

Projet ÉPICEA : Étude Pluridisciplinaire des Impacts du Changement climatique à l'Échelle de l'Agglomération parisienne.

Overview of Multidisciplinary study of the Impacts of the Climate change at Paris agglomeration scale

I. ROUSSEL

Les villes, en concentrant la moitié de la population mondiale, jouent un rôle essentiel dans la maîtrise des émissions de GES, ce qui justifie les nombreux travaux effectués pour imaginer la ville durable ou la ville postcarbone. Néanmoins la ville, avec une forte concentration d'habitants souvent vulnérables, doit également pouvoir s'adapter aux évolutions du climat. Le projet ÉPICEA⁽¹⁾, Étude Pluridisciplinaire des Impacts du Changement Climatique à l'Échelle de l'Agglomération parisienne, a cherché à évaluer l'évolution du climat de Paris dans la perspective du changement climatique et les actions à mettre en œuvre pour en limiter les conséquences fâcheuses. Les résultats obtenus devraient permettre, grâce à l'acquisition de relations quantitatives entre l'aménagement urbain et son climat associé, de sélectionner et de mettre en œuvre des dispositifs pertinents. Compte tenu de l'inertie des structures urbaines construites pour des décennies voire des siècles, il est difficile d'effectuer des changements radicaux ; en revanche, guidé par les résultats obtenus, il est possible de « jouer » à la fois sur la forme des villes, sur les modes de transport et sur les systèmes énergétiques. La floraison des éco-quartiers montre qu'à une échelle limitée, des expérimentations plus radicales sont possibles, surtout quand elles sont le fruit d'une adhésion volontaire des habitants.

Le plan climat urbain, par les réflexions pluridisciplinaires qu'il induit, invite les habitants à imaginer la ville du futur. Paris, dans son plan climat, a adopté, dans une première phase, une démarche théorique en croisant les scénarios d'évolution du climat avec les caractéristiques fines de l'urbanisme parisien. À l'échelle de l'agglomération, l'ICU module l'évolution du climat en opposant la ville à la campagne. L'hypothèse retenue est celle de la vulnérabilité urbaine devant les canicules appelées à être plus fréquentes. Or, pour tester la pertinence des moyens de lutte contre l'amplification dommageable que l'ICU confère au réchauffement climatique, l'analyse de la canicule de 2003 présente une référence intéressante pour simuler l'efficacité des leviers d'actions

possibles pour réduire l'ICU et ses manifestations délétères.

Le projet ÉPICEA, concrétisant cette première approche théorique du plan climat de la ville de Paris, a été mené conjointement par Météo-France, le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) et la Ville de Paris dans le cadre du programme de recherche « Paris 2030 ». Pour répondre à ces différentes problématiques, les travaux de ce projet sont répartis en trois volets : (1) évolution du climat urbain parisien dans la perspective du changement climatique ; (2) étude particulière d'une situation extrême : la canicule de 2003, à l'échelle de l'agglomération parisienne ; (3) lien entre l'urbanisme et le climat urbain : stratégies d'adaptation du territoire parisien pour diminuer l'intensité de l'ICU et limiter les fortes températures. Ces trois volets sont présentés ainsi que les résultats obtenus sur le site indiqué.

Le volet 1 du projet ÉPICEA analyse l'effet du changement climatique sur la région parisienne en s'appuyant sur un modèle d'impact, le modèle de ville *TEB (Town Energy Budget, TEB, Masson, 2000)*, développé au Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM-GAME) de Météo-France/CNRS. Il permet de simuler le climat urbain à l'échelle de la ville et des quartiers. Ce modèle de canopée urbaine représente la ville de manière théorique sous la forme d'un canyon urbain dans lequel est modélisée l'évolution temporelle de la température de la rue, des murs et des toits. Il simule finement le fonctionnement du système.

Il permet d'évaluer le comportement thermique de la ville en fonction des hypothèses retenues quant à l'évolution prévue du climat. Pour évaluer l'impact de l'urbanisation sur les tendances de température, les valeurs journalières minimales (T2mMIN) et maximales (T2mMAX) des températures de l'air à 2 m sont moyennées spatialement selon trois classes correspondant à différents degrés d'urbanisation : classe urbaine URB (surfaces minéralisées), classe périurbaine SUB (zones résidentielles qui incluent surfaces minéralisées et couverts naturels) et classe rurale RUR (couverts naturels).

(1) <http://www.cnrm-game.fr/projet/epicea>

Évolution de la température sur la région parisienne

L'augmentation des températures maximales (3 à 4 °C selon le scénario) est sensiblement plus forte que pour les minimales (2 à 3 °C selon le scénario) et plus importante dans les zones rurales que dans les zones périurbaines et urbaines.

