

# INTÉRÊT DES ESPACES VERTS ET OMBRAGÉS DANS LA PRÉVENTION DES IMPACTS SANITAIRES DE LA CHALEUR ET DE LA POLLUTION DE L'AIR EN ZONES URBAINES

MATHILDE PASCAL – KARINE LAIDI – PASCAL BEAUDEAU

Les décennies récentes ont été marquées par l'augmentation de la fréquence des vagues de chaleur (Stocker *et al.*, 2013). Dans le monde, le changement climatique a pu multiplier par dix la probabilité d'observer certaines des vagues de chaleur survenues entre 2011 et 2014 (Organisation météorologique mondiale, 2016). En France, Météo-France observe un doublement des vagues de chaleur depuis 1980 par rapport à la période antérieure (Soubeyroux *et al.*, 2016), et une multiplication de records de chaleur battus depuis 2015. Par exemple, le 21 juin 2017 a été la journée la plus chaude jamais enregistrée pour un mois de juin depuis 70 ans avec 26,4 °C de moyenne sur la France.

Alors que les modèles climatiques pointent une poursuite du réchauffement quelle que soit l'évolution des émissions de gaz à effet de serre (GES), s'adapter à un monde plus chaud est devenu une priorité. Cette préoccupation est particulièrement prégnante dans les grands centres urbains, qui combinent une population importante à des conditions d'exposition aggravées par l'îlot de chaleur urbain (ICU). L'ICU se caractérise par l'élévation de la température en zone urbaine par rapport aux zones rurales voisines. En France, des ICU de 7 à 8 °C peuvent par exemple être observés à Toulouse, Strasbourg ou Paris pendant les nuits d'été (Lambert-Habib *et al.*, 2013). Des variations importantes de températures existent aussi en ville, en fonction de l'occupation du sol et de la situation météorologique, conduisant à des micro-ICU intra-urbains. L'ICU a été identifié comme un facteur de risque important de décès pendant la canicule de 2003 à Paris (Dousset *et al.*, 2011). Au Royaume-Uni, l'ICU aurait contribué à environ la moitié de la mortalité totale observée en août 2003 (Heaviside *et al.*, 2015, 2016).

La végétalisation des villes apparaît comme une des stratégies possibles pour lutter contre l'ICU et rendre la ville moins vulnérable à la chaleur (Gagot *et al.*, 2013). Les mécanismes biologiques et physicochimiques permettant à la végétation d'influencer le climat urbain, de modifier les micro-ICU sont de mieux en mieux connus et désormais modélisables.

L'amélioration de la qualité de l'air est également une priorité de plus en plus fréquente des villes. En France, la pollution par les particules fines (particules de diamètre inférieur à 2,5 µg/m<sup>3</sup>) est responsable d'au moins 48 000 décès prématurés par an, soit huit mois d'espérance de vie perdue à 30 ans (Pascal *et al.*, 2016). La végétalisation est présentée comme pouvant contribuer à l'amélioration de la qualité de l'air dans les villes (Escobedo *et al.*, 2011).

Ainsi, la végétalisation est vue comme un moyen d'améliorer la santé et la qualité de vie des habitants (Beaudoin et Levasseur, 2017), et répond à une demande sociétale croissante. Les projets

urbains de végétalisation se développent [par exemple à Beijing (Ren *et al.*, 2013) ou à Paris (Lambert-Habib *et al.*, 2013)], et la recherche sur les bénéfices sanitaires associés aux espaces verts s'est étoffée ces dernières années (Beaudoin et Levasseur, 2017 ; OMS, 2016 ; Cuny *et al.*, 2015).

Cet article se propose de discuter le potentiel et l'intérêt des stratégies de végétalisation comme outil de prévention des impacts sanitaires de la chaleur en ville. Il ne s'agit pas d'une revue exhaustive de la littérature sur les mécanismes biologiques et physicochimiques impliqués ni sur les études épidémiologiques, mais d'une tentative de mettre en perspective des connaissances interdisciplinaires et d'identifier les possibles cobénéfices et synergies.

## MÉCANISMES D'ACTION DE LA VÉGÉTATION SUR L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN

L'action principale des arbres et de la végétation sur l'ICU est liée à l'ombre et à l'évapotranspiration. Les feuilles et les branches des arbres réduisent la quantité de rayonnement solaire atteignant le sol, *via* des mécanismes d'absorption pour la photosynthèse et de réflexion. En été, selon l'essence, la canopée laisse passer de 10 % à 30 % du rayonnement solaire. La température de la surface sous la canopée en est rafraîchie, et la chaleur transmise par cette surface aux bâtiments et à l'atmosphère diminuée (ainsi que le rayonnement UV) (EPA, 2008). Les flux d'eau à travers un couvert végétal ont également une action de rafraîchissement du milieu, dans la mesure où le passage de l'eau de l'état liquide à l'état de vapeur nécessite une certaine quantité de chaleur prélevée dans l'air (chaleur latente). Ces flux d'eau résultent de l'évapotranspiration, c'est-à-dire la somme de l'évaporation du sol et de la pluie interceptée par le couvert végétal, et de la transpiration des plantes. Cette dernière provient du transfert d'eau dans la plante en provenance du sol vers l'atmosphère et de sa vaporisation au niveau des stomates de ses feuilles.

