

H2C

L'INSTITUT PARIS REGION



SANTÉ - ENVIRONNEMENT

Octobre 2025

CHALEUR & SANTÉ EN VILLE

Notes d'appropriation
des principaux enseignements
du projet H2C

CHALEUR & SANTÉ EN VILLE

NOTES D'APPROPRIATION DES PRINCIPAUX ENSEIGNEMENTS DU PROJET H2C

Octobre 2025

Directeur général : Nicolas Bauquet

Directeur général adjoint, coordination des études : Sébastien Alavoine

Département Environnement urbain et rural : Christian Thibault, directeur

Directrice de la communication : Aude Saraudy

Responsable éditoriale : Laurène Champalle

Rédaction : Erwan Cordeau, Sandra Garrigou, Sabine Host, Nicolas Laruelle et Cécile Mauclair de L'Institut Paris Region ; Aude Lemonsu et Tim Nagel du CNRM ; Misha Faber et Martial Haeffelin de l'IPSL ; Malika Madelin du Prodig ; Mathilde Pascal et Morgane Stempfelet de Santé publique France ; Jean-Marie Alessandrini et Maeva Sabre du CSTB ; Véronique Gherzi et Amandine Rosso d'Airparif

Avec la collaboration de : Valéry Masson et Cécile de Munk du CNRM ; Simone Kotthaus et Jean-François Ribaud de l'IPSL ; Sarah Gorla et Gauthier Forceville de Santé publique France ; Salem Dahech du Prodig ; Pascal Keravec de LHEEA Centrale Nantes

Mise en page : Élodie Beaugendre et Agnès Charles

Cartographie et infographie : Laetitia Pigato

Impression : Stipa

N° d'ordonnancement : 8.21.009.

ISBN : 978-2-7371-2406-8

Crédit photo de couverture : Corinne Legenne/L'Institut Paris Region

En cas de citation du document, merci d'en mentionner la source :

Projet H2C/ANR(2021-2025)/CNRM/L'Institut Paris Region/2025

Ce projet a bénéficié d'une aide de l'Agence nationale de la recherche (ANR) portant la référence ANR-20-CE22-0013.

L'Institut Paris Region

Campus Pleyad - Pleyad 4

66-68 rue Pleyel

93200 Saint-Denis

Tél. : + 33 (1) 77 49 77 49

www.institutparisregion.fr

SOMMAIRE

INTRODUCTION • UN PROJET DE RECHERCHE POUR AMÉLIORER LES SERVICES CLIMATIQUES URBAINS	5
Présentation du projet	5
Vers un transfert des connaissances et un outil d'information et de décision	6
Comprendre les besoins des parties prenantes	7
 NOTE N° 1 • QU'EST-CE QUE LE CLIMAT URBAIN ?	 9
Caractéristiques des environnements urbains	9
Îlot de chaleur urbain et surchauffe urbaine	9
Mécanismes qui impactent l'évolution de la température en journée	10
Mécanismes qui impactent l'évolution de la température la nuit	11
 NOTE N° 2 • MESURES DE LA TEMPÉRATURE EN VILLE	 12
Contexte	13
Température de l'air dans et autour de la ville	13
Température des surfaces sur l'ensemble du territoire	15
Température ressentie et confort thermique	16
 NOTE N° 3 • CARTOGRAPHIE DE LA TEMPÉRATURE	 17
Pourquoi et comment cartographier les températures ?	17
Des contrastes plus marqués lors de conditions météorologiques stables	18
Dynamique spatio-temporelle des températures	19
La ville et ses contrastes thermiques	19
 NOTE N° 4 • EXPOSITION À LA CHALEUR DANS LES LOGEMENTS : DU CONFORT AU RISQUE	 21
Une approche limitée du confort	21
Une approche pragmatique de l'ambiance thermique pour prévenir le risque lié à la chaleur	21
Le bâtiment protégé	22

NOTE N° 5 • INFLUENCE DE LA CHALEUR SUR LA SANTÉ EN ÎLE-DE-FRANCE	25
Contexte	25
Objectifs	25
La vulnérabilité à la chaleur en Île-de-France et les impacts sur la mortalité	25
Les impacts sur le recours aux soins	26
Facteurs de risques sociaux et environnementaux	27
Renforcer l'adaptation à la chaleur pour protéger la santé	27
 NOTE N° 6 • POLLUTION DE L'AIR ET CHALEUR	 29
Des liens étroits entre chaleur et pollution de l'air	29
Productions du projet H2C en matière de qualité de l'air	31
 NOTE N° 7 • EFFET DES PARCS URBAINS	 33
Services écosystémiques associés aux espaces verts urbains	33
Rafraîchissement urbain par la végétation	33
Mécanismes impactant l'évolution de la température la nuit	34
Importance de la ressource en eau	36
 NOTE N° 8 • TRAVAIL EN ATELIER AUTOUR D'UNE PLATEFORME D'ANALYSE MULTICRITÈRE	 37
Contexte	37
La plateforme d'analyse multicritère	38
Le travail en atelier	39
Et maintenant ?	39

UN PROJET DE RECHERCHE POUR AMÉLIORER LES SERVICES CLIMATIQUES URBAINS

PRÉSENTATION DU PROJET

Le projet de recherche H2C (*Heat & Health in the City* ou « Chaleur et santé en ville ») porte sur les enjeux de santé en ville face aux conditions de fortes chaleurs. La morphologie de la ville (densité, hauteur du bâti...), et la nature des matériaux et des revêtements urbains, notamment, contribuent au phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU). Ce dernier est aggravé par la survenance des vagues de chaleur et des canicules, dont la fréquence, l'intensité et la durée devraient augmenter dans les prochaines décennies, d'après les projections climatiques. Or, les enjeux sanitaires sont particulièrement prégnants au regard des expériences passées : près de 15 000 décès en excès au niveau national lors de la canicule de 2003, dont 5 000 pour la seule région francilienne. Au-delà d'une exposition plus forte à la chaleur en zone urbaine, le risque sanitaire est également lié à la dégradation de la qualité de l'air. Pour faire face à ces enjeux, différentes typologies de solutions peuvent être mobilisées :

- des solutions « réactives », de court terme, sous forme de dispositifs d'alerte et de gestion de crise ;

Un service climatique urbain, c'est quoi ?

Un éventail de ressources (données, produits, supports à la décision) directement utilisables par les parties prenantes impliquées dans les actions requises par le changement climatique pour la gestion des impacts, l'adaptation et l'atténuation.

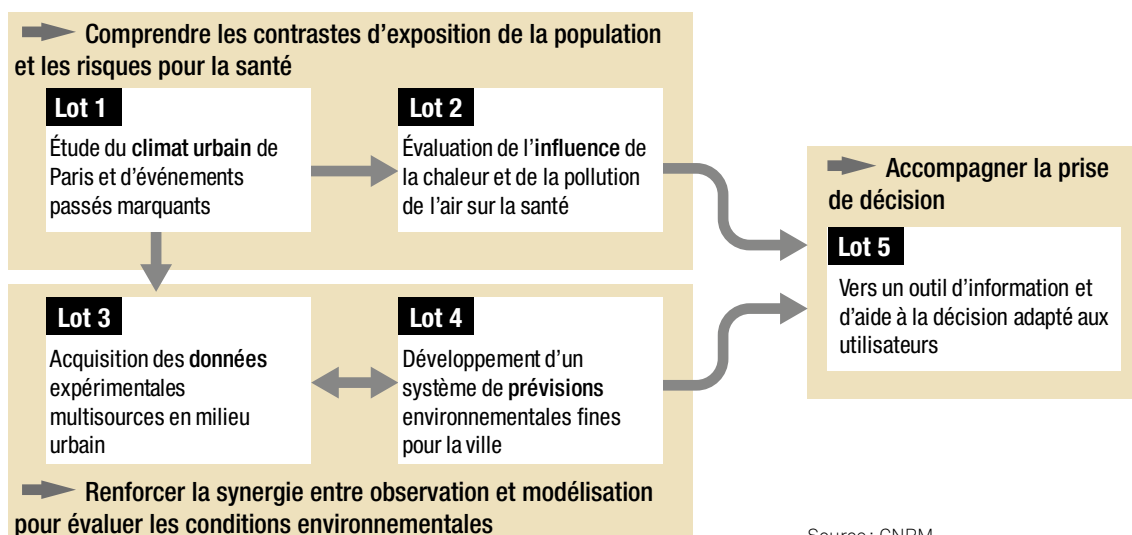
Une interface et un outil de coordination entre les besoins (sphère des utilisateurs) et les ressources disponibles (sphère de la recherche).

Un service climatique concerne également d'autres cibles que les acteurs de la ville : les territoires périurbains et ruraux, les agriculteurs...

Source : portail DRIAS

- des solutions de « prévention », de long terme, en lien avec la planification urbaine.

Si les registres de solutions sont multiples, par effet miroir, les parties prenantes y travaillant relèvent de divers domaines d'intervention : aménagement/urbanisme, action sociale/gestion sanitaire, gestion des événements de grande ampleur tels que les Jeux olympiques...



Source : CNRM

UN PROJET DE RECHERCHE POUR AMÉLIORER LES SERVICES CLIMATIQUES URBAINS

L'objectif clé de H2C est d'**améliorer les services climatiques urbains** pour les différentes parties prenantes afin d'encourager les mesures de prévention à la chaleur, avec l'aire urbaine de Paris comme cas d'étude.

Le projet s'échelonne entre 2021 et 2025. Il vise une approche multidisciplinaire et multisectorielle mobilisant huit partenaires, chercheurs et experts, regroupés dans un grand consortium, avec :

- en physique de l'atmosphère, en météorologie urbaine et en géographie, le Centre national de recherches météorologiques (CNRM) de Météo-France et du CNRS, l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), le Laboratoire de recherche en hydrodynamique, énergétique et environnement atmosphérique (LHEEA) Centrale Nantes, le Pôle de recherche pour l'organisation et la diffusion de l'information géographique (Prodig) ;
- en sciences du bâtiment et en étude du confort intérieur, le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) ;
- en qualité de l'air, Airparif, l'organisme de surveillance et de prévision de la qualité de l'air en Île-de-France ;
- en épidémiologie, Santé publique France, l'agence nationale de santé publique ;
- en aménagement et urbanisme de la région Île-de-France, L'Institut Paris Region, qui comprend l'Observatoire régional de santé (ORS) et l'Agence régionale énergie-climat (AREC).

Le projet associe ces expertises complémentaires et combine la mise en œuvre de systèmes d'observations météorologiques en milieu urbain, d'outils de modélisation numérique physique, d'approches statistiques, et d'enquêtes et ateliers pour répondre à trois objectifs scientifiques :

- **comprendre** les impacts des couvertures urbaines et des hétérogénéités de surface dans la ville sur

les phénomènes environnementaux (ICU, confort thermique, météorologie locale et qualité de l'air) ;

- **évaluer** les contrastes géographiques et les variations temporelles d'exposition de la population à la chaleur et à la pollution de l'air, ainsi que les risques sanitaires associés ;
- **traduire** la connaissance scientifique sous forme d'informations utiles à la prise de décision (conformément aux besoins des parties prenantes), en termes d'évaluation des ICU, de conséquences sur l'exposition dans l'environnement extérieur et intérieur, et de prévention des incidences sur la santé.

Ces différents attendus participent à une meilleure compréhension des facteurs contribuant à – ou modérant – cette « bulle chaude » dans la ville, et des seuils de tolérance physique et de confort, selon les environnements considérés.

Les résultats de la recherche alimentent les réflexions pour le développement de ce nouveau service climatique urbain, et œuvrent pour un transfert et un partage des connaissances auprès des parties prenantes.

Pour faciliter l'organisation des travaux et délimiter le périmètre de recherche selon les expertises mobilisées, des lots de travail ont été définis. Ils interagissent entre eux et sont illustrés dans les blocs du schéma page précédente.

VERS UN TRANSFERT DES CONNAISSANCES ET UN OUTIL D'INFORMATION ET DE DÉCISION

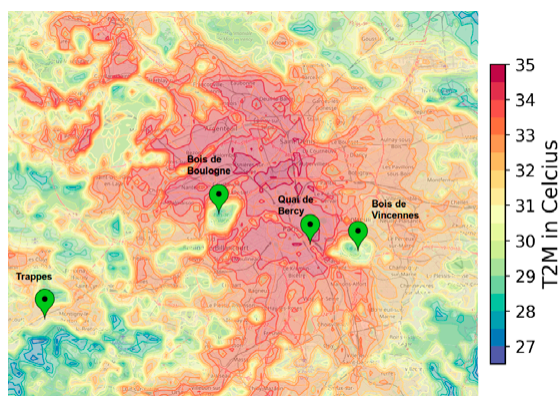
Appuyer le transfert de connaissances pour l'aide à la décision, tel est le rôle de L'Institut Paris Region dans le consortium H2C.

Ce transfert s'organise au travers de deux démarches, phasées en deux séquences comme illustré page de droite, en haut :

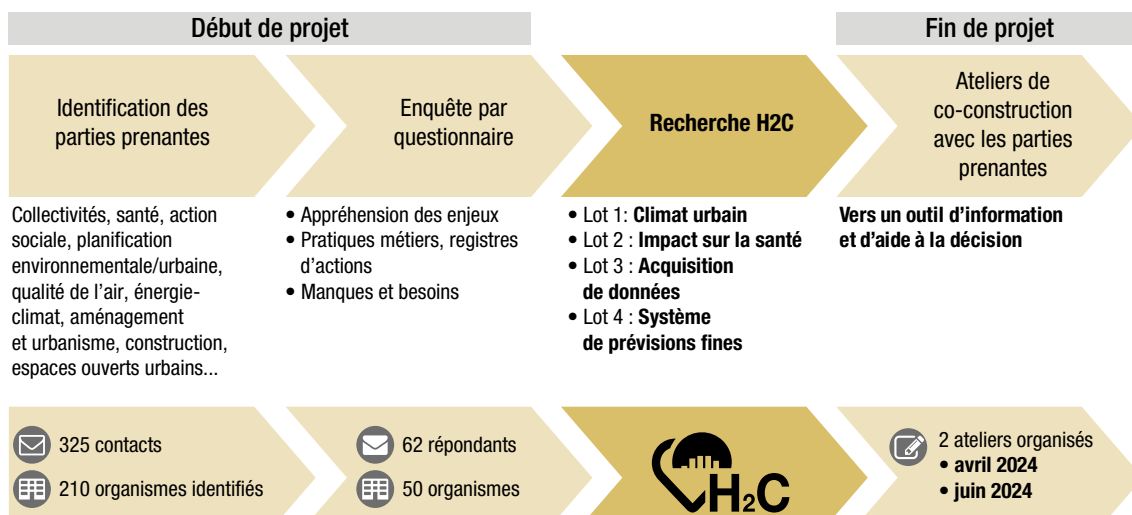
- en **début de projet**, avec l'identification des acteurs et de leurs besoins, en vue d'ancrer les travaux de recherche, dans la perspective du développement d'outils pour l'aide à la décision ;
- en **fin de projet**, avec la co-construction d'indicateurs territorialisés, avec l'aide d'un groupe volontaire de parties prenantes, pour la définition de services climatiques urbains faisables, pertinents et accessibles.

Des notes d'appropriation

En amont de l'atelier de co-construction, la matière scientifique produite par le consortium H2C a été



Source : CNRM



donnée à voir aux participants sous forme de notes vulgarisées sur les thèmes suivants :

- mesure et modélisation de la température ;
- variabilité spatio-temporelle de la température en ville ;
- confort thermique à l'intérieur des logements ;
- risques sanitaires et facteurs de vulnérabilité ;
- liens entre la pollution de l'air et la température ;
- effet rafraîchissant des parcs, ressources en eau.

Un outil d'animation cartographique

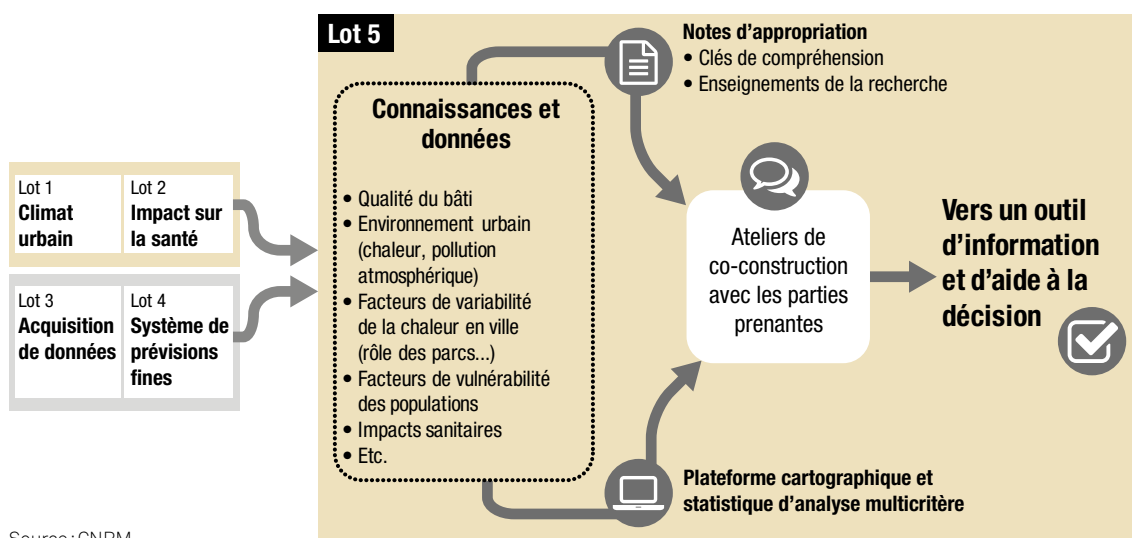
Par ailleurs, pour accompagner la co-construction, une plateforme cartographique et statistique d'analyse multicritère a été développée. Cet outil d'animation, alimenté par les connaissances et données issues de la recherche, a permis, **au moment de l'atelier**, de construire et de tester collectivement

différents indicateurs grâce à une restitution visuelle géographique et statistique dynamique. À l'issue d'un premier atelier, cet outil a été adapté pour poursuivre les échanges lors d'un second atelier. *In fine*, les enseignements de ces ateliers ont servi de base pour la **conception d'un outil opérationnel**.

COMPRENDRE LES BESOINS DES PARTIES PRENANTES

Pour comprendre les besoins des parties prenantes, une enquête a été organisée au 1^{er} semestre 2022 via l'outil *Lime Survey* à l'appui d'un travail d'identification des cibles. L'objectif était de constituer un échantillon permettant de représenter la diversité des modes d'intervention des parties prenantes, avec notamment sous-jacents :

- des enjeux de transformation de la ville, dans le registre de la prévention, à travers la planification,



UN PROJET DE RECHERCHE POUR AMÉLIORER LES SERVICES CLIMATIQUES URBAINS

- l'aménagement et la construction, à l'échelle du bâti, du quartier et de l'espace public ;
- des enjeux de gestion de crise et de protection des populations, notamment les plus vulnérables ;
- des enjeux de continuité de service, d'organisation des activités culturelles et sportives.

L'enquête a mis en lumière les besoins communs ou spécifiques selon la typologie des parties prenantes et des missions assignées.