Une augmentation systématique de la température de l'air en hiver est simulée, plus importante pour les maximales que les minimales, conformément à la tendance générale présentée par Déqué (2007) qui constate que le nombre de jours de froid en France devient négligeable à la fin de ce siècle.

L'augmentation de la température de l'air est plus importante pendant l'été que pendant l'hiver. En moyenne, les températures minimales et maximales en été augmentent de 3 à 5 °C dans les zones rurales. La tendance est moins marquée dans les zones urbanisées (hausse de 3 à 4,5 °C).

Les indices climatiques de température pour les situations estivales peuvent être les jours chauds ($T_{2mMAX} \geq 25 \text{ °C}$) ou très chauds ($T_{2mMAX} \geq 30 \text{ °C}$) ou les jours avec mise en alerte orange pour la canicule (basée sur le franchissement simultané d'indices biométéorologiques calculés sur 3 jours consécutifs, durée minimale d'une vague de chaleur). Les journées chaudes seront plus fréquentes dans le futur compte tenu de l'augmentation des températures estivales. Les cas de jours très chauds deviendront relativement habituels en climat futur alors qu'ils sont plutôt rares en climat présent (figure 1).

Il est intéressant de souligner que **les indices d'été augmentent de façon beaucoup plus importante dans les zones rurales que dans les zones urbanisées** en raison de l'assèchement des sols naturels. Ils atteignent des valeurs maximales dans les zones périurbaines. Dans ces quartiers composés de surfaces minéralisées et de couverts naturels, le réchauffement semble accentué par un effet cumulé de l'urbanisation et de l'assèchement des sols. Cette évolution explique l'atténuation de l'ICU diurne (figure 2).

Enfin, le nombre de jours de mise en alerte orange pour la canicule est en très nette augmentation (figure 1) : il passe de 1 jour d'alerte par an en climat présent à 12 à 20 jours dans les zones urbaines, 9 à 16 jours dans les zones périurbaines et 5 à 11 jours dans les zones rurales en climat futur, selon le scénario. Les avertissements de vague de chaleur sont plus nombreux dans les zones urbaines que dans les zones périurbaines et rurales, ce qui montre que le seuil en vigueur sur les températures minimales est le critère prépondérant dans leur déclenchement.

En moyenne en climat présent, l'ICU atteint 2,5 °C pendant la nuit contre 1,2 °C seulement en journée. Les projections climatiques indiquent une légère diminution d'environ 0,25 °C des intensités des ICU diurnes dans le futur, alors que les ICU nocturnes n'évoluent pas en moyenne annuelle.

Les ICU durant l'hiver, de l'ordre de quelques degrés Celsius et toujours positifs, n'évoluent que peu en climat futur. Leur structure est concentrique, les maxima étant observés dans Paris *intra-muros*. En été, on note une diminution substantielle des forts ICU, avec l'apparition d'ICU négatifs en journée et une évolution de la forme de l'ICU (les plus fortes anomalies de température sont localisées sur une grande partie de la banlieue et non plus dans Paris *intra-muros*). Ces résultats sont directement liés aux fortes températures simulées dans les zones rurales en corrélation avec l'assèchement des sols naturels.

Dans cette première partie, la structure urbaine de Paris est censée rester identique entre les périodes de référence 1971-2006 et future 2072-2098, dans le but de quantifier le changement. Les simulations effectuées concluent sur une hausse des températures parisiennes de 2 à 4 °C, suivant le taux d'urbanisation et la température enregistrée à la fin du *xxie* siècle. Cette évolution envisagée a pour conséquence une très forte augmentation du nombre de canicules, de 10 à 25 par an à Paris au lieu d'une seule par an en moyenne aujourd'hui.

Le volet 2 du projet ÉPICEA analyse finement l'épisode caniculaire d'août 2003 en se concentrant

sur la période du 8 au 13 août pendant laquelle les températures les plus chaudes ont été relevées et où a été observé un pic de surmortalité sur le territoire français, et plus particulièrement à Paris.

