



Étude du confort thermique parisien et de sa variabilité intra-urbaine en période estivale

Professeurs référents : Denis Martouzet
Encadré par : Tim Nagel & Aude Lemonsu

Polytech Tours
Département Aménagement Environnement

Février à Juillet 2025

Gabrielle VALLEE



Table des matières

1	Présentation de la structure d'accueil	2
1	Centre Nationale de Recherche en Météorologie (CNRM)	2
2	Groupe de Météorologie à Moyenne Échelle (GMME)	2
3	Équipe VILLE	2
2	Présentation de la mission	3
1	Étude des observations	7
1.1	La campagne de mesure PANAME-Urban	7
1.2	Évaluation et comparaison des indices de confort	10
1.3	Comparaison des environnements urbains grâce à l'UTCI	13
2	Étude de l'exposition à la chaleur avec un modèle météorologique de recherche	17
2.1	Description du modèle couplé MESO-NH/SURFEX	17
2.2	Évaluation du modèle à simuler les conditions de confort thermique	19
2.3	Exploitation du modèle validé	22
3	Conclusion	26
3	Livrables de la mission	27
4	Retour réflexif sur l'expérience	28
1	Démarche et méthodes employées	28
2	Analyse critique des résultats produits	28
2.1	Points forts	28
2.2	Points faibles	29
3	Compétences développées et perspectives professionnelles	29
3.1	Compétences techniques	29
3.2	Compétences transversales	29
4	Prise de recul et projection professionnelle	29
	Annexes	33

Remerciements

Je souhaite avant tout remercier Tim Nagel et Aude Lemonsu, mes encadrants de stage, pour leur accompagnement bienveillant, leurs conseils toujours pertinents et leur disponibilité tout au long de ces mois de stage.

Un grand merci également à toute l'équipe VILLE du CNRM pour leur accueil chaleureux, leur aide précieuse et les échanges stimulants qui ont largement enrichi cette expérience.

Je souhaite également remercier Denis Martouzet, mon référent à Polytech Tours, ainsi que toute l'équipe du DAE pour leur efficacité et l'encadrement de ces trois années d'études.

Enfin, merci à ma famille pour leurs relectures attentives et leur soutien.

Chapitre 1 : Présentation de la structure d'accueil

1. Centre Nationale de Recherche en Météorologie (CNRM)

Le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM, UMR 3589), principalement basé à Toulouse, est une unité mixte de Météo-France et du CNRS. Dirigé par Samuel Morin, il développe la recherche et les outils liés à la météorologie et au climat. Le CNRM est constitué de six groupes de recherche :

- Groupe de Modélisation et d'Assimilation pour la Prévision (GMAP)
- **Groupe de Météorologie à Moyenne Échelle (GMME)**
- Groupe de Météorologie de Grande Échelle et Climat (GMGEC)
- Groupe de Météorologie Expérimentale et Instrumentale (GMEI)
- Centre d'Études de la Neige (CEN)
- Centre d'Études en Météorologie Satellitaire (CEMS)

2. Groupe de Météorologie à Moyenne Échelle (GMME)

Mon stage se déroule au sein du groupe GMME. Le GMME conduit des recherches sur les phénomènes de méso-échelle dans les domaines de l'atmosphère et des surfaces en interaction avec les basses couches de l'atmosphère. Ces recherches visent à progresser dans la compréhension et la modélisation des phénomènes ou domaines à enjeux comme les nuages et le brouillard, le climat urbain, la convection, les précipitations intenses et les impacts hydrologiques. Ce groupe est composé de six équipes :

- Équipe PHY-NH
- Équipe PRECIP
- Équipe TROPIC²S
- Équipe SURFACE
- **Équipe VILLE**
- Équipe VEGEO

3. Équipe VILLE

J'ai réalisé mon stage au sein de l'équipe VILLE du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), dirigée par Aude Lemonsu. Cette équipe est spécialisée dans l'étude du climat urbain et des stratégies d'adaptation des villes au changement climatique. Les villes, en concentrant population, activités et infrastructures, sont particulièrement sensibles aux enjeux climatiques. L'équipe VILLE s'intéresse notamment à l'impact de l'anthropisation sur le climat local, en particulier à travers le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU). Ses travaux reposent sur une approche pluridisciplinaire, combinant observation, modélisation fine et études d'impact. Elle développe des modèles de microclimat urbain à haute résolution, améliore en continu le modèle de canopée urbaine TEB (Town Energy Balance), et mène des simulations à long terme à l'aide du modèle AROME-Climat. L'équipe conçoit également des bases de données urbaines à l'échelle mondiale, améliore les systèmes de prévision en ville et contribue à la création de services climatiques pour les acteurs publics.

Chapitre 2 : Présentation de la mission

Etat de l'art

Les vagues de chaleur en milieu urbain deviennent plus fréquentes et plus intenses sous l'effet du changement climatique, affectant particulièrement les grandes agglomérations françaises telles que Paris. Face à ces enjeux, les collectivités ont un besoin croissant de connaissances sur la répartition spatiale des zones de surchauffe et des îlots de fraîcheur, afin d'orienter les stratégies d'adaptation et les aménagements urbains.

La ville constitue un environnement complexe, caractérisé par la diversité des matériaux, des formes urbaines et des usages. Cette hétérogénéité génère des conditions microclimatiques variables à l'échelle intra-urbaine, notamment en période estivale. Si la température de l'air est souvent utilisée pour quantifier l'intensité de l'îlot de chaleur urbain, la température ressentie offre une information pertinente en matière de confort ou de stress thermique pour les habitants. Des indices de confort thermique permettent de mesurer ce stress.

Ce stage s'inscrit dans le cadre de la campagne PANAME-Urban (LEMONSU, en révision). Il a pour objectif d'analyser la variabilité spatiale et temporelle du confort thermique à Paris en été, en utilisant les observations issues du réseau PANAME-Urban ainsi que le modèle météorologique de recherche MESO-NH (LAC et al., 2018). Le travail porte plus précisément sur l'étude des indices de confort thermique, afin de mieux comprendre les mécanismes en jeu et d'identifier les zones les plus exposées au stress thermique.

De nombreuses études antérieures se sont intéressées au confort thermique en milieu urbain, souvent à fine échelle (à l'échelle des microclimats, des quartiers ou des parcs (WANG et al., 2017)). Ces travaux ont permis de mieux comprendre l'impact de certains aménagements ou configurations urbaines sur le ressenti thermique local. Toutefois, ces études portent souvent sur des zones restreintes, difficilement généralisables à l'ensemble de la ville. Ce stage a pour objectif de combler ces lacunes en menant une analyse à l'échelle de la petite couronne parisienne. En s'appuyant à la fois sur des observations fines issues du réseau PANAME-Urban et sur des simulations du modèle MESO-NH, il explore la variabilité spatiale du confort thermique dans l'ensemble de l'agglomération durant l'été.

Confort thermique

Au fil du dernier siècle, la compréhension du confort thermique humain est devenue un enjeu majeur. Les indices de confort thermique (ICT) ont été développés afin de quantifier les effets du climat sur le corps humain, que ce soit en termes de bien-être, de productivité ou de risque pour la santé. Les premiers indices ont été élaborés dans des contextes professionnels, militaires et industriels, où la protection des travailleurs exposés à des conditions climatiques extrêmes était prioritaire (ex : l'Effective Temperature, HOUGHTEN et al., 1924, pour les mineurs).

Cependant, les situations d'exposition varient considérablement selon les milieux (intérieur ou extérieur), les activités (travail, loisirs) et les types de climat. De plus, le confort thermique étant une sensation subjective, influencée par des facteurs individuels tels que l'âge, l'activité ou l'acclimatation, une grande diversité d'indices a été progressivement proposée. Chacun a été conçu pour répondre à un objectif, un public ou un environnement. À ce jour, plus de 160 indices ont été recensés à l'échelle mondiale.

Dans le cadre de ce travail, cinq indices ont été retenus pour l'analyse : *Physiological Equivalent Temperature* (PET), *Universal Thermal Comfort Index* (UTCI) et *Predicted Mean Vote* (PMV), identifiés par POTCHTER et al., 2018 comme faisant partie des plus utilisés en environnement extérieur mais aussi le *Wet Bulb Globe Temperature* (WBGT), en raison de son utilisation dans des travaux antérieurs du laboratoire. En effet lors des Jeux Olympiques de Paris 2024 une étude de prévision du confort thermique pour le marathon a été menée par l'équipe VILLE. Et enfin, le *Discomfort Index* (DI), sélectionné pour sa simplicité d'utilisation, car basé uniquement sur la température de l'air et l'humidité,

ce qui permet une application sur un grand nombre de stations du réseau PANAME-Urban.

Universal Thermal Climate Index (UTCI)

L'UTCI (*Universal Thermal Climate Index*), représente la température d'un environnement de référence induisant la même réponse physiologique qu'un environnement réel, pour un individu standard (BŁAŻEJCZYK et al., 2013). Il repose sur un modèle multi-nœuds de thermorégulation simulant 12 segments corporels composés de nœuds tissulaires, ainsi que sur les réponses thermorégulatrices du système nerveux central et l'adaptation vestimentaire saisonnière (ZARE et al., 2018). L'UTCI est calculé à partir d'une combinaison de variables météorologiques, physiologiques et comportementales, afin de produire une estimation de la contrainte thermique dans des conditions standards de référence (Eq. 1). Très utilisé depuis les années 2010, il bénéficie d'une large applicabilité et d'une reconnaissance internationale, couvrant une grande diversité de climats. Son principal inconvénient réside toutefois dans la complexité de son calcul.

$$UTCI = f(T_a, v, T_{mr}, RH) \quad (1)$$

où :

- T_a est la température de l'air (°C),
- v la vitesse du vent (m/s),
- T_{mr} la température radiante moyenne (°C),
- RH l'humidité relative de l'air (%),

avec :

$$T_{mr} = \left((T_g + 273.15)^4 + \frac{1.1 \times 10^8 \cdot v^{0.6}}{0.95 \times 0.125^{0.4}} \cdot (T_g - T_a) \right)^{\frac{1}{4}} - 273.15 \quad (2)$$

Physiological Equivalent Temperature (PET)

La Température Équivalente Physiologique (PET) modélise le bilan thermique complet du corps humain, comme proposé par HÖPPE, 1999. Elle correspond à la température d'un environnement de référence isotherme (20 °C, 50% d'humidité, vent à 0,1 m/s) dans lequel une personne standard présenterait un bilan thermique équivalent à celui mesuré dans l'environnement réel (Eq. 3). Le PET prend en compte les échanges de chaleur latente, la respiration et la transpiration cutanée, il repose ainsi sur la notion de confort perçu. Il fait intervenir le *Metabolic Equivalent of Task* (MET), qui correspond à la dépense énergétique d'une activité physique par rapport au métabolisme au repos (kJ/kg/h). Cependant, bien qu'il soit basé sur des principes de confort, sa méthode de calcul n'a pas beaucoup évolué depuis 1999.

$$PET = f(T_{db}, T_{mr}, v, RH, MET, CLO) \quad (3)$$

où :

- v est la vitesse du vent (m/s),
- T_{mr} est la température radiante moyenne (°C),
- RH est l'humidité relative de l'air (%),
- MET est l'équivalent métabolique (kJ/kg/h),
- CLO est l'isolation vestimentaire (clo).

Predicted Mean Vote (PMV)

Le PMV (*Predicted Mean Vote*), développé par FANGER et al., 2002, quantifie la sensation thermique moyenne d'un groupe sur une échelle en sept niveaux (YAO et al., 2009). Il se distingue des autres indicateurs par le fait qu'il utilise sa propre échelle, sans s'exprimer en température. Ce modèle repose sur l'équilibre entre la production interne de chaleur et la déperdition thermique dans un environnement donné, pour une personne supposée maintenue dans des conditions de confort optimales (Eq. 4). Le PMV se distingue par son approche détaillée, prenant en compte de nombreux paramètres (tels que l'isolation des vêtements et l'activité physique), ce qui le rend particulièrement précis et adapté à tous les climats. Cependant, il date des années 1970 et est justement très influencé par le MET et donc peu représentatif d'une population variée.

$$PMV = f(T_{db}, T_{mr}, VR, RH, MET, CLO) \quad (4)$$

où :

- T_a est la température de l'air (°C),
- VR est la vitesse relative de l'air (m/s),
- T_{mr} est la température radiante moyenne (°C),
- RH est l'humidité relative de l'air (%),
- MET est l'équivalent métabolique (kJ/kg/h),
- CLO est l'isolation vestimentaire (clo).

Wet Bulb Globe Temperature Index (WBGT)

Le WBGT (*Wet Bulb Globe Temperature*, exprimé en °C) est l'un des indices de stress thermique les plus utilisés au monde (Eq. 5). Il a été initialement développé par l'US Navy pour évaluer les risques de blessures liées à la chaleur lors des entraînements militaires (MINARD, 1957). Cet indice est dérivé de la température du thermomètre mouillé (T_{wb}), introduite par Vernon et Warner en 1932 (VERNON et al., 1932) (Eq. 6). Le WBGT est particulièrement utilisé en extérieur et constitue une norme bien établie dans les domaines du sport (FIFA). Toutefois, il ne repose pas sur des seuils universellement définis, ce qui peut compliquer son interprétation selon les contextes. Par ailleurs, sa conception initiale pour des individus en bonne condition physique, exposés à des environnements chauds, limite son applicabilité à une population ou à des conditions climatiques plus variées.

$$WBGT = 0,7 \times T_{wb} + 0,2 \times T_g + 0,1 \times T_{db} \quad (5)$$

où :

- T_{db} est la température sèche (°C),
- T_g la température du globe noir (°C),
- T_{wb} la température humide (°C) :

$$T_{wb} = 0.2831 \times T_a \times RH^{0.2735} + 0.0003018 \times RH^2 + 0.01289 \times RH - 4.0962 \quad (6)$$

- T_a est la température de l'air (°C),
- RH est l'humidité relative (%).

Discomfort Index (DI)

Le DI (*Discomfort Index*) est un indice de confort simple (THOM, 1959), visant à évaluer le stress thermique ressenti par l'être humain en fonction des conditions de température et d'humidité (Eq. 7). Cependant, il ne se distingue pas suffisamment de la température ambiante et ne semble apporter aucune réelle valeur ajoutée dans les études de confort thermique.

$$DI = 0,4 \times (T_a + T_{wb}) + 4,8 \quad (7)$$

où :

- T_a est la température sèche (°C),
- T_{wb} est la température humide naturelle (°C).

Bien que les formules de calcul diffèrent selon les indices, les cinq ICT étudiés s'appuient sur un socle commun de variables météorologiques, toutes disponibles via les stations de mesure déployées dans Paris (et présentées dans la section suivante) : la température de l'air à 2 m, l'humidité relative, la vitesse du vent et la température de globe noir. En revanche ces indices sont associés à des niveaux de stress spécifiques à chacun d'eux (détaillé plus loin).

1. Étude des observations

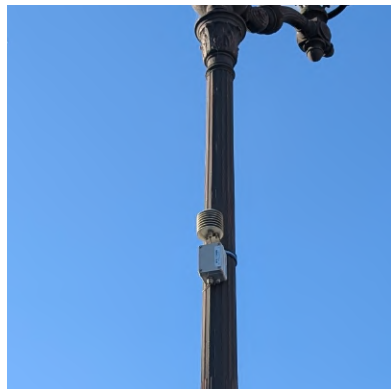
1.1 La campagne de mesure PANAME-Urban

1.1.1 Contexte et acteurs

La campagne de mesure PANAME-Urban (*PARis region urbaN Atmospheric observations and Models for Multi-disciplinary rEsearch*) rassemble une dizaine de programmes de recherche qui, de 2022 à 2024, utilisent Paris comme terrain d'étude (LEMONSU, en révision). L'objectif est d'améliorer la compréhension des mécanismes à l'origine de la pollution de l'air, de l'îlot de chaleur urbain et des phénomènes météorologiques extrêmes en milieu urbain, ainsi que de leurs impacts. La campagne PANAME-Urban s'appuie sur un réseau d'observations combinant stations météorologiques, capteurs urbains, mesures mobiles et instruments de télédétection (lidars, radars, radiomètres, drones). Ces dispositifs permettent de suivre les conditions de surface, le bilan d'énergie et la structure de la couche limite urbaine.

