

PROGRAMME DE RECHERCHE « PARIS 2030 »
APPEL A PROJETS 2007 DE LA VILLE DE PARIS



Projet **EPICEA**
2008-2012

Etude Pluridisciplinaire des Impacts du Changement climatique à
l'Echelle de l'Agglomération parisienne



Synthèse des résultats du projet
Octobre 2012

Rapports complets disponibles sur le site web du projet :
<http://www.cnrm.meteo.fr/spip.php?article271>

Acteurs du projet :



Partenaires :



La majeure partie de la population mondiale vit aujourd'hui en ville. Les zones urbaines représentent une part économique fondamentale de nos sociétés en regroupant la grande majorité du capital (logements, distribution d'eau, infrastructures de transport, *etc.*), ce qui accroît les préoccupations sociétales, économiques et environnementales.

Les projections climatiques issues du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) indiquent d'ici la fin du siècle à la fois un réchauffement climatique global et une probable augmentation de la fréquence et de l'intensité d'événements extrêmes. Ces événements viendront s'ajouter au microclimat spécifique des villes : l'urbanisation affecte en effet de nombreux paramètres et phénomènes météorologiques. La caractéristique majeure du climat urbain est l'îlot de chaleur urbain (ICU). Il désigne le fait que l'on observe régulièrement des températures de l'air plus élevées dans les zones urbaines par rapport aux zones rurales qui les entourent. Il est plus marqué la nuit que le jour. Ce processus pourrait s'ajouter à une augmentation de l'intensité et de la durée des vagues de chaleur : ainsi, en 2003, pendant l'épisode de canicule qui a touché l'Europe, la différence de température entre le centre de Paris et les zones rurales environnantes a atteint 8 °C. Les conséquences de l'amplification des événements extrêmes et de leur impact sur les villes peuvent être nombreuses et variées en termes de gestion des infrastructures, ressources en eau, pollution, confort bioclimatique et santé publique, demande énergétique, *etc.* Les villes se retrouvent donc au cœur des problématiques liées au changement climatique, et, pour pouvoir les préparer à ce changement, il est nécessaire de s'interroger sur leur vulnérabilité et leur adaptation :

- Quels seront les effets locaux, pour une ville particulière, du changement climatique global ?
- Quel sera le microclimat dans une ville, éventuellement en expansion ?
- Quelle sera l'énergie nécessaire pour assurer le confort thermique des habitants ?
- Comment adapter la structure urbaine au changement climatique ?

Etant donné la durée nécessaire à l'évolution structurelle d'une ville, c'est dès à présent qu'il faut penser la ville de demain. Cette réflexion ne peut se faire que par une approche pluridisciplinaire associant urbanistes, architectes, climatologues, hydrologues, ingénieurs du bâtiment, économistes, sociologues, *etc.*, compte tenu des interactions complexes entre le changement climatique, l'évolution des villes et le mode de vie des habitants.

Le projet EPICEA (Etude Pluridisciplinaire des Impacts du Changement climatique à l'Echelle de l'Agglomération parisienne) a été mené conjointement par Météo-France, le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) et la Ville de Paris pour apporter un éclairage scientifique sur des possibilités d'adaptation du territoire face au changement climatique. En réponse à l'appel à projets 2007 de la Ville de Paris, ce projet entre dans le cadre du Programme de Recherche « Paris 2030 », dont les résultats devraient apporter une contribution scientifique au processus de décision des élus et des directions de la Ville sur des questions à long terme. Au sein de ce programme, il s'intègre dans la thématique de recherche Environnement/Cadre de vie, en grande partie dévolue aux questions d'aménagement urbain, de météorologie urbaine et des conséquences du changement climatique.

Pour répondre à ces différentes problématiques, les travaux du projet EPICEA 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 limiter les fortes températures.

Volet 1 : Impact du changement climatique sur l'agglomération parisienne

La première partie du projet s'intéresse à l'évolution du climat urbain de l'agglomération parisienne dans la perspective d'évaluer l'impact du changement climatique sur la température de l'air à Paris et aux alentours.

Par l'intermédiaire d'un système de modélisation spécifique qui prend en compte les villes et de techniques particulières dites de descente d'échelle, les projections climatiques globales de Météo-France sont recalculées à l'échelle de l'agglomération parisienne, suivant différents scénarios d'émission de gaz à effet de serre (A2 plus pessimiste et A1B plus modéré) définis au plan international par le GIEC.