Les données climatiques issues du modèle TEB ont été croisées avec une base de données du couvert urbain parisien à la résolution de 250 m grâce à un travail de l'Atelier Parisien d'Urbanisme (APUR). Sur un domaine centré sur Paris, on dispose pour chaque maille de la surface de végétation et de la surface d'eau, de la surface et du type de toit, de l'altitude et de la hauteur moyenne des bâtiments, de la surface de mur et de la classe d'âge du bâtiment. La surface de sol nu et la surface de bitume sont calculées à partir des données issues de l'analyse de photos aériennes ou obtenues par traitement de données urbanistiques de la ville au moyen d'un système d'information géographique (SIG) qui permet d'établir une cartographie précise de l'agglomération parisienne et de calculer les bilans énergétiques nécessaires à la simulation. Le CSTB a en outre analysé les caractéristiques thermiques des parois opaques (toitures et murs) des bâtiments composant le patrimoine bâti parisien. Ces bilans intègrent ainsi les échanges radiatifs diurnes et nocturnes à la surface des parois opaques ainsi que leur inertie thermique. Les rejets de chaleur répartis dans le domaine sont également pris en compte.

L'étude de la demande énergétique, abordée à travers l'analyse des degrés-jours de chauffage et de refroidissement, indique, selon des estimations qui

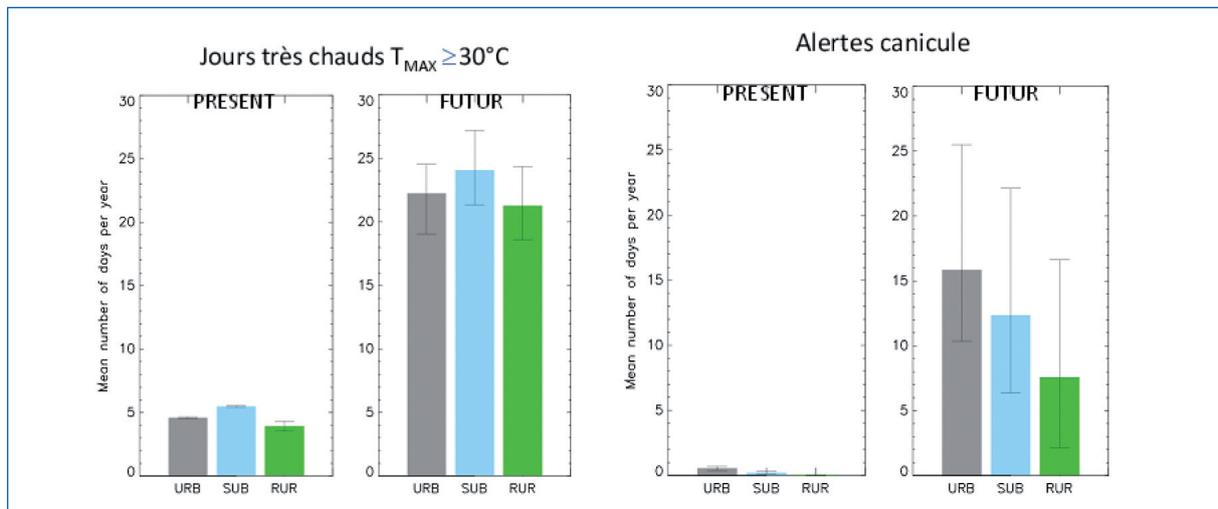


Figure 1.

Nombres de jours chauds, en moyenne annuelle, par classes de couvert (urbain : gris, périurbain : bleu et rural : vert) en climats présent et futur (gauche) et nombres de jours de mise en alerte orange pour la canicule, en moyenne annuelle, par classes de couvert en climats présent et futur (droite). L'incertitude liée à la méthode de descente d'échelle et au scénario est indiquée par la barre d'erreur.

Numbers of hot days, on average annual, by classes of clouds (urban: grey, peri-urban: blue and rural: green) in present and future climates (left) and numbers of days of orange alert for the heat wave, on average annual, by classes of cloudy sky in present and future climates (right). The uncertainty connected to the method of downscaling and to the scenario is indicated by the error bar.

restent à affiner, une diminution de 30 % des besoins en chauffage durant l'hiver et, inversement, une augmentation très conséquente des besoins en climatisation pour maintenir le confort thermique en été.

Une analyse fine de la canicule du mois d'août 2003 a été effectuée à l'aide des outils Méso-NH et TEB, au cours de la période du 8 au 13 août 2003 à Paris, durant laquelle il a été observé la surmortalité la plus élevée. L'ICU apparaît en fin de nuit entre le centre de Paris (arrondissements les plus chauds : 2^e, 3^e, 8^e, 9^e, 10^e et 11^e) et les zones rurales alentour présentant une différence de température de l'ordre de 4 à 7 °C (températures à 2 m). Une analyse temporelle de l'ICU a montré sa variabilité quotidienne. Le phénomène qui le pilote est le refroidissement, qui se fait plus rapidement et de manière plus importante sur les zones végétalisées. Des micro-ICU d'amplitude 2 à 4 °C se forment également au sein même de Paris *intra-muros*. Par ailleurs, selon la force du vent, un panache urbain peut se former sous le vent en aval de la zone la plus chaude. Cette simulation, dite de référence, identifie ainsi les zones urbaines de Paris les plus vulnérables aux processus climatiques, à savoir les arrondissements fortement urbanisés du centre de Paris, les arrondissements périphériques, ainsi que les zones situées dans le panache urbain.