62 répondants ont participé à l'enquête, soit un taux de retour de 20 %, représentant 50 organismes. Ces derniers couvrent de façon relativement exhaustive toutes les catégories d'acteurs espérées de l'échantillon ciblé initialement, confortant la très grande pluralité des métiers des parties prenantes qui interviennent dans la ville et qui se sentent concernées par l'impact de la chaleur sur la santé.

La perception des enjeux de la chaleur en ville

Les répondants s'accordent sur le fait que les enjeux de la chaleur en ville sont insuffisamment pris en compte par le grand public et l'ensemble des acteurs – privés comme publics – y compris dans les métiers qu'ils représentent. Ils se sentent, à leur niveau, davantage « conscientisés ». La majorité d'entre eux (plus de 60 %) y associent d'autres problématiques prégnantes comme la pression sur les ressources, le confort thermique ou la pollution de l'air.

Les solutions aux enjeux de la chaleur en ville

Si les solutions peuvent être « en réaction » ou « en prévention », les répondants ont précisé quels seraient les registres prioritaires d'intervention :

- sur le registre géographique, les quartiers à effet d'ICU sont considérés comme une échelle prioritaire de l'action, suivis des espaces publics ;

- sur le registre temporel, les épisodes de canicule sont, pour une grande partie d'entre eux (près de 80 %), une période particulièrement problématique – la période nocturne est également considérée comme critique ;
- sur le registre populationnel, les répondants viseraient en priorité une intervention orientée auprès des populations sensibles ou fragiles, isolées, en situation de précarité et sans domicile, et auprès des jeunes enfants.

Les besoins

Si les parties prenantes partagent une vision commune des enjeux associés à la chaleur en ville et des modalités d'intervention prioritaires pour y faire face, leurs réponses liées aux manques identifiés dans les pratiques de leurs métiers convergent également. Ils expriment ainsi le besoin d'approfondir les connaissances :

- sur les populations à risque ;
- sur les lieux les plus exposés ;
- sur les impacts sur la santé ;
- sur les effets systémiques.

Ces éléments sont à mettre en perspective de la méconnaissance des répondants quant à l'existence de services climatiques urbains relatifs à l'ICU, à la santé, aux solutions d'adaptation au changement climatique et, *a fortiori*, aux efforts à concéder sur le porter à connaissance de ces services, dans la durée et dans la transversalité.

Les attendus du projet H2C – amélioration et transfert des connaissances pour la sensibilisation à l'action préventive – rejoignent déjà, à ce stade, les besoins exprimés par les parties prenantes enquêtées. Le défi des ateliers de co-construction d'un service climatique urbain est d'arriver à la définition d'un service qui rassemble le plus grand nombre de parties prenantes, au vu de leur très grande diversité.

Aude Lemonsu du CNRM ; Erwan Cordeau, Sandra Garrigou et Sabine Host de L'Institut Paris Region



1 • QU'EST-CE QUE LE CLIMAT URBAIN ?

CARACTÉRISTIQUES DES ENVIRONNEMENTS URBAINS

Les environnements urbains ont des caractéristiques propres, qui les différencient des milieux naturels :

- la prédominance de surfaces minérales et imperméables, au détriment des sols naturels et de la végétation ;
- une organisation spatiale et une géométrie complexe du paysage urbain ;
- la présence des habitants et la concentration d'activités humaines.

Les spécificités suivantes modifient les échanges d'eau, de rayonnement et d'énergie entre les surfaces et l'atmosphère (**Fig. 1**), et participent aux facteurs intervenant dans le phénomène d'ICU :

- la **géométrie en canyon urbain** crée des effets d'ombrage en journée, mais aussi des réflexions multiples et un piégeage du rayonnement dans la rue, ce qui amplifie l'absorption d'énergie par les murs et les routes ;
- les **matériaux de construction** ont des propriétés thermiques différentes de celles des sols naturels, qui favorisent le stockage de chaleur ;

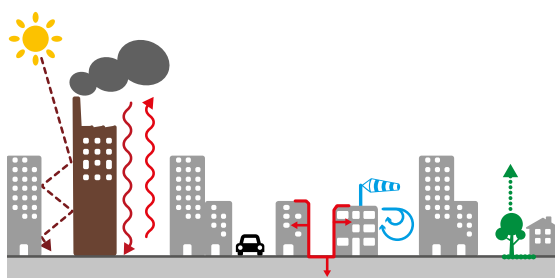


Figure 1 : Processus radiatifs, énergétiques, hydriques en milieu urbain

Source : M. Pijpers van Esch

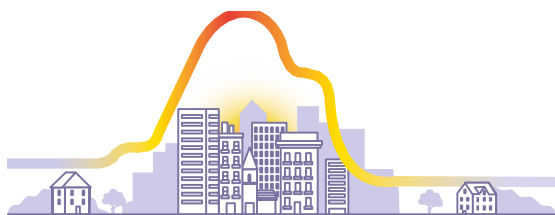


Figure 2 : Le phénomène d'îlot de chaleur urbain

Source : « Plus fraîche ma ville », ADEME

- la **présence des bâtiments** crée des obstacles qui modifient les écoulements d'air près de la surface, parfois en canalisant le vent, parfois en le bloquant, selon l'orientation des rues ;
- l'**imperméabilisation des surfaces et la faible part de végétation** limitent l'évaporation des sols et la transpiration des plantes, le drainage de l'eau de pluie dans le sol et, au contraire, amplifient les pertes rapides par ruissellement de surface ;
- les **activités humaines** (trafic routier, chauffage, climatisation, activités artisanales et industrielles, etc.) induisent des émissions locales de chaleur, d'humidité et de polluants.

Les conditions météorologiques locales se trouvent modifiées par ces différents effets, donnant lieu à un climat spécifique, que l'on nomme « climat urbain ».

ÎLOT DE CHALEUR URBAIN ET SURCHAUFFE URBAINE

Le climat urbain est associé à des enjeux déjà bien identifiés d'une exposition accrue des habitants à la chaleur, en particulier en été, dans les espaces extérieurs et dans les logements. On regroupe ces enjeux sous le terme général de « surchauffe urbaine », qui renvoie à deux phénomènes distincts : l'îlot de chaleur urbain et le stress thermique.

L'îlot de chaleur urbain (ICU)

Le phénomène d'ICU (qui s'exprime comme un écart de température en °C, **Fig. 2 et 3**) traduit le fait qu'il fasse plus chaud en ville, pendant la nuit, que dans la campagne environnante. Cet écart de température résulte d'un refroidissement nocturne moins efficace en ville qu'en dehors de la ville, en raison de l'artificialisation des sols, de la densité urbaine et des sources de chaleur locales (comme détaillé par la suite).

L'intensité de l'ICU dépend de la ville (sa taille, sa densité urbaine, les quartiers qui la composent, etc.), de la géographie locale et de l'environnement autour de la ville.

Pour une même ville, l'ICU n'est pas toujours de la même intensité, car il est influencé par les conditions météorologiques régionales. Il est particulièrement fort lorsqu'il fait chaud, qu'il y a beaucoup



QU'EST-CE QUE LE CLIMAT URBAIN ?

d'ensoleillement et peu de vent. C'est le cas surtout en été et lors de vagues de chaleur, qui sont des événements à forts enjeux en termes de risques sanitaires pour les habitants.

L'ICU est évalué à l'échelle de la ville mais de forts contrastes de température existent au sein de la ville, selon la morphologie des quartiers, la densité urbaine, les matériaux et la présence ou non de végétation.

Le stress thermique

Cette notion traduit le ressenti d'une personne soumise à un ensemble de conditions environnementales : la température de l'air, l'humidité, le vent et le rayonnement. Selon la combinaison de ces paramètres, la personne peut se sentir confortable ou, au contraire, en stress thermique chaud ou froid (**Note n°2**).

En journée, les conditions de confort thermique peuvent fortement varier selon les localisations. En particulier en période estivale et lorsqu'il fait chaud, le confort thermique est largement influencé par l'exposition au rayonnement (qui accentue la sensation de chaleur) et modulé par le vent (qui améliore le ressenti).

L'amélioration du confort thermique dans les espaces extérieurs est un véritable enjeu d'aménagement urbain. Les configurations urbaines, les matériaux, la présence de végétation arborée ou encore les orientations des rues influent sur les effets d'ombrage et de ventilation (outre la température et l'humidité de l'air).

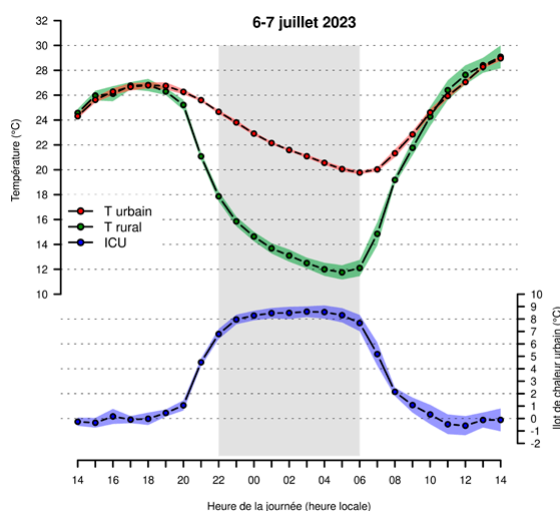


Figure 3 : Évolution de la température au cours de la journée en ville et à la campagne, et de l'ICU correspondant

Sources : H2C, CNRM

MÉCANISMES QUI IMPACTENT L'ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE EN JOURNÉE

L'évolution de la température de l'air au cours de la journée est gouvernée par quatre principaux facteurs : le rayonnement solaire, les échanges de chaleur dans l'atmosphère, les échanges de chaleur entre les surfaces et l'air proche des surfaces, et l'évolution des masses d'air.

Lorsque la masse d'air évolue peu au cours de la journée, la température de l'air en journée est fortement influencée par le rayonnement solaire. Le rayonnement solaire ne chauffe pas l'air directement, il est absorbé par l'ensemble des surfaces (urbaines et naturelles), qui échangent ensuite la chaleur qu'elles ont accumulée avec l'air à proximité de ces dernières. Le bâti est caractérisé par des matériaux à forte capacité calorifique, c'est-à-dire une forte capacité à accumuler la chaleur reçue par rayonnement solaire en journée, et par une faible capacité à absorber et à stocker l'humidité (matériaux imperméables), ce qui signifie que le refroidissement par évaporation est minimal. Le bâti est également caractérisé par des structures tridimensionnelles, qui génèrent des fortes hétérogénéités d'ensoleillement, augmentent le rayonnement solaire absorbé par piégeage dans les canyons urbains et peuvent réduire la vitesse du vent proche de la surface. De surcroît, le milieu urbain concentre des sources de chaleur engendrées par les activités humaines (**Fig.4**, en haut à droite).

Les couverts naturels absorbent également le rayonnement solaire, mais une partie de cette énergie est consommée par la végétation via le mécanisme d'évapotranspiration. Par ailleurs, le feuillage des arbres réfléchit une partie du rayonnement solaire incident. Ces espaces accumulent moins de chaleur dans la journée que les environnements bâtis (**Fig.4**, en haut à gauche).

Les mécanismes impliqués dans l'évolution de la température engendrent un décalage temporel entre le maximum de rayonnement solaire, atteint vers 14 h en été (heure locale), et le maximum de température de l'air, atteint plutôt vers 16-17 h en été. Dans les environnements bâtis, ce décalage est accru du fait de la capacité du bâti à accumuler la chaleur. Le maximum de température de l'air se produit vers 17-18 h en été (**Fig.3**). Outre ce décalage temporel, les températures de l'air sont assez comparables, en journée, en ville et dans la campagne environnante. La turbulence atmosphérique homogénéise les masses d'air et donc les températures : l'ICU est nul, voire légèrement négatif (**Fig.3**).

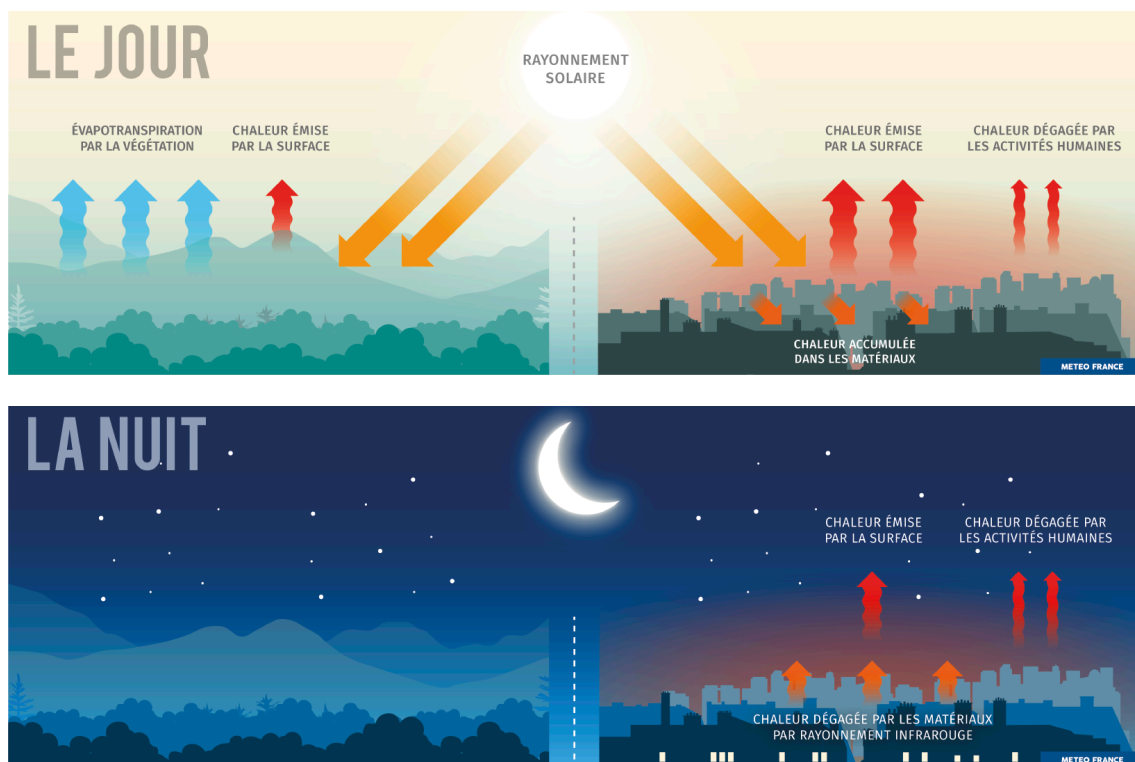


Figure 4 : Processus de surface qui s'établissent à la campagne (à gauche) et en ville (à droite) durant le jour et la nuit
Source : Météo-France

MÉCANISMES QUI IMPACTENT L'ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE LA NUIT

En été, après le coucher du soleil, la température de l'air dans les environnements bâtis décroît lentement (entre 0,5 et 1 °C par heure, **Fig.3**). En effet, la chaleur accumulée dans le bâti en journée continue à être restituée à l'atmosphère. Les surfaces du bâti émettent du rayonnement thermique (infrarouge) qui contribue à amplifier la température ressentie par les personnes présentes. Or, la forme des canyons urbains piège une partie de ce rayonnement infrarouge, qui ne peut s'échapper vers l'atmosphère. La chaleur dégagée par les activités humaines contribue également à réchauffer l'environnement (**Fig.4**, en bas à droite).

Dans les environnements naturels, grâce à une moindre accumulation de chaleur au cours de la journée, les surfaces se refroidissent plus rapidement la nuit, engendrant également un refroidissement de l'air. Ce refroidissement commence deux heures avant le coucher du soleil et jusqu'au début du lever du soleil. C'est sur cette période de temps que s'exprime l'ICU. Il peut atteindre plusieurs degrés : ici, sur Paris et sa région, il est de 8 °C en conditions estivales sans vent (**Fig.3**).

Aude Lemonsu du CNRM et Martial Haeffelin de l'IPSL

MESSAGES CLÉS

- Par l'artificialisation des sols, la géométrie complexe et les émissions liées aux activités anthropiques, les villes modifient les conditions microclimatiques locales.
- Le phénomène le plus connu qui en résulte est l'îlot de chaleur urbain (ICU) : au cours de la nuit, la température de l'air est plus chaude en ville que dans la campagne environnante.
- L'intensité et la forme de l'ICU varient selon les villes, les contextes géographiques et les conditions météorologiques. L'ICU est amplifié en conditions de canicule.
- Les habitants des villes sont aussi soumis à des effets de surchauffe urbaine en journée : l'été, des températures élevées combinées à un fort rayonnement peuvent se traduire par des conditions de stress thermique important dans les espaces extérieurs.

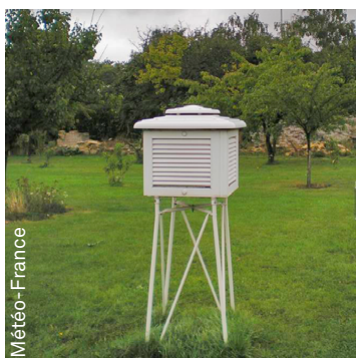


Figure 1 : Présentation de différents capteurs et systèmes de mesure de la température

2 • MESURES DE LA TEMPÉRATURE EN VILLE

CONTEXTE

La ville est un milieu complexe composé de types de surfaces et de matériaux très variés, et avec des agencements de bâtiments et d'infrastructures hétérogènes et variables selon les quartiers. Cette complexité influence les conditions microclimatiques (la température et l'humidité de l'air, le vent, l'ensoleillement, etc.) à différentes échelles spatiales : au niveau de la rue, du quartier, de la ville et du territoire.

La température est certainement le paramètre météo le plus étudié, le plus documenté et le plus parlant. Mais il existe différentes façons de la mesurer et elle peut exprimer différentes grandeurs : la température de l'air près de la surface (au niveau du piéton) ou dans l'atmosphère, la température des surfaces, la température ressentie.

TEMPÉRATURE DE L'AIR DANS ET AUTOUR DE LA VILLE

La température qui fait référence pour le suivi de la météo ou du climat est la température de l'air mesurée avec un thermomètre sous abri (selon la méthode conventionnelle et officielle). Le **réseau RADOME de Météo-France** est un réseau de stations météo d'observation au sol. Il est dédié à la surveillance des conditions météorologiques de surface, en temps

réel sur la France, et à l'amélioration des modèles de prévision du temps. En Île-de-France, 48 stations sont réparties sur le territoire, mesurant la température de l'air à deux mètres au-dessus du sol (entre autres paramètres). Des normes internationales sont fixées pour l'installation de ces stations : elles sont placées dans des espaces engazonnés et dégagés pour éviter toute perturbation locale (**Fig. 1**). Dans Paris intra-muros, la station de référence la plus ancienne est celle du parc Montsouris, en opération depuis 1872. Dans ce parc urbain, la température enregistrée est sous l'influence de l'effet rafraîchissant de la végétation et du plan d'eau au sein du parc ; elle est donc assez peu représentative de l'îlot de chaleur urbain parisien.