La combinaison de l'ombre et de l'évapotranspiration permet de diminuer la température de manière importante, et de nombreuses études proposent dans la littérature des mesures ou des modèles de l'influence de la végétation sur la température. Elles montrent que la température est globalement plus fraîche dans les espaces verts (Gago *et al.*, 2013 ; Qiu *et al.*, 2013), créant ainsi des îlots de fraîcheur en ville. L'intensité du rafraîchissement dépend du type de végétation, du climat et de la forme urbaine de la ville. Cet effet rafraîchissant s'observe également au-delà des espaces verts. Une revue récente de la littérature documente des variations de températures entre espaces verts et espaces construits variant de 0,5 °C à 4 °C selon la ville et le type d'espaces verts, et avec une influence pouvant s'étendre jusqu'à 2 km autour de l'espace vert (Qiu *et al.*, 2013). Aux États-Unis, les banlieues avec des arbres anciens peuvent être 2 °C à 3 °C plus fraîches que les banlieues récentes sans arbre (EPA, 2008). À Londres, le parc de Kensington Gardens peut réduire la température de l'air jusqu'à 4 °C, dans un rayon de 400 m autour du parc, durant les nuits les plus chaudes (Doick *et al.*, 2014).

La littérature montre que les parcs et les espaces verts créent des îlots de fraîcheur au sein de l'ICU et réduisent la température. Ils contribuent également à réduire la consommation énergétique pour la climatisation et le chauffage, et à amortir les fluctuations locales de température induites par les matériaux de construction. L'intensité du rafraîchissement dépend en partie de la taille des parcs et espaces verts, mais la forme des parcs et la nature de la végétation sont déterminantes (Ren *et al.*, 2013). La pelouse peut avoir un impact négatif sur la formation des îlots de fraîcheur, ou n'avoir un impact positif que la nuit (Gago *et al.*, 2013). Enfin, l'effet de rafraîchissement par évapotranspiration nécessite que la végétation ne soit pas en état de stress hydrique important : en période de canicule notamment, seul l'arrosage permet à la végétation de demeurer efficace pour réduire l'ICU (Météo-France, 2012).

## MÉCANISMES D'ACTION DE LA VÉGÉTATION SUR LA POLLUTION DE L'AIR

La végétation intervient en ville comme absorbant pour les polluants gazeux ( $\text{NO}_x$ , Ozone, COV,  $\text{CO}_2$ ), et piège pour les polluants particulaires, avec une efficacité dépendant de l'espèce, du climat, et du polluant. La capacité d'accumulation des PM peut ainsi varier de 1 à 15 selon l'espèce d'arbre étudiée. Par exemple, en Norvège, le Bouleau blanc (*Betula pendula*) peut accumuler sur une année de 24 à 55  $\mu\text{g}$  de  $\text{PM}/\text{cm}^2$ , et l'Érable plane (*Acer platanoides*) de 6 à 13  $\mu\text{g}$  de  $\text{PM}/\text{cm}^2$  (Sæbø *et al.*, 2012). Les polluants et les conditions climatiques jouent sur la capacité des arbres à rester en bonne santé et à maintenir une bonne capacité d'absorption et de piégeage dans le temps.

Une revue de la littérature sur l'influence des arbres sur la pollution *via* les mécanismes de piégeage et de dispersion conclut que la végétation doit avoir une surface foliaire importante, tout en permettant le passage de l'air, et doit être proche des sources d'émissions des polluants. La proximité à la source augmente localement les concentrations des polluants, et donc la quantité de polluant piégé (Janhäll, 2015). Des articles proposent des indications détaillées sur les caractéristiques à prendre en compte pour utiliser la végétation comme barrière antipollution en bordure des routes, en termes d'essences, de localisation, de maintenance, et de sécurité pour les usagers (Baldauf, 2017).

Les études de l'influence de la végétation sur les émissions et les concentrations dans un contexte urbain sont relativement nombreuses, et trouvent une influence généralement positive, à l'exception de certaines rues « canyons » (rues étroites et bordées de bâtiments hauts). L'alignement d'arbres dans ce type de rue peut conduire à une augmentation des concentrations en polluants en fonction du type d'espèce (densité foliaire, port...) (Abhijith *et al.*, 2017). Dans un modèle numérique, l'augmentation des concentrations de polluants à cause des arbres dans une rue canyon a par exemple été estimée à moins de 13 % mais avec des influences locales pouvant être très importantes (de - 87 % à + 1 378 %) (Gromke et Blocken, 2014). Toutefois, des études expérimentales ont rapporté que les haies<sup>(1)</sup> pouvaient diminuer les niveaux de pollution de 24 % à 61 % dans les rues « canyons » (Abhijith *et al.*, 2017). Dans les autres configurations de rues, plusieurs études expérimentales ont retrouvé des diminutions de 15 % à 60 % des concentrations de polluants (dont particules fines, ozone,  $\text{NO}_2$ ) grâce à des barrières végétales<sup>(2)</sup> (Abhijith *et al.*, 2017). À Strasbourg, l'ensemble de la végétation de la ville (forêt, parc, résidentiel...) absorberait près de 14 tonnes de  $\text{NO}_2$ , 56 tonnes d'ozone, 17 tonnes de  $\text{PM}_{10}$  et 5 tonnes de  $\text{PM}_{2,5}$  par an. Les répercussions en termes de concentrations seraient toutefois inférieures à 1 % à l'échelle de la ville (Selmi *et al.*, 2016). À Madrid, il a été estimé que la suppression de la forêt urbaine<sup>(3)</sup> pourrait se traduire par une augmentation de 15,6 % des niveaux d'ozone dans les zones voisines (Garcia-Gómez *et al.*, 2016).

