

L'îlot de chaleur urbain et le lien avec la qualité de l'air

Urban heat island and linkage with air quality

Claire GREUILLET⁽¹⁾ et Laurence GALSOMIÈS⁽²⁾

Résumé

Le phénomène de l'îlot de chaleur urbain (ICU) se constate dans les villes où la température est plus élevée que dans les zones rurales environnantes, en moyenne 2 °C de plus. L'été, pendant un épisode de canicule, l'écart de température peut atteindre une dizaine de degrés. Les ICU induisent un stress thermique qui a des conséquences sanitaires. La formation des ICU est de mieux en mieux documentée mais davantage de travaux nécessitent d'être menés afin de mieux qualifier et quantifier leurs impacts sanitaires et environnementaux dont le lien avec la pollution atmosphérique. Des études ont mis en évidence une dégradation de la qualité de l'air dans les zones de formation d'ICU : les deux phénomènes peuvent être simultanés car leurs conditions d'apparition sont souvent liées.

L'enjeu est désormais de maîtriser et si possible réduire les ICU pour adapter la ville aux changements climatiques annoncés. Les villes du futur, qui seront probablement denses, devront aussi être rafraîchies naturellement. Pour ce faire, il faudra jouer sur les facteurs les plus influents de la formation des ICU, à savoir : la végétation et l'eau, le bâti urbain (formes et types de matériaux), la production et la consommation d'énergie.

Mots-clés

ICU, chaleur, îlot, pollution, air.

Abstract

The urban heat island (UHI) effect can be noticed in cities where the temperature is higher than the surrounding countryside, on average 2°C above. In summer during a heat wave, the gap can up to over ten-degree. UHI causes a thermal stress which induces some repercussions on health. The formation of UHI is more and more documented but further studies have to be conducted in order to qualify and quantify the impacts on our health and environment, and the link with atmospheric pollution. Studies have shown air quality deterioration in UHI areas: Both phenomenons can be simultaneous because their conditions of appearance are often linked. Henceforth the stake is to manage and if possible reduce UHI to adapt cities to the expected climate change. Dense cities in the future will also have to be naturally cooled down. In order to do so, we will have to act on the most influential UHI formation factors, namely: vegetation and water, buildings (shapes and materials), production and consumption of energy.

Keywords

UHI, heat, island, pollution, air.

Introduction

L'air est indispensable à la vie car il fournit l'oxygène que les êtres vivants respirent et le dioxyde de carbone nécessaire à la photosynthèse par les plantes. Ce dernier contribue aussi à un effet de serre naturel protégeant des rayons ultraviolets nocifs. Par ailleurs, l'équilibre entre le climat et l'air est essentiel à la vie sur Terre. Toutefois, climat et qualité de l'air peuvent varier, comme au cours de ces dernières

décennies où l'Homme a marqué de son empreinte les grandes perturbations environnementales et climatiques. Un air sain, ni trop chaud ni trop froid, est un enjeu crucial dans les zones fortement peuplées où se concentrent la plupart des sources de pollution dues aux activités humaines. Les villes que l'on peut rencontrer en France, mais également dans d'autres pays, présentent une vulnérabilité particulière face au changement climatique et à la pollution atmosphérique compte tenu des fortes concentrations de popu-

(1) Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie – Direction régionale Ile-de-France. 6-8, rue Jean Jaurès, 92807 Puteaux cedex – claire.greuillet@ademe.fr

(2) Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie – Service Évaluation de la Qualité de l'Air. 27, rue Louis Vicat, 75015 Paris – laurence.galsomies@ademe.fr

lation et des nombreuses infrastructures caractérisant leur territoire [1]. Parmi les conséquences de cette vulnérabilité, le phénomène des îlots de chaleur urbains (ICU) semble moins connu que d'autres phénomènes climatiques comme l'effet de serre. Il est pourtant tout aussi important à une échelle urbaine. La connaissance des ICU est donc essentielle dans la protection des individus et de l'environnement. Cet article dresse un état des connaissances sur la formation des ICU et sur leur lien avec la pollution de l'air. Il s'appuie notamment sur une étude commandée par l'ADEME donnant un état de l'art sur le sujet réalisé au niveau international [2]. Une étude du Conseil Régional d'Ile-de-France, en collaboration avec l'ADEME, donne des recommandations à une échelle régionale pour lutter contre l'effet d'îlot de chaleur urbain [3].

L'îlot de chaleur urbain désigne une différence de température, observée dans l'air, entre une ville et les zones rurales environnantes. Les températures peuvent augmenter de 2 °C à 12 °C selon une densité de population allant de mille à plusieurs millions d'habitants dans les villes [1]. Un excès de chaleur contribue à accentuer les impacts sanitaires et environnementaux visibles en ville, notamment en période de canicule. L'écart des températures pendant la canicule de 2003 en France a pu atteindre 10 °C [5] voire 16 °C [6] par rapport aux températures minimales observées en fin de nuit. Cela a été responsable de divers troubles sanitaires dans la population générale (hyperthermie, déshydratation, syncopes) et a exacerbé les maladies chroniques telles que le diabète, les insuffisances respiratoires

ou les troubles cardio-vasculaires. Il a d'ailleurs été établi qu'au moment de la canicule de 2003, la surmortalité était de 80 % à Lyon et de 141 % à Paris [7]. Au-delà du stress thermique qu'engendrent les ICU, la ville contribuant à la formation de l'ICU est aussi le lieu où l'on rencontre le plus de problèmes liés à la pollution atmosphérique [8]. Le programme Clean Air For Europe (CAFE) a conclu que la pollution atmosphérique est la cause de la diminution en France de 9 mois d'espérance de vie par individu [9]. Une augmentation locale de la température a aussi un effet sur l'environnement. Par exemple, une température des trottoirs de 38 °C peut accroître celle des eaux de pluie passant de 21 °C à plus de 35 °C. La conséquence est que les eaux pluviales « réchauffées », déversées ensuite dans les égouts, augmentent la température des ruisseaux, des rivières, des étangs et des lacs, ce qui peut entraîner des effets sur les écosystèmes aquatiques. Les besoins en énergie et en eau potable au cours d'un épisode d'ICU sont également plus importants, ce qui accroît la demande pour les ressources naturelles fossiles (pétrole, charbon, gaz, etc.).