Stations IoT

Les stations IoT (Internet-of-Things) installées à Paris depuis mi-juillet 2022 sont des capteurs légers qui mesurent la température et l'humidité (DL-SHT35, Fig. 1a) toutes les six minutes. Fixées sur des lampadaires à une hauteur comprise entre 3 et 5 m, elles respectent les recommandations de Oke, 2007 pour les mesures de variables météorologiques en milieu urbain. Dans le centre de Paris, 23 stations ont été déployées pour observer la variabilité intra-urbaine de la température et notamment l'influence de la morphologie urbaine, l'orientation des rues, la végétation et la proximité de la Seine. En été 2023, sept d'entre elles ont été équipées de capteurs supplémentaires pour mesurer la température de globe noir, la température ressentie d'un corps exposé au soleil (DL-BLG, Fig. 1b) ainsi que la vitesse et la direction du vent (DL-ATM22, Fig. 1c).



(a) DL-SHT35



(b) DL-BLG



(c) DL-ATM22

FIGURE 1 – Photographies des capteurs constituant la station de mesure IoT : (a) température de l'air et humidité relative, (b) température de globe noir, (c) vitesse du vent

Mon travail de stage s'est concentré sur ces sept stations ainsi que les stations des Jardins du Luxembourg et du parc Montsouris, déjà dotées des mêmes capteurs (Fig. 2). Les stations ont été positionnées de manière stratégique par les chercheurs du CNRM afin de couvrir une diversité d'environnements urbains. Chaque site est notamment caractérisé selon la typologie en « Local Climate Zones » (LCZ), une classification géo-climatique reconnue à l'échelle internationale (STEWART et al., 2012). Ce système divise le territoire en zones homogènes en termes d'occupation du sol, de forme urbaine, de matériaux et d'activités humaines. Il comprend 17 classes, 10 pour les zones bâties et 7 pour les zones naturelles, chacune présentant un comportement climatique distinct. Les LCZs les plus fréquentes à Paris sont :

Code LCZ	Description
LCZ B	Espace arboré clairsemé
LCZ D	Végétation basse
LCZ E	Sol imperméable naturel ou artificiel
LCZ G	Surface en eau
LCZ 2	Ensemble compact d'immeubles
LCZ 3	Ensemble compact de maisons
LCZ 5	Ensemble d'immeubles espacés

TABLE 1 – LCZs les plus fréquentes à Paris

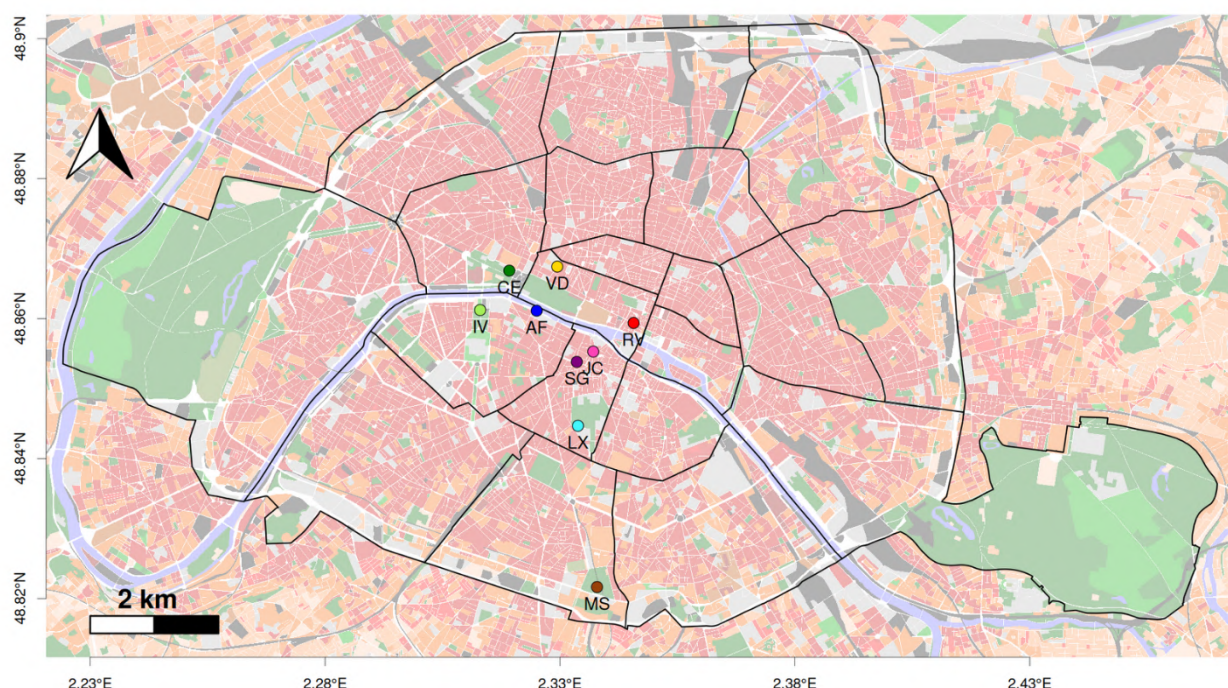


FIGURE 2 – Localisation des stations IoT étudiées à Paris

Les stations MS, LX et CE sont implantées dans des parcs urbains, offrant un environnement végétalisé et plus ou moins ombragé selon la densité et la proximité des arbres. À LX, les capteurs sont positionnés en hauteur, dans un verger partiellement ombragé par de grands arbres situés à proximité. La station CE est, quant à elle, installée le long de chemins gravillonnés blancs, bordés de pelouses, une configuration qui accentue la réflexion du rayonnement (Tab. 2).

À l'exception de MS et LX, où les trois capteurs (T/Hu (température/humidité), WS (vent) et BG (température de globe noir)) sont regroupés sur un même support, les autres stations utilisent des supports distincts. À JC, les capteurs WS et T/Hu sont co-localisés, tandis que le capteur BG est installé sur l'autre trottoir. Ailleurs, les capteurs peuvent être alignés le long d'un même trottoir (à RV et AF) ou répartis de manière triangulaire (CE, VD, IV et SG).

Les stations IV et VD se trouvent également sur de grandes places, des espaces ouverts, à l'image de MS, installée au cœur d'une grande pelouse dégagée, dans un parc de mesures. À IV, les capteurs sont placés au sein d'une esplanade majoritairement végétalisée, mais situés au-dessus de surfaces minérales, entre une route et un trottoir. La station VD est située autour de la colonne Vendôme, au sein d'une large place minérale quasiment dépourvue d'ombrage. À l'op-

Nom de la station		Type	LCZ (Tab. 1)	Hauteur capteur	Arbres	Sols	Circulation	Point notable
Montsouris	MS	Parc (15,5 ha)	LCZ B	2 m	+++	pelouse		Station météo active depuis 1872
Jardins du Luxembourg	LX	Parc (23 ha)	LCZ B	4,5 m	+++	pelouse		Verger
Jardins des Champs-Élysées	CE	Parc (5,3 ha)	LCZ B	2 m	++	pelouse; gravillon blanc		
Place des Invalides	IV	Esplanade végétalisée	LCZ D-E	3 m		pelouse; bitume	+++	Carrefour de circulation
Place Vendôme	VD	Place minéralisée	LCZ 2	3 m		bitume	+	
Rue de Rivoli	RV	Rue canyon	LCZ 2-3	5 m		bitume	+++	Grande artère
Boulevard Saint-Germain	SG	Rue canyon	LCZ 2-5	3 m	+	bitume	++	Grande artère
Rue Jacques Callot	JC	Rue canyon	LCZ 2-3	3 m	+	bitume	+	Rue étroite
Quai Anatole France	AF	Bord de Seine	LCZ 2-G	3 m	+	pelouse; bitume		Proche de l'eau

TABLE 2 – Caractéristiques des environnements des stations

posé de ces espaces dégagés, certaines stations sont implantées dans des rues étroites ou bordées d'immeubles. C'est le cas de RV, située dans une rue orientée est-ouest (115°), où les capteurs, positionnés à environ 4 mètres des façades, subissent une forte influence du bâti. À JC, les capteurs sont installés dans une rue étroite (orientation est-ouest, 91°), encadrée par des immeubles de 20 mètres de haut, distants de seulement 3 mètres des capteurs, ce qui limite fortement l'exposition directe au rayonnement. La station SG, orientée est-ouest (110°), est placée de part et d'autre d'un boulevard arboré : le capteur BG (température de globe noir), situé sous un arbre, reste à l'ombre une grande partie de la matinée.

Enfin, la station AF présente également un effet d'ombrage marqué, les capteurs BG et WS étant situés sous des arbres et à proximité immédiate d'un mur de 5 mètres. Cette station est également la première à être exposée au soleil le matin, en raison de sa position en bord de Seine et de son ouverture est-ouest.

1.1.2 Période d'étude

Conditions météorologiques

L'analyse des six mois (juillet à septembre 2023 et 2024) met en évidence des périodes contrastées météorologiquement. Durant l'été 2023, le mois de juillet reste proche des moyennes climatologiques thermiques mais se caractérise par des précipitations très abondantes (+88%) par rapport aux normales. Le mois d'août est globalement conforme aux normales. Par contre, septembre 2023 se distingue par des températures largement supérieures aux normales (+4,7°C en Tmax), marquant un mois exceptionnellement chaud, avec un épisode de forte chaleur du 2 au 12 septembre. Durant l'été 2024, les mois de juillet et août présentent des conditions proches des moyennes saisonnières. Contrairement à 2023, septembre 2024 est légèrement plus frais (-1,3°C en Tmax) que les normales et particulièrement pluvieux, avec plus du double des précipitations normales (+133%).

Date	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Précipitations (mm)
Juillet 2023	26,29 (26,26)	16,86 (16,03)	107,4 (57,1)
Août 2023	25,64 (26,08)	16,80 (15,85)	69,75 (55,2)
Septembre 2023	26,81 (22,11)	16,64 (12,78)	45,45 (45,8)
Juillet 2024	26,39 (26,26)	16,56 (16,03)	71,05 (57,1)
Août 2024	27,34 (26,08)	17,28 (15,85)	51,45 (55,2)
Septembre 2024	20,81 (22,11)	13,64 (12,78)	106,75 (45,8)

TABLE 3 – Températures moyennes et cumuls de précipitation mensuels. Les valeurs des normales sur la période 1991-2020 est donnée entre parenthèses

Selection des jours d'étude

Le stress thermique à Paris durant l'été a été étudié en se concentrant sur les jours de "ciel clair", considérés comme les plus susceptibles de générer des conditions de stress et des contrastes marqués selon les environnements. Pour identifier ces jours dits de ciel clair, l'irradiance solaire théorique au sommet de l'atmosphère a été calculée à partir de l'angle zénithal du soleil à Paris pour chaque jour de l'été 2023 et de l'été 2024. Selon IQBAL, 2012, environ 70 % de cette irradiance est reçue à la surface lors d'un jour de ciel clair. Cette valeur a été comparée au rayonnement solaire incident moyen mesuré quotidiennement sur quatre stations (Paris-Montsouris, Orly, Roissy et Trappes). La sélection des jours de ciel clair a ensuite été réalisée à l'aide d'un algorithme de k-means à trois clusters, fourni par l'équipe, appliqué à la différence entre l'irradiance solaire théorique par temps clair et le rayonnement solaire incident mesuré.

Il convient de préciser que les anémomètres et thermomètres de globe noir des stations IoT n'ont été installés qu'à partir du 6 juillet 2023. Par conséquent, les mesures issues de ces capteurs ne sont pas disponibles avant cette date. Les étés 2023 et 2024 se composent donc respectivement de 23 jours et 31 jours de ciel clair sur les 66 jours de la période d'étude (6 juillet au 15 septembre)

Disponibilité des données

Les stations ont été installées autour du 6 juillet 2023 pour une durée prévue d'au moins deux ans. Cependant, au cours de l'été 2024, deux des neuf stations sont devenues inexploitable. En raison de travaux de rénovation menés en 2024, un échafaudage a été installé autour de la station dans la rue Jacques Callot. Cette intervention a compromis la qualité des données durant toute la période des travaux, puis de manière durable, certains capteurs ayant été endommagés. Les mesures de température de l'air, de vitesse du vent et d'humidité relative ne sont ainsi plus disponibles pour cette station.

Par ailleurs, les Jeux olympiques de Paris ont entraîné des aménagements urbains, notamment le déplacement du lampadaire sur lequel la station IV était fixée, en lien avec le tracé du marathon. Ce lampadaire a été entreposé dans un hangar, rendant la station inopérante pour l'ensemble de la période estivale 2024.

1.2 Évaluation et comparaison des indices de confort

Pour cette étude, la bibliothèque Python *pythermalcomfort* (TARTARINI et al., 2020), dédiée au calcul des indices thermo-physiologiques et des niveaux de stress thermique, a été utilisée. Cet outil implémente des formules issues de normes internationales (comme ASHRAE, 2020 ou ISO, 2005) et repose sur des travaux validés scientifiquement. Il permet un calcul standardisé des principaux indices utilisés dans le domaine.

Cinq indices, parmi les plus couramment utilisés dans la littérature, ont été retenus pour l'étude comparative des indices de stress thermique : PET, PMV, UTCI, DI et WBGT.

Chaque indice repose sur une méthode de calcul spécifique et utilise donc des unités et des échelles différentes.

A chaque indice sont associés des niveaux de stress thermique chaud (stress modéré, fort, extrême), définis selon des valeurs de dépassement de seuil de l'indice considéré. Ces valeurs de dépassement de seuil varient d'un indice à l'autre, bien qu'ils soient tous structurés selon ces trois mêmes niveaux de stress thermique (Tab. 4)

Catégorie de stress thermique	UTCI (°C)	PET (°C)	WBGT (°C)	PMV	DI (°C)
Pas de stress thermique	9	18	–	0	21
Stress modéré	26	23	24	1	24
Stress fort	32	35	29,3	2	27
Stress extrême	36	41	32,2	3	29

TABLE 4 – Seuils de stress thermique selon différents indices (ICT)

Les cycles moyens des différentes variables météorologiques utilisées pour le calcul des indices de confort sont présentés en annexes.

1.2.1 Analyse par niveaux de seuils

Le nombre total d'heures durant lesquelles les seuils de stress thermique ont été dépassés sur les 66 jours d'été étudiés en 2023 a été représenté, sous forme d'histogrammes (Fig. 3), pour chaque station et chaque indice. Les résultats montrent des différences marquées entre les indices :

- DI et WBGT présentent les plus faibles durées de dépassement, avec très peu d'heures franchissant le seuil "fort" et un total avoisinant les 200 heures (soit 3h par jour en moyenne).
- PMV et UTCI montrent des valeurs intermédiaires, autour de 400–500 heures (soit 6h à 7h30 par jour en moyenne)
- PET affiche les durées les plus élevées (environ 600-700 heures, soit 9h à 10h30 par jour), ce qui s'explique en partie par son seuil "modéré" relativement bas (24°C). Toutefois, pour les seuils plus élevés (fort stress thermique), PET et UTCI donnent des résultats similaires.

Malgré des écarts significatifs sur le temps passé en stress thermique selon les niveaux, tous les indices indiquent que la station AF est la moins exposée au stress thermique. Cette station bénéficie d'un microclimat favorable, car elle est proche de la Seine et reste majoritairement à l'ombre, notamment l'après-midi. On constate plus de variabilité dans la comparaison des conditions de stress thermique entre les autres stations, selon l'indice considéré : UTCI, PMV et PET donnent une classification des stations assez comparable, mais assez différente de celles obtenues avec DI ou avec WBGT.