Les impacts de la végétation sur la qualité de l'air sont également illustrés par les campagnes de mesures. À Barcelone, une étude sur 36 écoles a mis en évidence des niveaux de  $\text{PM}_{2,5}$  et de  $\text{NO}_2$  moindres dans les écoles dont l'environnement dans un rayon de 50 m était plus vert. Le classement s'appuyait sur des images satellites de l'indice de végétation par différence normalisé (NDVI)<sup>(4)</sup> (Dadvand *et al.*, 2015). À Beijing, un programme de végétalisation en 2012 aurait permis de faire baisser les concentrations annuelles moyennes de  $\text{PM}_{2,5}$  de 0,6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Chen *et al.*, 2015). Les résultats semblent plus contrastés (niveaux plus faibles ou équivalents) selon les

(1) Les haies sont des ensembles d'arbustes et de buissons d'une hauteur limitée, généralement utilisées pour servir de séparation. Elles sont moins hautes et moins épaisses que les arbres, mais possèdent une plus grande densité foliaire.

(2) Les barrières végétales comme des arbres, arbustes, buissons ou haies se développant de part et d'autre des routes.

(3) Les forêts urbaines sont des forêts ou boisements anciens ou récents poussant dans une aire urbaine.

(4) Le NDVI compare les données du rouge et de l'infrarouge. Les valeurs positives de l'indice correspondent à des formations végétales, les valeurs les plus élevées correspondant à des couverts plus denses.

études pour d'autres polluants, notamment le NO<sub>2</sub> (Irga *et al.*, 2015 ; Klingberg *et al.*, 2017 ; Setälä *et al.*, 2013).

Enfin, les arbres émettent des pollens et des terpènes. Concernant les pollens, une attention doit être portée aux choix d'espèces non allergisantes (RNSA, sd). Les terpènes sont des précurseurs de l'ozone, un polluant néfaste pour la santé. Mais ces terpènes sont également identifiés par certaines études comme favorables à la santé (Cho *et al.*, 2017 ; Park *et al.*, 2010 ; Tsuetsuga *et al.*, 2010). L'impact global de ces émissions est donc difficile à cerner. Les études soulignant les bénéfices des terpènes sont toutefois menées principalement dans des forêts naturelles, et il est possible que leurs conclusions ne s'appliquent pas dans un contexte urbain (par exemple, les composés émis par les arbres pourraient être différents dans un espace naturel et dans un espace urbain, et interagir de manière différente avec les autres polluants).

Ainsi, la littérature indique globalement un effet favorable de la végétalisation sur la pollution de l'air. Toutefois, à une échelle fine, la végétation peut aggraver l'exposition en empêchant la dispersion des polluants. Ces situations étant bien identifiées, il est possible de mettre en place des stratégies de végétalisation limitant ces effets négatifs.

## ÉTUDES ÉPIDÉMIOLOGIQUES PRENANT EN COMPTE ICU ET DONNÉES DE VÉGÉTATION

Les études épidémiologiques intégrant des données de végétation en ville s'intéressent principalement à l'impact de la chaleur et à l'influence de l'ICU.

Dans les suites immédiates de la canicule de 2003, une étude cas-témoins avait été menée sur les personnes décédées à leur domicile à Paris, Orléans, Tours, et dans le Val-de-Marne (Bretin *et al.*, 2005). Parmi les nombreux facteurs de risques investigués dans cette enquête, un indice de végétation, calculé à partir d'images satellites prises le 9 août 2003 et représentant la proportion de la surface autour du domicile, ayant une activité significative de photosynthèse dans des rayons de 50, 100 et 200 m autour du domicile, avait été intégré dans l'analyse. L'analyse univariée montrait que la présence de végétation autour du domicile avait un effet protecteur : les domiciles dont l'environnement proche (100 m) était complètement végétalisé présentaient un risque de décès trois fois plus faible par rapport aux domiciles sans végétation (OR<sup>(5)</sup> 0,37 [IC 95 % 0,15-0,90]). Cet indice n'a pas été inclus dans l'analyse multivariée, un indice représentant la température au sol et très corrélé à l'indice de végétation, ayant été préféré. Les résultats trouvaient un OR de 1,81 [1,26 ; 2,6] pour une augmentation de 1 °C de cet indice thermique, montrant que l'ICU a contribué significativement à la mortalité en 2003 (Bretin *et al.*, 2005). Il est donc probable que la végétation a eu un effet protecteur pendant la vague de chaleur d'août 2003. Une autre étude s'est penchée sur la mortalité des personnes âgées dans les îlots Regroupés pour l'Information Statistique (IRIS) parisiens pendant les vagues de chaleur entre 2004 et 2009. Cette étude conclut que la présence d'espaces verts avait un effet protecteur (Benmarhnia *et al.*, 2017).

À Séoul, l'influence du taux de végétalisation des quartiers sur la relation température-mortalité a été étudiée pour la période 2000-2009 en s'appuyant sur des données NDVI. L'augmentation de la mortalité pour chaque degré au-dessus du percentile 90 de la distribution des températures était de 4,1 % [2,3 ; 5,9] pour les zones peu végétalisées, 3,0 % [0,2 ; 5,9] pour les zones moyennement végétalisées, et 2,2 % [0,5 ; 5,0] pour les zones très végétalisées. L'analyse était ajustée sur le nombre de personnes de plus de 65 ans, ainsi que sur la part des personnes bénéficiaires

(5) L'odds ratio (OR) est utilisé en épidémiologie pour mesurer l'influence d'un facteur sur la survenue d'un évènement sanitaire. Un OR inférieur à 1 signifie que l'évènement sanitaire considéré est plus faible dans le groupe exposé, et que le facteur étudié a un effet protecteur. À l'inverse, un OR supérieur à 1 signifie un effet aggravant.

d'aides sociales. Une limite était toutefois la disponibilité d'une seule station de mesure pour la température (Son *et al.*, 2016) Les différences observées peuvent indiquer une différence dans l'exposition (l'augmentation de 1 °C mesurée à la station de mesure ne représenterait pas la même valeur dans les différentes zones), ou une action protectrice plus large de la végétation.