Les résultats mettent en évidence une hausse significative de la température de l'air (entre 2 et 4 °C, cf. Tab. 1) qui varie selon le taux d'urbanisation (centre ville, banlieue, campagne), et une tendance significative vers des hivers plus doux et des étés beaucoup plus chauds à la fin du 21^{ème} siècle.

		Urbain		Périurbain		Rural	
		T _{MIN}	T _{MAX}	T _{MIN}	T _{MAX}	T _{MIN}	T _{MAX}
Présent (1971-2006)		9,4	15,8	8,0	15,5	6,9	14,6
Futur (2072-2098)	A1B	11,8	18,7	10,3	18,6	9,2	17,8
	A2	12,4	19,4	11,0	19,3	9,9	18,5
Hausse de température Futur - Présent	A1B	+2,4	+2,9	+2,3	+3,1	+2,3	+3,2
	A2	+3,0	+3,6	+3,0	+3,8	+3,0	+3,9

Tab. 1 : Moyennes annuelles des minima et maxima journaliers de température de l'air à 2 m en °C calculées en climats actuel et futur suivant les scénarios A1B et A2 en milieu urbain (centre ville), milieu périurbain (banlieue) et milieu rural (campagne).

Les indices de froid sont en forte régression et le nombre de jours de froid deviendrait négligeable à la fin du siècle, tandis que les indices de chaleur sont en forte expansion et des phénomènes tels que les journées très chaudes et les canicules, rares en climat présent, feraient partie du climat courant à la fin du siècle (cf. Fig. 1).

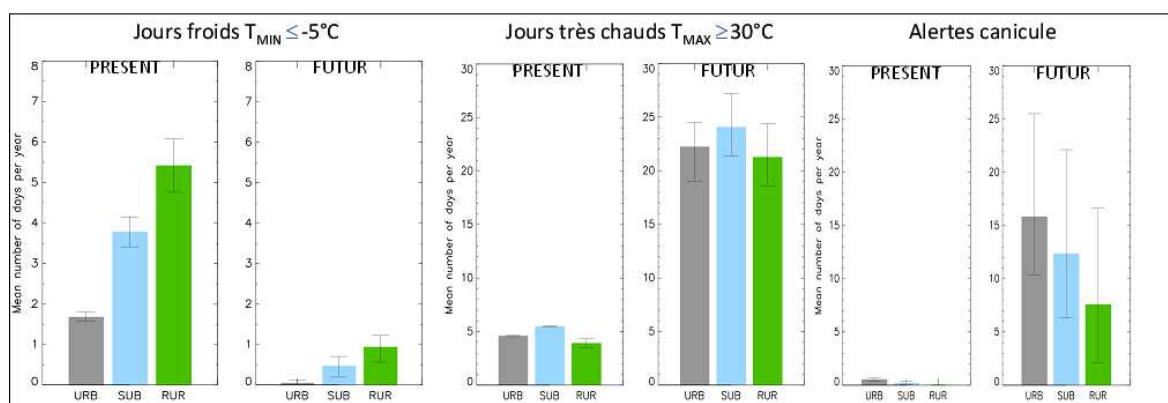


Fig. 1 : Nombre moyen par an de jours froids, de jours très chauds et d'alertes canicule pour les climats actuel et futur (fin du 21^{ème} siècle) dans les zones urbaines (gris), périurbaines (bleu) et rurales (vert) à Paris et alentour.

Par ailleurs, ces évolutions des températures conduiraient à la fin du 21^{ème} siècle à une diminution d'environ 30% des besoins en chauffage l'hiver et à une demande accrue des besoins en climatisation l'été.

Volet 2 : Retour sur la canicule de l'été 2003 à Paris

Le deuxième volet du projet EPICEA analyse finement l'épisode caniculaire d'août 2003 sur l'agglomération parisienne 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 à Paris. Une simulation numérique à très fine échelle, de résolution 250 m, a été effectuée avec des modèles de prévision du temps de Météo-France tenant compte des spécificités des villes. Une base de données décrivant le « couvert urbain » (occupation des sols, forme urbaine et propriétés physiques des matériaux), a été élaborée à l'échelle de l'agglomération parisienne avec le CSTB en étroite collaboration avec l'Atelier Parisien d'Urbanisme (APUR). Cette simulation sert par ailleurs de référence pour la suite du projet.