Pour mesurer les températures de l'air dans la ville, il est nécessaire de déployer des stations selon des critères différents, justement dans le but de capturer l'influence de l'environnement urbain. Des stations météo plus légères peuvent être installées sur des lampadaires, dans des rues ou sur des places. Certaines villes, en France, ont déjà leur propre réseau de stations pour le suivi de l'îlot de chaleur urbain (Rennes, Dijon, Toulouse et, plus récemment, Paris). On voit également se développer des réseaux communautaires, comme celui des **stations météo personnelles connectées Netatmo** (**Fig. 1**). Ces stations sont achetées dans le commerce par des

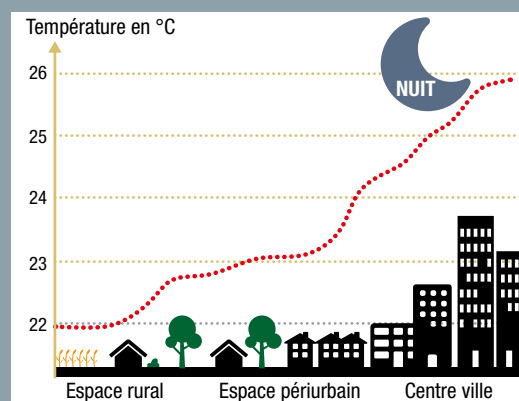
Qu'est-ce que l'îlot de chaleur urbain ?

L'îlot de chaleur urbain (ICU) exprime le fait qu'il fasse plus chaud en ville pendant la nuit que dans la campagne environnante.

L'intensité du phénomène dépend de la ville, de son environnement et des conditions météo.

L'ICU est particulièrement fort lorsqu'il fait chaud, qu'il y a beaucoup d'ensoleillement et peu de vent, surtout en été et lors de vagues de chaleur.

L'ICU est évalué à l'échelle de la ville mais de forts contrastes de température existent au sein de la ville, selon la morphologie des quartiers, la densité urbaine, les matériaux et la présence ou non de végétation.



Source : L'Institut Paris Region, d'après données Météo-France

MESURES DE LA TEMPÉRATURE EN VILLE

Figure 2a :
Température
de l'air mesurée
par les stations
Netatmo
Source : Prodig,
données Netatmo

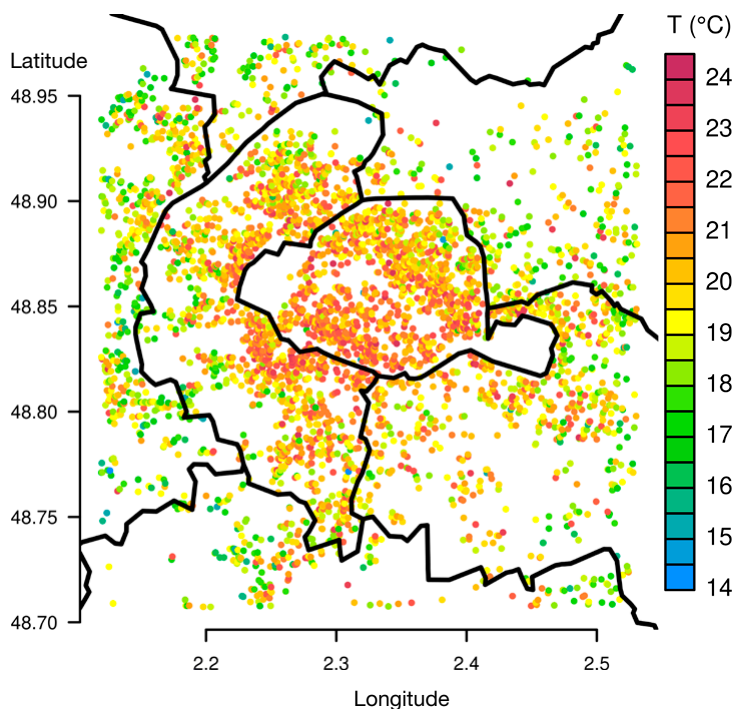
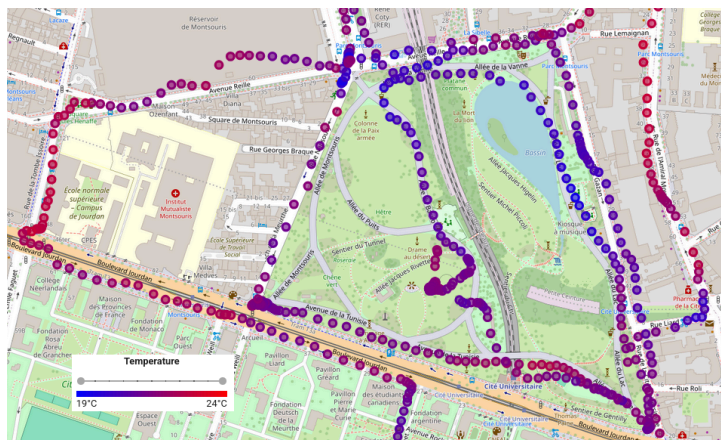


Figure 2b :
Température
de l'air
mesurée
en itinérance
Source : IPSL



DONNÉES ISSUES DU PROJET

- Températures de l'air mesurées par les stations des différents réseaux de surface déployées sur la région (48 stations régionales et 24 stations dans Paris intra-muros) depuis l'été 2022.
- Cartographies quotidiennes de température de l'air (jour et nuit) à partir des données Netatmo pendant l'été 2022 et l'été 2023.
- Mesures itinérantes de température de l'air dans certains quartiers de Paris et pendant certaines nuits chaudes de l'été 2022 et de l'été 2023.
- Profils verticaux de température mesurés notamment depuis plusieurs parcs urbains parisiens par des sondages et des drones durant des journées d'été en 2022 et 2023.

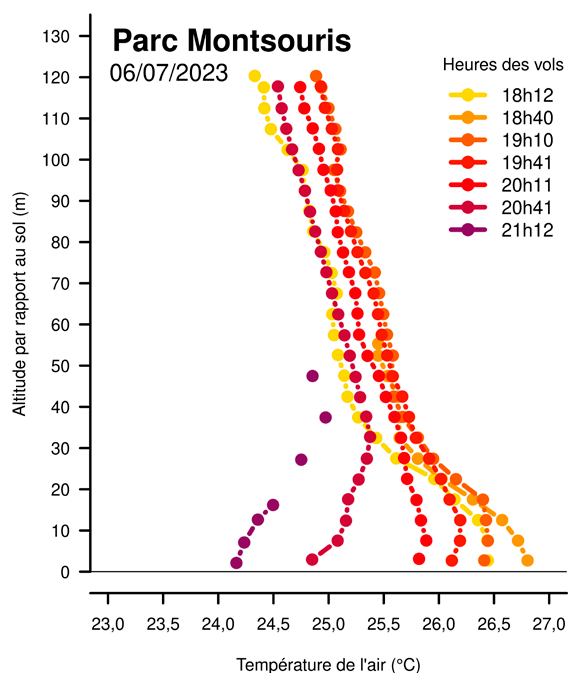


Figure 2c: Température de l'air mesurée par des drones
Source : CNRM

particuliers qui les installent sans respect de normes particulières : dans un jardin, à l'intérieur d'un appartement, sur un balcon en étage, etc. L'exploitation de ces données est donc délicate car de nombreuses incertitudes existent sur la localisation exacte du capteur, la représentativité et la qualité de la mesure. Néanmoins, l'atout majeur de ces stations est la densité du réseau, offrant une très large couverture des territoires urbains, ce qui permet de documenter les contrastes de température dans la ville (**Fig. 2a**).

Pour compléter les mesures collectées par des stations fixes et étudier les contrastes horizontaux de température au sein de la ville, des **systèmes de mesures itinérantes** (à pied, à vélo, **Fig. 1**) sont également mis en œuvre ponctuellement. Les capteurs sont embarqués et enregistrent la température le long d'un parcours prédéfini, avec un temps de réponse rapide pour capturer les variabilités fines de la température de l'air selon la distance à un parc, l'orientation de la rue, les revêtements de surface, des sources anthropiques ponctuelles (rejet de chaleur des systèmes de climatisation...), etc. (**Fig. 2b**).

La température de l'air peut aussi se mesurer **sur la verticale**, dans les premiers kilomètres d'atmosphère, afin de documenter la portion de l'atmosphère directement influencée par les surfaces, appelée la « couche limite atmosphérique ». Les conditions de température, d'humidité, de vent et de stabilité de

l'atmosphère dans cette couche sont des indicateurs des interactions complexes qui s'établissent entre les surfaces et l'atmosphère. Elles sont déterminantes pour expliquer la météorologie locale et les conditions microclimatiques en surface, mais aussi la dispersion des polluants de l'air émis par les activités humaines (**Note n° 6**). Les mesures de profil de température peuvent être réalisées par des systèmes en mouvement : principalement des radiosondages (**Fig. 1**), c'est-à-dire des ballons-sondes lâchés depuis la surface et qui s'élèvent dans l'atmosphère (jusqu'à plus de 30 km) en enregistrant régulièrement, au cours de l'ascension, les paramètres météorologiques et de géolocalisation ; ou bien des drones instrumentés, davantage à même de documenter finement l'atmosphère près de la surface (dans des cours, des jardins...) et à quelques mètres au-dessus (**Fig. 2c**).

TEMPÉRATURE DES SURFACES SUR L'ENSEMBLE DU TERRITOIRE

Les images satellitaires (**Fig. 3**) sont très souvent utilisées comme une cartographie de la température sur un territoire, et notamment pour communiquer sur les effets de surchauffe urbaine. Mais attention, il s'agit de la **température des surfaces** (mesurée par des capteurs infrarouges embarqués), qui est bien différente de la température de l'air mesurée par un thermomètre. Pendant la journée, les surfaces au soleil peuvent atteindre des températures très élevées (40-50 °C en été, voire plus), en particulier pour les matériaux artificiels que l'on trouve en ville. En comparaison, les températures de l'air sont moins chaudes et plus homogènes sur le territoire en raison du mélange turbulent dans l'atmosphère (effet de brassage). Ainsi, on peut mesurer et observer un effet

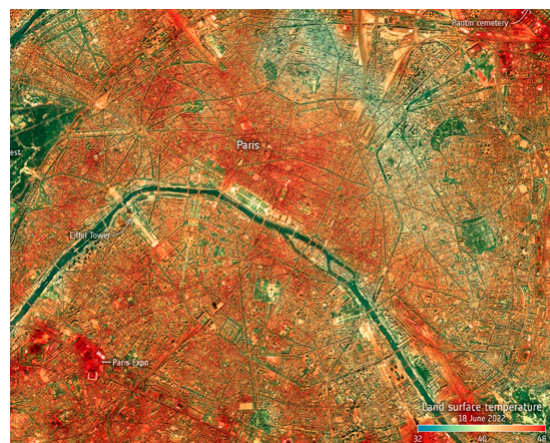


Figure 3: Image satellitaire de température des surfaces, le 18 juin 2022 (11 h 50) sur Paris
Source : NASA/JPL-Caltech

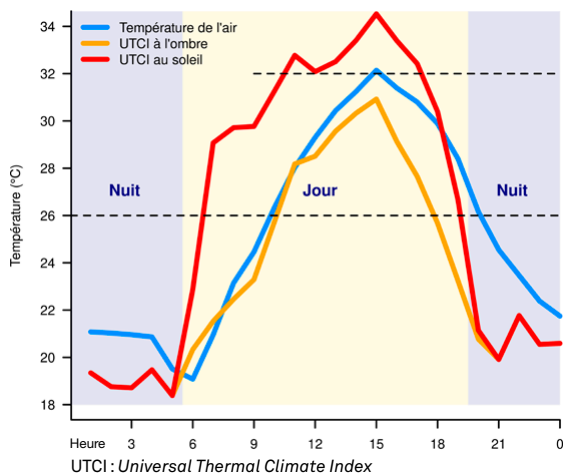


Figure 4 : Exemple d'évolution au cours d'une journée d'été de la température de l'air et de l'indice UTCI calculé à l'ombre (plus faible en journée) et au soleil (beaucoup plus fort en journée à cause du rayonnement)

Source : CNRM

d'îlot de chaleur urbain en température de surface en journée, alors qu'il n'y a pas d'îlot de chaleur urbain en température de l'air. La nuit, alors qu'il y a moins de turbulence et que les effets thermiques sont prépondérants, température de surface et température de l'air sont plus comparables (mais pas égales).

TEMPÉRATURE RESSENTIE ET CONFORT THERMIQUE

La température ressentie est différente de la température de l'air mais elle est très pertinente pour renseigner sur la **notion de confort ou de stress thermique**. Elle correspond à la sensation de froid ou de chaleur ressentie par une personne selon les conditions locales de température, d'humidité, de vent et de rayonnement. Elle peut aussi dépendre de facteurs individuels comme l'âge, le niveau d'activité, les vêtements portés, etc. Il existe plusieurs indices de température ressentie, plus ou moins sophistiqués dans leur méthode de mesure et de calcul, par exemple le *Universal Thermal Climate Index (UTCI)*, qui s'exprime comme une température (en degré Celsius) et qui est associé à différents niveaux de stress thermique (chaud ou froid) selon sa valeur (**Fig. 4**). Ces indices reposent principalement sur la mesure de la température radiante avec un capteur de température globe noir (**Fig. 1**, photo Decentlab) et la mesure de la température du thermomètre-globe mouillé, qui permettent de caractériser respectivement les conditions de rayonnement et les conditions de saturation de l'air en humidité pour un individu qui serait placé au niveau du point de mesure.

Aude Lemonsu et Tim Nagel du CNRM ;
Malika Madelin du Prodig ; Martial Haeffelin de l'IPSL

MESSAGES CLÉS

- La nuit, il fait plus chaud en ville que dans la campagne environnante, en particulier en été et lors de vagues de chaleur : c'est l'effet d'îlot de chaleur urbain (ICU).
- Les contrastes de température s'observent à différentes échelles spatiales : la ville, le quartier, la rue.
- Il existe plusieurs mesures de température : la température de l'air au niveau du piéton, la température de l'air dans l'atmosphère, la température des surfaces (surfaces naturelles et urbaines) et la température ressentie.
- Les stations conventionnelles dites « de surface » ne capturent pas bien le signal urbain d'ICU car elles sont situées dans des parcs. Des stations dédiées peuvent être implantées dans les rues.
- Les contrastes de température de l'air dans un quartier peuvent être documentés par des mesures itinérantes.
- Les températures issues de données satellitaires sont des températures des surfaces et non des températures de l'air, et elles sont difficilement comparables.

3 • CARTOGRAPHIE DE LA TEMPÉRATURE

POURQUOI ET COMMENT CARTOGRAPHIER LES TEMPÉRATURES ?

La carte s'avère un outil essentiel pour visualiser les contrastes dans l'espace, pour mettre en évidence des **structures spatiales** et pour comprendre les **facteurs sous-jacents** à ces variabilités spatiales. Synthétisant l'information géographique, elle est aussi un outil de dialogue entre différents acteurs, voire un outil d'aide à la décision. La cartographie de la température d'un territoire fera ressortir les contrastes entre les zones de surchauffe et les îlots de fraîcheur, ainsi que les gradients thermiques entre le centre d'une agglomération et les alentours ruraux, témoignant d'un îlot de chaleur urbain (**Note n° 2**). De plus, elle permettra le croisement avec d'autres informations, telles que les paramètres morphologiques de la ville et les données socio-démographiques ou de santé. Elle offrira alors un support visuel pour aider à l'aménagement des territoires dans une perspective d'adaptation aux fortes chaleurs en ville.

Produire une carte n'est pas anodin. C'est un processus complexe, impliquant une **suite de choix** : sur les données à représenter, sur la manière de le faire, sur le fond de carte et l'habillage, sur l'échelle spatiale, etc. Par exemple, le cartographe pourra sélectionner les éléments à représenter, choisir une simplification des tracés plus ou moins importante, un nombre de classes assez restreint ou une variation quasi

continue, une palette de couleurs arc-en-ciel ou du bleu au rouge, etc. Une carte des températures de l'air d'un transect de mesures ponctuelles itinérantes à proximité d'un parc sera bien différente, dans sa construction et dans le résultat visuel, d'une carte des températures de surface issues d'un produit satellitaire (**Fig. 1 et 5**).

La représentation en aplat de couleurs sur l'ensemble du territoire est très souvent privilégiée, ce qui implique des méthodes spécifiques pour passer des points aux surfaces (**Fig. 1**). En effet, l'information fournie par les observations est ponctuelle spatialement. Ainsi, la valeur de température donnée par une station n'est valable qu'au voisinage de celle-ci. Si le réseau de stations au sol est suffisamment dense, il est possible d'interpoler les résultats des stations afin d'obtenir des cartes spatialisées de température sur l'ensemble d'un territoire. Si le réseau ne le permet pas, la création de cartes spatialisées pour l'information nécessite alors de recourir à l'utilisation de **modèles numériques**. Ceux-ci permettent de simuler l'évolution de l'atmosphère en la découpant en une grille à trois dimensions aux « mailles » plus ou moins larges. La maille du modèle peut être vue comme le pixel d'une photographie. Un modèle ne peut pas fournir une information à plus fine résolution que la taille des mailles le constituant. Pour simuler la température à l'échelle d'une ville, la

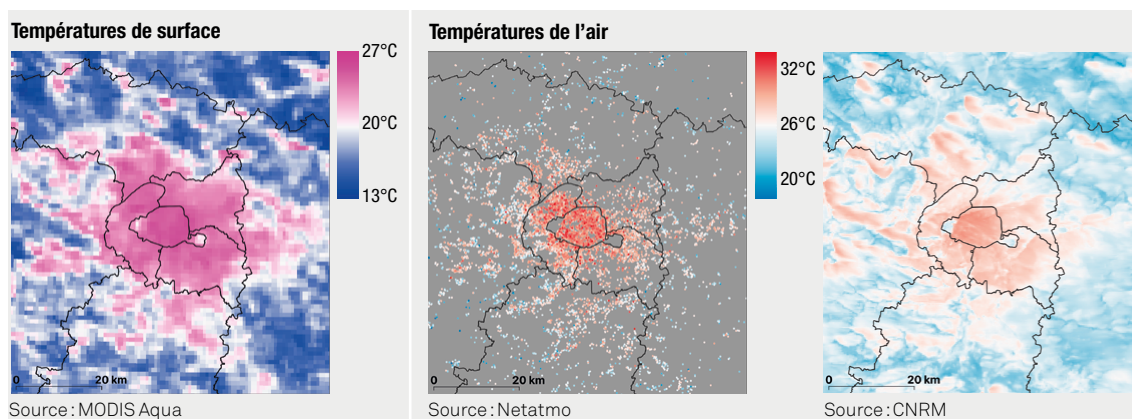


Figure 1 : Cartographies de différentes températures nocturnes, le 19 juillet 2022, vers 4 h locales (2 h UTC) : températures de surface issues du satellite MODIS Aqua (raster de résolution 1 km environ) ; températures de l'air relevées par les stations du réseau Netatmo (données ponctuelles) ; températures de l'air à 2 m modélisées par le CNRM Météo-France (MesoNH-TEB, raster 300 m)

**LA CARTE EST UNE SIMPLIFICATION
 DE LA RÉALITÉ, À UNE ÉCHELLE DONNÉE**

Mesurer une température impose déjà une simplification de la réalité. La représenter cartographiquement apporte une abstraction supplémentaire et soulève la question des échelles pertinentes pour appréhender le phénomène étudié.