L'effet additionnel de l'ICU accentue le stress thermique déjà ressenti par les habitants lors d'épisodes de vagues de chaleur, ce qui peut être particulièrement néfaste la nuit lorsque l'organisme est en période de récupération. Ce sont ces conditions météorologiques qui expliquent, en août 2003, l'excès de décès qui a particulièrement affecté les personnes âgées en France.

Le troisième volet de l'étude ÉPICEA avait pour objectif de tester, pour Paris *intra-muros*, au moyen d'une simulation à très fine échelle (résolution : 250 m) s'appuyant sur la base de données du couvert urbain et des caractéristiques du bâti parisien, quels sont les leviers pertinents susceptibles d'atténuer efficacement l'îlot de chaleur. En effet, la tendance au vieillissement des populations renforce la vulnérabilité des villes face au risque caniculaire qui, lui-même, tend à s'intensifier. La vulnérabilité de la capitale se différencie selon les caractéristiques urbaines des différents quartiers.

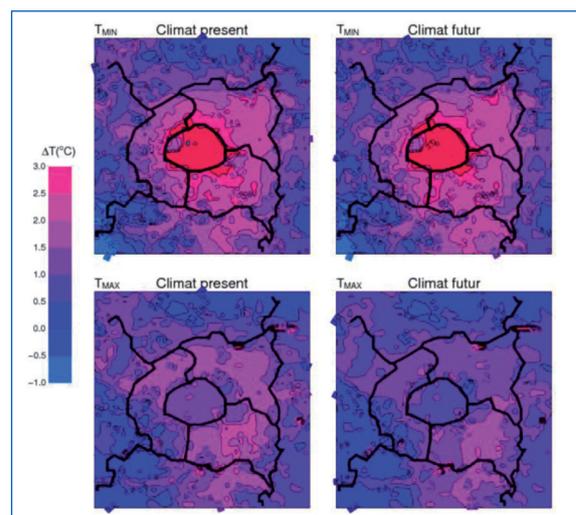


Figure 2.

Mise en évidence de l'ICU sur les minima et maxima journaliers de température de l'air à 2 m simulés par le modèle en climats actuel et futur en été.

The ICU on minima and daily maxima air temperature in 2 m issued from the model in current and future climates in summer.

L'étude de Colombert (2008) a permis d'identifier les paramètres (propriétés radiatives des surfaces, zones vertes, *i.e.* végétales, ou bleues, *i.e.* aquatiques), appelés « leviers urbains ». Différents tests de sensibilité ont été menés en modifiant ces paramètres pour Paris *intra-muros* afin de quantifier leur impact sur le climat urbain, dans le contexte de la canicule d'août 2003.

Quatre scénarios sont envisagés pour ces tests de sensibilité : (1) un scénario réfléchissant où les propriétés physiques des surfaces des parois opaques sont modifiées, (2) un scénario de verdissement où les surfaces végétalisées sont augmentées mais non arrosées, (2 bis) un scénario de verdissement où les surfaces végétalisées sont augmentées et arrosées, (3) un scénario d'humidification des chaussées, et (4) un scénario qui combine les précédents.

- Le scénario S1 a un impact jour et nuit puisqu'on joue sur le rayonnement, à la fois dans le domaine visible et dans le domaine infrarouge ; l'impact est sensible le long de la verticale car les modifications se font au niveau des murs et des toits donc sur toute la hauteur de la canopée urbaine ;
- Le scénario S2 n'a pas ou très peu d'impact visible car la végétation non arrosée est en situation de stress hydrique et ne joue pas son rôle de régulateur thermique ;
- Le scénario S2 bis a un impact principalement le jour avec l'activité de la végétation arrosée, mais qui diminue avec l'altitude (puisque la végétation est principalement basse ou de moyenne hauteur) ;
- Le scénario S3 a un impact principalement le jour puisque l'arrosage des chaussées ne se fait qu'en journée ; l'impact est très limité sur la verticale ;
- Le scénario complet Stot a un impact maximal et sur toute la hauteur de la canopée urbaine, avec le cumul des impacts sur tous les paramètres.