L'îlot de chaleur urbain, un phénomène issu de facteurs d'origine naturelle

Qu'ils soient d'origine naturelle ou anthropique, divers facteurs favorisent la formation des ICU. Les facteurs naturels sont incontrôlables car ils dépendent de la météorologie, telles que les situations anticycloniques, la vitesse du vent ou encore la couverture nua-

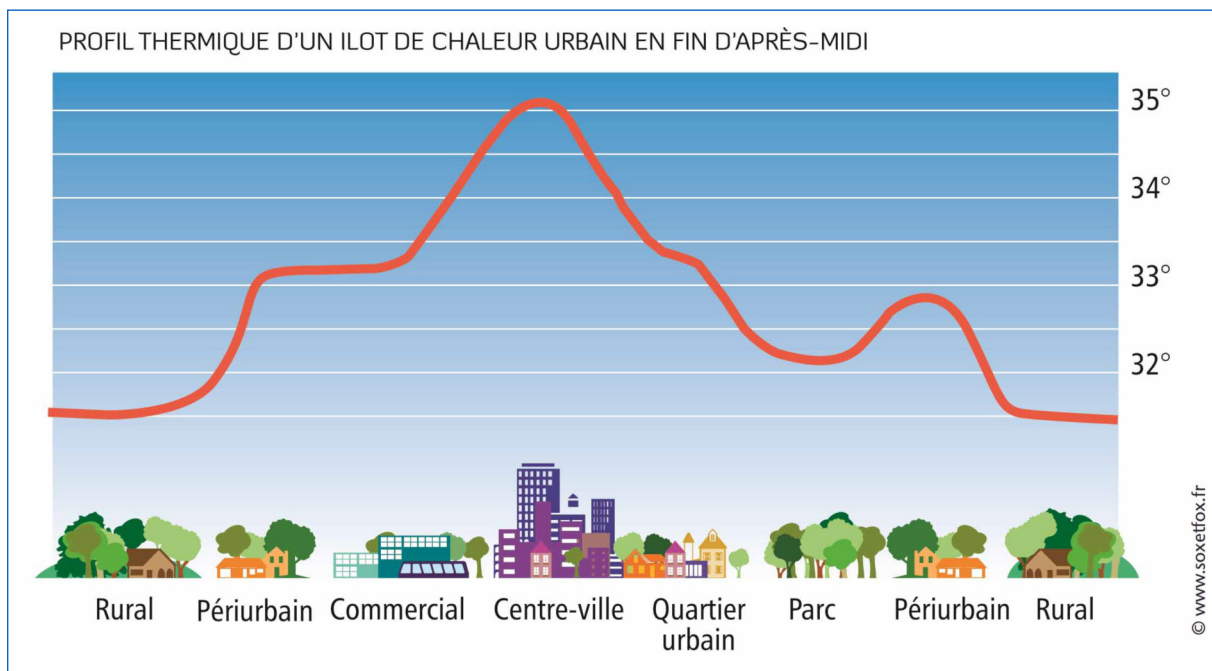


Figure 1.
Schéma de l'îlot de chaleur urbain (source ADEME [4]).
Plan of urban heat island.

Les polluants atmosphériques au niveau du sol se mélangent et se diluent dans la **couche limite atmosphérique (CLA)**. C'est une tranche de l'atmosphère présente depuis la surface de la Terre jusqu'à 1 km environ en altitude. Son épaisseur varie avec les transferts d'énergie dans l'atmosphère (par la convection et la turbulence). Ainsi, la pollution atmosphérique est influencée par la hauteur de cette CLA : plus la CLA est mince, plus les polluants sont concentrés et plus la pollution atmosphérique est importante. Les caractéristiques de la CLA se modifient à proximité des zones construites (le bâti) en milieu urbain.

Chaque ville est structurée et aménagée différemment et un climat particulier appelé **climat urbain** lui est propre. Le climat urbain est influencé par des phénomènes dynamiques tels que, par exemple, la rugosité de surface⁽³⁾ des bâtiments et des phénomènes thermiques tels que les effets de stabilité atmosphérique et de cycle diurne⁽⁴⁾.

Rappelons également que la qualité de l'air en ville est influencée par de nombreuses sources qui émettent des polluants et des gaz à effet de serre. Les polluants sont des indicateurs de la qualité de l'air ayant un impact environnemental et sanitaire. En France, on mesure notamment l'ozone, les oxydes d'azote, les particules en suspension, le dioxyde de soufre, le monoxyde de carbone, les composés organiques volatils (comme le benzène) mais aussi d'autres polluants qui se sont ajoutés progressivement à la liste des polluants surveillés dans un cadre réglementaire ou non (les hydrocarbures aromatiques polycycliques et monocycliques : HAP et HAM, certains métaux lourds et les composés organochlorés : dioxines et furanes). Les polluants réagissent entre eux et se transforment dans l'atmosphère. C'est le cas par exemple de l'ozone et des particules qui peuvent se combiner pour former un épais brouillard de pollution que l'on appelle communément le **smog**.

