: CISBAT 2019. Presented at the *CISBAT 2019 Climate Resilient Cities - Energy Efficiency & Renewables in the Digital Era*, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne.

### E.2.2 FRANCE

#### E.2.2.1 Revues à comité de lecture

1. Leduc, T., Stavropoulos-Laffaille, X., Requena-Ruiz, I. (2023). Implementation of a solar model and shadow plotting in the context of a 2D GIS: a validation based on radiometric measurements. *Revue Internationale de Géomatique*, (à paraître).
2. Requena-Ruiz, I., Leduc, T., Siret, D. 2023. Une méthodologie d'analyse des dispositifs de rafraîchissement estival basée sur la métrologie climatique mobile. *Revue Climatologie*, numéro spécial Changement climatique : les territoires acteurs des trajectoires d'adaptation et de transition écologique (en cours d'évaluation)

#### E.2.2.2 Communications (conférence)

1. Leduc, T., Stavropoulos-Laffaille, X., et Requena-Ruiz, I. 2021. « Implementation of a solar model and shadow plotting in the context of a 2D GIS: challenges and applications for the cooling effect of tree-covered based greening solutions in urban public spaces », in: *SAGEO 2021, 16th Spatial Analysis and Geomatics Conference*. La Rochelle, France.

### E.2.3 ACTIONS DE DIFFUSION

#### E.2.3.1 Conférences vulgarisation

1. Requena-Ruiz, I. 2022. Creating User Friendly Urban Coolspots with Raw-earth and XXL 3D printing. Présentation orale pour le webinaire *EUniWell meets New European Bauhaus*. Euniwell, Nantes-Florence-Linnaeus, 9/6/2022.

2. Colombert, M., Requena-Ruiz, I. 2021. Ilot de chaleur, canicules et enjeux du rafraîchissement urbain : focus usagers et ressentis. Présentation orale pour l'évènement *Agoras Paris La Défense*, Paris, 2/12/2021.
3. Requena-Ruiz, I. 2021. Coolscapes : L'espace urbain climatisé – perspectives techniques, spatiales et culturelles. Présentation orale pour l'évènement *Le Nouveau Bauhaus Européen en Pays de la Loire*. France Design Week Nantes, Nantes, 7/9/2021.

### E.2.3.2 Autres

1. Brunet, N., Jebbari, A., Lalisce, M., Mircescu, J., et Requena-Ruiz, I. 2022. « Summer School Experiencing Nantes ». *COOLSCAPES* (blog). [coolscapes.hypotheses.org/date/666](https://coolscapes.hypotheses.org/date/666)
2. Laffaille, X., et Requena-Ruiz, I. 2020. « Experimental sites – summer 2020 ». Billet. *COOLSCAPES* (blog). [coolscapes.hypotheses.org/451](https://coolscapes.hypotheses.org/451)
3. Laffaille, X., et Requena-Ruiz, I. 2020. « Quai des plantes (Nantes) – an experimental site ». Billet. *COOLSCAPES* (blog). [coolscapes.hypotheses.org/442](https://coolscapes.hypotheses.org/442)
4. Laffaille, X., et Requena-Ruiz, I. 2021. « Characterization of thermal comfort in the city – Part 1 ». Billet. *COOLSCAPES* (blog). [coolscapes.hypotheses.org/472](https://coolscapes.hypotheses.org/472)
5. Laffaille, X., et Requena-Ruiz, I. 2021. « Characterization of thermal comfort in the city – part 2 ». Billet. *COOLSCAPES* (blog). [coolscapes.hypotheses.org/487](https://coolscapes.hypotheses.org/487)
6. Laffaille, X., et Requena-Ruiz, I. 2021. « Experimental sites – summer 2021 ». Billet. *COOLSCAPES* (blog). [coolscapes.hypotheses.org/495](https://coolscapes.hypotheses.org/495)
7. Laffaille, X., et Requena-Ruiz, I. 2021. « Implementation of a solar model and shadow plotting in the context of a 2D GIS: challenges and applications for the cooling effect of tree-covered based greening solutions in urban public spaces ». Billet. *COOLSCAPES* (blog). [coolscapes.hypotheses.org/521](https://coolscapes.hypotheses.org/521)
8. Laffaille, X., et Requena-Ruiz, I. 2021. « Urban cooling strategies as interaction opportunities in the public space: a methodological proposal ». Billet. *COOLSCAPES* (blog). [coolscapes.hypotheses.org/535](https://coolscapes.hypotheses.org/535)
9. Laffaille, X., et Requena-Ruiz, I. 2022. « Atelier de prospective urbaine ». *COOLSCAPES* (blog). [coolscapes.hypotheses.org/date/2022/12](https://coolscapes.hypotheses.org/date/2022/12)
10. Leduc, T., Requena-Ruiz, I., et Siret, D. 2023. « Manipulating space-time chronicles in Python with Pandas, GeoPandas and Shapely. Application to mobile climate measurement ». Formation doctorale, ED SIS, Centrale Nantes, Nantes.
11. Pool, J., (réal.) 2023. « Ambiances ». Directe + podcast. *Vacarme*. Genève. Émission Radio, 25 minutes. [www.rts.ch/audio-podcast/2023/audio/ambiance-5-5-le-sens-des-masses-25897955.html](http://www.rts.ch/audio-podcast/2023/audio/ambiance-5-5-le-sens-des-masses-25897955.html)
12. Requena Ruiz, Ignacio. 2022. « Déambulations climatiques ». *COOLSCAPES* (blog). [coolscapes.hypotheses.org/date/545](https://coolscapes.hypotheses.org/date/545)
13. Requena-Ruiz, I. 2019. « Identification de dispositifs spatio-climatiques ». Billet. *COOLSCAPES* (blog). [coolscapes.hypotheses.org/180](https://coolscapes.hypotheses.org/180)
14. Requena-Ruiz, I. 2019. « Reflections on Interdisciplinary Methods for Studying the effects of Thermo-spatial Perception in the public space ». Billet. *COOLSCAPES* (blog). [coolscapes.hypotheses.org/229](https://coolscapes.hypotheses.org/229)
15. Requena-Ruiz, I. 2022. « Workshop Ambiances et Formes Urbaines : L'expérience des climats urbains ». Workshop thématique master à l'ENSA Nantes. Nantes.
16. Requena-Ruiz, I., et Laffaille, X. 2019. « Field trip to Paris ». Billet. *COOLSCAPES* (blog). [coolscapes.hypotheses.org/242](https://coolscapes.hypotheses.org/242)
17. Requena-Ruiz, I., et Laffaille, X. 2021. « Urban cooling strategies as interaction opportunities in the public space: a methodological proposal ». *COOLSCAPES* (blog). [coolscapes.hypotheses.org/date/2021/11](https://coolscapes.hypotheses.org/date/2021/11)
18. Requena-Ruiz, I., et Petesque, R. 2019. « Un inventaire des “dispositifs spatio-climatiques” dans le Monde ». Billet. *COOLSCAPES* (blog). [coolscapes.hypotheses.org/194](https://coolscapes.hypotheses.org/194)

## E.3 LISTE DES ELEMENTS DE VALORISATION

### E.3.1 LOGICIELS

1. Package Picoclim du plugin t4gps : la version 0.5.0, le plugin t4gpd (<https://pypi.org/project/t4gpd/>) embarque plus d'une dizaine de classes regroupées dans un même sous-ensemble t4gpd.picoclim. Ces classes permettent notamment la lecture, la jointure et le recalage des fichiers de données de mesure issus des capteurs Coolscapes.
2. Scripts traitement des données météorologiques : préalablement au développement du plugin sus-mentionné (t4gpd-0.5.0), un ensemble de scripts a été écrit et déposé sur <https://github.com/thomas-leduc/coolscapes>. Cet ensemble de scripts a permis de traiter (lecture, jointure, recalage) les données de mesure issues des capteurs Coolscapes et de produire un ensemble de planches graphiques à des fins d'illustration.
3. Notebook "Outdoor thermal comfort analyses at pedestrian level" sous format Jupiter notebook illustrant la démarche de traitement des données. Co-écrit par Xenia Stavropoulos-Laffaille et Thomas Leduc. Lien : [https://github.com/crenau/outdoor-thermal-comfort/blob/main/Outdoor\\_thermal\\_comfort.ipynb](https://github.com/crenau/outdoor-thermal-comfort/blob/main/Outdoor_thermal_comfort.ipynb)
4. Outils cartographiques pour l'observation des usages de l'espace public (v.1) : projet QField et scripts de traitement et représentation des données sur R pour l'analyse des observations des usages (statiques et dynamiques) dans l'espace public.

### E.3.2 PROTOTYPE

1. Chariot climatique (v.1) : station mobile géolocalisée pour la mesure de variables climatiques en lien au ressenti thermique du piéton.

### E.3.3 SITE-WEB PLATEFORME

1. Site web [www.coolscapes.net](http://www.coolscapes.net) depuis mars 2023.
2. Blog [coolscapes.hypotheses.org](http://coolscapes.hypotheses.org) de 2018 à 2023 sur la plateforme hypotheses.org.

### E.3.4 NOUVEAUX PROJETS ET CONTRATS DE RECHERCHE

1. *Terracool, construction d'un îlot frais en impression 3D en terre-crue*. 2022-2023. Laboratoires LS2N (Benoît FURET et Elodie PAQUET) et AAU (Ignacio REQUENA-RUIZ et Daniel SIRET). Financement : RFI Ouest Industries Créatives (Appel Démonstrateurs du Nouveau Bauhaus Européen). Financement obtenu, projet en cours de juillet 2022 à aout 2023.
2. *Etude des Expérimentations mobilier îlot de fraîcheur*. 2022-2024. Laboratoire AAU (Thomas LEDUC, Ignacio REQUENA-RUIZ et Daniel SIRET). Partenariat public-public Nantes Métropole – ENSA Nantes de juin 2022 à novembre 2024.
3. *Participatory Climate Sensing of Urban Coolscapes*. 2020. Laboratoire AAU (Laffaille, X. Thomas LEDUC, Ignacio REQUENA-RUIZ et Daniel SIRET) et Nantes Métropole. Réponse à l'appel Using data for local climate action du ICLEI Local governments for sustainability.

### E.3.5 OUVERTURE A L'INTERNATIONAL

1. *TCPSUD, Thermal Comfort in Public Space for Urban Design*. Partenaires : Universidad de Chile - Faculté d'Architecture et Urbanisme et Faculté de Sciences Agronomiques, Chile (Luz CARDENAS, Luis MORALES, Jiang CHIN LOU) ; Universidad de la Republica - Faculté d'ingénierie, Uruguay (José CATALDO) ; Nantes Université – ENSA Nantes – AAU (Thomas LEDUC, Ignacio REQUENA-RUIZ et Daniel SIRET). Financement : CLIMAT-AmSud (Appel 2022), Ministère de l'Europe et des Affaires Etrangères de Europa y de Asuntos Exteriores de Francia.
2. *Workshop international Experiencing the public space. A psycho-architectural approach to urban design*. Partenaires : Université Estatale de Milan (Italie), Politecnico di Milano (Italie), l'École Poly-

technique de l'Université de Thessaly (Grèce) et l'ENSA Nantes (France). Financement : Erasmus+ Blended Intensive Program.

## E.4 BILAN ET SUIVI DES PERSONNELS RECRUTES EN CDD (HORS STAGIAIRES)

Ce tableau dresse le bilan du projet en termes de recrutement de personnels non permanents sur CDD ou assimilé. Renseigner une ligne par personne embauchée sur le projet quand l'embauche a été financée partiellement ou en totalité par l'aide de l'ANR et quand la contribution au projet a été d'une durée au moins égale à 3 mois, tous contrats confondus, l'aide de l'ANR pouvant ne représenter qu'une partie de la rémunération de la personne sur la durée de sa participation au projet.

Identification	Nom et prénom	Stavropulos-Laffaille, Xénia
	Sexe H/F	F
	Adresse email (1)	xenia.laffaille@gmail.com
	Date des dernières nouvelles	15/1/2023
Avant le recrutement sur le projet	Dernier diplôme obtenu au moment du recrutement	Doctorat
	Lieu d'études (France, UE, hors UE)	France
	Expérience prof. antérieure, y compris post-docs (ans)	6 ans
Recrutement sur le projet	Partenaire ayant embauché la personne	AAU-CNRS
	Poste dans le projet (2)	Postdoctorant
	Durée missions (mois) (3)	25 mois
	Date de fin de mission sur le projet	31/9/2021
Après le projet	Devenir professionnel (4)	Postdoctorat CDD
	Type d'employeur (5)	Enseignement et recherche publique
	Type d'emploi (6)	Chercheur contractuel
	Lien au projet ANR (7)	Non
	Valorisation expérience (8)	Oui

### Aide pour le remplissage

(1) **Adresse email** : indiquer une adresse email la plus pérenne possible

(2) **Poste dans le projet** : post-doc, doctorant, ingénieur ou niveau ingénieur, technicien, vacataire, autre (préciser)

(3) **Durée missions** : indiquer en mois la durée totale des missions (y compris celles non financées par l'ANR) effectuées sur le projet

(4) **Devenir professionnel** : CDI, CDD, chef d'entreprise, encore sur le projet, post-doc France, post-doc étranger, étudiant, recherche d'emploi, sans nouvelles

(5) **Type d'employeur** : enseignement et recherche publique, EPIC de recherche, grande entreprise, PME/TPE, création d'entreprise, autre public, autre privé, libéral, autre (préciser)

(6) **Type d'emploi** : ingénieur, chercheur, enseignant-chercheur, cadre, technicien, autre (préciser)

(7) **Lien au projet ANR** : préciser si l'employeur est ou non un partenaire du projet

(8) **Valorisation expérience** : préciser si le poste occupé valorise l'expérience acquise pendant le projet.

## **F ANNEXES**

# Conception d'espaces publics pour l'adaptation au réchauffement urbain. Analyse à travers les médias d'architecture, urbanisme et paysage

## ANNEXE 1

Ignacio REQUENA-RUIZ      Xénia STAVROPULOS-LAFFAILLE  
Céline DROZD      Thomas LEDUC      Daniel SIRET

### Sommaire

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>2</b>
1.1	De la science du climat urbain aux médias de design urbain . . . . .	3
1.2	Points frais urbains : dessiner l'expérience thermique de la ville . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Méthode de recherche</b>	<b>5</b>
2.1	Procédures de collecte de données . . . . .	5
2.2	Procédures d'analyse des données . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Identification des points frais urbains à travers les médias de design urbain</b>	<b>11</b>
3.1	Analyse du contexte urbain . . . . .	11
3.2	Principaux acteurs du rafraîchissement . . . . .	12
3.3	Un grand éventail de techniques de rafraîchissement urbain . . . . .	13
<b>4</b>	<b>Une première typologie des points frais comme configurations spatio-climatiques à travers les médias de design urbain</b>	<b>15</b>
4.1	Places microclimatiques . . . . .	16
4.2	Capsules climatiques . . . . .	17
4.3	Mises en scène climatiques . . . . .	18
4.4	Mobiliers rafraîchissants . . . . .	20
<b>5</b>	<b>Conclusions</b>	<b>22</b>
	<b>Références</b>	<b>24</b>

*Cette annexe est issue de la traduction en français de l'article référencé ci-contre, merci de se référer à l'article original pour toute citation. Article : Requena-Ruiz, I., Siret, D., Stavropoulos-Laffaille, X. & Leduc, T. 2023. "Designing Thermally Sensitive Public Spaces: An Analysis Through Urban Design Media". Journal of Urban Design, 28, pp. 44-65. DOI: 10.1080/13574809.2022.2062312.*

## 1 Introduction

Les villes sont particulièrement sensibles à l'augmentation prévue des températures (IPCC, 2022). Les chercheurs reconnaissent que leur environnement bâti exacerbe les effets du réchauffement climatique, provoquant une détérioration du confort thermique extérieur et en augmentant le stress thermique (Santamouris et Kolokotsa, 2015; Stewart et Oke, 2012). Les recherches actuelles soulignent le fait que la mise en œuvre de mesures d'adaptation est un défi majeur pour les villes afin d'éviter que les espaces publics ne deviennent progressivement invivables (Tavares et al., 2020). En préservant la qualité de vie des espaces publics, l'aménagement urbain joue un rôle central dans la promotion à la fois (1) des stratégies d'atténuation qui visent à réduire la température de l'air dans l'ensemble de la ville (par exemple, les parcs, les toits végétalisés, le blanchiment des chaussées) et (2) des stratégies d'adaptation qui se concentrent sur les techniques de rafraîchissement spécifiques à une zone et l'adaptation des comportements (par exemple, les auvents urbains, les buses de brumisation, les surfaces vertes). Les connaissances sur l'amélioration thermique des espaces publics informent aujourd'hui les pratiques d'aménagement urbain grâce à divers types de directives fondées sur des données probantes (Cortés et al., 2020, 2016) ; cependant, la contribution des médias de design urbain à la popularisation de cette expertise dans une perspective plus large reste peu étudiée. Les médias de design peuvent être considérés à la fois comme un miroir des pratiques de conception de l'espace public et comme un moyen de diffusion des connaissances.

Les médias de design urbain présentent des pratiques de conception récentes qui entremêlent des stratégies d'adaptation climatique avec les dimensions culturelles, sociales et matérielles de la conception pour la mise en œuvre d'espaces publics attrayants et résilients (Santos Nouri et Costa, 2017; Stanislav et Chin, 2019). Plutôt que de présenter des transformations générales de la ville avec des solutions identiques, les projets d'aménagement des espaces publics apparaissent progressivement comme des formes d'« interventions tactiques contre le stress thermique à l'échelle de la rue » (Kluck et Boogard, 2020). Ce processus conduit à l'identification de « points frais urbains » (également appelés « refuges urbains frais » ou « oasis urbaines fraîches ») au sein du tissu urbain en tant qu'espaces qui diminuent localement la température perçue et permettent la vie publique pendant les périodes chaudes.

Cet article fait l'hypothèse que les médias de design urbain contribuent à promouvoir les espaces publics thermosensibles de manière complémentaire aux directives d'aménagement. En présentant des projets réels résultant d'un processus négocié avec de multiples acteurs et variables, y compris thermiques, ils influencent les processus d'inspiration et de résolution de problèmes des concepteurs des projets urbains (Forty, 2000). Cette étude analyse les principales caractéristiques des points frais urbains en tant qu'espaces publics thermosensibles du point de vue des médias de design urbain.

Des revues spécialisées aux sites de design, les photographies publiées des projets d'espaces publics fournissent des documents et des informations interprétatives. Grâce à des représentations visuelles des dimensions spatiales et climatiques de la conception, ces images synthétisent la

situation phénoménale de l'espace public et « nous aident à clarifier les formes, les processus et les conditions engendrées » (Morselli, 2019). Considérant que le processus éditorial des revues de design orientées vers les praticiens organise et catégorise l'information pour guider son interprétation, cet article examine les approches de conception émergentes des espaces publics thermosensibles telles qu'elles sont promues dans les médias de design urbain.

## **1.1 De la science du climat urbain aux médias de design urbain**

L'amélioration thermique des espaces publics englobe au moins trois domaines scientifiques qui font l'objet d'une abondante littérature scientifique (Lenzholzer et al., 2018) : (1) la perception thermique et le confort dans les espaces publics extérieurs ; (2) le rafraîchissement urbain et les technologies d'atténuation ; et (3) les études sur l'espace public et la vie publique.

Du point de vue de la perception thermique, plusieurs études analysent les effets des configurations spatiales urbaines (par exemple, la forme des bâtiments, les matériaux, les systèmes techniques, la végétation) sur la perception thermique humaine (Middel et Krayenhoff, 2019; Steane et Steemers, 2003). Ils explorent les réponses thermorégulatrices du corps humain dans les environnements bâtis extérieurs (Johansson et al., 2014), afin de proposer des indices de sensation thermique en fonction de facteurs physiologiques ou psychologiques. D'autres études ont ouvert ce champ en examinant les facteurs qui affectent la perception thermique, tels que la culture des personnes ou l'adaptation au climat (Lenzholzer et al., 2018).

Du point de vue du rafraîchissement urbain et des technologies d'atténuation, les recherches actuelles portent sur les conséquences indésirables de l'atténuation des îlots de chaleur urbains (Santamouris et al., 2017). Les chercheurs s'accordent sur quatre approches principales pour l'amélioration thermique des espaces publics : la réduction du rayonnement solaire par l'ombrage (Middel et al., 2016), l'augmentation de l'évapotranspiration par des solutions vertes ou à base d'eau (Aram et al., 2019; Jacobs et al., 2020), l'optimisation des matériaux de surface afin de diminuer l'absorption du rayonnement solaire ou d'améliorer le transfert de chaleur (Santamouris, 2013), et l'organisation de la forme urbaine pour optimiser les gains solaires et les effets du vent (Stewart et Oke, 2012).

Du point de vue des études sur l'espace public et la vie publique, des conditions thermiques agréables dans l'espace public sont souvent liées à la présence d'activités personnelles (par exemple, se tenir debout, s'asseoir, manger, s'allonger) et sociales (par exemple, les enfants qui jouent, les sports de groupe, la musique) (Chen et Ng, 2012; Gehl, 2011; Whyte, 1980). Diverses études ont examiné le potentiel des formes urbaines pour créer des espaces publics qui modifient les paramètres climatiques et façonnent l'expérience climatique ordinaire des citoyens (Heschong, 1981; Roesler et Kobbi, 2018).

Les domaines susmentionnés de la perception thermique et des techniques de rafraîchissement urbain contribuent à l'élaboration de directives en matière d'aménagement urbain à partir de connaissances fondées sur des preuves (Corteseo et al., 2020). Ils offrent des connaissances transférables qui « vont au-delà d'un cas spécifique pour s'appliquer à un ensemble de situations plus généralisables » (Prominski, 2017). Les stratégies de conception d'espaces publics thermosensibles intègrent aujourd'hui des directives pour les urbanistes et les concepteurs allant du niveau supranational (par exemple, C40-cities (2021) ; Georgi et al. (2016)) au niveau national et local (par exemple, Osmond et Sharifi (2017) ; Ruefenacht et Acero (2017) ; Mairie de Paris (2018)).

Lorsqu'il est abordé uniquement sous l'angle des approches par résolution de problèmes des

directives, le cadre des stratégies d'adaptation reste incomplet pour la conception d'un espace public. Ainsi, les références inspirantes publiées dans les médias de design urbain, présentées dans leur ensemble, pourraient influencer le processus créatif d'essai-erreur de la conception en complément des directives.

## **1.2 Points frais urbains : dessiner l'expérience thermique de la ville**

Les points frais urbains sont des espaces publics à différentes échelles (de la place au mobilier urbain) dont l'aménagement combine l'espace et le climat tout en créant des relations réciproques avec les activités sociales. Ce sont des « lieux thermiques », c'est-à-dire des espaces dotés de qualités thermiques qui « tendent naturellement à devenir des lieux sociaux car les gens se rassemblent pour profiter du confort qu'ils y trouvent » (Heschong, 1979). Ils modifient les variables climatiques (température, humidité, mouvement de l'air) au niveau du corps grâce à des stratégies éphémères ou permanentes (auvents, brumisateurs, miroirs d'eau, fontaines sèches installées au sol, etc.).

Un simple examen des revues d'aménagement urbain montre que les médias se font l'écho de cet intérêt à travers des articles et des numéros spéciaux sur la santé en ville, sur le changement climatique ou sur l'écologie urbaine. Cependant, l'influence des approches d'amélioration thermique des espaces publics dans les médias orientés vers les praticiens reste peu étudiée et soulève diverses questions, par exemple : Comment les médias définissent-ils, directement ou indirectement, une approche estivale de l'aménagement de l'espace public ? Comment les médias contribuent-ils à établir une esthétique de la fraîcheur dans l'espace public en présentant des projets inspirants de points frais urbains ?

## 2 Méthode de recherche

Cet article adopte l’approche inductive de la science des observations (« observatory science ») (Miller et al., 2021) basée sur la construction d’un inventaire multi-sources de projets d’aménagement urbain impliquant des techniques de rafraîchissement. Une version consolidée de l’inventaire a été analysée à l’aide de deux techniques d’analyse des données pour répondre aux questions de recherche susmentionnées : l’analyse statistique descriptive et l’approche constructiviste de la théorie ancrée (« grounded theory ») (Corbin et Strauss 2008) par le biais d’une analyse qualitative des données et d’un codage des variables (della Porta, 2008).

### 2.1 Procédures de collecte de données

Le travail de recherche a commencé par l’établissement d’un inventaire de projets d’espaces publics construits. Ces projets ont été sélectionnés par le biais d’un examen systématique de quatre types de sources d’information concernant l’aménagement urbain orientées vers les praticiens. La période d’étude a été fixée de 2002 (année de création du Prix européen de l’espace public urbain) à décembre 2020, bien qu’elle ait été réduite pour plusieurs sources en fonction de leur période de publication ou de leur accessibilité. Quatre catégories de sources de recherche ont été recensées (voir le tableau 1 pour plus de détails) :

- Les périodiques d’architecture, d’urbanisme et d’aménagement paysager publiés sur papier.
- Les revues et plateformes en ligne dans le domaine de l’architecture, de l’urbanisme et de l’architecture paysagère.
- Les prix d’architecture, d’urbanisme et d’architecture paysagère.
- Les programmes d’architecture et d’urbanisme.

Table 1: Inventaire des sources de données.

Type de source	Nom	Audience	Requête	
Revues d’architecture, d’urbanisme et de paysage publiées sur papier	A+T	Hispano et anglophone	2005–2020	
	Domus	Worldwide	2002–2020	
	Journal of Landscape Architecture	Anglophone	2006–2020	
	L’Architecture d’Aujourd’hui	Franco- et anglophone	2002–2020	
	Urban Design Journal	Anglophone	2002–2020	
	Revue Urbanisme	Francophone	2014–2020	
	Prix de design en architecture, design urbain et architecture de paysage	European Prize for Urban Public Space	Anglophone	2002–2020
		European Union Prize for Contemporary Architecture Mies van der Rohe Award	Anglophone	2005–2020
		LILA□ – Landezine International Landscape Award	Anglophone	2016–2020
		Urban Land Institute’s Urban Open Space Award	Anglophone	2010–2020

Type de source	Nom	Audience	Requête
Programmes d'architecture et de design urbain	Young Architects Programme MOMA PS1 (New York)	Anglophone	2002–2019
	Young Architects Programme Maxxi (Rome)	Anglophone	2011–2020
Revue et portails en ligne d'architecture, d'urbanisme et de paysagisme	Archdaily	Anglophone	Boolean query “public space OR urban” AND “cooling OR oasis OR cool spot”
	Dezeen	Anglophone	
Moteurs de recherche	Landezine	Anglophone	
	Metropolis	Anglophone	
	Topos Magazine	Anglophone	
	Google	Anglophone	Boolean query “public space OR urban” AND “cooling OR oasis OR cool spot”
	DuckDuckGo	Anglophone	
	Pinterest	Anglophone	Reiterative random search starting with previous word chains.
	Google Images	Anglophone	

Les périodiques papier ont été étudiés en examinant la table des matières, le titre de l'article et les illustrations du projet. Les sources en ligne ont été analysées au moyen d'une requête booléenne dans la langue principale du site. Les titres, l'introduction et les vignettes ont ensuite été examinés.

Pour saisir les différentes dimensions du phénomène et trianguler les données, une deuxième méthode a été utilisée pour la collecte des données. La recherche documentaire a ainsi été complétée par des requêtes booléennes identiques dans des moteurs de recherche multilingues basés sur des mots (Google et DuckDuckGo) et des moteurs de recherche basés sur des images (Google Images et Pinterest). Ce processus a été mené en anglais, en français et en espagnol.

Trois critères cumulatifs ont été considérés comme nécessaires pour inclure un projet dans l'inventaire :

- Le projet porte sur la conception d'un espace public extérieur construit.
- La description du projet et les illustrations révèlent l'intention des concepteurs de traiter les paramètres climatiques, de créer des effets de rafraîchissement ou d'introduire des techniques de rafraîchissement.
- Les photographies du projet fournissent des preuves visuelles du conditionnement climatique en représentant des effets de rafraîchissement (par exemple des ombres, de la brume) ou en montrant des citoyens profitant potentiellement de la fraîcheur.

Sur la base des protocoles de collecte de données de la théorie ancrée, la taille de l'échantillon a été déterminée par trois conditions cumulatives :

- Redondance de l'information sur les techniques de rafraîchissement urbain : la collecte de données se termine lorsqu'aucune nouvelle information sur le sujet n'est obtenue en ajoutant d'autres projets.

- Saturation thématique : la collecte des données prend fin lorsqu'aucun nouveau code thématique n'est trouvé en échantillonnant davantage de projets (Guest et al., 2020).
- Limitation temporelle de la recherche : la collecte des données a été réalisée de mars 2019 à décembre 2020.

À l'issue de ce processus, 232 références initiales ont été identifiées. Après un examen détaillé des textes et des illustrations, chaque projet dans un contexte urbain différent a été isolé comme un élément d'étude. Lorsque des informations supplémentaires étaient nécessaires à l'analyse, elles ont été recueillies sur les sites web des concepteurs, des consultants ou des commanditaires. À la fin du processus, 182 références ont été réunies et forment la première version de l'inventaire présentée dans la base de données (10.5281/zenodo.4646959).

Chaque élément de la base de données identifie un point frais urbain situé dans un environnement différent avec des données spatio-temporelles (coordonnées GPS, adresse, ville, pays, année de construction), les acteurs de la conception (concepteurs, consultants spécialisés, sponsors), le contexte urbain (ville compacte/dense, banlieue, parc urbain ou parc culturel) et la technique de rafraîchissement appliquée. Ces données ont été complétées par une description du projet et de ses illustrations architecturales : dessins techniques (plans et coupes), photographies publiées (espace, matériaux, construction, événements ou situations ordinaires).

## **2.2 Procédures d'analyse des données**

### **2.2.1 Statistiques descriptives**

Une analyse statistique a permis de décrire l'inventaire et de préciser la définition d'un point frais urbain par son contexte urbain, les acteurs impliqués et les techniques de rafraîchissement utilisées.

### **2.2.2 Analyse qualitative des données**

L'inventaire constitue la base de toute approche constructiviste de la théorie ancrée (Corbin et Strauss, 2008), par le biais d'une analyse qualitative des données et d'un codage des variables (della Porta, 2008), dans le but de déduire des tendances générales et des théories (Charmaz, 2001). Cette procédure a été assistée par MaxQDA® et l'analyse statistique dans R.

Les étapes du processus d'analyse qualitative des données (AQD) ont été les suivantes :

1. Codage ouvert : sélection des termes clés des stratégies de rafraîchissement, de l'aménagement de l'espace et des activités potentielles à travers les descriptions textuelles et les illustrations des projets.
2. Reformulation des éléments clés : examen des textes et illustrations sélectionnés afin d'identifier les caractéristiques répétées et les singularités.
3. Réduction des éléments : les codes ont été accumulés et réduits pour éviter les redondances.
4. Génération de catégories : les codes ont été regroupés par thèmes pour développer des catégories et, dans la mesure du possible, les codes ont été organisés en échelles graduelles.
5. Mise en relation des catégories : des liens ont été établis entre les catégories, sur la base des théories de la conception architecturale et urbaine, des ambiances urbaines et de la perception thermique, afin de renforcer la cohérence de l'inventaire.

Les étapes 1 à 5 ont été réalisées par deux chercheurs formés à l'architecture et à l'urbanisme.

En conséquence, le système de codage expliqué ci-dessus a été créé et mis en œuvre de manière cohérente dans l'ensemble du contenu de l'inventaire. Description du codage du microclimat. Les aspects physiques observables dans les illustrations et les textes des projets sont classés selon quatre catégories : (1) stratégie de rafraîchissement urbain, (2) approche du transfert de chaleur, (3) utilisation potentielle des ressources (énergie et eau), et (4) zone d'influence de l'effet microclimatique évaluée dans les photographies par rapport à sa surface. Le tableau 2 présente une définition détaillée des catégories de codage.

Table 2: Codage de caractères du microclimat.

Codes	Sous-codes	Description
Stratégies de rafraîchissement urbain	Bleue	Approches basées sur l'eau : stagnante, en stockage ou en circulation.
	Verte	Approches utilisant diverses formes de végétation intégrées dans l'espace.
	Blanche	Approches basées sur les caractéristiques formelles de la structure et ses effets rafraîchissants : ombrage ou courants d'air.
	Grise	Approches basées sur les matériaux et la technologie : modification de l'albédo des surfaces, absorption et stockage d'eau, modification des températures de surface, ventilation artificielle.
Gestion des flux énergétiques pour le rafraîchissement	Conduction	Rafrâichissement produit par le transfert de chaleur au contact direct d'un élément plus frais.
	Convection	Rafrâichissement produit lorsque le corps entre en contact avec une masse d'air plus frais.
	Evaporation	Rafrâichissement produit par une réduction de la température de l'air conséquence de la dissipation de chaleur par le passage de l'eau de état liquide à l'état gazeux.
	Rayonnement (ombrage)	Rafrâichissement produit par le masquage du rayonnement solaire direct.
Usage potentiel de ressources	Rayonnement (absorption)	Rafrâichissement produit par le transfert de chaleur depuis le corps du piéton vers un élément plus frais.
	Actif	Dispositifs présumés consommateurs d'énergie ou d'eau.
	Passif	Dispositifs présumés à très faible consommation de ressources.
Aire d'influence de l'effet microclimatique (par rapport à la surface du dispositif)	Disséminée	Zone d'influence disséminée à grande distance de la surface de du dispositif.
	Élargie	Zone d'influence étendue à l'environnement immédiat du dispositif.
	Confinée	Zone d'influence circonscrite à la surface du dispositif.
	Localisée	Zone d'influence concentrée sur un point à l'intérieur du dispositif.

Description du codage spatial. Les aspects spatiaux de la conception des espaces publics liés au climat sont classés en quatre catégories (voir tableau 3) correspondant (1) à l'échelle de conception, (2) à l'identification spatiale et (3) à l'apparence matérielle dominante pour chaque zone de rafraîchissement. Ces catégories ont été mises en évidence grâce à l'analyse des illustrations. Les descriptions textuelles et les plans des projets ont contribué à caractériser (4) la temporalité de la conception.

Table 3: Codage de caractères liés à la spatialité.

Codes	Sous-codes	Description
Échelle spatiale	XS	Mobilier urbain.
	S	Pavillon/installation.
	M	Petit espace public.
	L	Grand espace public.
	XL	Espace de grande échelle.
Identification dans l'espace	Inaperçu	Dispositif inaperçu dans l'espace, ou presque.
	Contours	Dispositif perceptible par ses contours.
	Saillant	Dispositif visuellement remarquable.
	Semi-fermé	Dispositif clôturé par au moins deux côtés préservant au moins une surface ouverte à l'extérieur.
	Fermé	Dispositif fermé qui délimite la zone d'usage et l'effet microclimatique.
Artificialité du dispositif	Artificiel (minéral)	Usage de matériaux manufacturés : métal, pierre, béton, plastique, bois.
	Végétation (contrôlée)	Espace artificiel intégrant des plantations végétales.
	Végétation (libre)	Espace avec des végétaux en pleine terre et croissance libre.
Temporalité du dispositif	Permanent	Dispositif pérenne présumé à longue durée.
	Éphémère	Dispositif démontable installé dans l'espace urbain pour une durée déterminée.

Description du codage de l'expérience des citoyens. La gamme d'activités et l'engagement corporel présentés dans les photographies sont classés selon quatre catégories : (1) la diversité des activités, (2) la cinétique spatiale et (3) la réactivité du projet telle qu'elle est observée dans les illustrations architecturales. Une approche théorique a permis d'émettre des hypothèses sur (4) le gradient perceptif des citoyens et les conditions apparentes du climat conçu dans l'espace public. La typologie appliquée dans cet article s'inspire des principes morphologiques de Torgue (2005) pour les ambiances urbaines (arrière-plans, séquences localisées et signaux) et de la typologie des stimuli climatiques de Popovic (2017) au niveau du corps (îlots microclimatiques, bandes d'ambiances climatiques et climats thermiquement distincts). Une définition détaillée de ces catégories de codage est présentée dans le tableau 4.

Table 4: Codage de caractères liés à l'expérience du citoyen

Codes	Sous-codes	Description
Diversité d'activités	Monofonctionnel	Les images ne montrent qu'une seule activité.
	Multifonctionnel	Les images présentent une variété d'usages sans montrer une configuration réversible.
Cinétique de l'espace	Flexible	Les images présentent une configuration entièrement réversible.
	S'asseoir	Les images montrent des personnes assises.
	Se promener	Les images montrent des piétons en situation de déambulation.
Potentiel d'interaction	Traverser	Les images montrent des piétons traversant l'espace.
	Parcourir	Dispositif offrant une forme d'interaction basique basée sur la traversée de l'espace. Il implique un mouvement du citoyen pour se rapprocher du dispositif plutôt qu'une interaction physique consciente.

Codes	Sous-codes	Description
Gradient perceptif	Accéder	Dispositif nécessitant que les piétons se déplacent dans sa zone d'influence. Il implique une immersion des piétons dans le dispositif.
	S'engager	Dispositif nécessitant une action simple de la part des citoyens pour se rafraîchir (par exemple, s'asseoir ou être debout à un endroit).
	Actionner	Dispositif nécessitant un geste conscient de la part des citoyens pour se rafraîchir (par exemple appuyer sur un bouton, actionner une poignée de commande ou rapprocher la main).
	Fonds	Gradient caractérisé par des conditions climatiques stables, sans variations intenses, dans une aire aux limites floues. L'effet climatique apparaît progressivement, passant presque inaperçu jusqu'à ce que l'immersion soit accomplie.
	Séquences	Gradient composé de différents effets climatiques perçus comme un ensemble. Les effets s'articulent ou se superposent dans l'aire d'influence proposant une variété de situations dans l'espace et dans le temps. L'effet climatique composite créé est un marqueur de l'espace.
	Évènements	Gradient produit dans de petites surfaces. Il émerge clairement dans son contexte par un contraste d'intensité et par le changement des formes d'interaction entre le citoyen et son environnement. Il modifie les sensations et comportements des piétons par une stimulation localisée.

### 2.2.3 Processus de construction de la typologie

Cet article présente une approche typologique qui vise à montrer comment les caractéristiques singulières de chaque projet peuvent être reliées à une vision plus générale de la conception des espaces publics face à l'augmentation des températures. Fréquemment adoptée en sciences sociales lorsqu'aucun modèle théorique n'explique les paramètres de chaque type possible (Henry et al., 2015), l'approche typologique contribue à la connaissance de l'aménagement des espaces publics. Cela a été réalisé en définissant l'ensemble des attributs communs qui caractérisent les tendances de conception en cours, comme le montrent les médias de design urbain.

Une typologie est le résultat d'un processus de regroupement dans lequel tous les éléments d'un type sont aussi similaires que possible, tandis que les différences entre ces derniers doivent être aussi fortes que possible. Sur la base de l'analyse des occurrences d'attributs qualitatifs dans le même projet, MaxQDA® a été utilisé pour déduire une première typologie par le biais d'un apprentissage non supervisé - également appelé « clustering » en statistiques. La mesure de la similarité entre les projets codés a été analysée en appliquant le coefficient de (Kuckartz et Rädiker, 2019) : les codes présents dans deux documents ou plus ont été comptés deux fois, tandis que la non-répétition des mêmes codes a été comptée une fois. Les premiers résultats ont été évalués et discutés par l'analyse d'un diagramme en arbre et par l'inspection visuelle des vignettes des projets de chaque catégorie. Cela a permis d'affiner la sensibilité du modèle aux attributs qualitatifs. En d'autres termes, les attributs empêchant une différenciation claire entre les types ont été filtrés.

### 3 Identification des points frais urbains à travers les médias de design urbain

#### 3.1 Analyse du contexte urbain

L'inventaire se compose de 182 références provenant de 33 pays du monde entier. Comme le montre le tableau 5, la méthode de recherche a abouti à une répartition géographique dans laquelle 161 des 182 points frais se trouvent en Europe occidentale, en Amérique du Nord et en Europe méridionale. La moitié des projets sont situés entre 40,5° et 49,0° de latitude - de Madrid ou New York (limite sud) à Paris ou Nuremberg (limite nord). L'utilisation de langues d'origine indo-européenne pour la recherche (anglais, français, espagnol) introduit un biais important qui nécessite des recherches supplémentaires pour affiner une image globale. Par exemple, la présence de seulement 16 références en Asie de l'Est et du Sud-Est, une région fortement urbanisée et avec des populations à hauts revenus, pourrait être sous-estimée.

Dans le contexte de l'Europe et de l'Amérique du Nord, cette constatation confirme l'hypothèse selon laquelle les points frais urbains, tels qu'ils sont présentés dans les médias consacrés au design urbain, sont relativement spécifiques aux villes situées à des latitudes moyennes dans les pays riches.

Table 5: Distribution des projets dans les grandes régions géographiques à travers le monde.

Région	Nb de projets
Europe occidentale	96
Amérique du Nord	27
Europe du Sud	25
Asie de l'Est	12
Europe du Nord	7
Asie du Sud-Est	4
Europe de l'Est	4
Asie de l'Ouest	3
Océanie	3
Amérique latine	1

L'analyse des localisations des projets publiés montre que ce phénomène tend à se limiter aux grandes villes et aux métropoles. Le tableau 6 montre que 101 projets apparaissent dans des agglomérations urbaines dont la population est comprise entre 500 000 et 10 millions d'habitants. Soumises à la concurrence mondiale en matière d'attractivité urbaine, les grandes villes semblent allouer davantage de ressources à la création d'espaces publics attrayants qui résistent mieux à la hausse des températures. Ce constat pourrait également s'expliquer par un parti pris général des revues de design urbain en faveur des projets des grandes villes.

Table 6: Distribution des projets selon la taille des villes.

Tissu urbain	Nb de projets
> 10 millions : mégapole	24
1-10 millions : métropole	74
500 k à 1 million : ville régionale	22
50 k à 500 k : ville	36
20 k à 50 k : ville de taille moyenne	17

Tissu urbain	Nb de projets
< 20 k : petite ville	9

Parmi les trois catégories proposées dans le tableau 7, 120 des 182 projets sont situés dans un tissu urbain compact/dense, le plus souvent à proximité du centre-ville. Plus rarement, ils sont situés dans des parcs culturels ou des zones d'activités commerciales dans lesquelles le point frais urbain contribue à diversifier les situations de rafraîchissement et les équipements. Ce résultat confirme trois tendances principales : (1) les points frais urbains apparaissent comme des attracteurs d'activités dans la ville, pour renforcer les nœuds existants ou en créer de nouveaux ; (2) les points frais urbains apparaissent comme des solutions dans les zones où les conditions de croissance des plantes sont limitées en raison du compactage du sol ou de l'espace restreint pour les racines (Czaja et al., 2020) ; (3) la prise de conscience des décideurs et des concepteurs de la nécessité de donner la priorité aux points frais urbains dans les zones densément urbanisées plus sensibles aux îlots de chaleur urbains (Stewart et Oke, 2012).

Table 7: Distribution des projets selon les contextes urbains.

Contexte urbain	Nb de projets
Tissu urbain compact/dense	121
Tissu urbain dispersé	12
Parcs à grande échelle (parcs urbains ou à usage culturel)	49

## 3.2 Principaux acteurs du rafraîchissement

### 3.2.1 La diversité des concepteurs de points frais urbains

Conformément à la nature intrinsèquement interdisciplinaire du design urbain (Carmona, 2014), l'inventaire montre neuf types de profils de concepteurs travaillant seuls ou en collaboration dans la conception de points frais urbains ; néanmoins, comme le montre le tableau 8, 143 des 182 projets ont été conçus par des architectes ou des architectes paysagistes. Dans 61 cas, les concepteurs ont travaillé au sein d'équipes interdisciplinaires, associant architectes et architectes paysagistes (20 sur 182), ingénieurs et concepteurs (7 sur 182), architectes et artistes ou designers (10 sur 182), architectes et urbanistes (6 sur 182), ou urbanistes et architectes paysagistes (6 sur 182).

Table 8: Distribution des types de professionnels concepteurs des projets.

Type de professionnel	Nb de projets <sup>1</sup>
Architectes	88
Architectes paysagistes	55
Ingénieurs	20
Artistes	19
Designers	17
Urbanistes	8
Concepteurs de fontaines	8
Chercheurs	5
Concepteurs de scène	2

Pour les praticiens généralistes tels que les architectes, les architectes paysagistes ou les ingénieurs, le rafraîchissement urbain est devenu une condition préalable à la mise en œuvre de stratégies d’adaptation au changement climatique. Seuls 79 projets sur 182 font état de la contribution de consultants spécialisés dans le confort des espaces extérieurs ou le rafraîchissement urbain ; parmi ceux-ci, seuls 6 consultants/concepteurs apparaissent dans 38 projets. Les compétences en matière de rafraîchissement urbain sont prises en charge par quelques professionnels spécialisés dans le confort des espaces extérieurs (par exemple Transolar KlimaEngineering, Breathe Earth Collective, Philippe Rahm Architects) ou dans les techniques de rafraîchissement urbain, telles que la conception de fontaines (par exemple Diluvial, JML, The Fountain Workshop). Bien que ces 6 entreprises spécialisées apparaissent comme des leaders dans le domaine tel qu’il est présenté dans les médias de design urbain, 25 autres spécialistes ont été identifiés grâce aux références de l’inventaire, si bien que la grande visibilité des 6 entreprises exceptionnelles pourrait également s’expliquer par l’autopromotion.

### 3.2.2 Commanditaires des points frais urbains

Les résultats présentés dans le tableau 9 montrent que 124 des 182 commandes proviennent de promoteurs publics ou d’institutions culturelles. Les entreprises privées ou semi-publiques, en charge de 41 projets, concentrent leurs activités à l’échelle d’installations temporaires ou de pavillons, évoluant occasionnellement vers une intervention permanente dans l’espace public, en fonction des politiques de développement urbain de chaque pays.

Table 9: Distribution des commanditaires des projets.

Type de commanditaire	Nb de projets
Planificateurs publics	92
Organisation culturelle	32
Entreprises privées	28
Entreprises d’économie mixte	13
N/A	17

### 3.3 Un grand éventail de techniques de rafraîchissement urbain

Tout au long du processus de collecte des données, 54 combinaisons différentes de techniques de rafraîchissement urbain ont été identifiées. Bien qu’elles ne soient pas toujours spécifiées dans les revues de design, des recherches documentaires supplémentaires ont permis d’établir l’éventail des techniques utilisées pour une catégorisation plus poussée. Le tableau 10 présente l’utilisation indépendante des 20 techniques identifiées.

L’approche bleue (à base d’eau), qui utilise l’eau pour le rafraîchissement, qu’elle soit ou non combinée à d’autres approches, est appliquée dans 143 des 182 projets. L’approche blanche, qui fait référence aux caractéristiques formelles de la conception, est également largement utilisée (56 projets sur 182), notamment en ce qui concerne la création d’ombres. L’approche grise, qui concerne les propriétés des matériaux ou des systèmes, s’applique à 31 projets. Enfin, l’approche verte, qui utilise des plantes sous différentes formes, arrosées ou non, concerne 29 projets.

<sup>1</sup>Notez que les projets peuvent impliquer plusieurs types de professionnels reconnus comme concepteurs principaux.

Table 10: Approches et techniques de rafraîchissement urbain mises en œuvre dans l'inventaire.

Type de stratégie <sup>2</sup>	Nb de projets	Technique de rafraîchissement	Nb d'usages
Bleu	143	Jets d'eau	63
		Buses de brumisation	59
		Plan d'eau	54
		Buses de désembuage	11
		Fontaine sèche	10
		Chute d'eau	8
		Cours d'eau	3
		Fontaine	2
		Immersion dans l'eau	1
		Blanc	56
Ventilation par tirage thermique	6		
Filtrage des rayons ultraviolets	1		
Gris	31	Ventilateurs faible vitesse	12
		Surface rafraîchie	9
		Ventilation par air pulsé	7
		Tissu humidifié	1
		Isolation thermique	1
Vert	29	Végétation (manufacturée)	23
		Culture d'arbres (hors-sol ou en conteneurs)	16
		Végétation (plein terre)	4

La prédominance des techniques à base d'eau pour le rafraîchissement des espaces publics locaux est cohérente avec d'autres études analysant leur potentiel de rafraîchissement (Santamouris et al., 2017). Les approches bleues, lorsque le climat local est sec, conduisent à une baisse moyenne de la température maximale de l'air de 4,5 °C, tandis que les approches grises, vertes et blanches restent moins efficaces (baisse de la température de l'air de 1,3 à 1,7 °C). Cette étude met également en évidence le fait que la combinaison des approches, telle qu'elle prévaut dans le contenu de l'inventaire, conduit à un potentiel de rafraîchissement plus élevé.

Dans une perspective plus large de conception d'espaces publics sans carbone, le rafraîchissement urbain reste globalement une pratique de conception dépendante de l'énergie ou de l'eau. Au total, 143 des 182 projets de l'inventaire consomment de l'énergie ou de l'eau de différentes manières et à différentes intensités. Plus précisément, les techniques bleues et grises sont les plus dépendantes des ressources. Seuls 38 dispositifs sont décrits comme passifs pendant la phase d'occupation, et ils sont principalement basés sur des techniques vertes et blanches. Une autre explication du nombre réduit de projets utilisant des techniques vertes pourrait être trouvée dans les difficultés de croissance des plantes dans les zones urbaines denses, comme expliqué précédemment (voir l'analyse du contexte urbain).

<sup>2</sup>Il est à noter que les projets peuvent combiner plusieurs approches, en utilisant diverses techniques de rafraîchissement urbain.

## 4 Une première typologie des points frais comme configurations spatio-climatiques à travers les médias de design urbain

L'étude typologique de l'inventaire produit une première typologie structurée en 4 types qui couvre 165 projets sur 182 (voir figure 1). Les 17 projets restants ont été jugés trop singuliers pour être intégrés dans d'autres catégories. Les typologies peuvent être consultées dans la base de données (10.5281/zenodo.4646959).

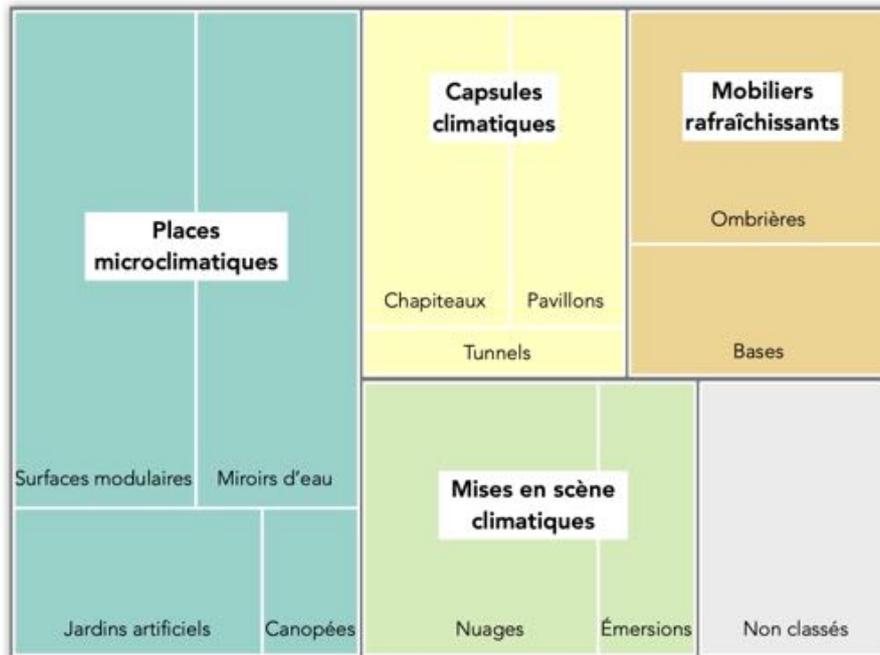


Figure 1: Distribution des types et sous-types de l'inventaire

Table 11: Distribution des types et sous-types de l'inventaire.

Type	Sous-type	Nb d'items
Placettes microclimatiques	Surfaces Modulaires	29
	Miroirs d'eau	27
	Jardins artificiels	12
	Canopées	5
Capsules climatiques	Chapiteaux	15
	Pavillons	12
	Tunnels	4
Mises en scène climatiques	Nuages	21
	Emersions	9
Mobiliers rafraîchissants	Ombrières	20
	Bases	11
Non classes		17
<b>Total</b>		<b>182</b>

## 4.1 Places microclimatiques

Une grande partie des références de l'inventaire se trouve dans cette catégorie (73 projets). Du point de vue de la configuration spatio-climatique, les places microclimatiques sont des espaces publics ouverts de taille moyenne ou grande dans lesquels la présence de techniques de rafraîchissement reste visuellement discrète. Les systèmes techniques s'intègrent à l'agencement spatial de l'espace public qui révèle leur présence par des changements subtils dans les textures ou les matériaux des sols. À cet égard, les places sont principalement des espaces publics permanents (64 cas), à l'exception de quelques approches éphémères (9 cas) qui impliquent des matériaux minéraux et massifs combinés à des éléments aquatiques dynamiques. Elles sont parfois ombragées par des arbres ou des auvents.

Du point de vue de l'expérience microclimatique, les places créent des effets de fond disséminés dans l'espace. L'imbrication de l'espace et du climat semble indissociable de l'atmosphère de l'espace public présenté. Les revues de design présentent les places comme des espaces multifonctionnels ou flexibles qui accueillent différentes activités quotidiennes (s'asseoir, se promener, passer) et des événements.

De manière plus générale, les places microclimatiques renforcent la fonction de régulation thermique des places traditionnelles et des petites places (Heschong, 1979). En complément, l'émergence des places microclimatiques peut s'expliquer par des facteurs à la fois environnementaux et socio-économiques, tels que les contraintes climatiques imposées par des formes urbaines héritées et conçues à l'origine pour l'accessibilité au sol (Foshag et al., 2020), la difficulté de planter des arbres ou l'intensification de l'expérience urbaine grâce à des espaces publics ouverts multifonctionnels (Stanislav et Chin, 2019).



Figure 2: Exemples of de places microclimatiques.