En ville, la géométrie urbaine et l'imperméabilisation des surfaces par des matériaux artificiels, aux propriétés physiques différentes des sols naturels, entraînent d'importantes modifications des flux de surface par comparaison à ce qui se produit en milieu rural (cf. Fig. 2). Ces modifications sont responsables de la formation d'un microclimat urbain dont le principal phénomène est l'îlot de chaleur urbain (ICU).

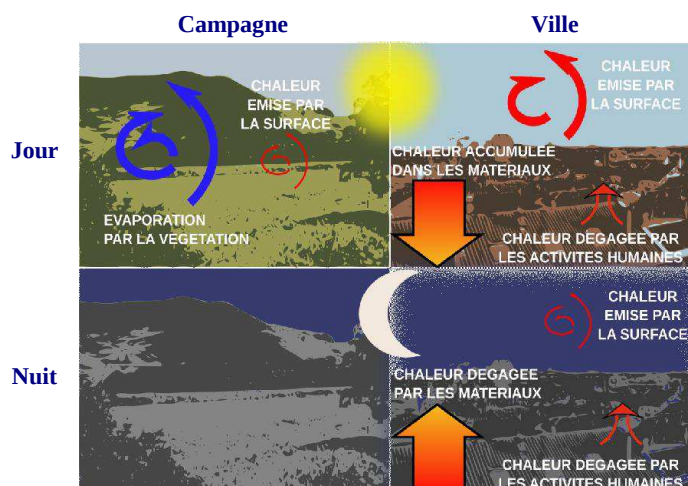


Fig. 2 : Différence de bilan d'énergie entre la campagne et la ville le jour et la nuit.

Nos travaux permettent d'identifier les zones les plus sensibles aux processus climatologiques urbains pendant la canicule d'août 2003 (arrondissements fortement urbanisés du centre de Paris, zones situées dans le panache urbain, etc.) :

→ Un ICU de l'ordre de 4 à 7 °C apparaît en fin de nuit entre le centre de Paris (arrondissements les plus chauds : 2^{ème}, 3^{ème}, 8^{ème}, 9^{ème}, 10^{ème} et 11^{ème}) et les zones moins urbanisées alentour. L'ICU a une structure classique, qui permet de voir l'influence du couvert sur la température (notamment les influences des zones densément urbanisées au centre de Paris, du bois de Boulogne et de la Seine).

→ Des micro ICU se forment également au sein même de Paris, d'une intensité de 2 à 4 °C.

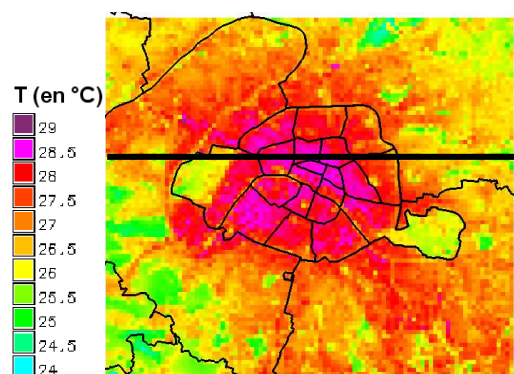


Fig. 3 : Îlot de chaleur urbain simulé au-dessus de l'agglomération parisienne (moyenne des températures de l'air à 2 m à 4 h, 5 h et 6 h locales pour les 5 nuits de la canicule).