Le **changement climatique** et la **pollution de l'air** interagissent l'un avec l'autre. Certains polluants participent au changement climatique et à la pollution atmosphérique, tels que des composés particulaires et gazeux dits à effet de serre (carbone suie, ozone).

geuse, et aussi du climat (selon les saisons). Par exemple, à Paris, l'intensité de l'ICU varie selon la saison et le moment de la journée. L'écart des températures entre la ville et les zones rurales est plus important la nuit et en été (avec un écart de température supérieur à 3 °C), alors qu'en journée il est atténué (l'écart de température est inférieur à 1 °C), en particulier à la fin du printemps jusqu'à l'automne. Pendant la nuit, les différences de température entre le centre d'une agglomération et les zones rurales environnantes sont principalement dues à la durée de l'ensoleillement reçu en journée et à la vitesse du vent. Plus généralement, la topographie d'un lieu et son exposition au vent semblent influencer le développement de l'ICU. Par ailleurs, les situations propices à former un ciel clair et calme sont plus fréquentes en été qu'en hiver, ce qui conduit à un ICU plus contrasté (3,4 °C contre 2,5 °C) malgré l'apport notable de chaleur en hiver lié au chauffage [10]. Ces situations propices se déroulent en condition de hautes pressions atmosphériques (situations anticycloniques). Au contraire, en situation de basses pressions (conditions dépressionnaires), un ciel couvert et agité ne favorise pas la formation de l'ICU. En été, les situations anticycloniques conduisent à une forte insolation et donc à former un ICU. L'ICU disparaît par ailleurs pour des vents supérieurs à 11,1 m.s⁻¹ [11].

Les variations journalières de température s'expliquent par la très forte quantité de chaleur stockée par le bâti (la chaleur s'accumulant au cours de la journée). La ville possède des propriétés de stockage particulières en restituant lentement cette chaleur tout au long de la nuit, à la différence des zones rurales où les températures restent plus basses. Ainsi, un îlot de chaleur urbain se forme non pas à cause d'un air réchauffé plus rapidement pendant la journée mais à cause d'un air refroidi plus lentement la nuit.

L'îlot de chaleur urbain, un phénomène renforcé par des facteurs d'origine anthropique

À la différence des facteurs naturels, les facteurs anthropiques à l'origine de la formation des ICU peuvent être contrôlés. Ainsi, certaines caractéristiques de la ville ou certains phénomènes de pollution dans les basses couches de l'atmosphère contribuent à la formation d'un ICU. La ville avec ses surfaces artificialisées, géométriques et construites en matériaux divers influence largement le climat urbain et donc la formation des ICU. En effet, les surfaces réfléchissant ou absorbant la lumière et la chaleur et perturbant les écoulements d'air, y sont nombreuses.

(3) Turbulence dynamique due aux variations spatiales de l'intensité et de la direction du vent (effet de cisaillement du vent).

(4) Turbulence thermique due aux variations verticales de la densité de l'air.

Le piégeage radiatif de la lumière par les surfaces des bâtiments est une des caractéristiques de la structure d'une ville engendrant une augmentation locale de température. Bien que le rayonnement solaire direct soit plus fort en intensité en milieu rural qu'en milieu urbain, les effets des rayons infrarouges⁽⁵⁾ sont pourtant plus importants en ville [12]. En effet, les flux radiatifs issus des multi-réflexions de la lumière sur les parois des bâtiments et sur le sol ne sont pas redirigés vers le ciel systématiquement mais absorbés par le bâti progressivement. Cela se traduit donc par une augmentation globale de l'albédo des espaces urbains.

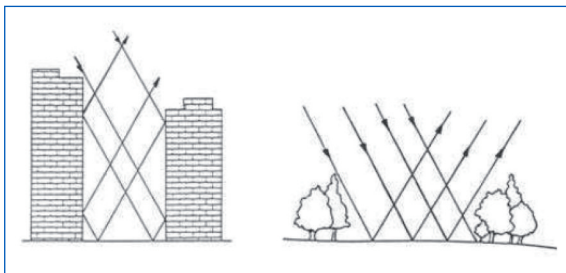


Figure 2.
Effet du piégeage radiatif en ville (à gauche)
et en zone rurale (à droite) [13].
Heat trapping effect in urban areas (left)
and in rural areas (right).

Certaines formes géométriques dans la structure d'une ville amplifient le piégeage radiatif, notamment les rues canyons⁽⁶⁾ très fréquentes dans les villes européennes d'après le CEREA⁽⁷⁾. Le lien entre formation des ICU et géométrie des rues dépend aussi de la latitude où se trouve la ville et de la saison. Sous un climat chaud, une ville dense avec des rues étroites (type médina) apporte un meilleur confort thermique en été, à condition de bien choisir l'orientation des rues afin d'optimiser la ventilation pour évacuer la chaleur piégée [14]. D'une manière générale, l'orientation des rues a un impact sur le phénomène des ICU car cela conditionne l'exposition au soleil et la circulation de l'air. Ainsi, les rues orientées nord-sud sont plus fraîches, que ce soit en été ou en hiver, comparées aux rues orientées est-ouest car elles restent moins longtemps exposées au soleil. De même, les rues orientées suivant les vents dominants favorisent la circulation de l'air et donc un meilleur rafraîchissement dans la zone urbaine [15]. D'autre part, l'étalement urbain, c'est-à-dire le développement de nouvelles surfaces artificialisées en périphérie des grandes villes, augmente l'effet des grandes vagues de chaleur à la différence de ce qui se produit dans les villes plus « compactes » qui ont su limiter leur

empreinte au sol [16]. En effet, dans les villes « étendues » les déplacements sont souvent thermo-motorisés et contribuent à augmenter les niveaux de chaleur. L'Institut National de Santé Publique du Québec encourage par exemple la densification des villes existantes afin de limiter l'étalement urbain mais avec un accès restreint des véhicules motorisés dans les centres-villes et des infrastructures adaptées à des modes de transport sobres en carbone (vélo ou marche à pied) [17]. Une autre conséquence de l'étalement urbain est la perte importante de zones naturelles, végétalisées et aquatiques, pourtant indispensables à la régulation du climat urbain au profit de zones urbaines (pavillons, zones d'activités industrielles ou commerciales) produisant potentiellement de la chaleur.