À Toronto, l'examen de l'origine des appels aux urgences (ambulances) pour causes liées à la chaleur pendant les vagues de chaleur montre que le nombre d'appels était en moyenne cinq fois plus important dans les quartiers avec peu d'arbres (c'est-à-dire avec 5 % de la surface couverte par la canopée) que dans les autres. Il était quinze fois plus important dans ces quartiers peu végétalisés que dans les quartiers très boisés (c'est-à-dire avec 70 % de la surface couverte par la canopée). Le nombre d'appels diminuait fortement entre les quartiers avec moins de 5 % de surface de canopée, et ceux avec de 5 à 10 % de surface de canopée. Les auteurs en concluent qu'une augmentation même faible de la canopée à Toronto permettrait de réduire de manière importante le nombre d'appels aux urgences liés à la chaleur (Graham *et al.*, 2016). Il s'agit toutefois d'une analyse univariée centrée sur l'occupation des sols et la canopée. La prise en compte d'autres variables socioéconomiques pourrait affecter cette réponse.

Selon une approche différente, à Kuala Lumpur, une enquête par questionnaire a interrogé 1 050 travailleurs, majoritairement âgés de moins de 30 ans, sur leur expérience de l'ICU et sur les conséquences sur leur santé physique et mentale. Une majorité des participants a rapporté avoir éprouvé de la fatigue (83,1 %) ou des crampes (72,9 %) en lien avec la chaleur, avoir réduit leur activité à l'extérieur (90,6 %), avoir eu des comportements agressifs (59,7 %) ou s'être vu prescrire des arrêts maladie (57,3 %). L'analyse montre que les participants travaillant dans un quartier avec peu de mesures pour lutter contre l'ICU (dont peu de mesures portant sur la végétation) avaient un risque beaucoup plus élevé de déclarer plusieurs effets sanitaires en lien avec la chaleur que ceux vivant dans des quartiers avec beaucoup de mesures visant à réduire l'ICU (OR 18 [11-29]) (Wong *et al.*, 2017). Malgré les limites inhérentes à des effets de santé auto-déclarés, cette étude montre que l'aggravation de la chaleur par l'ICU a des conséquences sur toute la population, y compris sur des jeunes actifs.

## **ÉVALUATIONS QUANTITATIVES DES BÉNÉFICES SANITAIRES ASSOCIÉS À LA RÉDUCTION DE L'ICU OU DE LA POLLUTION PAR LA VÉGÉTATION**

L'évaluation quantitative des impacts sanitaires (EQIS) est une méthode qui permet d'évaluer les répercussions sanitaires attendues de modifications de l'environnement. Elle combine des données environnementales mesurées ou modélisées et des connaissances épidémiologiques. Il est intéressant de voir apparaître dans la littérature des EQIS portant sur les espaces verts, la pollution de l'air et l'ICU. Ceci indique qu'une partie de la communauté scientifique estime que l'état des connaissances environnementales et épidémiologiques est déjà assez stabilisé et cohérent sur ces sujets pour pouvoir appliquer cette méthode.

Nowak *et al.* ont modélisé l'influence des arbres sur les concentrations annuelles moyennes de  $PM_{2,5}$  dans 10 villes des États-Unis d'Amérique, puis réalisé une EQIS pour transcrire les impacts sanitaires associés (Nowak *et al.*, 2013). Leur modèle estime que les arbres réduisent la concentration annuelle moyenne de  $PM_{2,5}$  de 0,006 % à San Francisco ou Philadelphie à 0,03 % à Atlanta. Exprimés en impact sanitaire, ces différences représentent 19 décès par an sur l'ensemble des villes (dont 7 à New York) (Nowak *et al.*, 2013).

Aux États-Unis, des simulations d'ICU correspondant à différents projets d'aménagements urbains ont été utilisées pour évaluer les bénéfices possibles à Atlanta, Philadelphie et Phoenix en 2050.

Le projet intégrait également une projection des évolutions sociodémographiques. Les auteurs ont stratifié les résultats par âge, revenu moyen et ethnicité des quartiers, afin d'identifier si les projets retenus pouvaient aggraver des inégalités sociales de santé. Dans toutes les villes, les résultats indiquent une diminution attendue de la mortalité liée à la chaleur pour tous les âges, plus importante chez les plus de 45 ans. À Philadelphie et Phoenix, la mortalité évitée est comparable selon les revenus moyens des quartiers, alors qu'à Atlanta elle est 1,9 fois plus importante dans les quartiers à faibles revenus (les impacts sur les revenus moyens et élevés étant par ailleurs similaires) (Vargo *et al.*, 2016).

À Melbourne, l'influence de plusieurs scénarios de végétalisation sur la température intérieure de différents logements a été modélisée pour 2009, et sous des scénarios climatiques pour 2030 et 2050. Ces estimations ont ensuite été intégrées dans une EQIS évaluant l'impact de la chaleur sur la mortalité. Les résultats indiquent un potentiel important de réduction de la mortalité liée à la chaleur, visible dès 2009. Augmenter la surface végétalisée de 15 % à 33 % réduirait la mortalité de 5 à 28 % (Chen *et al.*, 2014). Le choix de mener une EQIS à l'échelle des bâtiments induit certainement une incertitude plus importante dans les résultats qu'une analyse menée à l'échelle de la ville.

À Rome, des simulations d'aménagements du campus de l'université en centre-ville ont permis d'évaluer des indices de confort thermique, transcrits ensuite en probabilité d'aggravation ou de diminution du risque pour la santé. Selon les auteurs, l'approche combinant des interventions sur la couleur des matériaux, les toits et la végétation, pourrait réduire le risque sanitaire de 60 % (Salata *et al.*, 2017).