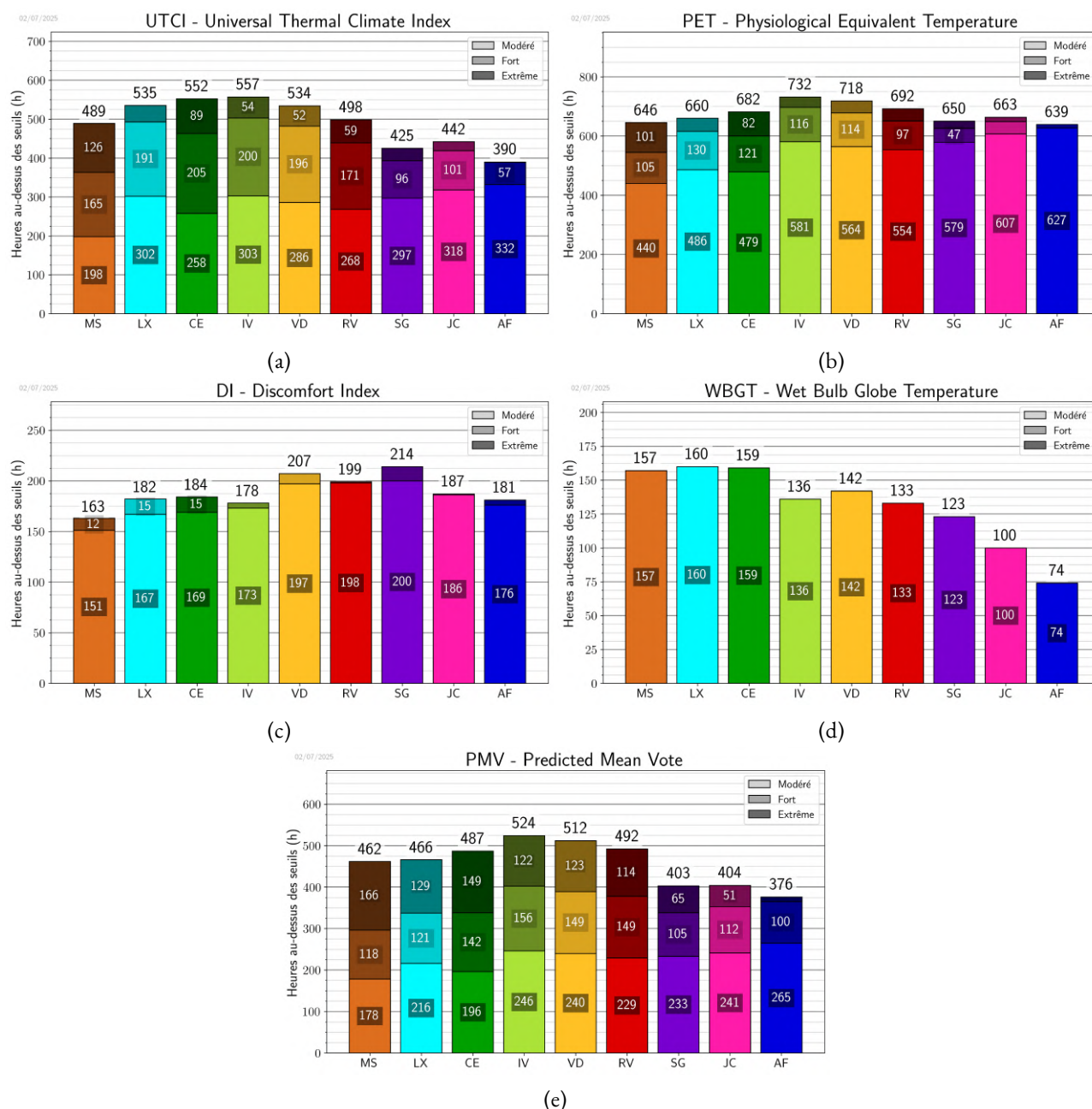


FIGURE 3 – Répartition des heures au-dessus des seuils de stress thermique du 6 juillet au 10 septembre 2023 pour différents indices de confort thermique

1.2.2 Analyse comparative par quantiles

Afin de comparer les indices entre eux sans recourir aux seuils (différents pour chaque ICT), la distribution des valeurs extrêmes a été analysée à l'aide de quantiles (Fig. 4). Les 30%, 20% et 10% des heures présentant les températures d'UTCI les plus élevées (respectivement, les quantiles Q70, Q80, Q90) ont été sélectionnés sur l'ensemble des données horaires de l'été. Pour chaque indice et chaque station, la répartition de ces heures a ensuite été examinée. Une cohérence forte entre les indices PET, PMV et UTCI a été observée, ceux-ci présentant des distributions très similaires, voire quasi-identiques. Cela suggère une réaction comparable de ces indices au cours de cet été. Cette méthode complémentaire de comparaison par quantiles permet de vérifier que, malgré des bases de calcul différentes, les indices convergent globalement dans leur diagnostic du stress thermique et leur capacité à différencier et classer les différents environnements urbains étudiés selon leurs conditions d'exposition au stress thermique.

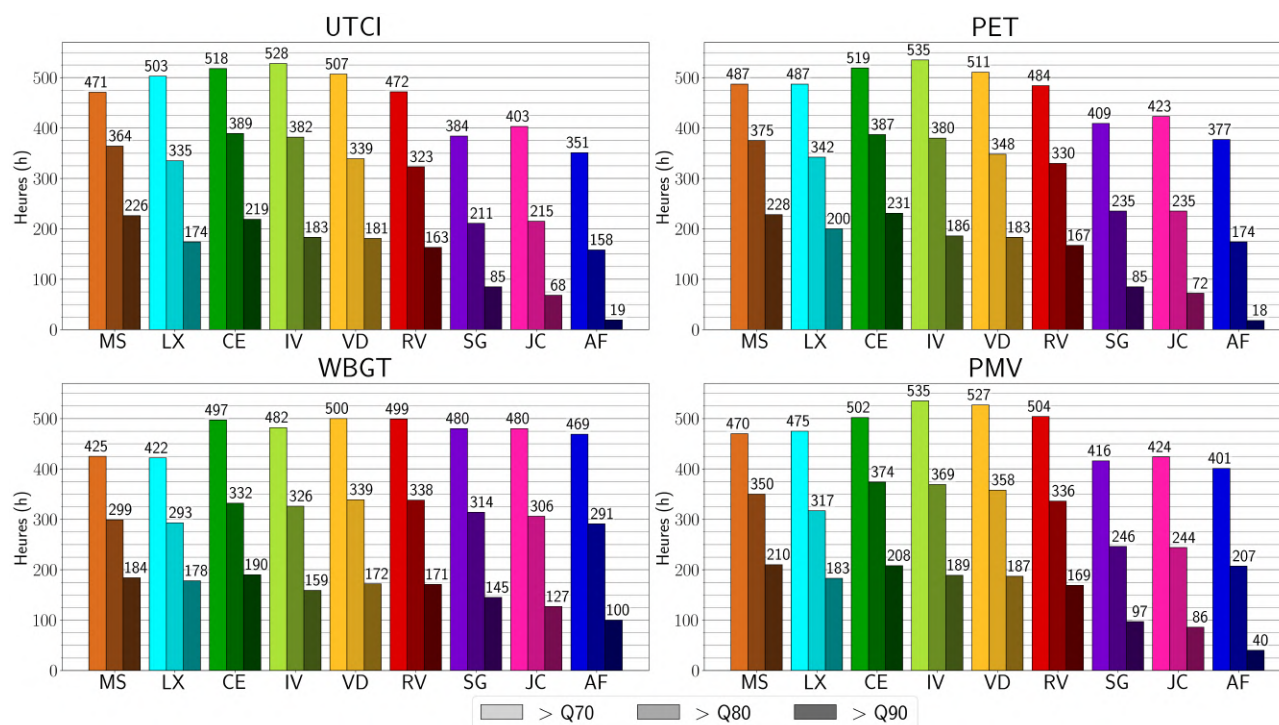


FIGURE 4 – Répartition horaire des températures extrêmes par quantiles pour chaque indice et station, sur 66 jours de l'été 2023

1.2.3 Choix de l'indice de confort

Sur la base de l'ensemble des informations disponibles, l'UTCI a été retenu comme indice de confort pour cette étude. Cet indice est basé sur un modèle thermo-physiologique avancé. Conçu pour représenter de manière réaliste la réponse du corps à différentes conditions climatiques, l'UTCI offre une évaluation réaliste du stress thermique. L'UTCI est aujourd'hui largement utilisé dans la littérature scientifique et dans de nombreux pays à travers le monde, ce qui en fait un indicateur reconnu et validé à l'échelle internationale. Il présente également l'avantage d'avoir des seuils de stress thermique cohérents avec les conditions climatiques tempérées, telles que celles observées à Paris. Un autre atout important de l'UTCI réside dans sa version simplifiée, rendue accessible via la bibliothèque *pythermalcomfort*. Cette simplification permet un calcul rapide de l'indice. Ces variables sont directement disponibles via les stations IoT, ce qui facilite le traitement des données. Par ailleurs, cette approche évite d'avoir à introduire des paramètres individuels (tels que le sexe, l'âge, la masse corporelle, l'habillement ou le niveau d'activité), qui complexifieraient inutilement l'analyse tout en réduisant la généralisation des résultats aux habitants d'une ville.

1.3 Comparaison des environnements urbains grâce à l'UTCI

1.3.1 Méthode

Afin de comparer les étés 2023 et 2024, il a été nécessaire de disposer du maximum de données exploitables. Or, deux stations (IV et JC) sont devenues inexploitables pour l'été 2024. Pour la station JC les capteurs de température et d'humidité relative de l'air, et de vitesse du vent ont été endommagés. Toutefois, la température de globe noir reste disponible, ce qui constitue un avantage, le calcul de l'UTCI étant fortement influencé par le rayonnement thermique. Dans ce contexte, une reconstitution de l'UTCI a été entreprise pour la station JC.

Les mesures de température de globe noir de la station JC ont été combinées aux autres paramètres météorologiques (température de l'air, humidité relative, vitesse du vent) issus de la station la plus proche, la station SG. Cette substitution est justifiée par des caractéristiques locales des stations assez semblables (Tab. 2) et la faible variabilité spa-

tiale de ces paramètres urbains sur une distance d'environ 300 mètres. Pour valider cette méthode, elle a d'abord été appliquée à l'été 2023, période durant laquelle l'ensemble des capteurs étaient opérationnels (Fig. 5). La comparaison entre l'UTCI mesuré et l'UTCI reconstitué a révélé une erreur moyenne de $0,02^{\circ}\text{C}$, avec un écart-type de $0,17^{\circ}\text{C}$. Ces résultats confirment la fiabilité de la méthode, autorisant ainsi l'exploitation des données reconstituées de la station JC pour l'été 2024.

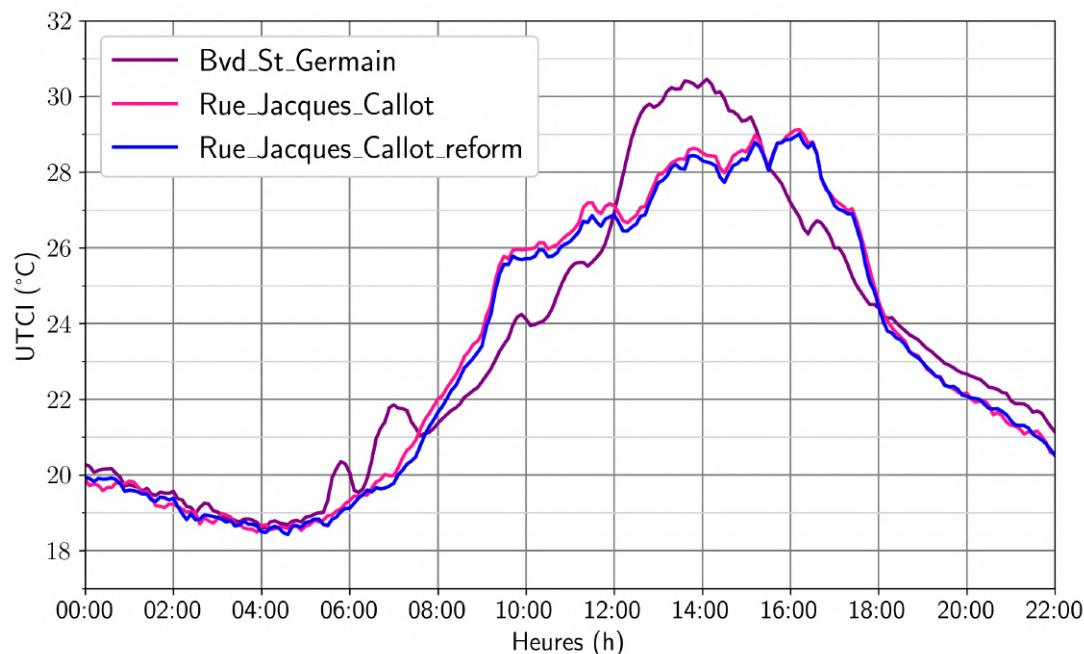


FIGURE 5 – Validation de la reconstitution de l'UTCI à la station JC à partir des données de SG (cycle diurne moyenné sur l'été 2023)

1.3.2 Distribution du stress

Variabilité entre les étés 2023 et 2024

Comme pour la Fig. 3, des histogrammes ont été réalisés pour comparer les heures de stress thermique d'UTCI durant les étés 2023 et 2024, sur une période identique allant du 6 juillet au 10 septembre (Fig. 6). Les deux années présentent des ordres de grandeur globalement similaires, et une hiérarchie des stations relativement identique. Toutefois, certaines différences sont notables. Les stations AF, SG et JC se distinguent par les durées d'exposition au stress thermique les plus faibles. Cette faible exposition s'explique par leur environnement majoritairement ombragé, soit par des murs (AF, JC), soit par des arbres (SG). À l'opposé, les stations CE et MS présentent les durées les plus élevées d'exposition au stress thermique **extrême** (respectivement 117 h et 120 h en 2023). Ces sites sont des milieux très ouverts sans éléments faisant obstacle à l'exposition au soleil à proximité du capteur. Ils sont également placés sur des surfaces claires (chemin en gravier blanc à CE) qui peuvent accentuer, par leur albédo élevé, le rayonnement réfléchi depuis le sol. Enfin, les stations les plus exposées, tous seuils confondus, sont IV en 2023, ainsi que CE et VD en 2024 (MS et LX très proche). Ces sites partagent une morphologie urbaine très ouverte, propice à une très forte exposition au rayonnement en journée, dès le lever et jusqu'au coucher du soleil.