Le changement de température en ville peut aussi être lié à certaines caractéristiques des matériaux telles que l'albédo, l'émissivité, la conductivité et la capacité thermique. La capacité des matériaux à restituer la chaleur est la principale cause dans la formation des ICU. En effet, les matériaux utilisés pour la construction ont une inertie thermique bien plus grande qu'un sol laissé nu. L'albédo est un indicateur de la capacité des matériaux à réfléchir le rayonnement solaire absorbé. À titre d'exemple, le béton brut a une inertie thermique élevée et un albédo faible. Il absorbe jusqu'à 80 % de l'énergie solaire qu'il reçoit en journée. Il peut ainsi accumuler de manière très lente beaucoup de chaleur et se refroidir tout aussi lentement la nuit alors que la température de l'air extérieur a déjà beaucoup baissé. En ville, divers revêtements (pierre, asphalte, béton...) recouvrant les sols ont une grande capacité à absorber le rayonnement solaire mais ils empêchent aussi l'infiltration et l'absorption de l'eau par les sols car ils sont imperméables. Les processus naturels de rafraîchissement (évaporation de l'eau par les sols et évapotranspiration par la végétation) sont donc réduits en ville.

Le rôle des surfaces végétalisées en ville pour limiter l'îlot de chaleur urbain

La végétalisation des surfaces est une mesure souvent mise en place dans les villes et aussi la plus connue du public : toitures ou murs végétaux, plantations ponctuelles de végétaux, création de parcs, végétalisation de centres commerciaux ou d'aires de stationnement, développement de jardins privés ou collectifs, etc. D'après l'Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique [1], la végétation influence plus fortement le climat urbain comparé à

(5) Les infrarouges sont une partie du rayonnement solaire et provoquent une élévation de température de la matière qui les reçoit et les absorbe.

(6) Rues étroites bordées de bâtiments avec plusieurs étages.

(7) Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique.

l'albédo. La manière la plus efficace pour diminuer la température en ville consisterait donc à augmenter les surfaces végétales en combinant des arbres plantés et des toitures végétalisées. À Valence, la température dans le parc de Viveros (20 hectares) est inférieure de 2,5 °C par rapport à la température maximale mesurée dans une zone construite [18]. À Berlin, 10 hectares d'espace vert abaissent la température de 1 °C, 50 hectares de 2 °C et 200 hectares de 3 °C [19].

Les lieux pour installer les espèces végétales doivent être choisis avec soin : plantations ponctuelles, terrains privés (parcs, stationnements), en pourtour d'habitations, murs et toitures, etc. Par exemple, en région Ile-de-France, l'idéal serait de combiner une ceinture verte et des espaces verts de proximité afin d'être plus efficace pour diminuer la température [10]. Des travaux de recherche ont permis d'évaluer l'impact des surfaces végétalisées sur le climat urbain. L'énergie nécessaire au fonctionnement de la ville de Paris a été modélisée sur la journée du 30 juin 2006. Ainsi, si l'on réduit les espaces végétalisés à Paris de 50 % à 0 %, le bilan rayonnement net est augmenté de 4 %, soit 8 W.m⁻² environ, et le flux de chaleur stockée augmenté de 36 %, soit 17 W.m⁻² environ, ce qui entraînerait une augmentation significative de la température à Paris en absence d'espaces végétalisés. En revanche, le flux de chaleur sensible⁽⁸⁾ est diminué de 47 W.m⁻² environ (soit 27 %) [12].

Plusieurs études ont permis de mieux quantifier les bénéfices induits par la végétation en termes de potentiel de rafraîchissement des surfaces bâties. Une température maximale de 30 °C à la surface de murs végétalisés peut atteindre 60 °C en absence de végétation et en fonction du type de revêtement [20]. Un arbre mature au sein d'une plantation d'arbres peut évaporer jusqu'à 450 litres d'eau par jour, ce qui rafraîchit autant que cinq climatiseurs fonctionnant 20 heures par jour [21]. La création d'un parc de 0,6 km² de superficie permet de réduire de près de 1,5 °C la température de l'air dans une zone commerciale située à 1 km en aval du parc et dans l'axe des vents dominants [22]. Dans les villes étudiées, la réduction de température dépend de la taille du parc (1 à 6,8 °C) et de la distance au parc (1,5 à 4 °C) [23]. Le potentiel de rafraîchissement d'un parc est aussi largement déterminé par le climat. Plus le climat est chaud et sec, plus l'effet rafraîchissant est important. Dans les zones de stationnement, une voiture ombragée par la végétation a une température d'environ 7 °C inférieure par rapport à une voiture exposée au soleil, tandis qu'un pavé asphalté est de 2 à 4 °C plus frais à l'ombre qu'au soleil [24]. Sandifer et Givoni [25] ont évalué l'effet ombrageant de la vigne vierge sur un mur. La température diminue de 20 °C par rapport à un mur nu. Les toitures végétalisées apportent les conditions de fraîcheur les plus avanta-

geuses. Par une journée ensoleillée de 26 °C (à l'ombre), un toit exposé au soleil peut atteindre une température de 80 °C si sa couleur est foncée, 45 °C si sa couleur est blanche et seulement 29 °C s'il est recouvert de végétaux [26] [27].

Cependant, il est très important d'étudier au préalable certains aspects avant de promouvoir le développement de surfaces végétalisées. L'apport en eau doit être suffisant car un « stress hydrique » perturbe la photosynthèse des plantes et peut entraîner prématurément leur flétrissement voire leur mort, de sorte que le potentiel rafraîchissant des surfaces végétalisées est annulé [6]. Si les végétaux disparaissent, alors les surfaces (ou substrats) devenues nues peuvent à nouveau stocker de la chaleur et donc contribuer à augmenter l'ICU. De plus, le choix des végétaux est primordial car certaines espèces émettent des polluants gazeux comme des Composés Organiques Volatils (COV : isoprène, monoterpènes, etc.) qui contribuent à la pollution de l'air et notamment au smog. Par exemple à Osaka au Japon, 38 % des émissions journalières de COV proviennent de la végétation [28]. Certaines espèces végétales peuvent aussi être allergisantes. Les plantes sont stressées dans les villes et elles pollinisent davantage. Certaines substances polluantes se fixent ainsi aux pollens. L'augmentation du potentiel allergisant des pollens est une conséquence de la pollution atmosphérique [29].