Quatre configurations principales ont été identifiées dans cette catégorie :

- Les *surfaces modulaires* (29 cas) intègrent les sources de rafraîchissement dans le sol de l'espace public. La surface horizontale est conçue comme une topographie continue dans laquelle les sources de rafraîchissement peuvent être positionnées en des points individuels ou réparties dans tout l'espace. Grâce à l'utilisation de techniques telles que les fontaines sèches, les buses de brumisation ou les jets d'eau, elles semblent être conçues pour une réversibilité fonctionnelle.
- Les *miroirs d'eau* (27 cas) se présentent comme des surfaces horizontales avec une subtile cavité dans le sol de quelques centimètres de profondeur, permettant la présence de l'eau. L'eau caractérise l'espace à la fois visuellement, avec l'effet de réflexion sur l'eau, et thermiquement, avec la présence d'eau fraîche, de jets et de brumisation. Bien que leurs utilisations et activités soient flexibles, le dispositif semble conçu avec une présence quasi permanente de l'eau.
- Les *jardins artificiels* (12 cas) développent des zones climatiques variées en combinant l'eau avec d'autres techniques de rafraîchissement - souvent l'ombrage avec la végétalisation. Ils combinent également des approches permanentes et temporelles qui transforment l'espace au fil des saisons - par exemple, en intégrant des structures pliables pour l'ombrage.
- Les *canopées* (5 cas) apparaissent comme des auvents couvrant une grande partie de la surface de l'espace public. L'ombrage est leur principal effet thermique, même si certains cas incluent également des stratégies basées sur l'eau. Il s'agit d'interventions majeures réalisées par des approches éphémères ou permanentes.

## 4.2 Capsules climatiques

Une petite partie des références de l'inventaire se trouve dans cette catégorie (31 projets). Du point de vue de la configuration spatio-climatique, les capsules climatiques sont le plus souvent de petits espaces qui enveloppent les piétons et les plongent dans un effet microclimatique circonscrit par les limites de l'espace. Il s'agit d'installations éphémères (24 projets) plutôt que permanentes (7 projets). Construites avec des matériaux légers, les capsules climatiques se présentent comme des espaces couverts avec une enceinte périmétrique, parfois même des façades, auxquels les piétons ne peuvent accéder que par des entrées. Elles combinent diverses stratégies de rafraîchissement : bleu (buses de brumisation), vert (murs végétalisés, plantes suspendues), gris (ventilateurs, surfaces de rafraîchissement, matériaux d'isolation) et blanc (auvents, tours à vent).

Du point de vue de l'expérience microclimatique, les capsules climatiques créent des situations de contraste entre l'environnement et l'intérieur de l'espace, comme une pause dans l'espace public. Elles créent des événements microclimatiques, éventuellement dans le cadre de grandes séquences microclimatiques d'un parcours urbain, qui créent une perturbation sensorielle dans l'expérience que les citoyens ont de l'espace public. Les capsules climatiques sont des structures spécialisées destinées à des individus ou à de petits groupes, souvent pour une durée limitée. Elles semblent améliorer l'expérience de l'espace public à différents endroits, à travers des expériences orientées vers l'activité (par exemple, culturelle ou commerciale) ou non fonctionnelles (par exemple, les aires de repos urbaines).

De manière plus générale, les capsules climatiques rappellent la perspective paysagère des « folies » des pavillons ou des jardins et y introduisent une dimension climatique, tantôt pour créer des situations agréables, tantôt pour abriter. Ce type contribue à la construction de la représenta-

tion thermique de la ville structurée en nœuds, voies et limites, qui enrichit la structure visuelle de la ville (Lynch, 1960).



Figure 3: Exemples de capsules climatiques.

Trois grands sous-groupes ont été identifiés au sein de ce type :

- Les *chapiteaux* (15 cas) créent des conditions climatiques locales tout en préservant un lien visuel avec l'environnement. Les citoyens accèdent au dispositif par différentes entrées et peuvent se déplacer à l'intérieur dans le cadre de leurs promenades urbaines régulières. Grâce à leur ouverture partielle, les concepteurs utilisent des techniques de rafraîchissement sous la forme d'une action localisée ciblant le corps des piétons, afin de produire l'expérience climatique à l'intérieur.
- Les *pavillons* (12 cas) sont des installations éphémères qui se déconnectent totalement de l'environnement extérieur. Ce sont des constructions légères qui enveloppent les piétons, les isolant et favorisant simultanément une atmosphère plus fraîche à l'intérieur. Les entrées dans le dispositif sont situées à différents endroits.
- Les *tunnels* (4 cas) sont une variation du groupe précédent. Ils se présentent comme des tentes linéaires permettant de traverser l'espace urbain dans des conditions climatiques régulées.

### 4.3 Mises en scène climatiques

Seuls 30 projets sur les 182 références de l'inventaire entrent dans cette catégorie. Du point de vue de la configuration spatio-climatique, les mises en scène climatiques créent des configurations visuelles et thermiques dynamiques qui apparaissent comme des effets théâtraux dans

l'espace public en fonction des schémas temporels ou d'activité. Elles sont généralement matérialisées par de petites sources, ou des sources en différents points, intégrées dans la forme ou les matériaux de l'espace public, mais elles peuvent également être créées par des structures temporaires plus proéminentes. Leur flexibilité est encore renforcée par l'utilisation exclusive de techniques basées sur l'eau (par exemple, des buses de brumisation, des fontaines à jet projeté, des systèmes qui gouttent). Les mises en scène climatiques sont principalement des installations éphémères (25 projets), même si quelques conceptions permanentes coexistent également dans l'inventaire (7 projets).

Du point de vue de l'expérience microclimatique, les mises en scène climatiques peuvent produire deux types de gradients perceptifs : des microclimats d'arrière-plan couvrant une vaste zone ou des microclimats événementiels ciblés sur le corps du citadin. Les photographies les présentent comme des espaces publics flexibles pour des activités principalement dynamiques.

De manière plus générale, les mises en scène climatiques apparaissent comme une approche de la mise en scène urbaine de l'espace public, dans laquelle les effets climatiques l'emportent sur les effets matériels. L'espace devient le support d'effets climatiques intangibles, collectifs ou individuels, spontanément reconnaissables par les citoyens.

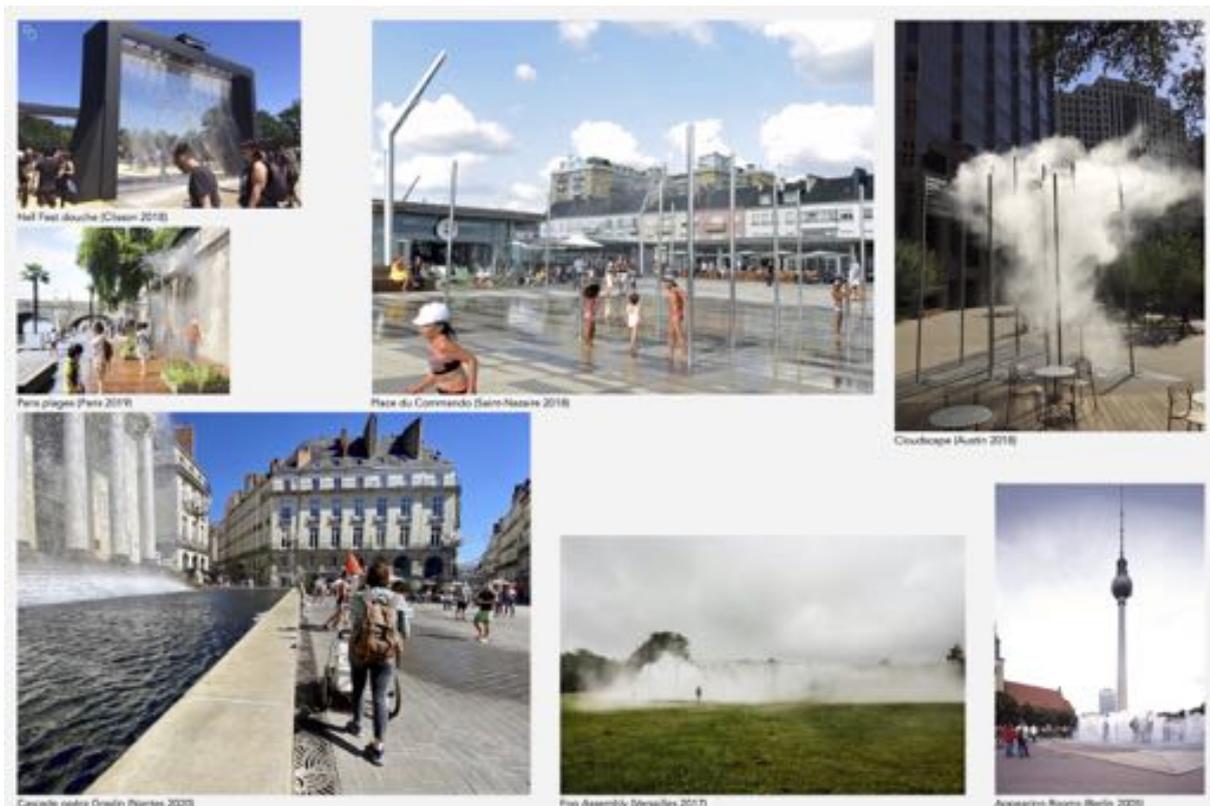


Figure 4: Exemples de mises en scènes climatiques.

Deux sous-groupes ont été identifiés au sein de ce type de projet :

- Les *nuages* (21 projets) associent les effets climatiques et visuels par la création d'un brouillard se déplaçant sur une surface plus grande que la zone froide urbaine elle-même. Intégrés dans les sols, les toits ou d'autres structures, ils impliquent des effets climatiques expansifs créés par des techniques de brumisation d'eau. La présence formelle, les limites et la temporalité des dispositifs varient en fonction des conditions météorologiques

(vent, humidité relative, température de l'air) et des formes urbaines environnantes. Les nuages impliquent principalement des installations éphémères dans l'espace public, mais certaines installations permanentes adoptent également cette approche.

- Les *émersions* (9 projets) introduisent des surprises urbaines dans lesquelles des dispositifs techniques sont intégrés à d'autres objets urbains réguliers ; ainsi, ils passent presque inaperçus d'un point de vue visuel. Ils créent un événement climatique localisé directement appliqué au corps du citoyen, comme « un peu de fraîcheur ». Ils agissent sur la perception thermique du citoyen en utilisant des techniques individuelles et ciblées telles que des buses de brumisation ou des jets d'eau. Les pop-ups peuvent impliquer une activation automatique ou une forme d'interaction directe, y compris l'activation par l'action ou la présence du piéton.

#### **4.4 Mobiliers rafraîchissants**

Au total, 31 projets sur 182 entrent dans cette catégorie. Du point de vue de la configuration spatio-climatique, le mobilier urbain rafraîchissant implique l'engagement du corps des piétons avec le dispositif. Ils apparaissent comme des micro ou petites interventions, présentées comme des structures ouvertes ou semi-fermées, avec une présence visuelle forte dans l'espace public. Il peut s'agir d'installations permanentes ou éphémères, matérialisées par l'hybridation de la végétalisation avec les matériaux de construction. Le mobilier urbain rafraîchissant modifie les perceptions thermiques des piétons en combinant l'utilisation de techniques blanches de réduction du rayonnement solaire (auvents, structures végétales) ou de techniques à base d'eau (brumisation) avec des techniques grises (surfaces refroidies, tissus humidifiés, ventilation forcée) ou vertes (murs végétalisés).

Du point de vue de l'expérience microclimatique, le mobilier urbain rafraîchissant crée des gradients d'événements qui contrastent avec leur environnement et dont la zone d'influence est limitée à l'empreinte du dispositif. Leur présence dans l'espace public crée une opportunité d'interaction qui attire les passants et les concentre autour d'eux. Conçus principalement pour des postures assises ou debout, la plupart de ces mobiliers proposent un usage quasi monofonctionnel.

De manière plus générale, ce type de mobilier émerge comme un renouvellement du mobilier urbain dans le contexte de l'augmentation des températures. Basé sur l'idée de la ville comme un tout, le mobilier urbain contribue à l'expérience thermique urbaine avec une approche climatique à l'échelle du corps. Les techniques de rafraîchissement urbain intègrent le mobilier urbain pour relever le défi de l'augmentation du confort tout en créant une identité forte et une perception qualitative de l'espace public.

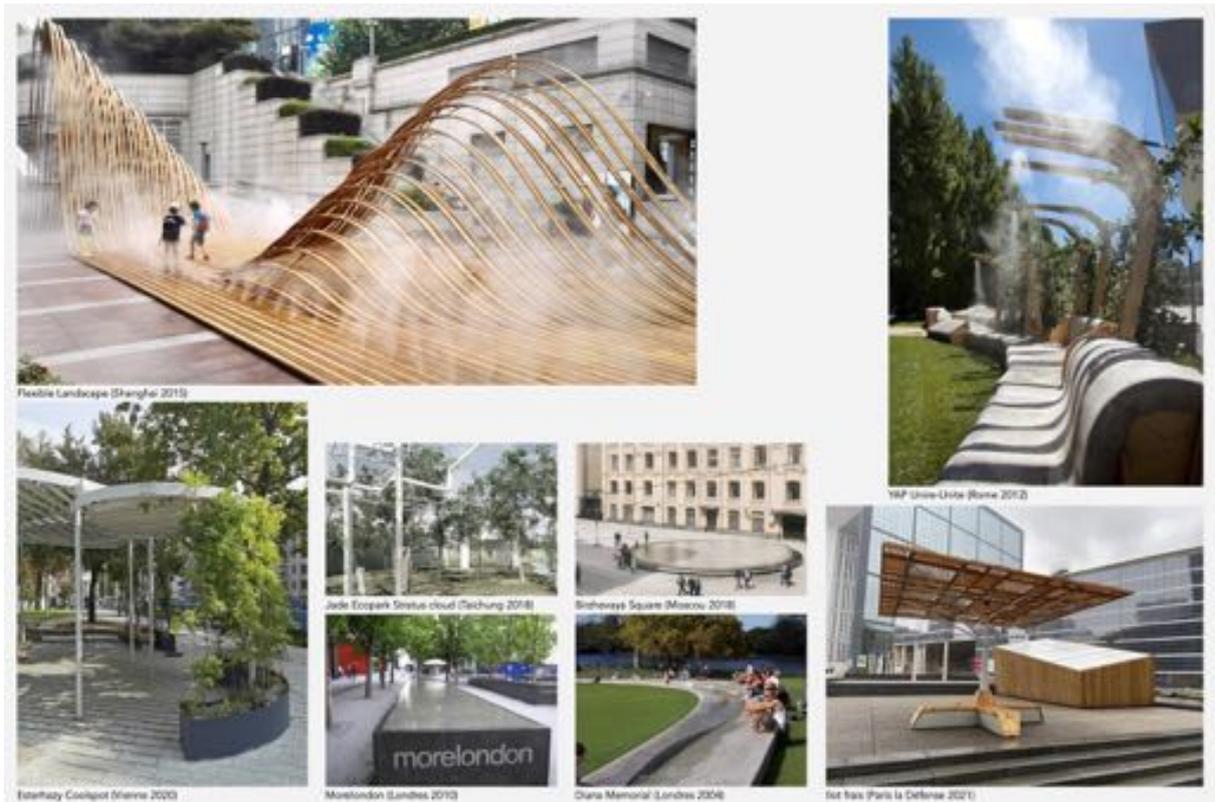


Figure 5: Exemples de mobiliers rafraîchissants.

Deux sous-groupes ont été identifiés au sein de ce type :

- Les *ombrières* (20 cas) sont des structures autonomes qui couvrent une petite surface dans l'espace public. Ils peuvent émerger du sol ou y être superposés. La zone ombragée peut être un espace couvert à usage libre, dans lequel les qualités visuelles et thermiques de la zone agissent comme un attracteur pour les activités dynamiques des piétons ; elle peut également être partiellement occupée par une plate-forme qui permet des activités plus calmes et statiques. Les ombrières végétales et artificielles peuvent renforcer l'effet d'ombrage et de rafraîchissement avec d'autres approches complémentaires - par exemple la brumisation, le rafraîchissement par contact, la ventilation forcée. Les ombrières sont généralement présentées comme des structures légères et sculpturales dans l'espace public.
- Les *bases* (11 cas) sont des dispositifs placés sur le sol de l'espace public. Intégrées dans la conception générale, elles apparaissent soit comme des artefacts saillants, soit comme des objets délicatement posés. Dans d'autres cas, elles apparaissent comme une structure superposée contrastant avec la conception initiale de l'espace public. Elles combinent les dimensions visuelles et haptiques intrinsèques au mobilier urbain de rafraîchissement avec la production de conditions climatiques qui influencent les activités à proximité ou sur le dispositif. La plupart des plateformes utilisent des techniques à base d'eau (brumisation, cours d'eau et plans d'eau) pour rafraîchir l'atmosphère. Leurs effets peuvent donc être légèrement diffusés autour du dispositif lui-même.

## 5 Conclusions

Dans le contexte des stratégies d'adaptation à la hausse des températures, la conception d'espaces publics thermosensibles devient cruciale pour préserver leur habitabilité pendant les périodes chaudes. Cet article met l'accent sur les points frais urbains, considérés ici comme des dispositifs spatio-climatiques spécifiques à l'été qui entremêlent à la fois les dimensions spatiales et climatiques des espaces publics dans le processus de conception. À travers l'étude d'un inventaire des points frais urbains tels qu'ils sont présentés dans les médias de design urbain, cet article explore l'hypothèse selon laquelle les médias contribuent à la diffusion des connaissances sur les stratégies d'adaptation et, ce faisant, délimitent un sous-domaine du design urbain climatique. Ce processus peut constituer une approche complémentaire des directives de conception pour inspirer le design d'espaces publics climato-sensibles.

D'après l'analyse statistique descriptive du contenu de l'inventaire, les médias de design offrent une perspective singulière sur les points frais urbains. Quatre caractéristiques principales composent cette image :

- Les points frais urbains apparaissent comme des stratégies adaptées aux villes des latitudes moyennes et à leurs contextes socio-économiques (Foshag et al., 2020), dans lesquelles les points frais urbains deviennent des interventions tactiques pour atténuer le stress thermique des piétons (Kluck et Boogard, 2020). Les médias de design urbain les présentent comme des équipements publics, financés par des institutions publiques ou semi-publiques, généralement situés dans les centres-villes ou les quartiers d'activité, afin de contribuer aux politiques d'attractivité urbaine.
- La conception des points frais urbains apparaît comme un domaine spécialisé émergent pour un petit groupe de concepteurs, qui peuvent être des chefs de projet ou des consultants collaborant avec un large panel de concepteurs généralistes (par exemple, des architectes, des urbanistes, des paysagistes). Leur importance croissante dans un domaine où les disciplines se chevauchent comme la conception urbaine (Cozzolino et al., 2020) révèle un processus de renouvellement des compétences dans la pratique de la conception.
- La conception des points frais urbains combine une diversité d'approches parmi les techniques de rafraîchissement urbain. Alors que les directives présentent une catégorisation matérielle des techniques de rafraîchissement urbain dans laquelle les techniques basées sur la végétation sont centrales, l'analyse de l'inventaire montre 54 stratégies fusionnant 20 techniques de rafraîchissement, avec une prédominance des techniques basées sur l'eau. Ce résultat fait écho à des travaux antérieurs sur la nécessité de mélanger les techniques pour obtenir une stratégie plus efficace et plus résiliente (Santamouris et al., 2017).
- Les points frais urbains dépendent fortement de l'accessibilité urbaine aux ressources permettant de rafraîchir localement l'espace public. Principalement situés dans un tissu urbain dense avec des conditions difficiles pour appliquer les stratégies basées sur la végétation (Czaja et al., 2020), les points frais urbains apparaissent comme des « stratégies d'adaptation douces » (Martinez-Juarez et al., 2019), créant des scénarios intermédiaires vers l'idéal de villes vertes et durables.

L'étude de l'inventaire présenté dans cet article révèle que les points frais urbains sont présentés dans les médias à partir d'une perspective panoramique qui synthétise la complexité du processus de conception et contextualise les stratégies d'adaptation au climat. Ils complètent l'approche des directives de conception climatique qui, à partir d'une approche structurée, présentent les parties et les critères utiles au processus de conception, y compris les directives visuelles qui mettent en œuvre la traduction spatiale des informations scientifiques (Cortés et al., 2020).

Cet article développe une approche typologique inductive pour caractériser les approches spatio-climatiques promues par les médias lors de la publication de projets de points frais urbains. En dépassant l'approche au cas par cas des médias, cette typologie contribue à la compréhension des tendances de conception des points frais urbains et, plus spécifiquement, clarifie les bases d'une « esthétique de la fraîcheur » contemporaine dans l'espace public telle qu'elle est présentée dans les médias.

L'approche inductive de cet article aboutit à une typologie de quatre types de points frais urbains. Deux de ces types (les places microclimatiques et les mobiliers rafraîchissants) apparaissent comme un renouvellement thermosensible de dispositifs urbains déjà existants. Le troisième type (capsules climatiques) rappelle l'approche paysagère des pavillons et des « folies » de jardin pour produire un espace frais permettant de faire une pause dans les îlots de chaleur urbains. Le quatrième type (mises en scène climatiques) concerne les techniques de mise en scène du climat urbain pour modifier la perception de l'espace public.

Les perspectives de recherche future impliquent l'ouverture de cette première version de l'inventaire à des contributions externes. D'une part, la recherche sur l'inventaire devrait être étendue à d'autres zones géographiques (par exemple, l'Asie, l'Amérique du Sud) ou à des médias professionnels sous-représentés ici (par exemple, la conception de fontaines, l'ingénierie). D'autre part, en abordant les processus de collecte et de codage qualitatif sous l'angle d'un réseau participatif, les évaluations pourraient être enrichies par divers experts : un processus qui pourrait minimiser les biais analytiques et structurer une nouvelle enquête sur les pratiques de conception de la climatisation urbaine.

## Références

- Aram, F., Higuera García, E., Solgi, E., Mansournia, S., 2019. Urban green space cooling effect in cities. *Heliyon* 5, e01339. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01339>
- C40-cities, 2021. Urban Cooling Toolbox. C40 Cities, Copenhagen.
- Carmona, M., 2014. The Place-shaping Continuum: A Theory of Urban Design Process. *Journal of Urban Design* 19, 2-36. <https://doi.org/10.1080/13574809.2013.854695>
- Charmaz, K., 2001. Grounded Theory: Methodology and Theory Construction, in: *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*. Elsevier, p. 6396-6399. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043076-7/00775-0>
- Chen, L., Ng, E., 2012. Outdoor thermal comfort and outdoor activities: A review of research in the past decade. *Cities* 29, 118-125. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2011.08.006>
- Corbin, J., Strauss, A., 2008. *Basics of Qualitative Research: Techniques and Procedures for Developing Grounded Theory*. SAGE Publications, Thousand Oaks. <https://doi.org/10.4135/9781452230153>
- Cortésao, J., Alves, F.B., Corvacho, H., Rocha, C., 2016. Retrofitting public spaces for thermal comfort and sustainability. *Indoor and Built Environment* 25, 1085-1095. <https://doi.org/10.1177/1420326X16659326>
- Cortésao, J., Lenzholzer, S., Mülder, J., Klok, L., Jacobs, C., Kluck, J., 2020. Visual guidelines for climate-responsive urban design. *Sustainable Cities and Society* 60, 102245. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102245>
- Cozzolino, S., Polívka, J., Fox-Kämper, R., Reimer, M., Kummel, O., 2020. What is urban design? A proposal for a common understanding. *Journal of Urban Design* 25, 35-49. <https://doi.org/10.1080/13574809.2019.1705776>
- Czaja, M., Kofron, A., Muras, P., 2020. The Complex Issue of Urban Trees—Stress Factor Accumulation and Ecological Service Possibilities. *Forests* 11, 932. <https://doi.org/10.3390/f11090932>
- della Porta, D., 2008. Comparative analysis: case-oriented versus variable-oriented research, in: Della Porta, D., Keating, M. (Ed.), *Approaches and Methodologies in the Social Sciences*. Cambridge University Press, Cambridge, p. 198-222. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511801938.012>
- Forty, A., 2000. *Words and Buildings. A Vocabulary of Modern Architecture*. Thames & Hudson, London.
- Foshag, K., Aeschbach, N., Höfle, B., Winkler, R., Siegmund, A., Aeschbach, W., 2020. Viability of public spaces in cities under increasing heat: A transdisciplinary approach. *Sustainable Cities and Society* 59, 102215. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102215>
- Gehl, J., 2011. *Life between buildings: using public space*. Island Press, Washington.
- Georgi, B., Isoard, S., Asquith, M., Garzillo, C., Swart, R., Timmerman, J., 2016. Urban adaptation to climate change in Europe 2016: Transforming cities in a changing climate (EEA Report No. 12/2016). European Environment Agency.
- Guest, G., Namey, E., Chen, M., 2020. A simple method to assess and report thematic saturation in qualitative research. *PLoS ONE* 15, e0232076. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232076>
- Henry, D., Dymnicki, A.B., Mohatt, N., Allen, J., Kelly, J.G., 2015. Clustering Methods with Qualitative Data: a Mixed-Methods Approach for Prevention Research with Small Samples. *Prev Sci* 16, 1007-1016. <https://doi.org/10.1007/s11121-015-0561-z>
- Heschong, L., 1981. *Architecture et volupté thermique*. Parenthèses, Paris.
- Heschong, L., 1979. *Thermal delight in architecture*. MIT Press, Cambridge.
- IPCC, 2022. *Climate Change 2022. Mitigation of Climate Change. Full report (No. 6)*. IPCC.
- Jacobs, C., Klok, L., Bruse, M., Cortésao, J., Lenzholzer, S., Kluck, J., 2020. Are urban water bodies really cooling? *Urban Climate* 32, 100607. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100607>
- Johansson, E., Thorsson, S., Emmanuel, R., Krüger, E., 2014. Instruments and methods in outdoor thermal comfort studies – The need for standardization. *Urban Climate, ICUC8: The 8th International Conference on Urban Climate and the 10th Symposium on the Urban Environment* 10, 346-366. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2013.12.002>
- Kluck, J., Boogard, F., 2020. Climate resilient urban retrofit at street level, in: *Climate resilient urban areas : coverage, design and development in coastal delta cities*. Palgrave Macmillan, p. 45-66.
- Kuckartz, U., Rädiker, S., 2019. *Analyzing qualitative data with MAXQDA. Text, audio, and video*. Springer Nature, Cham.
- Lenzholzer, S., Klemm, W., Vasilikou, C., 2018. Qualitative methods to explore thermo-spatial perception in outdoor urban spaces. *Urban Climate* 23, 231-249. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.10.003>
- Lynch, K., 1960. *The image of the city*. MIT Press, Cambridge.
- Mairie de Paris, 2018. *Plan Climat Air Energie Territorial (guideline)*. Mairie de Paris, Paris.
- Martinez-Juarez, P., Chiabai, A., Suárez, C., Quiroga, S., 2019. Insights on Urban and Periurban Adaptation Strategies Based on Stakeholders' Perceptions on Hard and Soft Responses to Climate Change. *Sustainability* 11, 647. <https://doi.org/10.3390/su11030647>
- Middel, A., Krayenhoff, E.S., 2019. Micrometeorological determinants of pedestrian thermal exposure during record-breaking heat in Tempe, Arizona: Introducing the MaRTy observational platform. *Science of The Total*

- Environment 687, 137-151. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.085>
- Middel, A., Selover, N., Hagen, B., Chhetri, N., 2016. Impact of shade on outdoor thermal comfort—a seasonal field study in Tempe, Arizona. *Int J Biometeorol* 60, 1849-1861. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1172-5>
- Miller, H.J., Clifton, K., Akar, G., Tufte, K., Gopalakrishnan, S., MacArthur, J., Irwin, E., 2021. Urban Sustainability Observatories: Leveraging Urban Experimentation for Sustainability Science and Policy. *Harvard Data Science Review*. <https://doi.org/10.1162/99608f92.2025202b>
- Morselli, E., 2019. Eyes that hear. The synesthetic representation of soundspace through architectural photography. *Ambiances Journal*. <https://doi.org/10.4000/ambiances.2835>
- Osmond, P., Sharifi, E., 2017. Guide to Urban Cooling Strategies. Low Carbon Living CRC - Australian Government, Sydney.
- Prominski, M., 2017. Design Guidelines, in: Brink, A. van den, Tobi, H., Bell, S. (Éd.), *Research in landscape architecture: methods and methodology*. Routledge, London New York, p. 194-208.
- Roesler, S., Kobbi, M. (Éd.), 2018. *The urban microclimate as artifact: Towards an architectural theory of thermal diversity*. Birkhauser, Basel.
- Ruefenacht, L.A., Acero, J.A., 2017. *Strategies for Cooling Singapore (Rapport d'études)*. TUM & NUS, Singapore.
- Santamouris, M., 2013. Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island—A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 26, 224-240. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047>
- Santamouris, M., Ding, L., Fiorito, F., Oldfield, P., Osmond, P., Paolini, R., Prasad, D., Synnefa, A., 2017. Passive and active cooling for the outdoor built environment – Analysis and assessment of the cooling potential of mitigation technologies using performance data from 220 large scale projects. *Solar Energy* 154, 14-33. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.006>
- Santamouris, M., Kolokotsa, D., 2015. On the impact of urban overheating and extreme climatic conditions on housing, energy, comfort and environmental quality of vulnerable population in Europe. *Energy and Buildings* 98, 125-133. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.08.050>
- Santos Nouri, A., Costa, J.P., 2017. Placemaking and climate change adaptation: new qualitative and quantitative considerations for the « Place Diagram ». *Journal of Urbanism* 10, 356-382. <https://doi.org/10.1080/17549175.2017.1295096>
- Stanislav, A., Chin, J.T., 2019. Evaluating livability and perceived values of sustainable neighborhood design: New Urbanism and original urban suburbs. *Sustainable Cities and Society* 47, 101517. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101517>
- Steane, M.A., Steemers, K. (Éd.), 2003. *Environmental diversity in architecture*. Spon Press, London.
- Stewart, I.D., Oke, T.R., 2012. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 93, 1879-1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
- Tavares, S., Sellars, D., Mews, G., Dupré, K., Cândido, C., Towle, S. (Éd.), 2020. Public health and well-being in public open spaces through climate responsive urban planning and design. *jps* 1-6. <https://doi.org/10.32891/jps.v5i2.1279>
- Whyte, W.H., 1980. *The social life of small urban spaces*. Project for Public Spaces, New York.

# Caractérisation de l'environnement thermique du citadin : état de l'art

## ANNEXE 2

Xénia STAVROPULOS-LAFFAILLE      Ignacio REQUENA-RUIZ  
Céline DROZD      Thomas LEDUC      Daniel SIRET

### Sommaire

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Variables physiques du microclimat à l'échelle piéton</b>	<b>4</b>
2.1	Température et humidité relative de l'air . . . . .	4
2.2	Vitesse et direction du vent . . . . .	4
2.3	Rayonnement solaire et infrarouge : bilan radiatif . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Indices de prédiction du ressenti thermique pour les espaces extérieurs</b>	<b>7</b>
3.1	PET (Physiologically Equivalent Temperature) . . . . .	9
3.2	PMV (Predicted Mean Vote) . . . . .	9
3.3	PT (Perceived Temperature) . . . . .	10
3.4	UTCI (Universal Thermal Climate Index) . . . . .	10
3.5	SET* (Standard Effective Temperature) et OUT_SET* (Outside Standard Effective Temperature) . . . . .	11
3.6	ETU (Universal Effective Temperature) . . . . .	12
3.7	ASV (Actual Sensation Vote) . . . . .	13
3.8	WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) . . . . .	14
<b>4</b>	<b>Variables physiques de l'environnement bâti</b>	<b>15</b>
4.1	Indicateurs morphologiques . . . . .	15
4.2	Indicateurs sur la matérialité des sols . . . . .	20
4.3	Indicateurs sur la végétation urbaine et les dissipateurs thermiques . . . . .	22
	<b>Références</b>	<b>24</b>

# 1 Introduction

L'étude des paramètres physiques induits par les dispositifs spatio-climatiques mobilise des méthodes issues des sciences de l'ingénieur, des sciences de l'atmosphère et des sciences de la santé. Lorsque l'on parle de la perception thermique dans l'espace public, l'hétérogénéité spatiale (formes et matières) ainsi que les interactions multiples entre les variables physiologiques, microclimatiques et socioculturelles complexifient l'analyse de ce phénomène (Johansson et al., 2014). Ce chapitre portera essentiellement sur l'étude des conditions microclimatiques en ville comme l'un de facteurs les plus importants dans la perception thermique de l'espace (Chokhachian et al., 2017b).

L'intérêt sur le potentiel des espaces publics à produire des conditions de confort thermique pour les citoyens a considérablement augmenté ces dernières décennies (Johansson et al., 2018). A l'ère de l'adaptation au réchauffement climatique, la conception des espaces publics doit répondre également à des nécessités écologiques (création d'îlots de fraîcheur urbains), sanitaires (prévention des effets des canicules), ou socio-économiques (événements, commerces) des villes.

De plus, ce domaine a pendant longtemps hérité des modèles et des méthodes développées depuis les années 1910 pour l'étude du confort thermique à l'intérieur des bâtiments. Selon (Spagnolo et de Dear, 2003), ceci est dû à des raisons socio-économiques, politiques et environnementales. Considérant que la plupart des personnes dépensent en moyenne 90 % de son temps à l'intérieur, ceci explique l'intérêt porté au confort thermique intérieur. Il est notamment plus facile de contrôler les conditions thermiques à l'intérieur par des moyens mécaniques et de délimiter les responsabilités de chacun. A l'opposé, les conditions climatiques extérieures sont difficilement contrôlables et fortement variables dans l'espace et dans le temps (Johansson et al., 2018).

Comme conséquence de l'héritage de la recherche sur le confort thermique intérieur, les modèles et indices actuels sont majoritairement issus d'une approche statique (aussi dénommée physiologique ou convergente). Utilisés pendant longtemps pour le contrôle de la climatisation mécanique à l'intérieur des bâtiments, ces modèles sont établis pour des conditions homogènes et stationnaires visant à déterminer les conditions d'absence d'inconfort. Malgré cela, certains de ces indices ont été adaptés pour l'étude du confort dans l'espace extérieur. Les indices le plus connus sont l'indice PMV (Predicted Mean Vote) et l'indice PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) développés par (Fanger, 1970), l'indice PET (Physiological Equivalent Temperature) développé par (Höppe, 1999), et l'indice SET (Standard Effective Temperature) développé par Gagge en 1986.

L'application de ces modèles aux espaces extérieurs a été fortement critiquée. (Nicol et al., 2012) constatent une grande différence entre la sensation thermique effective (subjective), recueillie par des questionnaires selon le principe de l'ASV (Actual Sensation Vote), et la plage du confort pronostiquée théoriquement par le PMV. Uniquement 35% des personnes enquêtées étaient dans les conditions de confort théoriquement acceptables, tandis que la plupart restaient volontairement dans les conditions trop chaudes ou trop froides. Sur la base d'une approche adaptative (dénommée divergente), (Nicol et al., 2012) ont introduit des plages variables pour la température de confort à la place d'une seule température standard invariable au cours de l'année, ce qui a donné lieu aux standards EN 15251 et ISO 7730. Ainsi le standard EN 15251 prend en compte les attentes des occupants d'un espace intérieur en reliant la zone de confort avec la température de l'air à l'extérieur. Un autre paramètre adressé par (Nicol et al., 2012) est l'histoire thermique

en tant que facteur psychologique décisif pour l'évaluation subjective du confort. Ils mettent en avant l'influence plus importante du court terme des expériences climatiques. Ils proposent que *« chacun réponde selon sa propre expérience thermique, la plus récente étant la plus influente. Une température extérieure moyenne, pondérée relativement à sa distance temporelle, est par conséquent plus appropriée qu'une moyenne mensuelle »*.

Plusieurs auteurs constatent qu'à l'heure actuelle il n'existe pas de standards ni normes internationales pour l'évaluation du confort thermique à l'extérieur (Johansson et al., 2014; Krüger et al., 2015). Dans les études existantes, du fait de leur caractère expérimental et de la diversité des méthodes appliquées, une comparaison des résultats est alors difficilement possible : méthodes de mesure et d'enquête différentes, diversité des échantillons d'étude, divergences dans la caractérisation de l'environnement d'étude, différents temps minimum à prévoir pour une campagne... (Johansson et al., 2014).

Des bonnes pratiques mettent en avant le croisement des données environnementales (microclimat, morphologie) et des données dérivées d'autres méthodes objectives et/ou subjectives afin d'analyser le confort et la perception thermique des individus en lien avec les formes urbaines (Ali-Toudert et Mayer, 2006; Coccolo et al., 2016; Gallinelli et al., 2017; Johansson et al., 2014; Kántor et al., 2012; Mayer et al., 2008; Spagnolo et de Dear, 2003). Dans la suite de cette annexe, ces différents types de données sont présentés. La première section est dédiée aux paramètres physiques du microclimat urbain à l'échelle piéton. Il s'agit notamment des variables microclimatiques à observer ou à déterminer, dont la température de l'air, l'humidité relative, la direction et la vitesse du vent, les rayonnements de courte longueur d'onde (solaire) et grande longueur d'onde (infrarouge). La deuxième section présente les indices synthétiques du ressenti thermique, dans laquelle le focus est mis sur les indices intéressants pour l'étude des dispositifs spatio-climatiques. Enfin, la dernière section est centrée sur la caractérisation de l'environnement urbain à l'aide des paramètres formels (indicateurs morphologiques) et d'occupation du sol (matérialité des sols, taux d'imperméabilisation, fraction des surfaces artificielles et naturelles).

## 2 Variables physiques du microclimat à l'échelle piéton

Contrairement aux études du confort thermique intérieur, les conditions thermiques à l'extérieur ne sont pas contrôlées, du fait des conditions climatiques dynamiques et variables dans l'espace et dans le temps (Johansson et al., 2018). De plus, l'hétérogénéité urbaine influence les flux turbulents et donc le microclimat, ce qui ne permet pas une généralisation des conditions climatiques d'un point à l'autre. Selon (Chokhachian et al., 2017a), le stimulus environnemental, plus précisément la condition microclimatique locale, est le facteur le plus important pour affecter la sensation et l'évaluation du confort thermique. C'est ainsi que le confort thermique urbain et les conditions microclimatiques sont fortement interdépendants (Nikolopoulou et al., 2004).

De nombreuses études d'évaluation du confort thermique à petite échelle (micro à pico) en environnement urbain ouvert ou semi-ouvert se basent sur l'observation des variables météorologiques, dont la température, l'humidité, le vent et le rayonnement solaire (Boiné et al., 2018; Camponovo et al., 2015; Chokhachian et al., 2017a; Gallinelli et al., 2017; Mayer et al., 2008; Middel et al., 2016; Santucci et al., 2019; Spagnolo et de Dear, 2003).

Selon (Nikolopoulou et Lykoudis, 2006), parmi ces variables, la température de l'air et le rayonnement solaire sont les plus déterminantes du confort thermique à l'extérieur. (Johansson et al., 2014) relativisent l'effet de la température de l'air et désignent la vitesse du vent comme variable critique dans l'évaluation du confort thermique, nécessitant des mesures précises. Basée sur ces variables observées, il est ensuite possible de calculer la température moyenne radiante ( $T_{mrt}$ ). Cette température intègre l'échauffement d'un individu suite au rayonnement solaire et donc permet de représenter la température ressentie (Le Bras, 2015). Elle est la variable la plus importante pour la détermination des indices thermiques (Fröhlich et al., 2019) ainsi que la plus importante à mesurer pour le confort thermique à l'extérieur (Mayer et al., 2008).

### 2.1 Température et humidité relative de l'air

Les mesures de température et d'humidité sont souvent assurées par une sonde mixte, composée d'un thermomètre et d'un hygromètre. Il est essentiel d'éviter un réchauffement de l'instrument par rayonnement solaire direct avec un abri solaire, ce qu'induit d'autres biais dans la mesure. Ainsi il est recommandé selon (Johansson et al., 2014) :

- d'utiliser une protection de la sonde afin d'éviter des échanges radiatifs entre l'instrument et son environnement à l'aide d'un écran ;
- d'assurer une ventilation en continu, soit naturelle soit mécanique, de l'écran afin de maximiser la convection et donc d'éviter de l'air chaud stagnant autour de la sonde ;
- de prendre en compte un temps d'acclimatation avant la mesure, en cas d'un changement important de l'environnement, correspondant à 1,5 fois du temps de réponse de la sonde.

### 2.2 Vitesse et direction du vent

Le vent est influencé par la morphologie et l'hétérogénéité du tissu urbain. Ainsi, la direction et la vitesse du vent varient fortement dans l'espace et dans le temps. L'observation du vent peut se faire avec des anémomètres mécaniques (hélice ou coupelle), thermiques (sphère ou fil chaud) ou ultrasoniques. Le choix du type d'anémomètre dépend notamment de la gamme de mesure souhaitée, du temps de réponse et de sa précision. Ainsi, les anémomètres à hélice ou à coupelle ne sont pas adaptés aux mesures de faible vitesse du vent. En revanche, les anémomètres à sphère ou fil chaud permettent de détecter de faibles vitesses, mais ont une limitation maximale pour

des vitesses élevées. Une combinaison de ces deux modèles permet donc une observation de toute vitesse du vent (faibles et élevées). De plus, le temps de mesure doit être assez long afin de pouvoir enregistrer un panel large des vitesses différentes (faibles et élevées).

Selon (Johansson et al., 2014), en environnement urbain il est recommandé de se baser sur des sondes permettant :

- un temps de réponse court et une haute précision et
- des mesures des composantes horizontales et verticales du vent (3D) afin de remédier à l'irrégularité de la direction du vent. Si le capteur détecte uniquement la vitesse horizontale et non la vitesse verticale du vent, il existe un risque de sous-estimer la vitesse du vent (Johansson et al., 2018).

### 2.3 Rayonnement solaire et infrarouge : bilan radiatif

Le rayonnement à courte longueur d'onde (visible) est en général mesuré à l'aide d'un pyranomètre et le rayonnement à grande longueur d'onde (infrarouge) est mesuré avec un pyrgéomètre. Orientés vers les 3 directions de l'espace, les radiomètres observent le rayonnement incident (direct et diffus) et réfléchi. La configuration expérimentale peut comprendre soit 6 paires de pyranomètres et de pyrgéomètres fixés pour pouvoir mesurer dans toutes les directions simultanément (Middel et Krayenhoff, 2019; Thorsson et al., 2007) soit une seule paire fixée sur un axe amovible et pointée dans les 6 directions avec un temps de mesure total de 10 min (Johansson et al., 2014).

Ces mesures intégrales peuvent ensuite être utilisées afin d'obtenir la température moyenne radiante en se basant en outre sur les proportions du rayonnement solaire direct, diffus, réfléchi à courte longueur d'onde et infrarouge (Spagnolo et de Dear, 2003). La température moyenne radiante est une des variables météorologiques clés influençant le bilan énergétique du corps humain ainsi que le confort thermique personnel (Mayer et al., 2008). Il existe plusieurs méthodes expérimentales ou bien numériques pour déterminer la température moyenne radiante (Guo et al., 2020; Johansson et al., 2014; Thorsson et al., 2007).

La  $T_{mrt}$  peut alors être déterminée à l'aide des simulations numériques en se basant sur des mesures météorologiques et la représentation de la morphologie urbaine. Les modèles utilisés sont par exemple Rayman (Matzarakis et Rutz, 2007), ENVI-met (Bruse, 2004), Solweig (Lindberg et al., 2008) ou SkyHelios (Fröhlich et Matzarakis, 2018). Une autre méthode se base sur des mesures directes avec un thermomètre globe, constitué d'un thermomètre à bulbe positionné au centre d'une sphère (Guo et al., 2020). Le principe repose sur l'hypothèse que la température globe représente la moyenne pondérée entre les températures radiantes et d'ambiance (Thorsson et al., 2007). Le globe peut varier en taille, en épaisseur, en matériaux et en couleur avec un modèle standardisé pour l'analyse du confort thermique intérieur correspondant à une sphère noire en cuivre de 150 mm de diamètre et de 0,4 mm d'épaisseur. Cependant, avec un temps de réponse assez long (20 min), il n'est pas adapté à une application dynamique (Le Bras, 2015; Nakayoshi et al., 2015; Spagnolo et de Dear, 2003). Afin de pallier ce problème, le globe a été adapté. De nombreuses études du confort thermique extérieur se basent alors sur un thermomètre globe, constitué d'une sonde Pt100 et d'une balle de ping-pong de 38 mm et d'une épaisseur de 1 mm, peint en gris (RAL7001) (Drach et Drach, 2014; Johansson et al., 2018; Kántor et al., 2012; Klok et al., 2018; Nikolopoulou et Lykoudis, 2006; Potvin, 2000). Il a été prouvé que c'est une méthode simple, mais tout à fait correcte dans l'analyse du confort thermique extérieure (Thorsson et al., 2007). La mesure de la température globe ( $T_g$  en °C), ensemble avec la

température ambiante ( $T_a$  en °C) et la vitesse de l'air ( $v_a$  en  $m.s^{-1}$ ) permet ainsi de calculer la température moyenne radiante ( $T_{mrt}$  en °C) selon l'équation ci-dessous. Ce calcul a été adapté afin de remédier aux erreurs en lien avec les propriétés de la forme et des matériaux du globe à travers le coefficient moyen de convection du globe.

$$T_{mrt} = \left[ (T_g + 273,15)^4 + \frac{1.1 \times 10^8 \times v_a^{0.6}}{\varepsilon \times D^{0.4}} \times (T_g - T_a) \right]^{\frac{1}{4}} - 273,15 \text{ avec :}$$

- $D$  le diamètre du globe (mm)
- $\varepsilon$  l'émissivité du globe
- et le terme  $1.1 \times 10^8 \times v_a^{0.6}$  représentant le coefficient de convection du globe.

Selon (Ali-Toudert et Mayer, 2007; Höppe, 1993; Spagnolo et de Dear, 2003; Thorsson et al., 2007) la façon la plus précise de déterminer la  $T_{mrt}$  est de mesurer le rayonnement tridimensionnel à grande et courte longueur d'onde ainsi que les facteurs angulaires associés. La  $T_{mrt}$  est ensuite calculée à partir de ces mesures intégrales du rayonnement. Cette méthode a été appliquée dans de nombreuses études de confort thermique à l'extérieur (Ali-Toudert et Mayer, 2007; Lindner-Cendrowska, 2013; Mayer et al., 2008; Middel et Krayenhoff, 2019; Nakayoshi et Nakashima, 2018).

La température moyenne radiante peut être déterminée si la densité moyenne des flux rayonnants ( $S_{str}$ ) du corps humain est connue. Ainsi, le calcul de  $S_{str}$  se base sur les six mesures individuelles du rayonnement à grande et courte longueur d'onde (up, down, N, O, S, W) qui doivent être multipliées par les facteurs angulaires  $F_i$  ( $i=1-6$ ) entre une personne et les surfaces environnantes selon l'équation:

$$S_{str} = \alpha_k \sum_{i=1}^6 F_i \times K_i + \varepsilon_p \sum_{i=1}^6 F_i \times L_i \text{ avec :}$$

- $F_i$  les facteurs angulaires. Les facteurs angulaires dépendent de la position et de l'orientation de la personne (Fanger et al., 1974). La détermination de  $F_i$  est compliquée pour les formes urbaines complexes. Il est donc nécessaire de les simplifier avec une valeur de 0,22 pour une personne debout ou à pied pour les flux de rayonnement des quatre points cardinaux (N, O, S, W) et avec une valeur de 0,06 pour les flux de rayonnement d'en haut et d'en bas. Pour une sphère,  $F_i$  est de 0,167 pour les six directions.
- $K_i$  le rayonnement à courte longueur d'onde,
- $L_i$  le rayonnement à grande longueur d'onde,
- $\alpha_k$  le coefficient d'absorption du rayonnement à courte longueur d'onde avec une valeur standard de 0,7,
- $\varepsilon_p$  l'émissivité du corps humain. Selon les lois de Krichhoff, elle est égale au coefficient d'absorption du rayonnement à grande longueur d'onde (valeur standard de 0,97).

Ainsi la  $T_{mrt}$  (°C) est calculée en se basant sur la loi de Stefan-Boltzmann :

$$T_{mrt} = \sqrt[4]{\frac{S_{str}}{\varepsilon_p \times \sigma}} - 273.15 \text{ avec :}$$

- $\sigma$  la constante de Stefan-Boltzmann avec une valeur de  $5,67 \times 10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$ .

### 3 Indices de prédiction du ressenti thermique pour les espaces extérieurs

La prédiction du ressenti thermique à l'extérieur basée sur des indices de confort permet de quantifier et comparer des espaces extérieurs en termes de microclimat rapportant la mesure à l'humain (Coccolo et al., 2016). L'état de l'art présenté par la suite cherche à comprendre la pertinence des multiples indices existants pour son application pour la caractérisation du ressenti thermo-spatial à l'échelle du piéton.

Les modèles du confort thermique actuels appliqués à l'espace extérieur mettent en relation des données environnementales (paramètres microclimatiques conditionnés par l'espace) et personnelles (tenue, activité, etc.). Il est important de souligner qu'une partie des indices ont initialement été appliqués pour les espaces intérieurs et ultérieurement ont été adaptés aux espaces extérieurs, tandis que d'autres ont été développés pour des conditions extérieures (Potchter et al., 2018). Selon Coccolo et al. (2016), ils se divisent en trois grandes catégories:

- Indices thermiques : ils se basent sur le bilan énergétique de l'individu en croisant les informations personnelles (activité métabolique, tenue) et environnementales (variables microclimatiques) afin d'évaluer la perception du confort thermique de l'individu.
- Indices empiriques : ils décrivent la sensation du confort thermique de l'individu prenant appui sur des enquêtes de terrain et exprimée par des régressions linéaires. Dépendant du climat local, ils expriment le confort thermique propre à une ville ; ils ne sont donc pas transposables d'un cas à l'autre.
- Indices linéaires : ils définissent le confort thermique en fonction des variables climatiques, mais ne prennent pas en compte les facteurs personnels. Ils conviennent spécialement aux études à long terme et grandes échelles spatiales et aux analyses du climat historique et des prévisions climatiques.

Une autre classification est proposée par Potchter et al. (2018), qui distinguent uniquement les indices universels, applicables dans n'importe quel climat, et les indices spécifiques, uniquement applicables dans un climat spécifique. Dans leur recensement d'indices, les auteurs indiquent que malgré les 165 indices différents, uniquement 4 sont appliqués régulièrement pour l'étude du confort thermique extérieur. Le PET (Physiologically Equivalent Temperature) est avec 30% le plus appliqué, suivi de l'indice PMV (Predicted Mean Vote) avec 10%, l'UTCI (Universal Thermal Climate Index) avec 8% et le SET\* (Standard Effective Temperature) avec 5%. Ce choix est notamment dirigé par les objectifs des études du confort thermique extérieur et par les données disponibles suite aux enquêtes de terrain.

Selon Johansson et al. (2014), les normes et standards ISO 7730 (2005) et ASHRAE 55 (2010), préconisent l'indice PMV. Cependant ces derniers sont des standards utilisés en évaluation du confort thermique intérieur. Le guide allemand de l'ingénieur pour l'évaluation du confort thermique extérieure VDI 3787 propose en plus du PMV les indices PET et PT.

Parallèlement aux indices thermiques universels, mais moins connus, il existe une autre catégorie d'indice. Cette catégorie permet d'indiquer simultanément les effets universels et séparés des facteurs environnementaux. Ainsi, Kurazumi et al. (2011) propose l'indice ETF (conduction-corrected modified effective temperature), pour des espaces intérieurs et pour des positions du corps humain dans lesquelles la conduction thermique joue un rôle important. Cet indice distingue entre les effets i) de vitesse de l'air, ii) de rayonnement thermique et iii) de température et d'humidité au contact de la surface du matériau. Son extension, nommée ETFe (enhanced

conduction-corrected modified effective temperature), permet une application en espace extérieur en incluant les effets du rayonnement solaire à courte longueur d'onde (Kurazumi et al., 2011).

Dans cette même logique, Horikoshi et al. (1995) présentent l'indice ETV et plus tard l'indice ETVO et l'indice ETU (Nagano et Horikoshi, 2011). Ils sont définis comme l'ET\* pour désigner un environnement standard, mais différent de ceux utilisés dans les cas de ET\* et SET\*. Contrairement à l'indice ETV, l'ETVO et l'ETU sont conçus pour des espaces extérieurs prenant en compte le rayonnement solaire. Ces derniers proposent la détermination d'un indice intégral universel, comme par exemple PET, OUT\_SET ou UTCI, mais également la détermination des indices séparés des différentes variables météorologiques l'influençant. Ainsi, cette approche permet de distinguer l'influence de différentes variables météorologiques sur le confort thermique extérieur : i) la température de l'air, ii) l'humidité relative, iii) la vitesse du vent et iv) le bilan radiatif.

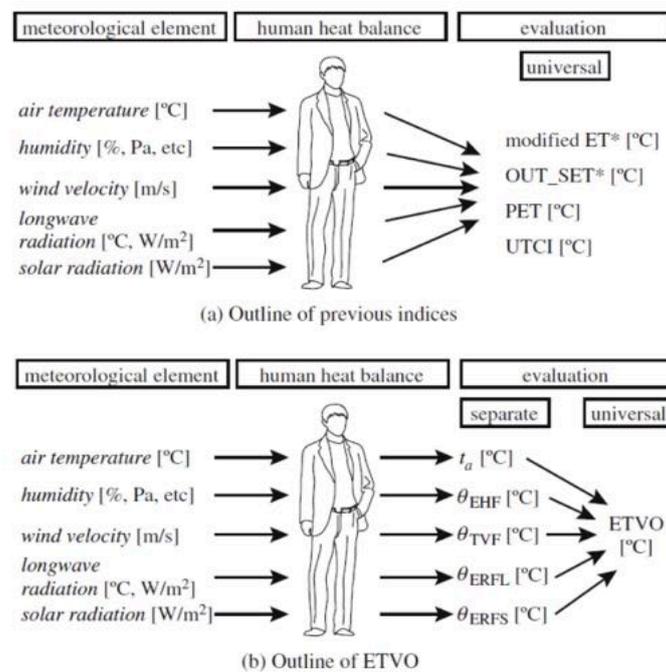


Figure 1: Schéma des indices thermiques conventionnels et universels (en haut) et de l'indice ETVO (en bas) permettant la détermination simultanée de l'indice universel et de ses composantes séparément (Nagano et Horikoshi, 2011)

Table 1: Synthèse des indices thermiques permettant une indication des effets universels et séparés des facteurs environnementaux.