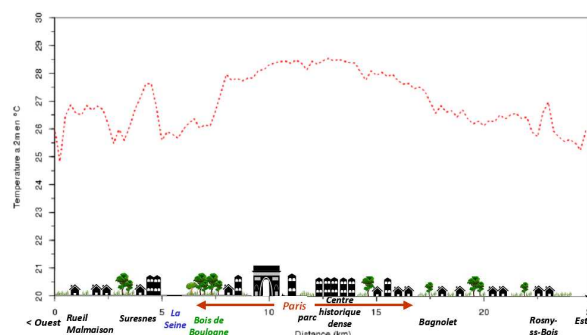
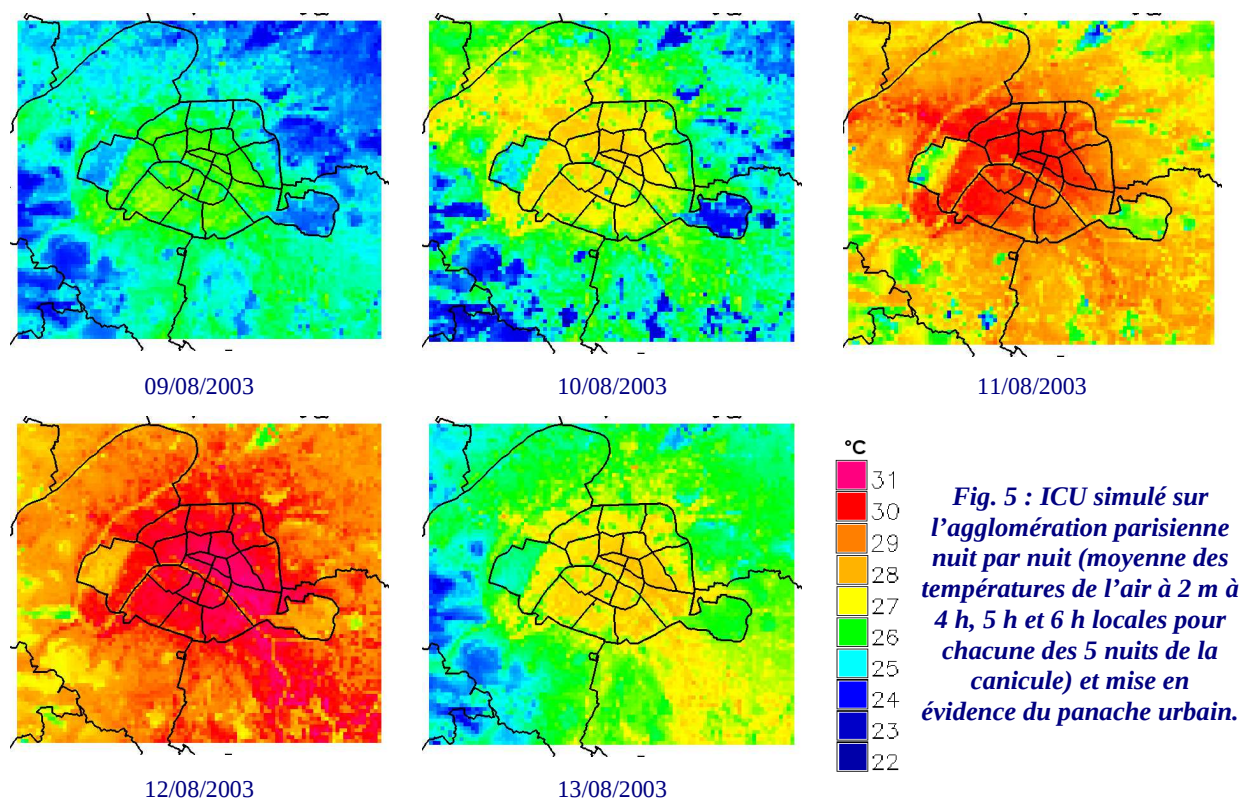


Fig. 4 : Coupe transversale de l'îlot de chaleur urbain (traversant les 16^{ème}, 8^{ème}, 9^{ème}, 10^{ème} et 20^{ème} arrondissements d'Ouest en Est selon l'axe indiqué à gauche en Fig. 3).

→ Selon la force du vent, la hausse de températures peut se propager sous le vent en aval de la zone la plus chaude, formant un panache urbain au sein duquel les températures augmentent de 2 °C pendant cette période (arrondissements périphériques et communes proches).



Volet 3 : Adaptation du territoire parisien au changement climatique

La perspective d'un nouveau contexte climatique caractérisé par des canicules fréquentes et comparables à celle de 2003 et le souvenir récent de cet événement incitent à étudier les paramètres qui peuvent avoir une influence sur les caractéristiques des ICU. Ces paramètres influents sont appelés « leviers urbains ». Ils concernent les propriétés radiatives des surfaces et les zones vertes, *ie.* végétales, ou bleues, *ie.* aquatiques. Différents tests de sensibilité ont été menés en modifiant ces paramètres dans Paris *intra muros* afin de quantifier leur impact sur le climat urbain, dans le contexte de la canicule 2003.