Une carte nous place au-dessus de l'espace considéré, souvent en masquant la dimension verticale des phénomènes. On est tour à tour dans la rue, au-dessus des toits...

Une carte est toujours associée à une échelle spatiale donnée : les rues adjacentes à un parc, une vaste zone commerciale ou encore une agglomération et sa périphérie moins artificialisée, etc. Changer l'échelle et la lecture du phénomène sera alors complètement modifiée. Sur la dimension horizontale, on navigue entre l'échelon d'observation et l'échelon de restitution.

résolution horizontale du modèle utilisé est donc un paramètre critique. AROME, le modèle opérationnel de prévision numérique du temps à maille fine développé au sein de Météo-France, a une résolution horizontale de 1,3 km. Des modèles utilisés en recherche permettent de descendre à des échelles plus fines (quelques centaines de mètres, **Fig. 1**).

Il existe finalement une **multitude de cartographies** possibles de la température des territoires urbains, et leur juxtaposition peut s'avérer pertinente pour mieux appréhender les différentes composantes de la chaleur en ville et sa variabilité spatio-temporelle à différentes échelles (à l'échelle d'une rue adjacente à un parc, d'une zone commerciale ou encore de l'agglomération, en températures de l'air ou des surfaces, etc.). Le raisonnement cartographique se construit aussi selon la finalité de la carte, son lectorat et son usage.

**DES CONTRASTES PLUS MARQUÉS
 LORS DE CONDITIONS
 MÉTÉOROLOGIQUES STABLES**

Une des principales manifestations du climat urbain est l'apparition d'un îlot de chaleur urbain, la nuit, lors de conditions stables (vent calme, faible nébulosité, **Note n° 2**). En journée et lors de conditions plus venteuses, le brassage de l'air a tendance à uniformiser les températures : les différences de température de l'air entre l'urbain et le rural s'estompent (**Fig. 2**). Rappelons-le, l'**îlot de chaleur urbain** est un **phénomène nocturne**, apparaissant lors de conditions dites « radiatives », très souvent anticycloniques. Par ailleurs, lors de ces nuits, l'orientation des vents faibles peut jouer sur l'extension et la forme de l'îlot de chaleur urbain, en poussant légèrement le dôme de chaleur vers les zones sous le vent (**Fig. 3**). Pendant des vagues de chaleur, les températures élevées en ville lors des nuits tropicales n'aident pas au repos des organismes et peuvent engendrer des risques sanitaires (**Note n° 5**).

Le jour, les conditions météorologiques radiatives (sans nuages) et le milieu urbain (très minéralisé) accentuent le phénomène de **surchauffe urbaine**, principalement observé sur les températures de surface et sur les températures ressenties (**Note n° 2**), qui prennent en compte le rayonnement. Au contraire, lors de journées nuageuses, les cartographies des températures montrent moins de contrastes.

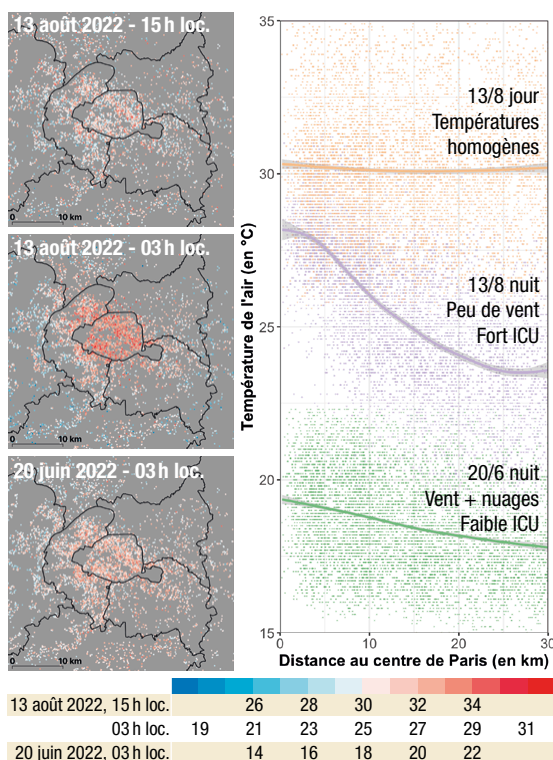
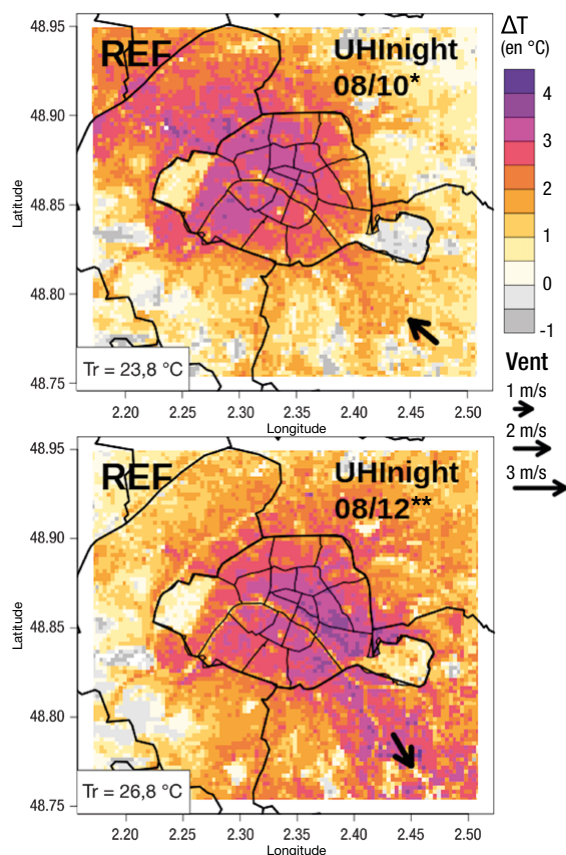


Figure 2: Cartographie des températures des stations Netatmo pour trois moments différents et graphique des températures en fonction de la distance au centre de Paris : répartition spatiale des températures plutôt homogène en journée (15 h locales) et pour une nuit avec du vent et des nuages (20 juin) vs. présence d'un îlot de chaleur urbain nocturne (13 août, à 03 h locales), avec un gradient thermique marqué



*REF UHInight 08/10 : référence Urban Heat Island (îlot de chaleur urbain - ICU) de la nuit du 10 août.

**REF UHInight 08/12 : référence Urban Heat Island (îlot de chaleur urbain - ICU) de la nuit du 12 août.

Figure 3 : Champs thermiques simulés par MesoNH dans le cadre du projet EPICEA, pour deux nuits d'août 2003 (3-5 h locales), montrant l'influence du vent sur l'îlot de chaleur urbain nocturne. Les ΔT représentés sont les écarts thermiques à la « température rurale » (Tr), calculée comme la température moyenne pour les points de grille avec 95 % de surface végétalisée

Source : CNRM

DYNAMIQUE SPATIO-TEMPORELLE DES TEMPÉRATURES

Bien que la carte, par construction, donne souvent une image statique du phénomène étudié, mettant l'accent sur sa **variabilité spatiale**, il est important de garder en tête la **dimension temporelle** et même le couplage entre ces deux variabilités pour apprécier toute la dynamique du phénomène cartographié. La variation dans le temps des conditions météorologiques conduit à des variations des répartitions spatiales des températures. Mais d'autres phénomènes intenses sur des échelles de temps plus courtes, comme le passage d'orages en été, peuvent induire des variabilités spatiales très marquées des températures, qui se prêtent également très bien à des cartographies (si la résolution temporelle est suffisante). Pour illustrer, la **Fig. 4** montre l'exemple des variations de température de l'air lors de l'orage du 16 août 2022, avant et après le passage de la ligne de grain (47 mm de pluie en 1 h 30 relevés à la station Météo-France Paris Montsouris). On observe une chute des températures de 10 °C en quelques minutes, avec une forte variabilité spatiale.

LA VILLE ET SES CONTRASTES THERMIQUES

Au-delà de la dichotomie rural-urbain utilisée pour quantifier l'intensité de l'îlot de chaleur urbain nocturne, la forte **diversité des propriétés physiques et morphologiques** des environnements urbains influence nécessairement la **variabilité de la température à des échelles plus fines** : contrastes à l'échelle de l'agglomération, gradients de température à proximité de parcs (**Note n° 7**) et de surfaces d'eau, effets de l'ombrage des bâtiments ou de l'arrosage des voiries, etc. S'ajoutent les flux de chaleur produite par les activités anthropiques (**Note n° 4**) et les relations avec la qualité de l'air (**Note n° 6**).

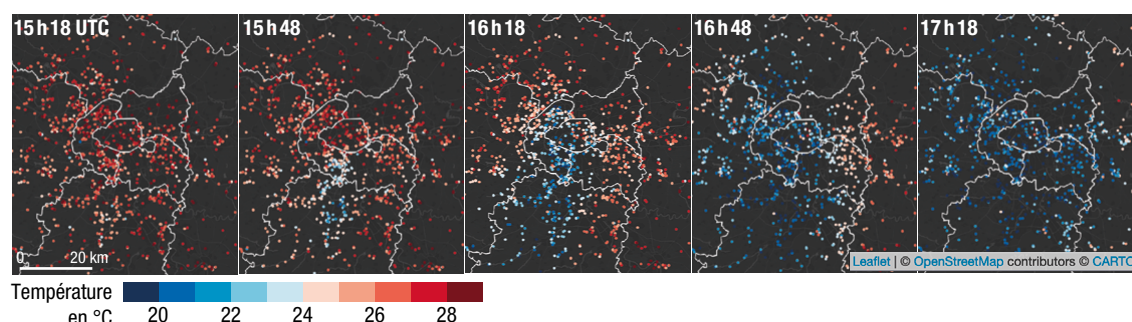


Figure 4 : Évolution de la répartition spatiale des températures de stations Netatmo au cours du passage d'un orage, le 16 août 2022

Source : Prodig, données Netatmo



Figure 5 : Un exemple de cartographie à échelle fine des températures issues de mesures itinérantes sur un transect ouest-est à Paris (nuit du 18 juillet 2022, 0 h 40-1 h 55 locales). Les températures sont exprimées en anomalies (soustraction d'une décroissance linéaire des températures à la station de référence parisienne du parc Montsouris entre le début et la fin des mesures)

Source : mesures itinérantes Prodig

Ces dimensions, qui font l'objet de nombreuses recherches, peuvent être abordées, là encore, à partir d'observations (produits satellitaires à haute résolution spatiale, données issues de réseaux denses de stations comme Netatmo, mesures itinérantes, voir **Fig. 5**) et/ou de simulation (modèles de recherche hectométriques), et être explorées au moyen de cartographies pour révéler les facteurs sous-jacents aux contrastes thermiques observés.

Malika Madelin du Prodig ; Aude Lemonsu et Tim Nagel du CNRM ; Martial Haeffelin de l'IPSL

CARTES ISSUES DU PROJET

1. Cartographies des champs de températures de surface (produits satellitaires) et de températures de l'air modélisés à une échelle fine.
2. Cartographies des températures de l'air mesurées par les stations des différents réseaux de surface déployés sur la région depuis l'été 2022.
3. Cartographies quotidiennes des températures de l'air (jour et nuit) à partir des données Netatmo pendant l'été 2022 et l'été 2023.
4. Cartographies des mesures itinérantes de température dans certains quartiers de Paris et pour certaines nuits chaudes des étés 2022 et 2023.
5. Cartographies des facteurs explicatifs des contrastes thermiques : relief, occupation du sol...

MESSAGES CLÉS

- La cartographie de la température permet de mettre en image les variations spatio-temporelles du climat urbain, à différentes échelles. Sa construction repose sur une suite de choix qui influencent la représentation du phénomène et son interprétation.
- L'accumulation de chaleur en ville et le différentiel de refroidissement entre la ville et la campagne environnante engendrent le phénomène d'îlot de chaleur urbain, visible sur les cartographies de la

température (observée et modélisée) à l'échelle de l'agglomération, avec des températures nocturnes plus élevées en ville.

- Les cartes de températures à échelle (spatiale ou temporelle) plus fine permettent de mettre en évidence l'effet de facteurs locaux sur la température (effets de parcs urbains, par exemple) ou la variabilité spatio-temporelle de phénomènes brefs et intenses (les orages, par exemple).

4 • EXPOSITION À LA CHALEUR DANS LES LOGEMENTS : DU CONFORT AU RISQUE

UNE APPROCHE LIMITÉE DU CONFORT

Littéralement, le « confort » traduit un bien-être. Il est donc l'expression d'un état global de l'individu. En donner une définition consensuelle et objective (selon une dimension) est une gageure. Il en est ainsi du confort thermique.

Défini par les conditions d'ambiance

Le glissement sémantique vers l'ergonomie permet de réduire le confort thermique à la définition des conditions d'ambiance les plus adaptées pour exercer une activité.

Les paramètres thermophysiques (température de l'air et des parois, humidité et vitesse d'air) identifiés comme pouvant altérer l'activité étudiée dessinent le périmètre des conditions d'ambiance à recueillir. La détermination de ces conditions appliquée à une population élargie permet de tendre vers une normalisation¹.

Du confort au risque

L'individu au repos dépense de l'énergie pour maintenir en fonctionnement ses organes. L'énergie dépensée est fonction de ses caractéristiques (poids, âge et taille), de son état (éveillé ou endormi) et des conditions d'ambiance. Sous l'effet d'une exposition croissante à la chaleur, le fonctionnement du corps va être modifié pour réguler la température corporelle (thermorégulation). Cela entraîne des conséquences allant de la gêne, avec l'expression d'un

inconfort ou une dégradation du sommeil, jusqu'à des manifestations cliniques telles que la déshydratation, l'hyperthermie ou l'aggravation de pathologies chroniques, comme illustré ci-après.

La complexité de la thermorégulation et la diversité au sein de la population ne permet pas de définir une frontière nette entre les zones de confort, d'inconfort et de risque.

La diversité des indicateurs mobilisés pour qualifier le confort thermique est la conséquence de la nature multifactorielle de l'ambiance thermique et des échanges entre l'ambiance et le corps.

UNE APPROCHE PRAGMATIQUE DE L'AMBIANCE THERMIQUE POUR PRÉVENIR LE RISQUE LIÉ À LA CHALEUR

Une démarche de prévention du risque se situe bien en amont de l'événement sanitaire, sans considération de la limite entre confort et inconfort. Dans un souci d'être comprise par le plus grand nombre, l'OMS s'appuie sur la température de l'air, une grandeur accessible et mesurable aisément,

1. ISO TC 159 : comité technique de normalisation, dont le sous-comité numéro 5 traite de l'ergonomie de l'environnement physique. Il assure, notamment, la rédaction et la mise à jour des normes NF EN ISO 7730 et 7243 pour, respectivement, l'évaluation des ambiances modérées et chaudes. www.iso.org/fr/committee/53348.html

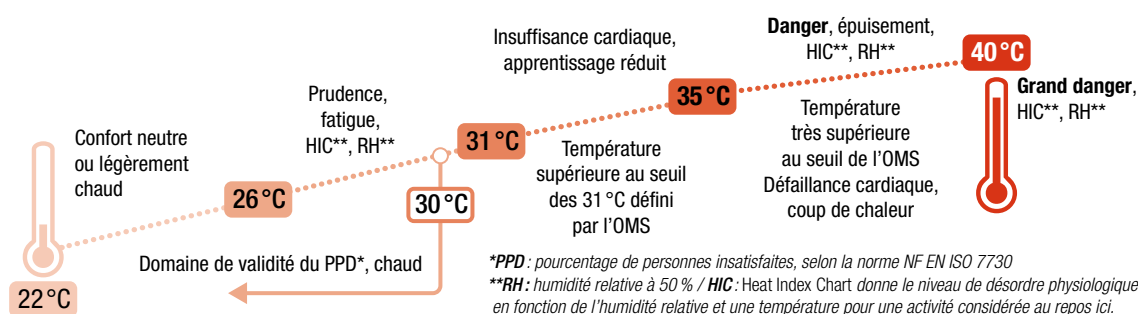


Figure 1 : Flèche du continuum du confort thermique au risque sanitaire dû à l'exposition à la chaleur

Source : CSTB

EXPOSITION À LA CHALEUR DANS LES LOGEMENTS : DU CONFORT AU RISQUE

pour donner des recommandations². À l'échelle européenne, la température préconisée dans les ambiances intérieures ne doit pas excéder 24 °C la nuit (de 22 h à 7 h du matin) et 32 °C le jour. D'autres textes³ donnent des températures plus faibles (30 °C), notamment pour les personnes de plus de 65 ans.

La nuit : une exigence forte

L'abaissement du seuil à 24 °C, la nuit, alerte sur l'importance de la qualité du sommeil pour la santé et dépasse les conséquences sanitaires directement liées à l'exposition à la chaleur.

Le brasseur d'air : une solution encadrée

Ces seuils sont parfois réhaussés avec l'augmentation de la vitesse d'air. Le renouvellement rapide de l'air sur la peau permet d'évacuer la sueur, qui, pour s'évaporer, absorbe de la chaleur au corps. De plus, sous réserve que la température de l'air soit inférieure à la température de la peau, le corps est également refroidi par la masse d'air froid. En revanche, si la température de l'air dépasse celle de la peau, autour de 34 °C, alors, en l'absence de sueur, le corps s'échauffera. Au-delà de cette température, apparaît donc une limite au refroidissement lorsqu'il n'y a plus de sueur. Cette situation survient lorsque la vitesse d'évaporation, dépendante de l'humidité ambiante et de la vitesse d'air, dépasse la vitesse de sudation. Les brasseurs d'air peuvent finalement perturber la sudation. En conséquence, l'OMS recommande de limiter l'usage des brasseurs d'air à des températures inférieures à 35 °C sous le climat européen, qui est relativement sec par rapport au climat tropical.

L'ambiance thermique est multicritère et hétérogène

Une fois le seuil pour l'ambiance thermique établi, son évaluation pratique est complexe et exige la mesure de plusieurs paramètres⁴, en priorité les températures de l'air et des parois, l'humidité et la vitesse d'air. La température au thermomètre rend compte d'une infinité d'ambiances thermiques, qui, toutes, influencent différemment le corps humain. L'analyse du domaine d'application rend explicite certains paramètres de l'ambiance thermique :

- la référence au climat européen laisse entendre que l'humidité relative en période chaude est généralement inférieure à 60 % ;
- la vitesse d'air est supposée quasi nulle à l'intérieur des bâtiments en l'absence de dispositifs spécifiques.

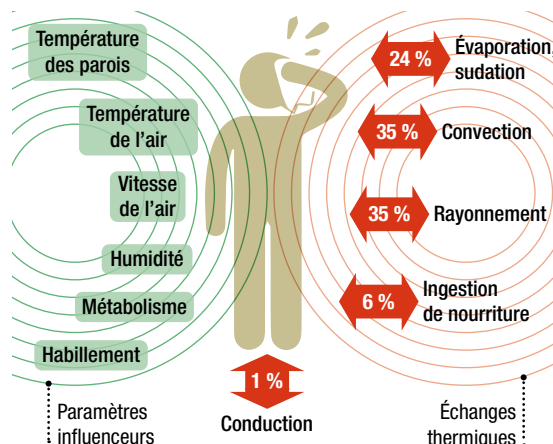


Figure 2 : Paramètres qui influencent les échanges thermiques avec le corps selon leur nature

Sources : Architecture et Climat - Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme (LOCI) - Université catholique de Louvain (Belgique)

La température des parois est un autre paramètre majeur. En l'absence de mouvement d'air, son influence est similaire à celle de la température de l'air. Mais cette variable est plus délicate à estimer. La position du thermomètre peut être à l'origine de variations de mesure importantes, et éviter l'exposition aux rayons directs du soleil est une priorité.