Indice universel et séparé	Référence	Extérieur	Conduction thermique	Env. thermique non uniforme
ETF	(Kurazumi et al., 2011)		X	
ETFe	(Kurazumi et al., 2011)	X	X	
ETV	(Horikoshi et al., 1995)			
ETVO	(Nagano et Horikoshi, 2011)	X		
ETU	(Nagano et Horikoshi, 2011)	X	X	X

Vu l'application fréquente des indices spécifiques dans les études du confort thermique extérieur, certains sont exposés en détail par la suite. Ce choix porte notamment sur les indices universels, dont la PET, PT, UTCI, SET/OUT-SET, et l'ETU, l'indice empirique ASV et l'indice linéaire WBGT.

### 3.1 PET (Physiologically Equivalent Temperature)

Cet indice est calculé par le modèle Munich Energy-balance Model » pour les individus (Höppe, 1999; Höppe, 1993). Il est basé sur des variables météorologiques observées à une hauteur de 1,1 m (Matzarakis et al., 1999; Mayer et al., 2008) et sur des variables physiologiques standardisées (vêtements et activité métabolique) (Johansson et al., 2018). Mayer et al. (2008) ont noté qu'il montre une forte dépendance au paramètre de température moyenne radiante et de Oliveira et Moreau (2007) ont démontré qu'il sous-estime l'influence du vent.

Selon Spagnolo et de Dear (2003), le PET est un indice acceptable pour l'application à l'extérieur puisqu'il permet de transposer le confort thermique extérieur dans un scénario intérieur, basé sur une approche physiologique facilement compréhensible. Selon (Coccolo et al., 2016), il a été appliqué dans différents contextes climatiques pour lesquels des échelles thermiques adaptées, soit 7 soit 9 points, ont été élaborées (Cohen et al., 2013; Lin et al., 2011; Matzarakis et al., 1999; Potchter et al., 2018). En Allemagne, il a été intégré dans la directive pour les concepteurs urbains et régionaux (Honjo, 2009).

L'indice PET indique un confort thermique optimal entre 18 et 22°C pour des conditions climatiques moyennes en Europe. Au-delà les individus sont sujets à un stress thermique (Mayer et al., 2008). Son application dans un nouveau type de climat nécessite conséquemment une validation avec des variables climatiques et personnelles observées. (Johansson et al., 2014) ont constaté une augmentation de l'utilisation de cet indice ces dernières années.

L'indice PET est calculé en se basant sur la température moyenne radiante. Ainsi, en cas de faible vent, c'est le facteur météorologique le plus influant sur l'indice (Matzarakis et al., 1999). La température radiante se base sur les calculs selon (Höppe, 1993) et nécessite des mesures du rayonnement à courte et à grande longueur d'onde (Ali-Toudert et Mayer, 2007).

$$T_{mrt} = \left( \frac{S_{rad}}{\varepsilon_p \times \sigma_B} \right) - 273.2$$

$$S_{rad} = \sum_{i=1}^6 W_i \times (\alpha_k \times K_i + \alpha_l \times L_i) \text{ avec :}$$

- $\varepsilon_p = 0.97$  l'émissivité du corps humain,
- $\sigma_B = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$
- la constante de Stefan-Boltzman,
- $W_i = 0.22$  et  $0.06$  respectivement pour la direction latérale et verticale,
- $\alpha_k = 0.7$  pour le coefficient d'absorption à courte longueur d'onde
- $\alpha_l = 0.97$  à grande longueur d'onde
- $K_i$  et  $L_i$  représentent respectivement les flux radiatifs de densité à courte et à grandes longueur d'onde.

### 3.2 PMV (Predicted Mean Vote)

Le PMV a été développé par (Fanger, 1970) en se basant sur l'équation d'équilibre thermique du corps humain et impliquant les termes de génération et échanges de chaleur avec le milieu environnant (Parsons, 2003). Ainsi un modèle de corrélation a été établi entre la perception subjective, exprimée par le vote de confort sur une échelle allant de -3 (très froid) à +3 (très

chaud), et la différence entre la chaleur générée et dégagée par le corps humain. Le PMV est exprimé de la manière suivante :

$$PMV = 0.303 \times e^{(0.036 \times M)} \times [(M - W) - R - C - E_d - E_{sw} - C_{res} - E_{res}] \text{ avec :}$$

- $M$  le taux métabolique,
- $W$  le taux de travail,
- $R$  la perte de chaleur sensible radiante,
- $C$  la perte de chaleur sensible convective,
- $E_d$  la perte de chaleur diffusive de vapeur d'eau à travers la peau,
- $E_{sw}$  la perte de chaleur évaporatoire de la sueur de la surface de la peau,
- $C_{res}$  l'échange de chaleur par convection lors de la respiration et
- $E_{res}$  l'échange de chaleur par évaporation lors de la respiration.

### 3.3 PT (Perceived Temperature)

Selon Johansson et al. (2014), l'indice PT est basé sur le PMV et s'appuie sur la même échelle thermo-physique. Il est cependant applicable pour déterminer la perception du confort thermique en espace extérieur. Il est simulé avec « Klima-Michel Model », un modèle pour simuler le bilan énergétique du corps humain (Fröhlich et al., 2019). Il dépend des variables climatiques et personnelles. Concernant les facteurs personnels, il se réfère à un sujet standard (homme, 35ans, 1,75m, 75kg, vitesse de marche à 4km/h, production de chaleur métabolique 172.5W). Il se base sur une approche d'acclimatation (Koppe et Jendritzky, 2005), ce qui amène à une considération d'acclimatation à court terme et en conséquence à une modification du seuil PT. Le modèle ne nécessite aucun calage en fonction de la saison ou du site (Coccolo et al., 2016). Son calcul dépend de l'indice  $PMV$  et de la valeur de clothing ( $Clo$ ) qui change selon la saison considérée (Coccolo et al., 2016) :

- $PT = 5.805 + 12.6784 \times PMV$  pour ( $PMV < 0$  et  $Clo = 1.75$ )
- $PT = 21.258 - 9558 \times Clo$  pour ( $PMV = 0$  et  $1,75 < Clo < 0.5$ )
- $PT = 16.826 + 6.183 \times PMV$  pour ( $PMV > 0$  et  $Clo = 0.5$ )

### 3.4 UTCI (Universal Thermal Climate Index)

L'indice UTCI a été développé dans l'objectif de créer un indice thermique universel pour des conditions extérieures (Jendritzky et al., 2012). Il est basé sur le concept d'une température équivalente comme déjà appliqué aux indices ET (effective temperature) et SET\* (standard effective temperature) (Bröde et al., 2012). Ainsi, les conditions météorologiques sont comparées à un environnement de référence avec 50% d'humidité relative, la pression à 20 hPa, l'air calme ( $V_a = 0.5 \text{ m.s}^{-1}$ ) et une  $T_{mrt}$  égale à la température de l'air (Bröde et al., 2012). Il n'est pas nécessaire de renseigner des informations concernant les vêtements, cela est calculé automatiquement en fonction de la température de l'air et de la vitesse du vent selon un modèle développé par (Fiala et al., 2012). Pour l'activité de l'individu, une valeur de référence est prise en compte qui correspond à la marche à 4 km/h.

L'échelle utilisée pour cet indice comprend 10 points, situés entre un stress thermique extrême chaud et froid (Potchter et al., 2018). L'absence de stress thermique est définie par la classification Koppen entre 9°C et 28°C. Cependant, Potchter et al. (2018) ont constaté que parmi 115 études, 80% ont été d'accord sur une fourchette thermique acceptable entre 16°C et 23°C.

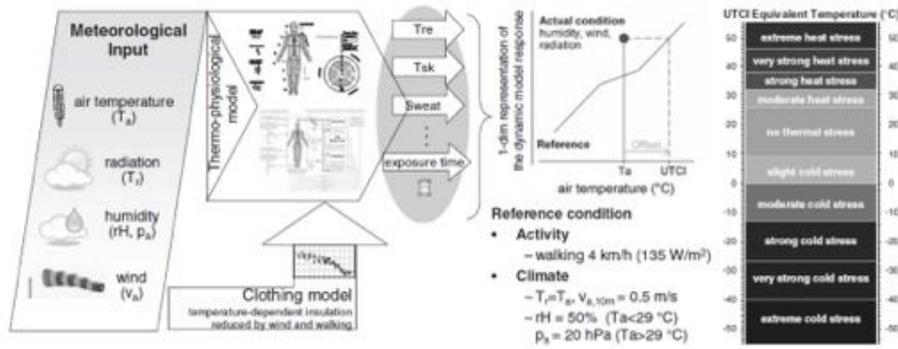


Figure 2: Concept de l'indice UTCI comme température équivalente (Bröde et al., 2012)

Selon Coccolo et al. (2016) et Fröhlich et al. (2019), l'UTCI présente quelques limites d'application : la vitesse du vent doit être comprise entre  $0.5$  et  $17 \text{ m.s}^{-1}$ , la température de l'air entre  $-/+50 \text{ }^\circ\text{C}$ , l'humidité relative entre  $50$  et  $100\%$  et la température moyenne radiante entre  $-30 \text{ }^\circ\text{C}$  et  $+70 \text{ }^\circ\text{C}$  de la température de l'air. Cependant, la principale limitation de l'UTCI pour son application sur des mesures in situ c'est que la référence de vitesse du vent est mesurée à  $10 \text{ m}$  de hauteur du sol (Fröhlich et al., 2019; Johansson et al., 2018; Lam et al., 2018; Lindner-Cendrowska, 2013). Ceci nécessite une extrapolation lorsque la vitesse ( $V_h$ ) est mesurée aux hauteurs habituelles ( $h$ ) des anémomètres appliqués pour l'étude du vent en espaces publics (entre  $1,5$  et  $2,1$ ) (Requena-Ruiz et al., 2019). La vitesse de vent à  $10 \text{ m}$  ( $V_{10}$ ) doit être recalculée selon l'équation (Lam et al., 2018):

$$v_{10} = v_h \times \frac{\log(\frac{10}{0.01})}{\log(\frac{h}{0.01})}$$

L'UTCI présente également une forte sensibilité à la vitesse du vent. Bröde et al. (2012) ont constaté que l'humidité affecte l'UTCI quand la température est élevée. Johansson et al. (2018) ont constaté qu'un niveau d'activité fixé à  $1,1 \text{ m.s}^{-1}$  (correspondant à  $2,3$  met -unité de mesure du taux métabolique-) est trop élevé pour un climat chaud-humide et inversement que les valeurs pour les vêtements sont trop basses.

L'UTCI peut être calculé selon l'équation suivante (Coccolo et al., 2016):

$$UTCI = T_a + Offset(T_a, v_{10}, P_a, T_{rmt}) \text{ avec :}$$

- $T_a$  la température de l'air,
- $v_{10}$  la vitesse du vent à  $10 \text{ m}$ ,
- $P_a$  la pression atmosphérique
- $T_{rmt}$  la température moyenne radiante.

### 3.5 SET\* (Standard Effectif Temperature) et OUT\_SET\* (Outside Standard Effectif Temperature)

A l'origine ces deux indices sont dérivés de l'indice ET. Ils se basent sur le modèle de Gagge avec des valeurs fixées de l'humidité relative à  $50 \%$  et de la vitesse du vent à  $0.15 \text{ m.s}^{-1}$  et de la température moyenne radiante égale à la température de l'air (Honjo, 2009; Parsons, 2003; Sasaki et al., 2009). Selon Parsons (2003), deux étapes de calcul sont nécessaires : tout d'abord, la température de la peau moyenne ( $t_{sk}$ ), l'humidité de la peau ( $w$ ) et la perte de chaleur cutanée ( $H_{sk}$ ) sont déterminées pour une personne dans les conditions d'intérêt « réelles ». Ensuite, la

température de l'environnement standard qui fournit le même  $t_{sk}$ ,  $w$ ,  $H_{sk}$  (c'est-à-dire un effet équivalent) est déterminée.

	<i>ET</i>	<i>ET*</i>	<i>SET</i>	<i>Example actual</i>
Air temperature <i>ET</i> ( $t_a$ )				30
Mean radiant temperature ( $t_r$ )	$t_r=t_a$	$t_r=t_a$	$t_r=t_a$	40
Air velocity ( $v$ )	0.15		0.15 0.15	0.25
Relative humidity ( $\phi$ )	100		50 50	30
Clothing ( $I_{cl}$ )	actual		0.8 f(Met)	0.8
Activity (Met)	actual		1.0 actual	1.0
Equivalence:	From charts of experimental data	$H_{sk}$ $t_{sk}$ $w$	53.7 53.7 53.7 35.6 35.6 35.6 0.4 0.4 0.4	53.7 35.6 0.4
Index value for actual environment (°C)	23		33 33	
Note	The <i>ET*</i> index applies only to sedentary activity and light clothing such as found in office work, it is a subset of the <i>SET</i> index. The standard clothing insulation value for <i>SET</i> is a function of the activity level.			

Figure 3: Paramètres nécessaires afin de calculer l'indice SET en comparaison avec ET et ET\* (Parsons, 2003).

La valeur de « Clothing » ( $I_{cl}$ ) est calculée en se basant sur l'équation suivante (Parsons, 2003) :

$$I_{cl} = \frac{1.33}{(Met - W_k + 0.74)} - 0.095 \text{ avec :}$$

- $Met$  le rythme métabolique
- $W_k$  le travail mécanique

L'indice SET\* a été développé pour l'évaluation du confort thermique intérieur et OUT\_SET\* pour l'évaluation du confort thermique extérieur. Cependant Honjo (2009) a constaté que l'indice SET\* est régulièrement appliqué en condition extérieure. Ils se basent sur toutes les variables météorologiques (température, humidité, vitesse du vent et température radiante moyenne) et des variables physiologiques (vêtements, activités). Selon Johansson et al. (2014), il y a une augmentation d'utilisation de ces indices ces dernières années. Ils décrivent le confort thermique autour d'une valeur neutre, mais ne prennent pas en compte les extrêmes (Coccolo et al., 2016). L'indice OUT\_SET\* a été validé pour un climat tempéré. Cependant, l'échelle de l'indice OUT\_SET\* est propre à la ville où il a été appliqué, il n'est donc pas transposable.

### 3.6 ETU (Universal Effective Temperature)

L'indice thermique ETU (Température effective universelle) fait partie des indices permettant d'indiquer simultanément les effets universels et séparés des variables météorologiques (Nagano et Horikoshi, 2011). Ces variables incluent i) la température de l'air, ii) l'humidité relative, iii) la vitesse du vent et iv) le rayonnement solaire à grande et courte longueur d'onde. Il est défini comme la température hypothétique de l'air d'un environnement isotherme à 50 % d'humidité relative, à une vitesse de l'air de  $0,1 \text{ m.s}^{-1}$ , à un coefficient de transfert de chaleur par convection de  $3,0 \text{ W.m}^{-2}.K^{-1}$ , à un coefficient de transfert de chaleur par rayonnement

de  $4,5 W.m^{-2}.K^{-1}$ , ainsi qu'à une isolation des vêtements de 0 clo, où le corps humain aurait le même échange thermique à la surface de la peau vers un environnement réel (Watanabe et al., 2014). Son application est sans restriction, car il peut être utilisé dans des environnements intérieurs ou extérieurs, uniformes ou non-uniformes, avec ou sans conduction thermique. Un exemple d'application en situation extérieure et non-uniforme avec conduction thermique est l'évaluation du confort thermique des personnes assises sur un banc dans différentes conditions thermiques (ensoleillée, à l'ombre d'un immeuble ou bien à l'ombre de la végétation) (Watanabe et al., 2014). Ainsi, Nagano et Horikoshi (2011) et Watanabe et al. (2014) soulignent son importance dans la compréhension de l'influence de chaque variable météorologique sur le confort thermique dans les environnements extérieurs et non uniformes avec conduction thermique. Toutefois, jusqu'à présent, les applications de cet indice récent se font rares (Watanabe et al., 2014).

Selon Nagano et Horikoshi (2011), l'indice ETU s'exprime par la somme de la température représentative de l'air ( $t_{ao}$ ) et des différences de la température effective par rapport à la température représentative de l'air causée par différents champs. Ainsi : NUATFi indique l'effet de la distribution de la température de l'air par rapport à la température représentative de l'air ; TVFi représente l'effet de la vitesse de l'air ; SERFLi traduit l'effet du rayonnement à grande longueur d'onde par rapport à la température de l'air ; TVFri est l'effet net du rayonnement à grande longueur d'onde causé par les différences de la vitesse réelle et des vêtements par rapport aux conditions standard ; ERFSi indique l'effet du rayonnement solaire ; SEHFi montre l'effet de l'humidité par rapport à 50% d'humidité relative à ETU ; TVFei est l'effet net de l'évaporation causée par les différences de vitesse réelle et de vêtements par rapport aux conditions standard ; et SECFj représente l'effet de la conduction thermique par rapport au matériau standard.

$$ETU = t_{ao} + \frac{\sum NUATFi}{h_u} + \frac{\sum TVFi}{h_u} + \frac{\sum SERFLi}{h_u} + \frac{\sum TVFri}{h_u} + \frac{\sum ERFSi}{h_u} + \frac{\sum SEHFi}{h_u} + \frac{\sum TVFei}{h_u} + \frac{\sum SECFj}{h_u}$$

Avec :

- $NUATFi = h_v \times f_i \times (t_{ai} - t_{ao})$
- $TVFi = h_{co} \times F_{cleo} \times f_i \times (t_{vi} - t_{ai})$
- $SERFLi = h_{ro} \times F_{cleo} \times f_i \times (t_{ri} - t_{ai})$
- $TVFri = h_{ro} \times F_{clea} \times f_i \times (t_{rvi} - t_{ri})$
- $ERFSi = R_{si} = f_i \times (R_{diri} + R_{difi} + R_{refi})$
- $SEHFi = wh_{eo} \times f_i \times (p_{ai} - 0.5 \times p_{ETU,s})$
- $TVFei = wh_{eo} \times f_i \times (p_{vi} - p_{ai})$
- $SECFj = h_{do} \times f_i \times (t_{doj} - t_{ao})$

### 3.7 ASV (Actual Sensation Vote)

Selon Coccolo et al. (2016) l'indice ASV est exprimé par une équation linéaire basée sur des mesures microclimatiques et des questionnaires pour différentes villes européennes. Ainsi, les variables microclimatiques température de l'air ( $T_a$ ), rayonnement global ( $R_{glo}$ ), vitesse du vent ( $V$ ) et humidité relative  $H_{rel}$  sont multipliées par un coefficient numérique dépendant du climat local.

$$ASV = 0.068 \times T_a + 0.0006 \times R_{glo} - 0,107 \times v - 0.002 \times H_{rel} - 0.69$$

### 3.8 WBGT (Wet Bulb Globe Temperature)

WBGT est un standard ISO 7243. Il est donc nécessaire de comparer les résultats avec les tableaux indiquant l'activité métabolique associée à la valeur de confort. Les valeurs pour les vêtements sont standardisées ( $Cl_o = 0.6$ ). Il est basé sur trois analyses simultanées : La température globe ( $T_g$ ), la température de l'air ( $T_a$ ) et la température humide ventilée ( $T_w$ ). La  $T_g$  mesure la vitesse de l'air, le rayonnement et la température de l'air, tandis que  $T_w$  mesure l'évaporation (Coccolo et al., 2016).

$$WBGT = 0.7 \times T_w + 0.2 \times T_g + 0.1 \times T_a$$

Middel et al. (2016) ont constaté que cet indice est moins approprié pour indiquer un stress et un inconfort thermique dans des régions avec une faible humidité relative.

## 4 Variables physiques de l'environnement bâti

La caractérisation des dispositifs spatio-climatiques dans ses dimensions climatiques et formelles commence par un travail d'analyse du contexte spatial. Ce volet cherche à classer le tissu urbain en zones potentiellement fraîches, ou inversement, à moindre risque de réchauffement. Il s'agit de mettre en place un panel d'indicateurs pour l'étude des conditions physiographiques urbaines qui nous permettront de comprendre l'insertion du dispositif dans la trame urbaine, analyser l'adéquation entre le dispositif et son environnement bâti, analyser les parcours des citoyens avant et après le dispositif pour mieux caractériser les ressentis.

L'objectif est donc l'identification des indicateurs morphologiques urbains existants et utilisés afin d'établir une corrélation entre la morphologie urbaine et le confort thermique en espace extérieur. Afin de trouver ces indicateurs, nous avons suivi deux approches. D'une part, les indicateurs qui évaluent le risque de surchauffe d'une forme urbaine, souvent provenant des recherches en microclimatologie urbaine autour de l'ICU. D'autre part, les indicateurs qui soulèveraient un potentiel de fraîcheur, provenant de recherches sur la végétation urbaine. Bowler et al. (2010) constatent dans de nombreuses études que ces paramètres ne sont pas explicitement décrits ou rapportés.

### 4.1 Indicateurs morphologiques

Selon (Lin et al., 2017; Lindberg, 2007; Middel et al., 2018; Wei et al., 2016) la morphologie urbaine (géométrie de la canopée urbaine et végétation) est le facteur le plus influençant du microclimat urbain à l'échelle locale et micro pendant la journée comme pendant la nuit. La géométrie modifie les flux d'air, les flux de chaleur et le bilan énergétique, tandis que la couverture de surface modifie l'albédo, la disponibilité en humidité et la capacité de chauffage / refroidissement du sol (Stewart et Oke, 2012). Ainsi, les paramètres les plus influents sur la couche limite urbaine sont la température de l'air, la température de surfaces, les flux turbulents, la ventilation, le rayonnement solaire et la qualité de l'air.

Les indicateurs morphologiques de la canopée urbaine doivent représenter l'hétérogénéité des espaces urbains dans ces trois dimensions à petite échelle (forme, disposition, espacement, occupation du sol et matériaux). Ainsi, les différents paramètres dans la littérature permettent de décrire tous types de surface en ville comme les bâtiments, les sols et la végétation. Généralement, ils ont tendance à se regrouper spatialement (Stewart et Oke, 2012) ; c'est-à-dire par exemple qu'un espace urbain avec un rapport en Height/Width important montre également un coefficient d'imperméabilisation et une densité des matériaux de construction élevés. Selon Fouad (2007), certains caractérisent l'espace urbain dans l'ensemble (ex. : H/W) tandis que d'autres traduisent les caractéristiques d'un espace à partir d'un point spécifique (ex. : SVF Sky View Factor). Certains de ces indicateurs ont été listés en fonction de leur influence sur les variables microclimatiques à différentes échelles par Fouad (2007) et Lin et al. (2017). Yang et Chen (2016) ont proposé un classement en différentes catégories : i) forme et densité des bâtiments, ii) occupation du sol, iii) chaleur anthropique, iv) potentiel de rafraîchissement de la végétation, v) potentiel de ventilation et vi) proximité aux dissipateurs thermiques.

Table 2: Synthèse des indicateurs morphologiques influençant les paramètres microclimatiques selon (Fouad, 2007).

Paramètres microclimatiques	Échelle espace public	Échelle tissu urbain	Auteurs
Rayonnement solaire	Ratio H/W (hauteur moyenne des bâtis et largeur moyenne des rues), Degree of enclosure, albédo moyen des surfaces	Densité végétale, densité bâtie, porosité urbaine (ratio du volume d'air creux urbain au volume total de la canopée urbaine)	Adolphe (2001) ; Ait-ameur (2002) ; Arnfield (1999) ; Bozonnet (2006) ; Brown (2000) ; Dimoudi (2003) ; Eliasson (1995) ; Santamouris (2001)
Température de l'air	SVF, Degree of enclosure	Densité végétale, densité bâtie, porosité urbaine	Givoni (1998) ; Gomez (2004) ; Nagaral (1996) ; Potvin (1997)
Température rayonnante	SVF, albédo moyen des surfaces, Degree of enclosure	Densité végétale, densité bâtie, porosité urbaine	Dimoudi (2003) ; Nikolopoulou (2001) ; Santamouris (2001) ; Steane (2004)
Vitesse du vent		Rugosité urbaine, densité bâtie, porosité urbaine	Adolphe (2001) ; Ait-ameur (2002) ; Givoni (1998)
Humidité relative		Densité végétale, densité bâtie	Ait-ameur (2002) ; Dimoudi (2003) ; Gomez (2004)

#### 4.1.1 Forme, densité et porosité

L'effet de la morphologie urbaine sur les conditions thermiques extérieures pendant la journée est largement déterminé par la relation entre la géométrie urbaine (forme, densité et porosité) et les composantes solaires (directes et diffuses) (Yang et Chen, 2016). Ceux-ci ont également un impact sur les flux d'air et le potentiel de ventilation des espaces urbains. Cependant, les effets aérauliques autour des bâtiments au niveau piéton sont complexes et très variables (Fouad, 2007). Pendant la journée, des environnements urbains denses avec des bâtiments de grande hauteur ont tendance à être moins chauds que des espaces plus ouverts du fait de l'ombrage procuré par les bâtiments. En revanche, dans la nuit la densité élevée des espaces urbains réduit fortement les pertes de flux de chaleur à grande longueur d'onde vers le ciel. Cela est favorable à la création des îlots de chaleurs urbains (ICU).

#### 4.1.2 Rugosité

La rugosité de la surface urbaine est un indicateur important influençant les flux turbulents d'air dans la canopée urbaine (Grimmond et al., 2010). Adolphe (2001) fait la distinction entre rugosité absolue et relative. Ainsi, la rugosité absolue décrit l'effet global de la morphologie urbaine sur le ralentissement moyen des flux aérauliques. Elle est traduite comme hauteur moyenne ( $H_{moy}$ ) de la canopée urbaine. Elle se base sur la somme des produits de la hauteur d'un bâtiment  $i$  ( $h_i$ ) avec sa surface au sol ( $A_i$ ) divisée par la surface totale ( $A_{tot}$ ) de l'espace urbain considéré :

$$H_{moy} = \frac{\sum_1^i (h_i \times A_i)}{A_{tot}}$$

En revanche, la rugosité relative ( $R_a$ ) traduit l'altération de la vitesse moyenne du vent en fonction de la variation de la morphologie urbaine (Adolphe, 2001). Elle est l'écart quadratique

moyen de la hauteur de la canopée urbaine pour une direction et un rayon donnés :

$$R_a = \frac{\sqrt{\sum_1^i (h_i - h_a)^2 \times l_i^2}}{\sum_1^i l_i} \text{ avec :}$$

- $h_i$  la hauteur d'élément urbain  $i$  dans la canopée urbaine
- $h_a$  la hauteur moyenne de la canopée urbaine pour une direction donnée
- $l_i$  la largeur d'un élément  $i$  de la canopée urbaine dans la direction et  $\sum_1^i l_i$  le diamètre de l'espace étudié.

### 4.1.3 Ratio d'aspect H/W

Le ratio H/W est le rapport entre la hauteur moyenne des bâtiments (H) et la largeur moyenne de la rue (W). C'est un des indicateurs le plus utilisés afin de décrire la morphologie urbaine (Lindberg, 2007). Selon Bakarman et Chang (2015), il est, avec l'orientation et le SVF, directement lié au phénomène d'îlot de chaleur. Il quantifie le rapport entre les surfaces verticales et horizontales influençant le rayonnement incident et réfléchi et la vitesse de l'air (Fouad, 2007; Johansson, 2006). Un rapport entre H/W élevé traduit en général un risque plus important d'îlot de chaleur urbain nocturne. Cependant, Bakarman et Chang (2015) ont constaté en région chaude aride que le confort thermique pendant la journée était meilleur pour des rues avec une valeur H/W plus élevée qu'avec une faible valeur.

### 4.1.4 Sky View Facteur (facteur de vue du ciel)

Le SVF est décrit comme la proportion du ciel visible d'un point, basée sur une représentation bidimensionnelle. De même que l'indice H/W, il est relié au rayonnement venant du ciel et reçu par une surface horizontale, ainsi qu'avec le rayonnement émis dans son environnement. Cependant, il a l'avantage d'intégrer une lecture tridimensionnelle de l'espace pour déterminer le potentiel d'exposition solaire en journée et de refroidissement par irradiation la nuit. Il est compris entre 0 et 1, traduisant respectivement des espaces complètement fermés ou ouverts. Selon plusieurs études, cet indicateur est fortement mis en relation avec les phénomènes nocturnes d'ICU, la distribution intra-urbaine de la température de l'air et de surface et le confort thermique (Ali-Toudert et Mayer, 2007; Chen et al., 2016; Lindberg, 2007; Matzarakis et al., 2010; Middel et al., 2018; Yang et Chen, 2016). Plusieurs approches sont utilisées pour le déterminer selon l'information de la morphologie urbaine (Lindberg, 2007) :

- des méthodes analytiques s'appuyant sur la géométrie urbaine de l'espace urbain,
- des méthodes vectorielles basées sur des outils SIG (géo-processing)
- des approches d'analyse d'image raster en présence des modèles de terrain ou
- des méthodes basées sur la photographie avec une lentille de type « fish-eye ».

La détermination du SVF, traditionnellement limitée aux bâtiments, peut aussi concerner d'autres éléments modifiant les masques solaires. Middel et Krayenhoff (2019) distinguent ainsi entre le SVF des bâtiments et le SVF dérivé de la végétation haute (arbres). Basée sur des méthodes de photographie hémisphérique, il est possible de déterminer le SVF moyen d'un espace urbain, mais également de le calculer par secteurs en fonction des différentes occupations du sol. L'inconvénient de cette méthode est sa restriction spatiale à petite échelle comme elle se base sur la photographie. Middel et al. (2018) ont développé une nouvelle approche en se basant sur des images Google Street Views avec une application sur 15 villes dans le monde. Ainsi, elle permet de calculer la distribution spatiale de SVF, les LCZs (Local Climate Zones) et la durée d'ensoleillement.

#### 4.1.5 Orientation

L'orientation est l'angle entre le N et la direction principale de l'espace urbain étudié. Elle est, ensemble avec le rapport H/W, l'indicateur le plus évalué quant à l'analyse de la corrélation entre la géométrie de la rue canyon et du microclimat urbain (Lin et al., 2017). Ainsi, l'orientation détermine l'exposition des rues au rayonnement solaire et aux vents dominants, ce qui influence les flux radiatifs, le stockage d'énergie et le potentiel de ventilation au niveau piéton.

#### 4.1.6 Porosité urbaine

La porosité d'un espace urbain conditionne les flux aérauliques et le captage du rayonnement solaire de manière globale (Fouad, 2007). Elle décrit le rapport entre le volume d'air de l'espace ouvert ( $V_{creux}$ ) et le volume d'air total ( $V_{tot}$ ) de l'espace considéré.

$$P_{tot} = \frac{V_{creux}}{V_{tot}}$$

Ainsi, Adolphe (2001) décrit la porosité ( $P_{tot}$ ) d'un espace urbain de manière suivante :

$$P_{tot} = \frac{\sum \pi \times r_{hi}^2 \times L_i}{V_{tot}} \text{ et } r_{hi} = \frac{l_i \times h_i}{l_i + h_i} \text{ avec :}$$

- $L_i$  la longueur de l'espace ouvert
- $r_{hi}$  le rayon hydraulique équivalent de l'espace ouvert.
- Pour une section rectangulaire  $l_i$  est la largeur de la rue et  $h_i$  la hauteur moyenne de la canopée urbaine.

#### 4.1.7 Frontal area density (porosité directionnelle)

La Frontal area density (FAD ou  $\lambda_F$ ) permet de représenter la forme urbaine de manière 3-dimensionnelle (Ramponi et al., 2015). Elle traduit l'influence de la géométrie des bâtiments sur les flux aérauliques et donc sur le comportement du vent au niveau piéton (Yang et Chen, 2016). Elle est spécialement adaptée aux espaces urbains avec une forte hétérogénéité en hauteur et peut être vue comme une porosité urbaine basée sur la direction du vent. Selon Yang et Chen (2016), la densité surfacique frontale d'une direction du vent spécifique ( $FAD_\theta$ ) est la fonction des surfaces géométriques urbaines sur un plan frontal normal à la direction du vent ( $A(\theta)$ ), d'une hauteur spécifique ( $\Delta_z$ ) et de la surface totale du plan de l'espace urbain considéré ( $A_{tot}$ ). La densité totale ( $FAD_{tot}$ ) est ainsi la somme pondérée de toutes les directions du vent en fonction de la rose du vent pour chaque espace :

$$FAD_{tot} = \sum_0^{360} \frac{A(\theta)}{\Delta_z} \times (\Delta_z * A_{tot})$$

Athamena (2012) se base sur la porosité directionnelle ( $P_{tot}$ ) d'un tissu urbain en fonction de la direction du vent dominant. Ainsi elle est décrite par le rapport entre les surfaces totales de percements ( $A_{perc}$ ) et la surface totale de la façade urbaine ( $A_{tot}$ ) orientée par rapport à l'angle de la direction dominante du vent ( $\theta$ ):

$$P_{tot} = \frac{A_{perc}}{A_{tot}} \times \cos\theta$$

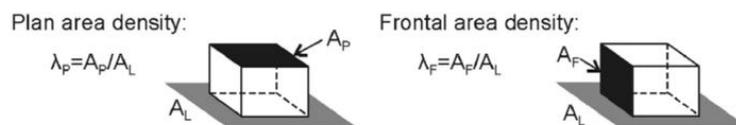


Figure 4: Représentation de Plan area density et de Frontal area density (Ramponi et al., 2015)

#### 4.1.8 Sinuosité

La sinuosité traduit un rapport entre l'orientation de la rue et les flux aérauliques. Elle est décrite selon Adolphe (2001) de la manière suivante :

$$S_{\theta} = \frac{\sum L_i \times \cos^2 \theta}{\sum L_i} \text{ avec :}$$

- $\theta$  l'angle entre l'azimut de la direction dominante du vent et l'azimut de l'orientation du segment de la rue  $i$
- $L_i$  la longueur du segment  $i$  de la rue considéré.

#### 4.1.9 Degré de cloisonnement (DoE Degree of Enclosure)

Le DoE est un indice utile dans les cas où il s'agit des espaces urbains semi-ouverts avec des surfaces pendantes ; pour ces cas, le rapport H/W n'est pas suffisant pour décrire les géométries urbaines. Cet indicateur décrit le rapport entre la somme totale des surfaces (ouvertes et fermées) ( $A_{tot}$ ) et la somme des surfaces ouvertes ( $A_{ouvert}$ ) dans un espace urbain.

$$DoE = \frac{\sum A_{tot}}{\sum A_{ouvert}}$$

Table 6.1 Generic types of semi-enclosed spaces and their degree of enclosure

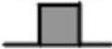
Type of space	Plan diagram	Degree of enclosure
Porch		6.0
Arcade		3.0
Portico		2.0
Undercroft		1.5
Open space		1.0

Figure 5: Schéma de différents types d'espaces semi-fermés et les DoE associés (Steane et Steemers, 2003)

La valeur de 1 signifie un espace complètement ouvert (parc) et une valeur de 6 un espace de type portail. Cette catégorisation est basée sur les travaux de Steane et Steemers (2003) et a été corrélée avec la température des espaces semi-ouverts par Nikolopoulou et Steemers (2003). Fouad (2007) l'a également utilisée afin de caractériser la morphologie urbaine de l'espace expérimental (ex. espace ouvert 1 ; rue canyon 2). Vasilikou et Nikolopoulou (2020) se basent sur cet indicateur pour caractériser les parcours identifiés des ballades thermiques en Angleterre et en Grèce.

#### 4.1.10 Densité

Différents indicateurs de densité sont utilisés pour décrire et caractériser l'environnement urbain (Ramponi et al., 2015). Cependant, selon Lin et al. (2017), cet indicateur doit être combiné avec

d'autres permettant une caractérisation plus fidèle à la géométrie urbaine sur un plan horizontal et vertical.

La densité surfacique bâtie ( $D_{cons}$ ) d'un espace urbain est décrite à travers la proportion des surfaces bâties ( $A_{cons}$ ) à la surface totale ( $A_{tot}$ ) de l'espace considéré. Cela correspond aux indicateurs BSC (Building Site Coverage), BSF (Building Surface Fraction) et Plan Area Density ( $\lambda_P$ ) de (Ramponi et al., 2015; Rodler et Leduc, 2019; Wei et al., 2016) :

$$D_{cons} = \frac{\sum A_{cons}}{A_{tot}}$$

En plus de cet indicateur (Wei et al., 2016) discutent d'autres indicateurs de densité dans leur travail sur les impacts de la morphologie sur le microclimat urbain.

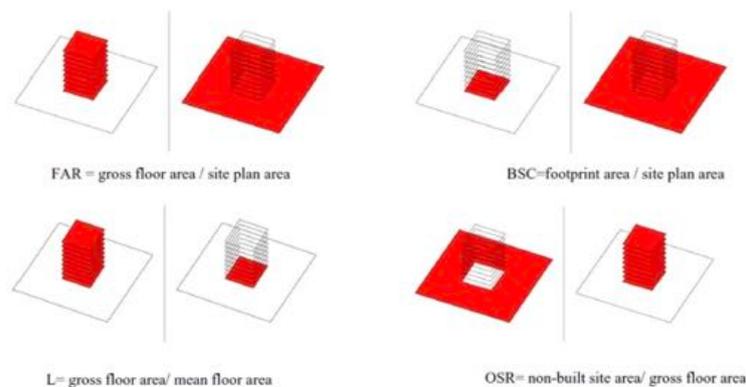


Figure 6: Représentation d'indicateurs de densité selon Wei et al. (2016)

Avec :

- FAR (Floor Area Ratio) il décrit l'intensité de l'espace construit
- BSC (Building Site Coverage) il traduit la proportion de l'espace construit dans une surface considérée
- L (Layer) il indique le nombre moyen d'étages dans une surface considérée
- OSR (Open Space Ratio) il décrit l'intensité de l'espace non construit

## 4.2 Indicateurs sur la matérialité des sols

L'occupation du sol en environnement urbain se décline en surfaces artificielles et naturelles. D'un point de vue énergétique, ces deux types de surfaces diffèrent notamment en transfert de chaleur, de masse et de quantité de mouvement à l'atmosphère (Lin et al., 2017; Oke, 1982).

### 4.2.1 Fraction d'occupation du sol

La fraction d'occupation du sol permet de classer l'environnement urbain en différents usages. Généralement, l'occupation du sol se divise entre les surfaces artificielles, comme les bâtiments et la voirie, et les surfaces naturelles, comme les parcs, squares publics, plans d'eau et jardins privés. Yang et Chen (2016) ont déterminé la fraction de couverture pavée incluant les routes, trottoirs et parkings. De nombreuses études en modélisation microclimatique de l'environnement urbain se basent sur une classification en surfaces bâties, voirie et surfaces naturelles avec une spatialisation plus fine de ces dernières en sol nu, végétation basse et haute (Lemonsu et al., 2012). Toutefois, il est possible de descendre en échelle afin de prendre en compte des fractions

plus fines d'occupation du sol. Ainsi, les surfaces artificielles peuvent être distinguées en fonction de leurs matériaux et les surfaces naturelles en fonction de leurs essences ou de leur mode d'entretien (irrigué ou pas).

#### 4.2.2 Albédo

Chaque surface urbaine est une source d'émission de rayonnement qui agit sur les échanges thermiques entre la surface de la Terre et l'atmosphère. Exprimé comme le rapport entre le rayonnement réfléchi et le rayonnement incident, l'albédo décrit la capacité d'une surface à réfléchir le rayonnement solaire incident. Ses valeurs sont comprises entre 0 et 1, correspondant respectivement à une surface noire, absorbant toutes les longueurs d'onde, et une surface réfléchissante sans en absorber une seule. L'albédo d'une surface dépend de sa propriété réfléchissante (couleur, nature) et de la forme géométrique du tissu urbain (SVF, H/W, orientation).

Généralement, l'albédo moyen des villes européennes est de 0,15, tandis qu'une zone rurale a un albédo plus élevé de l'ordre de 0,42 (Taha, 1997). Cela est en lien avec la forte présence des matériaux artificiels et le piégeage radiatif par les surfaces urbaines (Athamena, 2012). Ainsi, selon plusieurs études, la mise en place des surfaces urbaines avec un albédo élevé compte parmi les stratégies les plus efficaces afin d'atténuer les phénomènes d'îlot de chaleur urbain (Lin et al., 2017; Tsoka, 2017).

Différentes approches permettent d'obtenir l'albédo d'un espace urbain : i) un albédo moyen de l'espace prenant en compte la fraction d'occupation du sol à travers les différents matériaux des surfaces et ii) un albédo moyen considérant la nature et la géométrie des surfaces urbaines.

En se basant sur des images equizonales à axes horizontaux, Fouad (2007) a déterminé un albédo moyen ( $\alpha_{moy}$ ), pondéré en fonction de la fraction ( $f_i$ ) de différentes surfaces horizontales et verticales urbaines à 360° autour d'un point d'observation. Les valeurs d'albédo pour chaque matériau sont dérivées de l'équation ci-dessous selon Santamouris (2016) :

$$\alpha_{moy} = \sum \alpha_i \times f_i$$

Plusieurs études scientifiques ont constaté que l'albédo des surfaces urbaines est également dépendant de la géométrie de l'espace urbain considéré et de l'angle zénithal du soleil (Athamena, 2012). Par conséquent, il a été prouvé que l'albédo est fortement influencé par le SVF et par le ratio H/W, augmentant ainsi avec la densité bâtie. Cependant, Athamena (2012) n'a pas trouvé une corrélation significative de l'albédo avec l'angle zénithal du soleil.

#### 4.2.3 Coefficient d'imperméabilisation

Les villes sont caractérisées par une forte présence des surfaces artificielles au détriment des surfaces naturelles couvertes de la végétation. L'utilisation des matériaux comme le béton, l'asphalte, etc. agit sur les deux bilans en eau et en énergie. D'un côté, ces propriétés empêchent l'infiltration de l'eau de pluie dans le sol et diminuent la capacité d'évapotranspiration (transformation de l'énergie en vapeur d'eau). De l'autre côté, ils augmentent l'absorption et le stockage du rayonnement solaire pendant la journée ainsi que la restitution lente de la chaleur pendant la nuit. Ainsi, le coefficient d'imperméabilisation est un indicateur important pour caractériser l'environnement urbain (Carlson et Traci Arthur, 2000; Grimmond et al., 2010). Il est calculé comme le rapport entre la somme des surfaces imperméabilisées et la surface totale considérée, traduisant l'utilisation du sol et sa perturbation potentielle des bilans hydriques et énergétiques.

### 4.3 Indicateurs sur la végétation urbaine et les dissipateurs thermiques

Les aménagements urbains basés sur la nature (végétation, plan d'eau) ont de multiples fonctions et permettent d'influencer positivement non seulement les bilans hydriques, énergétiques et radiatifs (Lindberg et Grimmond, 2011), mais également l'acoustique, la pollution urbaine et la santé des citoyens (Bowler et al., 2010; Kabisch et al., 2017). Les effets sur les flux d'eau et d'énergie sont directs ou indirects (Gunawardena et al., 2017) et varient en fonction du temps, de la saison et de l'environnement construit (Lin et al., 2017). Les principaux se résument de la façon suivante :

- La canopée foliaire intercepte une partie du rayonnement solaire incident pendant la journée. De plus, la végétation haute (arbres) procure de l'ombre aux surfaces en dessous, ce qui limite également leur réchauffement (de Munck et al., 2013). Ainsi, cela contribue à une réduction de la température de l'air et de surface et influence localement le microclimat (Gunawardena et al., 2017). Tsoka (2017) a démontré une baisse de température de surface de 15°C en augmentant le nombre d'arbres et donc d'ombrage dans les rues indépendamment de leurs orientations.
- La rétention et le stockage de l'eau sur les surfaces naturelles (feuillage des plantes, surfaces d'eau) et dans le sol diminuent le ruissellement de surface (Smets et al., 2019). De plus, cela augmente la capacité de transférer l'énergie de la surface dans l'atmosphère à travers l'évaporation et ainsi augmente potentiellement le refroidissement de l'air (Gunawardena et al., 2017; Oke, 1987).
- La transpiration des végétaux permet également de produire de la vapeur d'eau en consommant de l'énergie. Ce processus participe ainsi au refroidissement de l'environnement attendant pendant la journée (Taha et al., 1991). En général, 99% d'eau et 50% d'énergie absorbée par les plantes sont converties en transpiration. La capacité de transpiration dépend de la plante elle-même (espèce, croissance) et de la saison, mais également du forçage atmosphérique (température, humidité, ensoleillement, vent) et de l'humidité disponible dans le sol (Oke, 1987).

Dans la plupart des études scientifiques concernant les solutions basées sur la nature en ville, l'indicateur le plus utilisé est l'occupation du sol. Cependant, les bénéfices de la végétation se traduisent également par le biais des processus métaboliques des plantes, par exemple l'évapotranspiration, la photosynthèse, la respiration et le stockage de CO<sub>2</sub> et des minéraux de l'air et du sol (Ong, 2003).

#### 4.3.1 Fraction des surfaces naturelles (sol nu, végétation basse et haute, eau)

La fraction des surfaces naturelles est l'indicateur le plus utilisé afin de caractériser la végétation en environnement urbain (Lin et al., 2017). Calculée comme le rapport entre la somme des surfaces naturelles et de la surface totale considérée, elle permet de distinguer les surfaces imperméables des surfaces perméables. Elle peut être considérée comme une fraction totale des surfaces naturelle ou, par extension, divisée en plusieurs parties comme le sol nu, la végétation basse (pelouse et arbustes), la végétation haute (arbres) ou bien des surfaces d'eau.

#### 4.3.2 Distance aux dissipateurs thermiques

Yang et Chen (2016) considèrent des surfaces étendues en végétation (parc) ou en eau (plan d'eau artificiel) comme des dissipateurs thermiques qui permettent de contrebalancer les effets négatifs de l'environnement urbain sur le microclimat. L'approche choisie prend donc en compte

la forme du dissipateur thermique et son emplacement (la distance, et l'angle avec la direction du vent dominant) par rapport à l'espace urbain considéré. Pour cela, ils utilisent la distance euclidienne proposée par des outils SIG.

### 4.3.3 TVF (Tree View Factor)

Le tree view factor décrit la capacité d'ombrage et la capacité d'interception de la pluie par la végétation haute à travers la canopée foliaire des arbres. Comme le SVW, c'est un indicateur qui peut être déterminé par la photographie en utilisant une lentille de type « fish-eye » (Middel et Krayenhoff, 2019). En considérant des arbres à feuilles caduques, il est nécessaire de l'adapter en fonction des saisons.

### 4.3.4 LAI ou Green plot ratio

Le LAI (Leaf Area Index) est un paramètre biologique utilisé pour mesurer la santé biologique des écosystèmes et simuler les processus métaboliques de transpiration et de photosynthèse des plantes (Ong, 2003). Le LAI est défini comme le rapport de l'ensemble des surfaces foliaires à la surface au sol. Il dépend de l'espèce considérée, de l'âge des plantes et de la saison. Masson et al. (2003) ont créé une base de données d'occupation du sol nommée Ecoclimap I et II dans laquelle il existe des informations concernant cet indice.

Le « green plot ratio » (GPR) est un concept réunissant le LAI et le concept de « building plot ratio » (BPR). Selon Ong (2003), le green plot ratio a été défini précédemment comme le LAI moyen de la végétation sur l'espace urbain considéré. Il peut également être défini de manière équivalente comme le rapport entre la surface foliaire totale de la végétation et l'espace urbain considéré. Sa valeur correspond à la valeur moyenne de LAI, mais est exprimée en rapport plutôt qu'en valeur absolue afin d'être consistante avec la détermination du BPR.

### 4.3.5 Indice NDVI

L'indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) est utilisé par Acero et al. (2013) afin de classer la végétation urbaine dans différentes classes de potentiel de rafraîchissement. Les valeurs de NDVI sont dérivées d'une image satellitaire de Landsat 7 d'une journée sans nuages. Elles se basent sur des mesures de réflectance effectuées par le satellite dans les intervalles spectraux visibles (rouge) et proches infrarouges. Ensuite les surfaces végétalisées ont été classées en 4 potentiels de rafraîchissement différents :

Table 3: Catégorisation des surfaces végétalisées en environnement urbain à partir d'une image salitaire de Landsat 7 en potentiel de rafraîchissement (Acero et al., 2013)

NDVI range	cooling potential
NDVI < 0,2	No cooling potential
0,2 < NDVI < 0,5	Low cooling potential
0,5 < NDVI < 0,7	Medium cooling potential
NDVI > 0,7	High potential cooling

## Références

- Acero, J.A., Arrizabalaga, J., Kupski, S., Katzschner, L., 2013. Deriving an Urban Climate Map in coastal areas with complex terrain in the Basque Country (Spain). *Urban Climate* 4, 35-60. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2013.02.002>
- Adolphe, L., 2001. Modelling the link between built environment and urban climate: Towards simplified indicators of the city environment. Rio de Janeiro.
- Ali-Toudert, F., Mayer, H., 2007. Effects of asymmetry, galleries, overhanging façades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons. *Solar Energy* 81, 742-754. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.10.007>
- Ali-Toudert, F., Mayer, H., 2006. Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Building and Environment* 41, 94-108. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.01.013>
- Athamena, K., 2012. Modelling and simulation of urban microclimates : Study of the impact of urban morphology on comfort in outside spaces. cases of Eco-districts (These de doctorat). Ecole Centrale de Nantes, Nantes.
- Bakarman, M.A., Chang, J.D., 2015. The Influence of Height/width Ratio on Urban Heat Island in Hot-arid Climates. *Procedia Engineering* 118, 101-108. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.408>
- Boiné, K., Demers, C.M.H., Potvin, A., 2018. Spatio-temporal promenades as representations of urban atmospheres. *Sustainable Cities and Society* 42, 674-687. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.04.028>
- Bowler, D.E., Buyung-Ali, L., Knight, T.M., Pullin, A.S., 2010. Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning* 97, 147-155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>
- Bröde, P., Fidala, D., Błażejczyk, K., Holmer, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., Tinz, B., 2012. Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *International Journal of Biometeorology* 56, 481-494.
- Bruse, M., 2004. ENVI-met 3.0: Updated Model Overview.
- Camponovo, R., Gallinelli, P., Thomann, P., 2015. moodCity – Qualifier l’environnement urbain : un outil d’aide à l’urbanisme climatique [WWW Document]. Institut inPACT laboratoire leea. URL [www.leea.ch](http://www.leea.ch) (consulté le 2.14.2019).
- Carlson, T.N., Traci Arthur, S., 2000. The impact of land use — land cover changes due to urbanization on surface microclimate and hydrology: a satellite perspective. *Global and Planetary Change* 25, 49-65. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(00\)00021-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(00)00021-7)
- Chen, L., Yu, B., Yang, F., Mayer, H., 2016. Intra-urban differences of mean radiant temperature in different urban settings in Shanghai and implications for heat stress under heat waves: A GIS-based approach. *Energy and Buildings* 130, 829-842. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.014>
- Chokhachian, A., Santucci, D., Auer, T., 2017a. A Human-Centered Approach to Enhance Urban Resilience, Implications and Application to Improve Outdoor Comfort in Dense Urban Spaces. *Buildings* 7, 113. <https://doi.org/10.3390/buildings7040113>
- Chokhachian, A., Santucci, D., Vohlidka, P., Auer, T., 2017b. Framework for Defining a Transient Outdoor Comfort Model in Dense Urban Spaces, Processes & Findings. Faculty of Architecture CTU, Prague, p. 51-54.
- Coccolo, S., Kämpf, J., Scartezzini, J.-L., Pearlmutter, D., 2016. Outdoor human comfort and thermal stress: A comprehensive review on models and standards. *Urban Climate* 18, 33-57. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.08.004>
- Cohen, P., Potchter, O., Matzarakis, A., 2013. Human thermal perception of Coastal Mediterranean outdoor urban environments. *Applied Geography* 37, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.11.001>
- de Munck, C., Pigeon, G., Masson, V., Meunier, F., Bousquet, P., Tréméac, B., Merchat, M., Poef, P., Marchadier, C., 2013. How much can air conditioning increase air temperatures for a city like Paris, France? *Int. J. Climatol.* 33, 210-227. <https://doi.org/10.1002/joc.3415>
- de Oliveira, F., Moreau, S., 2007. Confort thermique ressenti, Analyse des campagnes expérimentales 2005 - 2006, Etude dans le cadre de la recherche CAPE 04 003. CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), Nantes.
- Drach, P., Drach, H., 2014. Mobile Meteorological Survey Station: Applying Measurement Tools on a bike to create the Meteobike, in: Brotas, L., Roaf, S., Nicol, F., Humphreys, M. (Éd.), *Counting the Cost of Comfort in a changing world*. NCEUB, Windsor.
- Fanger, P.O., 1970. *Thermal Comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering*. McGraw-Hill, Copenhagen.
- Fanger, P.O., Hejbjerg, J., Thomsen, J.O.B., 1974. Thermal comfort conditions in the morning and in the evening. *Int J Biometeorol* 18, 16-22. <https://doi.org/10.1007/BF01450661>
- Fiala, D., Havenith, G., Bröde, P., Kampmann, B., Jendritzky, G., 2012. UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. *Int J Biometeorol* 56, 429-441. <https://doi.org/10.1007/s00484-011->

- Fouad, A.O., 2007. Morphologie urbaine et confort thermique dans les espaces publics : étude comparative entre trois tissus urbains de la ville de Québec (Mémoire de Master). Université Laval, Quebec.
- Fröhlich, D., Gangwisch, M., Matzarakis, A., 2019. Effect of radiation and wind on thermal comfort in urban environments - Application of the RayMan and SkyHelios model. *Urban Climate* 27, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.10.006>
- Fröhlich, D., Matzarakis, A., 2018. Spatial Estimation of Thermal Indices in Urban Areas—Basics of the SkyHelios Model. *Atmosphere* 9, 209. <https://doi.org/10.3390/atmos9060209>
- Gallinelli, P., Camponovo, R., Guillot, V., 2017. CityFeel - micro climate monitoring for climate mitigation and urban design. *Energy Procedia* 122, 391-396. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.427>
- Grimmond, C.S.B., Roth, M., Oke, T.R., Au, Y.C., Best, M., Betts, R., Carmichael, G., Cleugh, H., Dabberdt, W., Emmanuel, R., Freitas, E., Fortuniak, K., Hanna, S., Klein, P., Kalkstein, L.S., Liu, C.H., Nickson, A., Pearlmutter, D., Sailor, D., Voogt, J., 2010. Climate and More Sustainable Cities: Climate Information for Improved Planning and Management of Cities (Producers/Capabilities Perspective). *Procedia Environmental Sciences* 1, 247-274. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2010.09.016>
- Gunawardena, K.R., Wells, M.J., Kershaw, T., 2017. Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity. *Science of The Total Environment* 584-585, 1040-1055. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.158>
- Guo, H., Aviv, D., Loyola, M., Teitelbaum, E., Houchois, N., Meggers, F., 2020. On the understanding of the mean radiant temperature within both the indoor and outdoor environment, a critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 117, 109207. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.014>
- Honjo, T., 2009. Thermal Comfort in Outdoor Environment.
- Höppe, P., 1999. The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *Int J Biometeorol* 43, 71-75. <https://doi.org/10.1007/s004840050118>
- Höppe, P.R., 1993. Heat balance modelling. *Experientia* 49, 741-746. <https://doi.org/10.1007/BF01923542>
- Horikoshi, T., Tsuchikawa, T., Kurazumi, Y., Matsubara, N., 1995. Mathematical expression of combined and separate effect of air temperature, humidity, air velocity and thermal radiation on thermal comfort. *Arch Complex Environ Stud* 9-12.
- Jendritzky, G., de Dear, R., Havenith, G., 2012. UTCI—Why another thermal index? *Int J Biometeorol* 56, 421-428. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0513-7>
- Johansson, E., 2006. Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco. *Building and Environment* 41, 1326-1338. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.022>
- Johansson, E., Thorsson, S., Emmanuel, R., Krüger, E., 2014. Instruments and methods in outdoor thermal comfort studies – The need for standardization. *Urban Climate, ICUC8: The 8th International Conference on Urban Climate and the 10th Symposium on the Urban Environment* 10, 346-366. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2013.12.002>
- Johansson, E., Yahia, M.W., Arroyo, I., Bengs, C., 2018. Outdoor thermal comfort in public space in warm-humid Guayaquil, Ecuador. *Int J Biometeorol* 62, 387-399. <https://doi.org/10.1007/s00484-017-1329-x>
- Kabisch, N., van den Bosch, M., Laforteza, R., 2017. The health benefits of nature-based solutions to urbanization challenges for children and the elderly – A systematic review. *Environmental Research* 159, 362-373. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.08.004>
- Kántor, N., Égerházi, L., Unger, J., 2012. Subjective estimation of thermal environment in recreational urban spaces—Part 1: investigations in Szeged, Hungary. *Int J Biometeorol* 56, 1075-1088. <https://doi.org/10.1007/s00484-012-0523-0>
- Klok, L., Rood, N., Kluck, J., Kleerekoper, L., 2018. Assessment of thermally comfortable urban spaces in Amsterdam during hot summer days. *International Journal of Biometeorology* 63.
- Koppe, C., Jendritzky, G., 2005. Inclusion of short-term adaptation to thermal stresses in a heat load warning procedure. *metz* 14, 271-278. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2005/0030>
- Krüger, E., Tamura, C., Schweiker, M., Wagner, A., Bröde, P., 2015. Short-term acclimatization effects in an outdoor comfort study. Toulouse.
- Kurazumi, Y., Fukagawa, K., Yamato, Y., Tobita, K., Kondo, E., Tsuchikawa, T., Horikoshi, T., Matsubara, N., 2011. Enhanced conduction-corrected modified effective temperature as the outdoor thermal environment evaluation index upon the human body. *Building and Environment* 46, 12-21. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.06.012>
- Lam, C.K.C., Gallant, A.J.E., Tapper, N.J., 2018. Perceptions of thermal comfort in heatwave and non-heatwave conditions in Melbourne, Australia. *Urban Climate* 23, 204-218. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.08.006>
- Le Bras, J., 2015. Le microclimat urbain à haute résolution : mesures et modélisation (Thèse de doctorat). Université de Toulouse, Toulouse.

