

LES EFFETS DES ARBRES ET DE LA FORÊT SUR LA QUALITÉ DE L'AIR ET LA SANTÉ HUMAINE DANS ET AUTOUR DES ZONES URBAINES

DAVID J. NOWAK – MATILDA VAN DEN BOSCH

À l'échelle mondiale, on estime le nombre d'arbres à 3 000 milliards (Crowther *et al.*, 2015) et le nombre d'habitants à 7,4 milliards (US Census Bureau, 2018). Ces arbres procurent de nombreux avantages à la société mais sont également à l'origine de certains coûts. Les arbres peuvent avoir un effet bénéfique sur la santé et le bien-être humains par leurs effets modérateurs sur le climat, la réduction de l'énergie consommée par les constructions, la réduction du carbone atmosphérique (CO₂), l'amélioration de la qualité de l'air, l'atténuation des impacts des eaux de ruissellement et des inondations, la protection contre les rayons ultraviolets et contre l'érosion du sol, la baisse du niveau sonore et la fourniture de denrées alimentaires, de bois d'œuvre, de médicaments, d'environnements esthétiques et d'opportunités de loisirs (Millennium Ecosystem Assessment, 2005 ; Costanza *et al.*, 2014). Cependant, les arbres peuvent également engendrer des coûts environnementaux et monétaires liés aux allergies au pollen, aux émissions de composés organiques volatils, à une plus grande consommation d'énergie parfois due à la proximité entre arbres et constructions, et à leur entretien. Pour concevoir des aménagements paysagers propices à une meilleure santé et au bien-être humains, il faut tenir compte à la fois des aspects positifs et négatifs des arbres et des forêts. Un des bénéfices les plus importants associés aux arbres et aux forêts est un air plus propre. La locution « les arbres et les forêts » désigne ici aussi bien les arbres isolés que les arbres en forêt, c'est-à-dire tous les arbres qu'on peut trouver dans une région donnée. Dans la suite de cet article, le mot « arbres » sera employé pour désigner ensemble les arbres et les forêts.

L'Organisation mondiale de la santé (2016) affirme que le facteur de risque environnemental le plus important est la pollution atmosphérique. Par leur interaction avec l'atmosphère, les arbres ont un effet sur la qualité de l'air et par conséquent sur la santé humaine, surtout dans les zones très peuplées (dans les villes, notamment). On sait depuis des siècles que les arbres ont un impact sur l'atmosphère.

Dès les années 1800, on décrivait les parcs dans les villes comme les « poumons de la ville » du fait que la végétation dans les parcs produisait de l'oxygène et éliminait les polluants industriels de l'atmosphère (Compton, 2016). Cette expression était une reprise d'une précédente formulation — les « poumons de Londres » — inventée par William Pitt à en croire lord Windham au cours d'un discours prononcé à la Chambre des députés en 1808, pendant un débat sur l'empêchement des constructions sur Hyde Park (History House, 2017).

En plus de cette capacité de la végétation à agir comme un « poumon », on connaît depuis longtemps la capacité de la végétation à rafraîchir l'environnement local. Les plans de demeures historiques, dont certains remontent à mille ans, comportaient souvent des arbres et des éléments

paysagers utilisant l'eau destinés à rafraîchir le milieu (Laurie, 1986). Avec l'expansion des villes et l'accroissement des populations, en même temps que le réchauffement planétaire, l'aptitude à refroidir l'environnement devient de plus en plus essentielle. Les villes ont tendance à créer des « îlots de chaleur », un terme inventé en 1818 (Howard, 1818), désignant le fait que les villes sont plus chaudes que les zones rurales environnantes. Si les villes sont souvent des pôles culturels et économiques, la plus grande chaleur, la pollution et la densité de la population peuvent participer à une prévalence accrue de mortalité humaine et de plusieurs pathologies, notamment le stress thermique, les affections respiratoires et les troubles psychiques. L'objet de cet article est d'examiner la façon dont les arbres agissent sur la qualité de l'air et les impacts que cela peut avoir sur la santé humaine. Une meilleure compréhension de ces impacts permet de mettre au point des plans de gestion forestière capables d'améliorer la qualité de l'air et la santé humaine.

LES EFFETS DE LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE ET DE LA TEMPÉRATURE DE L'AIR SUR LA SANTÉ HUMAINE

La pollution atmosphérique a une incidence sanitaire significative sur les êtres humains et les écosystèmes (U.S. EPA, 2010). D'après certaines études récentes, le nombre de décès dans le monde imputables directement ou indirectement à la pollution de l'air ambiant a atteint près de 4,5 millions en 2015 (Cohen *et al.*, 2017). La pollution de l'air est la première cause environnementale de maladies et de mort prématurée au monde (OMS, 2014).

En 2015, la pollution atmosphérique a été à l'origine de 107,2 millions d'années de vie corrigées du facteur d'invalidité (nombre d'années perdues pour cause de mauvaise santé, invalidité ou mort prématurée) (Cohen *et al.*, 2017). Parmi les problèmes de santé humaine engendrés par la pollution atmosphérique, on trouve : l'aggravation de pathologies respiratoires et cardiovasculaires ; une plus grande fréquence et une plus grande sévérité de symptômes respiratoires [par exemple, gêne respiratoire, toux, broncho-pneumopathie chronique obstructive (BPCO) et asthme] ; une plus grande prédisposition aux infections respiratoires, au cancer du poumon et à la mort prématurée (Pope *et al.*, 2002 ; Marino *et al.*, 2015 ; Vieria, 2015). Des études récentes portent à croire que la pollution atmosphérique serait également à l'origine de certains troubles cognitifs et mentaux (Calderón-Garcidueñas *et al.*, 2011 ; Brauer, 2015 ; Annavarapu et Kathi, 2016). Les personnes souffrant de maladies préexistantes (notamment les cardiopathies, l'asthme, l'emphyse), les diabétiques, les personnes âgées et les enfants sont plus sujets à l'impact de la pollution atmosphérique. Aux États-Unis en 2005, environ 130 000 morts étaient en rapport avec la présence en suspension de particules fines de moins de 2,5 microns (PM_{2,5}) et 4 700 morts étaient liées à la présence d'ozone (O₃) (Fann *et al.*, 2012).