Les scénarios appliqués dans le projet sont :

- (1) un scénario réfléchissant modifiant les propriétés radiatives des matériaux des bâtiments ;
- (2) un scénario de verdissement avec arrosage ou non de la végétation ;
- (3) un scénario d'humidification des chaussées ;
- (4) et enfin un scénario qui combine tous ces aspects, dit scénario « complet ».

Ces scénarios à moyen ou long terme explorent des possibles dont la faisabilité technique semble avérée au vu des développements en cours. Cependant, agir sur ces « leviers urbains » modifie l'aspect de la ville. L'adoption de mesures nécessitera donc la maturation de décisions prenant en compte les performances escomptées mais également leurs coûts d'investissement et de maintenance, l'acceptabilité par les autorités et les usagers de la ville et les incidences de ces mesures d'adaptation sur d'autres facteurs sociétaux.

→ 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 : 1 °C de moins en moyenne sur toute la durée de l'épisode avec 3 °C au maximum à un instant donné dans le centre densément construit (*cf.* Fig. 8 et Fig. 9).

→ Le verdissement de la ville n'a un impact que si la végétation est maintenue dans un état permettant l'évapotranspiration (en l'absence de stress hydrique), ce qui n'est possible ici qu'avec un arrosage en raison de la sécheresse présente. En imposant un arrosage suffisant, on obtient ainsi un impact très important en journée (1 à 3 °C sur toute la durée de l'épisode et 3 à 5 °C à un instant donné) et ce d'autant plus que le taux de végétation est élevé (*cf.* Fig. 8 et Fig. 9).

→ L'humidification de la ville par aspersion d'eau dans les rues pendant la journée conduit à une diminution assez faible de l'intensité de l'îlot de chaleur urbain, inférieure à 0,5 °C en moyenne pendant toute la durée de l'épisode, avec des baisses instantanées comprises entre 1 et 2 °C. L'impact de cet arrosage est toutefois beaucoup plus sensible en journée que la nuit (*cf.* Fig. 8 et Fig. 9).

→ La réalisation simultanée de toutes ces modifications entraîne une diminution de l'ICU atteignant 1 à 2 °C en moyenne pendant toute la durée de l'épisode, avec des baisses maximales de la température dans Paris pouvant atteindre 6 °C, en fin de matinée ou en fin d'après-midi (*cf.* Fig. 6 à Fig. 9).

Comparaison de l'îlot de chaleur urbain entre le scénario « complet » et la référence

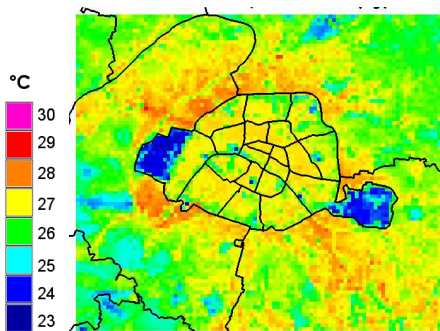


Fig. 6 : ICU simulé sur l'agglomération parisienne (moyenne des températures de l'air à 2 m à 4 h, 5 h et 6 h locales les 5 nuits de la canicule) dans le scénario « complet ».

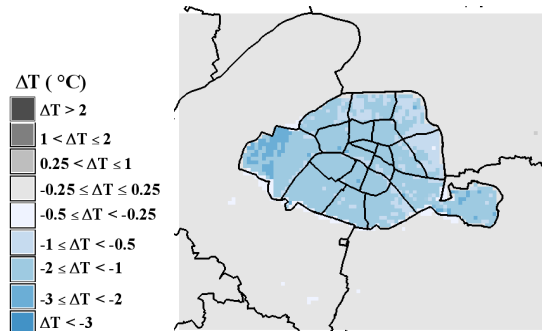


Fig. 7 : Anomalies de températures à 2 m calculées sur l'ICU entre le scénario « complet » et la référence (différence de valeur de l'ICU : scénario – référence).