- Lemonsu, A., Masson, V., Shashua-Bar, L., Erell, E., Pearlmutter, D., 2012. Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modelling urban green areas. *Geosci. Model Dev.* 5, 1377-1393. <https://doi.org/10.5194/gmd-5-1377-2012>
- Lin, P., Gou, Z., Lau, S., Qin, H., 2017. The Impact of Urban Design Descriptors on Outdoor Thermal Environment: A Literature Review. *Energies* 10, 2151. <https://doi.org/10.3390/en1022151>
- Lin, T.-P., de Dear, R., Hwang, R.-L., 2011. Effect of thermal adaptation on seasonal outdoor thermal comfort. *Int. J. Climatol.* 31, 302-312. <https://doi.org/10.1002/joc.2120>
- Lindberg, F., 2007. Modelling the urban climate using a local governmental geo-database: MODELLING THE URBAN CLIMATE USING A GEO-DATABASE. *Met. Apps* 14, 263-273. <https://doi.org/10.1002/met.29>
- Lindberg, F., Grimmond, C.S.B., 2011. Nature of vegetation and building morphology characteristics across a city: Influence on shadow patterns and mean radiant temperatures in London. *Urban Ecosyst* 14, 617-634. <https://doi.org/10.1007/s11252-011-0184-5>
- Lindberg, F., Holmer, B., Thorsson, S., 2008. SOLWEIG 1.0 – Modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings. *Int J Biometeorol* 52, 697-713. <https://doi.org/10.1007/s00484-008-0162-7>
- Lindner-Cendrowska, K., 2013. Assessment of bioclimatic conditions in cities for tourism and recreational purposes (a Warsaw case study). *Geogr. Pol.* 86, 55-66. <https://doi.org/10.7163/GPol.2013.7>
- Masson, V., Champeaux, J.-L., Chauvin, F., Meriguet, C., Lacaze, R., 2003. A Global Database of Land Surface Parameters at 1-km Resolution in Meteorological and Climate Models. *Journal of Climate* 16, 1261-1282. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)16%3C1261:AGDOLS%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)16%3C1261:AGDOLS%3E2.0.CO;2)
- Matzarakis, A., Mayer, H., Iziomon, M.G., 1999. Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *International Journal of Biometeorology* 43, 76-84. <https://doi.org/10.1007/s004840050119>
- Matzarakis, A., Rutz, F., 2007. RayMan: a tool for tourism and applied climatology. *Development in Tourism Climatology* 129-138.
- Matzarakis, A., Rutz, F., Mayer, H., 2010. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model. *Int J Biometeorol* 54, 131-139. <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0261-0>
- Mayer, H., Holst, J., Dostal, P., Imbery, F., Schindler, D., 2008. Human thermal comfort in summer within an urban street canyon in Central Europe. *Meteorologische Zeitschrift* 17, 241-250. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2008/0285>
- Middel, A., Krayenhoff, E.S., 2019. Micrometeorological determinants of pedestrian thermal exposure during record-breaking heat in Tempe, Arizona: Introducing the MaRTy observational platform. *Science of The Total Environment* 687, 137-151. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.085>
- Middel, A., Lukaczyk, J., Maciejewski, R., Demuzere, M., Roth, M., 2018. Sky View Factor footprints for urban climate modeling. *Urban Climate* 25, 120-134. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.05.004>
- Middel, A., Selover, N., Hagen, B., Chhetri, N., 2016. Impact of shade on outdoor thermal comfort—a seasonal field study in Tempe, Arizona. *Int J Biometeorol* 60, 1849-1861. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1172-5>
- Nagano, K., Horikoshi, T., 2011. New index indicating the universal and separate effects on human comfort under outdoor and non-uniform thermal conditions. *Energy and Buildings* 43, 1694-1701. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.012>
- Nakayoshi, M., Kanda, M., Shi, R., de Dear, R., 2015. Outdoor thermal physiology along human pathways: a study using a wearable measurement system. *International Journal of Biometeorology* 59, 503-515.
- Nakayoshi, M., Nakashima, T., 2018. Performance of Globe Anemo-radiometer in Mean Radiant Temperature Evaluation in Stationary and Mobile Observation. American Meteorological Society.
- Nicol, F., Humphreys, M., Roaf, S., 2012. *Adaptative thermal comfort: Principles and practices*. Routledge Taylor & Francis, New York.
- Nikolopoulou, M., Lykoudis, S., 2006. Thermal comfort in outdoor urban spaces: Analysis across different European countries. *Building and Environment* 41, 1455-1470. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.031>
- Nikolopoulou, M., Lykoudis, S., Kikira, M., Kofoed, N.-U., Gaarsted, M., Scudo, G., Dessi, V., Rogora, A., 2004. *Designing Open Spaces in the Urban Environment: a Bioclimatic Approach (Research Report)*. Centre for Renewable Energy Sources.
- Nikolopoulou, M., Steemers, K., 2003. Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces. *Energy and Buildings, Special issue on urban research* 35, 95-101. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00084-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00084-1)
- Oke, T.R., 1987. *Boundary layer climates*. Routledge, London.
- Oke, T.R., 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 108, 1-24.
- Ong, B.L., 2003. Green plot ratio: an ecological measure for architecture and urban planning. *Landscape and Urban Planning* 63, 197-211. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(02\)00191-3](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(02)00191-3)

- Parsons, K.C., 2003. *Human Thermal Environments. The effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort and performance*, 2e édition. ed. Taylor & Francis, London & New York.
- Potchter, O., Cohen, P., Lin, T.-P., Matzarakis, A., 2018. Outdoor human thermal perception in various climates: A comprehensive review of approaches, methods and quantification. *Science of The Total Environment* 631-632, 390-406. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.276>
- Potvin, A., 2000. Assessing the microclimate of urban transitional spaces, in: *Proceedings of Plea2000*. Cambridge.
- Ramponi, R., Blocken, B., de Coo, L.B., Janssen, W.D., 2015. CFD simulation of outdoor ventilation of generic urban configurations with different urban densities and equal and unequal street widths. *Building and Environment* 92, 152-166. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.018>
- Requena-Ruiz, I., Drozd, C., Leduc, T., Rodler, A., Servières, M., Siret, D., 2019. A Review on interdisciplinary methods for the characterization of thermal perception in public spaces, in: *CISBAT 2019*. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne.
- Rodler, A., Leduc, T., 2019. Local climate zone approach on local and micro scales: Dividing the urban open space. *Urban Climate* 28, 100457. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100457>
- Santamouris, M., 2016. Cooling the buildings – past, present and future. *Energy and Buildings* 128, 617-638. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.034>
- Santucci, D., Chokhachian, A., Lau, K., Schiavon, S., Pallubinsky, H., Auer, T., 2019. Evaluation of psychological and physiological response to transient comfort conditions in Singapore, in: Roaf, S. & Finlayson, W. (eds.) *Comfort at the extremes*. Dubai, p. 816-827.
- Sasaki, K., Mayer, H., Mochida, A., 2009. *Field Measurement on Thermal Comfort in Outdoor Locations*. Yokohama.
- Smets, V., Wirion, C., Bauwens, W., Hermy, M., Somers, B., Verbeiren, B., 2019. The importance of city trees for reducing net rainfall: comparing measurements and simulations. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 23, 3865-3884. <https://doi.org/10.5194/hess-23-3865-2019>
- Spagnolo, J., de Dear, R., 2003. A field study of thermal comfort in outdoor and semi-outdoor environments in subtropical Sydney Australia. *Building and Environment* 38, 721-738. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00209-3](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00209-3)
- Steane, M.A., Steemers, K. (Éd.), 2003. *Environmental diversity in architecture*. Spon Press, London.
- Stewart, I.D., Oke, T.R., 2012. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 93, 1879-1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
- Taha, H., 1997. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and Buildings* 25, 99-103. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(96\)00999-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(96)00999-1)
- Taha, H., Akbari, H., Rosenfeld, A., 1991. Heat island and oasis effects of vegetative canopies: Micro-meteorological field-measurements. *Theor Appl Climatol* 44, 123-138. <https://doi.org/10.1007/BF00867999>
- Thorsson, S., Lindberg, F., Eliasson, I., Holmer, Björn, 2007. Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting. *International Journal of Climatology* 27, 1983-1993.
- Tsoka, S., 2017. Investigating the Relationship Between Urban Spaces Morphology and Local Microclimate: A Study for Thessaloniki. *Procedia Environmental Sciences* 38, 674-681. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.148>
- Vasilikou, C., Nikolopoulou, M., 2020. Outdoor thermal comfort for pedestrians in movement: thermal walks in complex urban morphology. *Int J Biometeorol* 64, 277-291. <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01782-2>
- Watanabe, S., Nagano, K., Ishii, J., Horikoshi, T., 2014. Evaluation of outdoor thermal comfort in sunlight, building shade, and pergola shade during summer in a humid subtropical region. *Building and Environment* 82, 556-565. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.10.002>
- Wei, R., Song, D., Wong, N.H., Martin, M., 2016. Impact of Urban Morphology Parameters on Microclimate. *Procedia Engineering* 169, 142-149. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.10.017>
- Yang, F., Chen, L., 2016. Developing a thermal atlas for climate-responsive urban design based on empirical modeling and urban morphological analysis. *Energy and Buildings* 111, 120-130. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.047>

# Métrologie des variables climatiques pour la caractérisation de l'expérience thermique

## ANNEXE 3

Ignacio REQUENA-RUIZ      Xénia STAVROPULOS-LAFFAILLE  
Céline DROZD      Thomas LEDUC      Daniel SIRET

### Sommaire

<b>1</b>	<b>L'expérience thermique du citoyen : l'approche par la métrologie climatique</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>La métrologie mobile pour l'étude des variables climatiques in situ</b>	<b>3</b>
2.1	L'étude des variables climatiques à l'échelle urbaine en déplacement rapide . .	4
2.2	L'étude des variables climatiques à l'échelle du corps humain en déplacement à la vitesse du piéton . . . . .	5
2.3	Questionnements . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Chariot climatique Coolscapes</b>	<b>10</b>
3.1	Capteurs choisis . . . . .	10
3.2	Assemblage de la station mobile . . . . .	11
3.3	Spatialisation des données à l'échelle du piéton . . . . .	12
3.4	Guidage et géolocalisation du chariot . . . . .	13
3.5	Stations de référence . . . . .	14
<b>4</b>	<b>Traitement de la donnée</b>	<b>14</b>
	<b>Références</b>	<b>16</b>

# 1 L'expérience thermique du citoyen : l'approche par la métrologie climatique

Pour décrire l'expérience climatique urbaine, il est essentiel de s'attacher à la dynamique des parcours des citoyens. À cette fin, notre équipe a développé une station de mesures mobile sous la forme d'un chariot climatique qui permet de mesurer en n'importe quel point de l'espace accessible les grandeurs caractéristiques du ressenti thermique<sup>1</sup> :

- La température de l'air (°C) qui exprime les conditions thermiques prédominantes mais s'avère insuffisante pour décrire l'expérience thermique elle-même. Sa variation spatiale en milieu urbain en période de forte chaleur est souvent faible.
- L'humidité relative (%), fortement dépendante de la température de l'air, des conditions atmosphériques et de l'exposition au vent. Sa variation spatiale en milieu minéral est généralement faible.
- Le rayonnement solaire incident ( $W/m^2$ ) qui représente l'énergie transmise sur le corps directement par le soleil. Comme nous l'avons vu précédemment, il a un rôle fondamental dans le ressenti thermique.
- Le rayonnement infrarouge ( $W/m^2$ ) qui représente l'énergie transmise par les surfaces entourant le corps du piéton. Sa valeur globale se compose de l'énergie transmise par le sol, les surfaces verticales situées à droite, à gauche, devant et derrière le piéton, ainsi que par le ciel ou les canopées existantes.
- La vitesse du vent ( $m.s^{-1}$ ) qui exprime l'intensité du mouvement de l'air et dont les effets sur le ressenti thermique peuvent être aussi bien positifs que négatifs.

Comme l'indiquent (Yokoyama et al., 2018) et (Qi et al., 2021), les paramètres climatiques liés à la perception thermique peuvent être caractérisés selon trois démarches :

- Télédétection : approche basée sur l'imagerie satellitaire infrarouge informant des températures de surface du sol. Ces données peuvent aussi être couplées avec des données climatiques provenant de stations climatiques statiques pour prédire la température de l'air près du sol.
- Mesures statiques : approche basée sur des stations climatiques statiques dont les conditions de mesure sont parfaitement connues tout au long de l'année.
- Mesures mobiles : approche basée sur des capteurs de mesures climatiques montés sur des plates-formes mobiles.

En raison de leur capacité à fournir une image globale des conditions climatiques urbaines, la télédétection et les mesures stationnaires sont souvent utilisées pour étudier les mécanismes de formation de l'îlot de chaleur urbain et pour élaborer des stratégies d'atténuation de la chaleur dans le cadre de l'aménagement urbain et des espaces publics (Kousis et al., 2021). Cependant, les deux techniques se heurtent à des limites propres de résolution (spatiale et temporelle) et d'analyse des données produites.

Afin de caractériser l'hétérogénéité climatique de la ville, et de l'associer à une prédiction du ressenti thermique, la télédétection par images infrarouges doit être traitée en fonction des mesures de température de l'air fournies par d'autres stations (voir par exemple les travaux de Colaninno et Morello (2019)). Bien que ces procédures permettent de corrélérer la température des surfaces fournies par l'imagerie infrarouge et la température de l'air, l'interaction de ces données reste

---

<sup>1</sup>Pour plus de détails, voir l'annexe 2 de ce rapport intitulé « Caractérisation de l'environnement thermique du citoyen : état de l'art ».

complexe et parfois difficile à interpréter (Kousis et al., 2021). Plus largement, ces données manquent d'une granularité temporelle et spatiale suffisante pour l'étude du ressenti thermique dans l'espace public - par exemple, la résolution spatiale des images fournies par le satellite LandSat de la NASA est de 27x27 m et leur fréquence est d'entre 12 à 16 jours.

Les stations météorologiques stationnaires traditionnelles produisent des mesures parfois très détaillées et dans les longues séquences pour un seul point géographique. L'étude précise des espaces hétérogènes comme la ville implique donc l'usage de réseaux de capteurs qui multiplient les coûts et, malgré cela, ne peuvent pas fournir une densité de maillage des mesures suffisante pour l'analyse de l'expérience thermique (voir par exemple les travaux de Rizvi et al. (2019)). Plus largement, leur encombrement dans l'espace rend parfois leur installation inenvisageable dans des situations urbaines conventionnelles - hormis des situations de laboratoire en plein air comme Sense-city de l'Université Gustave Eiffel.

Contrairement aux approches précédentes, les mesures mobiles offrent une capacité d'acquisition de données à plus haute résolution spatiale dans le contexte urbain souhaité (Kousis et al., 2021; Mayer et al., 2009; Middel et Krayenhoff, 2019; Seidel et al., 2016). Elles s'avèrent utilisées pour identifier les variations intra-urbaines des paramètres microclimatiques. Elles se sont avérées adaptées à l'étude de la perception et du stress thermique, puisqu'elles offrent la possibilité d'effectuer des mesures proches des conditions réelles des citoyens. De plus, elles prennent en compte les paramètres climatiques dans l'étude de l'expérience thermique aussi bien statique que dynamique.

## **2 La métrologie mobile pour l'étude des variables climatiques in situ**

Les techniques de mesure mobile ont suscité l'intérêt des climatologues depuis plus d'un siècle (ex. Kratzer 1937 mesure le climat des villes en déplaçant une station). Elles se basent sur l'utilisation de capteurs climatiques montés sur des plates-formes mobiles qui traversent la zone d'étude pour collecter les données. En fonction de la superficie de la zone d'étude, de la vitesse de déplacement de la plate-forme, de la trajectoire de mesure et du temps de réponse des instruments, les mesures mobiles sont utilisées pour analyser le climat urbain soit à grande échelle (ex. avec des stations montées sur des bus ou des vélos) (Seidel et al., 2016 ; Liu et al., 2017) soit à l'échelle du piéton (ex. avec des stations intégrées dans des chariots, des sacs à dos ou des appareils portatifs). Dans plusieurs domaines scientifiques, ces techniques sont la seule source de données in situ permettant de cartographier les paramètres climatiques locaux à proximité du sol avec une résolution temporelle et spatiale adéquate.

Compte tenu de la variabilité temporelle et spatiale des paramètres climatiques dans les environnements urbains extérieurs, les stations portées par les piétons sont particulièrement appropriées pour l'analyse de l'expérience thermique. Ces stations se déplacent lentement dans l'espace public et collectent des données microclimatiques dans des espaces urbains autrement inaccessibles, tels que les zones piétonnes, les parcs et les jardins.

Deux grandes tendances sont observables dans le champ de la mesure mobile : i) l'étude des variables climatiques à l'échelle urbaine en déplacement rapide ( $V > 10km/h$ ), et ii) l'étude des variables climatiques à l'échelle du corps humain en déplacement à la vitesse du piéton ( $V < 3km/h$ ).

## 2.1 L'étude des variables climatiques à l'échelle urbaine en déplacement rapide

L'article de (Kousis et al., 2021) présente un état de l'art des stations de ce premier groupe, ayant souvent par objectif l'étude spatiale des variables climatiques reliées à l'îlot de chaleur urbain.

Table 1: Études réalisées à l'aide de techniques de métrologie mobile en déplacement rapide selon (Kousis et al., 2021). Température de l'air (Ta), humidité relative (RH), vitesse du vent (WS), rayonnement d'onde courte (SWR), rayonnement de grande longueur d'onde (LWR).

	Study	Platform	Variables	Protocol	City	Study Area
1	Busato et al. 2014	Automobile	Ta, Rh, WS	–	Padua, IT	Roadways
2	Dimitrova et al. 2014	Bicycle	Ta, Rh, WS, SWR	–	Vienna, AT	Roadways
3	Hart & Sailor 2009	Automobile	Ta	36 km/h	Portland, US	Roadways
4	Jacobs et al. 2019	Automobile	Ta, Rh, WS, SWR	18–36 km/h	Delhi, IND - Haka, BD - Faisalabad, PK	Roadways
5	Kim et al. 2019	Automobile	Ta, Rh, WS, SWR, LWR	30–40 km/h	Seoul, KR	Roadways
6	Makido et al. 2016	Automobile	Ta	–	Doha, QA	Roadways
7	Parece et al. 2016	Automobile	Ta	–	Roanoke, US	Roadways
8	Rodriguez et al. 2020	Bicycle	Ta	15 km/h	Seville, SP	Roadways
9	Santamouris et al. 2012	Automobile	Ta, WS	–	Athens, GR	Roadways
10	Santamouris et al. 2020	Automobile, hexacopter	Ta, WS, SWR	–	Sydney, AU	Roadways
11	Soltani & Sharifi 2017	Automobile	Ta, Rh	50 km/h	Adelaide, AU	Roadways
12	Spronken-Smith & Oke 1998	Automobile, bicycle	Ta	–	Vancouver, US	Roadways, pedestrians
13	Stewart 2000	Automobile	Ta	–	Regina, CA	Roadways
14	Sun et al. 2019	Motor vehicle	Ta, Rh	–	Tainan, TW	Roadways
15	Taha et al. 2018	Automobile	Ta	–	Los Angeles, US	Roadways

À l'issue de leur état de l'art, Kousis et al. (2021) indiquent plusieurs questions critiques de cette approche :

- La diversité de vitesses de déplacement de la plate-forme : « une vitesse du véhicule de 10 km/h est recommandée par Oke, tandis que selon Taha et al. les mesures de la température de l'air à une vitesse du véhicule inférieure à 10 km/h doivent être écartées. D'autres études de suivi mobile ont toutefois fait état de vitesses de véhicule supérieures à 30 km/h ».
- La diversité des variables mesurées. Bien que la température de l'air reste la variable essentielle, d'autres variables sont parfois ajoutées sans que ceci soit systématique. Une difficulté de comparaison des résultats demeure.
- La diversité des capteurs utilisés et leur temps de réponse. Les fréquences d'échantillonnage, notamment sur la température de l'air, varient de 5 sec. à 30 sec.

## 2.2 L'étude des variables climatiques à l'échelle du corps humain en déplacement à la vitesse du piéton

Le tableau ci-dessous présente une synthèse des articles scientifiques traitant des stations transportées par les piétons jusqu'en 2022.

Table 2: Études réalisées à l'aide de techniques de métrologie mobile utilisées par des piétons. Température de l'air (Ta), humidité relative (RH), vitesse de vent (WS), rayonnement d'onde courte (SWR), rayonnement de grande longueur d'onde (LWR) et température de globe noir (BGT).

	<b>Study</b>	<b>Platform</b>	<b>Variables</b>	<b>Protocol</b>	<b>Study Area</b>
1	Boiné et al. (2018)	backpack + headphones	Ta, Rh, WS, BGT	continuous (n/a)	Transect (2.2km)
2	Chàfer et al. (2022)	tripod	Ta, Rh, WS, SWR+LWR	stop-and-go (60sec./log)	Transect (2.2km)
3	Chokhachian et al. (2018)	backpack	Ta, Rh, WS, BGT	continuous (0,2 Hz)	Transect (2.5km)
4	Gallinelli et al. (2017)	backpack	Ta*, Rh, WS, SWR+LWR (3D)	continuous (1 Hz)	Transect (various)
5	He et al. (2020)	tripod	Ta, Rh, WS, SWR	semi-stationary (8loc - 15min/loc)	Square (0.35ha)
6	Johansson et al. (2018)	tripod	Ta, Rh, WS, SWR+LWR (3D)	semi-stationary (5loc - 60min/loc)	Public Spaces (various)
7	Kastendeuch et al. (2016)	bicycle luggage trailer + pole	Ta, Rh, WS, BGT	semi-stationary (22loc - 15min/loc)	Square (1ha)
8	Klok et al. (2018)	sack truck + pole	Ta, Rh, WS, BGT	semi-stationary (19loc - 60min/loc)	Public Spaces (various)
9	Lai et al. (2017)	tripod	Ta, Rh WS, SWR (1D)	semi-stationary (6loc - 45min/loc)	Public Spaces (various)
10	Le Bras (2015)	backpack + exo-structure	Ta, Rh, WS, BGT	continuous (0,25 Hz)	Public Spaces (various)
11	Mayer et al. (2008)	mobile station (n/a)	Ta, Rh, WS, SWR+LWR (3D)	semi-stationary (4loc - 10min/loc)	Public Spaces (various)
12	Middel et Krayenhoff (2019)	beach cart + tripod	Ta, Rh, WS, SWR+LWR (3D)	semi-stationary (22loc - 45sec./loc)	Public Spaces (various)
13	Motazedian et al. (2020)	caddie + pole	Ta, Rh, WS, BGT	continuous (0,2 Hz)	Park (1.45ha)
14	Nakayoshi et al. (2015)	cap	Ta, Rh, BGT	continuous (1,5 Hz)	Transect (1.9km)

	<b>Study</b>	<b>Platform</b>	<b>Variables</b>	<b>Protocol</b>	<b>Study Area</b>
15	Oliveira et al. (2011)	tripod	Ta, Rh, WS, SWR+LWR (1D)	semi-stationary (8loc - 15min/loc)	Park (0.4ha)
16	Park et al. (2019)	backpack	Ta	continuous (1 Hz)	Transect (1.1km)
17	Peng et al. (2022)	tripod	Ta, Rh, WS, BGT	stop-and-go (14loc - 8min/loc)	Transect (1.8km)
18	Pioppi et al. (2022)	helmet	Ta, Rh, WS, SWR (1D), therm.img.	continuous (1 Hz)	Transect (1-1.8km)
19	Qi et al. (2021)	sack truck + tripod	Ta, Rh, WS, BGT	stop-and-go (8loc - 15min/loc)	Transect (1km)
20	Skoulika et al. (2014)	hand-held	Ta	continuous (n/a)	Park (6ha)
21	Speak et Salbitano (2022)	backpack	Ta, Rh, WS, BGT	continuous (0,07 Hz)	Public Spaces (30m linear - 0.3ha surface)
22	Tsin et al. (2016)	backpack	Ta, Rh, WS	continuous (0,1 Hz)	Transect (8-10km)

Les auteurs des études citées dans le tableau précédent justifient l'utilisation de cette technique par deux raisons : (1) caractériser en détail les conditions thermiques réelles dans l'environnement bâti en utilisant des paramètres spatialement sensibles telles que la température radiante moyenne, et (2) étudier les relations entre les processus physiologiques et cognitifs de l'être humain et les configurations climatiques locales générées par l'environnement bâti, en combinant généralement des mesures climatiques et physiologiques avec des enquêtes in situ.

## 2.3 Questionnements

Les stations utilisées par les piétons posent cinq problématiques qu'il convient de résoudre :

1. La résolution spatiale de la méthode de mesure
2. Les biais dans la mesure introduits par la configuration d'assemblage de la station
3. La géolocalisation de la station mobile pendant les mesures
4. Le protocole de mesure
5. Le dimensionnement dans le temps et dans l'espace de la campagne de mesures

### 2.3.1 La résolution spatiale de la méthode de mesure

Les capteurs doivent échantillonner avec précision les variations du microclimat dans un environnement physique évolutif. Les effets combinés du temps de réponse des capteurs (y compris leurs abris), de la fréquence d'échantillonnage, de la vitesse du vent et de la vitesse de déplacement des capteurs déterminent la résolution spatiale des données mesurées (Hüb et al., 2015).

Les espaces publics sont des lieux hétérogènes qui présentent a priori des changements thermiques notables dans des espaces relativement petits, ce qui nécessite un temps de réponse court des capteurs (He et al., 2020 ; Qi et al., 2021). Cet aspect est crucial pour les mesures géolocalisées, où la précision géographique de la mesure doit être discutée à la lumière de la résolution spatiale permise par les capteurs sélectionnés.

La vitesse de déplacement est un sujet majeur pour les stations en déplacement rapide. Elle a un effet direct sur la mesure de la vitesse de vent en modifiant la lecture. Elle a aussi un impact sur la mesure de la température de l'air et de l'humidité relative (améliorant le temps de réponse avec la vitesse), ainsi que sur la température du globe noir (en accélérant le refroidissement du capteur). Cependant, selon l'état de l'art de (Kousis et al., 2021), la majorité d'articles n'analyse pas en détail ces effets. Les auteurs mentionnent que des approches contradictoires co-existent et, pour ce qui concerne les stations à la vitesse du piéton, selon état de l'art aucune référence n'a traité la question à notre connaissance.

### **2.3.2 Les biais dans la mesure introduits par la configuration d'assemblage de la station**

Le choix de la plate-forme mobile et la disposition spatiale des capteurs sont essentiels pour trouver un compromis qui minimise les effets sur les mesures (c'est-à-dire l'effet de masque de vent et d'ombre, les réflexions de la lumière du soleil et le transfert de chaleur) causées par la structure de la plate-forme, le corps de la personne en charge d'actionner la station et les capteurs entre les deux. En outre, la stabilité des conditions de mesure pendant les phases de mouvement doit également être prise en compte.

Dans notre état de l'art, nous avons trouvé quatre modalités d'assemblage des capteurs donnant lieu à des approches méthodologiques différentes :

- Instruments embarqués (ou « wearables ») : il s'agit des stations mettant en œuvre des capteurs situés à proximité de la surface du corps. Ils sont petits et peu intrusifs, bien que leur précision et leur résolution soient discutables. Les données nécessitent donc d'importants post-traitements pour les corriger. Les méthodes examinées rendent difficile l'obtention de mesures correctes pour le vent (masque du corps) et presque impossible la caractérisation du rayonnement à ondes courtes et longues.
- Instruments portables : ils sont installés dans des stations météorologiques intégrées dans un sac à dos transporté par le chercheur. Cette configuration permet le montage de capteurs de précision, bien qu'obtenir des mesures fiables demande d'éviter les rayonnements et les masques (solaires et éoliens) de la personne qui porte le sac à dos ou des capteurs. Il faut pour cela éloigner les capteurs par des structures additionnelles, ce qui rend l'instrument plus lourd et plus visible. Notre état de l'art montre que, dans l'état actuel de la technique, les instruments plus grands permettent une caractérisation plus complète du confort thermique, tandis que les solutions plus petites sont moins exhaustives.
- Instruments transportables à l'aide d'une plate-forme : ils mettent en œuvre des stations météorologiques installées sur des chariots. Cette configuration offre des capteurs précis et rapides, intégrant un grand nombre de variables météorologiques, placées dans des conditions de mesure optimales. La distance entre la personne qui actionne la station et l'instrument permet d'éviter les masques solaires et éoliens. Dans les trois cas, cela conduit à des instruments de taille moyenne et relativement lourds, ce qui modifie les conditions d'immersion dans le travail de terrain.
- Instruments semi-stationnaires : il s'agit d'instruments posés sur un trépied mobile. Ils sont principalement utilisés pour caractériser un espace unique, généralement avec des capteurs plus lents mais plus précis. D'autres conceptions utilisent des stations semi-stationnaires comme référence pour l'étalonnage d'autres dispositifs mobiles. Enfin, cette configuration est aussi en renouvellement avec de nouvelles perspectives grâce aux réseaux de microcapteurs (Seidel et al., 2016).

### **2.3.3 La géolocalisation de la station mobile pendant les mesures**

L'analyse du climat urbain au niveau du corps nécessite une localisation très précise des mesures. Cependant, l'obtention de données GNSS (Global Navigation Satellite System) précises dans un environnement urbain se heurte généralement à des interférences de signaux provenant des bâtiments (Seidel et al., 2016; Yokoyama et al., 2018), ce qui se traduit par une précision maximale de 5 mètres avec les appareils GPS conventionnels. D'autres techniques de géolocalisation doivent donc être utilisées.

### **2.3.4 Le protocole de mesure**

La normalisation d'une série de protocoles de mesure mobiles devrait permettre aux chercheurs d'obtenir des données et des conclusions plus facilement comparables. Notre état de l'art présente trois catégories de protocoles :

- Semi-stationnaire : les articles divergent entre 45 sec. par emplacement jusqu'à 60 min. par emplacement.
- Stop-and-go : protocole de mesure en mouvement ponctué par des mesures statiques le long du parcours. Les articles divergent avec des phases d'arrêt entre 1 min. par arrêt jusqu'à 15 min. par arrêt.
- Continu : mesure à vitesse constante sans points d'arrêt. Les protocoles étudiés divergent entre un enregistrement par seconde jusqu'à un enregistrement toutes les 15 secondes.

Le partage de jeux de données dans le monde entier pourrait être facilité par un étalonnage minutieux du protocole de mesure en fonction des caractéristiques des capteurs (Qi et al., 2021).

### **2.3.5 Le dimensionnement dans le temps et dans l'espace de la campagne de mesures**

La durée d'un trajet de mesures est déterminée par son étendue, la complexité des lieux et l'exhaustivité des mesures. Une autre limite est imposée par la variabilité des conditions de contour entre le début et la fin de l'expérimentation, avec parfois la nécessité d'introduire une méthode de correction pour lisser l'effet de ces variations. Selon (Liu et al., 2017), plusieurs types d'approche sont possibles :

- Modèle de correction temporelle simple : avec une seule station météorologique statique comme référence. Il se base sur la variation des mesures dans la station statique entre le début de la mesure et l'instant T de la mesure mobile afin de proposer une correction linéaire si nécessaire.
- Modèle de correction temporelle multiple : avec plusieurs stations météorologiques statiques comme référence. Cette méthode adopte les valeurs moyennes des variations des mesures de plusieurs stations météorologiques stationnaires servant de point de référence. Comparé au modèle précédent, le modèle de correction temporelle multiple reste plus universel en considérant plusieurs stations météorologiques dans différents environnements.
- Modèle de correction temporelle à distance multiple : avec plusieurs stations météorologiques statiques comme référence. Ce modèle, en plus de considérer plusieurs stations statiques, met l'accent sur l'effet de la distance entre chaque station météorologique et chaque point de localisation mobile. Il prend en compte une pondération par la distance entre les stations de références et les points de mesure mobile.

Concernant le nombre d'itérations journalières ou hebdomadaires du protocole, les articles étudiés montrent une diversité d'approches. En général, la majorité des études de notre état de l'art

se contente d'un passage par site et très peu répètent le protocole pour analyser l'évolution des paramètres mesurés le long de la journée.

## 3 Chariot climatique Coolscapes

### 3.1 Capteurs choisis

Inspirés par les travaux de (Middel et Krayenhoff, 2019), des capteurs à caractère scientifique et robuste ont été choisis et fixés sur une remorque à vélo adaptée à cet effet. S’agissant de mesures en mouvement, un temps de réponse très court a été visé en plus de la précision. Les variables microclimatiques mesurées sont la température de l’air, l’humidité relative, la direction et la vitesse du vent et le rayonnement à grande et courte longueur d’onde. L’ensemble de capteurs et la centrale de mesures ont été commandés chez Campbell Scientific, qui les a également testés et étalonnés en usine.

Table 3: Propriétés techniques des capteurs issus de la station de mesures microclimatiques mobile (Synthèse à partir des données fournies par campbellsci.fr).

	Sensors	Variables	Accuracy	Field	Response time	Height
1	HMP155A	Tair	$\pm 0.1$ °C	-80 °C to +60 °C	20 sec.	1.5 m
	HMP155A	RH	$\pm 1$ %	-80 °C to +60 °C	20 sec.	1.5 m
2	2 x Omega Type T Thermocouple	Tair	$\pm 0.5$ °C	-185 °C to +400 °C	Inst.	0.3 m and 1.8 m
3	Gill 2D Windsonic	Ws	$\pm 2$ %	0.01 to 60 $m.s^{-1}$	1 sec.	1.9 m
4	3 x Hukseflux 4-component Net Radiometers	SWR	$\pm 10$ %	0 to 2000 $W.m^{-2}$	18 sec.	1.1 m to 1.2 m
		LWR	$\pm 10\%$	0 to 1000 $W.m^{-2}$	18 sec.	1.1 m to 1.2 m

**Température de l’air et humidité relative** : une sonde mixte a été choisie afin de mesurer la température de l’air et l’humidité relative. Il s’agit du modèle HMP155A Vaisala. Elle est composée d’un « capteur capacitif HUMICAP® 180R avec un film mince de polymère pour mesurer l’humidité relative, et une sonde platine PRT pour mesurer la température ». C’est une sonde robuste à haute gamme qui permet des mesures de terrain fiables, c’est-à-dire à grande précision et à une fréquence élevée. La sonde HMP155A Vaisala doit être installée sous abri météorologique de type RAD14 avec une ventilation naturelle à travers une double ailette. Ce système assure une meilleure protection du capteur contre les intempéries (précipitation, soleil, vent, etc.) et l’intrusion d’insectes. En conséquence, en conditions de températures élevées ( $T_{air} > 24^{\circ}C$ ) et de faibles vitesses de vent ( $V < 2m.s^{-1}$ ), l’auto-échauffement est plus faible, garantissant ainsi des mesures précises.

**Température de l’air (mesure rapide)** : en plus de ce capteur, deux thermocouples chemisés de type T ( $\varnothing 1,0$  mm,  $l = 2m$  et sortie sur connecteur miniature) sont fixés à différentes hauteurs (0,3 m ; 1,8 m) afin de mesurer le gradient vertical de température auquel un corps humain en position debout (cheville et tête) est exposé.

**Vent** : les mesures de la vitesse et de la direction du vent sont assurées par un anémomètre ultrasonique 2D, de type WindSonic1. «Il utilise deux paires de transducteurs orientés perpendiculairement pour le vent horizontal. Les signaux ultrasonores des transducteurs rebondissent sur son capot, minimisant ainsi les effets du jumelage des transducteurs et de la distorsion de l’écoulement» (cf. campbellsci.fr). Sa manipulation est simple et sans parties mobiles ce qui réduit le coût et le temps de la maintenance. Son étalonnage n’est pas obligatoire.

**Bilan radiatif** : pour les mesures du rayonnement dans les trois axes de l'espace (haut-bas, gauche-droite, devant-derrière), il a été choisi d'utiliser un capteur NR01 de chez Hukseflux par direction installés dans une structure visant à minimiser les masques entre capteurs. Chaque NR01 est composé d'un couple de pyranomètres et de pyrgéomètres avec un appareil de chauffage intégré qui réduit la formation de rosée et fait fondre la glace. Ce type de capteurs est souvent utilisé dans des travaux scientifiques ayant pour objectif une représentation de qualité du bilan énergétique entre le rayonnement entrant et réfléchi à courtes et grandes longueurs d'onde.

**Centrale de stockage** : les capteurs sont connectés à une centrale de mesure et de contrôle de Campbell Scientific CR1000X avec un module d'extension CDM-A116. Le CR1000X est une centrale basse consommation et robuste adaptée à des conditions météorologiques extrêmes, auxquelles la station météorologique mobile pourrait être exposée. Selon Campbell Scientific, elle est *«conçue pour mesurer des capteurs, gérer des communications directes et à distance, analyser les données, contrôler des périphériques externes et stocker les données et les programmes de manière fiable par le biais de la mémoire interne non volatile. Son électronique est protégée par un blindage électromagnétique et par un boîtier scellé en acier inoxydable. Son horloge interne est alimentée séparément par pile afin d'assurer une grande précision»*. Elle est programmée en langage CRBasic afin de pouvoir traiter et analyser les données enregistrées. L'autonomie de cette centrale est assurée par une batterie 12V - 24Ah (BP24) permettant de mesurer et de stocker les données pendant plusieurs journées de terrain consécutives. La centrale, son extension et la batterie sont placées sur une platine dans un coffre GRP de type ENC 16/18. Il protège les instruments des intempéries et sa couleur blanche permet de réfléchir le rayonnement solaire afin de réduire le réchauffement à l'intérieur du coffre. L'organisation du coffre et le câblage entre les différents dispositifs ont été faits en usine ce qui permet un branchement simple sur le côté à l'extérieur du coffre.

### 3.2 Assemblage de la station mobile

L'ensemble de capteurs et la centrale de mesure avec la batterie sont montés sur un chariot qui permet de la déplacer le long d'un parcours et autour ou à l'intérieur d'un dispositif spatio-climatique. Ce chariot correspond à une remorque à vélo, deux places, avec trois roues et un frein à main. Le sol du chariot est constitué d'une planche en bois avec les dimensions du plan du chariot, sur laquelle le coffre et un pied de support sont fixés. Le pied sert à installer, par emboîtement, un support vertical et des bras de montage horizontaux afin de pouvoir fixer les capteurs. Les bras horizontaux doivent être assez larges pour éviter des interférences éventuelles avec le reste de l'équipement de mesure (60 cm de l'axe central). Les bras de montage horizontaux et les fixations correspondent aux différents modèles de capteur et ont été fournis par Campbell Scientific. Le chariot est pliable et l'ensemble de l'équipement est facilement dévis-sable, ce qui facilite les déplacements en transport public ou privé. Pour des déplacements à pied, l'équipement peut être rentré à l'intérieur du chariot, ou bien stocké sur le chariot, afin d'éviter des endommagements potentiels des capteurs.

La hauteur de mesure, à laquelle les capteurs doivent être fixés, correspond au centre de gravité du corps humain en position debout à environ 1,1 m. (Johansson et al., 2014). Les radiomètres sont donc installés autour de cette hauteur (un bras de montage de 1,2 m de long est installé à cette hauteur et puis un deuxième, de 0,6 m de long, est installé de manière perpendiculaire en dessous). Afin d'éviter les interférences entre les radiomètres et les autres capteurs, la sonde mixte d'humidité et de température est installée à une hauteur supérieure. L'anémomètre est placé au-dessus, à une hauteur de 1,9 m.



Figure 1: Support mobile de la station météorologique mobile et montage des capteurs

### 3.3 Spatialisation des données à l'échelle du piéton

Le positionnement des mesures mobiles pour l'étude des phénomènes climatiques à l'échelle du corps humain nécessite une grande précision spatiale, ce qui constitue un problème majeur. En effet, l'obtention des données géographiques précises en environnement urbain se heurte la plupart du temps à l'interférence du signal par les bâtiments (Seidel et al., 2016; Yokoyama et al., 2018). Ainsi, selon Yokoyama et al. (2018), l'utilisation d'un système de position globale (GPS) peut entraîner des erreurs de localisation de plus de 20 m. Il convient alors d'appliquer un post-traitement des tracés spatiaux afin de corriger les divergences. Basé sur le principe de plus courtes distances, les points des tracés enregistrés et divergents peuvent être ramenés sur un parcours défini sur la carte (Yokoyama et al., 2018).

Une autre méthode de localisation a émergé ces dernières années suite aux développements des « smartphones » en lien avec une forte baisse des coûts des nouvelles technologies : par exemple des systèmes inertiels à base de microsystèmes électromécaniques (MEMS) et des approches basées sur un réseau de capteurs (Gupta et al., 2015). Cette méthode est basée sur l'utilisation des mini-capteurs inertiels montés au pied à l'aide d'une fixation élastique. Il s'agit d'un capteur composé d'une plate-forme multi-IMU (MIMU) à détection de mouvement, permettant une localisation en temps réel sans avoir accès aux signaux GPS. Connectée à un dispositif portable (téléphone portable ou tablette), une plate-forme d'application reçoit des flux et des vecteurs de déplacements, qu'elle résume pour suivre la position actuelle du porteur.

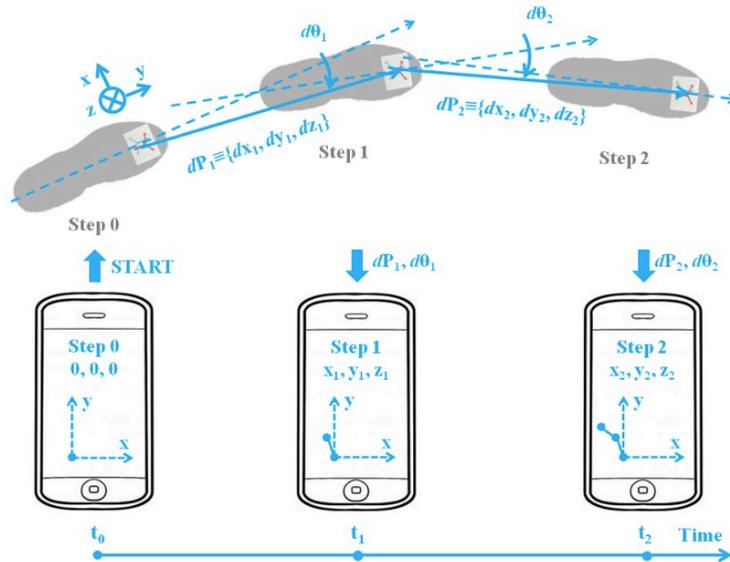


Figure 2: Principe de fonctionnement du capteur inertiel de navigation PDR (Pedestrian Dead Reckoning) porté au pied (Gupta et al., 2015)

Cela permet une application en environnement urbain hétérogène où généralement les bâtiments interfèrent avec une géolocalisation habituelle. Toutefois, afin d’assurer un bon fonctionnement du capteur et donc de limiter les erreurs de localisation, plusieurs points sont à considérer :

- La vitesse d’acquisition est limitée à une vitesse moyenne de marche de  $0,08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . En effet, les erreurs relatives à la localisation s’accroissent avec la vitesse de marche.
- Il est également recommandé de débuter les parcours des mesures à un point de référence fixe et facilement reconnaissable. Cela permet un post-traitement du traçage en cas d’erreur.
- De plus, il est important de noter le dernier étalonnage du capteur comme les erreurs s’accumulent avec la distance parcourue.
- Avant chaque usage du dispositif, la boussole doit être étalonnée de nouveau.

Dans le cadre du projet Coolscapes, un capteur « Inertial Elements » a été évalué. Ce capteur a fait l’objet de tests par un groupe d’étudiants de l’Ecole Centrale de Nantes afin d’étalonner sa mise en oeuvre. Sur le site web d’ Inertial Elements, il existe également de nombreuses vidéos, dont une concernant l’étalonnage du dispositif lui-même « How to calibrate MIMU22BL using BLE in Linux » et de sa boussole « Calibrating MIMU22BL’s Ecompass ». D’un autre côté, des applications portables de position géographique de type GPXTracker ont également été testées. Cependant, une première application a démontré des déviations importantes et dépendantes du modèle de portable utilisé.

### 3.4 Guidage et géolocalisation du chariot

Pour caractériser l’expérience climatique des piétons autour des dispositifs de rafraîchissement, il est nécessaire de pouvoir représenter spatialement les données avec une précision décimétrique. Il faut donc pouvoir s’appuyer sur une géolocalisation fine du chariot climatique. Les dispositifs de type GNSS n’assurent pas cette précision décimétrique en environnement urbain lorsqu’ils ne sont pas différentiels.

La station est localisée dans l'espace avec une précision décimétrique grâce à un capteur inertiel Osmium MIMU22 attaché au pied de la personne qui conduit la station mobile. Ce capteur évalue la position relative à un point initial géolocalisé. Pour recalibrer périodiquement la trajectoire, nous utilisons les points de repère du mobilier urbain ou d'autres éléments dont nous connaissons précisément les coordonnées spatiales. Dans une interface dédiée, nous enregistrons le moment (timestamp) où nous atteignons l'un des points de repère choisis. Nous arrêtons alors le chariot et nous réinitialisons le capteur inertiel en vue de la prochaine séquence. La centrale de mesures et l'interface de pointage sont préalablement synchronisées et chaque mesure du chariot (toutes les deux secondes) est associée à un timestamp.

Suite à un post-traitement des données spatiales, nous joignons les coordonnées GNSS aux mesures. Afin d'assurer la précision de la localisation et des lectures climatiques, un protocole combinant des mesures en mouvement à faible vitesse ( $V_{\text{moy}} = 0,50 \text{ m.s}^{-1}$ ) à des mesures en stop-and-go ( $T_{\text{arrêt}} \geq 50 \text{ sec.}$ ) (Qi et al., 2021) a été mise en œuvre. Les jeux de données résultants sont traités au moyen d'un ensemble d'outils numériques développés en Python dans le plug-in t4gpd qui reprend et étend des fonctionnalités standard de Pandas, Shapely, GeoPandas et Matplotlib.

### 3.5 Stations de référence

En plus des capteurs mobiles, une station fixe a été utilisée pour collecter des données de référence sur place pendant la période des mesures. Il s'agit d'une station Kestrel Instruments Heat stress tracker 5400 placée sur un trépied à 1m70 à l'extérieur de l'aire d'influence du dispositif. Elle est mise en service au moins 10 minutes avant de commencer les mesures mobiles et arrêtée au moins 3 minutes après avoir terminé le circuit. Elle enregistre la température de l'air, l'humidité relative, la température sous globe noir et la vitesse du vent à une fréquence de 0,1 Hz.

Pour chaque jour de mesures, les données de Météo France pour la station météorologique la plus proche ont été collectées : Nantes-Bouguenais (47.15° N, 1.60° W) et Roissy (49.00° N, 2.55° E). Ces jeux de données agrègent pour chaque heure les mesures de température de l'air  $T_{\text{air}}(\text{°C})$ , humidité relative  $R_h(\%)$ , vitesse du vent  $W_s(\text{m.s}^{-1})$  et irradiation solaire horizontale  $S_r(\text{Wm}^{-2})$ .

## 4 Traitement de la donnée

Les outils qui ont été développés spécifiquement pour la lecture, la mise en forme, le traitement et l'exploration des données du projet Coolscapes ont été intégrés au plug-in t4gpd dans le double objectif d'une facilitation du déploiement et d'une mutualisation des efforts de maintenance. Ils consistent plus précisément en :

- Un ensemble d'outils de lecture des données de mesure. Ces outils permettent principalement de convertir les fichiers de type csv hétérogènes issus des stations de mesures climatiques statiques et mobiles, des données inertielles et autres données telles celles de Météo France en un ensemble de DataFrame pandas. Ces conversions s'accompagnent d'un ensemble de traitements de conversion et d'alignement des données (notamment d'horodatage) mais aussi d'un ensemble de tests visant par exemple à garantir l'indispensable croissance monotone de l'horodatage ;

- Une phase de recalage des données inertielles sur une trace théorique en intégrant les contraintes d'un ensemble de jalons (i.e. points de passage obligés),
- Une phase de jointure temporelle (au plus proche voisin) permettant d'associer, à toute position issue du recalage des données inertielles, un ensemble de mesures climatiques mobiles,
- Une phase de calcul des indices du confort thermique (Tmrt, PET, UTCI, etc.),
- La production d'un ensemble de planches graphiques présentant une cartographie thématique du cheminement dans son contexte aux côtés d'un ensemble de chroniques de mesures (ou d'indicateurs dérivés) en fonction du temps.

La douzaine de classes python embarquées dans le plug-in t4gpd et développées spécifiquement dans le cadre du projet Coolscapes représente un peu plus de 600 lignes d'instructions. Pour en faciliter l'utilisation, ce développement a été encapsulé dans un serveur d'application web (technologie Flask) dédié exclusivement à la mise en forme des données de mesure.