Les surfaces aquatiques, un apport non négligeable pour limiter l'îlot de chaleur urbain

Les surfaces aquatiques influencent aussi le phénomène des ICU en régulant la température de la ville. C'est par l'évaporation de l'eau que l'air se rafraîchit, et donc cela réduit le phénomène des ICU. L'efficacité thermique des points d'eau dans une ville dépend de leur taille. Les fontaines qui sont de petites surfaces d'eau isolées ne refroidissent pas suffisamment l'air [12]. En revanche, de grands jets d'eau ont des effets notables sur l'humidification et le refroidissement de l'air [30]. Une étude, au cas par cas, est cependant nécessaire pour dimensionner la superficie des points d'eau et viser une réelle efficacité. Certains aménagements urbains améliorent la gestion des eaux en ville en facilitant l'infiltration des pluies dans le sol en le maintenant humide, ce qui permet l'évaporation et donc le rafraîchissement : arbres et toitures végétalisées, revêtements poreux (graviers, joints perméables, engazonnement), jardins pluviaux, bassins et tranchées de rétention, puits d'infiltration et enfin des chaussées avec réservoir d'eau [17].

(8) Quantité de chaleur transmise de la surface terrestre à l'atmosphère par conduction thermique.

Les flux de chaleur en ville issus de la consommation des énergies fossiles contribuent-ils à l'îlot de chaleur urbain ?

Un flux de chaleur (Q_f) d'origine anthropique s'exprime par la somme de l'ensemble des sources dégageant de la chaleur :

$$Q_f = Q_v + Q_b + Q_m \text{ [31, 32, 33 et 34].}$$

Q_v est la chaleur émise par les véhicules, Q_b la chaleur émise par les sources fixes (bâtiments et industries) et Q_m la chaleur émise par le métabolisme des êtres vivants.

D'une manière générale, les flux de chaleur d'origine anthropique varient selon la localisation de la ville, le moment de la journée et les jours de la semaine, et aussi selon la saison car ils sont généralement plus importants l'hiver que l'été.

Les caractéristiques de la ville, c'est-à-dire sa structure et ses surfaces (bâties, végétalisées, et aquatiques), influencent grandement le climat urbain et donc la formation des ICU. La consommation d'énergie a une influence tout aussi déterminante sur la formation de l'ICU car elle engendre un flux de chaleur Q_f . Les voitures (moteurs thermiques), le chauffage, la climatisation, les industries (production d'eau chaude sanitaire, fours à haute température) et le métabolisme des êtres vivants sont quelques exemples de sources de chaleur d'origine anthropique ainsi que de sources de polluants atmosphériques. D'après Sailor et Lu [34], la chaleur dégagée par le métabolisme des êtres vivants est très faible. Elle ne dépasse pas 5 % du flux total de chaleur quels que soient la densité de population, la saison ou le moment de la journée. Une étude, menée à Toulouse de 2004 à 2005, montre que le flux total de chaleur Q_f varie de 100 à 25 $W.m^{-2}$ en centre-ville entre l'hiver et l'été, alors qu'il varie de 25 à 5 $W.m^{-2}$ dans les zones périurbaines [11]. Le flux de chaleur est donc plus fort en hiver qu'en été quelle que soit la localisation. Les véhicules (consommant des combustibles fossiles) et les bâtiments (consommant une énergie à la fois électrique et fossile) peuvent émettre de la chaleur. Et le flux peut varier en fonction du moment de la journée⁹ et de la semaine¹⁰. Le niveau de chaleur dû aux bâtiments se chauffant à l'électricité est aussi influencé par la saison¹¹. Les bâtiments se chauffant avec des combustibles fossiles voient leurs émissions de chaleur dépendre aussi fortement des changements rapides de la météorologie¹².

(9) Chaleur plus élevée le jour que la nuit.

(10) Chaleur plus élevée au cours du week-end.

(11) Chaleur plus élevée en hiver qu'en été.

(12) Chaleur plus élevée si l'hiver est froid.

Paradoxalement, l'ICU est en général plus intense l'été que l'hiver alors que les rejets thermiques dus au chauffage sont plus importants en hiver. Cela signifie que les sources de chaleur d'origine anthropique ne sont pas les principaux facteurs du climat urbain dans la formation de l'ICU [12]. Toutefois, les flux de chaleur issus des activités humaines pourraient augmenter à l'avenir car la climatisation électrique, par exemple, est de plus en plus utilisée pendant les mois d'été et l'on sait que son utilisation amplifie davantage le phénomène de l'îlot de chaleur.

Le lien entre l'îlot de chaleur urbain et la qualité de l'air

En l'état actuel des connaissances, il semble qu'en définitive le phénomène de l'ICU est de mieux en mieux documenté pour sa formation (naturelle ou anthropique) mais davantage de travaux nécessitent d'être menés afin de caractériser et quantifier ses impacts sur l'Homme et l'environnement. Le lien avec la pollution atmosphérique est également à approfondir puisque les conditions d'apparition des deux phénomènes, ICU et pollution, sont souvent liées.

L'îlot de chaleur urbain influence la qualité de l'air

Certaines conditions météorologiques telles qu'une température élevée, un vent et une humidité faibles et un ciel clair, sont favorables à la formation des ICU et facilitent également les épisodes de pollution atmosphérique puisque les polluants se dispersent moins facilement et donc s'accumulent dans l'atmosphère [35]. Des températures élevées sont aussi à l'origine de la formation de l'ozone (O_3) qui est un polluant secondaire et aussi un gaz à effet de serre. Dans des situations anticycloniques, la formation de pics de pollution, en ozone mais aussi en dioxyde de soufre (SO_2) et dioxyde d'azote (NO_2), a par exemple été observée dans la ville de Saint-Étienne [36]. La présence simultanée d'un ICU de forte intensité et d'un pic de pollution pourrait avoir des impacts sanitaires d'autant plus importants.