En détaillant la structure de l'îlot de chaleur urbain, les résultats issus du scénario complet montrent que les différents effets s'ajoutent ce qui conduit à une réduction notable de l'ICU.

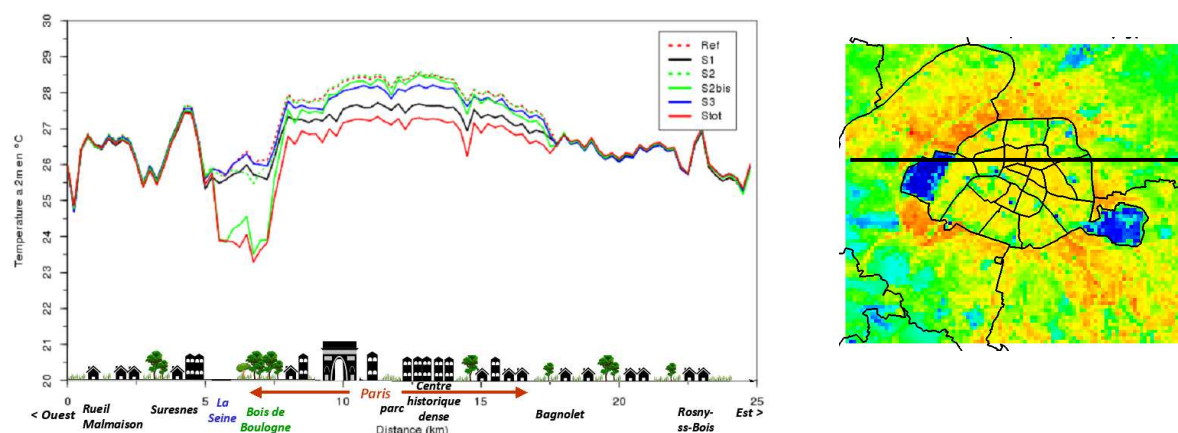


Fig. 8 : Coupe transversale (traversant les 16^{ème}, 8^{ème}, 9^{ème}, 10^{ème} et 20^{ème} arrondissements d'ouest en est comme indiqué sur la figure de droite) de la moyenne des températures de l'air à 2 m à 4 h, 5 h et 6 h locales les 5 nuits de la canicule pour la référence et les différents scénarios (Ref : référence, S1 : scénario réfléchissant, S2 : scénario de verdissement sans arrosage de la végétation, S2bis : scénario de verdissement avec arrosage de la végétation, S3 : scénario d'humidification des chaussées et Stot : scénario complet).