## Références

- Boiné, K., Demers, C.M.H., Potvin, A., 2018. Spatio-temporal promenades as representations of urban atmospheres. *Sustainable Cities and Society* 42, 674-687. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.04.028>
- Châfer, M., Tan, C.L., Cureau, R.J., Hien, W.N., Pisello, A.L., Cabeza, L.F., 2022. Mobile measurements of microclimatic variables through the central area of Singapore: An analysis from the pedestrian perspective. *Sustainable Cities and Society* 83, 103986. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103986>
- Chokhachian, A., Ka-Lun Lau, K., Perini, K., Auer, T., 2018. Sensing transient outdoor comfort: A georeferenced method to monitor and map microclimate. *Journal of Building Engineering* 20, 94-104. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.07.003>
- Colaninno, N., Morello, E., 2019. Modelling the impact of green solutions upon the urban heat island phenomenon by means of satellite data. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1343, 012010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1343/1/012010>
- Gallinelli, P., Camponovo, R., Guillot, V., 2017. CityFeel - micro climate monitoring for climate mitigation and urban design. *Energy Procedia* 122, 391-396. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.427>
- Gupta, A.K., Skog, I., Händel, P., 2015. Long-term Performance Evaluation of a Foot-mounted Pedestrian Navigation Device. New Delhi, India. <https://doi.org/10.1109/INDICON.2015.7443478>
- Hüb, K., Ruddell, B.L., Middel, A., 2015. Sensor lag correction for mobile urban microclimate measurements. *Urban Climate* 14, 622-635. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.10.003>
- He, B.-J., Ding, L., Prasad, D., 2020. Outdoor thermal environment of an open space under sea breeze: A mobile experience in a coastal city of Sydney, Australia. *Urban Climate* 31, 100567. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100567>
- Johansson, E., Thorsson, S., Emmanuel, R., Krüger, E., 2014. Instruments and methods in outdoor thermal comfort studies – The need for standardization. *Urban Climate, ICUC8: The 8th International Conference on Urban Climate and the 10th Symposium on the Urban Environment* 10, 346-366. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2013.12.002>
- Johansson, E., Yahia, M.W., Arroyo, I., Bengs, C., 2018. Outdoor thermal comfort in public space in warm-humid Guayaquil, Ecuador. *Int J Biometeorol* 62, 387-399. <https://doi.org/10.1007/s00484-017-1329-x>
- Kastendeuch, P.P., Najjar, G., Philips, N., Nerry, F., Roupioz, L., Colin, J., Luhahe, R., 2016. Mesures pour l'étude des ambiances climatiques à Strasbourg lors de la canicule 2015. Besançon.
- Klok, L., Rood, N., Kluck, J., Kleerekoper, L., 2018. Assessment of thermally comfortable urban spaces in Amsterdam during hot summer days. *International Journal of Biometeorology* 63.
- Kousis, I., Pigliaultile, I., Pisello, A.L., 2021. Intra-urban microclimate investigation in urban heat island through a novel mobile monitoring system. *Sci Rep* 11, 9732. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88344-y>
- Lai, A., Maing, M., Ng, E., 2017. Observational studies of mean radiant temperature across different outdoor spaces under shaded conditions in densely built environment. *Building and Environment* 114, 397-409. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.034>
- Le Bras, J., 2015. Le microclimat urbain à haute résolution : mesures et modélisation (Thèse de doctorat). Université de Toulouse, Toulouse.
- Liu, L., Lin, Y., Wang, D., Liu, J., 2017. An improved temporal correction method for mobile measurement of outdoor thermal climates. *Theor Appl Climatol* 129, 201-212. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1769-y>
- Mayer, H., Holst, J., Dostal, P., Imbery, F., Schindler, D., 2008. Human thermal comfort in summer within an urban street canyon in Central Europe. *Meteorologische Zeitschrift* 17, 241-250. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2008/0285>
- Mayer, J.-C.H., Rummel, U., Meixner, F.X., Foken, T., 2009. Moving measurement platforms specific challenges and corrections. *metz* 18, 477-488. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2009/0401>
- Middel, A., Krayenhoff, E.S., 2019. Micrometeorological determinants of pedestrian thermal exposure during record-breaking heat in Tempe, Arizona: Introducing the MaRTy observational platform. *Science of The Total Environment* 687, 137-151. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.085>
- Motazedian, A., Coutts, A.M., Tapper, N.J., 2020. The microclimatic interaction of a small urban park in central Melbourne with its surrounding urban environment during heat events. *Urban Forestry & Urban Greening* 52, 126688. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126688>
- Nakayoshi, M., Kanda, M., Shi, R., de Dear, R., 2015. Outdoor thermal physiology along human pathways: a study using a wearable measurement system. *International Journal of Biometeorology* 59, 503-515.
- Oliveira, S., Andrade, H., Vaz, T., 2011. The cooling effect of green spaces as a contribution to the mitigation of urban heat: A case study in Lisbon. *Building and Environment* 46, 2186-2194. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.04.034>
- Park, C.Y., Lee, D.K., Asawa, T., Murakami, A., Kim, H.G., Lee, M.K., Lee, H.S., 2019. Influence of urban form on the cooling effect of a small urban river. *Landscape and Urban Planning* 183, 26-35. <https://doi.org/10.1016/j.landscape.2019.04.003>

6/j.landurbplan.2018.10.022

- Peng, Z., Bardhan, R., Ellard, C., Steemers, K., 2022. Urban climate walk: A stop-and-go assessment of the dynamic thermal sensation and perception in two waterfront districts in Rome, Italy. *Building and Environment* 221, 109267. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109267>
- Pioppi, B., Pisello, A.L., Ramamurthy, P., 2022. Wearable sensing techniques to understand pedestrian-level outdoor microclimate affecting heat related risk in urban parks. *Solar Energy* 242, 397-412. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.05.076>
- Qi, Q., Meng, Q., Wang, J., Ren, P., 2021. Developing an optimized method for the « stop-and-go » strategy in mobile measurements for characterizing outdoor thermal environments. *Sustainable Cities and Society* 69, 102837. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102837>
- Rizvi, S.H., Alam, K., Iqbal, M.J., 2019. Spatio-temporal variations in urban heat island and its interaction with heat wave. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 185, 50-57. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.02.001>
- Seidel, J., Ketzler, G., Bechtel, B., Thies, B., Philipp, A., Böhner, J., Egli, S., Eisele, M., Herma, F., Langkamp, T., Petersen, E.S., Sachsen, T., Schlöbinger, D., Schneider, C., 2016. Mobile measurement techniques for local and microscale studies in urban and topo-climatology. *DIE ERDE. Journal of the Geographical Society of Berlin* 147, 15-39. <https://doi.org/10.12854/erde-147-2>
- Skoulika, F., Santamouris, M., Kolokotsa, D., Boemi, N., 2014. On the thermal characteristics and the mitigation potential of a medium size urban park in Athens, Greece. *Landscape and Urban Planning* 123, 73-86. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.11.002>
- Speak, A.F., Salbitano, F., 2022. Summer thermal comfort of pedestrians in diverse urban settings: A mobile study. *Building and Environment* 208, 108600. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108600>
- Tsin, P.K., Knudby, A., Krayenhoff, E.S., Ho, H.C., Brauer, M., Henderson, S.B., 2016. Microscale mobile monitoring of urban air temperature. *Urban Climate* 18, 58-72. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.10.001>
- Yokoyama, H., Ooka, R., Kikumoto, H., 2018. Study of mobile measurements for detailed temperature distribution in a high-density urban area in Tokyo. *Urban Climate* 24, 517-528. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.06.006>

# Mise en oeuvre et expérimentation de la démarche de caractérisation de l'expérience thermique

## ANNEXE 4

Ignacio REQUENA-RUIZ      Xénia STAVROPULOS-LAFFAILLE  
Céline DROZD      Thomas LEDUC      Daniel SIRET

### Sommaire

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Méthode de recherche</b>	<b>5</b>
2.1	Métrologie climatique mobile . . . . .	5
2.2	Etude ethnographique de l'espace public . . . . .	7
2.3	Analyse des données . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Quai des plantes (Nantes, 2020)</b>	<b>10</b>
3.1	Présentation du site . . . . .	10
3.2	Description des zones d'étude . . . . .	10
3.3	Synthèse détaillée des campagnes d'enquête . . . . .	13
<b>4</b>	<b>Jardin extraordinaire Carrière Misery (Nantes, 2020)</b>	<b>17</b>
4.1	Présentation du site . . . . .	17
4.2	Description des zones d'étude . . . . .	17
4.3	Détail des travaux de terrain réalisés . . . . .	20
<b>5</b>	<b>Installation Rideau à Place Graslin (Nantes, 2020)</b>	<b>24</b>
5.1	Présentation du site . . . . .	24
5.2	Description des zones d'étude . . . . .	24
5.3	Détail des travaux de terrain réalisés . . . . .	26
<b>6</b>	<b>Estrade rafraîchissante (La Défense, 2021)</b>	<b>29</b>
6.1	Présentation du site . . . . .	29
6.2	Description des zones d'étude . . . . .	30
6.3	Détail des travaux de terrain . . . . .	31
<b>7</b>	<b>Îlot frais (La Défense, 2021)</b>	<b>34</b>
7.1	Présentation du site . . . . .	34
7.2	Description des zones d'étude . . . . .	34
7.3	Détail des travaux de terrain . . . . .	35

<b>8 Parc de l'axe (La Défense, 2021)</b>	<b>38</b>
8.1 Présentation du site . . . . .	38
8.2 Description des zones d'étude . . . . .	39
8.3 Détail des travaux de terrain . . . . .	41
<b>Références</b>	<b>43</b>

# 1 Introduction

Les sites expérimentaux ciblés comprennent des dispositifs de rafraîchissement, également appelés « dispositifs spatio-climatiques », pérennes ou éphémères. Il s'agit d'espaces publics de ressourcement le temps d'une pause ou de rafraîchissement ponctuel pendant un parcours dans la ville. Ce sont des sites qui combinent plusieurs modes d'usage et de rafraîchissement dans un même espace public.

Le choix des terrains d'étude dans le cadre du projet Coolscapes répond à plusieurs critères : i) analyser des sites intégrant des approches de rafraîchissement les plus fréquentes d'après le répertoire (cf. Annexe 1), notamment les « stratégies vertes » appliquées sur des sites très minéraux et les « stratégies bleues » sous forme d'évènement localisé ; ii) diversifier le nombre de techniques de rafraîchissement afin de tester la station mobile (cf. Annexe 2) ; iii) se situer en phase avec les enjeux d'aménagement urbain contemporains. Malgré l'ambition européenne initialement portée par ce projet, la crise sanitaire a impacté le choix des terrains expérimentaux de l'été 2020 de par l'accessibilité restreinte de certains sites, le changement des comportements habituels pour gérer la distance interpersonnelle ou le contact avec les surfaces et le retardement dans la mise en oeuvre de certaines installations éphémères. De ce fait, nous nous sommes concentrés sur des sites pour lesquels les incertitudes d'accès et d'administration pouvaient être facilement gérées, tout en préservant un intérêt scientifique.

Au total nous avons étudié 6 dispositifs entre les étés 2020 et 2021 :

- *Quai des plantes, Nantes* : il s'agit de l'aménagement temporaire d'une surface bitumée destinée au parking en bord de Loire. Il est composé d'un ensemble de plantations hors-sol combinant strate basse, strate arbustive et strate arborée basse avec une structure de pergola linaire en bois. Il s'agit d'une canopée linaire végétalisée avec des assises parsemées le long du parcours. C'est un dispositif de type Capsule climatique - tunnel.
- *Jardin extraordinaire Carrière Miséry, Nantes* : il s'agit d'un parc paysager situé dans une ancienne carrière. Il dispose de plusieurs zones combinant la végétation locale et la végétation exotique. La séquence centrale intègre un bassin d'eau en circulation, une cascade et une brumisation intermittente sous une passerelle en caillebotis. Ce dispositif ne rentre pas dans le classement typologique du fait de sa singularité.
- *Installation Rideau Place Graslin, Nantes* : il s'agit d'un aménagement temporaire dans une place patrimoniale à caractère minéral. Rideau était une installation artistique composée d'une cascade et d'un bassin d'eau en fonctionnement pendant les heures centrales de la journée. C'est un dispositif de type Mise en scène climatique - nuages.
- *Estrade rafraîchissante, La Défense* : il s'agit de l'aménagement temporaire d'une surface minérale superposée à la dalle de la Défense et composée de pavés évaporatifs installés sur un lit de sable humidifié par un système d'humectation avec l'eau de pluie. C'est un dispositif de type Mobilier rafraîchissant - base.
- *Îlot frais, La Défense* : il s'agit d'un aménagement temporaire sous forme de banc ombragé intégrant un rafraîchissement sous l'assise par air frais et une canopée ajourée en bois. C'est un dispositif de type Mobilier rafraîchissant - ombrière.
- *Parc de l'axe, La Défense* : il s'agissait d'un aménagement temporaire avec la végétation hors-sol installée dans des jardinières de grande surface superposées à La Défense. C'est un dispositif de type Place microclimatique - jardin artificiel.

Table 1: Synthèse des dispositifs analysés. nb j. (nombre de jours), nb obs. (nombre de campagnes d'observation), Tair (température de l'air moyenne dans la station de référence Météo France pendant le temps de mesure).

site	porteur du projet	surface (m <sup>2</sup> )	type	période	nb j	nb obs	Tair
<b>Quai de plantes</b>	Service Espaces Verts Nantes	2 075	Capsule/tunnel	5/2020 6/2020 7/2020	9	39	25.2 (20.6-30.2)
<b>Carrière Miséry</b>	Service Espaces Verts Nantes	7 560	Non-classé	7/2020	7	31	25.9 (20.2-29.7)
<b>Rideau Place Graslin</b>	Voyage à Nantes	6 150	Mise-en-scène/nuage	9/2020	6	24	27.2 (21.5-32.7)
<b>Estrade rafraîchissante</b>	Paris La Défense, Efficacity, société privée	200	Mobilier/base	7/2021 9/2021	6	24	27.1 (25.4-28.5)
<b>Îlot frais</b>	Paris La Défense, Efficacity, société privée	25	Mobilier/ombrière	7/2021 9/2021	8	32	27.1 (25.4-28.5)
<b>Parc de l'axe</b>	Paris La Défense	6 400	Place/jardin-artificiel	7/2021 9/2021	8	32	27.1 (25.4-28.5)

## 2 Méthode de recherche

### 2.1 Métrologie climatique mobile

Avant chaque campagne de mesure, nous définissons des parcours-types qui simulent le cheminement d'un citadin avant, autour et après le dispositif étudié. Deux parcours-types croisés sont souvent définis sur un même site. Nous attendons ensuite une journée significativement chaude pour réaliser les mesures, c'est-à-dire une journée avec un écart de température important par rapport à la normale. Nous organisons des circuits de mesures associant les parcours-types. Le chariot est conduit sur ces circuits selon des horaires fixes tout au long de la journée, par exemple toutes les deux heures de 10h à 18h. L'opération peut être répétée sur plusieurs jours.

A la fin de chaque journée, les données sont entreposées, vérifiées et analysées. L'analyse permet d'évaluer les indicateurs de ressenti thermique par leurs valeurs absolues localisées, mais aussi par leurs valeurs relatives (dynamique temporelle) le long des parcours de mesure. L'analyse des gradients d'évolution des indicateurs permet en effet de restituer au plus près l'expérience d'un citadin en mouvement circulant en un temps court entre des espaces potentiellement contrastés sur le plan thermique.

#### 2.1.1 Station de mesures mobile

La station de mesures mobile développée par notre équipe se présente sous la forme d'un chariot climatique (Figure 1) qui embarque différents capteurs (Stavropoulos-Laffaille et al., 2021) :

- 2 thermocouples type T à hauteur des chevilles et de la nuque et 1 sonde mixte HMP155A Vaisala sous abri pour mesurer la température de l'air et l'humidité relative ;
- un anémomètre ultrasonique 2D de type WindSonic1 pour mesurer la vitesse et la direction du vent ;
- 3 capteurs NR01 (radiomètre net) de Hukseflux, chacun composé d'un couple de pyranomètres et de pyrgeomètres, qui mesurent le bilan d'énergie des rayonnements à ondes courtes et grandes longueurs d'onde infrarouge dans 6 directions (droite/gauche, devant/derrière et haut/bas) ;
- le tout contrôlé par une centrale autonome Campbell Scientific CR1000X et alimenté par une batterie 12V et 24Ah.

Le détail technique de montage de cette station est expliqué dans l'Annexe 3.



Figure 1: Le chariot climatique développé par notre équipe. On distingue la sonde mixte sous abri (cylindre blanc sur le mât vertical), l'anémomètre ultrasonique (en haut du mât), les couples de pyranomètres et pyrgeomètres dans les trois directions droite/gauche, devant/derrière et haut/bas. Photo D. Siret / I. Requena / AAU-Crenau.

### 2.1.2 Guidage et géolocalisation du chariot

Pour caractériser l'expérience climatique des piétons autour des dispositifs de rafraîchissement, il est nécessaire de pouvoir représenter spatialement les données avec une précision décimétrique. Il faut donc pouvoir s'appuyer sur une géolocalisation fine du chariot climatique. Les dispositifs de type GNSS n'assurent pas cette précision décimétrique en environnement urbain lorsqu'ils ne sont pas différentiels.

La station est localisée dans l'espace avec une précision décimétrique grâce à un capteur inertiel Osmium MIMU22 attaché au pied de la personne qui la conduit. Ce capteur évalue la position relative de la station par rapport à un point initial géolocalisé. Pour recalibrer périodiquement la trajectoire, nous utilisons les points de repère du mobilier urbain ou d'autres éléments dont nous connaissons précisément les coordonnées spatiales. Dans une interface dédiée, nous enregistrons le moment (timestamp) où nous atteignons l'un des points de repère choisis. Nous arrêtons alors le chariot et nous réinitialisons le capteur inertiel en vue de la prochaine séquence. La centrale de mesures et l'interface de pointage sont préalablement synchronisées et chaque mesure du chariot (toutes les deux secondes) est associée à un timestamp.

Suite à un post-traitement des données spatiales, nous joignons les coordonnées GNSS aux mesures. Afin d'assurer la précision de la localisation et des lectures climatiques, un protocole combinant des mesures en mouvement à faible vitesse ( $V_{\text{moy}} = 0,50 \text{ m.s}^{-1}$ ) à des mesures en stop-and-go ( $T_{\text{arrêt}} \geq 50 \text{ sec.}$ ) (Qi et al., 2021) a été mis en œuvre. Les jeux de données résultants sont traités au moyen d'un ensemble d'outils numériques développés en Python dans le

plug-in t4gpd qui reprend et étend des fonctionnalités standard de Pandas, Shapely, GeoPandas et Matplotlib.

### 2.1.3 Stations de référence

En plus des capteurs mobiles, une station fixe a été utilisée pour collecter des données de référence sur place pendant la période des mesures. Il s'agit d'une station Kestrel Instruments Heat stress tracker 5400 placée sur un trépied à 1m70 à l'extérieur de l'aire d'influence du dispositif. Elle est mise en service au moins 10 minutes avant de commencer les mesures mobiles et arrêtée au moins 3 minutes après avoir terminé le circuit. Elle enregistre la température de l'air, l'humidité relative, la température sous globe noir et la vitesse du vent à une fréquence de 0,1 Hz.

Pour chaque jour de mesures, les données de Météo France pour la station météorologique la plus proche ont été collectées : Nantes-Bouguenais (47.15° N, 1.60° W) et Roissy (49.00° N, 2.55° E). Ces jeux de données agrègent pour chaque heure les mesures de température de l'air  $T_{\text{air}}$  (°C), humidité relative  $R_h$  (%), vitesse du vent  $W_s$  (m.s<sup>-1</sup>) et irradiation solaire horizontale  $S_r$  (Wm<sup>-2</sup>).

## 2.2 Etude ethnographique de l'espace public

### 2.2.1 Observation passive des usages

L'approche métrologique est complétée par des observations des usages effectifs du dispositif de rafraîchissement dans son environnement. Les trajectoires, attitudes et postures des citoyens, leurs arrêts éventuels, renseignent de manière utile sur l'efficacité du dispositif et sur son appropriation. Pour cette phase, nous nous appuyons notamment sur le protocole établi par le Gehl Institute pour l'analyse des espaces publics urbains (Tsay et Andersen, 2017). L'observation passive des activités dans l'espace public est réalisée avec les méthodes de « mapping » et « tracking », expérimentées par des chercheurs du champ des études urbaines (Alexandra et al., 2009 ; Flükiger et Leuba, 2015 ; Ng, 2016 ; Whyte, 1980).

L'observateur se place dans une position qui ne gêne pas la circulation des citoyens. Sur une séquence de 15 à 20 minutes, elle ou il enregistre les arrivées et départs autour du dispositif en notant les trajectoires de déplacement, les postures et activités apparentes des passants, ainsi que les éventuels lieux et temps d'arrêt. Afin de produire le maximum de données pendant l'observation sur place, tout en évitant que la technique empiète sur l'observation, nous avons réalisé un état de l'art des outils numériques. Bien que la question d'un outil SIG pour l'observation ethnographique ait été abordée par plusieurs chercheurs (Ghavampour et al., 2017; Golicnik et Marusic, 2012; Goličnik Marušić, 2015; Müller-Eie et al., 2018), actuellement aucune application ne permet sa réalisation. La majorité de chercheurs réalise leurs études sur des formats papier (carte + tableau) ou, dans certains cas, sur des formats graphiques numériques sans possibilité de données associées. Nous avons choisi de nous appuyer sur la solution libre de droits Qfield© que nous avons adaptée à nos besoins. Qfield est une extension mobile de QGIS© pour le travail de terrain. Elle permet d'ouvrir un projet QGIS en déplacement à l'aide d'un dispositif numérique portable (téléphone ou tablette Android). Ainsi, il est possible de visualiser un projet QGIS sur le dispositif portable tout en travaillant sur les géométries spatiales et leurs informations attributaires. L'interface est simplifiée et permet uniquement de modifier des éléments spatiaux prédéfinis au préalable sur un poste informatique fixe avec QGIS. La communication

entre le dispositif portable et le poste fixe est sans problème puisque les mêmes librairies entre les deux logiciels sont utilisées.

L'analyse de ces données permet de reconstituer les flux dans l'espace autour du dispositif et les lieux d'arrêt préférentiels. Elle rend compte des usages effectifs et peut être croisée avec les données météorologiques. Connaître ces parcours est essentiel pour évaluer le pouvoir d'attraction du dispositif sur les passants. La provenance des citoyens qui abordent le dispositif permet de savoir si leur parcours les amène de zones particulièrement chaudes (un trottoir exposé qu'il est difficile d'éviter par exemple) ou au contraire de zones plus confortables. L'arrivée sur le point frais n'aura évidemment pas le même effet suivant les cas.

### **2.2.2 Observation passive des comportements**

L'observation comportementale de l'espace public est une méthode de recherche qualitative visant à caractériser les interactions des individus avec leur environnement urbain ou avec d'autres individus. Parmi plusieurs techniques d'enquête spécifiques pour cette méthode, nous avons choisi de nous concentrer sur l'enregistrement de séquences vidéo et les prises de vue des actions (Aiello et al., 2016 ; Aventin, 2006 ; Monnet, 2014). Le rapport entre ces méthodes et la question de la perception thermique se fait ici à partir de l'hypothèse du confort adaptatif (Nicol et al., 2012). Nous supposons que les choix individuels des citoyens dans l'espace public, déclenchés par de nombreux aspects non maîtrisables, visent in fine à améliorer la situation initiale. En caractérisant les actions et interactions lorsqu'il fait chaud dans un espace qui propose une solution de rafraîchissement, des chercheurs comme (Popovic, 2017) arrivent à mieux comprendre les liens entre l'espace public, la technique de rafraîchissement et la perception thermique. Ainsi, nous avons enregistré des séquences vidéo avec une caméra GoPro (discrète, mais pas cachée). Ces séquences sont ensuite traitées à l'aide du logiciel de recherche qualitative MaxQDA© selon un processus de codage in vivo.

## **2.3 Analyse des données**

### **2.3.1 Analyse des données climatiques**

Les outils qui ont été développés spécifiquement pour la lecture, la mise en forme, le traitement et l'exploration des données du projet Coolscapes ont été intégrés au plug-in t4gpd dans le double objectif d'une facilitation du déploiement et d'une mutualisation des efforts de maintenance. Ils consistent plus précisément en :

- Un ensemble d'outils de lecture des données de mesure. Ces outils permettent principalement de convertir les csv hétérogènes issus des stations de mesures climatiques statiques et mobiles, des données inertielles et autres données telles celles de Météo France en un ensemble de DataFrame pandas. Ces conversions s'accompagnent d'un ensemble de traitements de conversion et d'alignement des données (notamment d'horodatage) mais aussi d'un ensemble de tests visant par exemple à garantir l'indispensable croissance monotone de l'horodatage ;
- Une phase de recalage des données inertielles sur une trace théorique en intégrant les contraintes d'un ensemble de jalons (i.e. points de passage obligés),
- Une phase de jointure temporelle (au plus proche voisin) permettant d'associer, à toute position issue du recalage des données inertielles, un ensemble de mesures climatiques mobiles,
- Une phase de calcul des indices du confort thermique (Tmrt, PET, UTCI, etc.),

- La production d'un ensemble de planches graphiques présentant une cartographie thématique du cheminement dans son contexte aux côtés d'un ensemble de chroniques de mesures (ou d'indicateurs dérivés) en fonction du temps.

La douzaine de classes python embarquées dans le plug-in t4gpd et développées spécifiquement dans le cadre du projet Coolscapes représente un peu plus de 600 lignes d'instructions. Pour en faciliter l'utilisation, ce développement a été encapsulé dans un serveur d'application web (technologie Flask) dédié exclusivement à la mise en forme des données de mesure.

### **2.3.2 Analyse des données ethnographiques**

L'analyse des données obtenues par l'observation ethnographique a été réalisée en deux étapes. Dans un premier temps, elles sont traitées séparément selon des techniques statistiques afin d'éclaircir, pour chaque méthode, les phénomènes récurrents et les singularités significatives. Deuxièmement, une approche visuelle présente des données interdisciplinaires dans une représentation unique permettant des interprétations plus riches de leur rôle dans l'expérience de l'espace.

Les analyses statistiques ont été conduites à l'aide de R statistics®, notamment selon les techniques d'Analyse des composantes principales (ACP), de corrélation par paires et de matrice de corrélations. L'objectif était de comprendre les liens entre les variables indépendantes. Ceci nous a permis de sélectionner les variables les plus influentes pour réaliser une analyse spatiale à l'aide de techniques SIG, dont l'objectif était de clarifier les facteurs spatiaux dans la distribution des données, notamment en lien aux potentielles sources de fraîcheur. Les deux jeux de données ethnographiques (observations d'usages et observations de comportements) ont fait l'objet de ce traitement.

Les interactions entre les citoyens et leur environnement ont aussi fait l'objet d'une analyse graphique sur la base d'une représentation de type transect urbain. Le transect est utilisé ici comme un protocole exploratoire basé sur une coupe urbaine qui superpose des couches de données spatiales, microclimatiques et sociales à travers des séquences de l'espace étudié. La coupe encourage une perspective centrée sur l'humain en lien avec les formes urbaines et les dispositifs spatiaux. Elle peut également exprimer une diversité de phénomènes invisibles qui façonnent l'expérience thermique du citoyen. Compte tenu de la quantité de données acquises, l'analyse préalable a contribué à un filtrage des informations affichées et à une sélection des scènes de rafraîchissement récurrentes ou singulières. Ces informations sont tirées notamment d'une analyse des dimensions de l'ACP et des variables corrélées (pour obtenir les variables significatives à représenter), ainsi que de l'analyse du poids de contribution de chaque observation à l'ACP (pour obtenir les scènes significatives).

## 3 Quai des plantes (Nantes, 2020)

### 3.1 Présentation du site

La zone d'étude, appelée « Quai des Plantes », est située sur le Quai de la Fosse au bord de la Loire dans la ville de Nantes. Il représente une installation éphémère de 500 m sur un ancien parking depuis l'été 2017, offrant une pépinière, une promenade verte et un lieu de rassemblement, de loisirs et de festivités. Ce site est un emblème de « transition », car il renoue avec sa vocation historique de végétaux transitant par les navires des colonies vers le jardin des apothicaires français. Aujourd'hui, 1500 arbres en pot constituent le cœur perpétuel du site, avant d'être plantés dans les parcs et jardins publics de la ville environnante. Le caractère transitoire se reflète également dans la volonté de transformer durablement les quais de la Loire en une promenade verte entre le centre-ville et le « Bas Chantenay ».

Ce site public est particulièrement intéressant, car il permet des usages variés. Il offre différentes possibilités d'assise et de parcours. Les assises, principalement des bancs, présentent une variété de situations en termes de posture (position du corps, orientation, abri), de socialisation (individuelle, couple, groupe) et de matérialité elle-même (pierre, bois, etc.). Le parcours proposé à travers ce dispositif représente une succession de plantes hautes et basses ainsi que d'ombrage naturel et artificiel. En parallèle, le dispositif peut être parcouru en bord de Loire par « l'extérieur » de manière exposée (soleil, vent). Les piétons peuvent changer entre ces deux possibilités comme les deux communiquent le long du site. Basé sur la végétalisation de l'espace urbain, le site change avec les saisons influençant son microclimat. En été, la canopée des arbres constitue un abri contre le rayonnement solaire direct et le vent. Toutes les plantes sont arrosées quotidiennement créant une source supplémentaire de refroidissement par évapotranspiration. Un système d'arrosage d'appoint par brumisation est également installé aux carrés de vivaces, ce qui permet ponctuellement une humidification des plantes basses par le haut.



Figure 2: Quai des plantes, Nantes (<https://jardins.nantes.fr/N/Accueil/Quai-des-plante>, consultée en août 2020)

### 3.2 Description des zones d'étude

Quatre parcours de mesures différents ont été identifiés sur ce site, prenant en compte une variété de situations d'assise et de traversée du dispositif :

1. Parcours 1 : Ce parcours est situé au milieu du quai de plantes au niveau des carrés de vivaces et comprend neuf points d'arrêt. Il se déroule le long d'un ensemble de bancs

en bois orientés sud, exposés au soleil et au vent toute la journée, suivi par un passage ombragé naturellement par des arbres et mi-ombragé de manière artificielle par le carré de vivaces. Il prend fin sur le quai face à la Loire au niveau du banc en pierre. Il compte 19 points d'arrêt au total.

2. Parcours 2 : Ce parcours débute face à la Loire au point d'arrivée du parcours 1. Il suit la piste cyclable et traverse l'espace dédié à la buvette « 40 Pieds ». Par la suite, il traverse un carré d'arbres avant de longer une série de bancs différents (positions et matériaux) orientés sud vers la Loire. Ce parcours comprend 11 points d'arrêt et se termine devant l'entrée du Maillé Brézé.
3. Parcours 3 : Ce parcours représente une partie de la traversée interne du dispositif dans sa longueur. Il débute au point de départ du parcours 1 et comprend un passage linéaire mi-ombragé à travers les carrés des vivaces suivi par un passage linéaire et ombragé par une allée d'arbres. Il comprend quatre points d'arrêt et se termine à un carrefour de deux pistes cyclables.
4. Parcours 4 : Ce parcours représente le retour du parcours 3, mais à l'extérieur du dispositif, exposé au soleil et au vent. Son point de départ et son point d'arrivée sont donc inversés par rapport au parcours 3. Il comprend deux points d'arrêt.

Table 2: Synthèse des jours de mesures représentant les parcours effectués en fonction de la date et de l'heure de début de mesures.

	18/05	19/05	25/05	26/05	28/05	02/06	25/06	08/07	09/07
<b>11h20</b>	1,2	1,2	1,2,3,4	1,2,3,4	1,2,3,4	1,2,3,4	1,2,3,4	1,2,3,4	1,2,3,4
<b>12h40</b>	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
<b>14h05</b>	3,4,1,2	3,4,1,2	3,4,1,2	3,4,1,2	3,4,1,2	3,4,1,2	3,4,1,2	3,4,1,2	3,4,1,2
<b>15h40</b>	3,4,1,2	3,4,1,2	3,4,1,2	3,4,1,2	3,4,1,2	3,4,1,2	3,4,1,2	3,4,1,2	3,4,1,2
<b>17h10</b>				1,2		1,2		1,2	



Figure 3: Emplacement du parcours 1 sur le quai des plantes, étoile bleue = point de départ, étoile rouge = point d'arrivée, points jaunes = points d'arrêt



Figure 4: Emplacement du parcours 2 sur le quai des plantes, étoile bleue = point de départ, étoile rouge = point d'arrivée, points jaunes = points d'arrêt



Figure 5: Emplacement du parcours 3 sur le quai des plantes, étoile bleue = point de départ, étoile rouge = point d'arrivée, points jaunes = points d'arrêt



Figure 6: Emplacement du parcours 4 sur le quai des plantes, étoile bleue = point de départ, étoile rouge = point d'arrivée, points jaunes = points d'arrêt

### 3.3 Synthèse détaillée des campagnes d'enquête

#### 3.3.1 Météorologie climatique mobile

Table 3: Synthèse détaillée des parcours de mesures réalisés. Date de la mesure (date), numéro de parcours (p), heure de début (heure), distance du parcours (dist), durée du parcours (temp), nombre de mesures (nb mes), ainsi que valeurs moyens de la température de l'air (Tair), humidité relative (Rh), vitesse de vent (Ws) et rayonnement onde courte provenant du ciel (SWR). Le parcours 3 étant un serie discontinue de points dans l'espace, les valeurs moyennes n'ont pas été calculées.

date	parcours	heure	dist	temp	nb mes	Tair	Rh	Ws	SWR
2020-05-18	1	11:38:42	157.9	804 secs	403	20.1	35.9	0.9	740.7
2020-05-18	2	11:54:36	245.7	1060 secs	531	20.3	37.4	0.8	689.6
2020-05-18	1	13:13:16	156.3	796 secs	399	22.0	34.2	1.0	874.6
2020-05-18	2	13:28:24	246.7	1076 secs	539	22.2	35.0	1.1	818.5
2020-05-18	3	14:40:16	139.9	532 secs	267	23.2	32.5	1.2	613.7
2020-05-18	4	14:51:12	128.1	346 secs	174	23.6	30.6	1.4	927.3
2020-05-18	1	15:16:14	157.3	658 secs	330	23.5	32.0	1.0	743.3
2020-05-18	2	15:27:56	246.7	806 secs	404	23.5	32.3	1.1	811.5
2020-05-18	3	16:01:48	139.6	390 secs	196	24.2	30.7	1.1	676.0
2020-05-18	4	16:08:52	127.9	316 secs	159	24.0	31.9	1.0	742.2
2020-05-18	1	16:15:24	157.5	534 secs	268	24.3	31.3	0.9	768.9
2020-05-18	2	16:24:56	246.8	746 secs	374	24.0	30.9	1.4	723.1
2020-05-19	1	11:20:20	157.3	764 secs	383	21.1	31.7	1.1	695.9
2020-05-19	2	11:33:50	246.7	930 secs	466	21.2	29.5	0.9	653.2
2020-05-19	1	12:39:54	156.2	680 secs	341	23.0	33.3	1.0	778.8
2020-05-19	2	12:52:18	246.7	864 secs	433	22.6	34.9	0.9	772.3
2020-05-19	1	14:06:50	157.5	640 secs	321	24.0	31.1	1.2	879.4
2020-05-19	2	14:18:48	246.7	872 secs	437	24.1	30.3	0.9	834.6
2020-05-19	3	14:36:26	139.9	480 secs	241	24.4	30.6	1.1	701.4
2020-05-19	4	14:45:06	129.2	392 secs	197	24.1	29.9	1.0	884.0
2020-05-25	1	11:20:10	157.5	778 secs	390	19.8	52.7	1.5	696.2
2020-05-25	2	11:33:58	245.8	1084 secs	543	20.0	51.8	1.7	683.5
2020-05-25	3	11:55:16	138.9	526 secs	264	20.2	49.8	1.7	578.3
2020-05-25	4	12:04:38	128.2	426 secs	214	20.5	47.3	1.9	795.5
2020-05-25	1	12:40:14	157.3	736 secs	369	21.7	42.8	1.9	840.1
2020-05-25	2	12:53:10	246.6	1020 secs	511	21.7	41.2	2.0	803.9
2020-05-25	3	14:06:10	139.9	516 secs	259	22.8	40.2	1.9	686.5
2020-05-25	4	14:15:30	129.1	478 secs	240	22.7	40.7	2.1	917.9
2020-05-25	1	14:24:30	157.3	690 secs	346	23.1	39.9	2.1	892.4
2020-05-25	2	14:36:42	246.7	916 secs	459	23.0	41.0	2.1	843.5
2020-05-25	3	15:40:12	139.9	544 secs	273	23.8	38.8	1.9	638.4
2020-05-25	4	15:50:02	129.3	474 secs	238	24.1	37.1	2.0	835.8
2020-05-25	1	15:58:34	157.5	666 secs	334	24.0	37.2	2.2	775.6
2020-05-25	2	16:10:18	246.8	880 secs	441	24.2	37.6	1.8	697.1
2020-05-26	1	11:20:10	157.3	718 secs	360	23.1	42.7	2.1	631.5
2020-05-26	2	11:32:48	246.7	968 secs	485	22.9	42.8	2.0	662.5
2020-05-26	3	11:55:22	140.2	436 secs	219	23.2	40.8	1.9	585.6
2020-05-26	4	12:03:12	129.0	374 secs	188	23.5	39.9	2.2	795.4
2020-05-26	1	12:40:10	157.5	714 secs	358	24.2	37.4	2.2	853.5
2020-05-26	2	12:53:10	245.7	878 secs	440	24.1	37.7	2.4	794.0
2020-05-26	3	14:06:08	139.9	468 secs	235	25.2	33.9	2.1	696.7
2020-05-26	4	14:14:36	129.1	380 secs	191	25.2	33.4	2.5	891.5
2020-05-26	1	14:22:16	157.5	684 secs	343	25.1	34.0	2.4	892.8
2020-05-26	2	14:34:26	246.8	872 secs	437	25.4	32.7	2.3	810.6
2020-05-26	3	15:41:04	138.7	430 secs	216	26.1	31.9	2.1	679.4

date	parcours	heure	dist	temp	nb mes	Tair	Rh	Ws	SWR
2020-05-26	4	15:48:56	128.3	372 secs	187	26.5	31.8	2.2	818.8
2020-05-26	1	15:55:54	157.3	608 secs	305	26.5	31.5	2.2	817.4
2020-05-26	2	16:06:46	246.8	858 secs	430	26.3	32.1	2.2	708.0
2020-05-26	1	17:10:06	157.3	660 secs	331	26.7	30.6	2.2	643.0
2020-05-26	2	17:21:48	246.8	820 secs	411	26.8	30.0	2.2	563.9
2020-05-28	1	11:20:10	157.3	682 secs	342	22.1	49.9	1.9	690.5
2020-05-28	2	11:32:06	245.6	958 secs	480	22.3	50.5	2.0	658.6
2020-05-28	3	11:50:46	140.1	542 secs	272	23.0	48.0	1.8	566.7
2020-05-28	4	12:00:26	129.2	462 secs	232	23.3	46.4	2.2	810.1
2020-05-28	1	12:47:10	157.5	704 secs	353	24.1	46.0	2.2	823.6
2020-05-28	2	12:59:30	246.8	980 secs	491	24.4	44.6	2.6	786.7
2020-05-28	3	14:06:06	140.1	526 secs	264	25.3	41.0	2.0	672.2
2020-05-28	4	14:15:58	128.3	468 secs	235	25.9	39.0	2.4	933.6
2020-05-28	1	14:24:48	157.6	692 secs	347	25.8	39.5	2.3	855.3
2020-05-28	2	14:36:56	245.8	982 secs	492	25.9	37.9	2.5	802.3
2020-05-28	3	15:40:06	138.9	570 secs	286	26.7	37.2	1.6	691.0
2020-05-28	4	15:50:12	129.2	458 secs	230	26.7	38.0	2.3	808.7
2020-05-28	1	15:58:34	157.6	760 secs	381	26.7	37.4	1.8	785.9
2020-05-28	2	16:11:50	246.9	1020 secs	511	26.9	37.0	1.8	667.5
2020-06-02	1	11:20:22	156.4	732 secs	367	25.8	37.8	1.0	707.5
2020-06-02	2	11:33:06	245.9	972 secs	487	25.9	37.3	1.6	662.2
2020-06-02	3	11:51:42	140.1	542 secs	272	26.0	35.9	1.5	547.5
2020-06-02	4	12:01:18	128.4	434 secs	218	26.3	34.2	2.0	804.8
2020-06-02	1	12:45:24	157.5	638 secs	320	27.1	33.7	1.6	859.7
2020-06-02	2	12:56:28	246.7	910 secs	456	27.0	35.0	1.5	796.8
2020-06-02	3	14:05:16	140.1	500 secs	251	28.2	32.8	1.0	690.5
2020-06-02	4	14:13:58	129.1	390 secs	196	28.2	31.5	1.3	862.5
2020-06-02	1	14:21:00	157.5	598 secs	300	28.7	29.6	1.1	890.6
2020-06-02	2	14:31:24	245.6	802 secs	402	28.4	29.2	1.1	844.6
2020-06-02	3	15:40:06	138.9	452 secs	227	28.6	30.0	1.3	240.2
2020-06-02	4	15:48:06	129.0	350 secs	176	28.5	31.2	1.5	814.0
2020-06-02	1	15:54:26	157.5	630 secs	316	28.6	29.7	1.1	397.9
2020-06-02	2	16:05:14	245.8	826 secs	414	28.7	30.0	1.1	445.1
2020-06-02	1	17:10:06	157.5	628 secs	315	29.3	28.7	1.7	546.1
2020-06-02	2	17:21:18	246.8	936 secs	469	29.0	28.7	1.1	490.9
2020-06-25	1	11:23:18	157.7	854 secs	428	28.3	52.4	1.7	661.2
2020-06-25	2	11:38:20	246.4	988 secs	495	28.6	51.2	1.2	655.4
2020-06-25	3	11:58:06	140.2	498 secs	250	29.1	47.9	1.0	520.6
2020-06-25	4	12:07:06	129.3	394 secs	198	28.5	47.3	3.1	442.7
2020-06-25	1	12:45:18	157.7	654 secs	328	28.9	41.0	2.6	844.0
2020-06-25	2	12:57:00	246.5	854 secs	428	28.9	44.3	2.0	746.8
2020-06-25	3	14:05:36	138.9	498 secs	250	29.2	44.8	0.8	605.0
2020-06-25	4	14:14:34	129.2	354 secs	178	28.6	49.6	1.8	908.0
2020-06-25	1	14:21:10	156.5	548 secs	275	28.5	48.3	1.9	793.1
2020-06-25	2	14:31:02	246.3	848 secs	425	29.4	44.5	1.9	764.7
2020-06-25	3	15:40:10	140.2	460 secs	231	27.9	47.8	1.1	533.2
2020-06-25	4	15:48:06	128.3	394 secs	198	27.7	46.9	2.0	872.1
2020-06-25	1	15:55:16	157.7	608 secs	305	27.7	44.9	2.0	816.9
2020-06-25	2	16:06:28	245.6	796 secs	399	28.4	44.6	1.2	716.6
2020-07-08	1	11:26:12	157.7	956 secs	479	22.7	47.1	0.7	717.7
2020-07-08	2	11:42:52	245.6	1106 secs	554	23.3	44.5	0.9	679.4
2020-07-08	3	12:03:34	139.5	550 secs	276	23.3	44.4	0.9	532.4
2020-07-08	4	12:13:10	129.2	388 secs	195	23.3	44.5	0.8	869.0
2020-07-08	1	12:44:50	157.7	732 secs	367	24.7	44.6	1.1	817.1
2020-07-08	2	12:58:02	246.6	998 secs	500	24.9	44.1	0.9	759.9
2020-07-08	3	14:05:22	139.4	570 secs	286	25.5	45.8	0.8	620.9

date	parcours	heure	dist	temp	nb mes	Tair	Rh	Ws	SWR
2020-07-08	4	14:16:00	128.3	422 secs	212	26.2	43.1	1.2	941.6
2020-07-08	1	14:24:06	156.7	784 secs	393	26.0	43.3	1.3	869.9
2020-07-08	2	14:37:40	246.6	934 secs	468	26.4	42.9	1.0	786.9
2020-07-08	3	15:40:06	140.5	514 secs	258	27.4	42.4	1.1	662.1
2020-07-08	4	15:50:16	128.1	388 secs	195	27.1	43.8	0.9	879.3
2020-07-08	1	15:57:20	156.7	652 secs	327	27.4	43.2	0.9	698.2
2020-07-08	2	16:08:44	246.5	916 secs	459	27.0	46.0	0.9	656.0
2020-07-08	1	17:10:18	156.6	654 secs	328	27.4	46.5	1.1	289.5
2020-07-08	2	17:21:36	246.6	890 secs	446	27.4	46.8	1.0	392.1
2020-07-09	1	11:22:28	157.7	748 secs	375	23.8	66.3	1.6	676.7
2020-07-09	2	11:35:30	246.6	966 secs	484	24.7	60.9	1.3	667.7
2020-07-09	3	11:53:40	140.5	464 secs	233	25.3	59.4	1.0	501.7
2020-07-09	4	12:01:52	129.1	352 secs	177	25.0	60.8	1.9	852.2
2020-07-09	1	12:40:08	157.7	682 secs	342	25.5	47.9	2.1	818.9
2020-07-09	2	12:51:52	245.3	860 secs	431	26.1	47.3	1.6	785.7
2020-07-09	3	14:05:22	140.5	480 secs	241	26.4	50.1	1.2	640.7
2020-07-09	4	14:13:40	129.1	368 secs	185	26.1	46.3	2.4	945.1
2020-07-09	1	14:20:24	156.5	608 secs	305	26.3	45.6	2.2	859.5
2020-07-09	2	14:31:08	246.5	830 secs	416	26.3	46.3	1.7	790.2
2020-07-09	3	15:40:04	140.5	482 secs	242	26.5	47.4	1.5	529.1
2020-07-09	4	15:48:34	128.0	408 secs	205	26.0	47.5	3.1	864.4
2020-07-09	1	15:55:40	157.6	656 secs	329	26.0	46.2	2.6	768.4
2020-07-09	2	16:07:12	245.3	992 secs	497	26.3	46.2	1.6	694.8

### 3.3.2 Observation d'usages et de comportements

Table 4: Synthèse détaillée des observations passives réalisées. Date de la campagne (date), numéro d'observation de la journée (n), heure de début (heure), nombre de situations statiques (nb sta), nombre de personnes en situation statique (nbp sta), nombre de situations dynamiques (nb dyn) et nombre de personnes en situation dynamique (nbp dyn).

date	n	heure	nb sta	nbp sta	nb dyn	nbp dyn
2020-05-25	1	11:26:33	4	5	11	16
2020-05-25	2	12:47:56	16	37	1	1
2020-05-25	3	13:41:56	11	25	8	14
2020-05-25	4	14:41:58	8	16	6	9
2020-05-25	5	15:37:55	9	14	9	13
2020-05-25	6	16:42:38	8	15	6	10
2020-05-26	1	NA	NA	NA	NA	NA
2020-05-26	2	NA	NA	NA	NA	NA
2020-05-26	3	NA	NA	NA	NA	NA
2020-05-26	4	14:39:57	7	17	9	14
2020-05-26	5	15:37:29	6	18	15	27
2020-05-26	6	16:47:03	10	21	11	22
2020-05-28	1	11:26:09	6	10	10	22
2020-05-28	2	12:55:17	14	30	8	10
2020-05-28	3	13:47:36	10	29	5	7
2020-05-28	4	14:34:15	5	8	5	5
2020-05-28	5	15:41:01	9	15	4	6
2020-05-28	6	16:31:33	9	16	15	33
2020-06-02	1	11:33:36	4	8	10	10
2020-06-02	2	12:45:11	13	36	7	10
2020-06-02	3	13:43:24	8	26	8	16
2020-06-02	4	14:35:46	3	4	11	18
2020-06-02	5	15:30:31	10	19	9	14
2020-06-02	6	16:46:28	7	31	12	15
2020-06-05	1	11:43:59	2	2	3	3
2020-06-05	2	NA	NA	NA	NA	NA
2020-06-05	3	NA	NA	NA	NA	NA
2020-06-05	4	NA	NA	NA	NA	NA
2020-06-05	5	15:38:22	8	20	14	22
2020-06-05	6	16:33:38	11	17	20	31
2020-06-25	1	11:37:32	2	7	11	18
2020-06-25	2	12:50:26	11	27	11	20
2020-06-25	3	13:37:10	6	12	6	10
2020-06-25	4	NA	NA	NA	NA	NA
2020-06-25	5	NA	NA	NA	NA	NA
2020-06-25	6	NA	NA	NA	NA	NA
2020-07-08	1	12:01:48	1	1	10	21
2020-07-08	2	12:53:15	14	34	9	16
2020-07-08	3	13:47:55	4	19	11	28
2020-07-08	4	14:38:39	5	9	7	13
2020-07-08	5	15:39:39	3	13	13	40
2020-07-08	6	16:38:05	11	17	14	31
2020-07-09	1	11:48:33	1	1	16	43
2020-07-09	2	12:36:26	14	43	12	30
2020-07-09	3	13:34:52	6	30	13	30
2020-07-09	4	14:41:53	2	4	11	23
2020-07-09	5	15:35:24	4	13	18	44
2020-07-09	6	16:30:01	3	7	13	34

## 4 Jardin extraordinaire Carrière Misery (Nantes, 2020)

### 4.1 Présentation du site

Le jardin extraordinaire a été installé sur une partie de l'ancienne carrière de granit Misery à Chantenay. Cet aménagement fait partie d'un ensemble de travaux d'aménagement du Bas Chantenay. Ouvert depuis début octobre 2019, il représente la première étape parmi d'autres projets d'aménagement, comme une promenade verte le long de la Loire entre le quai des plantes et le Bas Chantenay, ou la réhabilitation de l'immeuble CAP44, situé entre la carrière et la Loire et classé grâce à sa structure en béton armé. Il a été conçu par l'agence de paysagisme Phytolab.

Le Jardin extraordinaire est exposé plein sud et enclavé dans des falaises d'une hauteur de 25 m. Cette configuration offre une protection contre les vents froids et permet de stocker la chaleur pendant la journée ce qui assure des températures nocturnes supérieures de 4 °C par rapport aux alentours. De plus, trois cascades tombant des falaises et des buses de brumisation, installées sur le dessous du pont au pied des cascades, assurent une hygrométrie élevée aux alentours. Ainsi, la configuration naturelle et l'aménagement particulier favorisent un microclimat propice aux nombreuses espèces exotiques (fougères, bananiers, papyrus, lotus, figuiers, etc.) faisant référence aux « Voyages Extraordinaires » de Jules Verne. Les cascades sont alimentées en circuit fermé par le bassin situé en contrebas et s'activent de façon discontinue suivant des cycles pré-programmés. La brumisation au niveau du pont est programmée toutes les 10 minutes pour une durée d'environ 2 minutes.



Figure 7: Images du jardin extraordinaire.

### 4.2 Description des zones d'étude

Cinq parcours de mesures différents ont été identifiés dans le jardin extraordinaire, prenant en compte ses aménagements différents. Un parcours a été choisi à l'extérieur du jardin le long d'une route afin de pouvoir contraster les mesures du jardin avec les mesures d'un environnement très artificialisé. Les parcours de mesures sont arpentés toutes les heures et demie à partir de 11h20 pendant plusieurs jours. L'heure de départ de chaque séquence de mesures a été ajustée en fonction de la programmation des cascades et de la brumisation au niveau du pont, permettant différentes configurations de fonctionnement lors des passages :

1. Parcours 1 : Ce parcours commence à l'entrée principale du jardin et longe les falaises. Il passe d'abord par le pont situé au pied des cascades, suivi par un passage ombragé par des arbres. Il se termine par un passage exposé au soleil au nord du jardin, à l'intersection d'un autre chemin. Il comprend cinq points d'arrêt.

2. Parcours 2 : Ce parcours représente le retour du parcours 1 commençant par le point d'arrivée du premier parcours et se terminant par son point de départ. Cependant, il prend un autre chemin plus éloigné des falaises et passe par le deuxième pont plus loin des cascades et de la brumisation. Trois points d'arrêt sont enregistrés représentant respectivement le début, le milieu et la fin du pont.
3. Parcours 3 : Ce parcours est parallèle aux murs extérieurs du jardin sur un chemin en copeaux de bois et traverse une plantation de bambous avant de sortir par une entrée secondaire du jardin. Son point de départ est identique à celui du parcours 1 et se termine au portail d'entrée secondaire avec deux points d'arrêt.
4. Parcours 4 : Ce parcours commence au point d'arrivée du parcours 3 et longe les murs du jardin par l'extérieur sur la route. Il continue sur cette même route jusqu'à l'entrée du « parc des Oblates », située à côté du centre d'apiculture. Un point d'arrêt est enregistré sur ce parcours.
5. Parcours 5 : Ce parcours correspond au parcours 1, mais comprend une boucle en plus afin de pouvoir passer deux fois de suite par le pont situé au pied des cascades. Ainsi, cela permet de mesurer deux modes de fonctionnement différents : au premier passage l'ensemble de trois cascades et de brumisation du pont est actif, tandis qu'au deuxième passage uniquement les trois cascades sont en action. Il comprend 13 points d'arrêt avec les mêmes points de départ et d'arrivée que le parcours 1.

Table 5: Synthèse des jours de mesures représentant les parcours effectués en fonction de la date et de l'heure de début de mesures

	16/07	17/07	20/07	21/07	22/07	23/07	24/07
<b>11h20</b>	1,2,3,4	1,2,3,4	1,2,3,4	1,2,3,4	1,2,3,4	1,2,3,4	1,2,3,4
<b>12h40</b>	1,2,3,4	1,2,3,4	1,2,3,4	1,2,3,4	1,2,3,4	1,2,3,4	1,2,3,4
<b>14h07</b>	1,2,3,4	5,2,3,4	5,2,3,4	1,2,3,4	5,2,3,4	5,2,3,4	5,2,3,4
<b>15h37</b>	1,2,3,4	1,2,3,4	1,2,3,4	5,2,3,4	1,2,3,4	1,2,3,4	1,2,3,4
<b>17h08</b>		1,2,3,4		1,2,3,4	1,2,3,4		



Figure 8: Emplacement du parcours 1 au jardin extraordinaire, étoile bleue = point de départ, étoile rouge = point d'arrivée, points jaunes = points d'arrêt.



Figure 9: Emplacement du parcours 2 au jardin extraordinaire, étoile bleue = point de départ, étoile rouge = point d'arrivée, points jaunes = points d'arrêt.



Figure 10: Emplacement du parcours 3 au jardin extraordinaire, étoile bleue = point de départ, étoile rouge = point d'arrivée, points jaunes = points d'arrêt.



Figure 11: Emplacement du parcours 4 au jardin extraordinaire, étoile bleue = point de départ, étoile rouge = point d'arrivée, points jaunes = points d'arrêt.



Figure 12: Emplacement du parcours 5 au jardin extraordinaire, étoile bleue = point de départ, étoile rouge = point d'arrivée, points jaunes = points d'arrêt.