LE BÂTIMENT PROTÉGÉ

L'enveloppe du bâtiment filtre les variations du climat extérieur. Selon sa conception et l'activité des occupants, elle peut réguler les flux de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur pour maintenir une ambiance thermique intérieure décente.

L'analogie hydraulique permet de visualiser plus facilement la dynamique des transferts de chaleur entre les ambiances intérieure et extérieure en les représentant par deux réservoirs à des niveaux de hauteur d'eau distincts assimilés à des températures en première intention. La chaleur est considérée comme une forme d'énergie qui s'écoule entre les deux sources à des niveaux différents.

Mis en contact, des flux vont s'échanger entre les réservoirs pour équilibrer les niveaux. Pour compléter l'analogie avec l'alternance jour/nuit, on distingue deux régimes :

- diurne, quand le niveau du réservoir « climat » est élevé, c'est-à-dire chaud, le flux s'écoule vers le réservoir « logement » avec un niveau plus bas et contribue à élever son niveau, donc à le réchauffer ;
- nocturne, à l'inverse, quand le niveau du réservoir « climat » est bas, le réservoir « logement » se vide vers le réservoir « climat » et l'ambiance intérieure se refroidit.

La présence d'un réservoir tampon, appelé « bâtiment », temporise les écoulements en stockant une partie du fluide qui a pénétré à l'intérieur. Son efficacité dépend de :

- sa capacité thermique, déterminée par sa masse et l'énergie consommée pour chauffer cette masse ;
- la vitesse d'écoulement du flux, fonction de la surface d'échange et de la résistance du matériau à l'écoulement de la chaleur.

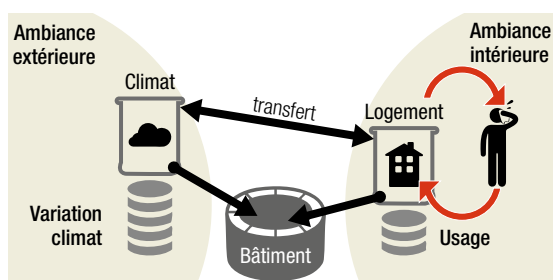


Figure 3 : Analogie hydraulique des transferts de chaleur
Source : CSTB

Les leviers pour améliorer la protection

Les moyens de protection visent à :

- limiter la chaleur émise ou transmise vers l'intérieur ;
- favoriser le stockage de la chaleur interne (inertie) ;
- évacuer la chaleur vers l'extérieur.

Respectivement, les moyens d'action traditionnels sont les protections solaires extérieures et l'isolation, en priorité en toiture, puis l'inertie de l'enveloppe, apportée essentiellement par les surfaces horizontales en béton ou en carrelage, et enfin la taille des fenêtres et leur ouverture la nuit. En climat océanique dégradé, caractérisé par l'alternance entre jours chauds et nuits fraîches en été, ils permettent de conserver des ambiances thermiques modérées dans les logements.

Les freins en ville

Sous l'effet cumulé du changement climatique et de l'îlot de chaleur urbain, les nuits chaudes sont plus fréquentes. En conséquence, « le ressort climat » est toujours en extension, potentiellement à un niveau au-delà des seuils recommandés (par l'OMS, par exemple). L'écoulement ne peut être stoppé et l'effet tampon ne peut que retarder le moment où le niveau acceptable de température au sein du logement sera atteint si la température extérieure ne baisse pas. L'évolution de la température intérieure (en bleu), au fil du temps, dans un logement intermédiaire soumis aux températures enregistrées par la station de

référence de Météo-France installée au parc Montsouris, durant la canicule de 2003, illustre les limites de la résistance de l'enveloppe (**Fig. 4**).

Pour le cas illustré, au bout de quatre jours, les conditions d'ambiance intérieure dépassent le seuil de 24 °C la nuit tandis que le seuil de 30 °C est dépassé au huitième jour (seuils recommandés en pointillés rouges).

Ces limites liées au climat sont à compléter avec la difficulté d'ouvrir les fenêtres la nuit en ville. Du risque d'intrusion aux bruits extérieurs, toutes les nuisances véhiculées par l'air sont transmises à l'intérieur, altérant la quiétude et la santé des occupants. Identifier et comprendre ces freins sont un préalable nécessaire à la portée de la recommandation.

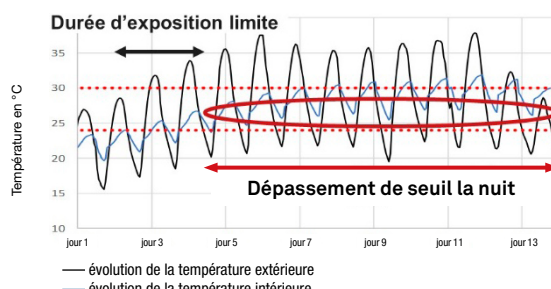


Figure 4 : Températures intérieure et extérieure au cours de l'été 2003, à Paris
Source : CSTB

Les limites des systèmes de rafraîchissement

Une fois les seuils dépassés, il faut extraire la chaleur de l'ambiance intérieure en pompant dans le réservoir « logement » pour abaisser son niveau. Mécaniquement, cela revient à envoyer le fluide de la source froide à la source chaude. Ce transfert à contre-courant consomme de l'énergie. Bien que la climatisation soit un système efficace pour réaliser cette action, elle présente des inconvénients, dont :

- l'influence du rejet de chaleur dans l'environnement extérieur et donc sur les bâtiments à proximité ;
- la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre associées ;
- les émissions des fluides frigorigènes à fort pouvoir de réchauffement.

2. *On preventing health effects of heat*, World Health Organization (WHO), 2011.
3. *Ministry of social affairs and health decree (525/2015) on housing health*, Ministry of social affairs and health, Helsinki, Finland, 2015.
4. Norme NF EN ISO 7726, « Ergonomie des ambiances thermiques. Appareils de mesure des grandeurs physiques », Afnor, 1998.



EXPOSITION À LA CHALEUR DANS LES LOGEMENTS : DU CONFORT AU RISQUE

Des alternatives à la climatisation individuelle existent :

- utiliser le pouvoir refroidissant de l'évaporation (avec des humidificateurs, par exemple) ;
- exploiter des sources froides locales (à l'instar d'une rivière ou du sol) ;
- développer un système collectif (réseau de froid, boucle tempérée) en s'appuyant sur la densité des besoins en ville, voire en exploitant la présence simultanée de besoins de froid et de chaud, fréquente dans des zones avec une forte diversité d'usages.

Toutes ces solutions, y compris la climatisation, ont des limites à établir afin d'avoir des solutions fiables pour prévenir le risque. H2C contribue à cette connaissance.

Jean-Marie Alessandrini et Maeva Sabre du CSTB

MESSAGES CLÉS

- Le confort thermique et le risque sanitaire lié à la chaleur s'appuient sur une multitude d'indicateurs et de seuils du fait des phénomènes complexes mis en jeu et de situations hétérogènes.
- Pour prévenir le risque sanitaire lié à la chaleur, l'OMS recommande de ne pas dépasser 24 °C la nuit et 32 °C le jour dans les ambiances intérieures.
- Les protections solaires extérieures, l'isolation et l'ouverture nocturne des fenêtres offrent des solutions intéressantes mais une protection limitée.
- La ville est un frein à l'évacuation de la chaleur :
 - l'ouverture des fenêtres, la nuit, une nécessité sous contrainte (intrusion, pollution, bruit, etc.) ;
 - l'îlot de chaleur urbain, avec des températures nocturnes élevées.
- La climatisation est un système efficace mais comportant des inconvénients forts pour l'adaptation et l'atténuation au changement climatique.

5 • INFLUENCE DE LA CHALEUR SUR LA SANTÉ EN ÎLE-DE-FRANCE

CONTEXTE

La chaleur est identifiée par le Groupe intergouvernemental d'experts pour le climat (GIEC) comme l'un des risques climatiques les plus préoccupants en Europe, compte tenu de ses impacts sur la santé humaine et sur l'équilibre des écosystèmes.

En France, la chaleur a déjà un impact majeur sur la mortalité et le recours aux soins. Entre 2014 et 2022, elle a causé plus de 32 000 décès, dont près de 7 000 pour le seul été 2022. Moins d'un tiers de ces décès sont survenus pendant des vagues de chaleur (résultant d'un risque élevé sur un faible nombre de jours) ; les deux tiers sont dûs à des températures observées tout au long de l'été (résultant d'un risque plus faible sur un grand nombre de jours).

Au-delà de la mortalité, **le coût sociétal des impacts de la chaleur sur la santé est élevé** : il a été estimé à au moins 21 milliards d'euros de coûts directs et indirects pour la France entre 2015 et 2019 (recours aux soins, mortalité et restrictions d'activité).

L'Île-de-France est particulièrement concernée par le risque chaleur. L'augmentation des températures, sous l'influence du changement climatique, y est rapide. Enfin, **la région se caractérise par des inégalités environnementales et sociales, susceptibles d'aggraver l'influence de la chaleur sur la santé.**

OBJECTIFS

Le projet H2C vise à mieux comprendre l'influence de la chaleur sur la santé en Île-de-France afin d'orienter les mesures d'adaptation et de prévention pour une meilleure efficacité. À cette fin, plusieurs analyses épidémiologiques sont réalisées en s'appuyant sur des données environnementales, sociales et sanitaires à l'échelle de la commune, sur la période 2000-2019. Les objectifs :

- **décrire l'exposition et la vulnérabilité** à la chaleur ;
- **quantifier l'influence** de la chaleur sur la mortalité, les hospitalisations et les passages aux urgences ;
- **identifier les facteurs de risque et les facteurs protecteurs** pour ouvrir des pistes d'adaptation.

DES DONNÉES D'EXPOSITION JOURNALIÈRE À LA TEMPÉRATURE À FINE ÉCHELLE

Ces analyses mobilisent des données journalières de température fournies par Météo-France à l'échelle de la commune, avec ci-dessous un exemple de carte.

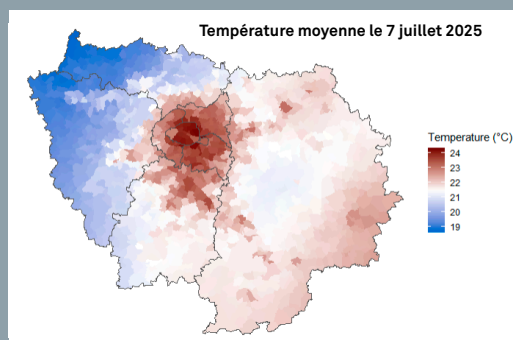


Figure 1 : Carte de température à la commune, exemple de la journée du 7 juillet 2015

Source : Santé publique France, d'après données CNRM

LA VULNÉRABILITÉ À LA CHALEUR EN ÎLE-DE-FRANCE ET LES IMPACTS SUR LA MORTALITÉ

La chaleur constitue un risque pour l'ensemble de la population. Cependant, ce risque peut être plus élevé pour certaines populations ou certaines zones, alors qualifiées de « vulnérables ».

Cette vulnérabilité dépend de trois dimensions :

- l'exposition à la chaleur ;
- la susceptibilité individuelle ;
- la capacité individuelle à faire face (**Fig. 2**).

Le projet H2C a permis de croiser des indicateurs représentant chacune de ces dimensions, afin d'identifier des zones plus ou moins vulnérables à la chaleur.

INFLUENCE DE LA CHALEUR SUR LA SANTÉ EN ÎLE-DE-FRANCE



Figure 2 : Les dimensions de la vulnérabilité à la chaleur et les indicateurs retenus pour chacune dans H2C

Source : Santé publique France

Les zones potentiellement très vulnérables qui ressortent (**Fig. 3**) sont :

- des zones avec des revenus faibles, un taux élevé de chômeurs et de logements sociaux, et des températures élevées (en violet) ;
- des zones très denses, très artificialisées, avec des revenus et des niveaux d'éducation élevés, mais également des températures très élevées (en vert).

Trois types de zones sont identifiés comme *a priori* moins vulnérables :

- des zones denses, avec des revenus et des températures élevés mais une végétalisation plus importante que le reste de la région (en jaune) ;
- des zones moins denses, plus végétalisées, avec des températures moins élevées que le reste de

la région, et des revenus plus ou moins élevés (en bleu et en rouge, respectivement).

Entre 2000 et 2017, 8 000 décès sont attribuables à la chaleur pendant l'été en Île-de-France. Près de 5 600 de ces décès, soit 70 %, sont survenus dans les deux zones les plus vulnérables (en violet et en vert).

LES IMPACTS SUR LE RECOURS AUX SOINS

La chaleur a de nombreux effets sur la santé, dont une partie seulement conduit à des décès (**Fig. 4**). L'étude des recours aux soins permet d'avoir une vision plus large du coût humain et sociétal de la chaleur. Ainsi, dans le cadre de H2C, l'étude de l'influence de la chaleur sur les passages aux urgences et les hospitalisations pour diverses causes (cardiovasculaires, respiratoires, rénales...) a permis de mettre en évidence un impact important de la chaleur sur le recours aux soins dans la région, avec au moins 27 000 passages aux urgences et 4 800 hospitalisations attribuables entre 2010 et 2019.

À tous les âges, la chaleur augmente la probabilité d'être pris en charge par les urgences pour des causes directes de la chaleur (hyperthermie, déshydratation), mais également pour des malaises ou des causes rénales et respiratoires. Elle augmente également la probabilité d'être hospitalisé pour des causes respiratoires ou rénales.

En ce qui concerne les causes cardiovasculaires, on observe que la chaleur est associée à une diminution des passages aux urgences, mais à une augmentation des hospitalisations et de la mortalité. Cela

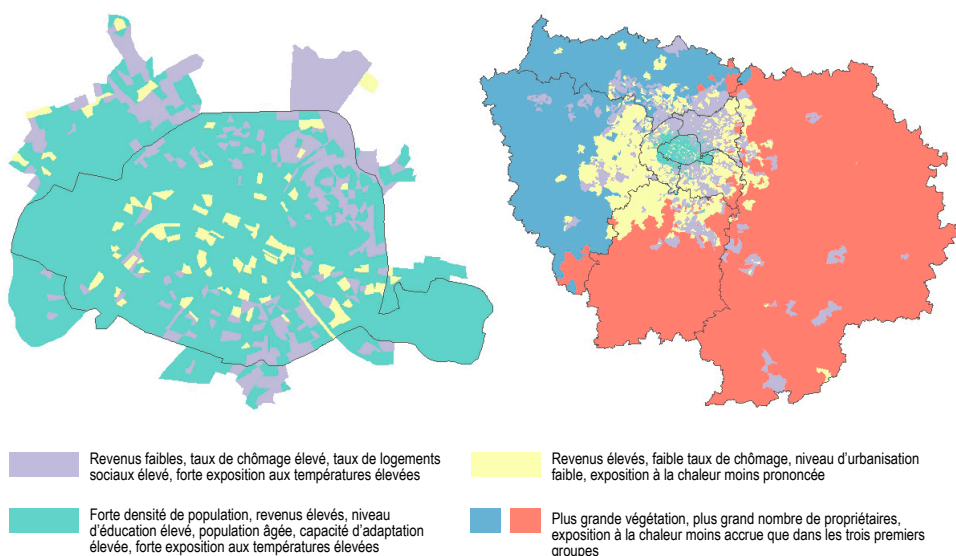


Figure 3 : Les cinq zones de vulnérabilité à la chaleur identifiées par le projet H2C
Source : Santé publique France

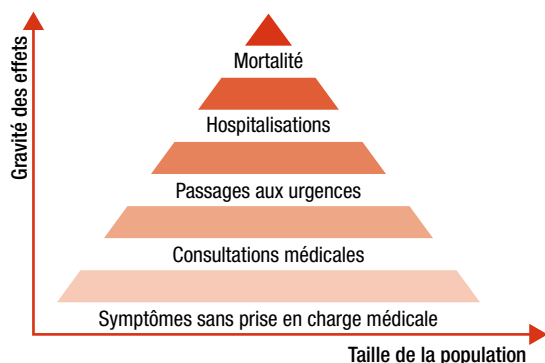


Figure 4 : Pyramide des effets de la chaleur sur la santé
Source : Santé publique France

suggère des impacts très rapides et graves de la chaleur sur la santé cardiovasculaire, avec une prise en charge ne dépendant plus des urgences.

FACTEURS DE RISQUES SOCIAUX ET ENVIRONNEMENTAUX

Ces analyses permettent aussi d'aller plus loin dans l'identification des facteurs de risque et des facteurs protecteurs.

Les résultats montrent que l'influence délétère de la chaleur sur la mortalité et sur les recours aux soins est observée dans les zones rurales comme urbaines, et à tous les âges. Les risques sont globalement plus élevés chez les plus de 65 ans, mais existent aussi chez les moins de 65 ans (**Fig. 5**).

Chez les moins de 65 ans, le risque de décès est plus élevé chez les hommes, ce qui pourrait être en partie lié à une exposition professionnelle et à une moindre adhésion aux conseils de comportements. Chez les plus de 65 ans, le risque de décès est plus élevé chez les femmes, ce qui pourrait être en partie lié à la physiologie (en raison du système hormonal, en particulier), à la démographie (les femmes très âgées sont plus nombreuses que les hommes) et aux inégalités sociales (les femmes âgées ont en moyenne des revenus plus faibles que les hommes âgés et sont plus susceptibles d'être isolées socialement). À l'inverse, on observe peu de différence par genre de l'effet de la chaleur sur les passages aux urgences et les hospitalisations.

Cela souligne l'importance de poursuivre les travaux pour mieux comprendre les différences ou non observées selon les genres.

Les analyses indiquent que les risques de décès tendent à être plus élevés dans les communes plus défavorisées socialement, avec des revenus plus faibles ou un nombre de logements sociaux plus important. À l'inverse, les personnes vivant dans

les communes plus favorisées socialement ou avec moins de logements sociaux ont plus de probabilité d'être prises en charge rapidement par les urgences en lien avec la chaleur.

Quant à la présence de végétation, son effet protecteur, retrouvé plus largement dans d'autres travaux épidémiologiques, apparaît plus limité dans notre étude (effet observé uniquement sur la mortalité des moins de 65 ans). Cela pourrait s'expliquer du fait que les données d'exposition à la température sont estimées à une échelle plus fine que dans les précédents travaux (à la commune vs. au département). Ainsi, les contrastes de température d'une commune à l'autre révèlent déjà une partie de l'influence de la végétation sur ce paramètre.

RENFORCER L'ADAPTATION À LA CHALEUR POUR PROTÉGER LA SANTÉ

Les résultats du projet H2C soulignent que la chaleur demeure un risque important de décès en Île-de-France, malgré les mesures de prévention et d'adaptation mises en œuvre.

La première cible de la prévention doit être la réduction de l'exposition, qui constitue la première protection et la plus efficace. La seconde cible doit être la prise en charge médicale, si l'exposition n'a pu être évitée.