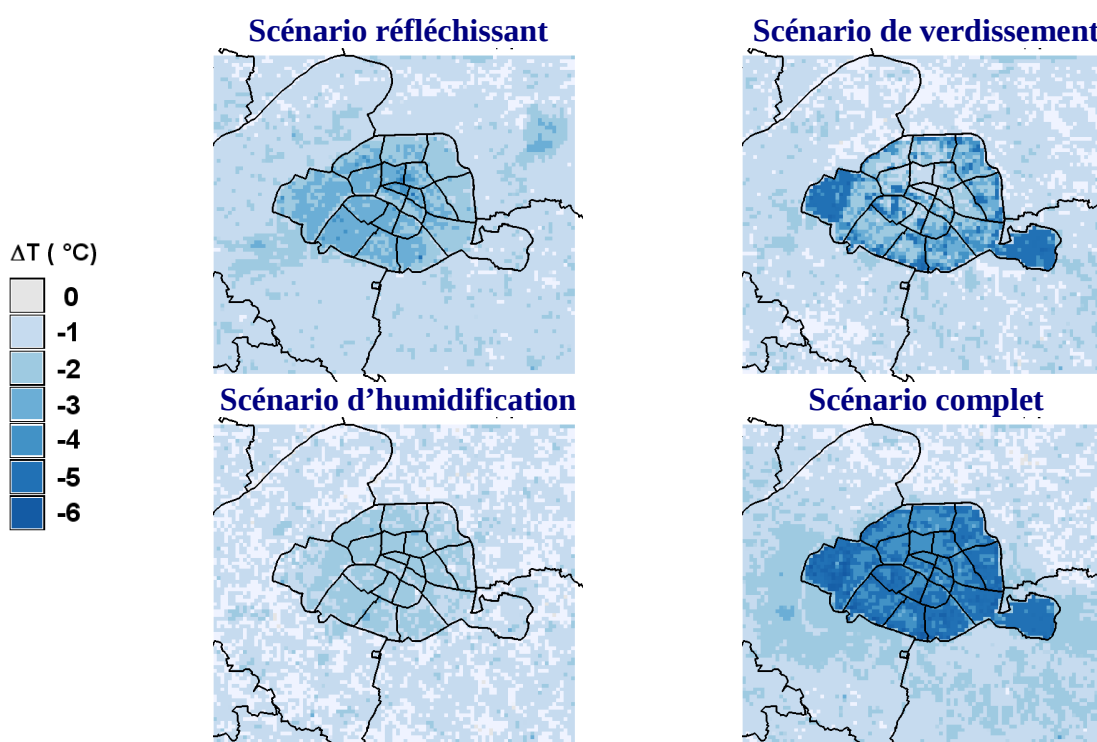


Fig. 9 : Anomalies horaires de température à 2 m (en °C) les plus importantes (différence maximale durant tout l'épisode caniculaire de température à 2 m : scénario – référence) pour chaque point de grille du domaine pour les différents scénarios.

Conclusions du projet

Les éléments clés du projet EPICEA :

- (1) Une hausse significative de 2 à 4°C de la température sur Paris à la fin du 21^{ème} siècle, plus marquée en été qu'en hiver, et plus marquée en journée que durant la nuit ;
- (2) Une très forte augmentation à la fin du 21^{ème} siècle du nombre de vigilances canicule, de 10 à 25 par an à Paris au lieu d'une seule par an en moyenne aujourd'hui, et de 5 à 15 dans les zones rurales alentour ;
- (3) Durant la canicule de 2003 :
 - a. Un îlot de chaleur urbain apparaît en fin de nuit entre le centre de Paris et les zones rurales alentour, de l'ordre de 4 à 7 °C, et dans Paris intra-muros même, de 2 à 4°C ;
 - b. Un phénomène de « panache urbain » se produit, réchauffant de 2°C les arrondissements limitrophes et les communes alentours suivant le sens du vent ;
- (4) Les leviers urbains testés permettent de réduire l'intensité de l'ICU en période caniculaire. Il s'agit des propriétés radiatives des toits et murs, de l'ajout de végétation arrosée et de l'humidification des chaussées ;
- (5) En combinant des scénarios sur ces leviers urbains, l'îlot de chaleur de Paris voit son intensité diminuer de 1 à 2 °C durant une canicule comme celle de 2003, avec des températures dans Paris pouvant diminuer de 6°C à un instant donné de la journée.

L'objectif central du projet EPICEA était d'évaluer l'impact du changement climatique à l'échelle de la ville et l'influence du bâti sur le climat urbain, en étudiant l'épisode climatique extrême qu'a été la canicule du mois d'août 2003, afin de proposer des stratégies d'adaptation.

L'emploi d'une méthodologie novatrice qui intègre une réelle représentation de la ville 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 qui est perçu par les habitants au niveau des rues. En affinant ainsi les projections climatiques au niveau d'un territoire et relativement à une problématique précise, des tendances en matière d'exposition, de vulnérabilité et d'extrêmes climatiques sont identifiées et peuvent ainsi éclairer les stratégies, politiques et mesures de gestion des risques et d'adaptation. L'intérêt qu'elles présentent pour la prise de décision dépend de leur ampleur et de leur degré de certitude, aux échelles spatiales et temporelles de l'aléa considéré, et de la possibilité de mettre en œuvre des mesures de gestion du risque.

Le projet EPICEA dépasse cette notion de mesure de gestion des risques et s'intéresse à l'adaptation. En effet, il contribue à donner des repères, sur un plan théorique, concernant l'ampleur des modifications de l'intensité de l'îlot de chaleur urbain et des autres spécificités du climat urbain induites par des actions sur les leviers urbains. Des considérations relatives à la faisabilité technique et aux conditions de mise en œuvre et d'exploitation attachées aux scénarios étudiés dans le projet peuvent à l'heure actuelle en limiter la portée. Cela permet néanmoins d'apporter des éléments de réflexion à un processus de décision éminemment complexe.