## 4.3 Détail des travaux de terrain réalisés

### 4.3.1 Métrologie climatique mobile

Table 6: Synthèse détaillée des parcours de mesures réalisés. Date de la mesure (date), numéro de parcours (p), heure de début (heure), distance du parcours (dist), durée du parcours (temp), nombre de mesures (nb mes), ainsi que valeurs moyennes de la température de l'air (Tair), humidité relative (Rh), vitesse de vent (Ws) et rayonnement onde courte provenant du ciel (SWR). Le parcours 3 étant un serie discontinue de points dans l'espace, les valeurs moyennes n'ont pas été calculées.

date	parcours	heure	dist	temp	nb mes	Tair	Rh	Ws	SWR
2020-07-16	1	11:24:48	145.9	658 secs	330	17.9	71.7	0.8	262.4
2020-07-16	2	11:36:18	99.4	366 secs	184	18.6	68.3	1.0	528.9
2020-07-16	3	11:43:30	116.4	386 secs	194	19.0	66.5	1.0	450.8
2020-07-16	4	11:50:26	293.4	746 secs	374	19.0	66.3	1.4	331.4
2020-07-16	1	12:40:22	144.9	646 secs	324	20.6	63.1	0.9	633.5
2020-07-16	2	12:51:32	98.3	496 secs	229	20.6	62.5	0.8	506.8
2020-07-16	3	13:00:22	116.4	336 secs	169	20.5	62.1	0.8	429.6
2020-07-16	4	13:06:58	295.6	754 secs	378	21.0	60.6	1.0	755.6
2020-07-16	1	14:07:08	144.8	580 secs	291	21.5	63.6	0.7	263.6
2020-07-16	2	14:17:12	99.4	340 secs	171	21.9	58.8	1.0	241.6
2020-07-16	3	14:23:16	116.5	376 secs	189	21.8	58.9	0.9	131.7
2020-07-16	4	14:29:56	293.7	724 secs	363	22.3	56.9	0.9	272.8
2020-07-16	1	15:39:30	145.8	524 secs	263	21.9	62.4	0.8	287.2
2020-07-16	2	15:48:54	99.4	390 secs	196	22.4	56.6	0.8	305.1
2020-07-16	3	15:55:52	116.4	332 secs	167	22.6	55.7	0.6	230.2
2020-07-16	4	16:01:50	295.6	736 secs	369	22.9	52.7	1.0	231.3
2020-07-17	1	11:20:06	145.0	852 secs	318	20.9	65.6	0.8	711.3
2020-07-17	2	11:38:54	99.3	290 secs	146	21.5	62.1	0.7	710.1
2020-07-17	3	11:44:12	116.4	344 secs	173	21.5	61.6	0.9	492.2
2020-07-17	4	11:50:18	295.6	664 secs	333	22.1	59.1	0.8	727.1
2020-07-17	1	12:39:18	145.0	526 secs	264	23.1	56.7	0.8	778.7
2020-07-17	2	12:48:26	98.4	350 secs	176	23.3	54.1	1.2	857.9
2020-07-17	3	12:54:50	116.4	296 secs	149	23.5	53.8	1.0	615.9

date	parcours	heure	dist	temp	nb mes	Tair	Rh	Ws	SWR
2020-07-17	4	13:00:14	293.7	814 secs	408	23.8	51.9	1.1	862.3
2020-07-17	5	14:07:06	136.1	458 secs	230	24.4	52.5	1.1	904.0
2020-07-17	1	14:14:46	145.8	544 secs	273	24.7	52.0	1.2	756.4
2020-07-17	2	14:24:14	98.4	304 secs	153	24.8	49.6	0.8	903.5
2020-07-17	3	14:29:46	115.1	338 secs	170	25.2	48.3	0.8	626.7
2020-07-17	4	14:35:54	295.6	708 secs	355	25.7	46.8	0.9	876.6
2020-07-17	1	15:37:32	145.0	502 secs	252	25.6	52.5	0.9	683.2
2020-07-17	2	15:46:08	99.4	328 secs	165	26.5	46.4	0.7	774.0
2020-07-17	3	15:52:06	116.4	338 secs	170	26.9	44.8	0.8	550.4
2020-07-17	4	15:59:04	293.7	688 secs	345	27.1	43.2	1.2	788.5
2020-07-17	1	17:08:04	144.9	478 secs	240	25.9	52.1	0.9	468.6
2020-07-17	2	17:16:20	98.3	300 secs	151	26.9	45.4	1.0	600.9
2020-07-17	3	17:22:26	116.4	406 secs	204	27.3	44.2	0.7	409.3
2020-07-17	4	17:29:44	293.7	824 secs	393	27.8	42.8	1.0	503.7
2020-07-20	1	11:20:18	145.1	668 secs	335	23.0	55.5	1.2	728.5
2020-07-20	2	11:31:46	99.4	322 secs	162	23.3	52.9	1.2	709.2
2020-07-20	3	11:37:54	115.1	362 secs	182	23.3	52.9	1.1	467.4
2020-07-20	4	11:44:08	293.7	662 secs	332	23.7	51.5	1.8	742.3
2020-07-20	1	12:40:10	145.1	524 secs	263	25.2	49.2	0.9	759.7
2020-07-20	2	12:49:16	98.4	384 secs	193	25.5	46.3	1.0	861.9
2020-07-20	3	12:56:46	116.4	388 secs	195	25.8	46.0	1.1	568.2
2020-07-20	4	13:04:00	293.7	764 secs	383	26.0	44.6	1.4	864.7
2020-07-20	5	14:07:08	136.2	484 secs	243	26.0	48.6	1.4	919.9
2020-07-20	1	14:15:14	145.0	522 secs	262	26.1	47.9	1.2	778.3
2020-07-20	2	14:24:30	99.4	362 secs	182	27.1	44.9	1.2	888.7
2020-07-20	3	14:31:16	116.4	328 secs	165	27.2	43.4	1.1	664.2
2020-07-20	4	14:37:06	293.7	700 secs	351	27.4	42.9	1.4	879.7
2020-07-20	1	15:37:08	146.0	554 secs	278	26.9	47.5	1.1	679.0
2020-07-20	2	15:46:46	99.4	388 secs	195	27.7	42.8	1.3	793.4
2020-07-20	3	15:53:46	115.1	404 secs	203	27.6	42.6	1.1	594.7
2020-07-20	4	16:00:50	295.6	752 secs	377	28.1	40.8	1.6	659.4
2020-07-21	1	11:20:16	145.1	596 secs	299	21.9	46.8	1.5	472.2
2020-07-21	2	11:30:38	98.3	358 secs	180	22.5	43.8	1.3	596.3
2020-07-21	3	11:37:14	115.1	392 secs	197	22.9	43.0	1.4	337.6
2020-07-21	4	11:44:00	293.7	796 secs	399	23.5	40.5	1.8	660.7
2020-07-21	1	12:40:06	145.1	534 secs	268	24.0	40.7	1.7	779.1
2020-07-21	2	12:49:28	99.4	392 secs	197	24.9	37.4	1.1	838.3
2020-07-21	3	12:56:32	116.4	376 secs	189	25.2	36.4	1.4	560.7
2020-07-21	4	13:04:06	295.6	754 secs	378	25.7	34.8	2.0	862.2
2020-07-21	1	14:07:06	145.0	614 secs	308	26.3	36.1	1.3	782.3
2020-07-21	2	14:17:44	98.5	360 secs	181	27.0	33.3	1.3	888.7
2020-07-21	3	14:25:00	115.1	362 secs	182	27.5	31.8	1.3	640.9
2020-07-21	4	14:31:18	295.6	740 secs	371	27.3	30.7	1.9	864.3
2020-07-21	5	15:37:08	136.4	506 secs	254	27.1	33.5	1.6	839.8
2020-07-21	1	15:45:36	145.1	610 secs	306	27.1	33.4	1.5	590.2
2020-07-21	2	15:56:00	98.4	328 secs	165	27.7	31.1	1.2	760.9
2020-07-21	3	16:02:00	116.4	438 secs	214	28.5	30.4	1.2	589.3
2020-07-21	4	16:09:36	293.7	706 secs	354	28.8	29.3	1.6	748.0
2020-07-21	1	17:08:00	145.9	516 secs	259	27.3	34.9	1.2	463.1
2020-07-21	2	17:17:02	99.5	360 secs	181	27.9	31.8	1.4	600.6
2020-07-21	3	17:23:50	116.4	384 secs	193	28.6	30.6	1.1	500.3
2020-07-21	4	17:30:28	293.7	722 secs	362	28.7	29.7	1.5	526.2
2020-07-22	1	11:20:12	146.0	644 secs	323	22.9	44.1	1.2	724.4
2020-07-22	2	11:31:20	98.4	390 secs	196	23.6	41.7	0.8	615.5
2020-07-22	3	11:38:26	116.4	318 secs	160	24.1	39.4	1.1	470.9
2020-07-22	4	11:43:54	295.6	698 secs	350	24.5	38.0	1.1	768.4

date	parcours	heure	dist	temp	nb mes	Tair	Rh	Ws	SWR
2020-07-22	1	12:40:08	145.1	552 secs	277	25.6	36.6	1.1	779.3
2020-07-22	2	12:49:40	99.5	352 secs	177	26.5	32.7	0.9	858.1
2020-07-22	3	12:55:58	116.4	330 secs	166	27.0	30.3	0.8	582.0
2020-07-22	4	13:02:22	295.6	720 secs	361	27.2	28.0	1.2	876.7
2020-07-22	5	14:07:14	135.4	530 secs	266	26.6	29.8	1.2	921.3
2020-07-22	1	14:16:06	145.8	468 secs	235	27.0	27.7	1.1	804.0
2020-07-22	2	14:24:18	98.3	326 secs	164	27.9	26.0	1.0	902.1
2020-07-22	3	14:30:10	116.4	286 secs	144	28.1	25.6	0.7	650.8
2020-07-22	4	14:35:16	295.6	650 secs	326	28.4	24.6	1.1	876.6
2020-07-22	1	15:37:10	145.0	592 secs	297	27.8	27.9	0.8	641.7
2020-07-22	2	15:47:26	98.4	356 secs	179	29.0	22.1	1.4	800.1
2020-07-22	3	15:54:38	116.4	392 secs	197	29.0	21.9	1.0	660.0
2020-07-22	4	16:01:20	293.7	684 secs	343	29.4	20.0	1.4	786.4
2020-07-22	1	17:07:12	145.9	604 secs	303	27.2	25.5	0.9	460.8
2020-07-22	2	17:17:26	99.4	318 secs	160	28.2	21.8	0.6	620.2
2020-07-22	3	17:23:10	116.4	306 secs	154	28.6	21.1	0.6	472.8
2020-07-22	4	17:28:44	293.7	758 secs	380	29.6	18.7	1.0	576.0
2020-07-23	1	11:20:12	145.1	542 secs	272	23.6	43.8	0.8	718.1
2020-07-23	2	11:29:52	99.5	368 secs	185	24.8	39.7	0.5	502.0
2020-07-23	3	11:36:28	115.1	328 secs	165	25.2	38.2	0.7	544.5
2020-07-23	4	11:42:18	295.6	670 secs	336	26.1	35.0	0.7	878.5
2020-07-23	1	12:40:04	145.1	556 secs	279	27.0	32.2	0.8	507.0
2020-07-23	2	12:49:42	99.4	344 secs	173	27.1	29.6	1.1	640.2
2020-07-23	3	12:55:56	116.4	320 secs	161	27.7	28.4	0.9	463.5
2020-07-23	4	13:01:28	293.7	744 secs	373	28.0	27.4	1.0	685.3
2020-07-23	5	14:07:52	136.4	412 secs	207	27.2	34.4	1.1	570.5
2020-07-23	1	14:14:46	145.0	492 secs	247	26.5	37.6	0.6	247.2
2020-07-23	2	14:23:38	98.4	304 secs	153	26.7	34.7	1.0	230.4
2020-07-23	3	14:29:20	116.4	294 secs	148	26.7	34.5	0.7	207.5
2020-07-23	4	14:34:44	293.7	686 secs	344	27.5	31.2	1.2	630.3
2020-07-23	1	15:37:06	146.0	588 secs	295	27.1	39.1	0.9	496.9
2020-07-23	2	15:47:08	99.4	328 secs	165	28.2	28.5	1.2	570.0
2020-07-23	3	15:53:06	115.2	374 secs	188	28.0	28.1	1.0	404.0
2020-07-23	4	15:59:34	293.7	778 secs	390	28.2	27.4	1.4	506.8
2020-07-24	1	11:20:44	146.0	588 secs	295	22.2	57.0	0.8	801.1
2020-07-24	2	11:30:52	99.4	384 secs	193	22.7	53.7	0.9	666.7
2020-07-24	3	11:37:50	116.4	310 secs	156	22.1	55.5	1.2	465.7
2020-07-24	4	11:43:12	295.6	690 secs	346	22.7	52.3	1.1	792.1
2020-07-24	1	12:40:30	146.0	624 secs	313	23.6	50.8	0.9	739.0
2020-07-24	2	12:51:14	98.4	396 secs	199	23.8	50.4	1.5	852.2
2020-07-24	3	12:58:18	116.4	568 secs	285	23.4	49.5	0.9	653.4
2020-07-24	4	13:08:06	293.7	704 secs	353	24.2	47.6	1.1	859.3
2020-07-24	5	14:07:06	135.4	480 secs	241	24.9	48.8	1.4	937.2
2020-07-24	1	14:15:08	145.9	564 secs	283	24.9	49.0	1.1	773.8
2020-07-24	2	14:24:50	99.4	304 secs	153	25.0	46.2	1.3	934.9
2020-07-24	3	14:30:54	115.2	306 secs	154	25.0	44.5	1.0	688.8
2020-07-24	4	14:36:20	293.7	682 secs	342	25.6	43.2	1.2	922.0
2020-07-24	1	15:37:42	145.1	508 secs	255	25.3	48.8	1.1	656.8
2020-07-24	2	15:46:56	99.4	316 secs	159	25.5	45.6	1.0	926.7
2020-07-24	3	15:52:46	115.1	494 secs	248	25.6	45.7	0.9	461.5
2020-07-24	4	16:01:16	295.6	822 secs	402	26.1	44.6	1.5	877.0

### 4.3.2 Observation d'usages et de comportements

Table 7: Synthèse détaillée des observations passives réalisées. Date de la campagne (date), numéro d'observation de la journée (n), heure de début (heure), nombre de situations statiques (nb sta), nombre de personnes en situation statique (nbp sta), nombre de situations dynamiques (nb dyn) et nombre de personnes en situation dynamique (nbp dyn).

date	n	heure	nb sta	nbp sta	nb dyn	nbp dyn
2020-07-16	1	11:39:18	6	28	3	17
2020-07-16	2	12:49:50	6	20	4	12
2020-07-16	3	13:39:21	6	19	8	28
2020-07-16	4	14:32:47	9	22	6	13
2020-07-16	5	15:30:13	10	27	10	31
2020-07-16	6	NA	NA	NA	NA	NA
2020-07-17	1	11:31:33	6	17	5	20
2020-07-17	2	12:33:48	9	29	6	18
2020-07-17	3	13:32:19	11	45	7	23
2020-07-17	4	14:31:02	11	28	7	21
2020-07-17	5	15:38:34	17	50	14	43
2020-07-17	6	16:30:19	11	38	6	25
2020-07-17	7	17:30:05	NA	NA	NA	NA
2020-07-20	1	11:32:09	6	14	8	24
2020-07-20	2	12:44:13	11	27	7	24
2020-07-20	3	13:32:00	9	19	9	22
2020-07-20	4	14:30:48	5	18	3	10
2020-07-20	5	15:31:12	11	49	10	42
2020-07-20	6	NA	NA	NA	NA	NA
2020-07-21	1	11:32:55	0	0	5	25
2020-07-21	2	12:43:06	5	10	9	22
2020-07-21	3	14:30:18	10	28	5	18
2020-07-21	4	15:33:42	9	48	7	26
2020-07-21	5	16:30:50	6	32	7	21
2020-07-21	6	17:30:25	2	6	8	30
2020-07-22	1	11:17:15	6	13	9	26
2020-07-22	2	12:36:33	12	33	12	46
2020-07-22	3	13:33:54	7	16	9	48
2020-07-22	4	14:33:02	3	35	6	15
2020-07-22	5	15:37:16	14	51	7	22
2020-07-22	6	16:30:38	17	60	17	66
2020-07-23	1	11:32:26	7	18	9	38
2020-07-23	2	12:31:18	16	75	9	42
2020-07-23	3	13:36:25	6	22	5	17
2020-07-23	4	14:30:11	10	60	9	40
2020-07-23	5	15:35:21	12	71	8	32
2020-07-23	6	NA	NA	NA	NA	NA
2020-07-24	1	11:39:49	5	11	9	23
2020-07-24	2	12:30:05	12	38	13	45
2020-07-24	3	13:31:05	6	21		
2020-07-24	4	14:37:09	6	27	9	26
2020-07-24	5	15:35:08	9	52	17	63
2020-07-24	6	NA	NA	NA	NA	NA

## 5 Installation Rideau à Place Graslin (Nantes, 2020)

### 5.1 Présentation du site

Le « Rideau » fait partie des œuvres artistiques éphémères du Voyage à Nantes entre le 8 août et le 27 septembre 2020 (dates décalées du fait de la crise sanitaire Covid-19). Imaginé par Stéphane Thidet, le « Rideau » est une chute d'eau installée sur la façade du théâtre Graslin dans le centre de Nantes. Il s'écoule de manière continue entre 10 et 20 h. L'eau surgit d'une corniche au-dessus de la colonnade avant de tomber sur les marches du théâtre et de s'écouler dans un bassin installé sur la place Graslin. L'alimentation en eau de la chute est assurée par le bassin en circuit fermé. Cette installation impressionne le public par son emplacement dominant sur la place ainsi que par sa force physique. En effet, l'eau tombant sur les marches du théâtre permet d'immerger la place dans un ensemble de bruit, de vent et de brume.



Figure 13: Rideau, place Graslin, Nantes ((à gauche) <https://www.lemonde.fr/>, (à droite) <https://media.ouest-france.fr>, consultée en septembre 2020)

### 5.2 Description des zones d'étude

Trois parcours de mesures différents ont été identifiés sur la place Graslin devant le « Rideau ». Le choix des parcours repose sur l'interaction frontale du rideau avec la place Graslin et la proximité du dispositif avec le cours Cambronne, représentant un jardin typique urbain. Les parcours de mesures sont parcourus toutes les 1h30 à partir de 11h50 pendant plusieurs jours :

1. Parcours 1 : Ce parcours débute dans la rue Voltaire en dehors de la place Graslin. Il parcourt la place Graslin avec plusieurs allers-retours face au rideau, avant de se terminer dans la rue Molière sur le côté du dispositif. Il comprend 9 points d'arrêt.
2. Parcours 2 : Ce parcours débute au point d'arrivée du parcours 1 dans la rue Molière et traverse la place Graslin en diagonale vers la rue Piron, située au sud de la place. Il comprend 5 points d'arrêt et le point d'arrivée est situé devant l'entrée du cours Cambronne.
3. Parcours 3 : Contrairement aux parcours précédents, le parcours 3 se concentre uniquement sur le cours Cambronne. Son point de départ est devant l'entrée du cours et le traverse au milieu jusqu'à la statue. Par la suite il fait demi-tour afin de passer le long des arbres. Il comprend 5 points d'arrêt.

Table 8: Synthèse des jours de mesures représentant les parcours effectués en fonction de la date et de l'heure de début de mesures.

	03/09	09/09	11/09	14/09	16/09	18/09
<b>11h50</b>		1,2,3	1,2,3	1,2,3	1,2,3	1,2,3
<b>13h20</b>	1,2,3	1,2,3	1,2,3	1,2,3	1,2,3	1,2,3
<b>14h50</b>	1,2,3	1,2,3	1,2,3	1,2,3	1,2,3	1,2,3
<b>16h20</b>	1,2,3	1,2,3	1,2,3	1,2,3	1,2,3	1,2,3
<b>17h50</b>				1,2,3		

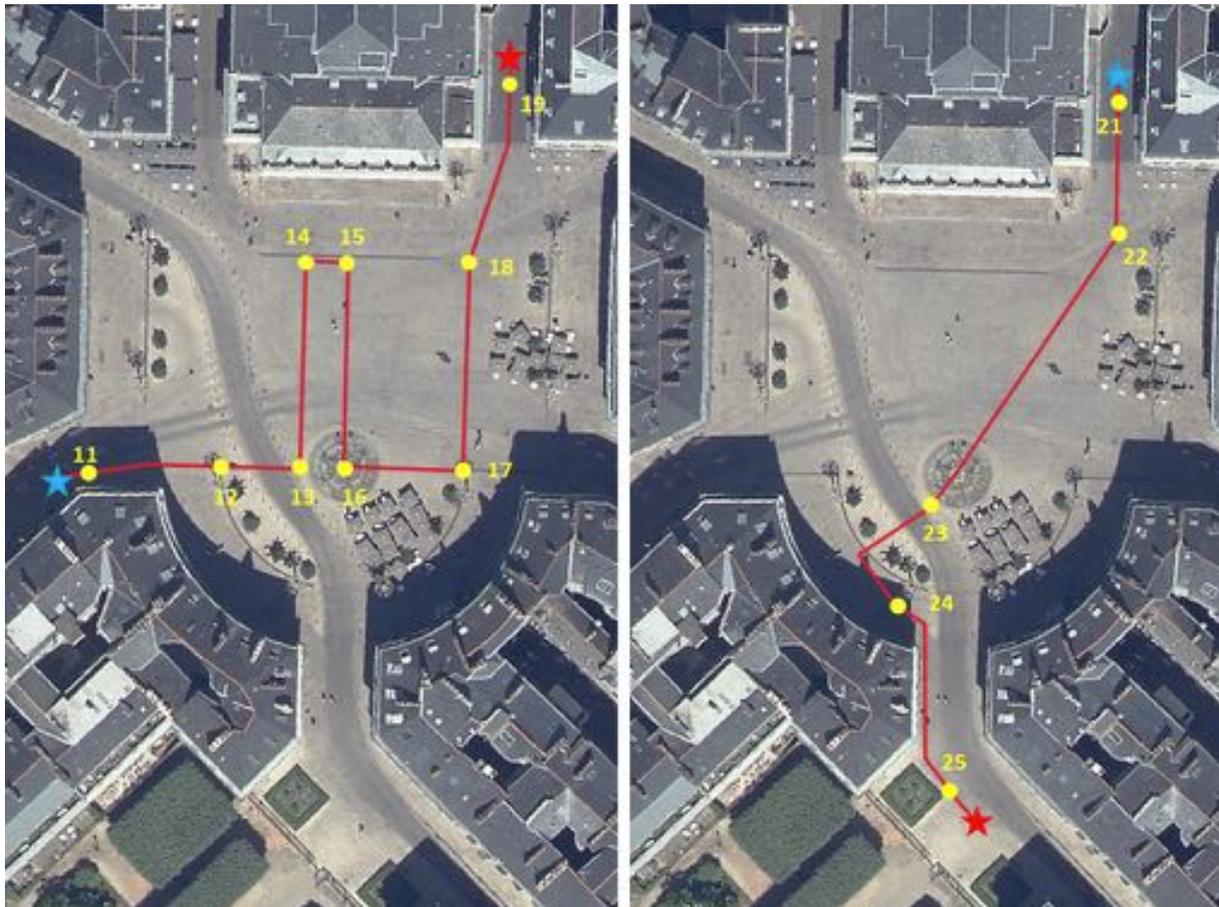


Figure 14: Emplacement du parcours 1 (à gauche) et du parcours 2 (à droite) au Rideau sur la place Graslin, étoile bleu = point de départ, étoile rouge = point d'arrivée, points jaunes = points d'arrêt.

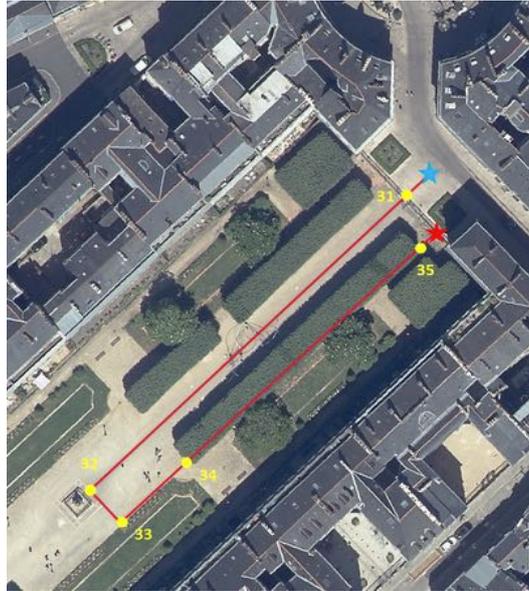


Figure 15: Emplacement du parcours 3 au Rideau sur la place Graslin, étoile bleu = point de départ, étoile rouge = point d'arrivée, points jaunes = points d'arrêt.

## 5.3 Détail des travaux de terrain réalisés

### 5.3.1 Métrologie climatique mobile

Table 9: Synthèse détaillée des parcours de mesures réalisés. Date de la mesure (date), numéro de parcours (p), heure de début (heure), distance du parcours (dist), durée du parcours (temp), nombre de mesures (nb mes), ainsi que valeurs moyennes de la température de l'air ( $T_{air}$ ), humidité relative (Rh), vitesse de vent ( $W_s$ ) et rayonnement onde courte provenant du ciel (SWR). Le parcours 3 étant un serie discontinue de points dans l'espace, les valeurs moyennes n'ont pas été calculées.

date	parcours	heure	dist	temp	nb mes	$T_{air}$	Rh	$W_s$	SWR
2020-09-04	1	13:20:26	162.7	552 secs	277	21.8	55.4	1.7	695.4
2020-09-04	2	13:30:44	117.4	362 secs	182	22.0	55.3	1.5	665.3
2020-09-04	3	13:38:24	195.2	754 secs	378	23.0	49.8	0.7	682.8
2020-09-04	1	14:50:06	161.8	594 secs	298	24.1	46.5	1.7	680.3
2020-09-04	2	15:00:40	117.4	424 secs	213	24.9	41.2	1.1	567.6
2020-09-04	3	15:10:26	195.2	904 secs	402	25.7	37.7	0.7	626.0
2020-09-04	1	16:20:10	162.7	574 secs	288	25.2	37.6	2.0	499.6
2020-09-04	2	16:30:10	116.1	402 secs	202	25.5	36.6	1.2	314.2
2020-09-04	3	16:37:12	196.0	642 secs	322	26.8	31.1	1.1	357.4
2020-09-09	1	11:50:24	161.8	692 secs	347	22.8	61.9	1.5	467.3
2020-09-09	2	12:02:30	117.4	484 secs	243	23.1	60.0	0.9	498.5
2020-09-09	3	12:10:56	195.1	738 secs	370	23.7	57.5	0.8	331.1
2020-09-09	1	13:20:16	161.8	604 secs	303	24.8	56.8	1.4	493.3
2020-09-09	2	13:30:46	116.1	512 secs	257	25.5	50.4	1.5	543.1
2020-09-09	3	13:40:06	195.1	612 secs	307	25.7	49.0	1.2	527.3
2020-09-09	1	14:50:06	161.8	566 secs	284	25.8	54.0	1.6	617.6
2020-09-09	2	15:00:14	117.4	362 secs	182	26.4	51.1	1.4	550.5
2020-09-09	3	15:06:44	195.9	714 secs	346	26.9	47.9	1.4	615.7
2020-09-09	1	16:19:12	162.7	544 secs	273	26.0	55.6	1.6	149.2
2020-09-09	2	16:28:42	117.4	354 secs	178	26.4	52.1	1.1	137.2
2020-09-09	3	16:35:04	195.9	650 secs	326	26.4	51.1	1.0	90.8

date	parcours	heure	dist	temp	nb mes	Tair	Rh	Ws	SWR
2020-09-11	1	11:52:36	162.7	584 secs	293	20.2	74.1	1.6	397.4
2020-09-11	2	12:02:48	115.8	494 secs	248	20.5	72.3	0.9	381.4
2020-09-11	3	12:11:32	195.9	696 secs	349	21.1	66.8	0.9	243.4
2020-09-11	1	13:20:04	162.7	642 secs	322	22.2	63.9	1.7	660.0
2020-09-11	2	13:31:10	116.1	646 secs	295	23.3	58.6	1.2	641.1
2020-09-11	3	13:42:20	195.9	756 secs	379	23.5	55.9	1.0	444.8
2020-09-11	1	14:50:20	162.7	692 secs	328	24.0	51.3	2.0	639.1
2020-09-11	2	15:02:12	117.4	418 secs	210	24.5	48.2	1.4	517.0
2020-09-11	3	15:09:52	196.0	634 secs	318	24.8	46.6	1.4	575.2
2020-09-11	1	16:20:12	162.7	580 secs	291	24.0	46.8	1.8	466.6
2020-09-11	2	16:30:14	116.1	366 secs	184	24.5	42.1	0.9	313.3
2020-09-11	3	16:36:44	194.8	600 secs	301	25.0	38.3	1.3	353.5
2020-09-14	1	11:50:06	161.8	558 secs	280	26.0	47.1	1.6	411.1
2020-09-14	2	12:00:00	117.4	376 secs	189	26.3	44.6	1.0	386.8
2020-09-14	3	12:06:36	195.2	698 secs	350	27.8	39.8	1.1	165.4
2020-09-14	1	13:20:08	161.8	546 secs	274	28.5	40.4	1.6	623.2
2020-09-14	2	13:29:38	117.4	366 secs	184	28.9	37.6	1.3	604.4
2020-09-14	3	13:36:08	195.9	626 secs	314	30.5	33.2	1.2	463.7
2020-09-14	1	14:50:04	162.7	602 secs	302	30.1	37.4	1.7	596.5
2020-09-14	2	15:00:34	116.1	378 secs	190	30.6	33.9	1.6	449.0
2020-09-14	3	15:07:16	195.2	694 secs	348	32.0	30.4	1.2	577.5
2020-09-14	1	16:20:12	162.7	576 secs	289	30.7	36.8	1.7	428.5
2020-09-14	2	16:30:10	117.4	412 secs	207	30.8	35.0	1.2	298.6
2020-09-14	3	16:37:24	195.2	606 secs	304	32.1	31.0	1.3	351.0
2020-09-14	1	17:49:42	162.7	502 secs	252	30.3	37.8	1.8	169.0
2020-09-14	2	17:58:36	116.1	406 secs	204	29.9	38.1	1.0	143.1
2020-09-14	3	18:05:42	195.9	656 secs	329	31.0	34.1	0.9	104.9
2020-09-16	1	11:50:04	162.7	692 secs	347	23.0	65.0	0.9	412.1
2020-09-16	2	12:02:02	116.1	430 secs	216	23.5	63.0	1.1	390.3
2020-09-16	3	12:09:34	195.9	800 secs	385	23.6	62.6	0.8	139.0
2020-09-16	1	13:20:12	162.7	622 secs	312	26.1	51.9	0.9	610.0
2020-09-16	2	13:31:00	117.4	374 secs	188	27.0	48.9	1.3	509.2
2020-09-16	3	13:37:36	195.9	646 secs	324	26.7	49.9	1.1	393.2
2020-09-16	1	14:50:06	161.8	592 secs	297	28.6	42.8	1.2	588.8
2020-09-16	2	15:00:26	117.4	380 secs	191	29.1	41.5	0.9	437.3
2020-09-16	3	15:07:08	195.9	586 secs	294	28.7	43.0	1.0	559.1
2020-09-16	1	16:20:14	161.8	528 secs	265	29.4	40.8	1.1	377.6
2020-09-16	2	16:29:30	117.4	372 secs	187	29.6	40.0	1.6	309.8
2020-09-16	3	16:36:02	196.0	568 secs	285	29.7	40.1	0.8	324.6

### 5.3.2 Observation d'usages et de comportements

Table 10: Synthèse détaillée des observations passives réalisées. Date de la campagne (date), numéro d'observation de la journée (n), heure de début (heure), nombre de situations statiques (nb sta), nombre de personnes en situation statique (nbp sta), nombre de situations dynamiques (nb dyn) et nombre de personnes en situation dynamique (nbp dyn).

date	n	heure	nb sta	nbp sta	nb dyn	nbp dyn
2020-09-11	1	12:09:00	4	10	14	14
2020-09-11	2	13:18:53	4	12	9	9
2020-09-11	3	14:20:38	18	70	23	23
2020-09-11	4	16:19:19	8	60	13	13
2020-09-11	5	NA	NA	NA	NA	NA
2020-09-14	1	12:00:08	2	14	12	12
2020-09-14	2	13:18:21	8	18	13	13
2020-09-14	3	14:11:01	8	26	15	15
2020-09-14	4	15:45:52	8	22	13	13
2020-09-14	5	17:35:35	4	10	26	26

## 6 Estrade rafraîchissante (La Défense, 2021)

### 6.1 Présentation du site

Efficacity et Paris La Défense ont lancé pour l'été 2021 deux expérimentations de rafraîchissement de l'espace public pendant la période estivale, également présentées comme « Oasis de fraîcheur »<sup>1</sup>. Il s'agit notamment d'une « estrade rafraîchissante » de Seureca/Veolia et d'un « îlot frais – skycooling » d'Engie Solutions, posés sur le parvis près de la Grande Arche de La Défense.

L'estrade mesure 200 m<sup>2</sup> au sol et combine plusieurs modes de rafraîchissement : des pavés poreux qui permettent d'évaporer l'eau de pluie stockée dans un réservoir situé dans des locaux techniques proches, et des bacs de végétation qui retiennent de l'eau de pluie et qui sont également arrosés avec l'eau du réservoir. Ce dispositif cherche à inviter les usagers à faire un temps de pause dans un lieu souvent perçu comme hostile par sa minéralité. Une station météo installée sur le dispositif permet de régler le taux d'humidification des pavés et de déclencher et arrêter la demande en eau en fonction des conditions mesurées sur place. Ce dispositif a été développé par Seureca en partenariat avec les sociétés Alkern et Vertuo.



Figure 16: Emplacement des deux expérimentations à La Défense

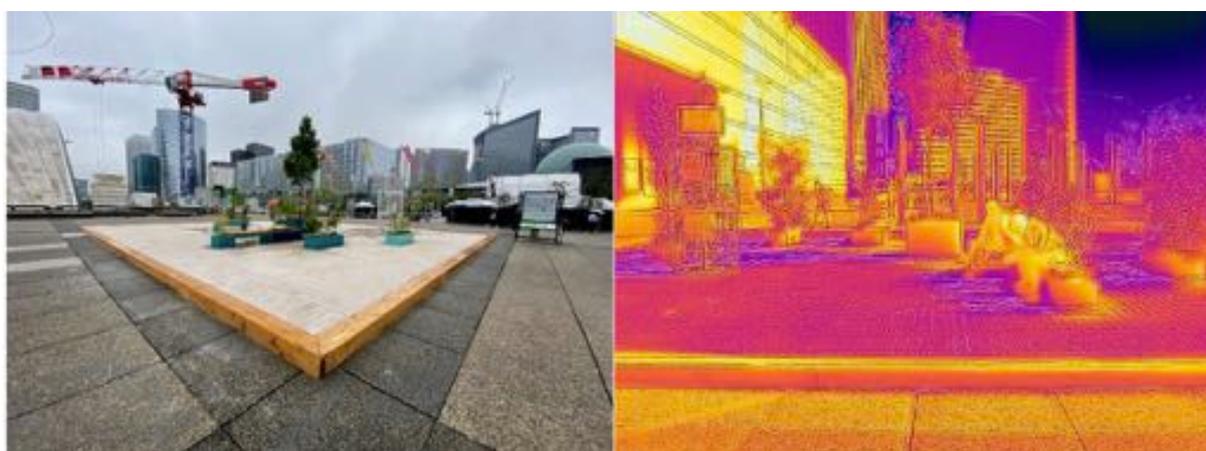


Figure 17: à gauche : Paris La Défense, Estrade rafraîchissante, à droite : photo thermique.

<sup>1</sup>Voir [https://efficacity.com/experimentations-oasis-de\\_fraicheur](https://efficacity.com/experimentations-oasis-de_fraicheur), consulté en 2021.

## 6.2 Description des zones d'étude

Deux parcours de mesures ont été identifiés, prenant en compte une variété de situations d'assise et de traversées à l'intérieur et entre ces deux dispositifs. Les parcours de mesures sont parcourus toutes les 2 heures à partir de 11h00 pendant 5 jours en juillet et puis 3 jours en septembre :

1. Parcours 1 : Ce trajet commence à la sortie du métro, serpente dans le dispositif à travers les bacs végétalisés et le mobilier urbain et se termine au pied de la Grande Arche. Il comprend 13 points d'arrêt.
2. Parcours 2 : Ce trajet représente une traversée typique urbaine sur le Parvis que des nombreuses personnes empruntent pour le travail ou pour la pause déjeuner. Il débute à la Grande Arche, puis traverse le dispositif l'Estrade en diagonale et continue en direction Nord-Est sur le Parvis de l'Arche vers la Place Carpeaux ou se situe l'îlot frais – Skycooling, en s'arrêtant sous l'abri de ce dernier. Il comprend 10 points d'arrêt.

Table 11: Synthèse des jours de mesures représentant les parcours effectués en fonction de la date et de l'heure de début de mesures.

	18/07	19/07	20/07	21/07	22/07	04/09	05/09	06/09
<b>11h00</b>	1,2	1,2	1,2	2	2		1,2	1,2
<b>13h00</b>	1,2	1,2	1,2	2	2	1,2	1,2	1,2
<b>15h00</b>	1,2	1,2	1,2	2	2	1,2	1,2	1,2
<b>17h00</b>	1,2	1,2	1,2	2	2	1,2	1,2	



Figure 18: Représentation du parcours 1 et des points d'arrêt sur le dispositif l'estrade rafraîchissante.

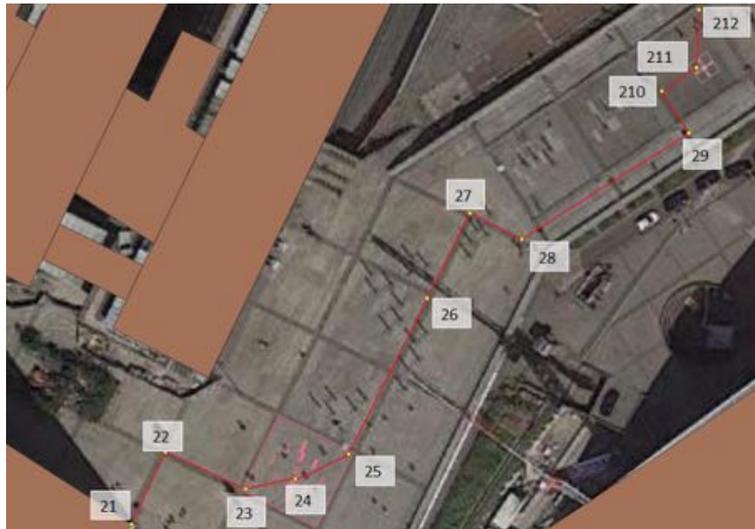


Figure 19: Représentation du parcours 2 et des points d'arrêt sur les dispositifs « estrade » et « îlot frais »

## 6.3 Détail des travaux de terrain

### 6.3.1 Métrologie climatique mobile

Table 12: Synthèse détaillée des parcours de mesures réalisés. Date de la mesure (date), numéro de parcours (p), heure de début (heure), distance du parcours (dist), durée du parcours (temp), nombre de mesures (nb mes), ainsi que valeurs moyennes de la température de l'air (Tair), humidité relative (Rh), vitesse de vent (Ws) et rayonnement onde courte provenant du ciel (SWR). Le parcours 3 étant un serie discontinue de points dans l'espace, les valeurs moyennes n'ont pas été calculées.

date	parcours	heure	dist	temp	nb mes	Tair	Rh	Ws	SWR
2021-07-18	1	10:59:34	108.7	692 secs	347	23.4	56.1	2.0	705.6
2021-07-18	2	11:11:54	164.8	760 secs	381	23.8	53.7	2.6	680.5
2021-07-18	1	12:59:30	109.8	612 secs	307	26.3	44.6	2.6	870.9
2021-07-18	2	13:10:40	164.8	882 secs	413	26.3	45.4	2.3	742.0
2021-07-18	1	14:59:16	109.8	604 secs	303	27.9	42.3	2.6	752.3
2021-07-18	2	15:10:10	164.8	858 secs	402	27.9	42.1	2.9	734.2
2021-07-18	1	16:59:12	108.7	644 secs	323	28.5	39.8	3.0	48.5
2021-07-18	2	17:11:02	163.5	768 secs	385	28.5	39.0	3.5	214.2
2021-07-19	1	10:59:34	109.8	702 secs	352	25.4	48.9	2.3	531.9
2021-07-19	2	11:12:16	164.8	928 secs	442	25.7	48.4	2.4	642.5
2021-07-19	1	12:59:12	109.8	660 secs	331	28.1	42.2	3.3	821.2
2021-07-19	2	13:11:20	164.8	828 secs	396	27.9	42.2	2.9	804.1
2021-07-19	1	14:59:38	109.8	642 secs	322	28.9	40.8	2.3	713.9
2021-07-19	2	15:11:06	164.8	822 secs	394	29.0	39.9	2.6	693.4
2021-07-19	1	16:59:44	109.8	546 secs	274	28.8	41.8	2.6	109.9
2021-07-19	2	17:09:36	164.8	844 secs	401	28.9	41.0	2.3	271.0
2021-07-20	1	11:20:24	109.8	622 secs	312	24.3	49.7	2.5	684.8
2021-07-20	2	11:31:30	164.8	830 secs	403	24.1	51.7	2.8	648.1
2021-07-20	1	12:59:32	109.8	644 secs	323	26.1	45.1	2.0	842.1
2021-07-20	2	13:11:00	164.8	834 secs	418	26.0	44.8	2.9	795.8
2021-07-20	1	14:59:22	109.8	704 secs	353	27.1	40.9	2.2	676.0
2021-07-20	2	15:11:42	164.8	832 secs	394	27.5	40.3	2.3	722.4
2021-07-20	1	17:00:00	109.8	736 secs	369	27.9	40.3	2.0	67.9

date	parcours	heure	dist	temp	nb mes	Tair	Rh	Ws	SWR
2021-07-20	2	17:12:34	164.8	828 secs	415	28.0	40.3	2.4	254.0
2021-07-21	2	11:10:04	164.8	930 secs	449	25.1	47.8	1.7	571.5
2021-07-21	2	13:09:38	164.8	828 secs	415	27.2	45.5	2.1	734.3
2021-07-21	2	15:10:20	164.8	798 secs	400	28.0	41.1	2.2	556.5
2021-07-21	2	17:09:14	164.8	872 secs	410	28.5	41.6	1.8	273.6
2021-07-22	2	11:09:16	164.8	862 secs	417	24.4	45.2	2.9	621.9
2021-07-22	2	13:09:46	164.8	810 secs	406	26.3	41.0	2.6	782.0
2021-07-22	2	15:09:28	164.8	832 secs	417	27.2	40.1	2.1	698.6
2021-07-22	2	17:09:12	164.8	826 secs	389	27.8	38.0	2.4	253.8
2021-09-04	1	12:59:36	109.8	670 secs	336	23.9	63.9	1.4	332.2
2021-09-04	2	13:11:32	164.8	804 secs	403	24.3	62.4	0.8	465.3
2021-09-04	1	15:00:04	109.8	594 secs	298	26.2	49.0	1.3	482.1
2021-09-04	2	15:10:42	164.8	796 secs	375	27.0	47.2	1.3	822.4
2021-09-04	1	16:59:38	109.8	620 secs	311	25.4	59.9	1.5	137.3
2021-09-04	2	17:10:36	164.8	822 secs	398	25.8	56.1	1.1	93.6
2021-09-05	1	10:59:42	109.8	668 secs	335	22.2	70.4	1.1	518.7
2021-09-05	2	11:11:32	164.8	898 secs	437	22.3	69.4	1.1	428.0
2021-09-05	1	13:02:28	109.8	622 secs	312	25.3	58.0	1.0	677.0
2021-09-05	2	13:13:12	164.8	840 secs	408	26.0	56.1	0.9	634.1
2021-09-05	1	15:06:20	109.8	610 secs	306	27.7	48.3	1.7	666.4
2021-09-05	2	15:18:02	164.8	666 secs	334	27.9	47.7	1.6	691.1
2021-09-05	1	17:00:06	109.8	568 secs	285	28.2	44.4	0.6	170.1
2021-09-05	2	17:10:38	164.8	856 secs	405	28.3	42.9	0.8	131.7
2021-09-06	1	11:00:02	109.8	566 secs	284	24.7	50.2	0.6	478.4
2021-09-06	2	11:10:08	164.8	742 secs	361	25.0	48.7	0.8	403.4
2021-09-06	1	12:59:32	109.8	552 secs	277	27.2	41.4	2.0	681.8
2021-09-06	2	13:09:02	164.8	796 secs	368	27.1	41.3	1.2	635.2
2021-09-06	1	15:00:08	109.8	570 secs	286	28.3	38.4	1.7	568.8
2021-09-06	2	15:09:58	164.8	682 secs	313	28.8	37.5	1.7	600.2

### 6.3.2 Observation d'usages et de comportements

Table 13: Synthèse détaillée des observations passives réalisées. Date de la campagne (date), numéro d'observation de la journée (n), heure de début (heure), nombre de situations statiques (nb sta), nombre de personnes en situation statique (nbp sta), nombre de situations dynamiques (nb dyn) et nombre de personnes en situation dynamique (nbp dyn).

date	n	heure	nb sta	nbp sta	nb dyn	nbp dyn
2021-07-17	1	10:58:29	0	0	0	0
2021-07-17	2	13:01:17	5	8	2	2
2021-07-17	3	14:59:04	7	13	0	0
2021-07-17	4	17:00:41	0	0	0	0
2021-07-18	1	11:03:52	2	4	5	11
2021-07-18	2	12:58:36	5	11	3	8
2021-07-18	3	15:00:03	1	1	4	7
2021-07-18	4	17:01:32	9	11	3	5
2021-07-19	1	11:03:12	4	4	5	10
2021-07-19	2	13:00:34	8	11	3	4
2021-07-19	3	15:11:37	1	1	3	7
2021-07-19	4	17:00:41	0	0	0	0
2021-07-20	1	11:34:46	2	2	5	7
2021-07-20	2	13:00:09	6	8	4	8
2021-07-20	3	15:00:03	0	0	3	5
2021-07-20	4	17:00:41	2	4	3	6
2021-07-21	1	10:58:29	3	4	1	1
2021-07-21	2	13:14:30	2	5	0	0
2021-07-21	3	15:00:00	0	0	0	0
2021-07-21	4	17:03:59	5	9	3	4
2021-07-22	1	11:06:45	1	1	4	6
2021-07-22	2	13:04:05	5	8	3	4
2021-07-22	3	15:11:29	3	3	1	4
2021-07-22	4	NA	NA	NA	NA	NA

## 7 Îlot frais (La Défense, 2021)

### 7.1 Présentation du site

L'îlot frais a été déjà installé à plusieurs reprises à Paris, notamment en 2019. Les modes de rafraîchissement sont doubles : i) la canopée artificielle de 25 m<sup>2</sup>, portée par une structure arborescente, produit des zones ombragées en dessous et autour du dispositif, ii) et le banc rafraîchissant équipé d'un système combiné d'échangeurs air/eau et des ventilateurs. À l'inverse des versions précédentes, branchées sur le réseau eau froide de la ville de Paris, cette installation introduit comme nouveauté une production d'eau froide sur place en circuit fermé. Ainsi, les panneaux Skycooling développés par le centre de recherche Engie Lab Crigen en collaboration avec Engie Solutions, couvrant la toiture du cube, permettent de refroidir l'eau pendant la nuit par une technique radiative.

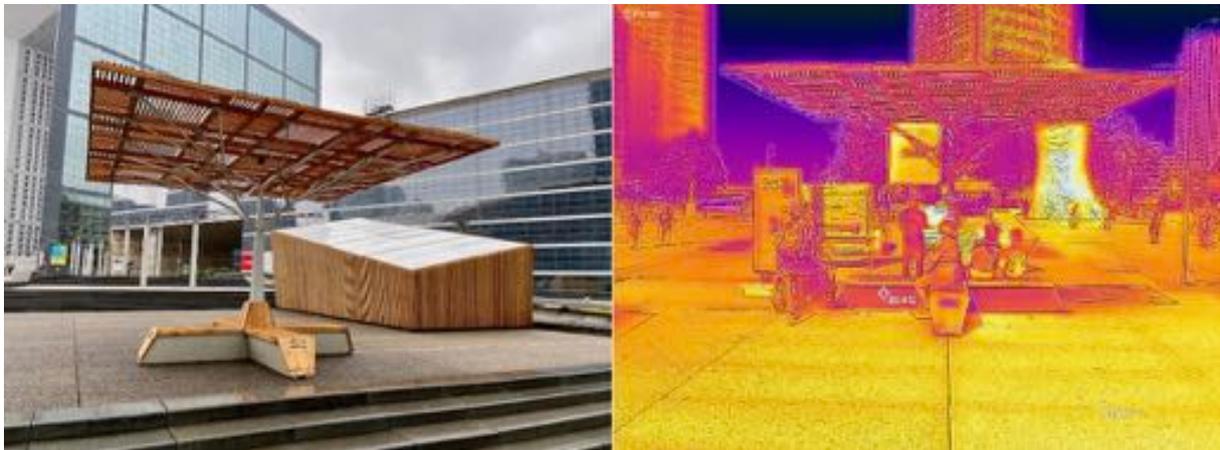


Figure 20: à gauche : Paris La Défense, Îlot frais – Skycooling, à droite : photo thermique.

### 7.2 Description des zones d'étude

Deux parcours de mesures ont été identifiés, prenant en compte une variété de situations d'assise et de traversée à l'intérieur et entre ces deux dispositifs. Les parcours de mesures sont parcourus toutes les 2 heures à partir de 11h00 pendant 5 jours en juillet puis 3 jours en septembre :

2. Parcours 2 : voir présentation du parcours 2 site Estrade rafraîchissante.
3. Parcours 3 : Ce parcours consiste uniquement en 8 points de mesures, dont 4 situés à l'extrémité de chaque assise et 4 aux coins intérieurs entre deux assises. Les points de mesures ont été adaptés en fonction de la fréquentation du dispositif. Il existe alors des séquences de mesures incomplètes en fonction de l'occupation des différents bancs du dispositif.

Table 14: Synthèse des jours de mesures représentant les parcours effectués en fonction de la date et de l'heure de début de mesures.

	18/07	19/07	20/07	21/07	22/07	04/09	05/09	06/09
<b>11h00</b>	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3		2,3	2,3
<b>13h00</b>	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
<b>15h00</b>	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
<b>17h00</b>	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	



Figure 21: Représentation des points de mesures sur le dispositif « îlot frais »

## 7.3 Détail des travaux de terrain

### 7.3.1 Métrologie climatique mobile

Table 15: Synthèse détaillée des parcours de mesures réalisés. Date de la mesure (date), numéro de parcours (p), heure de début (heure), distance du parcours (dist), durée du parcours (temp), nombre de mesures (nb mes), ainsi que valeurs moyennes de la température de l'air ( $T_{air}$ ), humidité relative (Rh), vitesse de vent ( $W_s$ ) et rayonnement onde courte provenant du ciel (SWR). Le parcours 3 est formé par une série non linéaire de points dans l'espace.

date	parcours	heure	dist	temp	nb mes	$T_{air}$	Rh	$W_s$	SWR
2021-07-18	2	11:17:58	164.8	396	199	23.8	53.9	2.5	635.3
2021-07-18	3	11:25:59	0.0	577	35	24.1	51.8	2.7	346.0
2021-07-18	2	13:17:10	164.8	492	218	26.4	45.6	2.3	620.3
2021-07-18	3	13:25:21	0.0	662	38	26.4	45.8	2.4	351.7
2021-07-18	2	15:16:50	164.8	458	202	28.2	41.6	2.9	737.2
2021-07-18	3	15:24:24	0.0	291	17	28.0	42.2	2.9	517.5
2021-07-18	2	17:18:04	163.5	346	174	28.7	38.8	3.5	413.6

date	parcours	heure	dist	temp	nb mes	Tair	Rh	Ws	SWR
2021-07-18	3	17:25:15	0.0	704	51	28.9	37.2	3.6	319.4
2021-07-19	2	11:19:36	164.8	488	222	25.7	48.2	2.3	634.3
2021-07-19	3	11:27:30	0.0	671	43	25.9	48.0	2.0	249.4
2021-07-19	2	13:17:50	164.8	438	201	28.0	42.3	2.4	756.4
2021-07-19	3	13:24:46	0.0	762	42	28.1	42.2	2.2	261.2
2021-07-19	2	15:17:32	164.8	436	201	29.1	40.0	2.9	692.2
2021-07-19	3	15:24:24	0.0	776	54	29.2	40.3	3.0	381.0
2021-07-19	2	17:16:04	164.8	456	207	29.1	40.7	2.1	441.0
2021-07-19	3	17:23:25	0.0	747	61	29.4	40.4	2.8	311.9
2021-07-20	2	11:37:58	164.8	442	209	24.1	51.8	2.7	625.4
2021-07-20	3	11:44:46	0.0	677	45	24.2	51.1	1.9	270.0
2021-07-20	2	13:18:00	164.8	414	208	26.0	44.8	2.8	734.5
2021-07-20	3	13:25:57	0.0	743	48	26.2	44.8	1.4	321.5
2021-07-20	2	15:18:54	164.8	400	178	27.7	39.5	1.8	757.0
2021-07-20	3	15:25:21	0.0	496	27	27.8	38.9	2.1	323.1
2021-07-20	2	17:19:14	164.8	428	215	28.2	39.8	2.2	425.0
2021-07-20	3	17:27:25	0.0	765	40	28.4	38.7	2.1	271.0
2021-07-21	2	11:17:08	164.8	506	237	25.0	48.3	1.6	537.3
2021-07-21	3	11:25:08	0.0	939	42	25.1	48.1	1.5	377.7
2021-07-21	2	13:16:46	164.8	400	201	27.4	45.3	2.2	637.3
2021-07-21	3	13:24:35	0.0	710	55	27.2	45.5	1.9	632.9
2021-07-21	2	15:17:34	164.8	364	183	28.2	41.0	1.9	547.0
2021-07-21	3	15:24:47	0.0	658	46	28.3	41.7	2.4	311.1
2021-07-21	2	17:15:44	164.8	482	215	28.8	40.6	2.1	405.3
2021-07-21	3	17:23:40	0.0	659	40	29.1	38.9	2.3	302.2
2021-07-22	2	11:16:22	164.8	436	204	24.3	45.4	3.0	561.7
2021-07-22	3	11:23:08	0.0	743	43	24.5	45.3	2.5	318.7
2021-07-22	2	13:16:06	164.8	430	216	26.3	40.8	2.6	727.8
2021-07-22	3	13:25:01	0.0	741	46	26.4	41.1	2.4	475.4
2021-07-22	2	15:16:48	164.8	392	197	27.4	39.7	2.0	680.7
2021-07-22	3	15:24:22	0.0	451	22	27.6	39.3	1.9	234.0
2021-07-22	2	17:15:22	164.8	456	204	28.0	37.5	2.7	415.0
2021-07-22	3	17:22:48	0.0	600	46	28.4	36.7	1.5	289.6
2021-09-04	2	13:18:42	164.8	374	188	24.4	62.0	0.7	489.6
2021-09-04	3	13:26:32	0.0	689	32	24.6	61.3	0.8	198.0
2021-09-04	2	15:17:34	164.8	384	169	27.4	46.4	1.0	761.8
2021-09-04	3	15:23:46	0.0	808	29	27.3	48.7	1.4	262.4
2021-09-04	2	17:17:24	164.8	414	194	25.9	55.6	1.1	84.6
2021-09-04	3	17:23:47	0.0	559	24	26.0	55.4	0.8	71.0
2021-09-05	2	11:18:40	164.8	470	223	22.4	69.2	0.8	413.7
2021-09-05	3	11:25:57	0.0	891	27	22.6	68.0	1.1	209.4
2021-09-05	2	13:19:42	164.8	450	213	26.2	55.5	0.9	597.8
2021-09-05	3	13:26:39	0.0	718	37	25.9	56.1	1.1	405.4
2021-09-05	2	15:23:36	164.8	332	167	28.2	47.1	1.5	682.5
2021-09-05	3	15:30:12	0.0	537	35	28.2	45.8	1.4	283.0
2021-09-05	2	17:17:54	164.8	420	187	28.3	42.5	0.8	123.5
2021-09-05	3	17:24:43	0.0	341	22	28.6	42.2	0.9	104.9
2021-09-06	2	11:16:14	164.8	376	178	25.0	48.7	0.8	402.0
2021-09-06	3	11:21:53	0.0	766	28	25.2	47.1	1.0	267.2
2021-09-06	2	13:15:54	164.8	384	166	27.1	41.6	0.9	568.5
2021-09-06	3	13:22:12	0.0	453	29	27.4	40.9	2.0	481.9
2021-09-06	2	15:15:16	164.8	364	154	28.7	37.8	1.6	565.9
2021-09-06	3	15:21:18	0.0	633	35	28.8	37.5	0.8	294.5

### 7.3.2 Observation d'usages et de comportements

Table 16: Synthèse détaillée des observations passives réalisées. Date de la campagne (date), numéro d'observation de la journée (n), heure de début (heure), nombre de situations statiques (nb sta), nombre de personnes en situation statique (nbp sta), nombre de situations dynamiques (nb dyn) et nombre de personnes en situation dynamique (nbp dyn).

date	n	heure	nb sta	nbp sta	nb dyn	nbp dyn
2021-07-18	1	11:19:29	1	1	2	4
2021-07-18	2	13:17:58	3	6	2	4
2021-07-18	3	15:18:53	5	6	1	2
2021-07-18	4	17:20:02	3	5	2	5
2021-07-19	1	11:21:19	1	1	3	5
2021-07-19	2	13:19:20	3	3	2	2
2021-07-19	3	15:27:12	1	1	4	6
2021-07-19	4	17:18:33	1	5	1	1
2021-07-20	1	11:43:56	1	1	3	3
2021-07-20	2	13:23:23	2	3	1	2
2021-07-20	3	15:24:16	2	2	1	2
2021-07-20	4	17:20:32	0	0	1	3
2021-07-21	1	11:21:38	1	1	0	0
2021-07-21	2	13:20:08	2	5	2	2
2021-07-21	3	15:20:38	1	1	3	3
2021-07-21	4	17:20:32	3	6	1	1
2021-07-22	1	11:21:38	0	0	2	4
2021-07-22	2	13:17:40	4	8	0	0
2021-07-22	3	15:19:47	3	3	0	0
2021-07-22	4	17:22:21	1	2	1	1

## 8 Parc de l'axe (La Défense, 2021)

### 8.1 Présentation du site

Un troisième site a été joint à cette campagne, consistant en une séquence paysagère de jardins sur dalle, appelée « Séquence Agam ». Ce jardin a été conçu par l'Atelier Fois, et est situé entre la Place de la fontaine Agam et la Place Basse. Ces jardins ont été installés hors sol en 2020 pour une durée de 3 ans afin de questionner le paysage durable et adapté à la dalle de La Défense. C'est une série des jardins expérimentaux qui vont permettre aux paysagistes et aux usagers de s'approprier le lieu tout en faisant une évaluation des espèces et des substrats choisis, des techniques et pratiques d'entretien appliquées (arrosage), et des fonctions proposées (milieux d'eau, sec, frais, cultivé). Ce lieu est très fréquenté pendant la pause déjeuner.