Ainsi, la prévention repose actuellement en grande partie sur la communication de comportements individuels adéquats tout au long de la saison estivale, englobant des conseils tels que maintenir une

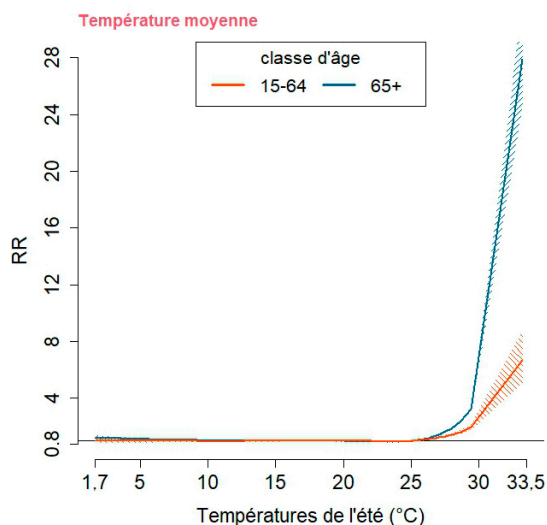


Figure 5 : Risques relatifs (RR) de décès (toutes causes confondues) selon l'âge pour l'Île-de-France
Source : Santé publique France

hydratation suffisante, réduire les températures à l'intérieur des bâtiments et reconnaître les signes d'un « coup de chaleur ». Des mesures à court terme sont mises en place pendant les vagues de chaleur, incluant des ajustements du personnel dans les hôpitaux, l'annulation d'événements sportifs et la modification des horaires de travail. Ces mesures sont essentielles pour réduire les risques très élevés pendant les vagues de chaleur.

En parallèle, pour réduire les risques et les impacts tout au long de l'été, il semble pertinent d'agir simultanément sur différents volets :

- la réduction de la surchauffe urbaine, à travers le traitement de l'inconfort thermique ressenti en journée par les piétons dans les espaces urbains (rayonnement du soleil et des surfaces minérales, manque de ventilation, etc.) et les solutions de lutte contre l'effet d'îlot de chaleur urbain la nuit ;
- la végétalisation des villes, qui est par ailleurs associée à de nombreux bénéfices pour la santé et l'environnement, au-delà de son rôle de rafraîchissement (renforcement des capacités individuelles, bien-être, biodiversité, etc.) ;
- la désimperméabilisation des sols et le retour de l'eau en surface dans les villes (création de noues, réouverture de rivières) ;
- la réduction de la température dans les logements pendant l'été, en favorisant des méthodes peu coûteuses et peu consommatrices d'énergie ;
- la réduction des inégalités sociales, et en particulier des inégalités de genre.

Mathilde Pascal et Morgane Stempfelet
de Santé publique France ;
Sabine Host de l'ORS, L'Institut Paris Region

MESSAGES CLÉS

- La chaleur, aggravée par le changement climatique, est associée à une augmentation du risque de décès des adultes, et à une augmentation du risque de passages aux urgences et d'hospitalisations pour de nombreuses causes. En Île-de-France, entre 2000 et 2017, 8 000 décès sont attribuables à la chaleur pendant l'été ; et entre 2010 et 2019, ce sont au moins 27 000 passages aux urgences et 4 800 hospitalisations attribuables.
- La chaleur constitue un risque de décès et de recours aux soins dans les zones très denses comme dans les zones rurales, pour toutes les catégories d'âge.
- Des différences par genre sont observées, pour la mortalité uniquement. Chez les moins de 65 ans, les risques sont plus élevés chez les hommes. Chez les plus de 65 ans, ils sont plus élevés chez les femmes.
- Le risque de décès lié à la chaleur est plus élevé dans les communes plus défavorisées socialement. Les personnes vivant dans des communes avec moins de logements sociaux, ont une plus grande probabilité de prise en charge par les urgences à cause de la chaleur.
- La vulnérabilité à la chaleur dépend de l'exposition, de la susceptibilité individuelle et de la capacité individuelle à faire face. Elle nécessite des stratégies d'adaptation différenciées.
- La réduction des inégalités sociales et des inégalités de genre doit être un levier majeur pour l'adaptation à la chaleur.

6 • POLLUTION DE L'AIR ET CHALEUR

DES LIENS ÉTROITS ENTRE CHALEUR ET POLLUTION DE L'AIR

Chaleur et pollution de l'air sont fortement liées. En effet, les canicules favorisent la formation de polluants de l'air, et certains polluants ont un effet sur le réchauffement climatique. Le changement climatique, la pollution de l'air et la menace sur la biodiversité constituent la triple crise planétaire à laquelle l'humanité est confrontée, selon l'ONU.

La chaleur favorise la formation d'ozone

L'ozone de basse altitude (O_3) est un polluant dit « secondaire », c'est-à-dire qu'il n'est pas rejeté directement dans l'atmosphère, mais se forme par transformation chimique de différents gaz précurseurs – composés organiques volatils (COV), méthane (CH_4) et monoxyde de carbone (CO) – en présence d'oxydes d'azote (NO_x), sous l'effet d'un ensoleillement important et de températures élevées (Fig. 1). De ce fait, les plus fortes concentrations en ozone, pouvant dépasser les seuils d'information et d'alerte, sont observées en journée lors des périodes de canicule. Cette particularité en fait l'un des enjeux des années à venir, en lien avec le changement climatique. Outre l'action du rayonnement

solaire sur la vitesse de réaction chimique, les fortes températures augmentent les émissions par les végétaux de COV biogéniques, également précurseurs d'ozone.

En Île-de-France, le seuil recommandé par l'OMS (100 $\mu g/m^3$ sur une période de huit heures, à ne pas dépasser plus de trois jours par an)¹ est dépassé de façon chronique en tout point de la région. Le nombre de dépassements de ce paramètre, tout comme le nombre de dépassements du seuil d'information et de recommandations (180 $\mu g/m^3$ sur une heure), sont variables d'une année sur l'autre (Fig. 2). L'occurrence des épisodes de pollution est étroitement liée aux vagues de chaleur et de sécheresse.

À des concentrations élevées, l'ozone provoque le déclenchement de crises d'asthme, une diminution de la fonction pulmonaire et l'apparition de maladies respiratoires². À long terme, des liens sont observés avec la mortalité respiratoire et cardiovasculaire, notamment pour des sujets prédisposés par des maladies chroniques (maladies pulmonaires et cardiaques ou diabète).

1. "Air Quality Guidelines", World Health Organization (WHO), 2021.
2. Project "Review of evidence on health aspects of air pollution" (REVIHAAP), 2013.

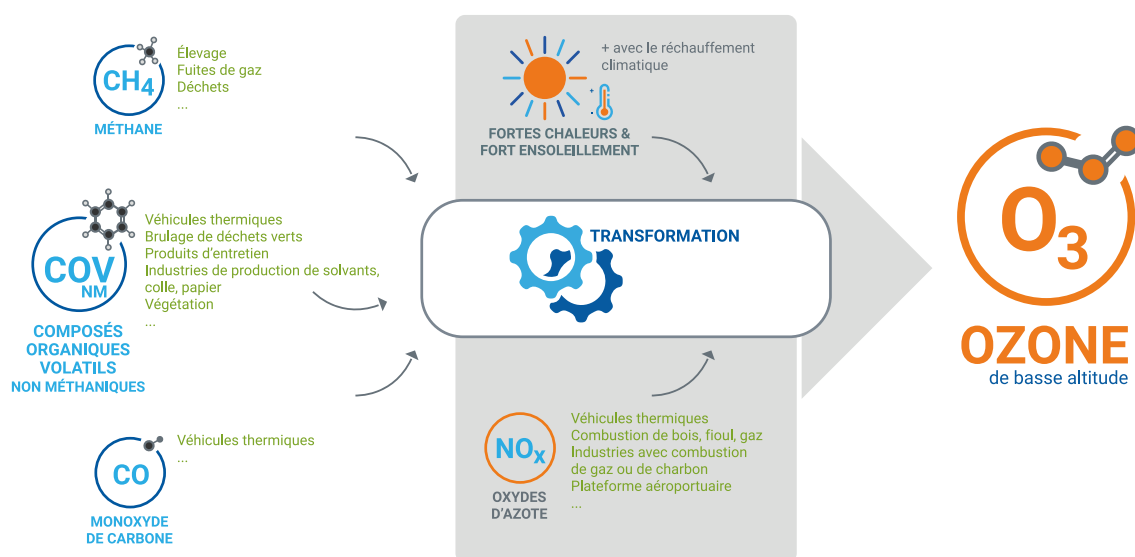


Figure 1 : La formation d'ozone de basse altitude
Source : Airparif

POLLUTION DE L'AIR ET CHALEUR

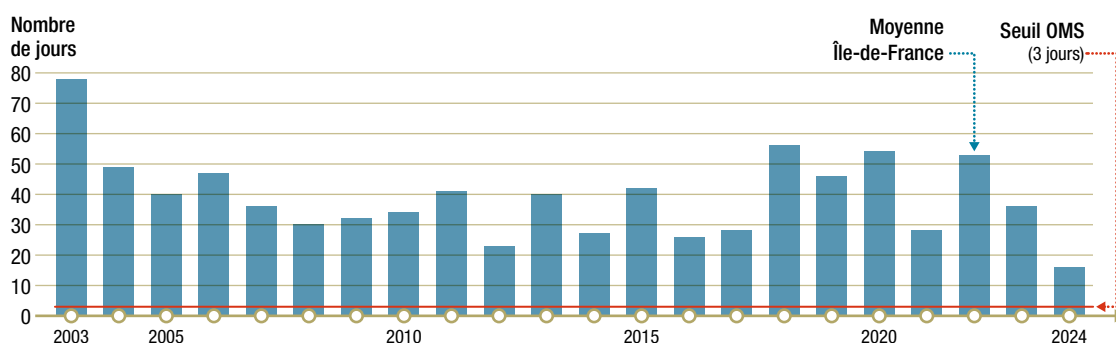


Figure 2 : Évolution du nombre de jours de dépassement du seuil de 100 µg/m³ d'ozone sur 8 heures en Île-de-France, entre 2003 et 2024, moyenne sur l'ensemble des stations de mesure d'Airparif

Source : Airparif 2025

En 2022, l'Observatoire régional de santé Île-de-France (ORS) et Airparif ont estimé que l'exposition chronique à l'ozone de basse altitude était responsable de 1 700 décès prématurés par an en Île-de-France, qui pourraient être évités en respectant les recommandations de l'OMS (60 µg/m³) sur l'ensemble de la région³. L'ozone a également un effet néfaste sur la végétation, qui conduit à une baisse de rendement des cultures, voire à un dépérissement des écosystèmes. Cet effet, cumulé au stress hydrique, pourrait diminuer l'effet rafraîchissant des arbres en ville et leur capacité à absorber une partie de la pollution urbaine⁴.

Tendances des niveaux d'ozone à moyen terme

Sur le moyen terme, la pollution chronique due à l'ozone reste, en Île-de-France, une problématique récurrente. Les niveaux de pointe en ozone sont étroitement liés aux vagues de chaleur et de sécheresse, dont la fréquence et l'intensité tendent à augmenter en Europe. Néanmoins, la quantification des niveaux d'ozone à venir reste incertaine, compte tenu de la complexité des processus de formation de ce composé. Les modélisations prévoient une augmentation des concentrations en ozone à moyen et long termes, au-delà de 2040⁵. Toutefois, cette tendance pourrait être compensée par la diminution des émissions de précurseurs d'ozone.

Sur les vingt dernières années, la fréquence et l'intensité des pics de pollution ont tendance à diminuer, à conditions météorologiques équivalentes. Ainsi, alors qu'une température de 27 °C suffisait, en 2003, à dépasser le niveau d'information et de recommandations en O₃ (180 µg/m³), il a été constaté, en Île-de-France, ces dernières années, qu'une température minimale de 30 °C était désormais nécessaire pour dépasser ce seuil réglementaire. Ce constat peut s'expliquer en partie par la baisse

continue observée des concentrations des précurseurs (NOx, COV).

Autres effets de la chaleur sur la pollution de l'air

Au-delà de l'impact sur l'ozone, les vagues de chaleur et les périodes de sécheresse augmentent les risques de feux de forêt en été, qui sont source de particules fines.

La pollution de l'air contribue au réchauffement climatique

L'ozone de basse altitude est également l'un des rares polluants de l'air à être aussi un gaz à effet de serre. Les concentrations moyennes annuelles ont augmenté de 25 % au cours des vingt dernières années. Cette hausse a été constatée en France et dans toute l'Europe. Elle s'explique principalement par deux phénomènes. Le premier est lié au transport intercontinental de l'ozone et de ses précurseurs, dont les émissions sont globalement en hausse dans l'hémisphère Nord. Le second tient paradoxalement à la diminution des niveaux d'oxydes d'azote dans les grandes agglomérations. Alors qu'ils contribuent, la journée, à la formation de l'ozone, les NOx entraînent au contraire, dans les cœurs urbains, une destruction chimique de l'ozone par titration, qui intervient principalement la nuit.

L'ozone est le troisième gaz contributeur au réchauffement climatique, après le dioxyde de carbone et le méthane (Fig. 3).

De plus, l'impact nocif de l'ozone sur la végétation réduit l'activité photosynthétique des plantes, des cultures et des forêts, et pourrait diminuer leur

3. « Mortalité attribuable à la pollution atmosphérique en Île-de-France », ORS, Airparif, 2022.

4. Maison A., « Modélisation des impacts des arbres sur la qualité de l'air de l'échelle de la rue à la ville », thèse, 2023.

5. European Topic Centre on Air pollution and Climate change Mitigation, 2015.

capacité à consommer le CO₂ atmosphérique, ce qui aurait pour conséquence une augmentation de l'effet de serre et donc un réchauffement climatique plus important⁶.

PRODUCTIONS DU PROJET H2C EN MATIÈRE DE QUALITÉ DE L'AIR

Le dispositif de surveillance est dimensionné pour fournir des niveaux des polluants atmosphériques réglementés en tout point de l'Île-de-France. Suivant les endroits, cette information est fournie par le système de modélisation validé ou *via* le réseau de mesure, qui compte 52 stations permanentes. Des campagnes de mesures complémentaires peuvent être menées dans certains secteurs géographiques pour affiner la précision des cartographies. Les systèmes de modélisation utilisés à Airparif prennent en compte toutes les sources d'émissions et notamment celles du trafic routier. À partir de ces outils sont établies des cartes permettant de situer les concentrations de dioxyde d'azote (NO₂), de particules PM10 et PM2,5, et d'ozone au regard des seuils réglementaires et des valeurs de référence fixés par l'OMS, à une résolution de maille de 50 mètres à l'échelle de l'Île-de-France. Les cartographies résultantes présentent les niveaux annuels de pollution rencontrés en situation de fond (loin des sources directes d'émissions) et, pour les polluants en lien direct avec le trafic routier, à proximité immédiate des axes de circulation. Les zones d'influence directe des axes et la décroissance des concentrations en s'éloignant de ces derniers sont également prises en compte. La méthodologie de ces cartes repose sur l'exploitation conjointe des sorties de la plateforme inter-régionale de cartographie et de prévision de la qualité de l'air ESMERALDA et des observations aux stations de mesure d'Airparif, couplées à la modélisation des émissions du trafic routier menée par le système HEAVEN (pour le NO₂ et les particules).

Documenter les interactions possibles avec les effets de la chaleur

De multiples études montrent des interactions entre les effets à court terme de la pollution de l'air et la chaleur, notamment sur le risque de décès. Ainsi, l'effet de la température sur la mortalité tendrait à être plus important lorsque les concentrations d'ozone ou de particules fines sont plus élevées et réciproquement, les effets de la pollution de l'air sont

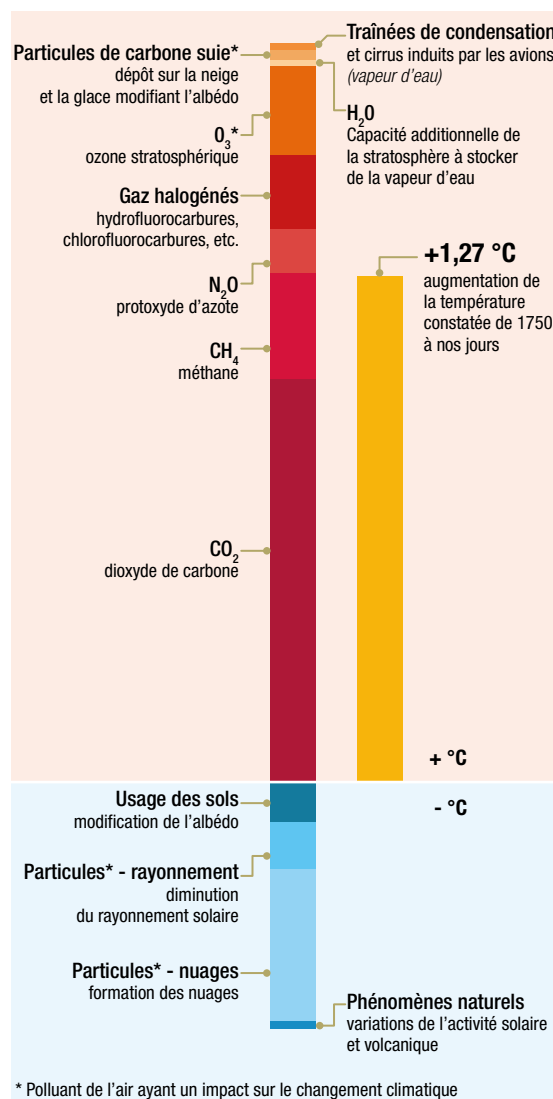


Figure 3 : Contribution au changement climatique de 1750 à nos jours

Source : Airparif, à partir de GIEC, *Changements climatiques 2021 : les bases scientifiques physiques*

6. Ainsworth et al., *The Effects of Tropospheric Ozone on Net Primary Productivity and Implications for Climate Change*, *Annual Review of Plant Biology*, 2012.



également accentués par la chaleur. Dans le cadre du projet H2C, les cartographies de pollution produites sur la période 2015-2021 à l'échelle des mailles Iris⁷ ont permis d'alimenter le volet consacré à l'étude épidémiologique. Cette dernière visait à évaluer l'influence des indicateurs de pollution atmosphérique sur la relation entre la température et la mortalité ou le recours aux soins (passages aux urgences et hospitalisations). Concrètement, il s'agissait de croiser statistiquement les paramètres d'exposition et les données sanitaires (**Note n° 5**).

Améliorer la modélisation

Un second volet a porté sur l'amélioration de la modélisation de la qualité de l'air sur l'Île-de-France en couplant le dispositif de surveillance d'Airparif avec deux systèmes de modélisation locale et régionale alimentés par des données météorologiques plus fines, issues du modèle AROME de Météo-France.

Véronique Gherzi et Amandine Rosso d'Airparif

7. Îlot regroupé pour l'information statistique.