La variation des propriétés radiatives des parois opaques du bâti parisien (murs et toitures) dans le sens d'un Paris plus « réfléchissant » a un impact relativement important sur les températures dans Paris *intra-muros* (diminution de l'intensité de l'ICU de 1 °C et diminution maximale instantanée des températures à 2 m de 2 à 3 °C), mais également dans le panache urbain. L'effet de ces modifications se fait sentir à la fois en surface et en altitude, avec un effet maximal aux alentours de 10 à 15 m d'altitude, là où les répercussions liées aux modifications des propriétés radiatives des murs et des toits se font sentir simultanément et donc s'additionnent.

Le verdissement de la ville retenu dans cette étude (végétalisation des espaces de sol nu « disponibles » et de la moitié de la surface des rues dont la largeur est supérieure à 15 m) n'a un impact que si la végétation est maintenue dans un état lui permettant ses activités d'évapotranspiration. Ainsi, si la végétation est en situation de stress hydrique, elle se comporte quasiment comme du sol nu, n'occasionnant pas de transfert d'énergie par le biais du flux de chaleur latente. En imposant un arrosage suffisant

dans les simulations numériques, on obtient un impact très important (diminution de l'intensité de l'ICU de 1 à 3 °C et diminution maximale instantanée des températures à 2 m de 3 à 5 °C) notamment en journée (évapotranspiration de la végétation), et d'autant plus important que le taux de végétation est élevé. L'humidification de la ville par aspersion d'eau dans les rues conduit à une diminution de l'intensité de l'ICU inférieure à 0,5 °C et à une diminution maximale instantanée des températures à 2 m de l'ordre de 1 à 2 °C et cet effet ne se fait sentir qu'en basses couches. Les conséquences de l'humidification, de la végétalisation et de la présence des plans d'eau sont détaillées dans l'article de C. Greuillet dans ce numéro.

En additionnant toutes ces modifications, les effets sur le climat urbain se cumulent, avec une intensité de l'ICU diminuée de 1 à 2 °C et une baisse maximale instantanée des températures à 2 m de 5 à 6 °C. Les effets se font sentir sur toute la hauteur de la canopée urbaine.

Conclusion

L'emploi d'une méthodologie novatrice qui intègre le modèle de canopée urbaine TEB a permis d'axer plus spécifiquement notre analyse de l'impact du changement climatique global à l'échelle de Paris et de sa région sur le microclimat, tel qu'il est vécu par les habitants au niveau des rues. En affinant ainsi les projections climatiques au niveau d'un territoire et sur une problématique précise, des tendances en matière d'exposition et d'extrêmes climatiques sont identifiées et peuvent ainsi éclairer les stratégies, les politiques et les mesures de gestion des risques. L'intérêt que présente cette étude ne doit pas faire oublier qu'elle ne traite qu'un aspect de la vulnérabilité urbaine face au changement climatique, celui lié au risque caniculaire et à l'augmentation de la fréquence des événements extrêmes. La ville présente d'autres vulnérabilités comme celle liée à la pollution atmosphérique et au risque sanitaire qu'elle induit. L'article de C. Greuillet, dans ce numéro, insiste sur le rôle joué par l'ICU sur la variation des niveaux de polluants. La ville du futur, pauvre en carbone, sera aussi plus saine, ce qui souligne l'importance des politiques urbaines intégrées au-delà des frontières quelque peu artificielles entre adaptation et atténuation. Les politiques d'adaptation en ville sont contraintes de prendre des décisions sur des infrastructures pérennes dans un monde en constante évolution et dans un contexte scientifique d'incertitudes sur le climat futur. Le plan climat urbain, à l'image de celui de Paris, est emblématique des difficultés que soulève le changement climatique qui impose aux villes des adaptations considérables en termes de flux et de réseaux matériels et immatériels. Mais ces considérations ne doivent pas faire oublier que la ville, bien avant d'être constituée par des infrastructures, est le lieu des réseaux sociaux qui contribuent à son fonctionnement au-delà de toutes les simulations théoriques.

Références

- Colombert M. *Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville*. Thèse de doctorat de l'université Paris-Est, 2008, 539 p.
- Déqué M, Drevet C, Braun A, Cariolle D. The ARPEGE-IFS atmosphere model: a contribution to the French community climate modelling, *Climate Dynamics* 1994; 10 : 249-66.
- Déqué M. Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values, *Global and Planetary Change* 2007; 57(1-2): 16-26.
- Greuillet C, Galsomiès L. Adaptation au changement climatique et maîtrise de la qualité de l'air, numéro spécial « Climat » de la revue « Pollution atmosphérique », juin 2013.
- Masson V. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models, *Bound.-Layer Meteorol.* 2000; 94: 357-97.