Ces études sont fondées sur des modélisations et ne prennent en compte que l'influence directe de la végétalisation sur la température ou la concentration de polluants, immédiatement répercutée en population exposée et incrément de risque. En ne ciblant que la température ou que la pollution elles ne donnent ainsi qu'une vision partielle du bénéfice sanitaire. Le développement des connaissances et l'intérêt pour cette thématique devraient aboutir à des EQIS intégrant ces deux risques simultanément. Idéalement, ces futures études devraient également prendre en compte les interactions entre températures et pollution de l'air sur la formation de polluants secondaires et sur les synergies en termes sanitaires.

## **BÉNÉFICES SANITAIRES INDUITS À PLUS LONG TERME DES STRATÉGIES DE VÉGÉTALISATION COMME OUTIL D'ADAPTATION À LA CHALEUR**

L'approche proposée par Markevych *et al.* pour conceptualiser les fonctions des espaces verts est intéressante pour appréhender l'ensemble des bénéfices sanitaires possibles associées à la végétalisation. Ils distinguent la fonction de réduire le danger (par exemple réduire l'ICU et la pollution ainsi que décrire ci-dessus, mais également le bruit), de restaurer les capacités de résilience (par exemple améliorer l'attention, réduire le stress...) et de construire des capacités de résilience (par exemple encourager l'activité physique, faciliter la cohésion sociale...) (Markevych *et al.*, 2017). Chacun de ces trois facteurs peut contribuer fortement à l'amélioration de la santé. Dans l'exemple de la chaleur et de la pollution, plusieurs synergies positives sont à attendre (figure 1, p. 359).

La capacité de la végétation à réduire l'exposition globale à l'échelle de la ville a été largement étudiée, comme discuté ci-dessus. L'utilisation plus ponctuelle des espaces verts comme moyen de réduire l'exposition individuelle pendant les canicules a été beaucoup moins prise en compte. Si les espaces verts peuvent être des îlots de fraîcheur, les quelques études disponibles montrent

qu'une majorité des personnes âgées restent chez elles pendant les vagues de chaleur, car elles perçoivent leur logement comme plus frais et plus sûr que l'extérieur (Klinenberg, 2002 ; Arnberger *et al.*, 2017). Une analyse portant spécifiquement sur les caractéristiques des espaces verts susceptibles d'être utilisés comme îlot de fraîcheur par les personnes âgées pendant les vagues de chaleur a été menée à Vienne (Autriche). Elle montre que 55 % des participants restaient chez eux pendant les canicules, majoritairement parce qu'ils avaient le sentiment qu'il y faisait meilleur (73,8 %) ou parce que sortir était trop fatigant (51,4 %). Quatorze pour cent indiquaient n'avoir aucun lieu où ils avaient envie d'aller. Sur la base des espaces verts fictifs proposés aux participants, les auteurs concluent que la configuration idéale pour servir d'îlot de fraîcheur utilisé par les personnes âgées serait un espace vert avec des arbres, un plan d'eau, quelques animaux, des toilettes, accessible à moins de 5 minutes à pied *via* une rue ombragée. L'accessibilité était un des paramètres déterminants, en termes de temps de marche et de nature de l'environnement (rues ombragées ou non) (Arnberger *et al.*, 2017).

**FIGURE 1**  
**SCHÉMATISATION DE L'INFLUENCE GLOBALE DE LA VÉGÉTATION**  
**SUR LES IMPACTS SANITAIRES DE LA POLLUTION DE L'AIR ET DE LA CHALEUR**  
 (Les traits plus gros représentent les aspects qu'on sait intégrer dans des EQIS.)



Plus largement, les espaces verts peuvent jouer positivement sur plusieurs facteurs de risques déterminants lors des vagues de chaleur, tels que l'isolement social ou la survenue de pathologies chroniques. Par exemple, en favorisant la marche chez les personnes âgées, les espaces verts contribuent à réduire les risques de pathologies chroniques (Beaudoin et Levasseur, 2017). En offrant des espaces de rencontres, ils contribuent à réduire l'isolement social (Beaudoin et Levasseur, 2017).

Enfin, certaines études concluent que les espaces verts incitent les personnes à adopter des transports actifs (Beaudoin et Levasseur, 2017), ce qui *in fine* se traduit par une baisse des émissions de polluants, par une meilleure santé physique et mentale des personnes, et donc là encore par une moindre vulnérabilité à la chaleur et à la pollution (figure 1, p. 359). De même, l'influence positive de la végétation sur la consommation énergétique liée au chauffage et à la climatisation se traduit par moins d'émissions polluantes, moins d'émissions de GES, et à terme contribue à limiter l'amplitude du réchauffement climatique.

Ainsi, les connaissances actuelles permettent de développer des stratégies de végétalisation adaptées (par exemple : choix des essences, localisation, infrastructures d'irrigation) pour optimiser les bénéfices en termes de réduction des ICU, d'amélioration du confort thermique en hiver et de qualité de l'air (EPA, 2008 ; Janhäll, 2015 ; Baldhauf, 2017 ; Abhijith, 2017). Les caractéristiques des espaces verts facilitant leur fréquentation par les personnes âgées ou leur utilisation pour des activités sportives et sociales sont également mieux connues : forme, accessibilité, aménagements récréatifs, bancs, toilettes, présence d'animaux et de plantes, sécurité... (Beaudoin et Levasseur, 2017). La végétation en ville s'accompagne de bénéfices sanitaires potentiellement importants, dont seule une partie peut être quantifiée par les outils actuels.