MESSAGES CLÉS

- Les vagues de chaleur favorisent la formation de l'ozone. De ce fait, les concentrations en ozone les plus fortes, pouvant dépasser les seuils d'information et d'alerte, sont rencontrées lors des périodes de canicule.
- En Île-de-France, le seuil recommandé par l'OMS (100 µg/m³ sur une période de huit heures, à ne pas dépasser plus de trois jours par an), est dépassé de façon chronique en tout point de la région. L'occurrence des épisodes de pollution est étroitement liée aux vagues de chaleur et de sécheresse.
- À des concentrations élevées, l'ozone provoque le déclenchement de crises d'asthme, une diminution de la fonction pulmonaire et l'apparition de maladies respiratoires. À long terme, des liens sont observés avec la mortalité respiratoire et cardiovasculaire, notamment pour des sujets prédisposés par des maladies chroniques.
- À moyen terme, la pollution chronique due à l'ozone reste, en Île-de-France, une problématique récurrente. Néanmoins, la quantification des niveaux d'ozone à venir demeure incertaine, compte tenu de la complexité des processus de formation de ce composé. Sous l'effet de l'augmentation des vagues de chaleur, on s'attendrait à des pics de pollution à l'ozone plus fréquents, mais la diminution des émissions de précurseurs d'ozone pourrait compenser cette tendance.
- L'ozone de basse altitude est également l'un des rares polluants de l'air à être aussi un gaz à effet de serre. Les concentrations moyennes annuelles ont augmenté de 25 % au cours des vingt dernières années.

7 • EFFET DES PARCS URBAINS

SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES ASSOCIÉS AUX ESPACES VERTS URBAINS

La nature en ville apporte un ensemble d'avantages aux habitants, que l'on nomme « services écosystémiques » ou « services environnementaux ». Ces services sont multiples, combinant notamment la régulation du microclimat urbain, la préservation de la biodiversité, le drainage des eaux de pluie et la réduction du ruissellement de surface, le stockage de carbone, l'amélioration des ambiances urbaines et du bien-être des habitants, etc.

Les risques associés à la chaleur sont renforcés en ville pendant les vagues de chaleur, car l'îlot de chaleur urbain intensifie les températures nocturnes déjà très élevées. Dans un contexte de réchauffement global et de recrudescence de vagues de chaleur, la végétalisation de l'espace urbain est une stratégie de plus en plus plébiscitée pour lutter contre la surchauffe urbaine. Les Plans Climat des villes intègrent la préservation des espaces verts existants, l'introduction de plus de nature et la désimperméabilisation des sols comme des voies d'adaptation au changement climatique.

Cependant, de nombreuses questions restent ouvertes sur les facteurs d'efficacité des espaces végétalisés à créer des îlots de fraîcheur dans la ville, selon leur nature (squares, places, parcs ou bois), leur taille, leur forme, leurs types de végétation, leur aménagement ou encore leur accessibilité. L'influence des conditions météorologiques et de l'état hydrique des sols sur l'apport de fraîcheur par ces espaces végétalisés reste également un sujet d'étude.

RAFRAÎCHISSEMENT URBAIN PAR LA VÉGÉTATION

Les caractéristiques des environnements bâtis, comparés aux surfaces naturelles, engendrent des différences de température entre ces deux types de milieux. Les matériaux qui composent le bâti accumulent la chaleur reçue par rayonnement solaire en journée du fait de leur forte capacité calorifique. Leur caractère perméable, de plus, diminue leur capacité à absorber et à stocker l'humidité, rendant minimal le refroidissement par évaporation. Le milieu urbain, de

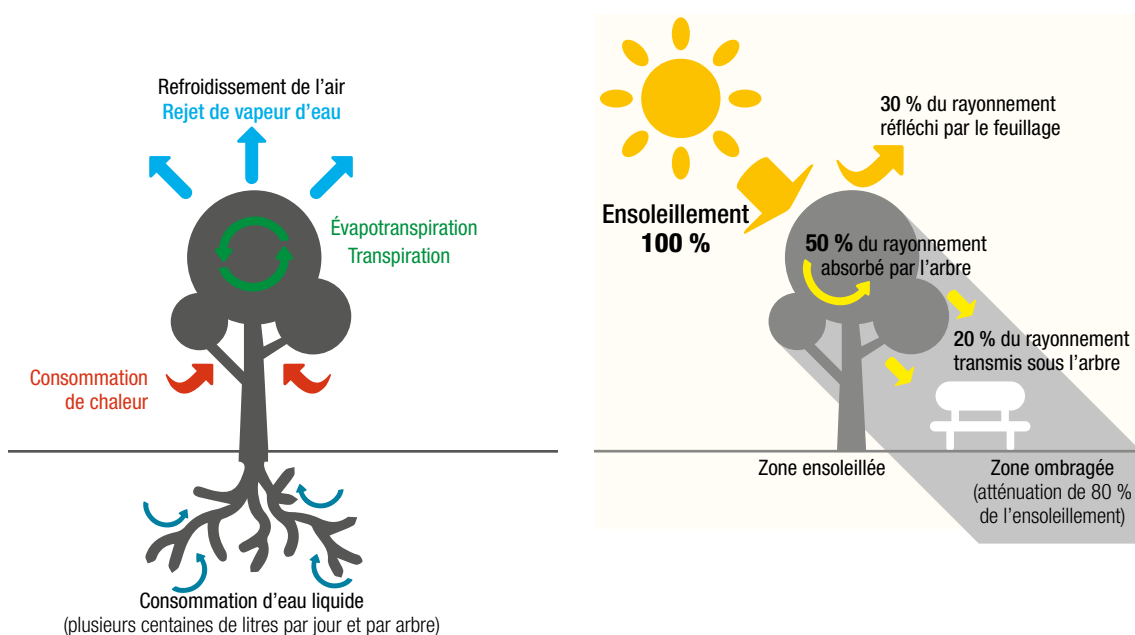


Figure 1. Évapotranspiration et ombrage apportés par les végétaux : les mécanismes du refroidissement

Source : Apur

surcroît, concentre des activités humaines qui sont source de chaleur.

Les espaces végétalisés, incluant les arbres, la végétation basse et les surfaces engazonnées, consomment, *a contrario*, une partie de l'énergie du rayonnement solaire absorbée *via* le mécanisme d'évapotranspiration par la végétation. Le rayonnement solaire incident, par ailleurs, est pour partie réfléchi par le feuillage des arbres (**Fig. 1**). L'accumulation de chaleur dans la journée par ces espaces est moindre par rapport aux environnements bâtis. On observe, en raison des mécanismes impliqués dans l'évolution des températures, un décalage temporel entre le maximum de rayonnement solaire (atteint, en été, vers 14 h) et le maximum de température de l'air (atteint, en été, plutôt vers 16-17 h). Ce décalage est accru dans les environnements bâtis : le maximum de température de l'air se produit, en été, en ville, vers 17-18 h, du fait de la capacité du bâti à accumuler la chaleur.

En termes de température ressentie en journée, les avantages des espaces végétalisés en ville sont liés principalement aux effets d'ombrage des arbres (environ deux tiers du rafraîchissement apporté par la végétation, **Fig. 1**), au moindre rayonnement thermique, réfléchi par le feuillage, au refroidissement par évapotranspiration des plantes (environ un tiers du rafraîchissement apporté par la végétation, et potentiellement à un meilleur effet de ventilation dans des espaces ouverts.

MÉCANISMES IMPACTANT L'ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE LA NUIT

Dans les environnements bâtis, en été, la température de l'air décroît lentement après le coucher du soleil (entre -0,5 et -1 °C par heure, **Fig. 3**). En effet, la chaleur accumulée dans le bâti en journée continue à être restituée à l'atmosphère. Du rayonnement thermique (infrarouge) est émis par les surfaces du bâti, contribuant en outre à la température ressentie par les personnes présentes dans ce milieu urbain. La forme des canyons urbains, de plus, réduit le rayonnement infrarouge qui peut s'échapper vers l'atmosphère. À cela vient également s'ajouter la chaleur dégagée par les activités humaines.

Dans les espaces végétalisés, l'accumulation de chaleur est moindre. Les surfaces se refroidissent ainsi plus rapidement, ce qui engendre aussi un refroidissement de l'air. Ce dernier débute deux heures avant le coucher du soleil et peut atteindre environ -2 °C par heure à partir du moment où il se couche, en conditions de vent faible. Les conditions de vent

faible permettent un refroidissement de l'air important dans les espaces végétalisés (mécanisme de refroidissement radiatif).

Conditions de vent et de turbulence nocturne très faibles

C'est dans les conditions de vent très faible (brassage de l'air horizontal et vertical très faible) que le refroidissement du milieu bâti est le plus lent. De plus, l'absence de vent limite fortement l'efficacité de ventilation des logements par ouverture des fenêtres.

Les contrastes de température entre le milieu bâti et les espaces verts urbains sont les plus marqués. Dans ces conditions, on observe au-dessus des espaces verts une bulle d'air frais de plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, qui varie en fonction de la dimension du parc (plus ce dernier est grand, plus la bulle est épaisse).

Du fait des très faibles brassages horizontaux et verticaux de l'air, l'air « frais » reste confiné au-dessus des espaces verts et ne bénéficie pas aux milieux bâtis environnants.

Dans ces conditions, l'air frais rural nocturne est transporté au-dessus de la ville, mais n'est pas mélangé avec l'air proche de la surface. Les habitants du milieu bâti ne peuvent pas se rafraîchir, ce qui génère des contrastes de températures de plusieurs degrés (voir encadré « Zoom sur des parcs parisiens »).

De telles conditions de très faible brassage de l'air sont souvent observées pendant les vagues de chaleur, lorsque les températures en journée sont particulièrement élevées et qu'il est absolument vital pour le corps humain de se reposer et de se rafraîchir pendant la nuit.

Dans ces conditions, les espaces végétalisés urbains deviennent des espaces refuges, où les habitants peuvent trouver un environnement sensiblement plus frais que le milieu bâti chargé de chaleur. L'accès à ces espaces à proximité des habitations, en soirée et en début de nuit, est donc particulièrement important, spécifiquement dans des conditions de faible brassage de l'air.

Conditions de vent et de turbulence nocturne modérées à fortes

Lorsque que le vent proche de la surface se maintient à une vitesse supérieure à 2 m/s (7 km/h), plusieurs mécanismes permettent à l'environnement bâti de se refroidir un peu plus rapidement.

Dans ces conditions, l'air au-dessus de la ville est caractérisé par des mouvements horizontaux et

ZOOM SUR DES PARCS PARISIENS

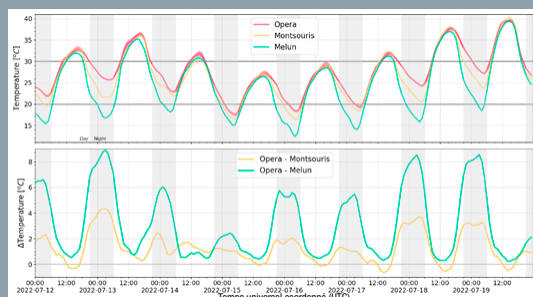


Figure 2 : Évolution temporelle de la température de l'air (en haut) sur trois sites (milieu bâti, parc urbain et zone rurale). Différence de température entre milieux bâti et rural, et entre milieu bâti et parc urbain (en bas)

Source : Martial Haefelin, IPSL

En période de canicule, on observe que les températures de l'air (sous abri) en milieu bâti (Opéra), dans un parc urbain (Montsouris) et en zone rurale (Melun) sont très proches en journée. La nuit (zones grisées sur la figure), on voit que la température de l'air dans le parc urbain peut être jusqu'à 4 °C inférieure à celle du milieu bâti dense. Ces mêmes nuits, la température en milieu rural est jusqu'à 9 °C plus fraîche que dans le milieu bâti. Ces nuits correspondent à des conditions de très faible brassage de l'air.

Le refroidissement nocturne des parcs et jardins excède celui en milieu bâti environnant dans des conditions de faible brassage de l'air (régime stagnant sur la figure). Cet excédent de refroidissement dépend de la taille des parcs mais aussi de leur aménagement. Le jardin des Champs-Élysées et le parc Montsouris (environ 15 ha chacun) fournissent des refroidissements additionnels, relatifs au milieu bâti à proximité, d'amplitude comparable. Le refroidissement observé dans le jardin du Luxembourg est plus marqué. D'une part ce jardin est plus grand (24 ha) mais, surtout, il bénéficie d'une irrigation plus régulière, qui favorise

le refroidissement. L'esplanade des Invalides apporte un refroidissement assez limité, malgré sa taille importante (7 ha), que l'on peut attribuer aux caractéristiques de l'aménagement (peu d'arbres, une végétation principalement sous forme de pelouses), peu propice au refroidissement. Le square du Temple-Elie Wiesel, de taille modeste (moins d'1 ha), apporte un refroidissement notable grâce à sa configuration combinant plusieurs strates végétales.



Figure 4. Contrastes de température de l'air sur un parcours autour du parc Montsouris (relatif à la température moyenne du parcours)

Source : Jean-François Ribaud, IPSL

En condition de faible brassage de l'air, les contrastes en termes de température de l'air à l'échelle d'un quartier entre des rues adjacentes peuvent atteindre 4-5 °C la nuit. La figure montre la différence de température, relative à la moyenne, le long d'un parcours de plus de 3 km autour du parc Montsouris. On note des températures jusqu'à 2,5 °C en-dessous de la moyenne sur la partie basse du parc Montsouris et, au contraire, jusqu'à 2,5 °C au-dessus de la moyenne dans des rues au nord-est du parc, situées derrière une longue rangée ininterrompue d'immeubles, véritable barrière empêchant la diffusion de l'air frais du parc.

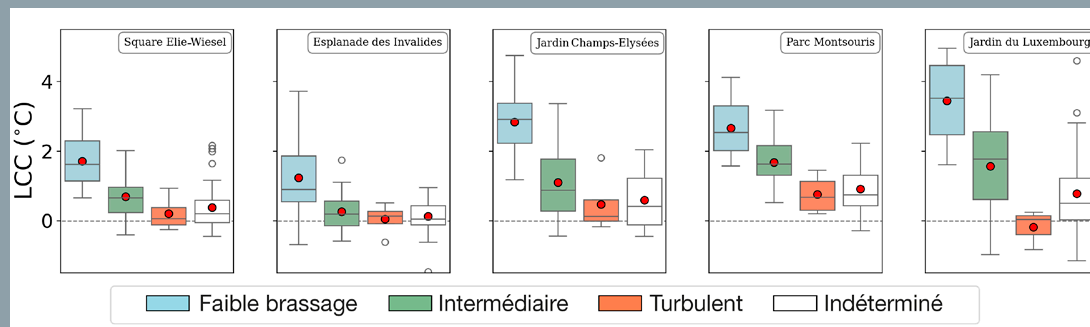


Figure 3. Excédents de refroidissement dans les parcs urbains relatifs au milieu bâti à proximité en fonction des régimes de brassage de l'air pour cinq espaces végétalisés de tailles différentes

Source : IPSL



verticaux qui permettent de le mélanger. Le refroidissement des espaces verts urbains peut alors bénéficier au milieu bâti environnant (effet à l'échelle des rues à proximité immédiate des espaces verts). De plus, l'air rural frais transporté au-dessus de la ville est mélangé verticalement, ce qui contribue à faire baisser légèrement la température du milieu bâti à l'échelle de toute la ville (d'environ -0,5 à -1 °C vers minuit).

Lorsque le vent proche de la surface dépasse 3 m/s le soir (11 km/h environ), les contrastes de température entre milieu bâti et espaces verts sont fortement réduits (inférieurs à 1 °C). Cela signifie que les effets de refroidissement de la végétation urbaine ne peuvent plus être distingués car le refroidissement nocturne rural est rapidement transporté dans la ville.

IMPORTANCE DE LA RESSOURCE EN EAU

La végétation, pour jouer un rôle rafraîchissant, *via* l'ombrage (végétation arborée) et l'évapotranspiration (végétation arborée et herbacée), doit être en bonne santé. Cet état dépend fortement de la disponibilité en eau dans le sol à différentes profondeurs selon le type de végétation. En cas d'insuffisance de l'eau dans le sol, la circulation de l'eau au sein de la végétation (la transpiration) sera ralentie, ce qui aura pour effet, d'une part, de réduire l'apport en nutriments nécessaires à sa bonne santé et, d'autre part, de réduire l'évaporation qui génère l'effet de refroidissement. Pour la végétation arborée, il est important de disposer d'un sol favorable à l'enracinement profond, qui permettra à la végétation d'exploiter l'eau sur de grandes profondeurs. Pour la végétation herbacée, par son faible enracinement, l'apport en eau doit être régulier *via* un arrosage complémentaire en cas d'absence de précipitations naturelles.

Martial Haeffelin et Misha Faber de l'IPSL ;
Aude Lemonsu du CNRM

MESSAGES CLÉS

- Les espaces végétalisés en milieu urbain (squares, parcs et bois) emmagasinent moins de chaleur que les environnements bâtis car ils ont une capacité calorifique moindre et sont capables de se refroidir par le phénomène d'évapotranspiration de la végétation.
- En journée, la température de l'air (mesurée sous abri) dans les environnements bâtis n'est pas très différente de celle mesurée dans un parc. Cependant, la température ressentie dans un parc peut être plus fraîche du fait des ombrages apportés par la végétation, un vent plus important (moins d'obstacles à l'écoulement) et un rayonnement thermique moindre.
- La nuit, l'efficacité de refroidissement des espaces végétalisés urbains dépend essentiellement de deux facteurs : les conditions de vent et de turbulence, ainsi que la taille et la composition des espaces végétalisés.
- Conditions de vent et de turbulence : quand le vent souffle la nuit, même modérément, les différences de température entre espaces végétalisés et environnements bâtis sont faibles car les environnements bâtis bénéficient du refroidissement des espaces végétalisés urbains (et de la campagne environnante). Mais lorsque le vent est très faible, le brassage de l'air est fortement réduit dans le milieu urbain. Dans ces conditions, les bâtiments se refroidissent mal et l'ouverture des fenêtres des logements n'induit pas la ventilation intérieure nécessaire au rafraîchissement des lieux de vie. Cependant, dans ces conditions de très faible brassage de l'air, les espaces végétalisés sont bien plus frais que l'environnement bâti alentour. Ils deviennent alors de véritables lieux de refuge face à la canicule.
- S'il est impossible d'agir directement sur le vent et ses régimes, il est néanmoins important de sensibiliser le grand public aux espaces refuges que sont les parcs lors d'épisodes de fortes chaleurs. Les municipalités peuvent également agir en étendant les horaires d'accès aux espaces végétalisés en soirée et début de nuit.
- Taille et composition des espaces végétalisés : le refroidissement apporté par les espaces végétalisés (bois, parcs, squares urbains et arbres d'alignement) dépend fortement de leur taille, et de leur composition et configuration (géométrie d'ombrage, essences végétales, combinaison de plusieurs strates végétales...). Il est important de noter que les squares de petite taille, composés de plusieurs strates végétales, combinant pelouses et végétation arborée, constituent des îlots de fraîcheur de proximité efficaces.
- Il est essentiel de prendre en compte ces éléments lors de la conception des projets d'urbanisme d'espaces végétalisés.