Variabilité quotidienne

Afin d'analyser la variabilité spatio-temporelle du stress thermique au sein de la journée, une carte thermique a été construite (Fig. 7). Elle représente, pour chaque heure de la journée, le nombre de jours dépassant le seuil de stress thermique modéré pour les 66 jours retenus des étés 2023 et 2024. Cette visualisation permet l'identification des motifs de stress thermique ainsi que des différences entre les environnements urbains. De manière générale, l'été 2024 se caracté-

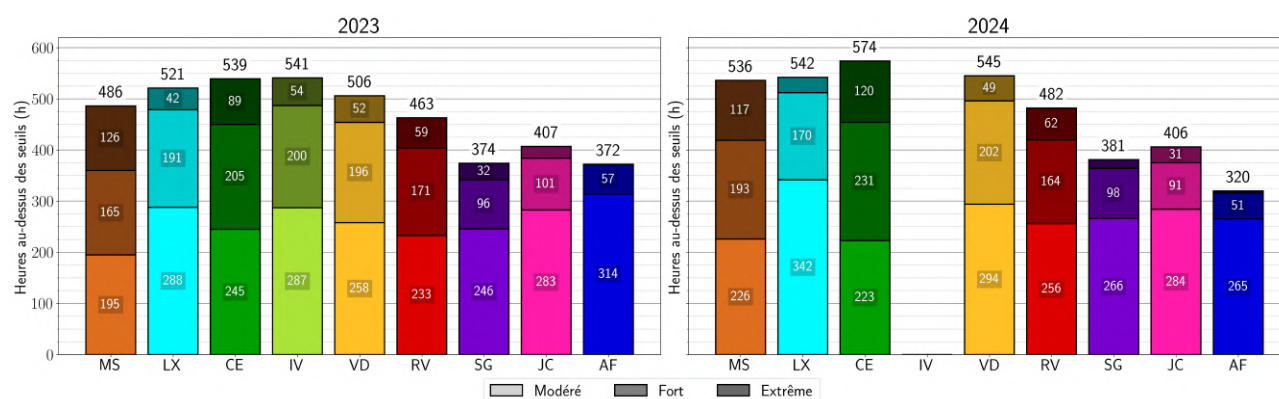


FIGURE 6 – Répartition des heures au-dessus des seuils de stress thermique d'UTCI du 6 juillet au 10 septembre 2023 et 2024

rise par un nombre plus important d'heures en situation de stress thermique, confirmant des conditions climatiques plus chaudes que celles observées l'année précédente. L'analyse de la figure permet de distinguer trois grandes catégories de stations :

1. La station AF se distingue nettement par un pic localisé de stress thermique entre 7h et 9h, correspondant à sa seule période d'exposition directe au rayonnement solaire. Le reste du temps, la station demeure à l'ombre, ce qui limite fortement le stress thermique.
2. Les stations situées dans des environnements végétalisés (IV, MS, LX et CE) présentent une forte intensité de stress thermique en journée, suivie d'une nette chute dès le coucher du soleil. Ce comportement s'explique par la présence de végétation et l'humidité du sol, qui favorisent un refroidissement rapide en soirée. L'évapotranspiration permet de limiter la durée du stress thermique après le coucher du soleil. L'énergie reçue par une surface naturelle est en partie conduite vers les couches profondes du sol et en partie directement transformée en vapeur d'eau via le flux de chaleur latente. En conséquence, peu de chaleur est accumulée durant la journée, et donc peu restituée la nuit. De plus, ces zones végétalisées bénéficient d'un refroidissement par divergence du flux radiatif : après le coucher du soleil, les surfaces émettent de l'énergie sous forme de rayonnement infrarouge vers l'atmosphère libre, ce qui accentue la baisse des températures près du sol.
3. Les stations implantées dans des zones minéralisées (VD, JC, SG, RV) présentent un stress thermique plus étalé, persistant en soirée et parfois une partie de la nuit. Dans ces environnements, la chaleur emmagasinée dans les matériaux au cours de la journée est restituée vers l'air ambiant après le coucher du soleil, ce qui limite le refroidissement nocturne et par conséquent, retarde le retour à des conditions plus confortables et prolonge la sensation de stress thermique. En journée c'est donc le rayonnement qui a le plus d'influence mais la nuit c'est la température de l'air qui agit sur le confort thermique.

Au-delà de cette typologie générale, certaines stations présentent des comportements différents malgré des contextes urbains comparables. En effet, RV et SG sont toutes deux situées sur de grands boulevards parisiens, orientés est-ouest, et pourraient donc *a priori* présenter des réponses de stress thermique proches. Pourtant, une différence nette apparaît en matinée : SG montre une nette atténuation du stress thermique, contrairement à RV. Cette différence s'explique par la présence d'un arbre surplombant le capteur de température du globe noir de SG, qui bloque le rayonnement solaire direct de 9 à 12 h UTC.

Cet ombrage prolongé pourrait faire penser que SG réagit de manière similaire à JC, installée dans un canyon urbain très étroit et également à l'ombre le matin. Cependant, entre 9h et 12h, JC enregistre un stress thermique plus élevé que SG. Cela peut s'expliquer par la forte minéralité de la rue Jacques Callot, mais aussi par la couleur claire des façades environnantes qui amplifient les réflexions du rayonnement solaire depuis les murs vers le capteur.

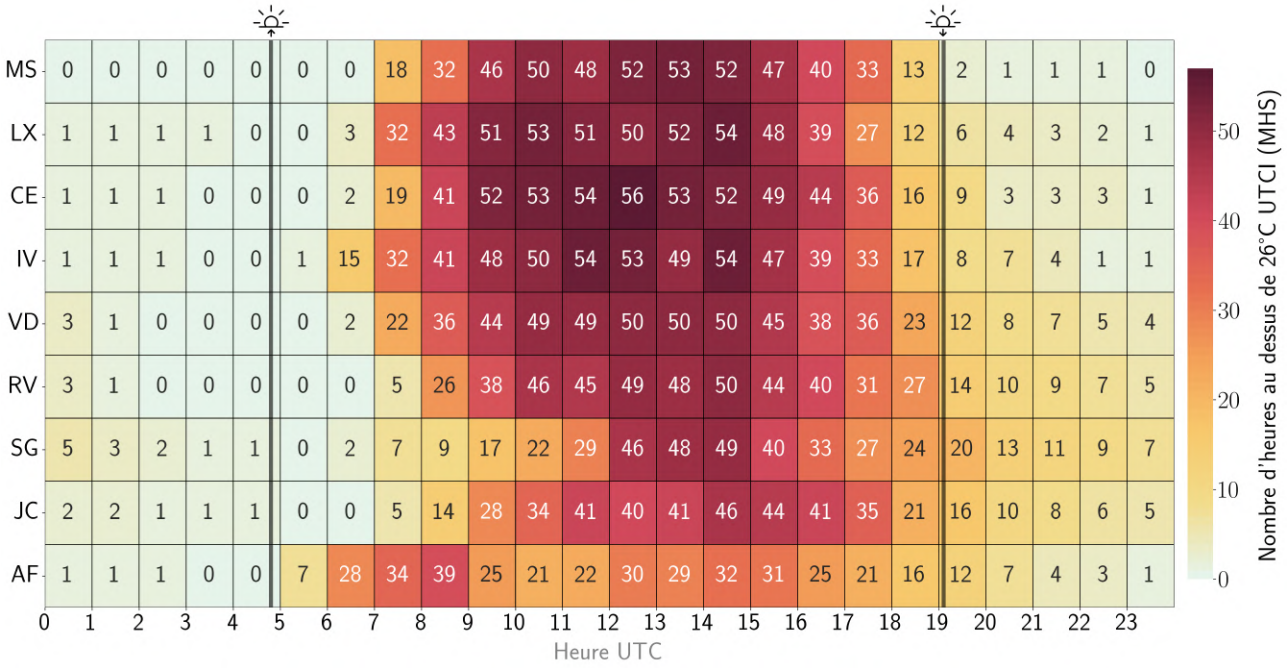


FIGURE 7 – Distribution du stress thermique par station pour l’été 2023. Heure au dessus du seuil de stress thermique modéré

Enfin, il est à noter que les stations qui présentent le plus grand nombre d’heures de stress thermique, comme IV, VD et CE, sont celles situées dans des espaces très ouverts et donc fortement exposés au rayonnement. Dans le cas particulier de CE, cette exposition est probablement amplifiée par la présence de gravillons blancs au sol, qui augmentent la réflexion solaire, contribuant à élever la température de globe noir (T_g), et donc l’UTCI. Cette hypothèse est particulièrement renforcée par l’analyse de l’été 2024, où CE apparaît comme la station la plus longtemps exposée au stress thermique.

Les neuf stations IoT permettent de mettre en évidence des différences significatives en termes d’exposition au stress thermique entre les environnements étudiés. Toutefois, elles apportent une information très localisée de cette exposition et le réseau de stations reste insuffisant pour capturer la variabilité spatio-temporelle du stress thermique sur l’ensemble de la ville. Pour dépasser cette limite, le recours à un modèle numérique pouvant simuler le climat urbain à haute résolution, permettrait d’obtenir des résultats de l’exposition au stress thermique sur tout le territoire parisien. Afin d’assurer la fiabilité de ces simulations, une étape de validation est d’abord nécessaire. C’est l’objet de la seconde partie de ce travail, dans laquelle les observations présentées ici seront utilisées pour évaluer les performances du modèle.

2. Étude de l'exposition à la chaleur avec un modèle météorologique de recherche

2.1 Description du modèle couplé MESO-NH/SURFEX

2.1.1 Modèles et configuration MESO-NH

MESO-NH (LAC et al., 2018), développé au CNRM depuis 1993, est un modèle atmosphérique de recherche non-hydrostatique conçu pour simuler des processus météorologiques depuis la meso-échelle (mailles horizontales de 1 à 10 km de côté) et jusqu'à la très haute résolution. MESO-NH repose sur un maillage spatial, c'est-à-dire une division régulière du territoire en mailles au sein desquelles les équations de l'atmosphère sont résolues.

MESO-NH est couplé au modèle de surface SURFEX (MASSON et al., 2013), qui modélise les échanges entre l'atmosphère et différents types de surfaces. Sur la grille de modélisation, la surface est décrite comme une mosaïque avec plusieurs types de couverts (sols naturels et végétation, rivières et lacs et milieux urbains). Un modèle de surface dédié est appliqué à chaque type de couvert, pour calculer les flux de surface (énergie, eau, quantité de mouvement) :

- ISBA (NOILHAN et al., 1996) modélise les processus hydrologiques, thermiques et énergétiques pour les sols naturels et la végétation (ainsi que la neige en surface),
- FLake est dédié aux lacs (SALGADO et al., 2010),
- TEB (MASSON, 2000, SCHOETTER et al., 2020) simule les zones urbaines.

Les flux sont ensuite agrégés sur la maille en fonction des fractions respectives d'occupation du sol, et renvoyés au modèle atmosphérique.



FIGURE 8 – Répartition des modèles de surface pour une zone donnée (Aude Lemonsu, Tim Nagel & Cécile de Munck. Cours de Météorologie Urbaine, École Nationale de la Météorologie)

MESO-NH est forcé par les conditions initiales et limites du modèle AROME (SEITY et al., 2011) qui est un modèle centré sur la France, utilisé pour la prévision numérique du temps à haute résolution de 1,3 km. La configuration de simulation de MESO-NH est organisée en trois domaines emboîtés de résolutions horizontales croissantes (1,2 km sur le nord de la France, 300 m sur l'Île-de-France, et 100 m sur Paris et la petite couronne), avec une grille verticale permettant d'estimer directement les variables physiques à 2 m du sol. Les données d'occupation du sol sont issues des bases ECOCLIMAP-SG (WIKI – ECOCLIMAP-SG – CNRM OPEN SOURCE SITE, 2018), OpenStreetMap (OSM, 2025) et MApUCE (TORNAY et al., 2017) permettant une représentation fine des caractéristiques de surface et du bâti. Les sorties du modèle MESO-NH couplé à SURFEX, centrées sur Paris ont été exploitées pour cette étude à partir de simulations existantes produites par l'équipe VILLE.

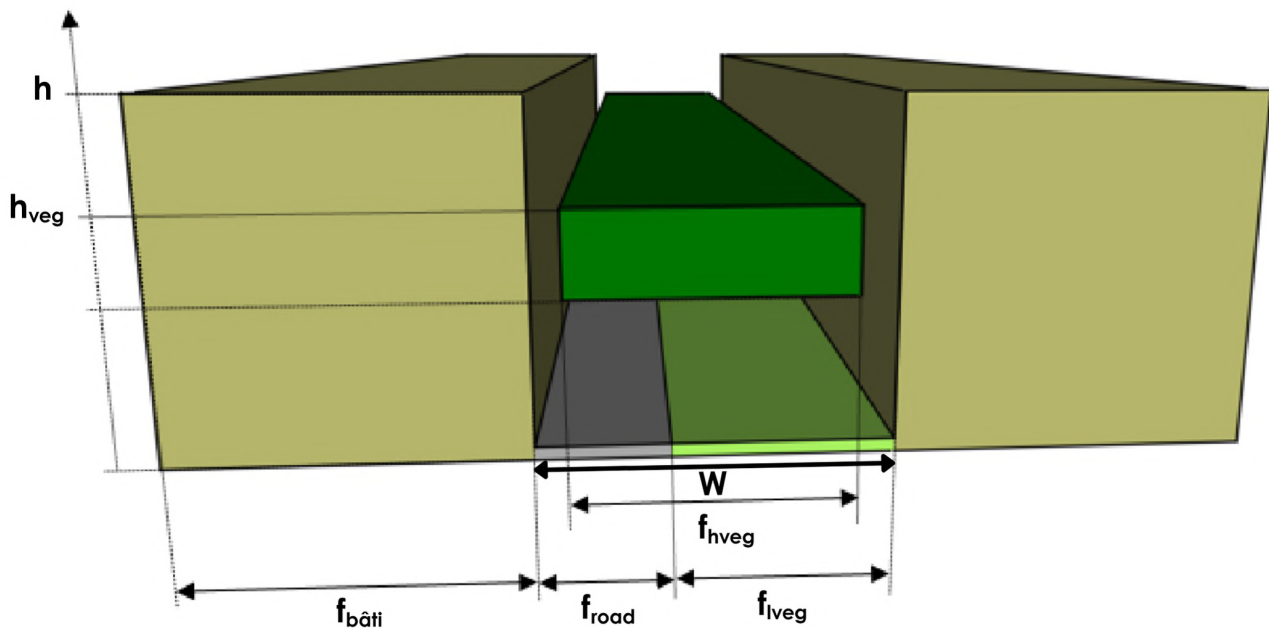


FIGURE 9 – Canyon urbain équivalent et ses paramètres associés dans le modèle TEB avec végétation haute (modifié de REDON et al., 2017)

2.1.2 Modèle de canopée urbaine TEB

Comme décrit précédemment, chaque maille de surface est caractérisée par une combinaison de couverts avec :

- f_{nature} : fraction de la maille occupée par des milieux naturels, gérée par ISBA (%)
- f_{water} : fraction de la maille occupée par des plans d'eau, gérée par FLake (%)
- f_{town} : fraction de la maille urbanisée, gérée par TEB (%)

Dans la suite, le modèle de climat urbain TEB est présenté plus en détail.

Canyon urbain équivalent

Le modèle TEB (MASSON, 2000) a été développé pour simuler les échanges d'énergie et d'eau entre les environnements urbains et l'atmosphère. Il prend en compte de nombreux processus radiatifs, énergétiques, hydriques, et turbulents : la géométrie 3D de la ville, les effets d'ombrage, le piégeage radiatif, la conduction thermique dans les toits, murs et routes, l'interception des précipitations par les routes et les toits, l'évaporation et le ruissellement de surface de l'eau interceptée, l'évolution de la couverture neigeuse sur les routes et les toits, et les échanges turbulents l'évolution des variables microclimatiques dans les rues.

Pour tenir compte de ces processus, le modèle repose sur une simplification de la morphologie urbaine. Il discrétise la ville en mailles et représente les caractéristiques du tissu urbain de chaque maille par un *canyon urbain équivalent* : une rue infinie bordée de deux bâtiments identiques se faisant face (Fig. 9). Ce canyon simplifié se compose de surfaces minérales mais peut aussi inclure une part de sols naturels, de végétation au sol et d'arbres de rue.