## CONCLUSIONS

L'influence positive de la végétation en ville sur l'ICU est bien documentée et apparaît comme un outil majeur de l'adaptation au changement climatique. La mise en œuvre de stratégies de végétalisation minimisant les impacts négatifs, et permettant notamment d'améliorer la qualité de l'air, est facilitée par les nombreux travaux qui identifient les stratégies de végétalisation les plus adaptées en fonction du climat, de la topographie, et des objectifs.

Les projets de végétalisation peuvent s'accompagner d'un risque de gentrification (OMS, 2016). L'OMS souligne la nécessité de la concertation avec la population riveraine, pour que la création d'espaces verts profite à toutes les catégories sociales et contribue à la réduction des inégalités sociales de santé (OMS, 2016).

Les bénéfices sanitaires attendus vont au-delà de ce qui peut être quantifié en considérant uniquement les effets directs de la végétation sur la température et sur les concentrations en polluants. La végétation et la nature en ville sont associées à une amélioration de la santé physique et mentale dans la littérature (Beaudoin et Levasseur, 2017). Peu de données sont disponibles en France sur ces sujets mais l'augmentation du nombre d'études épidémiologiques sur les liens entre espaces verts et santé ces dernières années donne des pistes pour des études futures (Markevych *et al.*, 2017). Développer de la connaissance en France afin d'accompagner plus efficacement les politiques publiques est donc possible et souhaitable. Notamment, la diversité des approches utilisées pour quantifier les impacts sanitaires associés aux ICU souligne la complexité de réaliser des EQIS sur la température. Contrairement à la pollution de l'air pour laquelle la méthode est bien rodée, des développements sont encore nécessaires pour réaliser des EQIS robustes sur les ICU. L'enjeu est important pour les décideurs locaux, puisqu'il permettrait d'illustrer les bénéfices sanitaires attendus des politiques d'urbanisme. Le besoin de développer l'approche épidémiologique est d'autant plus fort que les modèles climatiques sont déjà disponibles. Par exemple, sous un scénario de végétalisation de tous les espaces de sol nu « disponibles » et de la moitié de la surface des rues dont la largeur est supérieure à 15 m à Paris, et en imposant un arrosage suffisant, l'ICU parisien pourrait être diminué de 1 à 3 °C, avec une diminution maximale instantanée des températures à 2 m de 3 à 5 °C notamment en journée (Météo-France, 2012).



Le verdissement de la ville apparaît comme une mesure prometteuse d'adaptation de la ville à la chaleur et de lutte contre les ICU, compte-tenu de l'ensemble des retombées positives escomptées.

**Mathilde PASCAL**  
Santé publique France  
12 rue du val d'Osne  
F-94415 SAINT MAURICE  
(Mathilde.Pascal@santepubliquefrance.fr)

**Karine LAIDI**  
Santé publique France  
12 rue du val d'Osne  
F-94415 SAINT MAURICE  
(Karine.Laaidi@santepubliquefrance.fr)

**Pascal BEAUDEAU**  
Santé publique France  
12 rue du val d'Osne  
F-94415 SAINT MAURICE  
(Pascal.Beaudeau@santepubliquefrance.fr)

## BIBLIOGRAPHIE

- ABHIJITH K.V., KUMAR P., GALLAGHER J., McNABOLA A., BALDAUF R., PILLA F. *et al.*, 2017. Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments – A review. *Atmospheric Environment*, 162, pp. 71-86.
- ARNBERGER A., ALLEX B., EDER R., EBENBERGER M., WANKA A., KOLLAND F. *et al.*, 2017. Elderly resident's uses of and preferences for urban green spaces during heat periods. *Urban Forestry & Urban Greening*, 21(Supplement C), pp. 102-115.
- BALDAUF R., 2017. Roadside vegetation design characteristics that can improve local, near-road air quality. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 52, pp. 354-361.
- BEAUDOIN M.L., LEVASSEUR M.E., 2017. *Verdire les villes pour la santé de la population*. Institut national de santé publique du Québec. 104 p.
- BENMARHIA T., KIHAL-TALANTIKITE W., RAGETTI M.S., DEGUEN S., 2017. Small-area spatiotemporal analysis of heatwave impacts on elderly mortality in Paris: A cluster analysis approach. *Science of The Total Environment*, 592(Supplement C), pp. 288-294.
- BRETIN P., VANDENTORREN S., ZEGHNOUN A., LEDRANS M., 2005. Étude des facteurs de risque de décès des personnes âgées résidant à domicile durant la vague de chaleur d'août 2003. Juillet 2004. Saint-Maurice : Institut de veille sanitaire.
- CHEN B., WANG X., CHEN J., ZHU J., LIU J., 2015. Forestry strategies against PM<sub>2.5</sub> pollution in Beijing. *Forestry Chronicle*, 91(3), pp. 233-237.
- CHEN D., WANG X., THATCHER M., BARNETT G., KACHENKO A., PRINCE R., 2014. Urban vegetation for reducing heat related mortality. *Environmental Pollution*, 192, pp. 275-284.
- CHO K.S., LIM Y-r, LEE K., LEE J., LEE J.H., LEE I.S., 2017. Terpenes from Forests and Human Health. *Toxicological Research*, 33(2), pp. 97-106.
- CUNY M.A., VERROUGSTRAETE L., THIBAUDON M., BONHÊME L., BESANCENOT J.P., CUNY D., 2015. Effects of urban vegetation on climate, air pollution and health. *Environnement, Risques et Santé*, 14(6), pp. 482-489.
- DADVAND P., RIVAS I., BASAGAÑA X., ALVAREZ-PEDREROL M., SU J., DE CASTRO PASCUAL M. *et al.*, 2015. The association between greenness and traffic-related air pollution at schools. *Science of the Total Environment*, 523, pp. 59-63.