La différence des températures engendrée par un ICU, avec un air plus chaud en ville qu'en zone rurale environnante, favorise aussi les déplacements horizontaux des masses d'air froides (ou brises de campagne) vers les masses d'air plus chaudes au centre des villes. Cela crée une couche d'inversion des températures avec des effets sur la qualité de l'air telles

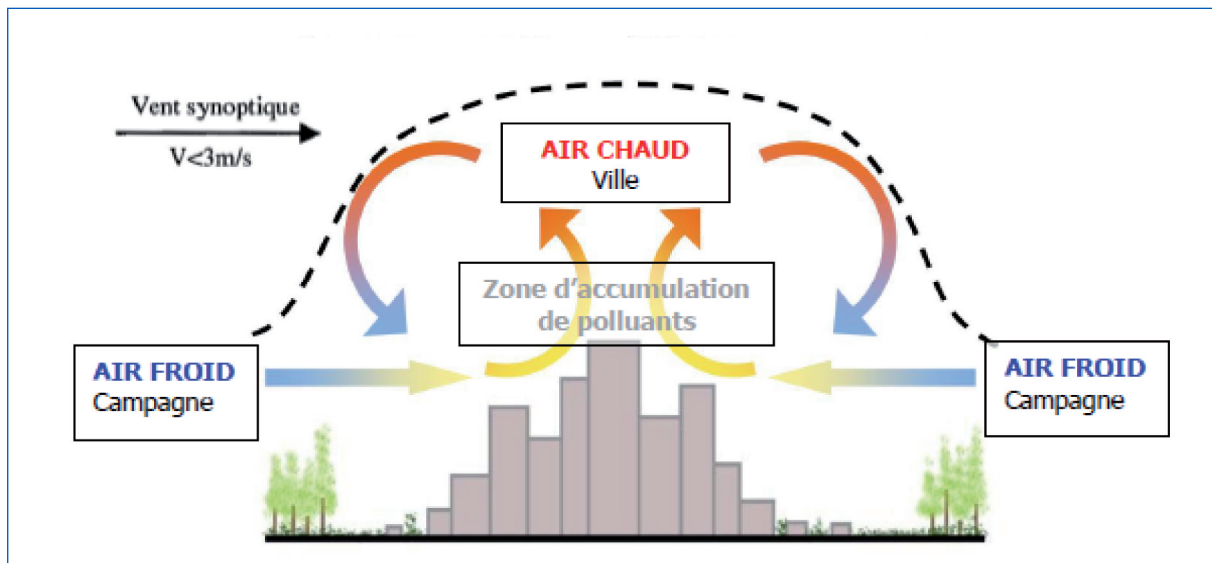


Figure 3.

Phénomène de convergence des vents entre la ville et la campagne.[6].
Wind convergence phenomenon between the city and the countryside.

que l'accumulation et la stagnation de la pollution en ville [37]. Les niveaux de concentration des polluants augmentent avec l'intensité de l'ICU [38].

Une autre influence, cette fois positive, de l'ICU sur la pollution de l'air est l'augmentation des mouvements de convection des masses d'air. Les polluants peuvent mieux se disperser dans l'atmosphère, et la qualité de l'air est donc meilleure. Sarrat *et al.* ont modélisé des concentrations d'oxydes d'azote (NOx) au cours de la formation d'un ICU en région Ile-de-France [39]. Le modèle a utilisé des mesures (météorologie et qualité de l'air) réalisées le 17 juillet 1999 lors d'un épisode anticyclonique de forte pollution photochimique. À 17 heures, par exemple, les NOx sont plus fortement dilués dans la couche limite atmosphérique qui atteint, sous l'effet de l'ICU, une hauteur la plus élevée au centre de Paris. En revanche, les concentrations en NOx sont moins diluées s'il n'y a pas le phénomène de l'ICU. Sur le reste de l'Ile-de-France, les concentrations en NOx sont similaires avec et sans ICU. À minuit, l'îlot de chaleur augmente également la hauteur de la couche limite atmosphérique (environ 206 mètres contre 72 mètres dans la même zone sans ICU), et la turbulence des masses d'air contribue alors à disperser les polluants primaires tels que les NOx, qui sont des précurseurs de l'ozone. La présence d'un ICU influence donc la formation de l'ozone avec des niveaux de concentrations homogènes en région Ile-de-France. En revanche, l'absence d'un ICU dans les mêmes conditions de pollution de l'air conduirait à des niveaux en ozone très faibles même en présence d'un niveau élevé d'oxydes d'azote.

L'ICU influence également le niveau d'humidité dans l'air et les niveaux de précipitations. En présence d'un ICU, les jours de brouillard (y compris le smog, c'est-à-dire les brouillards de pollution) et les

jours de gel sont moins nombreux, le niveau d'humidité relative diminue, les pluies sont plus fortes (orages) et plus courtes, ce qui lessive les polluants accumulés dans l'atmosphère [37].

Et la pollution de l'air influence l'îlot de chaleur urbain

En l'état actuel des connaissances, le seul effet connu de la pollution de l'air sur l'îlot de chaleur urbain est une diminution du rayonnement solaire incident, de 3 à 10 % plus faible en ville par rapport au milieu rural, ce qui amène à un refroidissement de l'atmosphère [40]. En effet, les aérosols absorbent une partie du rayonnement solaire incident qui est diffusé ensuite dans toutes les directions. En conséquence, la quantité d'énergie arrivant sur la surface de la Terre et absorbée par les matériaux est réduite, mais l'air a pu se réchauffer localement. Ces deux effets rendent donc difficile l'établissement d'une relation entre la pollution atmosphérique et l'ICU.