Les données issues du module TEB, disponibles pour chaque maille pour décrire le tissu urbain de la fraction f_{town} (Fig. 9), sont les suivantes :

- f_{bati} : part du bâti (%)
- f_{road} : part de la voirie (%)
- f_{nveg} : part du sol nu (non végétalisé) (%)
- f_{hveg} : part de la végétation haute (arbres) qui se superpose aux surfaces au sol (%)
- f_{lveg} : part de la végétation basse (herbes) (%)
- W : largeur du canyon urbain équivalent (m)

- h : hauteur des bâtiments bordant le canyon (m)
- h_{veg} : hauteur moyenne de la végétation haute (m)

Calcul de l'UTCI dans SURFEX

Le modèle TEB diagnostique dans chaque maille urbaine l'indice de confort thermique UTCI pour un individu dans la rue, à partir de la température radiante (tenant compte des contributions de rayonnement de l'environnement), de la température et de l'humidité de l'air, et de la vitesse du vent. TEB différencie trois méthodes de calcul de l'UTCI, correspondant à trois situations différentes au sein d'un canyon urbain :

- $UTCI_{soleil}$: représente les conditions ressenties par une personne exposée en plein soleil dans le canyon
- $UTCI_{ombre}$: correspond à une personne située à l'ombre
- $UTCI_{agregé}$: intègre les caractéristiques du canyon pour moduler l'exposition au soleil ou à l'ombre tout au long de la journée

Il existe également deux configurations possibles pour ISBA :

- $ISBA_{soleil}$
- $ISBA_{ombre}$

Il n'existe pas de calcul d'UTCI dans le module FLake.

2.2 Évaluation du modèle à simuler les conditions de confort thermique

2.2.1 Représentation de l'environnement de la station dans le modèle

Dans un premier temps, il est nécessaire de vérifier que les canyons urbains équivalents simulés par le modèle pour chaque maille de $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ sont représentatifs de l'environnement réel autour des stations étudiées.

L'extraction des caractéristiques de surface a été réalisée aux points de grille correspondant à la localisation des stations (Tab. 5). La maille correspondant à la station MS est entièrement gérée par ISBA, avec une couverture naturelle de 100 %, ce qui est cohérent avec sa localisation dans un espace végétalisé dépourvu d'infrastructure urbaine. À l'inverse, pour VD, RV, SG et JC, les flux de surface sont gérés uniquement par TEB. Ces stations sont toutes situées dans des environnements très minéralisés, avec une forte présence de bâti et de voirie, et une végétation quasi absente, ce qui correspond bien à la réalité de terrain observée.

Les mailles correspondant à certaines stations sont gérées par TEB et ISBA à la fois : c'est le cas de LX, CE et IV. Pour LX, la répartition est cohérente avec sa situation en bordure de parc : 55 % de f_{town} , 45 % f_{nature} . Dans la fraction de maille gérée par TEB (f_{town}), il y a une dominance de végétation basse ($f_{lveg} = 77\%$) accompagnée de végétation haute ($f_{hveg} = 16\%$). Bien que la station elle-même soit implantée dans une zone végétalisée, sa proximité immédiate avec des rues justifie la part de surfaces bâties ($f_{bati} = 16\%$) et de voirie ($f_{road} = 7\%$). Cela suggère une influence possible du tissu urbain voisin sur la station.

La station CE, également localisée dans un parc urbain, présente une répartition équilibrée entre la f_{nature} et f_{town} (50 % chacune). Toutefois, la part de végétation haute y est étonnamment nulle, ce qui paraît différent de la réalité observée. Cette absence peut s'expliquer par la résolution de la maille, qui ne capte pas nécessairement la présence de grands arbres plus éloignés de la station ou d'un manque dans les données OSM (*OpenStreetMap*). Le fort pourcentage de voirie ($f_{road} = 35\%$) peut s'expliquer par la présence de l'avenue des Champs-Élysées assez proche.

À IV, les données reflètent parfaitement les conditions locales : la station est située sur une esplanade de gazon bordée par des rangées d'arbres et coupée par de larges avenues. Le modèle attribue 75 % à la f_{nature} , en lien avec la présence d'arbres proches, et 25 % à la f_{town} . Dans cette dernière, la répartition est de $f_{lveg} = 50\%$ et $f_{road} = 50\%$, ce qui correspond à l'environnement immédiat.

Enfin, la station AF présente une configuration mixte, modélisée à 67 % par TEB et à 33 % par FLake, en raison de la proximité directe de la Seine. La faible part de bâti ($f_{bati} = 9\%$) et la forte proportion de voirie ($f_{road} = 68\%$) sont

cohérentes avec le positionnement de la station sur un quai de Seine, tandis que les valeurs de f_{hveg} et f_{lveg} reflètent la faible densité végétale du site mais tout de même présente.

Globalement, la répartition des fractions de surface est cohérente avec les observations de terrain. Certaines disparités peuvent s'expliquer par la résolution du modèle, souvent plus large que l'environnement direct de la station.

Station	f_{town}	f_{nature}	f_{water}	f_{lveg}	f_{hveg}	f_{road}	f_{bati}	H
MS	–	100 %	–	–	–	–	–	–
LX	55 %	45 %	–	77 %	16 %	7 %	16 %	12.2
CE	50 %	50 %	–	64 %	–	35 %	1 %	5.1
IV	25 %	75 %	–	50 %	–	50 %	1 %	2.0
VD	100 %	–	–	–	–	60 %	40 %	17.0
RV	100 %	–	–	5 %	2 %	42 %	52 %	20.7
SG	100 %	–	–	15 %	3 %	49 %	36 %	14.4
JC	100 %	–	–	2 %	–	37 %	61 %	18.0
AF	67 %	–	33 %	23 %	11 %	68 %	9 %	10.0

TABLE 5 – Caractéristiques de surface pour chaque station selon TEB

Le rapport d'aspect est un paramètre important dans la caractérisation des canyons urbains. Il se calcule en faisant le ratio de la hauteur des bâtiments de la rue sur la largeur de la rue ($\frac{h}{w}$, Fig. 9). Des valeurs élevées correspondent à des canyons étroits où les effets d'ombrage seront importants, alors que les valeurs plus basses correspondent à des canyons plus ouverts et donc plus exposés au soleil.

Station	h/w Observé	h/w Modélisé
MS	–	–
LX	–	0,25
CE	–	0,01
IV	–	0,005
VD	0,18	0,69
RV	0,97	1,69
SG	0,64	0,81
JC	1,30	3,46
AF	–	0,07

TABLE 6 – Rapport h/w observé et modélisé par station

Il y a un écart important entre les rapports d'aspect observés sur le terrain et ceux issus de la modélisation, comme l'illustre le tableau Tab. 6.

Par ailleurs, ce paramètre n'est pas pertinent pour les stations situées dans des parcs, où la notion de canyon urbain ne s'applique pas. Il s'agit d'une limite du modèle, sur laquelle il n'est pas possible d'intervenir directement, mais qui est prise en compte dans l'interprétation des résultats.

Malgré ces écarts, une cohérence relative est observée entre les stations. Ainsi, JC, identifiée comme la rue la plus étroite d'après les observations, est également celle présentant le plus fort rapport d'aspect dans la modélisation. À l'inverse, la station VD, située sur une place très ouverte, affiche le rapport d'aspect modélisé le plus faible. Ces correspondances suggèrent que, même si les valeurs absolues diffèrent, les tendances générales sont respectées.

2.2.2 Analyse des cycles diurnes

Données utilisées

La figure 10 présente les cycles diurnes moyens sur 66 jours d'été de l'UTCI, pour les neuf stations étudiées. Les courbes noires représentent les observations issues des stations IoT, tandis que les courbes rouges et bleues correspondent respectivement aux sorties du modèle TEB et du modèle ISBA. Les courbes en pointillés représentent les calculs de l'UTCI en conditions ensoleillées ($UTCI_{\text{soleil}}$), et celles en tirets en conditions ombragées ($UTCI_{\text{ombre}}$).

Résultats et analyse

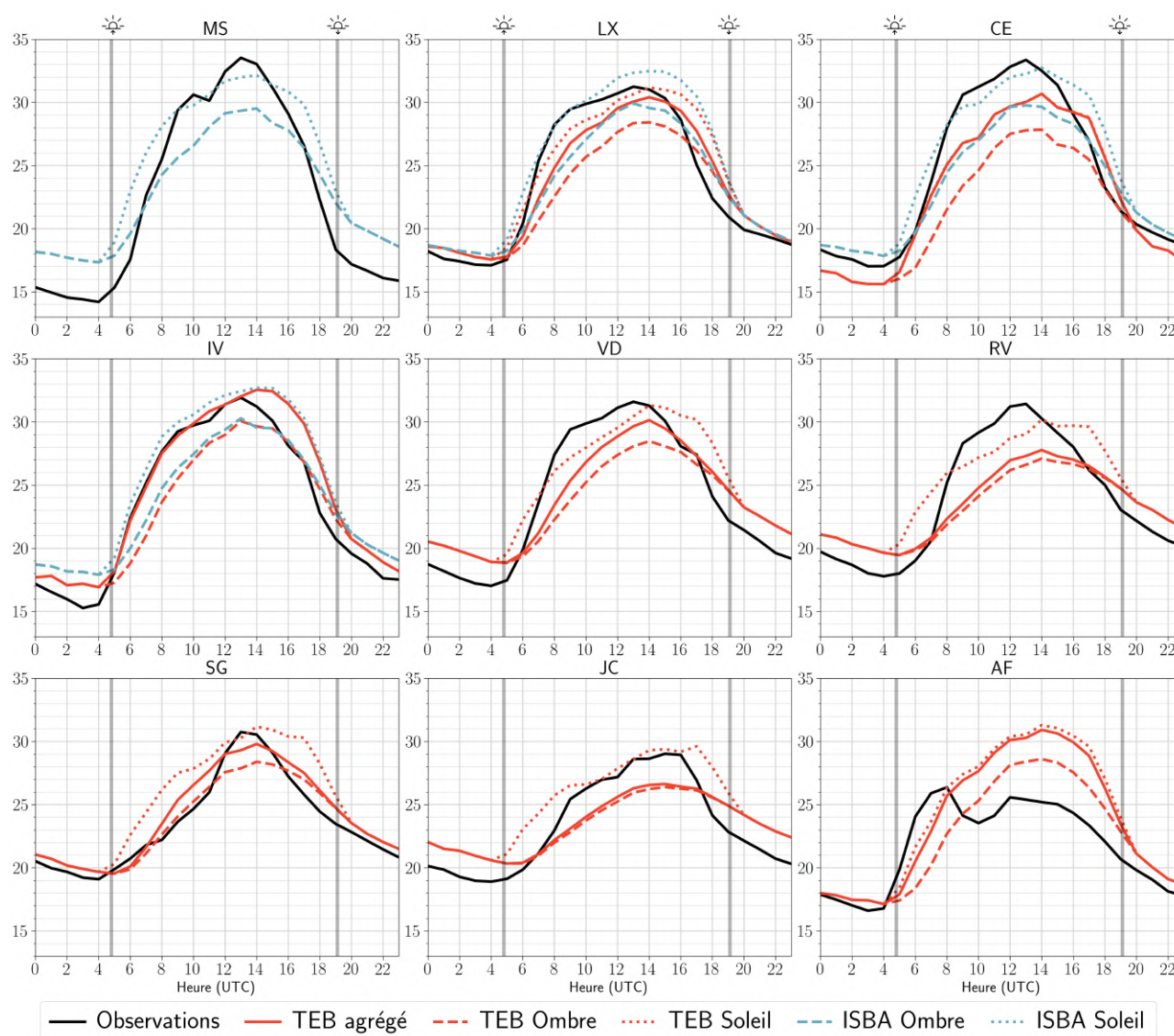


FIGURE 10 – Comparaison des observations aux sorties modèles (TEB ISBA) pour chaque station (6 juillet au 15 septembre 2023)

Cette comparaison permet d'évaluer la capacité du modèle MESO-NH à reproduire la variabilité de l'UTCI selon différents types d'environnement.

Pour les stations situées dans des parcs (CE, LX, IV, MS), les cycles diurnes observés sont globalement bien reproduits par le modèle, avec une meilleure performance d'ISBA par rapport à TEB. L'UTCI ISBA soleil/ombre est très similaire pour les 4 espaces verts. Pour certains sites cela correspond bien aux observations (CE), pour d'autres moins (LX, MS). Cela illustre l'importance d'effet locaux sur la mesure, que le modèle n'arrive pas ou peu à reproduire. À

IV, les observations sont proches de la simulation ISBA soleil jusqu'à 13 h, traduisant un environnement très ouvert et végétalisé. Mais le stress thermique observé diminue ensuite plus rapidement que celui du modèle, plus marqué à IV mais est aussi observable pour les 4 sites situés dans les parcs. Pour LX, la courbe agrégée de TEB ne correspond ni aux conditions ensoleillées ni aux conditions ombragées, suggérant que la maille modélisée intègre un canyon urbain absent du site réel. À CE, les valeurs observées de stress thermique sont particulièrement élevées, probablement liées à la forte réflexion des gravillons blancs à côté de la station, ce qui est bien reproduit par ISBA soleil mais largement sous-estimé par TEB soleil (quasiment superposé à TEB agrégé). La différence marquée de près de 3 °C entre les simulations TEB soleil et ISBA soleil restent difficile à expliquer. Enfin, la station MS présente un stress thermique important, fortement sous-estimé par le modèle TEB, sans explication évidente.

Dans les canyons urbains (VD, RV, SG, JC), le modèle ne rend pas compte l'orientation préférentielle des rues, ce qui induit des écarts liés à l'ensoleillement réel. À VD, le modèle donne des résultats très proches des observations en début de journée, mais les écarts augmentent lorsque l'ensoleillement diminue l'après-midi. À RV, la représentation est globalement mauvaise sur l'ensemble du cycle diurne car le canyon du modèle est trop étroit. SG présente un comportement mieux reproduit : à l'ombre en matinée, exposition solaire en milieu de journée, puis retour à l'ombre en fin d'après-midi. Pour JC, les résultats sont plus surprenants : le modèle laisse entendre une exposition quasi permanente au soleil, alors que l'étroitesse du canyon rend ce scénario peu probable. Cette incohérence pourrait s'expliquer par la prise en compte du capteur BG de la réflexion solaire sur un mur blanc adjacent à la station.

La station AF constitue un cas particulier, exposée au soleil le matin puis à l'ombre le reste de la journée. Ce type de configuration, influencée à la fois par la proximité d'un mur et par la présence d'arbres en surplomb, n'est pas capté par le modèle.

De manière générale, les stations en parc sont globalement mieux simulées, avec une supériorité notable d'ISBA sur TEB. Les canyons urbains présentent une performance plus variable, fortement dépendante des conditions locales d'ensoleillement, d'ombrage et d'orientation des rues. Aucune configuration modélisée ne permet de reproduire fidèlement l'UTCI sur l'ensemble des sites, car la variabilité observée est dominée par des spécificités locales que le modèle ne représente pas. Néanmoins, certaines tendances observées sont retrouvées dans les simulations, et les écarts s'expliquent souvent par l'environnement immédiat non pris en compte.

Ainsi, bien que la validation du modèle à l'échelle ponctuelle montre des limites, celui-ci reste exploitable pour la spatialisation de l'UTCI à l'échelle de la ville de Paris. L'enjeu réside alors dans le choix de l'UTCI à représenter (ISBA soleil/ombre, TEB soleil/ombre/agrégé).

Notons qu'un travail complémentaire a été mené sur d'autres mailles, afin d'évaluer si une configuration plus proche des conditions réelles d'exposition permettrait d'obtenir de meilleurs résultats. Pour cela, des "mailles similaires" ont été définies, en cherchant à reproduire plus fidèlement les caractéristiques des environnements observés autour des stations (voir annexes).