8 • TRAVAIL EN ATELIER

AUTOUR D'UNE PLATEFORME D'ANALYSE MULTICRITÈRE

CONTEXTE

Dès son origine, le projet de recherche H2C (*Heat and Health in Cities* ou « Chaleur et santé en ville ») a envisagé les modalités de transmission de ses résultats aux parties prenantes publiques et privées impliquées dans la prévention et la gestion des risques liés à la chaleur en ville. C'est l'objet du lot 5, dont L'Institut Paris Region est responsable, en association avec Santé publique France, le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), Airparif, le Pôle de recherche pour l'organisation et la diffusion

de l'information géographique (Prodig) et le Centre national de recherches météorologiques (CNRM). Ainsi, en début de projet, des parties prenantes franciliennes potentielles (collectivités territoriales, organismes publics, bureaux d'études...) dans les champs de l'aménagement, de l'urbanisme et de l'action sanitaire et sociale ont été identifiées puis interrogées à travers une enquête sur leurs besoins face aux enjeux de santé publique liés à la chaleur en ville. En fin de projet, deux ateliers de co-construction réunissant chercheurs et parties prenantes ont été

EXPRESSION DES DONNÉES À LA MAILLE

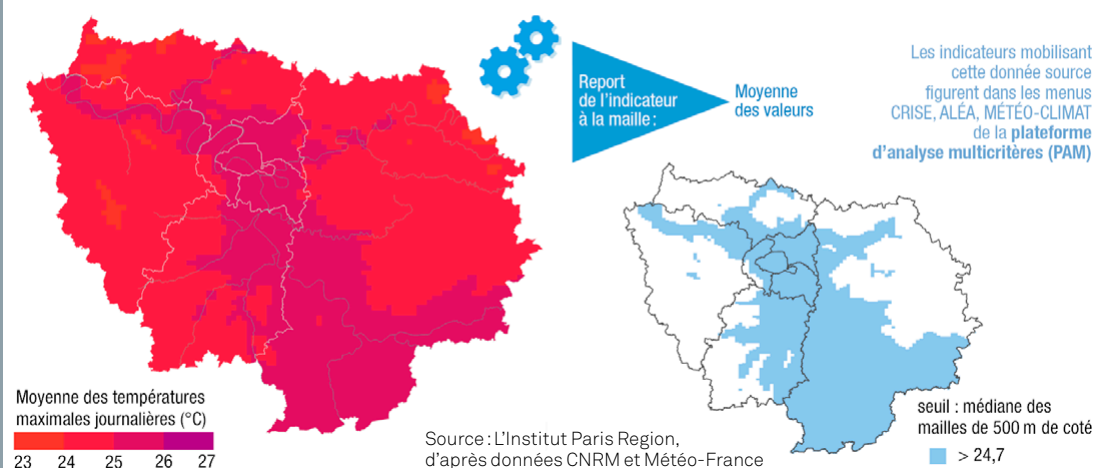
L'expression des indicateurs dans une grille de mailles carrées de 250 ou 500 mètres de côté facilite leur croisement. Elle s'obtient en appliquant différents types de calculs aux données géographiques sources, par exemple :

- pour l'indicateur « effectif total des écoles maternelles et élémentaires », on fait la somme des effectifs des écoles présentes dans la maille ;
- pour l'indicateur « moyenne des températures maximales journalières en juin 2019 », on fait la moyenne des valeurs présentes dans la maille ;

- pour l'indicateur « part de ménages sous le seuil de pauvreté », on prend la valeur de l'îlot regroupé pour l'information statistique (Iris) le plus représenté (en population) dans la maille.

L'extrait de « l'atlas des indicateurs H2C », ci-dessous, montre comment on a transformé la donnée source (à gauche) en indicateur à la maille (à droite), exprimé de façon binaire en retenant comme seuil la médiane.

Températures maximales journalières juin 2019 - année historique



TRAVAIL EN ATELIER AUTOUR D'UNE PLATEFORME D'ANALYSE MULTICRITÈRE

organisés afin d'imaginer et de tester ensemble les modalités futures de transmission des résultats.

Ces ateliers ont nécessité, en amont :

- de rassembler et d'organiser, dans des « notes d'appropriation », les principaux enseignements du projet de recherche ;
- de rassembler et d'organiser, dans une base de données unique, toutes les données géographiques produites dans le cadre du projet de recherche, ainsi que des données géographiques de contexte (population, occupation du sol...) déjà disponibles par ailleurs (toutes ces données sont exprimées sous forme d'indicateurs dans une même grille de mailles carrées de 500 mètres de côté pour l'ensemble de l'Île-de-France, et de 250 mètres de côté pour le territoire de la métropole du Grand Paris) ;
- de concevoir et de réaliser une plateforme d'analyse multicritère permettant de prendre connaissance de chacun de ces indicateurs en les visualisant par des cartes et des graphiques, mais surtout

permettant de les croiser entre eux afin de les problématiser dans une perspective de réponse aux enjeux de santé publique liés à la chaleur en ville.

LA PLATEFORME D'ANALYSE MULTICRITÈRE

Cette plateforme se présente sous la forme d'un écran principal découpé en deux parties :

- sur la gauche, un bandeau vertical permet de sélectionner par des menus déroulants le territoire d'étude (et le territoire de référence avec lequel on souhaite le comparer), le ou les indicateurs A, B et C que l'on souhaite représenter, ainsi que les modalités de représentation retenues (par exemple, mailles de 250 ou 500 mètres);
- sur la droite, s'affiche la carte résultant des choix effectués dans le bandeau de gauche, accompagnée d'une légende et d'un ensemble de diagrammes en secteurs synthétisant les quantités considérées pour le territoire d'étude ainsi que pour le territoire de référence.

Les indicateurs A, B et C peuvent être sélectionnés parmi un total de 84 indicateurs, organisés en 15 registres correspondant soit à un thème (climat, santé, occupation du sol...), soit à une composante de la vulnérabilité (aléa, sensibilité ou difficulté à faire face), un même indicateur pouvant appartenir à plusieurs registres différents.

Ils peuvent être visualisés de façon binaire (même si une visualisation par quartiles est également possible), en retenant un seuil au-dessus ou au-dessous duquel le rond représentant chaque maille prend une couleur donnée (jaune pour l'indicateur A, rose pour le B et bleu pour le C, gris étant la couleur par défaut). Aucun seuil réglementaire ou usuel n'étant pour l'instant associé à la plupart des indicateurs considérés, on peut retenir un seuil statistique proposé dans le menu déroulant (moyenne, médiane, percentile 75, 80, 90 ou 95 des mailles du territoire étudié) ou saisir arbitrairement une autre valeur de seuil.

On peut également décider que la taille du rond représentant chaque maille sera la même pour toutes les mailles, ou qu'elle sera proportionnelle à la surface urbanisée, à la population totale ou encore, par exemple, à la population des personnes isolées de plus de 80 ans dans chaque maille.

Quand on choisit de représenter non plus un mais deux ou trois indicateurs, il peut s'agir :

- d'indicateurs appartenant à un même thème, par exemple pour comparer les distributions spatiales respectives des personnes de 5 ans ou

PAM-H2C : Plateforme d'analyse multicritère des enseignements du projet H2C

Langue	français		
Territoire d'étude	EPT Plaine Commune		
Territoire de référence	Région Ile-de-France		
Type de carte	coloriage		

☒ **Indicateur A**

Registre 7. Faire face

Indicateur 4. Part d'espaces verts de plus d'un hectare ouverts au public

Cet indicateur rend compte de l'offre en espaces verts publics (surfactiques et linéaires).
Source : Institut Paris Region - BEV, 2020.

Coloriage	≤	Valeur saisie (5%)	0,05
Scorage	direct	poids 1	0 compté à part

☒ **Indicateur B**

Registre 5. Sensibilité (suite)

Indicateur 6. Effectif total des écoles maternelles et élémentaires, en 2022

Cet indicateur concerne un public sensible exposé à des canicules précoces (juin) susceptibles d'altérer sa capacité d'apprentissage.
Source : Institut Paris Region - BD, équipements, 2022.

Coloriage	≥	Valeur saisie (50)	50,00
Scorage	direct	poids 1	0 compté à part

☒ **Indicateur C**

Registre 2. Aléa

Indicateur 9. Moyenne des températures maximales journalières, juin 2019 (année historique)

Moyenne des températures maximales journalières estimées à la maille de 1,25 km de côté (modèle de Météo France) au mois de juin 2019. Cet indicateur rend compte des températures maximales (de JOUR) lors d'une année EXCEPTIONNELLE de canicules précoces (mois de juin), et de leurs contrastes territoriaux.

Coloriage	>	P75 terr. d'ét. 500m (25,7°)	
Scorage	inverse	poids 1	0 compté à part

Grille mixte Taille des ronds Population en 5 classes Correc. man. 100%

Toponymie noire

☐ Ne représenter que les ronds du territoire d'étude

☐ Ne représenter que les ronds des couleurs sélectionnées ci-dessous

Bandeau de gauche

Code de la carte Exemple d'utilisation de la plateforme d'analyse multicritères

Titre de carte VULNÉRABILITÉ DES ÉCOLIERS AUX CANICULES PRÉCOCES

Légende condensée

Bandeau de droite

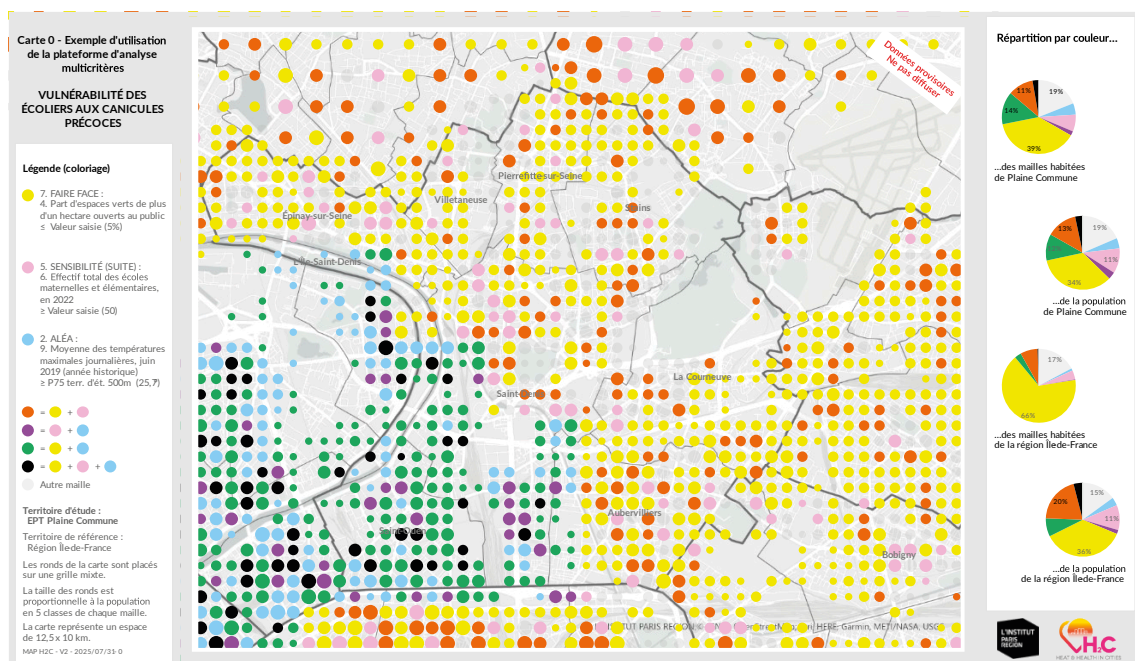
Variable de normalisation des diagramme de gauche Unique (maille habitée)

Variable de normalisation des diagramme de droite Population

Seuil pour les étiquettes des diagrammes 10%

Figure 1 : Le bandeau vertical de l'écran principal

Source : L'Institut Paris Region



moins et de celles de 65 ans ou plus, avant de retenir la « part de personnes de 5 ans ou moins ou de 65 ans ou plus » comme indicateur synthétique de sensibilité ;

- d'indicateurs appartenant à différentes composantes de la vulnérabilité (aléa, sensibilité et/ou difficulté à faire face), par exemple pour apprécier la vulnérabilité des écoliers aux canicules précoces (**Fig. 2**).

Les mailles prennent alors une couleur rendant compte des critères qu'elles vérifient, comme l'explique la légende de la carte (orange = jaune + rose, noir = jaune + rose + jaune, etc.). On peut alors choisir de ne pas représenter certaines couleurs, et donc certaines mailles, pour se concentrer visuellement sur certaines configurations spatiales.

LE TRAVAIL EN ATELIER

La matinée du premier atelier a commencé par un temps d'acculturation des parties prenantes aux enseignements du projet de recherche, au cours duquel les chercheurs ont partagé le contenu des notes d'appropriation, suivi d'un temps d'initiation à l'usage de la plateforme. Ainsi, l'après-midi, cinq groupes réunissant chercheurs, parties prenantes et facilitateurs de L'Institut Paris Region ont pu se prêter à une série d'exercices consacrés à l'identification des enjeux (aléa, sensibilité, difficulté à faire face...) sur un territoire particulier (région, métropole, département ou intercommunalité).

Figure 2 : Exemple d'utilisation de la plateforme d'analyse multicritère : identifier les secteurs de vulnérabilité des écoliers aux canicules précoces sur le territoire de Plaine Commune (93)

Source : L'Institut Paris Region

LES ENRICHISSEMENTS MUTUELS ENTRE LES PROJETS H2C ET I4C

Impetus4Change (I4C) est un projet européen associant quatre régions métropolitaines (Barcelone, Bergen, Paris-Île-de-France et Prague) et visant, dans le cadre de la mission de l'Union européenne sur l'adaptation au changement climatique à l'horizon 2030, à améliorer la qualité, l'accessibilité et la facilité d'utilisation des informations et des « services climatiques » à court terme, à l'échelle locale et régionale.

Il s'appuie en grande partie sur des « adaptalabs », événements immersifs organisés à Paris en 2023 et à Barcelone en 2025 pour accélérer l'innovation en matière de services climatiques, dont les enseignements rejoignent ceux des ateliers H2C : besoin de mutualiser les efforts de conception, de développement et de maintenance des services climatiques qui prolifèrent, besoin d'accompagner les parties prenantes par des « médiateurs » dans leur utilisation des services climatiques...

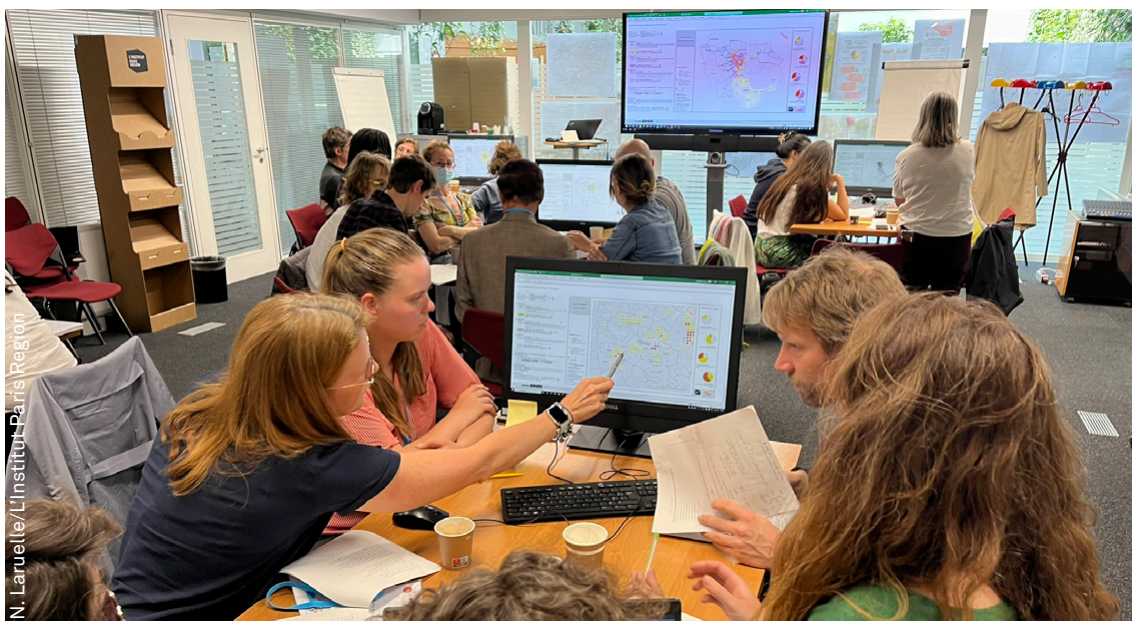


Figure 3 : Le travail en atelier autour de la plateforme

Ils ont utilisé collectivement la plateforme pour sélectionner et croiser les indicateurs qui leur semblaient pertinents, faire varier les seuils, la grille, la taille des ronds..., et finalement répondre à chaque exercice par au moins une carte, accompagnée de l'idée qui l'a inspirée et de l'enseignement que l'on peut en tirer, croisant par exemple exposition forte aux nuits tropicales et surreprésentation de la population de 65 ans ou plus, ou encore aléa îlot de chaleur urbain nocturne et passoires thermiques.

Un mois plus tard, un second atelier a réuni les mêmes personnes pour une série d'exercices consacrés cette fois aux pistes d'action (prévention-aménagement, gestion de crise...), autour d'une version de la plateforme dont les fonctionnalités et la documentation avaient été améliorées par le retour d'expérience du premier atelier.

ET MAINTENANT ?

L'expérience autour de la plateforme d'analyse multicritère a été particulièrement appréciée des parties prenantes (comme des chercheurs), qui ont pu collectivement prendre connaissance des résultats de la recherche, s'approprier certaines notions complexes (telles que l'approche « à la maille » ou les composantes de la vulnérabilité), sélectionner un jeu d'indicateurs adapté, et jouer sur ces indicateurs et les seuils retenus pour hiérarchiser les enjeux et prioriser les actions.

Ils ont ainsi montré le foisonnement des enjeux de santé publique liés à la chaleur en ville (il n'y a pas

MESSAGES CLÉS

- La transmission des résultats de la recherche a fait l'objet d'une démarche de co-construction en deux ateliers destinés à imaginer un service climatique répondant aux besoins des parties prenantes.
- Cette démarche a nécessité, notamment, la création d'un outil cartographique dédié : la plateforme d'analyse multicritère (PAM), à la fois réceptacle et transmetteur des résultats de la recherche.
- La PAM a facilité le dialogue entre les parties prenantes et avec les chercheurs, par-delà les frontières des métiers et des disciplines, pour mieux identifier les enjeux et prioriser les actions.
- La PAM constitue, en l'état, un outil d'aide à la décision, dont l'expérience d'utilisation en atelier peut nourrir le cahier des charges d'un futur service climatique.

une, mais des vulnérabilités), comme des actions envisageables, qui varient selon le territoire étudié, mais aussi selon le champ d'intervention des parties prenantes : registres d'action (prévention-aménagement, gestion de crise...), populations cibles (personnes précaires ou sans-abri, employés, sportifs, touristes...) ou espaces d'intervention (espaces publics, logements, équipements, réseaux...).

Nicolas Laruelle, Cécile Mauclair, Erwan Cordeau, Sandra Garrigou et Sabine Host de L'Institut Paris Region



En partenariat avec:



Financé par:



ISBN 978-2-7371-2406-8

L'INSTITUT PARIS REGION
ASSOCIATION LOI 1901.

CAMPUS PLEYAD - PLEYAD 4
66-68 RUE PLEYEL
93200 SAINT-DENIS



www.institutparisregion.fr