Figure 22: Emplacement de l'aménagement dans l'axe de La Défense en relation aux dispositifs Estrade rafraîchissante et Îlot frais.

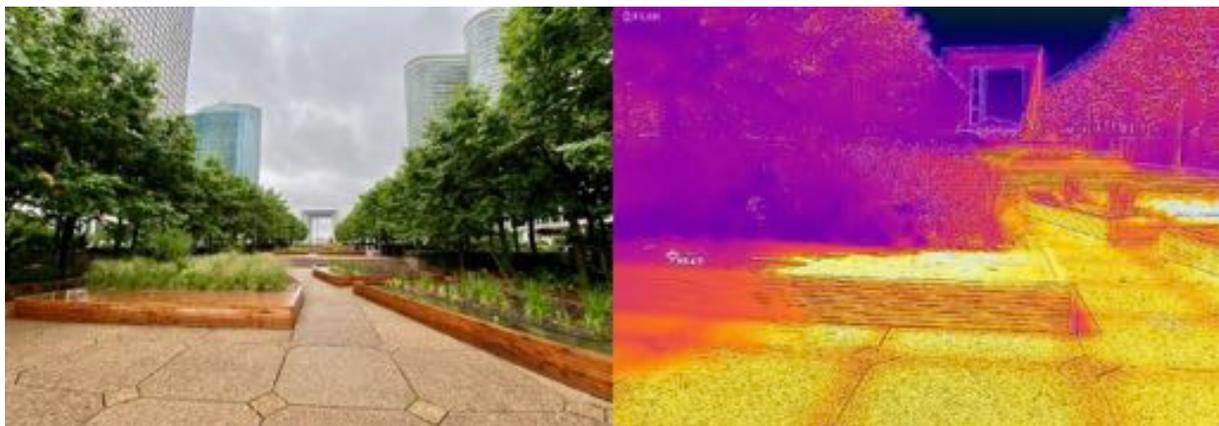


Figure 23: à gauche : Jardins expérimentaux « Séquence Agam », entre la Place de la fontaine Agam et la Place Basse, Paris La Défense, à droite : photo thermique.

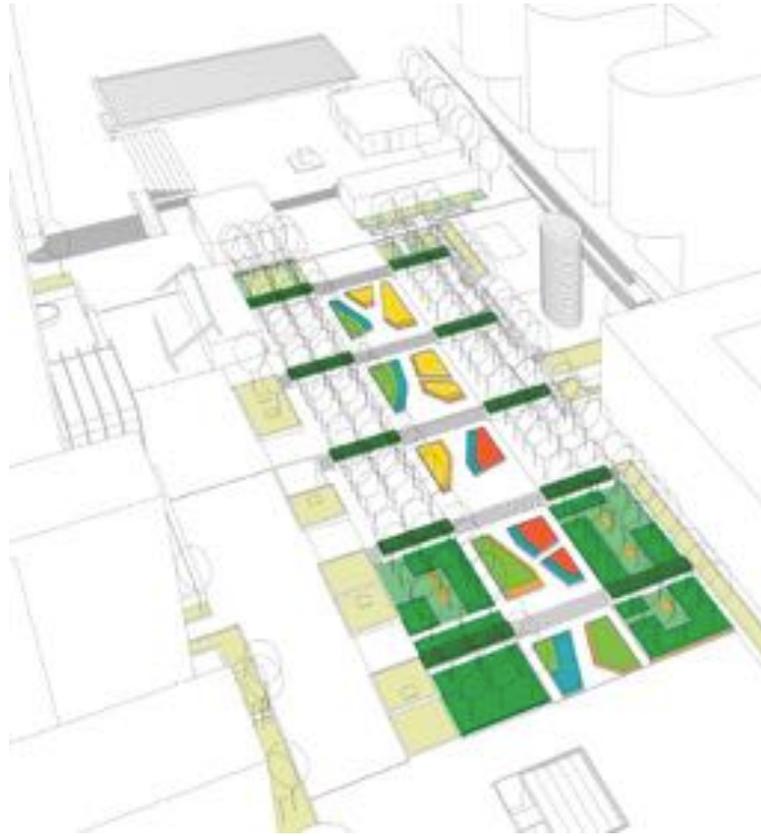


Figure 24: en haut : Jardins sur dalle « Séquence Agam », plan par l'Atelier Foïs (source : <https://www.atelierfois.com/info.html>)

## 8.2 Description des zones d'étude

Deux parcours de mesures ont été identifiés, prenant en compte une variété de situations d'assise et de traversée entre le dispositif et le parc qui l'environne. Les parcours de mesures sont parcourus toutes les 2 heures à partir de 11h00 pendant 5 jours en juillet et puis 3 jours en septembre :

4. Parcours 4 : ce parcours traverse le jardin de haut en bas en passant par les aires arborées et par la dalle située à l'extérieur de l'espace végétalisé. Ainsi, il est possible de reconstituer un parcours longitudinal au milieu des différents jardins d'eau, frais, secs et cultivés ou bien de reconstituer des parcours transversaux en prenant en compte les conditions climatiques extérieures du site. Il comprend 28 points d'arrêt.
5. Parcours 5 : ce parcours traverse tout l'axe de La Défense suivant le trajet accessible indiqué sur place avec une ligne verte. L'objectif de ce parcours est de comprendre l'effet localisé du parc dans l'ensemble de l'axe de La Défense. Du fait de sa longueur, ce parcours n'a pu être réalisé que trois fois pendant la campagne.

Table 17: Synthèse des jours de mesures représentant les parcours effectués en fonction de la date et de l'heure de début de mesures.

	18/07	19/07	20/07	21/07	22/07	04/09	05/09	06/09
<b>11h00</b>	4	4	4	4,5	4		4	4
<b>13h00</b>	4	4	4	4	4	4	4	4
<b>15h00</b>	4	4	4	4	4,5	4	4	4
<b>17h00</b>	4	4	4	4,5	4	4	4	

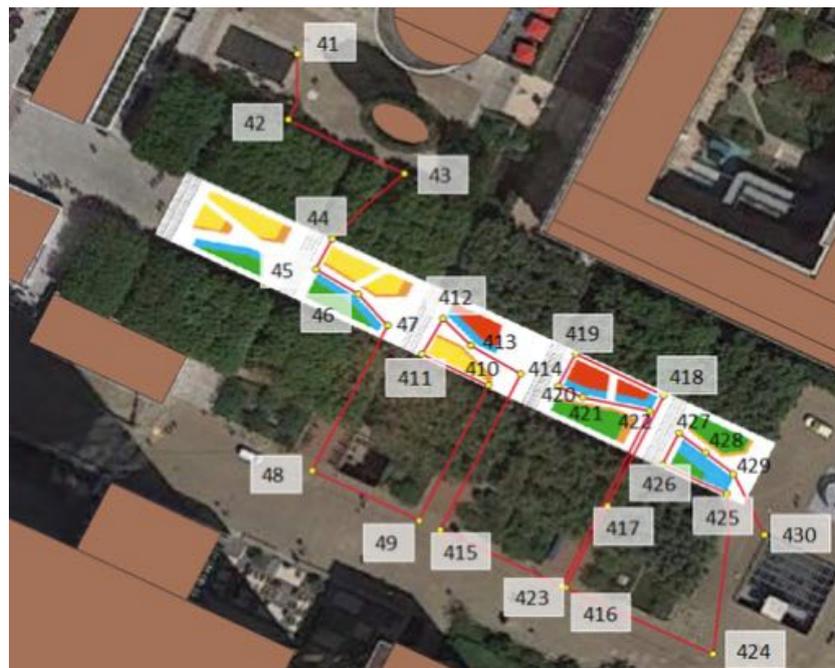


Figure 25: Représentation du parcours 4 de mesures avec des points d'arrêt.



Figure 26: Représentation du parcours 5 (rouge) en relation au parcours 4 (bleu).

## 8.3 Détail des travaux de terrain

### 8.3.1 Météorologie climatique mobile

Table 18: Synthèse détaillée des parcours de mesures réalisés. Date de la mesure (date), numéro de parcours (p), heure de début (heure), distance du parcours (dist), durée du parcours (temp), nombre de mesures (nb mes), ainsi que valeurs moyens de la température de l'air (Tair), humidité relative (Rh), vitesse de vent (Ws) et rayonnement onde courte provenant du ciel (SWR).

date	parcours	heure	dist	temp	nb mes	Tair	Rh	Ws	SWR
2021-07-18	4	11:50:26	457.3	1614 secs	808	25.6	47.5	1.0	578.6
2021-07-18	4	13:50:38	455.9	1520 secs	761	27.2	44.4	1.5	610.2
2021-07-18	4	15:42:46	455.9	1662 secs	832	28.1	41.2	2.0	55.8
2021-07-18	4	17:51:28	457.3	1736 secs	869	28.3	41.3	2.1	64.9
2021-07-19	4	11:51:40	457.3	1754 secs	878	27.2	46.0	1.0	541.8
2021-07-19	4	13:52:10	457.3	1498 secs	750	29.1	40.5	1.2	545.3
2021-07-19	4	15:54:34	457.3	1568 secs	785	28.9	41.8	0.8	87.7
2021-07-19	4	17:50:10	457.3	1512 secs	757	28.7	41.9	1.1	83.6
2021-07-20	4	12:07:22	457.3	1628 secs	815	25.6	47.9	1.1	544.6
2021-07-20	4	13:52:44	457.3	1452 secs	727	27.3	42.6	1.1	575.1
2021-07-20	4	15:47:22	457.3	1622 secs	812	27.7	39.3	1.2	68.2
2021-07-20	4	17:53:34	457.3	1692 secs	847	27.7	41.0	1.6	66.8
2021-07-21	4	11:57:24	457.3	1678 secs	840	26.5	45.8	1.2	529.9
2021-07-21	5	12:38:26	1138.9	1312 secs	657	26.6	46.0	1.8	600.6
2021-07-21	4	13:50:38	457.3	1540 secs	771	27.8	44.0	1.2	528.1
2021-07-21	4	15:51:06	457.3	1598 secs	800	28.2	41.9	1.2	79.0
2021-07-21	4	17:48:20	457.3	1482 secs	742	28.5	41.8	0.9	88.8
2021-07-21	5	18:24:04	1138.9	1206 secs	604	28.5	41.4	1.7	142.5
2021-07-22	4	11:49:48	457.3	1584 secs	793	25.3	44.2	1.8	524.6
2021-07-22	4	13:51:14	457.3	1534 secs	768	27.2	39.8	1.1	560.8
2021-07-22	4	15:47:26	457.3	1532 secs	767	27.5	39.2	1.0	66.8
2021-07-22	5	16:22:32	1138.9	1106 secs	535	27.7	38.8	1.8	336.4
2021-07-22	4	17:46:28	457.3	1566 secs	784	27.8	38.6	1.5	85.2
2021-09-04	4	13:54:16	457.3	1526 secs	764	25.4	58.5	0.8	329.2
2021-09-04	4	15:49:18	457.3	1644 secs	823	26.2	55.3	1.1	110.7
2021-09-04	4	17:45:06	457.3	1648 secs	825	25.7	56.4	0.8	49.1
2021-09-05	4	11:53:28	457.3	1618 secs	810	23.9	64.8	0.8	459.8
2021-09-05	4	13:49:26	457.3	1490 secs	746	26.9	53.3	0.9	394.1
2021-09-05	4	15:50:22	457.3	1666 secs	834	27.6	47.0	0.6	134.4
2021-09-05	4	17:42:24	457.3	1528 secs	765	28.0	46.6	0.7	48.2
2021-09-06	4	11:46:14	457.3	1378 secs	690	26.4	44.1	0.8	461.9
2021-09-06	4	13:40:28	457.3	1562 secs	782	28.3	40.1	1.3	376.9
2021-09-06	4	15:43:02	457.3	1552 secs	777	28.2	40.1	0.9	99.7

### 8.3.2 Observation d'usages et de comportements

Table 19: Synthèse détaillée des observations passives réalisées. Date de la campagne (date), numéro d'observation de la journée (n), heure de début (heure), nombre de situations statiques (nb sta), nombre de personnes en situation statique (nbp sta), nombre de situations dynamiques (nb dyn) et nombre de personnes en situation dynamique (nbp dyn).

date	n	heure	nb sta	nbp sta	nb dyn	nbp dyn
2021-07-17	1	NA	NA	NA	NA	NA
2021-07-17	2	14:00:28	7	14	2	5
2021-07-17	3	15:54:41	8	25	0	0
2021-07-17	4	NA	NA	NA	NA	NA
2021-07-18	1	11:53:07	6	9	6	12
2021-07-18	2	13:54:21	7	13	6	11
2021-07-18	3	15:47:12	12	30	3	11
2021-07-18	4	17:52:15	11	20	3	7
2021-07-19	1	11:58:33	12	25	2	3
2021-07-19	2	14:00:27	10	19	3	3
2021-07-19	3	15:58:51	8	16	0	0
2021-07-19	4	17:50:58	9	21	5	9
2021-07-20	1	12:30:01	26	101	3	13
2021-07-20	2	13:52:53	16	29	3	6
2021-07-20	3	15:50:18	11	23	4	9
2021-07-20	4	17:56:26	9	17	4	9
2021-07-21	1	11:59:28	18	35	2	5
2021-07-21	2	13:53:59	18	64	2	4
2021-07-21	3	15:52:10	13	26	3	6
2021-07-21	4	17:52:27	11	28	3	6
2021-07-22	1	11:49:26	18	31	4	8
2021-07-22	2	13:50:57	15	40	5	7
2021-07-22	3	15:49:07	14	22	4	7
2021-07-22	4	NA	NA	NA	NA	NA

## Références

- Aiello, L.M., Schifanella, R., Quercia, D., Aletta, F., 2016. Chatty maps: constructing sound maps of urban areas from social media data. *Royal Society Open Science* 3, 150690. <https://doi.org/10.1098/rsos.150690>
- Alexandra, M., Norbert, B., Markus, R., Dietmar, B., Stefan, van der S., 2009. Pedestrian Behaviour Monitoring: Methods and Experiences. *Ambient Intelligence and Smart Environments* 11-42. <https://doi.org/10.3233/978-1-60750-048-3-11>
- Aventin, C., 2006. Les arts de la rue ou comment l'espace public prend le corps. *Lieux Communs* 9.
- Flükiger, S., Leuba, J., 2015. Qualité du séjour dans l'espace public. Aperçu des méthodes d'analyse. *Mobilité Piétonne Suisse*, Bâle.
- Ghavampour, E., Del Aguila, M., Vale, B., 2017. GIS mapping and analysis of behaviour in small urban public spaces. *Area* 49, 349-358. <https://doi.org/10.1111/area.12323>
- Golicnik, B., Marusic, D., 2012. Behavioural Maps and GIS in Place Evaluation and Design. *Application of Geographic Information Systems*. <https://doi.org/10.5772/47940>
- Goličnik Marušić, B., 2015. Social behaviour as a basis for design and development of green infrastructure. *Urbani izziv* 26. <https://doi.org/10.5379/urbani-izziv-en-2015-26-supplement-009>
- Monnet, N., 2014. Photoethnography of the urban space, or how to describe the urban world beyond words: presentation of a multimedia essay. *Visual Ethnography* 3, 35-64.
- Müller-Eie, D., Reinertsen, M., Tøssebro, E., 2018. Electronic behaviour mapping and GIS application for Stavanger Torget, Norway. *Int. J. SDP* 13, 571-581. <https://doi.org/10.2495/SDP-V13-N4-571-581>
- Ng, C.F., 2016. Behavioral Mapping and Tracking, in: *Research Methods for Environmental Psychology*. John Wiley & Sons, Ltd, p. 29-51. <https://doi.org/10.1002/9781119162124.ch3>
- Nicol, F., Humphreys, M., Roaf, S., 2012. *Adaptative thermal comfort: Principles and practices*. Routledge Taylor & Francis, New York.
- Popovic, M., 2017. Potentiel des événements climatiques à l'échelle « pico » pour l'amélioration du confort thermique piétonnier (PhD Thesis). Ecole Centrale de Nantes, Nantes.
- Qi, Q., Meng, Q., Wang, J., Ren, P., 2021. Developing an optimized method for the « stop-and-go » strategy in mobile measurements for characterizing outdoor thermal environments. *Sustainable Cities and Society* 69, 102837. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102837>
- Stavropoulos-Laffaille, X., Requena-Ruiz, I., Drozd, C., Leduc, T., Servières, M., Siret, D., 2021. Urban cooling strategies as interaction opportunities in the public space: a methodological proposal. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2042, 012128. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2042/1/012128>
- Tsay, S., Andersen, C., 2017. *The Open Public Life Data Protocol*. Gehl Institute, City of San Francisco's Planning Department, Copenhagen Municipality's City Data Department & Seattle Department of Transportation, Copenhagen.
- Whyte, W.H., 1980. *The social life of small urban spaces*. Project for Public Spaces, New York.

# Atelier de prospective Fraîcheurs urbaines. Exploration collective de scénarii d'adaptation des espaces publics urbains aux étés caniculaire

## ANNEXE 5

Ignacio REQUENA-RUIZ      Céline DROZD      Daniel SIRET  
Thomas LEDUC              Kévin CHESNEL

### Sommaire

<b>1</b>	<b>Introduction et problématique</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Méthode</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Table 1 : Quelles incidences du rafraîchissement localisé des espaces publics sur les visions territoriales ?</b>	<b>5</b>
3.1	Des stratégies et figures de rafraîchissement localisées ? . . . . .	5
3.2	Comment gouverner la fraîcheur ? . . . . .	6
3.3	Appréhender les inégalités sociospatiales . . . . .	6
<b>4</b>	<b>Table 2 : Quelles modalités de rafraîchissement localisé pour l'avenir des espaces publics ?</b>	<b>8</b>
4.1	La fraîcheur comme ressource urbaine à valoriser par le projet . . . . .	8
4.2	Transformer l'espace public en profondeur . . . . .	8
4.3	Le projet d'espace frais comme lieu habité . . . . .	9
<b>5</b>	<b>Table 3 : Comment penser les espaces de rafraîchissement localisés à travers les imaginaires et représentations de la fraîcheur en ville ?</b>	<b>11</b>
5.1	Formes narratives de la fraîcheur en ville . . . . .	11
5.2	Parcours expérientiels ou acclimatation des terroirs ? . . . . .	11
<b>6</b>	<b>Discussion</b>	<b>13</b>
6.1	Du besoin d'une gouvernance spécifique pour l'adaptation au réchauffement urbain . . . . .	13
6.2	Le rafraîchissement ponctuel dans son territoire . . . . .	13
6.3	Des lieux frais à concevoir par le sol et par l'ombre . . . . .	14
6.4	L'expérience des espaces frais en ville : l'ordinaire et l'extraordinaire . . . . .	16
<b>7</b>	<b>Conclusions</b>	<b>17</b>
	<b>Références</b>	<b>18</b>

# 1 Introduction et problématique

Au cours des derniers étés, les villes européennes ont vu se multiplier des installations urbaines intégrant une forme de rafraîchissement dans l'espace public (ex., canopées rafraîchissantes, miroirs d'eau, bancs frais). Les citoyens des régions à climat tempéré expérimentent dès à présent les effets annoncés par les projections climatiques : une hausse des températures moyennes et une augmentation en fréquence des événements de chaleur extrême. Dans ce contexte, les espaces publics ont un rôle primordial à jouer dans les stratégies d'atténuation et d'adaptation aux changements climatiques et leur aménagement est confronté à l'enjeu de préserver la vie urbaine dans des conditions caniculaires. Concepteurs et aménageurs abordent cette problématique par une diversité de stratégies qui mêlent les techniques de rafraîchissement urbain (ex., brumisation, surfaces fraîches, canopées, végétation) à la spatialité des lieux (ex., formes, matières, imaginaires) et ses usages (ex., lieux de repos, zones de passage, espaces de pause, refuges ponctuels, aires de jeux). Cependant, savoir comment ces formes de « climatisation » collective façonneront les ambiances urbaines estivales du futur reste à explorer.

Dans cette perspective, nous avons organisé un atelier de prospective urbaine qui s'intéresse aux enjeux d'adaptation des villes denses centro-européennes à climat tempéré qui héritent de formes urbaines principalement conçues pour les conditions hivernales. Ce cadre peut être questionné selon deux horizons d'évolution des changements climatiques : (1) un changement lent, qui permettrait une temporalité classique dans les temps longs du projet urbain, et une adaptation progressive de l'espace public aux nouvelles conditions ; (2) un changement brutal, qui obligerait à des interventions dans l'urgence avec des outils d'aménagement spécifiques pour préserver la vie urbaine dans le court terme.

Préalablement, nous avons mené une étude analytique et typologique d'un répertoire de projets réalisés tels qu'ils sont diffusés dans les médias d'architecture, d'urbanisme et de paysage. Ensuite, nous avons mené une campagne d'entretiens exploratoires auprès d'acteurs (concepteurs, aménageurs, industriels) et d'usagers de dispositifs de rafraîchissement urbain. Ces deux entrées nous ont permis de repérer trois axes thématiques qui font objet de questions croisées pour orienter l'atelier de prospective : le rôle des espaces frais dans les stratégies d'aménagement urbain ; les modalités d'intervention pour le rafraîchissement des espaces en fonction des conditions des lieux ; les représentations des espaces frais dans l'imaginaire de la ville l'été.

Trois thématiques avec un ensemble de sous-questions associées émergent de ce travail :

1. *Quelles sont les incidences du rafraîchissement localisé des espaces publics sur les visions territoriales ?* Les sous-questions incluent : Quelles sont les formes de structuration spatiale (par exemple, maillages, corridors, ponctuels) ? Quels espaces sont considérés comme stratégiques et/ou prioritaires à investir à l'échelle territoriale (par exemple, centres anciens denses, périurbains...) et à l'échelle urbaine (par exemple, cœur d'îlot, cours d'école) ? Comment prendre en compte les enjeux socio-économiques spécifiques à l'échelle du quartier (par exemple, populations vulnérables, santé) ? Quel est le lien entre la stratégie d'adaptation et la biodiversité ? Quelles sont les modalités d'arbitrage en fonction de la stratégie ? Quelles actions privilégier (par exemple, planification, projets, expérimentations...) ? Quelle est la place de l'utilisateur ? Quelle est la place dans la temporalité du projet urbain ?
2. *Quelles modalités de rafraîchissement localisé envisager pour l'avenir des espaces publics ?* Les sous-questions incluent : Comment les modalités de rafraîchissement

pourraient-elles s'adapter au contexte urbain spécifique des espaces publics ? Quels seraient les rapports matériels et spatiaux avec l'espace public, et dans quelles temporalités seraient-ils à envisager ? Quelles formes de vie urbaine pourraient accompagner les espaces publics rafraîchis, et pour quels usages précisément ? Dans quelles temporalités de la vie urbaine pourraient-elles être utilisées (par exemple, de manière quotidienne ou saisonnière) ? Quels seraient les coûts en termes de ressources (eau et énergie notamment) nécessaires pour la mise en place du rafraîchissement localisé des espaces publics ?

3. *Comment penser les espaces de rafraîchissement localisés à travers les imaginaires et les représentations de la fraîcheur en ville ?* Les sous-questions incluent : Quels codes et références sont manipulés par les acteurs des projets urbains lorsqu'il s'agit de parler de fraîcheur en ville ? On peut notamment penser aux références constituées par les espaces de fraîcheur naturels tels que les pieds des arbres, les forêts ou les étangs, ou encore par les espaces de fraîcheur conditionnée tels que les piazzas, les paseos/ramblas/promenades des villes méditerranéennes ou les médinas. Comment ces espaces sont-ils nommés et quel vocabulaire est utilisé ? Il existe actuellement toute une gamme sémantique, allant des « points frais » aux « îlots frais » en passant par les « îlots de fraîcheur » ou les « parcours de fraîcheur ». Quels types d'ambiances urbaines et quelles nouvelles esthétiques urbaines apparaissent autour de la fraîcheur en ville ? Quels sont les nouveaux rythmes et les nouvelles urbanités liés à la fraîcheur ? Quelles formes de dépaysement ou de voyage sont véhiculées par les espaces de rafraîchissement ? Enfin, comment traduire ces imaginaires dans la commande publique et dans les phases de projet ?

## 2 Méthode

La méthode de travail choisie est celle du World Café avec 10 professionnels de profils interdisciplinaires et animé par 3 chercheurs du projet et 3 chercheurs extérieurs au projet, mais sensibilisés au sujet.

L'atelier World Café a été structuré en 3 tables thématiques par lesquelles passent de manière consécutive 3 groupes de participants différents pour une durée de 25 minutes à chaque fois. Pour chaque thématique, trois tours de table ont été menés, avec en préambule pour les tours 2 et 3, le résumé des éléments collectés dans le ou les tours précédents. A la fin de chaque tour, les groupes de participants sont recomposés. Afin de ne pas perturber la fluidité du débat, le temps des discussions thématiques a fait l'objet d'une prise de notes systématique par un rapporteur par chaque table.

Suite à cela, des synthèses construites par les animateurs-rapporteurs de chaque table ont été restituées en 10 minutes par thématique, suivies d'un temps de débat ouvert de 45 minutes. Ce temps de débat collectif a été enregistré et retranscrit pour la constitution de ce rapport.

L'atelier a eu lieu le vendredi 2 décembre 2022 de 11h45 à 17h00 à l'ENSA Nantes. Il a été intitulé « Fraîcheurs urbaines. Exploration collective de scénarii d'adaptation des espaces publics urbains aux étés caniculaires ».

L'atelier a réuni des professionnels du monde de l'urbanisme aux expertises complémentaires : espace public et paysage urbain ; microclimatologie urbaine et adaptation aux changements climatiques ; stratégie urbaine et politique d'aménagement.

Table 1: Liste de participants à l'atelier World Café.

participant	expertise	société	ville
Pauline BARLIER	Conception et MOE architecturale et urbaine	Collectif Faro	Nantes
Nicolas BATAILLE	Consultant transition sociale et écologique	Auxilia Conseil	Nantes
Morgane COLOMBERT	Cheffe projet R&D	Efficacity	Paris
Matthieu DELMAS	Conception et MOE paysagère et urbaine	agence LALU	Nantes
Vincent HERTENBERGER	Conception et MOE urbaine espaces publics	agence TVK	Paris
Christian LECOUCVEY	Conception et MOE architecturale et urbaine	agence TICA	Nantes
Célia MAILFERT	Consultante environnement	Wigwam Conseil	Nantes
Alban MALLET	Transition écologique et climat	Nantes Métropole	Nantes
Matthieu THEAUDIN	Conception et MOE paysagère et urbaine	agence Phytolab	Nantes
Christoph VON FISCHER	AMO urbaine	Les Ateliers UP+ SCE	Nantes

Table 2: Liste d'intervenants à l'animation de l'atelier World Café.

intervenant	expertise	rôle	lien au projet
Anne BOSSE	Enseignante-chercheure ENSAN Ville et territoires	animatrice table	non
Kevin CHESNEL	Enseignant-chercheur ENSAN Sciences humaines et sociales pour l'architecture	rapporteur table	non
Céline DROZD	Chercheure ENSAN Ambiances	animatrice débat	oui
Thomas LEDUC	Chercheur CNRS Géomatique et analyses spatiales	rapporteur table	oui
Virginie MEUNIER	Enseignante-chercheure ENSAN Sciences et techniques pour l'architecture	rapporteuse table	non
Ignacio REQUENA-RUIZ	Enseignant-chercheur ENSAN Théorie et pratique de la conception architecturale et urbaine	animateur table	oui
Daniel SIRET	Chercheur ENSAN Ambiances	animateur table	oui

### **3 Table 1 : Quelles incidences du rafraîchissement localisé des espaces publics sur les visions territoriales ?**

La première table ronde invitait les participants à interroger les stratégies urbaines de rafraîchissement des espaces publics. Les échanges visaient à interroger dans le même temps les échelles, les lieux, les figures spatiales et les modalités de mise en œuvre opérationnelles (acteurs, outils, temporalités...) de ces stratégies de rafraîchissement.

A partir de la mise en discussion des stratégies urbaines et territoriales, il s'agissait notamment de questionner leur articulation aux différentes échelles, leurs modalités de mise en œuvre opérationnelle, mais aussi de pointer les enjeux que soulèvent ces stratégies en matière de justice spatiale et environnementale.

A l'issue de ces trois tables rondes de discussion, plusieurs éléments peuvent être soulignés en guise de synthèse.

#### **3.1 Des stratégies et figures de rafraîchissement localisées ?**

A quelles échelles pourraient se décliner des stratégies de rafraîchissement ? Les participants partagent l'idée qu'une approche à la « grande » échelle territoriale est déterminante pour penser les stratégies de rafraîchissement. Aussi, les actions localisées et ponctuelles gagneraient à s'inscrire dans des stratégies territoriales élargies. In fine, ils soulignent l'enjeu de connaissance de ces phénomènes et de leur représentation cartographique afin d'identifier les secteurs davantage soumis aux îlots de chaleurs ainsi qu'aux aléas liés au réchauffement climatique. Cela vise à apprêter des stratégies d'actions différenciées à l'échelle urbaine au regard des composantes spatiales (nature des espaces publics, nature du bâti, tissu résidentiel...), mais aussi sociales.

De la manière croisée, les participants pointent l'enjeu de mettre en place des stratégies de long terme sur les centres urbains denses — maillage de petites aménités de quartier — tout en s'appuyant sur des approches low-tech pour engager des actions à plus court terme, ne serait-ce que parce que ces approches appellent à une économie de moyen. Au-delà des centres-ville urbains denses, plusieurs situations territoriales ont été identifiées comme des espaces stratégiques.

Certains quartiers de grands ensembles apparaissent comme des espaces où la problématique des îlots de chaleur se trouve prégnante (cf. étude AURAN (2020)), néanmoins les participants ont pu souligner que leur composition urbaine et architecturale pouvait faciliter des actions de transformations dans la perspective des stratégies de rafraîchissement. Par ailleurs, les espaces périurbains constituent des espaces « ressources » en matière de fraîcheur par les aménités paysagères qui les composent. Néanmoins les dynamiques de périurbanisation, mais aussi de densification à l'œuvre dans ces territoires appellent une vigilance sur la gestion de ces ressources à long terme.

Ces différentes situations territoriales appellent à proposer de nouvelles lectures territoriales sur la gestion, la transformation des modèles urbains hérités et in fine des réponses spécifiques à y apporter. Toutefois, si l'action sur l'existant semble être la principale clé d'entrée, les nouvelles urbanisations — les ZAC ont notamment été évoquées — constituent également des espaces à enjeux. Grands ensembles, centres-ville, périphéries, la question d'une hiérarchisation des espaces publics à rafraîchir a ici été posée par les participants permettant de dépasser « l'option urbaine » de ces stratégies au profit d'une articulation avec une approche par les pratiques so-

ciospatiales (temps de la ville, usages...).

### **3.2 Comment gouverner la fraîcheur ?**

Au-delà des situations évoquées plus haut, les participants ont pu soulever un paradoxe entre la nécessité d'une approche à grande échelle, systémique pourrait-on dire, et les difficultés pour les acteurs publics d'intervenir sur le domaine privé (logement, activités...) qui compose une grande partie de nos territoires urbanisés. Le rôle du PLU — plus spécifiquement des PLUI — a été pointé à cet égard comme un outil pertinent par l'échelle de réflexion qu'il implique et les stratégies de long terme qui peuvent s'y déployer tant sur les espaces publics que privés. Par ailleurs, il est sans doute un lieu stratégique dans l'articulation des différentes trames (vertes, bleues, noires...) et notamment de leur articulation avec une potentielle trame de fraîcheur.

De plus, le rôle de la donnée dans les stratégies de planifications territoriales a été discuté par les participants. Si ces données, issues notamment de dispositifs de métrologies atmosphériques, facilitent une meilleure connaissance des phénomènes, la question de leur utilisation à des fins de gouvernement par des logiques de seuils est ici interrogée dans le cadre des politiques de rafraîchissement.

Au-delà de la planification territoriale, les participants ont tenu à souligner l'enjeu d'une approche par les modes de gestion — notamment des espaces végétalisés — qui affectent directement les services des collectivités territoriales. Les figures associées comme les forêts urbaines, les rives mais aussi les espaces ouverts appellent d'une part à une gestion différenciée de ces espaces, mais aussi à des stratégies de végétalisation qui tiennent davantage compte de leur durée de vie et de leur capacité d'adaptation aux effets du réchauffement climatique. De fait, ces espaces végétalisés constituent tout autant un potentiel dans les stratégies de rafraîchissement qu'un risque (incendies de forêt...) à prendre en compte.

Enfin, en complément d'une approche planificatrice, la logique d'action expérimentale (débordurage, cours oasis, végétalisation de rues...) a été soulignée comme pouvant permettre de nourrir des stratégies territoriales élargies (hypothèse du retournement d'infrastructures routières...), mais aussi d'identifier des tensions et conflits d'usages à l'œuvre pour les projets futurs.

### **3.3 Appréhender les inégalités sociospatiales**

Les inégalités sociospatiales, en matière d'accès à la fraîcheur, apparaissent comme un enjeu central de ces stratégies urbaines selon les participants. Elles impliquent de mieux les identifier et de veiller à les réduire dans le cadre des politiques mises en œuvre. Les enjeux relèvent ici tout autant du diagnostic et de la compréhension des dynamiques que de leur représentation à grande échelle. Un travail cartographique précis associant données physiques et socio-économiques/démographiques permettrait davantage d'interroger ces inégalités en matière d'îlots de chaleur et d'accès à la fraîcheur.

Les discussions montrent une articulation forte entre des dynamiques sociospatiales, des logiques de planification, d'aménagement et de projets. Dans ce contexte, les participants se demandent par quoi passe le droit à la fraîcheur ? Au regard des dynamiques de captations foncières dont pourraient faire l'objet les espaces dits de fraîcheur, d'un emballement immobilier associé, comment garantir l'accès à ces espaces de fraîcheur en ville, mais aussi en dehors des centres urbains de manière à réguler, compenser les logiques de marchés ?

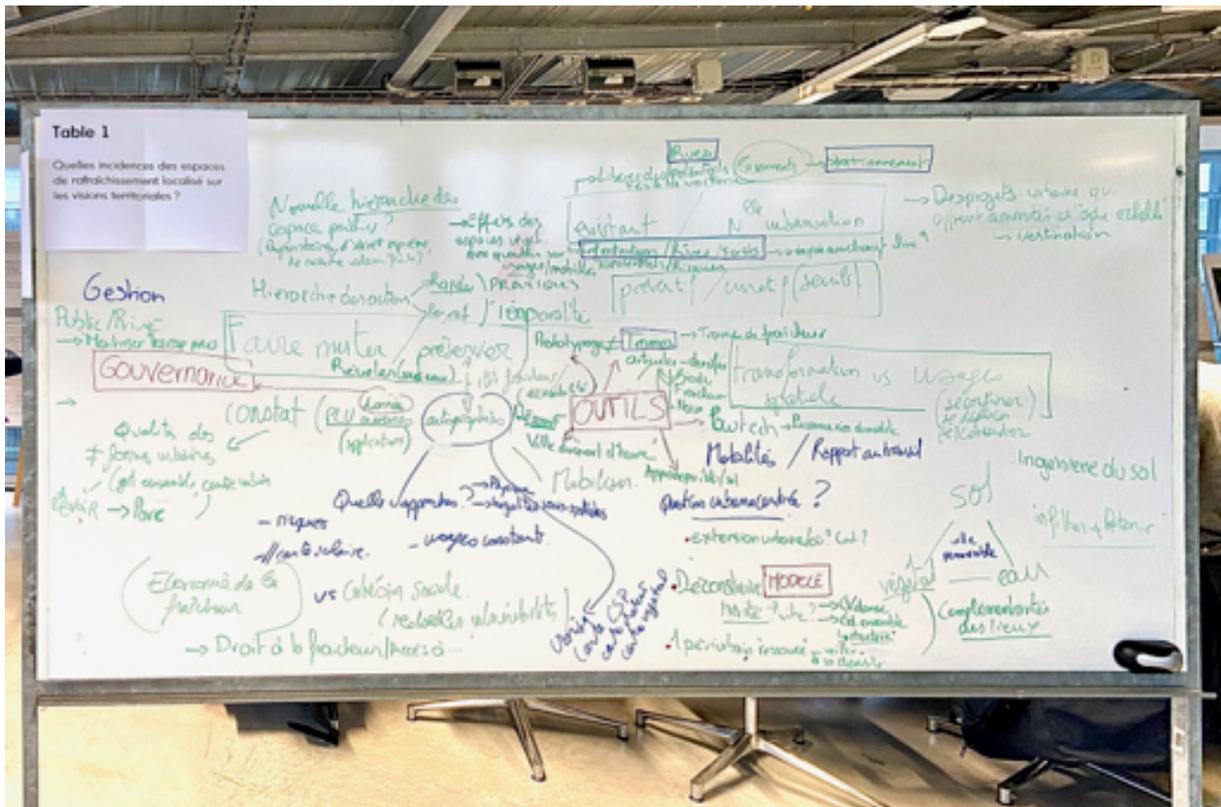


Figure 1: Tableau de la table 1 à l'issu des trois tours de débats

## **4 Table 2 : Quelles modalités de rafraîchissement localisé pour l'avenir des espaces publics ?**

Autour de cette table, les participants ont été invités à identifier et analyser des modalités de rafraîchissement localisé pour l'avenir des espaces publics. Il s'agit de mieux comprendre les limites et potentialités des modalités de rafraîchissement déjà expérimentées par les participants pour faire face à un réchauffement de nos villes. Les participants ont pour consigne de partager leurs expériences autour des stratégies et de la mise en œuvre des espaces publics rafraîchissants, avec toutefois une approche critique sur la production globale.

### **4.1 La fraîcheur comme ressource urbaine à valoriser par le projet**

D'après les participants, la fraîcheur semble être elle-même une ressource du territoire en disparition et qu'on doit préserver. Concepteurs, citoyens et décideurs doivent avoir une conscience accrue de la fraîcheur. Le rapport de la ville aux vents dominants, à la préservation de l'ombre du végétal ou du bâti, à l'inertie thermique des masses bâties, le lien à la terre et à l'humidité sont à prioriser dans cette lecture climatique de la ville.

Pour l'aménagement de l'espace public dans les villes centro-européennes, deux enjeux majeurs concentrent l'attention des participants : retrouver le sol naturel et renforcer la canopée urbaine. Pour le premier, le rapport à la terre naturelle et à la gestion, au stockage et au drainage de l'eau en surface est mis en avant. Il est question de gestion d'eau pluviale à ciel ouvert, de trame d'eau de surface, du rapport sensible à la terre humide. Cependant, la méconnaissance des sous-sols de la ville par les métropoles (démultiplication des réseaux, types de sol et carence de pleine terre) et les tensions autour de la ressource en eau sont un frein. Pour le second, il a été souligné l'importance de l'ombre, du bâti ou du végétal, donnant lieu à la notion de ville semi-couverte en été (ex. Séville, Turin), qui doit être aussi imaginée en intersaisons ou de manière réversible. Néanmoins, l'approche par le végétal comme solution dite passive est encore à questionner du fait de la consommation d'eau et de la résistance des essences aux nouvelles conditions climatiques de nos villes. Les conditions actuelles, avec des hivers encore relativement froids et des étés avec des pics de chaleur, rendent difficile le choix des essences.

Existe-t-il un droit à la fraîcheur en ville dans une ville amenée à surchauffer ? Dans l'affirmative, est-ce une responsabilité collective et partagée entre tous (citadins, entreprises, aménageurs), ou est-ce une responsabilité publique ? Verrons-nous advenir un Ministère ou des « brigades de la fraîcheur » ? Est-ce une préoccupation exclusive d'ingénieur appelant à un solutionnisme technologique ou est-ce l'affaire de tous (cf. les obligations de déneigement de trottoir face au logement lorsqu'un arrêté municipal l'impose) ?

### **4.2 Transformer l'espace public en profondeur**

Les participants s'accordent sur le fait qu'une transformation en profondeur des espaces publics de nos villes est impérative pour s'adapter aux nouvelles conditions d'été. Les participants distinguent trois temporalités du projet d'espace public qui permettraient d'agir sur cette transformation. D'abord, le temps long traditionnel du projet urbain, qui doit impliquer ici des transformations de fond dans le rapport au sol, au végétal, et aux ressources de la fraîcheur. Ensuite, le temps court de l'urbanisme tactique qui peut apporter des solutions transitoires, notamment pour des périodes de crise. Il est cependant noté que cette approche mène parfois à une entrée « techno-solutionniste » sous la bannière de l'expérimentation qui devrait rester ponctuelle.

Dans ce cadre-là, l'adaptation des usages et des temporalités de la vie urbaine devrait pouvoir s'installer davantage dans la gouvernance de la ville. Enfin, entre ces deux temporalités, une autre approche émerge, avec des transformations profondes réalisées sur une temporalité relativement courte, illustrée par la désimperméabilisation et l'aménagement des cours d'école.

La dimension d'un tel défi conduit les participants à s'accorder sur la nécessité de construire une approche ciblée qui permettrait d'avoir un plus grand impact social tout en faisant un usage intelligent des ressources en tension. Dans l'adaptation de la ville existante, il convient de distinguer les espaces dits clés, qui vont concentrer les ressources et s'attacher à améliorer le ressenti thermique, des espaces de parcours, qui vont permettre d'atteindre ces lieux. Dans cette démarche, il faudrait rester attentifs à éviter les inégalités sociospatiales produites par une concentration des ressources dans des secteurs favorisés.

Une approche ciblée et progressive doit permettre de cadrer l'usage des ressources en eau, matière et énergie pour le rafraîchissement des espaces publics. Celle-ci pourrait même amener, dans le cas d'une crise, à la nécessité d'arbitrer pour identifier les lieux à rafraîchir et les pratiques à favoriser et, inversement, pour identifier les lieux et les pratiques à « sacrifier ».

### **4.3 Le projet d'espace frais comme lieu habité**

Au-delà des aspects techniques et écologiques de la fraîcheur en ville, les participants soulignent le besoin de concevoir les espaces publics, et notamment les espaces de rafraîchissement comme une expérience sociale et sensible, notamment pour faire face au risque de repli et d'uniformisation sensorielle apporté par la climatisation. Ils mettent en avant la nécessité de replacer la socialisation de ces lieux au cœur de la question dans l'objectif d'éviter une entrée purement physiologique. La fraîcheur de certains espaces extérieurs deviendrait alors un levier pour amener les habitants à sortir de leur foyer. Pour cela, la lisibilité de l'offre climatique de l'espace public semble à améliorer, notamment en termes de fraîcheur. Comment faire en sorte que les citoyens apprennent (ou réapprennent) à lire la ville en termes climatiques ? Existe-t-il une carte mentale de la fraîcheur ? Est-elle « naturelle » (implicite) pour les citoyens des villes de moyenne latitude, où faut-il l'orienter ou l'assister avec des outils (ex. numériques, parcours fraîcheur) ? D'autre part, la sensibilisation des citoyens est nécessaire pour qu'ils assument un rôle actif. Il est question d'activer les espaces aussi bien l'été que l'hiver, de partage d'usages par alternance saisonnière ou hebdomadaire.

Les participants proposent d'imaginer le projet d'espace public comme une fraîcheur enveloppante. Le rapport au sol et à la nature doit contribuer à l'envie d'usage des lieux frais. Il s'agit ainsi d'imaginer l'enveloppe climatique des espaces publics. L'expérience d'un espace public frais serait donc celle de l'entrée ou de la traversée d'un espace (climatique) suffisamment volumineux pour générer une sensation d'enveloppement. Elle implique un effet de masse et est associée à une notion de seuil et de temps de parcours suffisant. Cette expérience doit contribuer à l'envie d'usage des citoyens. Le rapport sensoriel à la terre humide et à l'ombre dense est évoqué.

Cependant, certains participants alertent sur le besoin de polyvalence. Par exemple, nos rues ont été conçues pour évacuer les eaux de pluie (c'est notamment le cas à Paris). Doit-on imaginer une large déconnexion des réseaux d'évacuation des eaux pluviales ? Et, de manière plus générale, faut-il systématiser une polyvalence en ville d'espaces présentant des réponses climatiques diversifiées, c'est-à-dire d'espaces présentant des qualités à certaines saisons et pas à d'autres ?

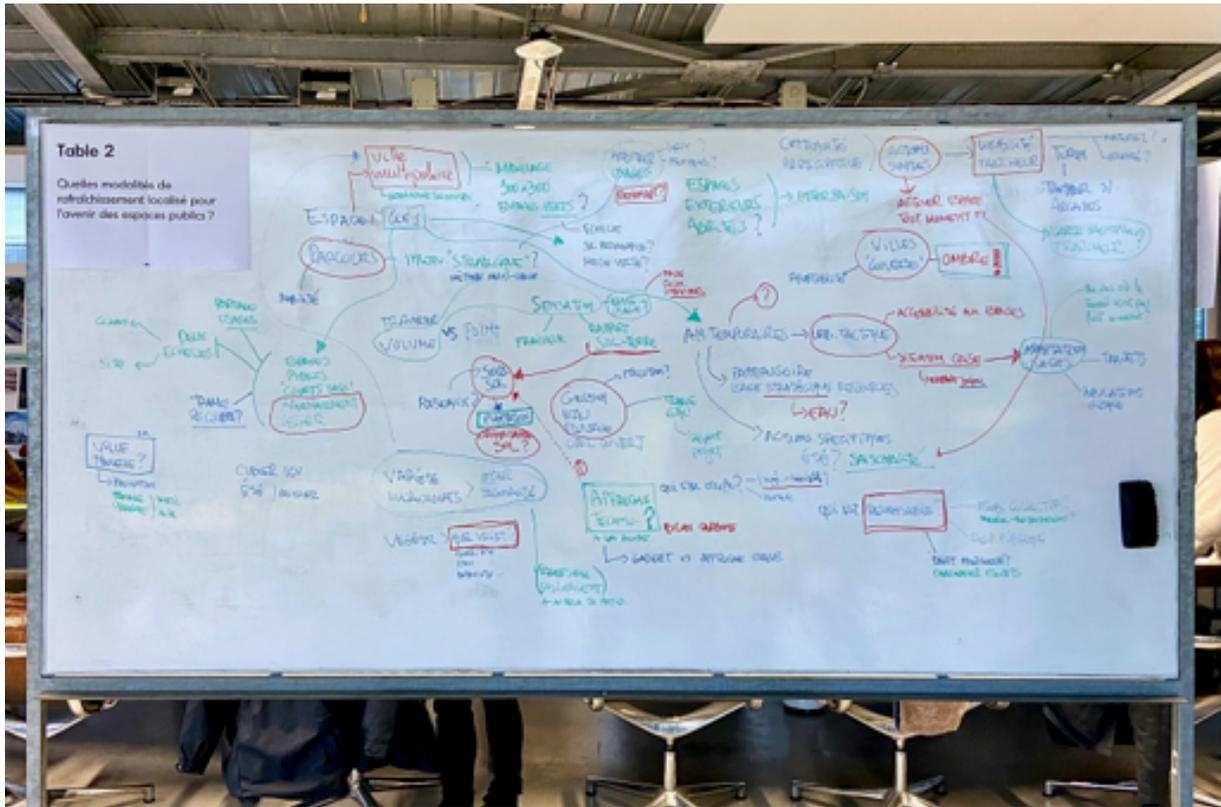


Figure 2: Tableau de la table 2 à l'issu des trois tours de débats

## **5 Table 3 : Comment penser les espaces de rafraîchissement localisés à travers les imaginaires et représentations de la fraîcheur en ville ?**

La table 3 invitait les participants à analyser les stratégies de rafraîchissement urbain du point de vue des imaginaires et représentations de la fraîcheur en ville. Notre objectif était d'amener les participants à exprimer leurs pratiques et références dans les manières de décrire les espaces frais, mais aussi à exposer une approche critique de ces pratiques. A l'issue de ces trois « rounds » de discussion, deux grandes thématiques de synthèse peuvent être dégagées. La première porte sur les formes narratives de la fraîcheur en ville et la seconde sur les références de la fraîcheur urbaine, entre parcours expérientiels et acclimatation des terroirs.

### **5.1 Formes narratives de la fraîcheur en ville**

Les participants précisent que la notion d'îlot de fraîcheur est devenue un standard de la commande publique en matière d'aménagement des espaces urbains. Elle fait partie de la « liste des courses » du cahier des charges d'un projet. Les collectivités adorent ce terme qui permet de donner une perspective positive au problème des îlots de chaleur urbains.

Les participants sont unanimes pour penser que c'est à travers le récit du projet dans son ensemble que sont créés les imaginaires liés à la fraîcheur. La fraîcheur n'est pas un récit en soi, mais une dimension du récit du projet. Le projet propose un imaginaire, ce n'est pas un alignement de solutions techniques. Parler de « solutions de rafraîchissement » serait le signe d'un échec du projet qui ne réussirait pas, dans son ensemble, à garantir l'impératif de fraîcheur en été, un pansement sur une situation qui ne marche pas. Cependant, les participants pointent le risque d'expressions trop imagées, du jargon ou du trop-plein de poésie dans l'expression de la fraîcheur qui peuvent conduire à des mauvaises réponses. La narration de la fraîcheur ne doit pas tendre vers un « bullshit » jargonnant.

Par définition, le récit du projet met en avant un imaginaire positif. Les politiques publiques développent des récits mesurés pour ne pas faire peur aux citoyens. Le vocabulaire est choisi, par exemple on n'utilise pas le mot « extrême » comme dans l'expression « chaleur extrême ». Des perspectives apaisantes sont mises en avant : « vivre mieux avec un climat chaud », « faire face aux aléas climatiques », etc. Les participants remarquent que cet imaginaire urbain apaisé entre en contradiction avec les formes d'anxiété climatique qui se développent dans la société en lien avec le changement climatique. La différence de positionnement viendrait ici du pouvoir d'agir : le grand public, qui n'a pas ou peu de pouvoir d'agir, développerait un imaginaire climatique anxigène que les acteurs des projets et les « sachants » s'efforceraient de contrer à travers un discours apaisant. Sur cette question, on évoque la nécessité pour les collectivités d'impliquer le public pour construire un récit partagé en lien avec les attentes et pratiques des citoyens.

### **5.2 Parcours expérientiels ou acclimatation des terroirs ?**

Les participants s'accordent à dire que la fraîcheur en ville est fortement liée à la nature en ville, les solutions sont « dans » le végétal. Après avoir construit la ville sur la ville, il faut désormais « construire la nature sur la ville ». Attention cependant aux effets de mode sur le verdissement de la ville comme les façades végétalisées qui ne semblent pas être une bonne solution.

A quels imaginaires renvoie ce lien entre nature et fraîcheur ? Deux « écoles » apparaissent à travers les propos des participants. D'un côté, la fraîcheur est associée à l'exotisme, au voyage, aux jardins extraordinaires ou à l'imaginaire des forêts, cascades, rivages, montagnes et biotopes lointains, supposés représenter une forme d'idéal microclimatique dans des environnements chauds. L'aménagement de la carrière Miséry en « jardin extraordinaire » à Nantes (projet de l'agence Phytolab dont un des membres participait à l'atelier) a servi d'archétype de cette approche. Sont mis en avant ici les « parcours expérientiels » permis par de tels aménagements et les plaisirs (temporaires) associés.