2.3 Exploitation du modèle validé

2.3.1 Cartographie du confort thermique sur Paris à partir du modèle

Construction des cartes

Ces cartes Fig. 11 représentent le confort thermique (UTCI) simulé à l'échelle de Paris pour une heure donnée. Le territoire étant découpé en mailles, on dispose d'une valeur d'UTCI issue du modèle pour chacune. En fonction de la répartition des fractions de surfaces dans chaque maille, différents UTCI sont utilisés. Pour les mailles 100 % f_{town} , l'UTCI de TEB est utilisé. Pour les mailles 100 % f_{nature} c'est celui de ISBA et pour les mailles gérées à la fois par ISBA et par TEB, l'UTCI appliqué est une moyenne des deux UTCI pondérés par la f_{town} et la f_{nature} .

Les points correspondent aux données observées aux neuf stations IoT de Paris. Ils utilisent la même échelle de couleurs que les mailles. Les mailles blanches indiquent des mailles composées à 100% d'eau ($f_{\text{water}} = 1$), pour lesquelles

l'UTCI n'est pas calculé.

L'analyse des cartes met en évidence une nette différence de confort thermique entre les zones ombragées ($ISBA_{\text{ombre}}$) et ensoleillées ($ISBA_{\text{soleil}}$) au sein des parcs, ce qui confirme les observations issues des cycles diurnes (Fig. 10). Le rayonnement solaire direct joue un rôle déterminant dans la sensation de chaleur, particulièrement lors de cette journée marquée par une vague de chaleur exceptionnelle. En effet le 9 septembre enregistre un record de température pour l'année 2023 à Paris avec un pic de température de l'air à 35.8°C. Il est donc clairement préférable d'être à l'ombre, notamment sous les arbres, plutôt qu'en plein soleil, même dans un espace végétalisé.

Cependant, dans les figures représentant toutes les configurations (Fig. 11), lorsqu'on compare les zones ombragées en ville et celles situées dans les parcs, les différences de température apparaissent peu marquées sur la carte. Les parcs semblent légèrement plus frais, mais sans contraste thermique très fort. Cela suggère que le simple fait d'être dans un parc n'assure pas à lui seul un confort thermique optimal en journée.

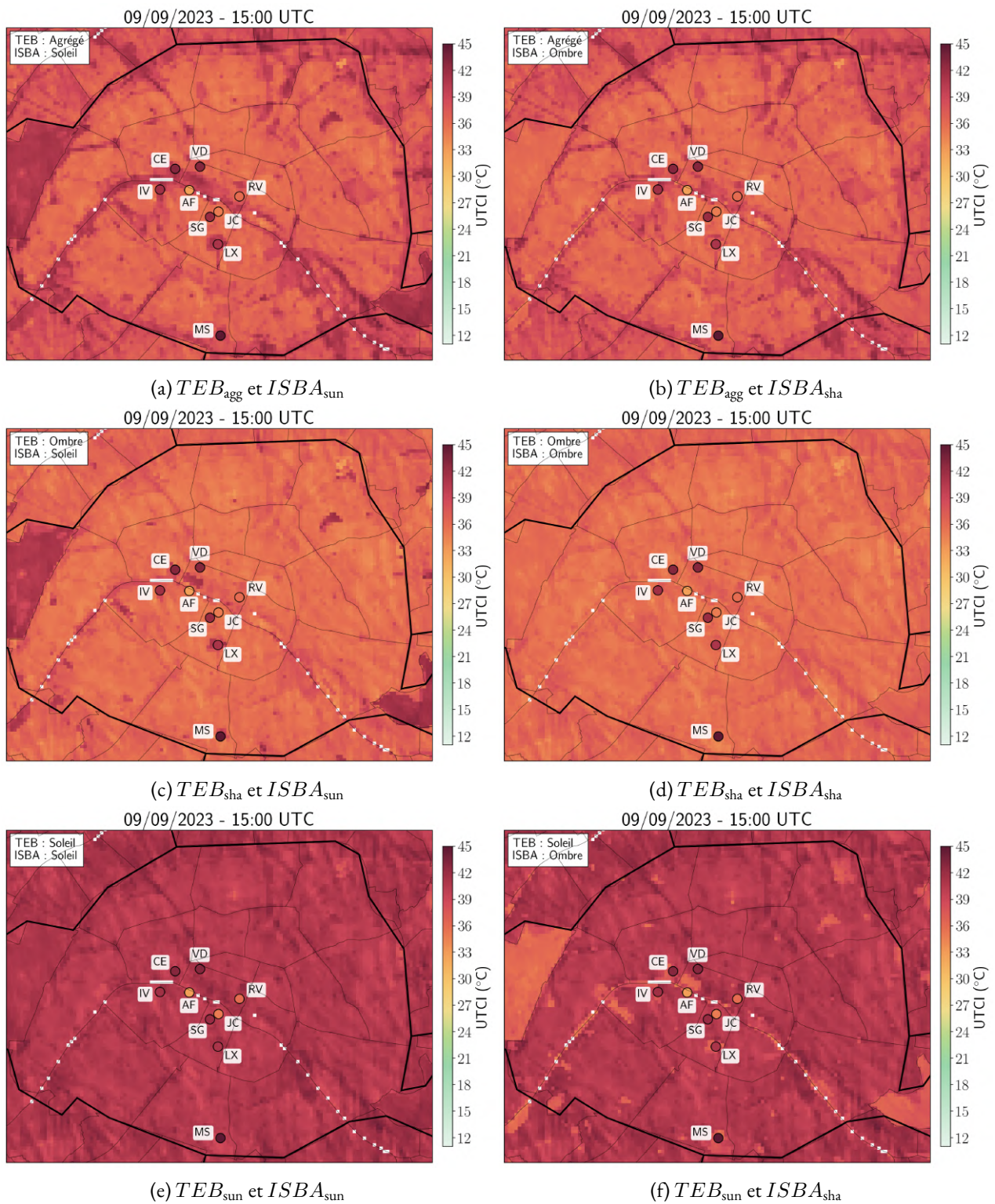


FIGURE II – Cartes du confort thermique (UTCI) à Paris le 9 septembre 2023 à 15h : comparaison des simulations issues du modèle MESO-NH couplé à TEB et ISBA selon plusieurs configurations de (agrégé/soleil/ombre), avec superposition des observations

La carte 2D nocturne (Fig. 12) illustre l'impact du rayonnement solaire sur le confort thermique. Même lors de l'une des nuits les plus chaudes de 2023, aucun stress thermique n'est observé, en l'absence de soleil. Dans ces conditions, c'est principalement la température de l'air à 2 m qui détermine le confort thermique. On distingue nettement que les parcs constituent des zones plus fraîches. La résolution spatiale de 100 m met également en évidence une hétérogénéité thermique au sein même de parcs de taille moyenne.

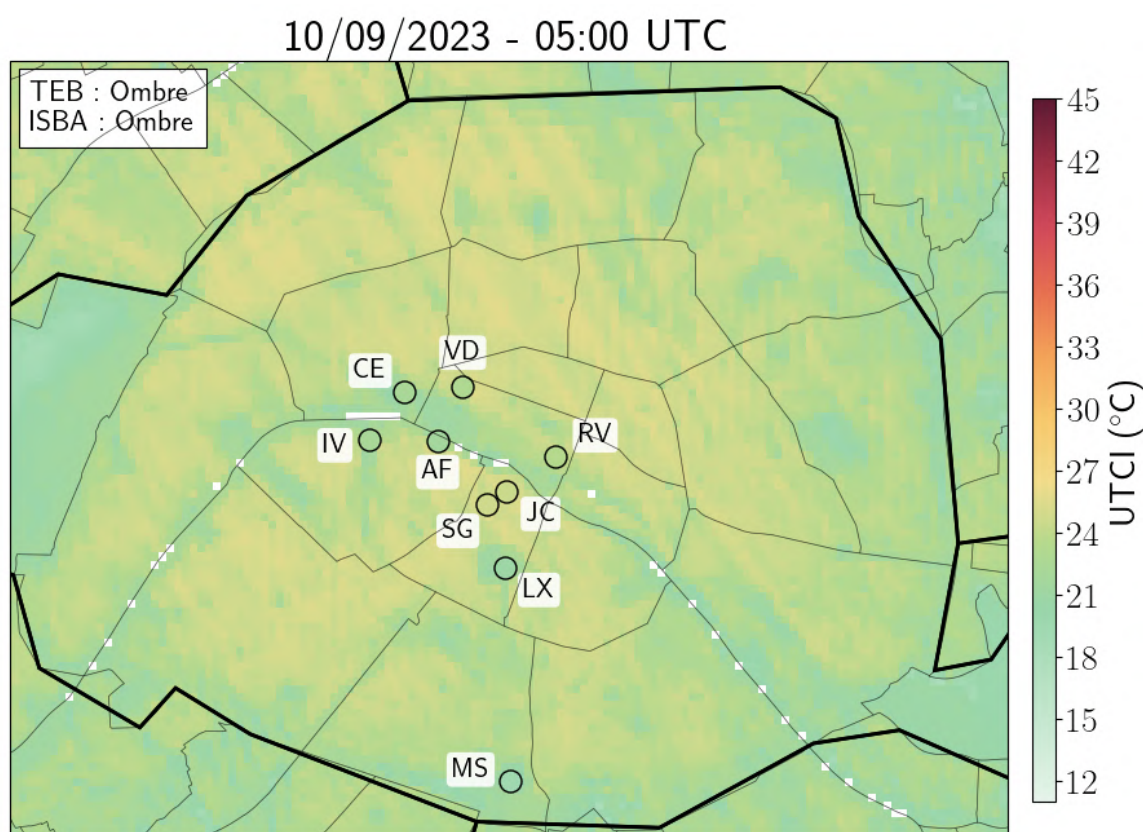


FIGURE 12 – Cartes du confort thermique (UTCI) à Paris le 10 septembre 2023 à 5h (UTC) :

Ces cartes, produites à une résolution spatiale fine (100 m), offrent une information très localisée, ce qui rend parfois leur interprétation difficile. Cela soulève la question de l'échelle pertinente pour analyser et communiquer les résultats liés au confort thermique : à quelle échelle faut-il raisonner ?

2.3.2 Ouvertures et perspectives

La validation du modèle reste incomplète. Les résultats de la Fig. 10 montrent qu'il ne parvient pas à reproduire fidèlement certains environnements spécifiques. De plus, l'orientation des rues peut jouer un rôle déterminant à fine échelle. Il serait donc pertinent d'évaluer dans quelle mesure ce facteur influence les résultats. En considérant le modèle validé/correct en l'état, il est possible d'obtenir une grande quantité d'informations fines à l'échelle de la maille (traduisant une variabilité sous-maille). Toutefois, l'interprétation de ces résultats bruts reste difficile, en particulier pour les non-spécialistes. L'un des enjeux majeurs réside donc dans la transmission claire et synthétique de ces données afin de les rendre exploitables par les décideurs publics, les collectivités ou les aménageurs urbains. Le modèle MESO-NH, permet de produire une cartographie précise du stress thermique. Cependant, une telle précision peut parfois nuire à la lisibilité globale de l'information. Une piste d'amélioration consiste à développer des méthodes d'agrégation spatiale et/ou temporelle adaptées aux besoins des acteurs de terrain. A l'inverse, une autre approche pourrait être de s'appuyer sur des masques précis d'ensoleillement du couvert urbain au cours de la journée pour redistribuer spatialement les UTCI ombre et soleil. L'objectif est de proposer des outils d'aide à la décision qui rendent l'information accessible, pertinente et exploitable. Cela suppose également une réflexion sur la manière de spatialiser les résultats de manière intelligible et pertinente.

3. Conclusion

L'analyse de données d'observation issues de stations météorologiques urbaines et l'exploitation de sorties de modèle climatique à haute résolution avaient pour objectif de mieux comprendre la variabilité du stress thermique en milieu urbain à travers différents types d'environnements.

L'étude a d'abord permis de comparer plusieurs indices de confort thermique (UTCI, WBGT, PET, PMV, DI), avant de retenir l'UTCI comme indicateur principal. Ce choix s'est fondé sur sa robustesse et sa lisibilité. L'analyse des observations a mis en évidence des différences nettes entre les neuf sites étudiés, reflétant la diversité des morphologies urbaines : végétalisation, minéralisation, présence d'eau, exposition au soleil, etc.

Dans un second temps, les simulations issues du modèle MESO-NH couplé à TEB ont été mobilisées. L'évaluation du modèle a montré sa capacité à bien reproduire les grandes tendances des cycles diurnes et des gradients de confort thermique entre les stations. Certaines limites subsistent néanmoins, notamment dans la représentation fine des formes urbaines (orientation des rues, végétation très localisé) qui influencent fortement le micro-climat du site.

Malgré cela, MESO-NH s'avère être un outil pertinent pour simuler le confort thermique à grande échelle et en conditions réalistes. La question essentielle reste celle de la présentation des résultats du modèle en cartes lisibles et utiles pour les acteurs de la planification urbaine. Le choix de l'indice, la méthode d'agrégation et la résolution spatiale sont autant de paramètres à ajuster pour assurer une transmission claire et efficace de l'information.

Chapitre 3 : Livrables de la mission

Bien qu'il s'agisse d'un stage de recherche, et qu'aucun livrable formel n'ait été exigé, plusieurs productions ont été réalisées : scripts, figures, présentations et rapport de stage. La Direction des Services Météorologiques (DSM) a manifesté un intérêt pour mes travaux sur le confort thermique en ville. J'ai notamment préparé des slides utilisés lors d'une présentation à la DSM, effectuée par la cheffe d'équipe. Par ailleurs, une fois certains points clés du travail analysés de manière plus systématique, ces résultats devraient faire l'objet d'une publication scientifique, que je rédigerai dans le cadre de la poursuite de mon activité au sein de l'équipe.

Chapitre 4 : Retour réflexif sur l'expérience

Ce stage de cinq mois s'est déroulé au Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) à Toulouse, au sein d'un projet de recherche portant sur le confort thermique à Paris durant la période estivale. J'ai trouvé cette opportunité sur le site du CNRM, attirée par la thématique de la météorologie urbaine. Bien que quelques notions de climatologie soient abordées dans notre cursus à Polytech Tours, elles restent peu approfondies. Cela m'a poussé à chercher une expérience me permettant d'aller plus loin. Par ailleurs, le sujet du stage, centré sur la ville, s'inscrit pleinement dans les thématiques du département Aménagement et Environnement.

Ce retour réflexif vise à faire le point sur les méthodes que j'ai mises en œuvre pour m'adapter au contexte de la recherche scientifique, à analyser de manière critique les résultats produits, à identifier les compétences acquises, et à envisager les apports de cette expérience dans la suite de mon parcours professionnel.

1. Démarche et méthodes employées

Ma mission principale pendant ce stage a été d'élaborer une démarche scientifique complète, en structurant un projet de recherche autour de différentes bases de données. Il s'agissait de produire mes propres analyses à partir de données issues de modèles météorologiques complexes et de réseaux de capteurs. Cela m'a demandé de concevoir progressivement une méthodologie rigoureuse, depuis la compréhension du sujet jusqu'à l'interprétation des résultats.

La météorologie était un domaine très nouveau pour moi. Pour combler mes lacunes, je n'ai pas hésité à poser de nombreuses questions à mes encadrants, mais aussi aux autres membres de l'équipe. Cette dynamique d'échange m'a permis de progresser rapidement et d'éviter de rester bloquée trop longtemps sur des incompréhensions.

J'ai également dû adopter de nouvelles méthodes de travail, en particulier une grande autonomie dans la gestion de mes tâches. J'ai travaillé presque exclusivement en Python, avec des jeux de données très volumineux. Ce type de données, à la fois massives et complexes, m'a demandé de développer des compétences en traitement, visualisation et analyse.

L'ambiance de travail au sein de l'équipe était particulièrement bienveillante et motivante. Mes collègues ont fait preuve de beaucoup de patience et ont toujours été prêts à m'aider. Des réunions d'équipe mensuelles permettaient à chacun de partager l'état d'avancement de ses travaux, ce qui m'a permis de comprendre comment s'insérait mon projet dans une dynamique de recherche collective.