- DOICK K.J., PEACE A., HUTCHINGS T.R., 2014. The role of one large greenspace in mitigating London's nocturnal urban heat island. *Science of The Total Environment*, 493(Supplement C), pp. 662-671.
- DOUSSET B., GOURMELON F., LAAIDI K., ZEGHNOUN A., GIRAUDET E., BRETIN P. *et al.*, 2011. Satellite monitoring of summer heat waves in the Paris metropolitan area. *International Journal of Climatology*, 31(2), pp. 313-323.
- EPA, 2008. *Trees and Vegetation. In: Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies*. Draft. US Environmental protection agency.
- ESCOBEDO F.J., KROEGER T., WAGNER J.E., 2011. Urban forests and pollution mitigation: Analyzing ecosystem services and disservices. *Environmental Pollution*, 159, pp. 2078-2087.
- GAGO E.J., ROLDAN J., PACHECO-TORRES R., ORDÓÑEZ J., 2013. The city and urban heat islands: A review of strategies to mitigate adverse effects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, pp. 749-758.
- GARCIA-GÓMEZ H., AGUILLAUME L., IZQUIETA-ROJANO S., VALIÑO F., ÀVILA A., ELUSTONDO D. *et al.*, 2016. Atmospheric pollutants in peri-urban forests of *Quercus ilex*: evidence of pollution abatement and threats for vegetation. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(7), pp. 6400-6413.
- GRAHAM D.A., VANOS J.K., KENNY N.A., BROWN R.D., 2016. The relationship between neighbourhood tree canopy cover and heat-related ambulance calls during extreme heat events in Toronto, Canada. *Urban Forestry & Urban Greening*, 20(Supplement C), pp. 180-186.
- GROMKE C., BLOCKEN B., 2014. Influence of avenue-trees on air quality at the urban neighborhood scale. Part II: traffic pollutant concentrations at pedestrian level. *Environmental Pollution*, 196C, pp. 176-184.
- HEAVISIDE C., CAI X.M., VARDOULAKIS S., 2015. The effects of horizontal advection on the urban heat island in Birmingham and the West Midlands, United Kingdom during a heatwave. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 41(689), pp. 1429-1441.
- HEAVISIDE C., VARDOULAKIS S., CAI X.M., 2016. Attribution of mortality to the urban heat island during heatwaves in the West Midlands, UK. *Environmental Health: A Global Access Science Source*, 15.
- IRGA P.J., BURCHETT M.D., TORPY F.R., 2015. Does urban forestry have a quantitative effect on ambient air quality in an urban environment? *Atmospheric Environment*, 120, pp. 173-181.
- JANHÄLL S., 2015. Review on urban vegetation and particle air pollution - Deposition and dispersion. *Atmospheric Environment*, 105, pp. 130-137.
- KLINENBERG E., 2002. *Heat Wave: a social autopsy of disaster in Chicago*. Chicago: The university of Chicago press books. 328 p.
- KLINGBERG J., BROBERG M., STRANBERG B., THORSSON P., PLEIJEL H., 2017. Influence of urban vegetation on air pollution and noise exposure – A case study in Gothenburg, Sweden. *Science of the Total Environment*, 599-600, pp. 1728-1739.
- LAMBERT-HABIB M.L., HIDALGO J., FEDELE C., LEMONSU A., BERNARD C., 2013. How is climatic adaptation taken into account by legal tools? Introduction of water and vegetation by French town planning documents. *Urban Climate*, 4(Supplement C), pp. 16-34.
- MARKEYVCH I., SCHOIERER J., HARTIG T., CHUDNOVSKY A., HYSTAD P., DZHAMBOV A.M. *et al.*, 2017. Exploring pathways linking greenspace to health: Theoretical and methodological guidance. *Environmental Research*, 158(Supplement C), pp. 301-317.
- MÉTÉO-FRANCE, 2012. *Étude pluridisciplinaire des impacts du changement climatique à l'échelle de l'Agglomération parisienne - Rapport final du projet*. Paris : Météo-France.
- NOWAK D.J., HIRABAYASHI S., BODINE A., HOEHN R., 2013. Modeled PM<sub>2.5</sub> removal by trees in ten U.S. cities and associated health effects. *Environmental Pollution*, 178, pp. 395-402.
- OMS, 2016. *Urban green spaces and health: a review of evidence*. Bonn, Allemagne : OMS Europe.
- ORGANISATION MÉTÉOROLOGIQUE MONDIALE (OMM), 2016. *Le Climat mondial 2011-2015*. Genève, Suisse : Organisation météorologique mondiale.
- PARK B.J., TSUNETSUGU Y., KASETANI T., KAGAWA T., MIYAZAKI Y., 2010. The physiological effects of Shinrin-yoku (taking in the forest atmosphere or forest bathing): evidence from field experiments in 24 forests across Japan. *Environmental health and preventive medicine*, 15(1), pp. 18-26.
- PASCAL M., DE CROUY CHANEL P., WAGNER V., CORSO M., TILLIER C., BENTAYEB M. *et al.*, 2016. The mortality impacts of fine particles in France. *Science of the Total Environment*, 571, pp. 416-425.
- QIU G.Y., LI H.Y., ZHANG Q.T., CHEN W., LIANG X.J., LI X.Z., 2013. Effects of Evapotranspiration on Mitigation of Urban Temperature by Vegetation and Urban Agriculture. *Journal of Integrative Agriculture*, 12(8), pp. 1307-1315.
- REN Z., HE X., ZHENG H., ZHANG D., YU X., SHEN G. *et al.*, 2013. Estimation of the relationship between urban park characteristics and park cool island intensity by remote sensing data and field measurement. *Forests*, 4(4), pp. 868-886.