Conclusion

La formation des ICU, qui est liée à un processus complexe avec des interactions diverses entre le climat et la pollution de l'air, est différente d'une ville à une autre. Les facteurs agissant sur cette formation, qu'ils soient d'origine naturelle ou anthropique, ne doivent pas être étudiés séparément. Des travaux intégrant de la modélisation couplée à des campagnes de mesure et des analyses statistiques sont devenus indispensables pour identifier et étudier le phénomène des ICU. Le phénomène d'ICU est un sujet transversal ce qui rend indispensable une prise

en compte conjointe des expertises par les urbanistes et les spécialistes de l'efficacité énergétique, de l'environnement et de la pollution. Les mesures pour éviter la formation d'un ICU doivent s'appuyer sur toutes ces compétences et doivent tenir compte des deux problématiques CLIMAT et QUALITÉ DE L'AIR. Même s'il est encore difficile d'établir clairement le niveau d'influence d'un ICU sur la pollution atmosphérique en ville, et vice-versa, différents liens ont pu être montrés. À ce jour, seule une étude de l'ADEME tente de définir le lien entre l'îlot de chaleur urbain et la qualité de l'air [2].

Il est difficile cependant, en se basant sur les connaissances actuelles, de concevoir une ville idéale permettant de lutter contre le phénomène des ICU. Néanmoins, davantage de fraîcheur peut être ressentie dans une ville en combinant une stratégie de ventilation et en privilégiant des aménagements de végétation (parcs, jardins, murs végétaux) et d'eau (jets et chutes d'eau). En complément des actions liées à la structure de la ville, celles liées à la présence de points d'eau et de surfaces végétalisées constituent donc d'autres facteurs contrôlables pour influencer sur la présence et l'intensité des ICU. Cela montre aussi que les enjeux sont croisés entre l'installation en ville de surfaces végétalisées et aquatiques et une disponibilité des ressources en eau sur le territoire urbain. Par ailleurs, il convient de privilégier des actions qui amènent des bénéfices multiples. La végétation en ville a un rôle potentiel rafraîchissant (par évapotranspiration et ombrage) qui est bénéfique pour la santé de la population en offrant des lieux (parcs et jardins) favorables pour la protection du rayonnement ultraviolet et adaptés à la pratique d'une activité physique. La végétation en ville peut améliorer la qualité de l'air par la production d'oxygène, la captation du dioxyde de carbone ainsi qu'en piégeant les particules en suspension dans l'air. Elle contribue également à conserver une bonne qualité des eaux

(en limitant les eaux de ruissellement), à réduire la consommation d'énergie (la végétation rafraîchit l'air, ce qui diminue le besoin en climatisation), à rendre la ville agréable et à développer certains bienfaits sociaux (des zones de verdure diminuent le stress) [41]. La végétalisation des surfaces protège aussi de l'érosion due aux vents et à l'eau, diminue la réverbération du rayonnement solaire par un effet de filtre ou d'écran, et atténue aussi certaines fréquences sonores, etc. [23].

Limiter le phénomène d'îlot de chaleur urbain demande la mise en œuvre d'actions individuelles et locales mais aussi une mise en œuvre de politiques publiques plus globales au niveau des villes. Chaque individu peut agir pour réduire sa consommation énergétique en privilégiant l'achat d'appareils électroménagers certifiés économes en énergie [42] ou en utilisant des lampes à faible consommation électrique et des détecteurs de présence dans les pièces, etc. D'autre part, une meilleure gestion de la consommation énergétique peut être mise en place si le trafic routier est mieux régulé. L'utilisation en ville de transports en commun (métro, tram, bus, trains...) et de transports actifs (vélo et marche à pied) est un autre exemple de bénéfices multiples. L'usage des transports actifs contribue en effet à réduire le flux de chaleur anthropique lié aux transports motorisés et sont bénéfiques pour la santé humaine en encourageant l'activité physique. Par ailleurs, les transports en commun qui nécessitent le développement d'infrastructures spécifiques (chaussées, pistes cyclables ou espaces voiries) peuvent aider au rafraîchissement de l'air avec une intégration de la végétation en ville et une meilleure gestion des eaux pluviales. Une conception plus durable des villes peut aussi être privilégiée avec des aménagements végétalisés et en utilisant des matériaux du bâti thermiquement économes.

Les données infrarouges issues du radiomètre AVHRR des satellites NOAA permettent d'acquérir des informations sur la température des surfaces en enregistrant le spectre infrarouge thermique émis par les surfaces. Même s'il existe souvent une bonne corrélation, les températures de surface ne doivent pas être confondues avec la température de l'air. De plus, en ville, en raison de leur résolution spatiale (1,1 km), les données issues des satellites NOAA sont peu adaptées pour des mesures des températures sur des surfaces hétérogènes.

Hervé Quenol

Remerciements

Les auteurs remercient Joëlle Colosio et Marie Pouponneau de l'ADEME pour la relecture de l'article et leurs remarques enrichissantes.