Enfin, je me suis progressivement familiarisée avec un vocabulaire scientifique très spécifique, lié à la physique de l'atmosphère, aux phénomènes urbains et aux modèles numériques. La lecture d'ouvrages de référence, notamment *Urban Climates* (Oke et al., 2017), m'a beaucoup aidée dans mon stage.

2. Analyse critique des résultats produits

2.1 Points forts

Tout au long du stage, je me suis montrée très impliquée dans mon projet. Malgré la complexité du sujet, j'ai su faire preuve d'autonomie, tout en maintenant un lien régulier avec mes encadrants à travers des réunions de suivi. Cette organisation m'a permis de progresser efficacement, tout en validant régulièrement mes choix méthodologiques. J'ai également accordé une grande importance à la rigueur dans la conduite de mes analyses. J'ai pris soin de structurer mon travail de manière claire, en documentant les étapes de traitement et en produisant des supports lisibles et bien présentés. Enfin, j'ai su être force de proposition : j'ai testé différentes approches et variantes d'analyse, notamment au niveau des visualisations. Ces propositions étaient systématiquement discutées avec mes encadrants, ce qui a enrichi ma

compréhension des résultats et renforcé la qualité scientifique de mon travail. Une autre dimension importante de mon travail a été la production de métadonnées associées aux jeux de données exploités. J'ai pris le temps de m'approprier les données en analysant en détail leur structure, leur contenu, etc. Ce travail m'a permis de mieux les comprendre, d'en extraire les informations pertinentes pour mes analyses. Cette étape a renforcé ma capacité à exploiter efficacement des données complexes et à structurer une démarche d'analyse rigoureuse et reproductible.

2.2 Points faibles

Au cours du stage, j'ai parfois été freinée par mon manque initial de connaissances en météorologie et en climat urbain. Certaines notions complexes, comme le fonctionnement précis des modèles, m'étaient difficiles à appréhender au début. Cela a pu provoquer des blocages temporaires. Pour surmonter ces difficultés, j'ai fait preuve de persévérance et j'ai progressivement comblé mes lacunes. Aujourd'hui, je me sens bien plus à l'aise avec les notions de climat urbain, que ce soit en termes de phénomènes physiques, de méthodes d'analyse ou d'outils associés. Ce progrès est l'un des principaux acquis de ce stage.

3. Compétences développées et perspectives professionnelles

3.1 Compétences techniques

Ce stage m'a permis de progresser en Python, notamment dans l'analyse et l'exploitation de grands jeux de données et la production de graphiques. J'ai appris à structurer mes idées et à expliquer mes résultats de façon compréhensible. C'était la première fois que je manipulais des sorties de modèles numériques aussi complexes. J'ai donc gagné en rigueur et en efficacité. J'ai également mobilisé des compétences acquises en formation, notamment en SIG et en R, ce qui m'a permis de relier mes cours à une application concrète.

3.2 Compétences transversales

J'ai renforcé ma communication, à l'écrit comme à l'oral, en présentant régulièrement mes avancées. Le travail en équipe, facilité par une ambiance bienveillante, m'a aussi beaucoup apporté. J'ai appris à m'organiser en autonomie, à chercher des réponses par moi-même, et à m'adapter à des situations nouvelles. Enfin, cette expérience m'a aidée à gagner en assurance et à prendre des initiatives. J'ai d'ailleurs pu organiser et animer une fresque du climat pour l'équipe.

4. Prise de recul et projection professionnelle

Ce stage m'a permis de découvrir l'environnement de travail propre à la recherche, très différent de celui de l'entreprise. Même s'il ne m'a pas directement préparée au monde professionnel classique, il m'a apporté une meilleure compréhension du fonctionnement d'un laboratoire, de la démarche scientifique et du rythme propre à la recherche. Vers les deux tiers du stage, mes encadrants m'ont proposé de candidater à des concours pour poursuivre en thèse au sein de l'équipe. J'ai accepté ce défi, ce qui m'a amenée à travailler sur un nouveau sujet et à défendre mon projet devant plusieurs jurys de chercheurs. Cette expérience a été très formatrice : elle m'a permis de développer des compétences de synthèse, de prise de parole en public et de positionnement scientifique, dans un laps de temps très restreint. J'ai finalement obtenu la bourse, ce qui me permet de poursuivre mon parcours par une thèse au CNRM, toujours dans l'équipe ville, sur le sujet suivant : "Apport des observations conventionnelles et opportunes pour l'étude de la variabilité du climat urbain et l'amélioration de la prévisibilité des modèles". Ce projet ne s'inscrit pas exactement dans la continuité de mon stage, mais reste dans un domaine proche. Je continuerai à utiliser les données, les outils, certains scripts et les modèles avec lesquels j'ai déjà travaillé.

Ce stage a été une expérience marquante dans mon parcours. Il m'a permis de gagner en compétences, en autonomie et de découvrir un nouveau domaine. Il a été le point de départ d'un nouveau chapitre : celui d'une thèse, que j'aborde avec motivation et curiosité.

Bibliographie

- LEMONSU, (en révision). "PANAME-Urban campaign : investigating multiscale surface-atmosphere interactions and thermal-contrasts in the Paris region (France)". In : *Bulletin of the American Meteorological Society*. en révision.
- LAC, et al. (mai 2018). "Overview of the Meso-NH model version 5.4 and its applications". In : *Geoscientific Model Development*. 2018, 11 (5), p. 1929-1969, p. 1929-1969.
- WANG, et al. (2017). "Thermal comfort in urban green spaces : a survey on a Dutch university campus". In : *International journal of biometeorology*. 2017, 61 (1), p. 87-101, p. 87-101.
- HOUGHTEN, et al. (1924). *Effective Temperatures for Still Air Conditions and Their Application to Mining*. T. 2563.
- POTCHTER, et al. (août 2018). "Outdoor human thermal perception in various climates : A comprehensive review of approaches, methods and quantification". In : *Science of The Total Environment*. 2018, 631-632, p. 390-406, p. 390-406.
- BŁAŻEJCZYK, et al. (2013). "An introduction to the Universal Thermal Climate Index (UTCI)". In : *Geographia Polonica*. 2013, 86 (1), p. 5-10, p. 5-10.
- ZARE, et al. (mars 2018). "Comparing Universal Thermal Climate Index (UTCI) with selected thermal indices/environmental parameters during 12 months of the year". In : *Weather and Climate Extremes*. 2018, 19, p. 49-57, p. 49-57.
- HÖPPE, (1999). "The physiological equivalent temperature—a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment." In : *International journal of Biometeorology*. 1999, 43 (2), p. 71-75, p. 71-75.
- FANGER, et al. (juill. 2002). "Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates". In : *Energy and Buildings*. 2002, 34 (6), p. 533-536, p. 533-536.
- YAO, et al. (oct. 2009). "A theoretical adaptive model of thermal comfort – Adaptive Predicted Mean Vote (aPMV)". In : *Building and Environment*. 2009, 44 (10), p. 2089-2096, p. 2089-2096.
- MINARD, (déc. 1957). "Prevention of heat casualties". In : *Journal of the American Medical Association*. 1957, 165 (14), p. 1813, p. 1813.
- VERNON, et al. (juill. 1932). "The Influence of the Humidity of the Air on Capacity for Work at High Temperatures". In : *Journal of Hygiene*. 1932, 32 (3), p. 431-462, p. 431-462.
- THOM, (avr. 1959). "The Discomfort Index". In : *Weatherwise*. 1959, 12 (2), p. 57-61, p. 57-61.
- OKE, (2007). "Siting and exposure of meteorological instruments at urban sites". In : *Air pollution modeling and its application XVII*, p. 615-631.
- STEWART, et al. (déc. 2012). "Local Climate Zones for Urban Temperature Studies". In : *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2012, 93 (12), p. 1879-1900, p. 1879-1900.
- IQBAL, (2012). *An introduction to solar radiation*.

TARTARINI, et al. (juill. 2020). “pythermalcomfort : A Python package for thermal comfort research”. In : *SoftwareX*. 2020, 12, p. 100578, p. 100578.

ASHRAE (2020). *ANSI/ASHRAE Standard 55-2020 : Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. American Society of Heating, Refrigerating et Air-Conditioning Engineers.

ISO (2005). *ISO 7730 :2005. Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*. International Organization for Standardization.

MASSON, et al. (juill. 2013). “The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes”. In : *Geoscientific Model Development*. 2013, 6 (4), p. 929-960, p. 929-960.

NOILHAN, et al. (juin 1996). “The ISBA land surface parameterisation scheme”. In : *Global and Planetary Change*. 1996, 13 (1-4), p. 145-159, p. 145-159.

SALGADO, et al. (2010). “Coupling of the FLake model to the Surfex externalized surface model”. In : 2010.

MASSON, (mars 2000). “A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models”. In : *Boundary-Layer Meteorology*. 2000, 94 (3), p. 357-397, p. 357-397.

SCHOETTER, et al. (2020). “Multi-layer coupling between SURFEX-TEB-v9. 0 and Meso-NH-v5. 3 for modelling the urban climate of high-rise cities”. In : *Geoscientific Model Development*. 2020, 13 (11), p. 5609-5643, p. 5609-5643.

SEITY, et al. (mars 2011). “The AROME-France Convective-Scale Operational Model”. In : *Monthly Weather Review*. 2011, 139 (3), p. 976-991, p. 976-991.

WIKI – ECOCLIMAP-SG – CNRM OPEN SOURCE SITE (2018). Retrieved from <https://opensource.umr-cnrm.fr/projects/ecoclimap-sg/wiki>. Consulté le 20 juillet 2025.

OSM (2025). Retrieved from <https://www.openstreetmap.org>. Consulté le 12 avril 2025.

TORNAY, et al. (2017). “GENIUS : A methodology to define a detailed description of buildings for urban climate and building energy consumption simulations”. In : *Urban climate*. 2017, 20, p. 75-93, p. 75-93.

REDON, et al. (2017). “Implementation of street trees within the solar radiative exchange parameterization of TEB in SURFEX v8. 0”. In : *Geoscientific Model Development*. 2017, 10 (1), p. 385-411, p. 385-411.

OKE, et al. (2017). *Urban climates*.

ANNEXE

Les mailles similaires

La station VD illustre bien les difficultés rencontrées par le modèle pour représenter fidèlement certains environnements. D'après les observations, la place où se situe la station mesure environ 120 m de large, ce qui l'inscrit nécessairement sur deux mailles voisines. Le modèle ne pouvant restituer cette configuration, la largeur est alors réduite à seulement 25 m. Afin de mieux approcher la réalité, une recherche a été effectuée parmi toutes les mailles disponibles pour Paris afin d'identifier celles présentant les caractéristiques les plus proches des observations, en tenant compte de la hauteur des bâtiments, de la largeur du canyon et de la proportion de végétation haute. Un cycle diurne a ensuite été tracé pour le 3 septembre 2023, comparant les observations aux sorties du modèle et aux six mailles les plus "similaires" selon ces critères. Les résultats montrent qu'aucune différence notable n'est observée avec les autres mailles jugées plus réalistes pour les cas soleil et agrégé, mais de légers écarts apparaissent pour le cas ombre.

Cycle diurne des observation

Température de l'air

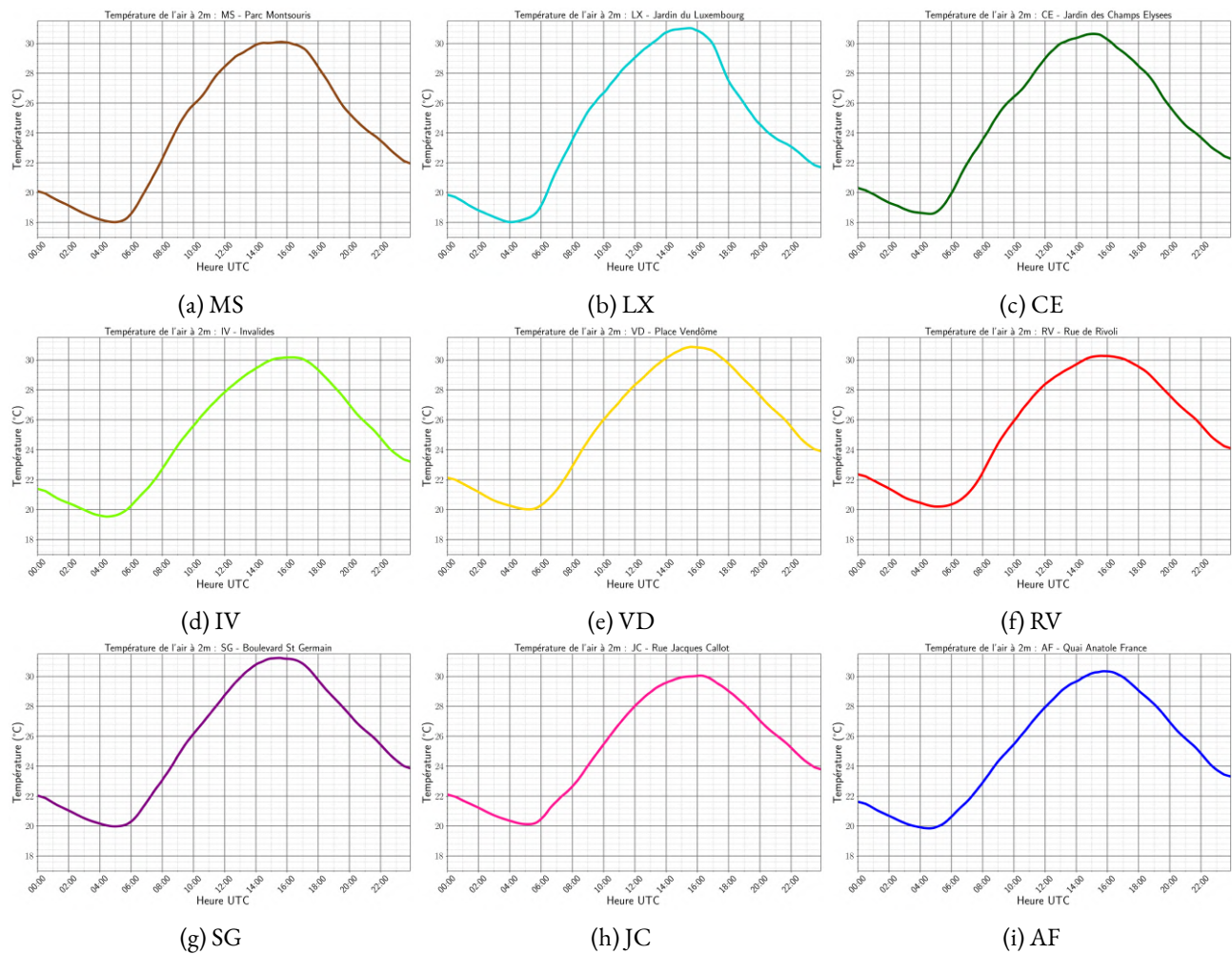


FIGURE 13 – Cycle diurne moyen de température de l'air à 2m sur 66 jours de l'été 2023 pour l'ensemble des stations