- RNSA. *Végétation en ville - Guide d'information*. St-Genis l'Argentière : Réseau national de surveillance aérobiologique - RNSA. 68 p.
- SÆBØ A., POPEK R., NAWROT B., HANSLIN H.M., GAWRONSKA H., GAWRONSKI S.W., 2012. Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces. *Science of the Total Environment*, 427-428, pp. 347-354.
- SALATA F., GOLASI I., PETITTI D., DE LIETO VOLLARO E., COPPI M., DE LIETO VOLLARO A., 2017. Relating microclimate, human thermal comfort and health during heat waves: An analysis of heat island mitigation strategies through a case study in an urban outdoor environment. *Sustainable Cities and Society*, 30(Supplement C), pp. 79-96.
- SELMI W., WEBER C., RIVIÈRE E., BLOND N., MEHDI L., NOWAK D., 2016. Air pollution removal by trees in public green spaces in Strasbourg city, France. *Urban Forestry and Urban Greening*, 17, pp. 192-201.
- SETÄLÄ H., VIIPPOLA V., RANTALEINEN A.L., PENNANEN A., YLI-PELHONEN V., 2013. Does urban vegetation mitigate air pollution in northern conditions? *Environmental Pollution*, 183, pp. 104-112.
- SON J.Y., LANE K.J., LEE J.T., BELL M.L., 2016. Urban vegetation and heat-related mortality in Seoul, Korea. *Environmental Research*, 151(Supplement C), pp. 728-733.
- SOUBEYROUX J., OUZEAU G., SCHNEIDER M., CABANES O., KOUNKOU-ARNAUD R., 2016. Les vagues de chaleur en France : analyse de l'été 2015 et évolutions attendues en climat futur. *La Météorologie*, pp. 94-96.
- STOCKER T., QIN D., PLATTNER G., TIGNOR M., ALLEN S., BOSCHUNG J. *et al.*, 2013. *IPCC, 2013: climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge, Royaume-Uni ; New York, États-Unis: Cambridge University Press. 1535 p.
- TSUNETZUGU Y., PARK B.J., MIYAZAKI Y., 2010. Trends in research related to «Shinrin-yoku» (taking in the forest atmosphere or forest bathing) in Japan. *Environmental health and preventive medicine*, 15(1), pp. 27-37.
- VARGO J., STONE B., HABEEB D., LIU P., RUSSEL A., 2016. The social and spatial distribution of temperature-related health impacts from urban heat island reduction policies. *Environmental Science & Policy*, 66(Supplement C), pp. 366-374.
- WONG L.P., ALIAS H., AGHAMOHAMMADI N., AGHAZADEH S., NIK SULAIMAN N.M., 2017. Urban heat island experience, control measures and health impact: A survey among working community in the city of Kuala Lumpur. *Sustainable Cities and Society*, 35(Supplement C), pp. 660-668.

**INTÉRÊT DES ESPACES VERTS ET OMBRAGÉS DANS LA PRÉVENTION DES IMPACTS SANITAIRES DE LA CHALEUR ET DE LA POLLUTION DE L'AIR EN ZONES URBAINES (Résumé)**

S'adapter à un monde plus chaud est devenu une priorité, particulièrement dans les villes qui combinent une population importante et des conditions d'exposition aggravées par l'îlot de chaleur urbain. Ces villes sont également soucieuses d'améliorer la qualité de l'air. Cet article synthétise et discute les principales connaissances sur l'intérêt de la végétalisation en ville comme outil de prévention des impacts sanitaires de la chaleur et sur les bénéfices potentiels associés, notamment sur la qualité de l'air. La littérature montre que la végétation peut créer des îlots de fraîcheur en ville et réduire localement la température et les concentrations de certains polluants de l'air. Peu d'études épidémiologiques s'intéressent aux répercussions sanitaires possibles, mais elles indiquent un effet protecteur probable de la végétation sur la mortalité et le recours aux soins pendant les vagues de chaleur. Les espaces verts peuvent également contribuer à restaurer et à construire les capacités de résilience des personnes, et à réduire les impacts sanitaires de la chaleur et de la pollution. Les connaissances actuelles permettent de développer des stratégies de végétalisation adaptées pour optimiser les bénéfices en termes de réduction des îlots de chaleur urbains, d'amélioration du confort thermique en hiver, et de qualité de l'air. Les bénéfices sanitaires associés sont potentiellement importants. Seule une partie peut en être quantifiée par les outils actuels d'évaluation des impacts sanitaires.

**RELEVANCE OF GREEN, SHADED ENVIRONMENTS IN THE PREVENTION OF ADVERSE EFFECTS ON HEALTH FROM HEAT AND AIR POLLUTION IN URBAN AREAS (Abstract)**

Adaptation to a warmer world is a priority, especially in large urban centres where the population is concentrated and heat-related risks are compounded by the urban heat island. These cities are also interested in improving their air quality. This paper summarizes and discusses current knowledge on how green spaces may be used to reduce heat-related health impacts and their potential co-benefits, especially for air quality. The literature shows that vegetation contributes to the creation of cool islands in cities, and to locally decreasing temperature and air pollutant concentrations. Few epidemiological studies have investigated the associated health impacts, but what is available indicates that vegetation is probably a protective factor that reduces mortality and morbidity during heat waves. Green spaces can also contribute to restoring and building resilience capabilities, thus reducing the health impacts of heat and pollution. Current knowledge provides the material to develop green space strategies adapted to optimize benefits in terms of urban heat island, thermal comfort and air quality, generating potentially large health benefits. Only a part of those benefits can be quantified with current health impact assessment tools.

---