Références

- [1] ONERC (Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique) : Février E., Vigié V., Hallegatte S., Garnaud B. Villes et adaptation au changement climatique, 2010, 158 p.
- [2] ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie). État de l'art des connaissances sur le lien qualité de l'air et îlot de chaleur urbain. Marché ADEME n° 1162c0032, rapport rédigé par BURGEAP, 2012, 102 p.
- [3] Conseil Régional d'Ile-de-France – ADEME (dans le cadre de l'étude de vulnérabilité du territoire francilien au changement climatique). Guide de recommandation pour lutter contre l'Effet d'Îlot de Chaleur Urbain à destination des collectivités territoriales, rapport rédigé par I. CARE, sous presse, 69 p.
- [4] ADEME. Adaptation au changement climatique – 12 fiches pour agir dans les collectivités locales, 2012, 41 p.
- [5] FONDATION MAIF : Dousset B., Gourmelon F. Évolution climatique et canicule en milieu urbain : apport de la télédétection à l'anticipation et à la gestion de l'impact sanitaire, 2011, 82 p.
- [6] IAU-IDF : Cordeau E., Valette E. Les îlots de chaleur – Répertoires des fiches connaissances, 2010, 58 p.
- [7] Vandentorren S., Suzan F., Medina S. *et al.* Mortality in 13 French Cities during the August 2003 Heat Wave. *American Journal of Public Health*, 2004 ; 94 : 1518-20.
- [8] Yoshikado H., Tsuchida M. High levels of winter air pollution under the influence of the urban heat island along the shore of Tokyo Bay. *J. Applied Meteor.* 1996 ; 35 : 1804-13.
- [9] Baseline Scenarios for the Clean Air For Europe (CAFE) Programme, Final Report (Corrected version), International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), 2005, 90 p.
- [10] Cantat O. L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps, 2008, 33 p. <http://norois.revues.org>
- [11] Pigeon G. Les échanges surface atmosphère en zone urbaine – projets clu-escompte et capitoul, 2007, 172 p.
- [12] Colombert M. Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville, 2010, 540 p.
- [13] Griffiths J.-F. *Climate and the Environment. The atmospheric impact on man.* London: Paul Elek 1976, 148 p.
- [14] Boucheriba F., Bourbia Pr. F. Impact de la géométrie des canyons urbains sur le confort thermique extérieur dans un climat semi-aride : cas du Coudiat de Constantine (Algérie), thèse, 2008, 253 p.
- [15] Bozonnet E., Allard F., Musy M. *et al.* URBAT : Approche méthodologique de la construction durable en milieu urbain : le microclimat urbain et son impact environnemental sur les constructions. Plan Urbanisme Construction Architecture, 2006, 97 p.
- [16] EHP (Environmental Health Perspectives). Urban Form and Extreme Heat Events: Are Sprawling Cities More Vulnerable to Climate Change Than Compact Cities? <http://ehp03.niehs.nih.gov/home.action>
- [17] INSP (Institut National de Santé Publique du Québec) : Giguere M. Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains, 2009, 95 p.
- [18] Gomez F., Gaja E., Reig A. Vegetation and climatic changes in a city. *Ecological Engineering* 1998 : 355-60.
- [19] Von Stülpnagel A. Klimatische Veränderungen in Ballungsgebieten unter besonderer Berücksichtigung der Ausgleichswirkung von Grünflächen, dargestellt am Beispiel von Berlin (West), PhD thesis, TU Berlin, Berlin, 1987, 173 p.
- [20] Dunnett N.-P., Kingsbury N. *Planting Green Roofs and Living Walls*, 2nd edition. Portland, Oregon, Timber Press 2008, 254 p.
- [21] Johnston J., Newton J. *Building Green, a guide to using plants on roofs, walls and pavements.* Greater London Authority, May 2004, 124 p.
- [22] Ca V.-T., Asaeda T., Abu E.-M. Reductions in air conditioning energy caused by a nearby park, *Energy and Buildings* 1998 ; 29 : 83-92.
- [23] Vinet J. Contribution à la modélisation thermo-aéroulque du microclimat urbain. Caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs, 2000, 250 p.
- [24] McPherson E.-G. Sacramento's parking lot shading ordinance: environmental and economic costs of compliance. *Landscape Urban Plan* 2001 ; 57 : 105–23.
- [25] Sandifer S., Givoni B. Thermal effects of vines on wall temperatures, comparing laboratory and field collected data. Proceedings of the annual conference of the American Solar Energy Society, Reno, NV, 2002, June 15-20, 6 p.
- [26] Fischetti M. Green roofs, living cover. *Scientific American* 2008 ; 298 : 104-5.
- [27] Liu K, Bass B. Performance of green roof systems. National Research Council Canada, Ottawa, 2005, 18 p.
- [28] Narumi D, Kondo A, Shimoda Y. The effect of the increase in urban temperature on the concentration of photochemical oxidants, 2008, 12 p.

- [29] Déoux S. L'air et la santé. Ed. Médecine-Sciences FLAMMARION, 2004, 305 p.
- [30] Benzerzour M. Transformations urbaines et variations du microclimat : application au centre ancien de Nantes et proposition d'un indicateur « morpho-climatique ». Thèse : université de Nantes : 2004, 343 p.
- [31] Grimmond CSB. The suburban energy balance: methodological considerations and results for a mid-latitude west coast city under winter and spring conditions. *Int. J. Climatol.* 1992 ; 12 : 481-97.
- [32] Klysik K. Spatial and seasonal distribution of anthropogenic heat emissions in Łódź, Poland, *Atmos. Environ.* 1996 ; 30 : 3397-3404.
- [33] Ichinose T, Shimodono K, Hanaki K. Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo. *Atmos. Environ.* 1999 ; 33 : 3897-3909.
- [34] Sailor DJ, Lu L. A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas. *Atmos. Environ.* 2004 ; 38 : 2737-48.
- [35] Yoshikado H, Tsuchida M. High levels of winter air pollution under the influence of the urban heat island along the shore of Tokyo Bay. *J. Applied Meteor.* 1996 ; 35 : 1804-13.
- [36] Batton-Hubert M, Roussel I, Rouchouse S. Pollution atmosphérique urbaine et climat local : l'exemple de l'agglomération stéphanoise en 1997. *Revue de géographie de Lyon* 1997 ; 72 (4) : 315-21.
- [37] Escourrou G. La spécificité du climat de l'agglomération parisienne. *Revue de géographie de Lyon* 1999 ; 65 (2) : 85-9.
- [38] Lai Li-Wei, Cheng Wan-Li. Air quality influenced by urban heat island coupled with synoptic weather patterns, *Science of the Total Environment* 2008, 10 p.
- [39] Sarrat C, Lemonsu A, Masson V, Guedalia D. Impact of urban heat island on regional atmospheric pollution, *Atmospheric environment* 2005, 16 p.
- [40] Ringenbach N. Bilan radiatif et flux de chaleur en climatologie urbaine : mesures, modélisation et validation sur Strasbourg, *thèse de l'université Louis Pasteur* 2004, 180 p.
- [41] Anquez P, Herlem A. Les îlots de chaleur dans la région métropolitaine de Montréal : causes, impacts et solutions. Chaire de responsabilité sociale et de développement durable ESG UAM, 2011, 16 p.
- [42] Gagné A, Dufour S, Saulnier M, St-Louis M. Le guide des options éco exclusivité de l'APCHQ : des options claires pour construire vert. Association provinciale des constructeurs d'habitations du Québec (APCHQ), 2008, 47 p.