Température de globe noir

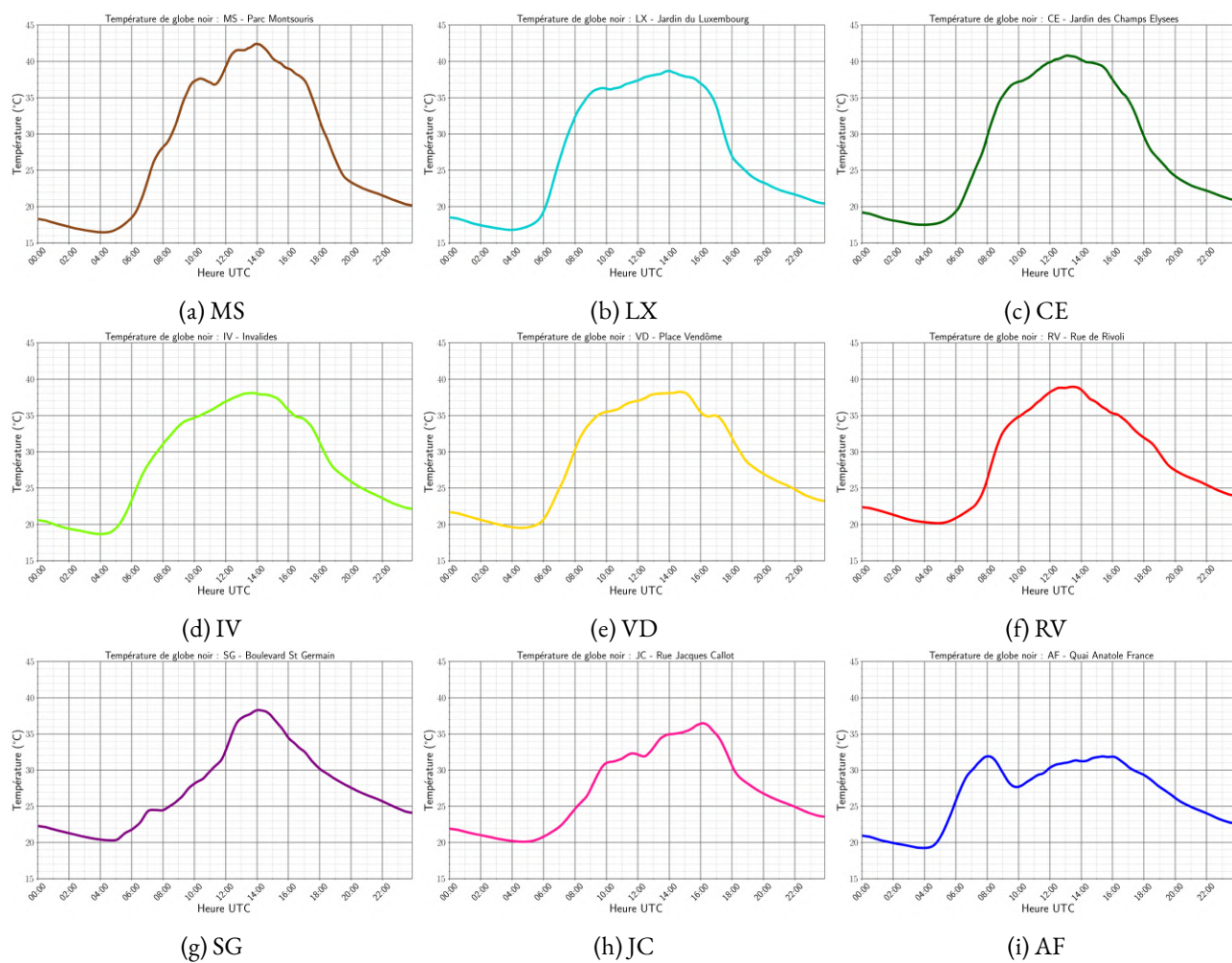


FIGURE 14 – Cycle diurne moyen de température de globe noir sur 66 jours de l'été 2023 pour l'ensemble des stations

Vitesse du vent

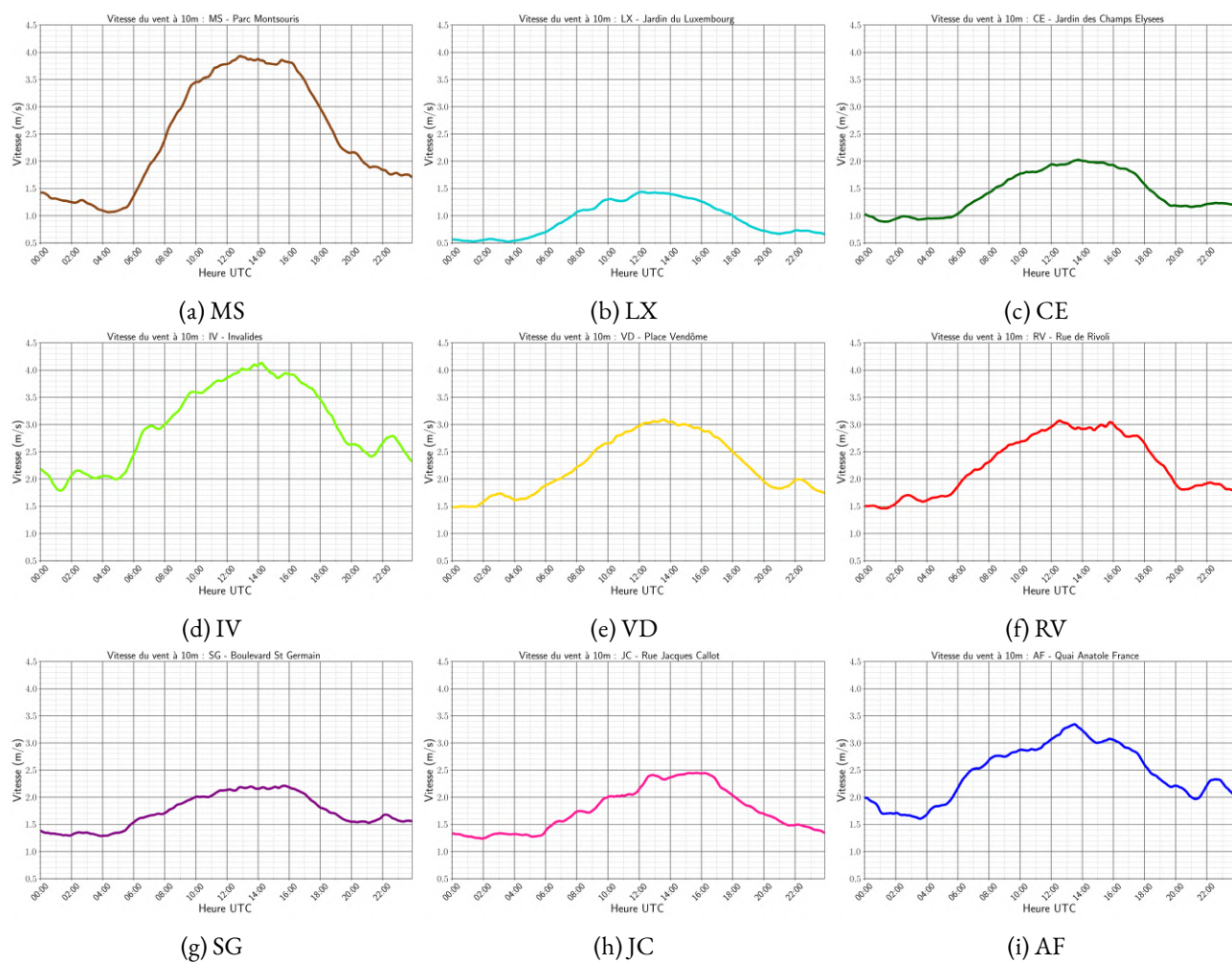


FIGURE 15 – Cycle diurne moyen de vitesse du vent sur 66 jours de l'été 2023 pour l'ensemble des stations

Humidité Relative

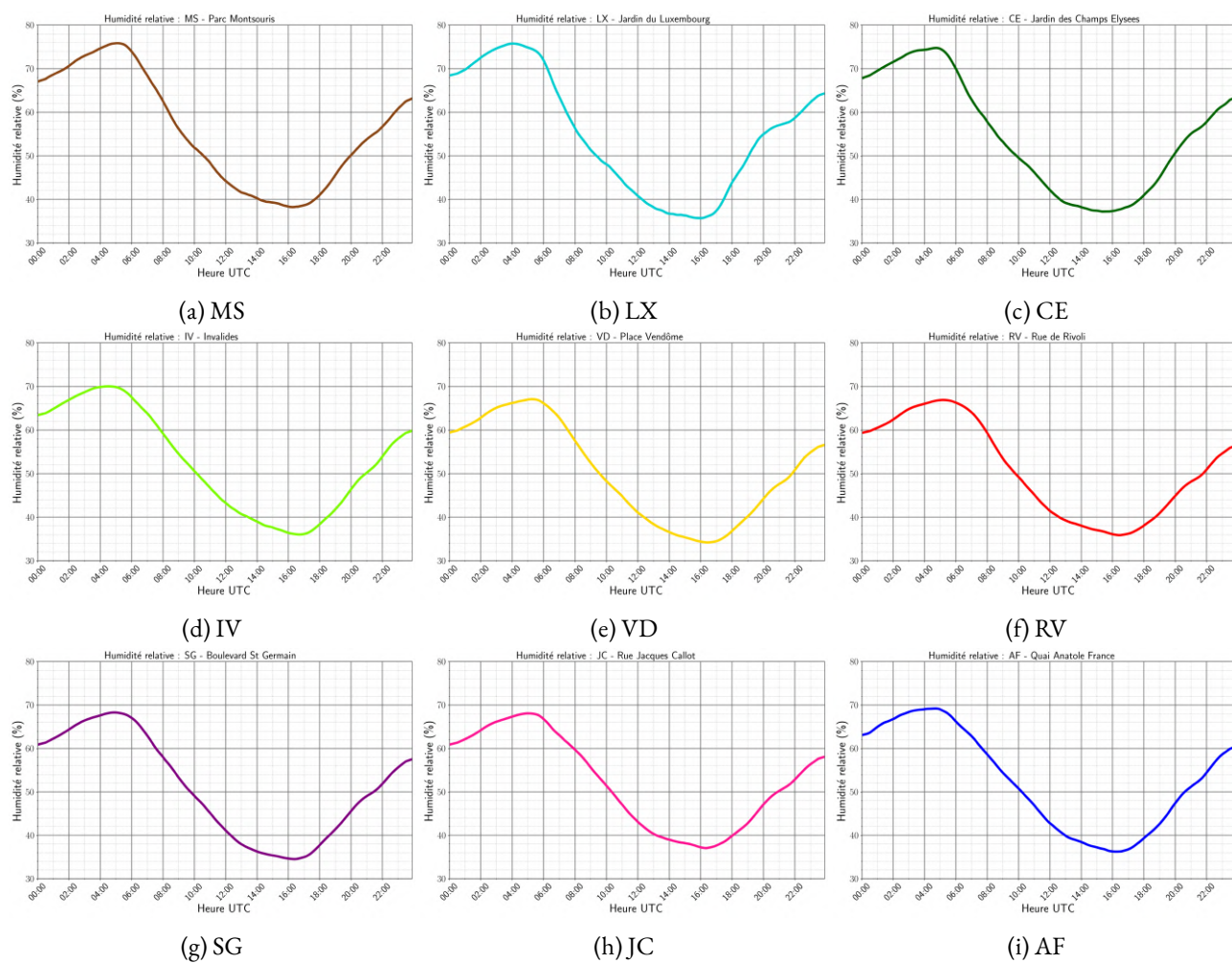


FIGURE 16 – Cycle diurne moyen d'humidité relative sur 66 jours de l'été 2023 pour l'ensemble des stations

UTCI

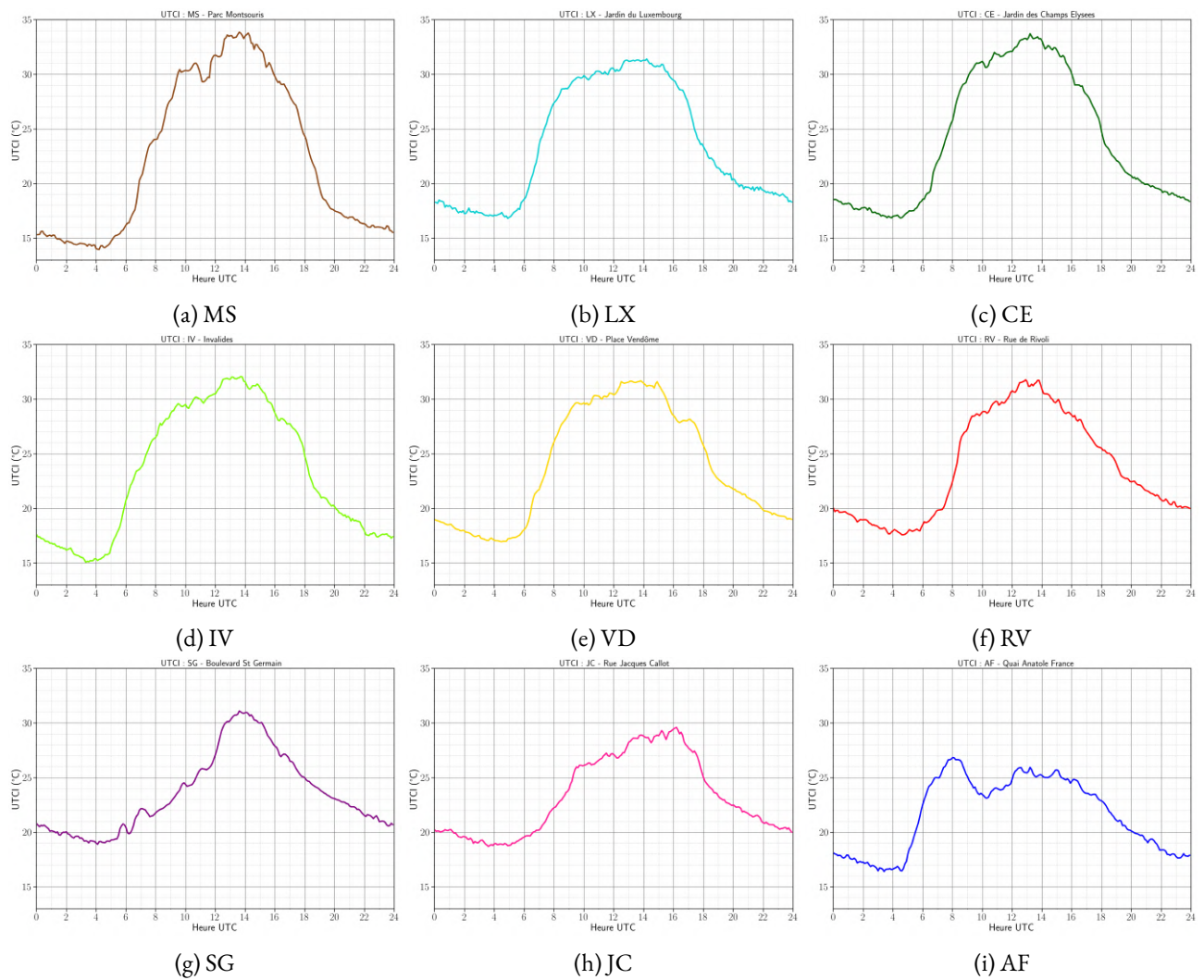


FIGURE 17 – Cycle diurne moyen de l'UTCI sur 66 jours de l'été 2023 pour l'ensemble des stations

Étude du confort thermique parisien et de sa variabilité intra-urbaine en période estivale

Abstract :

This internship was conducted at the National Center for Meteorological Research (CNRM) within the VILLE team, dedicated to urban climate studies. The aim was to investigate the variability of urban thermal stress using data from the PANAME-Urban campaign and simulations from the MESO-NH/SURFEX model. Several thermal comfort indices (UTCI, WBGT, PET, PMV, DI) were compared, and UTCI was selected as the main indicator. Observations revealed strong contrasts between urban environments. Model evaluation showed limitations in representing urban morphology and radiation, but simulations remained valuable for mapping thermal comfort across Paris. This study contributes to a better understanding of urban thermal comfort and lays the groundwork for future systematic analyses.

Mots clés : Urban climate; Thermal comfort; Urban heat stress; UTCI; MESO-NH/SURFEX; PANAME-Urban

Entreprise :

CNRM

42 rue Gaspard Coriolis 31100 Toulouse

Tuteur entreprise :

Tim NAGEL

Tuteur académique :

Denis MARTOUZET