A l'opposé de cette approche associant fraîcheur et imaginaires lointains de l'insolite et de l'exubérance sauvage, une autre école défend la nécessité de considérer ensemble fraîcheur et sobriété. Il s'agit ici de défendre une forme de « localisme de la fraîcheur » dans une perspective de transition, de renvoyer à l'imaginaire des terroirs, aux matériaux locaux, aux traditions constructives. La sobriété consisterait alors à réinvestir les espaces du quotidien, ce qui est déjà là (les rues, les sols), à ramener de la biodiversité et adapter les modes de vie citadins aux climats. L'imaginaire de la fraîcheur convoque alors celui d'une ville aux rythmes renouvelés, selon les saisons et les temporalités climatiques. Les ambiances urbaines de référence sont celles des pratiques de pays méditerranéens, comme lorsque les citadins sortent les tables et les chaises dans la rue le soir pour « tomar la fresca » (prendre le frais), repoussant temporairement les véhicules hors de l'espace public.

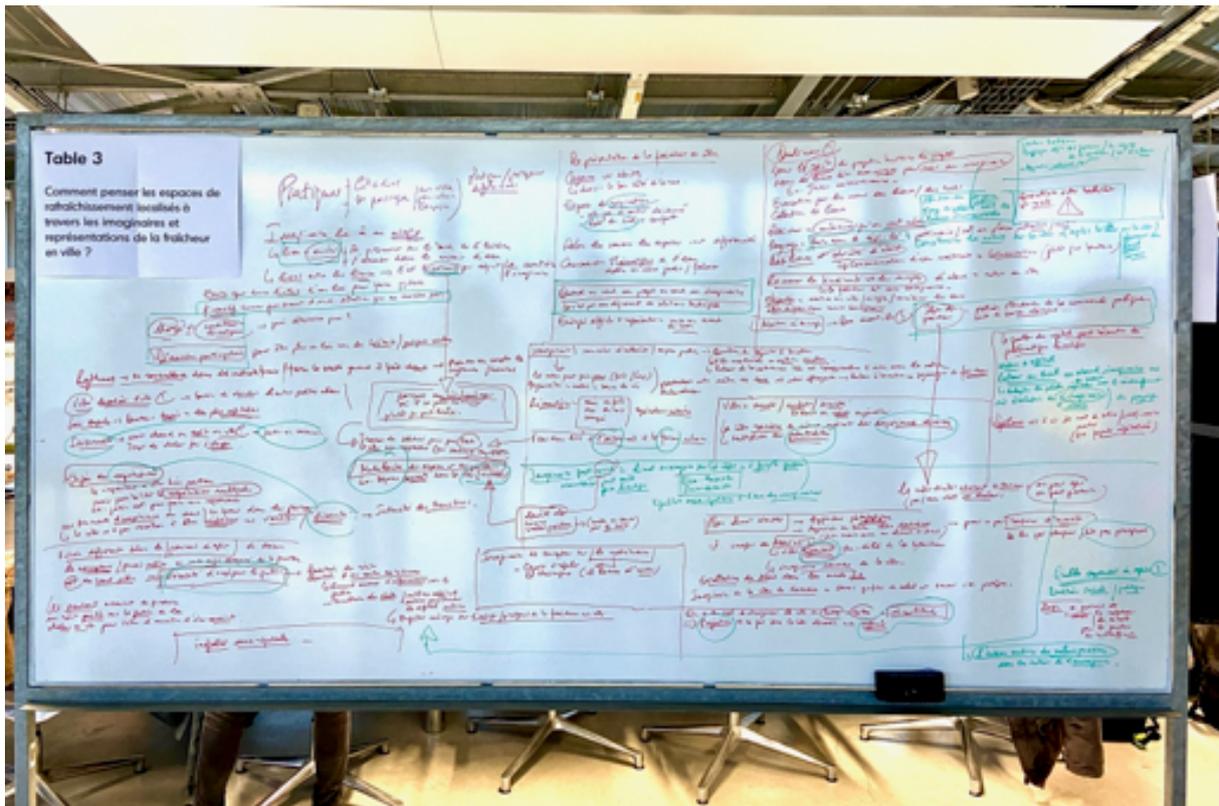


Figure 3: Tableau de la table 3 à l'issue des trois tours de débats

## 6 Discussion

### 6.1 Du besoin d'une gouvernance spécifique pour l'adaptation au réchauffement urbain

Les questionnements soulevés par les participants sur la gouvernance de la fraîcheur en ville font écho aux réflexions de (Keith et al., 2019) sur les difficultés de gouvernance pour agir contre le réchauffement urbain. Les auteurs distinguent cette problématique des autres aléas climatiques pour plusieurs raisons : le manque historique de gouvernance et de structure réglementaire, la complexité spatiale et temporelle du phénomène, la combinaison avec d'autres risques et impacts, ainsi que l'invisibilité du phénomène. L'urgence de l'adaptation n'est pas appréhendée avec des structures adaptées, comme c'est le cas pour les inondations par exemple. L'initiative de l'Arsht-Rock Foundation et de l'Extreme Heat Resilience Alliance de créer le poste de « Chief Heat Officer » reflète ce besoin (Arsht-Rock, 2023). Ces personnes sont chargées d'accélérer les efforts de protection contre la chaleur et d'initier des travaux pour réduire les risques, accélérant ainsi l'adaptation à la chaleur à court terme et jetant les bases d'une résilience durable à moyen et à long terme. Actuellement, six villes bénéficient de ce type de poste : Athènes (Grèce), Florida (États-Unis), Santiago de Chile (Chili), Freetown (Sierra Leone), Melbourne (Australie) et Monterrey (Mexique).

Parallèlement, les participants ont ouvert le débat entre une responsabilité collective et une responsabilité des pouvoirs publics. L'implication de citoyens, entreprises et aménageurs rappelle les obligations de déneigement des trottoirs face aux habitations lorsqu'un arrêté municipal l'impose ; tandis que la prise en charge par l'administration évoque la création d'un nouveau service public dédié à la fraîcheur. Cependant, le besoin d'impliquer les citoyens au-delà de l'information et de la sensibilisation semble incontournable dans l'état de l'art (Tavares et al., 2020).

### 6.2 Le rafraîchissement ponctuel dans son territoire

La compréhension des stratégies d'adaptation, telles que le rafraîchissement ponctuel des espaces publics, mérite d'être discutée à plusieurs échelles interconnectées. D'une part, l'échelle territoriale soulignée par les participants interroge la place des puits de fraîcheur dans la ville et ses alentours. Il s'agit ici de questionner la forme urbaine en lien avec les parcs ou forêts urbaines, les grandes surfaces d'eau et les corridors de ventilation. Leur effet de rafraîchissement global des zones limitrophes a déjà été étudié par plusieurs travaux de recherche. Les travaux de (Aram et al., 2019) et (Oliveira et al., 2011) indiquent que les grands parcs urbains (superficie > 10 ha) conduisent à un effet de rafraîchissement plus intense et plus étendu. Les simulations de (Jacobs et al., 2020) montrent que les effets thermiques locaux de petites étendues d'eau (ex. petits plans d'eau, canaux, étangs) sont négligeables et que seuls les plans d'eau permettant un recul d'au moins 200 m ou plus induisent des effets thermiques perceptibles. Bien que les plans des trames vertes et bleues, davantage conçues pour assurer les continuités écologiques, intègrent une partie de ces espaces, la ressource en fraîcheur reste peu valorisée dans les documents d'aménagement. Des manuels pratiques comme (Campbell et al., 2021 ; C40-cities, 2021) pointent notamment les corridors ou couloirs de ventilation urbaine. Il s'agit des grandes percées urbaines, construites ou imposées par le territoire, qui peuvent canaliser l'air frais à travers la ville et étendre le rafraîchissement. En effet, ces corridors peuvent compléter une trame de lecture du territoire et structurer les itinéraires adaptés aux périodes de forte chaleur.

L'effet combiné du réchauffement climatique et des îlots de chaleur urbains est reconnu pour exacerber la surchauffe urbaine (ex., Santamouris et Kolokotsa, 2015). Les effets de la forme urbaine sur la captation du rayonnement solaire et le piégeage radiatif sont connus depuis longue date ; cependant, les tentatives de classement systématique des tissus urbains sous ce prisme restent relativement récentes, notamment avec la notion de Local Climate Zones (LCZ). Les quatre dimensions fondamentales selon Stewart et Oke (2012) (hauteur et rugosité, disposition spatiale, couverture du sol, inertie thermique des matériaux), caractérisent le ressenti thermique des formes urbaines archétypiques, par exemple les centres-villes historiques, les grands ensembles de la modernité et les zones pavillonnaires. A l'échelle du quartier, l'imbrication de ces formes urbaines dans une trame de sources de fraîcheur appelle à des analyses différenciées des besoins de rafraîchissement ponctuel. A l'échelle de l'îlot, le travail de (Kluck et Boogard, 2020) met en valeur le potentiel de fraîcheur spécifique à chaque forme urbaine - par exemple, l'abondance d'espaces publics avec des surfaces de pleine terre accessibles dans les aménagements d'après-guerre, ou l'inertie thermique et les rez-de-chaussée frais des bâtiments avant le 19<sup>e</sup> siècle.

Au croisement de ces deux échelles avec des temporalités d'action à moyen et long terme, le rafraîchissement ponctuel apparaît comme une stratégie d'adaptation permettant de concentrer les moyens (humains et ressources) sur des territoires limités. Si les espaces privés, notamment les zones vertes arborées, jouent un rôle dans le rafraîchissement, il est essentiel que tous les citoyens puissent profiter des avantages offerts par des espaces variés et répartis sur le territoire, ainsi que l'ont souligné les participants à l'atelier. Pour garantir l'usage de ces espaces, en particulier dans les quartiers défavorisés à cet égard, les aménageurs doivent veiller à leur accessibilité à pied. Par exemple, le Trust for Public Land américain préconise une distance de marche de 10 minutes (environ 800 mètres) pour trouver un lieu frais (notamment un parc public), tandis que (Kluck et Boogard, 2020) recommandent des distances d'environ 200 mètres. Bien que ces métriques puissent être remises en question à la lumière des deux points précédents, elles soulignent l'importance d'une approche en réseau.

### **6.3 Des lieux frais à concevoir par le sol et par l'ombre**

La discussion portant sur les modalités de rafraîchissement ponctuel a conduit à une mise en perspective du projet d'espace public en relation avec les enjeux de sobriété et les grandes tendances d'aménagement actuelles.

Le lien du citoyen à la terre a été fréquemment évoqué par les participants. Les principaux enjeux consistent à retrouver ce lien, à retenir l'eau, et à habiter un sol perméable. Les actions de désimperméabilisation sont soulignées à ce titre, principalement portées par les métropoles dans des zones encore trop limitées de l'espace public (ex. bords de trottoir), elles sont parfois porteuses d'une plus grande ambition, comme dans le cas des cours d'école, avec aussi une dimension pédagogique. Ces actions peuvent avoir un impact significatif sur un lieu à court terme et de manière localisée (Université Paris Cité, 2021). En effet, la désimperméabilisation des sols n'est pas seulement une opération technique, c'est une façon de considérer la nature des sols en surface et de mieux les comprendre pour aménager autrement (Henry, 2022).

La perméabilité du sol interroge également la question du rapport à l'eau dans l'espace public, convoquée par les participants aussi bien pour la préservation de la ressource hydrique que pour sa capacité à préserver l'humidité et donc à rafraîchir l'ambiance. L'eau dans l'espace public peut être visible ou invisible, à l'état liquide ou gazeux, produisant des effets sensibles en lien avec une approche multisensorielle de la fraîcheur (thermique, olfactive, sonore). De ce fait, la

gestion des eaux de pluie semble un premier niveau du projet de sol, avec leur gestion visible en surface, mais aussi avec le dévoilement des eaux en sous-sol - ex., eaux souterraines ou canalisées (Laboy, 2017). L'utilisation directe de l'eau pour le rafraîchissement, par exemple à travers les fontaines, les brumisateurs ou les pataugeoires, est évoquée par les participants comme un apport ponctuel, qui peut venir marquer les temporalités de l'espace public tel que (Ivers, 2018) le suggère. Cependant, la mobilisation de la ressource en eau, actuellement en tension, est discutée.

Le rapport à l'ombre et à la canopée qui la produit est au cœur des préoccupations des participants à l'atelier. Augmenter le taux de couverture végétale des espaces publics constitue un enjeu central pour réduire le rayonnement solaire incident sur les surfaces de sol et de murs. La matérialité et la temporalité de création de cette canopée interrogent les participants. D'une part, les qualités « ombrières » de la ville dense traditionnelle, avec ses passages, ses arcades, ses places resserrées à l'ombre, sont connues ; tous des dispositifs urbains permettant de maximiser la durée d'ombrage sur les espaces publics en été et de préserver une fraîcheur thermiquement efficace (Middel et al., 2016). D'autre part, la contribution des arbres à la fraîcheur de l'espace public, en fournissant de l'ombre et en produisant de l'évapotranspiration via la photosynthèse, est aussi connue (Taha, 1997). Les participants soulignent aussi la qualité multisensorielle des espaces abrités par le végétal et les bénéfiques pour la biodiversité. Dans le cadre des plans « Canopée » promus par l'Europe, des villes Nantes ou Paris, avec des taux de canopée respectifs de 20,4 % et 28,9 % de leur sol public, se sont fixés des objectifs d'augmentation à moyen ou long terme (EEA, 2021).

Cependant, les limites connues de l'approche par le végétal sont très peu mentionnées dans les discours des participants à l'atelier prospectif. Selon (Czaja et al., 2020), le pouvoir rafraîchissant d'un arbre dépend de sa taille et de sa vitalité, toutes deux conditionnées par la qualité de son environnement de plantation. Les auteurs soulignent la difficulté à concilier densité urbaine et végétalisation en raison du manque d'accès à la lumière et de la nature des sols (disponibilité en eau et en nutriments ainsi que l'épaisseur du sol). Cet impératif reste complexe à accorder avec les conditions du milieu urbain dense, rarement pourvu d'accès à la pleine terre et des sous-sols encombrés de réseaux. Il convient donc de prendre soin du patrimoine arboré existant, de planter dans les meilleures conditions pour assurer la longévité des arbres et de diversifier les essences pour limiter les mortalités dues aux pathogènes, à l'amplitude des températures et aux sécheresses (Léonardon, 2021). Par ailleurs, les temporalités de l'arbre et du projet urbain peuvent être contradictoires, les arbres plantés de petite taille s'adaptent mieux aux contraintes de leur environnement et deviennent ainsi plus résistants (Léonardon, 2021), mais leurs effets thermiques n'apparaissent que longtemps après leur plantation.

Ces aspects s'intègrent à l'ambition fondamentale de tout espace public, ici notamment colorée par l'adaptation au réchauffement urbain : préserver la qualité de vie des espaces publics en conditions d'été. Cet enjeu est central dans l'aménagement urbain et des espaces publics, pour lesquels la conception d'espaces adaptés au climat à venir est une manière de continuer à garantir un mode de vie urbain sain, en particulier à la lumière de la fréquence et de la gravité des phénomènes de chaleur plus extrêmes (Tavares et al., 2020). De ce fait, les participants à l'atelier évoquent le besoin de combiner différentes stratégies de rafraîchissement afin de permettre une meilleure appropriation par les citoyens, chacun trouvant son espace de confort ; ce qui par ailleurs apporte un plus grand potentiel de résilience face aux incertitudes climatiques (Santamouris et Kolokotsa, 2016).

## **6.4 L'expérience des espaces frais en ville : l'ordinaire et l'extraordinaire**

La fraîcheur est progressivement intégrée dans la narration du projet urbain pour réunir « en une trame consistante des personnes, des espaces, des objets, des activités et des images éparpillées » (Uyttenhove et al., 2021). Le récit des concepteurs, anticipant des situations futures, ne peut aujourd'hui éviter d'intégrer l'adaptation des citoyens aux conditions estivales à venir. Deux imaginaires se développent, celui d'une expérience extraordinaire par l'évocation et celui d'une acclimatation ordinaire attachée aux ressources propres du territoire.

Ces deux imaginaires convoquent néanmoins une approche centrée sur l'humain, immersive et multisensorielle de la fraîcheur en ville. Il est en effet communément admis par plusieurs travaux que, au-delà de la recherche de la zone thermique optimale pour le confort, dans la pratique de l'espace public, les citoyens cherchent davantage des espaces thermiques agréables (Shooshtarian, 2019 ; Auliciems, 1981). Dans ce sens, les travaux de (Heschong, 1979) et (Erwine, 2017) mobilisent des approches anthropologiques qui soutiennent l'hypothèse selon laquelle une expérience agréable de l'espace fait partie de la compréhension même de l'espace public. Les espaces de rafraîchissement localisé, grâce à la variation des conditions climatiques proposées, renforcent les conditions d'une expérience immersive incarnée de la ville, régie par l'activité sensorimotrice dynamique de l'organisme humain dans son ensemble (Jelić et al., 2016). Les piétons ne sont pas de simples spectateurs de la scène urbaine, mais des acteurs qui interagissent avec l'espace.

## 7 Conclusions

Ce travail collectif de prospective urbaine a permis de comprendre l'horizon des stratégies de rafraîchissement dans la ville du point de vue des acteurs de l'aménagement de l'espace public. Sur la base d'une méthode de type World café, nous avons pu aborder trois questions : l'incidence sur les visions territoriales, les modalités de rafraîchissement pour l'avenir des espaces publics et les imaginaires et représentations de la fraîcheur en ville.

Au-delà des points de discussion présentés ci-avant, ce travail nous éclaire sur la difficulté à articuler les échelles temporelles et spatiales du rafraîchissement dans le quotidien du projet urbain.

Un travail avec des acteurs d'autres territoires, soumis à des situations d'urgence plus manifestes, pourrait mettre en perspective cet atelier afin de mieux comprendre si les temporalités du discours porté par les intervenants se trouvent bouleversées face aux enjeux d'un climat plus extrême.

En effet, comme le 6e rapport du GIEC (IPCC, 2022), et son résumé général (IPCC, 2023), l'ont montré, les jeunes générations seront forcément soumises à une hausse d'intensité et de fréquence des événements de chaleur extrêmes, mais aussi à des conditions normales climatiques plus chaudes. Ceci pointe le besoin d'une adaptation rapide des villes aux conditions changeantes pour continuer à héberger ses citoyens, quels que soient la latitude et le climat de départ. Ce qui peut s'apparenter comme peu extrême pour des populations du sud de l'Europe peut l'être pour celles du nord. La transformation des formes urbaines et la renaturation des villes étant des processus dont les résultats seront vécus à moyen et long terme, il est urgent d'agir dans une temporalité courte, permettant l'adaptation des populations actuelles, sans pour autant mettre en péril l'avenir des nouvelles générations.



Figure 4: Image prise du moment des débats

## Références

- Aram, F., Higuera García, E., Solgi, E., Mansournia, S., 2019. Urban green space cooling effect in cities. *Heliyon* 5, e01339. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01339>
- Arsht-Rock, 2023. Chief Heat Officers. Arsht-Rock. URL <https://onebillionresilient.org/project/chief-heat-officers/> (consulté le 3.21.2023).
- Auliciems, A., 1981. Towards a psycho-physiological model of thermal perception. *Int J Biometeorol* 25, 109-122. <https://doi.org/10.1007/BF02184458>
- AURAN, 2020. 40 °C à l'ombre : Faut-il craindre de vivre dans un climat plus chaud ? (Note de synthèse), Les synthèses de l'Auran. AURAN, Nantes.
- C40-cities, 2021. Urban Cooling Toolbox. C40 Cities, Copenhagen.
- Campbell, I., Sachar, S., Mesiel, J., Nanavatty, R., 2021. Beating the heat: A sustainable cooling handbook for cities. United Nations Environment Programme, Nairobi.
- Czaja, M., Kofton, A., Muras, P., 2020. The Complex Issue of Urban Trees—Stress Factor Accumulation and Ecological Service Possibilities. *Forests* 11, 932. <https://doi.org/10.3390/f11090932>
- EEA, 2021. Urban tree cover — European Environment Agency [WWW Document]. European Environment Agency. URL <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/dashboards/urban-tree-cover> (consulté le 3.21.2023).
- Erwine, B., 2017. Creating sensory spaces: the architecture of the invisible. Routledge, Taylor & Francis Group, New York.
- Henry, P., 2022. Des tracés aux traces : pour un urbanisme des sols. Editions Apogée, Paris.
- Heschong, L., 1979. Thermal delight in architecture. MIT Press, Cambridge.
- IPCC, 2023. Synthesis report of the sixth assessment report AR6. IPCC.
- IPCC, 2022. Climate Change 2022. Mitigation of Climate Change. Full report (No. 6). IPCC.
- Ivers, B.C., 2018. Staging urban landscapes: the activation and curation of flexible public spaces. Birkhäuser, Basel.
- Jacobs, C., Klok, L., Bruse, M., Cortesão, J., Lenzholzer, S., Kluck, J., 2020. Are urban water bodies really cooling? *Urban Climate* 32, 100607. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100607>
- Jelić, A., Tieri, G., De Matteis, F., Babiloni, F., Vecchiato, G., 2016. The Enactive Approach to Architectural Experience: A Neurophysiological Perspective on Embodiment, Motivation, and Affordances. *Front. Psychol.* 7. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00481>
- Keith, L., Meerow, S., Wagner, T., 2019. Planning for Extreme Heat: A Review. *J. of Extr. Even.* 06, 2050003. <https://doi.org/10.1142/S2345737620500037>
- Kluck, J., Boogard, F., 2020. Climate resilient urban retrofit at street level, in: Climate resilient urban areas : covariance, design and development in coastal delta cities. Palgrave Macmillan, p. 45-66.
- Laboy, M., 2017. On Groundwater: Invisible Architectural Environments. *Journal of Architectural Education* 71, 232-237. <https://doi.org/10.1080/10464883.2017.1340783>
- Léonardon, J., 2021. Concilier plantations et constructions en ville • Articles [WWW Document]. PCA-STREAM. URL <https://www.pca-stream.com/fr/articles/www.pca-stream.com/fr/articles/concilier-plantations-et-constructions-en-ville-156> (consulté le 4.3.2023).
- Middel, A., Selover, N., Hagen, B., Chhetri, N., 2016. Impact of shade on outdoor thermal comfort—a seasonal field study in Tempe, Arizona. *Int J Biometeorol* 60, 1849-1861. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1172-5>
- Oliveira, S., Andrade, H., Vaz, T., 2011. The cooling effect of green spaces as a contribution to the mitigation of urban heat: A case study in Lisbon. *Building and Environment* 46, 2186-2194. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.04.034>
- Santamouris, M., Kolokotsa, D., 2016. Urban Climate Mitigation Techniques. Routledge, London.
- Santamouris, M., Kolokotsa, D., 2015. On the impact of urban overheating and extreme climatic conditions on housing, energy, comfort and environmental quality of vulnerable population in Europe. *Energy and Buildings* 98, 125-133. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.08.050>
- Shooshtarian, S., 2019. Theoretical dimension of outdoor thermal comfort research. *Sustainable Cities and Society* 47, 101495. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101495>
- Stewart, I.D., Oke, T.R., 2012. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 93, 1879-1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
- Taha, H., 1997. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and Buildings* 25, 99-103. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(96\)00999-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(96)00999-1)
- Tavares, S., Sellars, D., Mews, G., Dupré, K., Cândido, C., Towle, S. (Éd.), 2020. Public health and well-being in public open spaces through climate responsive urban planning and design. *jps* 1-6. <https://doi.org/10.32891/jps.v5i2.1279>
- Université Paris Cité, 2021. Université Paris Cité | u-paris.fr | Des cours d'écoles transformées en îlots de fraîcheur [WWW Document]. URL <https://fr.u-paris.fr/actualites/des-cours-decoles-transformees-en-ilots-de>

fraicheur (consulté le 4.3.2023).

Uyttenhove, P., Keunen, B., Ameel, L., 2021. La puissance projective: intrigue narrative et projet urbain. Metis Presses, Geneve.

# COOLSCAPES

## L'espace urbain climatisé

Coolscares est un projet de recherche dédié à l'analyse des dispositifs spatio-climatiques rafraîchissants ou "coolspots" dans l'espace urbain. Il s'appuie sur un système de métrologie climatique mobile. Il a pour objectif de fournir une méthodologie de diagnostic et des outils de design pour les acteurs de l'aménagement urbain dans le contexte de l'adaptation des villes au changement climatique.

### MÉTROLOGIE CLIMATIQUE MOBILE



**Le chariot climatique** développé dans le cadre du projet Coolscares mesure en temps réel plusieurs paramètres physiques caractéristiques du ressenti thermique :

- Température de l'air et humidité relative (2 thermocouples type T et 1 sonde mixte HMP155A Vaisala sous abri).
- Vitesse et direction du vent (anémomètre ultrasonique 2D de type WindSonic1).
- Rayonnement solaire (3 capteurs NR01 de Hukseflux chacun composé d'un couple de pyranomètres et de pyr géomètres mesurant le rayonnement net de courtes longueurs d'ondes et infrarouge, orientés latéralement droite/ gauche, devant/derrière et verticalement haut/ bas).
- Le tout contrôlé par une centrale autonome (Campbell Scientific CR1000X).

Associé à des observations d'usage des lieux (notation des lignes de flux et points d'arrêts des piétons), le chariot climatique permet d'analyser l'expérience climatique des citoyens lors des épisodes de forte chaleur.

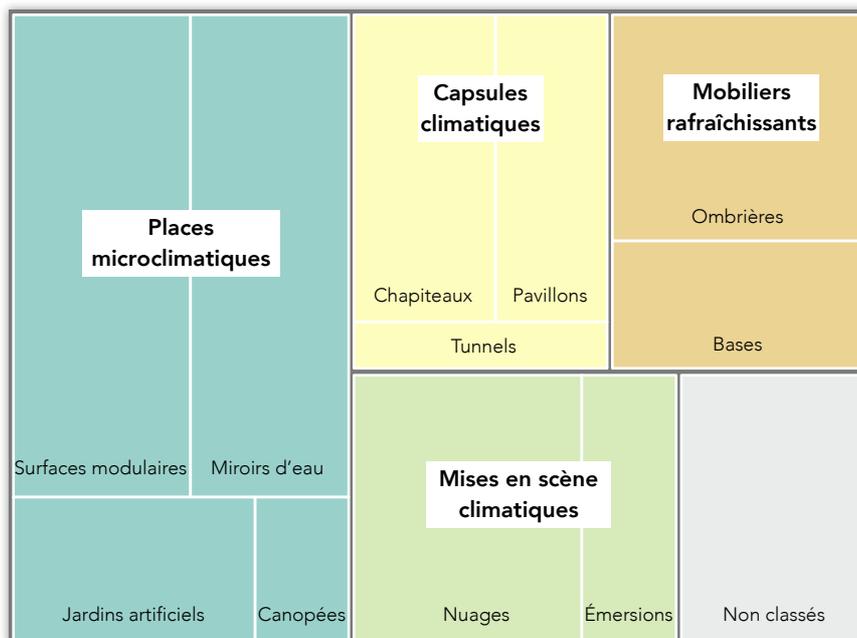
PROJET DE RECHERCHE COOLSCAPES 2018-2023 - FINANCEMENT ANR - RESPONSABLE SCIENTIFIQUE IGNACIO REQUENA-RUIZ

## À TRAVERS LES MÉDIAS

Une étude de la diffusion des dispositifs spatio-climatiques rafraîchissants dans les médias a permis de compiler 182 références réalisées depuis le début des années 2000 à travers le monde.

L'analyse de chaque exemple considère son échelle et sa situation urbaine, les stratégies de rafraîchissement employées, son apparence matérielle, son caractère temporaire ou permanent, les activités et usages potentiels, etc.

L'analyse typologique met en évidence 4 grands types et 11 sous-types indiqués ci-contre.



## TYPLOGIE DES "COOLSPOTS"

### Caractères liés au microclimat

Stratégies de rafraîchissement urbain	Bleue	Approches basées sur l'eau : stagnante, en stockage ou en circulation.
	Verte	Approches utilisant diverses formes de végétation intégrées dans l'espace.
	Blanche	Approches basées sur les caractéristiques formelles de la structure et ses effets rafraîchissants : ombrage ou courants d'air.
	Grise	Approches basées sur les matériaux et la technologie : modification de l'albédo des surfaces, absorption et stockage d'eau, modification des températures de surface, ventilation artificielle.
Gestion des flux énergétiques pour le rafraîchissement	Conduction	Rafraîchissement produit par le transfert de chaleur au contact direct d'un élément plus frais.
	Convection	Rafraîchissement produit lorsque le corps entre en contact avec une masse d'air plus frais.
	Évaporation	Rafraîchissement produit par une réduction de la température de l'air conséquence de la dissipation de chaleur par le passage de l'eau de état liquide à l'état gazeux.
	Rayonnement (ombrage)	Rafraîchissement produit par le masquage du rayonnement solaire direct.
Usage potentiel de ressources	Actif	Dispositifs présumés consommateurs d'énergie ou d'eau.
	Passif	Dispositifs présumés à très faible consommation de ressources.
Aire d'influence de l'effet microclimatique (par rapport à la surface du dispositif)	Disséminée	Zone d'influence disséminée à grande distance de la surface de du dispositif.
	Élargie	Zone d'influence étendue à l'environnement immédiat du dispositif.
	Confinée	Zone d'influence circonscrite à la surface du dispositif.
	Localisée	Zone d'influence concentrée sur un point à l'intérieur du dispositif.

### Caractères liés à la spatialité

Échelle spatiale	XS	Mobilier urbain.
	S	Pavillon/installation.
	M	Petit espace public.
	L	Grand espace public.
	XL	Espace de grande échelle.
Identification dans l'espace	Inaperçu	Dispositif inaperçu dans l'espace, ou presque.
	Contours	Dispositif perceptible par ses contours.
	Saillant	Dispositif visuellement remarquable.
	Semi-fermé	Dispositif clôturé par au moins deux côtés préservant au moins une surface ouverte à l'extérieur.
Artificialité du dispositif	Fermé	Dispositif fermé qui délimite la zone d'usage et l'effet microclimatique.
	Artificiel (minéral)	Usage de matériaux manufacturés : métal, pierre, béton, plastique, bois.
	Végétation (contrôlée)	Espace artificiel intégrant des plantations végétales.
Temporalité du dispositif	Végétation (libre)	Espace avec des végétaux en pleine terre et croissance libre.
	Permanent	Dispositif pérenne présumé à longue durée.
	Éphémère	Dispositif démontable installé dans l'espace urbain pour une durée déterminée.

### Caractères liés à l'expérience du citadin

Diversité d'activités	Monofonctionnel	Les images ne montrent qu'une seule activité.
	Multifonctionnel	Les images présentent une variété d'usages sans montrer une configuration réversible.
	Flexible	Les images présentent une configuration entièrement réversible.
Cinétique de l'espace	S'asseoir	Les images montrent des personnes assises.
	Se promener	Les images montrent des piétons en situation de déambulation.
	Traverser	Les images montrent des piétons traversant l'espace.
Potential d'interaction	Parcourir	Dispositif offrant une forme d'interaction basique basée sur la traversée de l'espace. Il implique un mouvement du citadin pour se rapprocher du dispositif plutôt qu'une interaction physique consciente.
	Accéder	Dispositif nécessitant que les piétons se déplacent dans sa zone d'influence. Il implique une immersion des piétons dans le dispositif.
	S'engager	Dispositif nécessitant une action simple de la part des citadins pour se rafraîchir (par exemple, s'asseoir ou être debout à un endroit).
	Actionner	Dispositif nécessitant un geste conscient de la part des citadins pour se rafraîchir (par exemple appuyer sur un bouton, actionner une poignée de commande ou rapprocher la main).
Gradient perceptif	Fonds	Gradient caractérisé par des conditions climatiques stables, sans variations intenses, dans une aire aux limites floues. L'effet climatique apparaît progressivement, passant presque inaperçu jusqu'à ce que l'immersion soit accomplie.
	Séquences	Gradient composé de différents effets climatiques perçus comme un ensemble. Les effets s'articulent ou se superposent dans l'aire d'influence proposant une variété de situations dans l'espace et dans le temps. L'effet climatique composite créé est un marqueur de l'espace.
	Événements	Gradient produit dans de petites surfaces. Il émerge clairement dans son contexte par un contraste d'intensité et par le changement des formes d'interaction entre le citadin et son environnement. Il modifie les sensations et comportements des piétons par une stimulation localisée.

### Sources utilisées

Revue d'architecture, d'urbanisme et de paysage publiées sur papier	A+T, Domus, Journal of Landscape Architecture, L'Architecture d'Aujourd'hui, Urban Design Journal, Revue Urbanisme
Prix de design en architecture, design urbain et architecture de paysage	European Prize for Urban Public Space, European Union Prize for Contemporary Architecture Mies van der Rohe Award, LILA Landezine International Landscape Award, Urban Land Institute's Urban Open Space Award
Programmes d'architecture et de design urbain	Young Architects Programme MOMA P51 (New York), Young Architects Programme Maxxi (Rome)
Revue et portails en ligne d'architecture, d'urbanisme et de paysagisme	Archdaily, Dezeen, Landezine, Metropolis, Topos Magazine
Moteurs de recherche	Google, DuckDuckGo, Pinterest, Google Images

PROJET DE RECHERCHE COOLSCAPES 2018-2023 - FINANCEMENT ANR - RESPONSABLE SCIENTIFIQUE IGNACIO REQUENA-RUIZ

## TYPOLOGIE DES "COOLSPOTS"



Miroir d'eau (Nantes 2015)

**Les places microclimatiques** sont des espaces publics ouverts de taille moyenne ou grande dans lesquels la présence de techniques de rafraîchissement reste visuellement discrète. Les systèmes techniques intègrent la disposition spatiale de l'espace public qui révèle leur présence par des changements subtils dans les textures ou les matériaux des sols. Ce sont principalement des espaces publics permanents.

Du point de vue de l'expérience microclimatique, les places créent des effets de fond disséminés dans l'espace. L'imbrication de l'espace et du climat semble indissociable de l'atmosphère de l'espace public. Ces places forment des espaces multifonctionnels ou flexibles qui accueillent différentes activités quotidiennes (s'asseoir, flâner, passer) et des événements. Elles renforcent l'objectif de régulation thermique des places traditionnelles.

## PLACES MICROCLIMATIQUES



Theatreplein (Anvers 2018)



CAAC Cordoba (Cordoue 2010)



Roof Prototype (Barrancabermeja 2016)



Place Général de Gaulle (Antibes 2006)



Skanderberg square (Tirana 2017)



Place Général de Gaulle (Armentières 2010)



Place des canotiers (Montréal 2017)

PROJET DE RECHERCHE COOLSCAPES 2018-2023 - FINANCEMENT ANR - RESPONSABLE SCIENTIFIQUE IGNACIO REQUENA-RUIZ

## TYPOLOGIE DES "COOLSPOTS"



Eco-boulevard Vallecas (Madrid 2007)

Les capsules climatiques sont pour la plupart de petits espaces qui enveloppent les piétons et les immergent dans un effet microclimatique circonscrit par les limites du dispositif. Ce sont généralement des installations éphémères construites avec des matériaux légers. Elles combinent diverses stratégies de rafraîchissement : bleu (brumisation), vert (murs verts, plantes suspendues), gris (ventilateurs, surfaces froides, matériaux isolants) et blanc (auvents, tours à vent).

Du point de vue de l'expérience microclimatique, les capsules créent des situations de contraste entre le milieu environnant et l'intérieur du dispositif, comme une pause fraîche dans l'espace public. Elles sont organisées pour des personnes seules ou des petits groupes pour une durée limitée. Elles rappellent le principe du pavillon ou des "folies" et y introduisent une dimension climatique, tantôt pour créer des situations agréables, tantôt pour fournir un abri.

## CAPSULES CLIMATIQUES



Quai des plantes (Nantes 2017)



Rainforest Pavilion (Londres 2014)



YAP Green Gallery (Rome 2019)



Air Tree (Shanghai 2010)



La Vague (Montréal 2017)



Airship 3 (Milan 2018)

PROJET DE RECHERCHE COOLSCAPES 2018-2023 - FINANCEMENT ANR - RESPONSABLE SCIENTIFIQUE IGNACIO REQUENA-RUIZ

## TYPOLOGIE DES "COOLSPOTS"



Floor-works (Genève 2005)

**Les mises en scène climatiques** créent des configurations visuelles et thermiques dynamiques qui apparaissent comme des effets théâtraux dans l'espace public. Elles sont générées par des sources dispersées ou intégrées dans la forme ou les matériaux de l'espace public. Leur flexibilité est encore renforcée par l'utilisation exclusive des techniques à base d'eau (brumisation, jets d'eau, goutte à goutte). Ce sont principalement des installations éphémères même si quelques réalisations permanentes existent également.

Du point de vue de l'expérience microclimatique, les mises en scène peuvent produire deux types de gradients perceptifs : des microclimats d'arrière-plan couvrant une grande surface, ou des microclimats d'événement ciblés sur le corps du citadin. Elles configurent des espaces publics flexibles qui invitent au mouvement. Leurs effets climatiques priment sur les effets matériels.

## MISES EN SCÈNE CLIMATIQUES



Hell Fest douche (Clisson 2018)



Paris plages (Paris 2019)



Place du Commando (Saint-Nazaire 2018)



Cloudscape (Austin 2018)



Cascade opéra Graslin (Nantes 2020)



Fog Assembly (Versailles 2017)



Appearing Rooms (Berlin 2005)

PROJET DE RECHERCHE COOLSCAPES 2018-2023 - FINANCEMENT ANR - RESPONSABLE SCIENTIFIQUE IGNACIO REQUENA-RUIZ

## TYPOLOGIE DES "COOLSPOTS"



City Tree (Glasgow 2018)

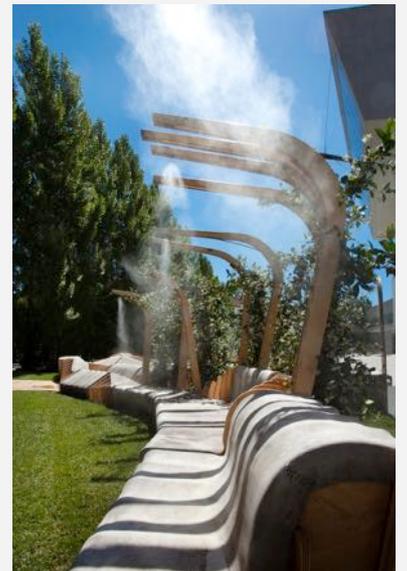
**Les mobiliers rafraîchissants** impliquent l'engagement du corps des piétons avec le dispositif. Ce sont des micro ou petites interventions qui ont une présence visuelle remarquable dans l'espace public. Les installations permanentes ou éphémères modifient le ressenti thermique en combinant des techniques de réduction du rayonnement solaire (auvents, pergolas) ou des techniques à base d'eau (brumisation) avec des techniques grises (surfaces refroidies, tissus humidifiés, ventilation forcée) ou vertes (murs végétaux).

Du point de vue de l'expérience microclimatique, les mobiliers urbains rafraîchissants produisent un gradient thermique qui contraste avec l'environnement et dont l'influence est limitée à l'emprise du dispositif. Leur présence dans l'espace public crée une opportunité d'interaction qui attire et concentre les personnes autour d'eux.

## MOBIERS RAFRAICHISSANTS



Flexible Landscape (Shanghai 2015)



YAP Unire-Unite (Rome 2012)



Esterhazy Coolspot (Vienne 2020)



Jade Ecopark Stratus cloud (Taichung 2018)



Bizhevaya Square (Moscou 2018)



Morelondon (Londres 2010)



Diana Memorial (Londres 2004)

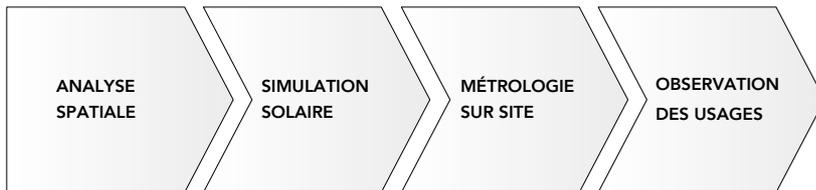


Ilot frais (Paris la Défense 2021)

PROJET DE RECHERCHE COOLSCAPES 2018-2023 - FINANCEMENT ANR - RESPONSABLE SCIENTIFIQUE IGNACIO REQUENA-RUIZ

# MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE

La démarche permettant de caractériser les dispositifs de rafraîchissement installés dans l'espace public urbain se développe suivant quatre approches complémentaires.



**ANALYSE SPATIALE**  
L'analyse spatiale du dispositif de rafraîchissement et de son environnement proche comporte huit dimensions. Trois dimensions constituent l'analyse architecturale du dispositif lui-même et cinq l'analyse urbaine de l'environnement dans lequel il se situe.

**SIMULATION SOLAIRE**  
La simulation solaire permet de déterminer les zones de l'espace présentant un potentiel de rafraîchissement par leur qualité d'ombrage. Ce sont les zones potentiellement ombragées plusieurs heures consécutives durant les journées estivales.

**MÉTROLOGIE SUR SITE**  
La métrologie sur site associant des instruments fixes et mobiles vise à caractériser l'expérience thermique urbaine en s'attachant à la dynamique des parcours des citadins. Elle s'appuie sur le chariot climatique et sur des stations fixes.

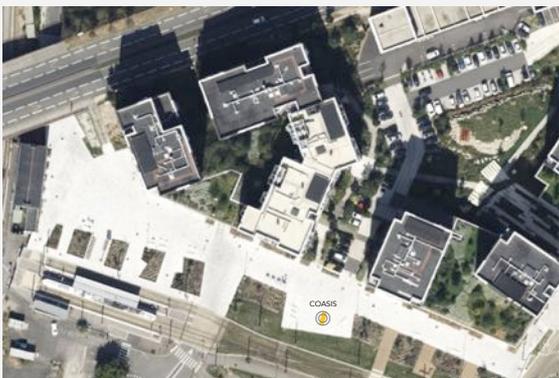
**OBSERVATION DES USAGES**  
L'observation des usages du dispositif permet d'analyser les trajectoires et attitudes des citadins ainsi que leurs arrêts éventuels. Elle renseigne sur l'efficacité du dispositif et sur son appropriation en situation de forte chaleur.

Étude de cas : mobilier Coasis à Rezé

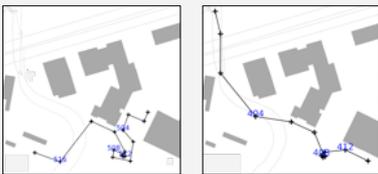


Coasis est un mobilier expérimental développé par Spie batignolles vallia. Il vise à améliorer le confort des citoyens dans l'espace public face aux effets d'îlots de chaleur urbains. Il est installé sur l'esplanade près de la gare de Pont-Rousseau à Rezé. Coasis est composé d'une voile recouvrant un socle muni de surfaces d'assise et de tables, ainsi qu'un volume plus massif intégrant un bac de terre végétale. Le rafraîchissement potentiel repose sur l'ombrage et l'évapotranspiration.

## ÉTUDE DE POINTS FRAIS DE LA METROPOLE NANTAISE



Plan de situation

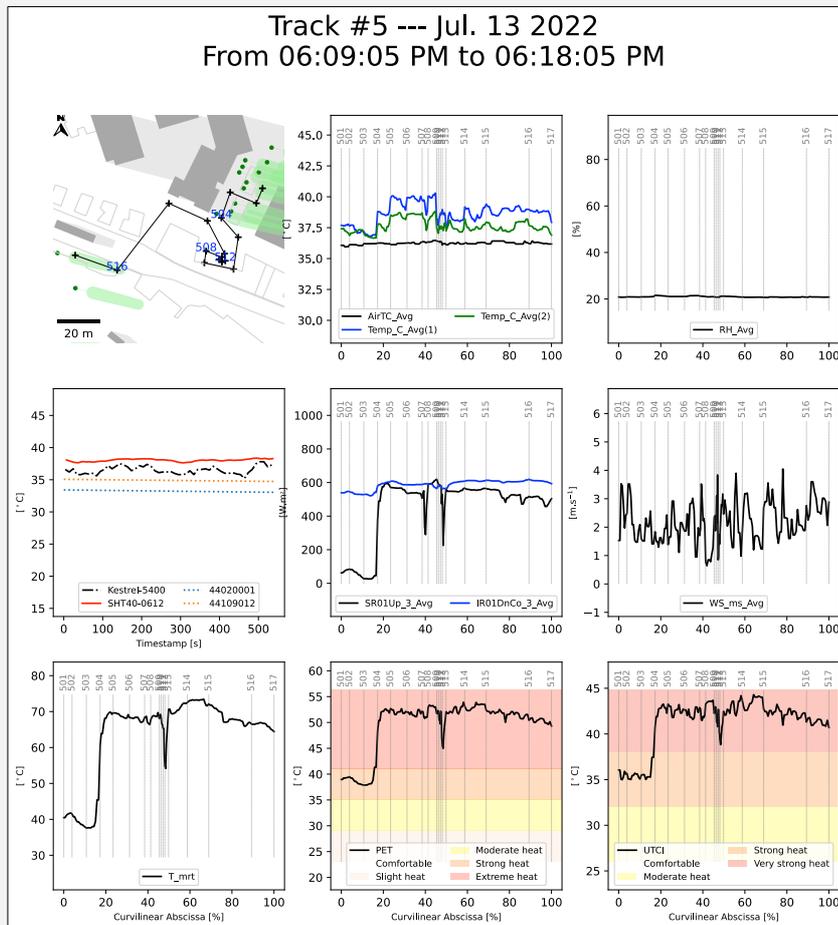


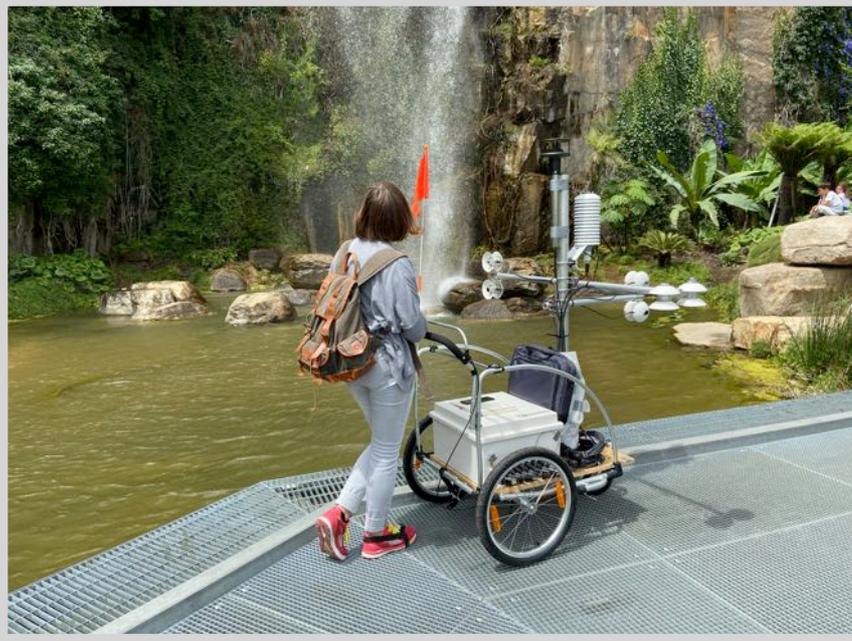
Parcours de mesure

Les mesures sur site ont été réalisées le 11 juillet 2022 vers 11h, 13h, 15h et 17h et le 13 juillet 2022 vers 12h, 14h, 16h et 18h. Sur chaque plage horaire le circuit du chariot comprend deux parcours de 9 à 12 minutes chacun. Les deux journées étaient globalement très chaudes.

**Données synthétisées** sur chaque parcours :

- La température de l'air sous abri, au niveau des chevilles et au niveau de la nuque.
- L'humidité relative.
- Le rayonnement solaire direct (énergie transmise sur le corps directement par le soleil).
- Le rayonnement infrarouge depuis le sol (énergie transmise par le sol sur le corps).
- La vitesse de vent.
- la température radiante moyenne qui synthétise les échanges thermiques par rayonnement (visible et infrarouge) entre le corps et son environnement.
- Les indices PET (Physiological Equivalent Temperature) et UTCI (Universal Thermal Comfort Index) qui permettent d'évaluer le ressenti thermique d'une personne dans un environnement complexe. Ils intègrent les grandeurs physiques mesurées, ainsi que des paramètres physiologiques liés à l'activité, l'habillement, etc.



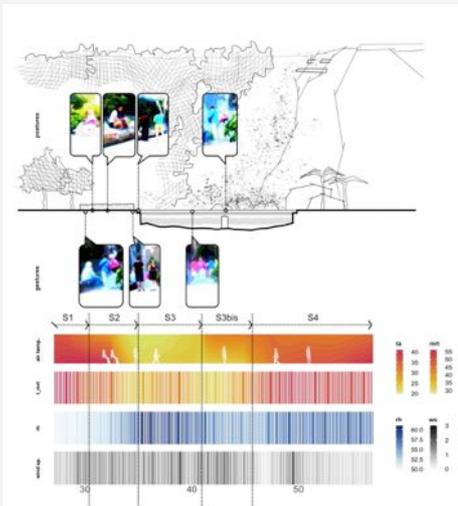


Le "jardin extraordinaire" est un parc public nantais aménagé dans une ancienne carrière en 2019. Il comporte une cascade de 25 mètres et est agrémenté de plantes d'eau géantes, lierres, bananiers et fougères arborescentes bénéficiant du microclimat créé par la carrière.

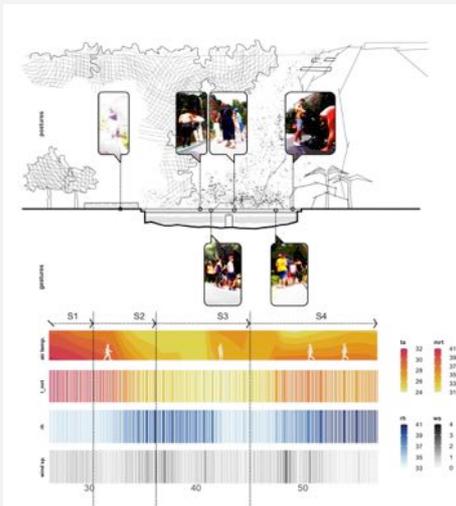
Des méthodes croisant la métrologie climatique et l'observation passive des promeneurs permettent d'appréhender la dimension sensible de l'expérience thermique des "coolspots". Chaque circuit de mesure est suivi d'une séquence d'observation. La notation des usages (fréquentation, genre et âge perçus, activités, postures, temps de séjour) est réalisée à l'aide d'une application dédiée.

Pour l'analyse, les données d'observation sont superposées aux données météorologiques. Leur association met en évidence l'expérience thermique du "coolspot" et caractérise son potentiel d'usages. Les interactions avec le dispositif s'expriment par les déplacements des promeneurs vers, à l'écart ou autour des sources de fraîcheur ; leurs gestes et actions ponctuelles impliquant des interactions entre le corps et l'espace ; leurs postures.

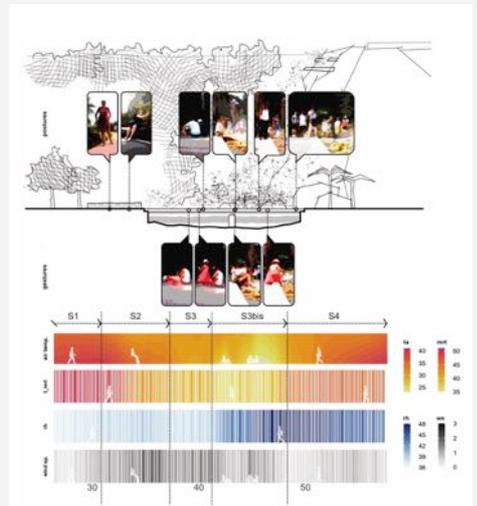
## EXPÉRIENCE THERMIQUE DU "JARDIN EXTRAORDINAIRE"



**Observation n°30 | 17/7/2020 - 17h46**  
Ciel clair, température moyenne d'été, vent faible  
Station référence entrée de la carrière : Ta 29,3 °C / Hr 46,3 % / Ws 1,2 m/s



**Observation n°63 | 23/7/2020 - 14h43**  
Ciel légèrement couvert, température moyenne d'été, vent faible  
Station référence entrée de la carrière : Ta 29,2 °C / Hr 28,2 % / Ws 1,8 m/s



**Observation n°65 | 23/7/2020 - 16h12**  
Ciel clair, température moyenne d'été, vent faible  
Station référence entrée de la carrière : Ta 28,9 °C / Hr 27,6 % / Ws 0,7 m/s

### SÉQUENCES CLIMATIQUES DE L'OBSERVATION N°65

**S1 - Séquence d'approche**

Une fois l'espace identifié par sa présence sonore et visuelle, les promeneurs suivent un chemin en béton gris clair qui rayonne la chaleur et chauffe l'air proche du sol.

**S2 - Séquence de seuil**

Au début du dispositif, cette séquence permet une appréciation visuelle complète de l'espace et invite à s'asseoir sur les bancs. L'effet de rafraîchissement est doux mais perceptible (plus ou moins intensément selon la direction du vent) sans que les promeneurs soient immergés dans la brume. Les enfants traversent rapidement cette zone pour chercher l'interaction dans la séquence suivante. Les adultes font une pause dans la zone avant de poursuivre leur cheminement le long de la passerelle.

**S3 et S3bis - Séquence d'immersion**

Située juste après le centre de la passerelle devant la cascade, cette zone permet l'immersion totale des visiteurs dans une atmosphère plus fraîche et plus humide (Hr +15%) alors que les corps restent exposés au rayonnement solaire. Les buses de brumisation intégrées à la passerelle intensifient le rafraîchissement de l'air près du sol (Ta -7°C par rapport la partie supérieure). Les promeneurs interagissent directement avec la brume (exposition des mains ou des pieds, ouverture des bras, jeux autour des buses). Ils peuvent également adopter des postures proches du sol (assis par terre ou agenouillés) favorisées par l'aménagement des bords de la passerelle en dénivelé vers l'eau.

**S4 - Séquence de sortie**

Cette séquence est franchie plus rapidement que les séquences d'approche et de seuil. Tout comme la séquence de seuil, elle implique une transition spatio-climatique vers les conditions environnantes en suivant le chemin en béton du jardin. Compte tenu de la configuration presque symétrique de l'espace, le seuil de sortie est aussi le seuil d'entrée pour les promeneurs arrivant dans la direction opposée.