Des températures ambiantes élevées sont associées à une mortalité augmentée imputable au stress thermique (Basu et Ostro, 2008). L'exposition à la chaleur augmente le risque de mortalité pour les groupes souffrant déjà de pathologies telles que les maladies cardiovasculaires, respiratoires et cérébrovasculaires (Basu, 2009). Plusieurs populations à haut risque ont pu être identifiées, dont les personnes âgées, les enfants, les personnes qui travaillent à l'extérieur et les personnes qui vivent seules, surtout celles qui vivent dans les appartements situés aux étages les plus hauts des immeubles (Basu et Ostro, 2008). En juillet 1995, Chicago a subi une canicule qui a conduit à plus de 600 morts, 3 300 admissions aux urgences et un nombre important d'hospitalisations en soins intensifs pour cause d'accident cérébrovasculaire quasi fatal (Dematte *et al.*, 1998). La canicule, qui a sévi en Europe au cours de l'été 2003, a conduit à plus de 70 000 morts (Robine *et al.*, 2008). La problématique de la morbidité et la mortalité liées à la chaleur prendra probablement des proportions beaucoup plus grandes avec le changement climatique (Gasparrini

et al., 2017). La pollution et des températures plus élevées ont un impact sur la santé humaine ; de surcroît, l'interaction de ces facteurs pourrait aggraver leurs effets négatifs (Harlan et Ruddell, 2011). Il est néanmoins possible d'améliorer la qualité de l'air et de réduire la température grâce aux arbres et d'améliorer ainsi la santé humaine.

EFFETS DES ARBRES SUR LA QUALITÉ DE L'AIR ET LES TEMPÉRATURES

Pour mieux comprendre comment les arbres agissent sur la qualité de l'air, il importe de connaître les différents types de polluants atmosphériques. Certains polluants, aussi bien sous forme de gaz que de particules, sont émis directement dans l'atmosphère, notamment le dioxyde de soufre (SO₂), les oxydes d'azote (NO_x), le monoxyde de carbone (CO), les particules en suspension (PM) et les composés organiques volatils (COV). Les autres polluants ne sont pas directement émis, ils se forment à travers des réactions chimiques. Par exemple, la formation d'ozone en basse altitude est souvent le fait de la réaction des émissions de NO_x et de COV en présence de la lumière du soleil. Certaines particules sont également formées à partir d'autres polluants directement émis dans l'atmosphère. Les arbres agissent sur ces polluants atmosphériques de trois manières principalement :

- ils modifient localement les températures ambiantes, les microclimats et la consommation d'énergie par les constructions ;
- ils dépolluent l'air ;
- ils émettent différentes substances chimiques.

Effets des arbres sur les températures de l'air, le microclimat local et la consommation d'énergie des constructions

L'augmentation des températures de l'air peut conduire à une demande d'énergie plus importante des immeubles en période estivale, une plus grande pollution de l'air et une incidence plus élevée des pathologies liées à la chaleur. Les arbres modifient les microclimats et réduisent les températures de l'air de plusieurs manières : l'évaporation occasionnée par leur transpiration, le freinage du vent et la protection de certaines surfaces par leur ombre. Les zones végétalisées sont capables de diminuer de plusieurs degrés Celsius la température de l'environnement proche, d'autant plus que le couvert est arboré et arbustif (Chang *et al.*, 2007). Bien qu'en règle générale les arbres contribuent à des températures estivales plus fraîches, leur présence peut parfois avoir l'effet inverse (Myrop *et al.*, 1991). Par ailleurs, la baisse de la température de l'air imputable aux arbres est susceptible d'améliorer la qualité de l'air car l'émission de nombreux polluants ou substances chimiques formant l'ozone dépend de la température.

La transpiration des arbres et les couverts forestiers agissent également sur l'absorption du rayonnement et le stockage thermique, l'humidité relative, la turbulence, l'albédo de surface, la rugosité de surface et la hauteur de la couche de mélange (soit la hauteur à laquelle l'air et les substances en surface, notamment les polluants, sont dispersés par des processus de mélange vertical). Ces changements de la météorologie locale sont susceptibles de modifier les concentrations de polluants dans les zones urbaines (Nowak *et al.*, 2000).

Une modification de la vitesse des vents peut avoir une incidence positive ou négative sur la pollution atmosphérique. Du côté positif, une vitesse du vent réduite diminue l'infiltration d'air froid dans les immeubles, ce qui entraîne une moindre consommation énergétique pour les chauffer en hiver (et aussi moins de polluants connexes émis par les chaudières et les centrales électriques). Du côté négatif, la réduction de la vitesse du vent conduit parfois à une moindre dispersion des polluants, ce qui fait augmenter les concentrations en polluants localement. En outre, avec des

vents plus faibles, la hauteur de la couche de l'atmosphère au sein de laquelle le polluant se mélange est souvent réduite. Cette réduction de la couche de mélange tend à faire augmenter les concentrations en polluants puisque la même quantité de polluants est désormais mélangée avec un plus petit volume d'air.

De plus, des températures plus basses et la mise à l'ombre des constructions sont susceptibles de réduire la quantité d'énergie utilisée pour climatiser les immeubles en été. À l'inverse, la mise à l'ombre des immeubles en hiver peut conduire à une consommation énergétique accrue par les immeubles (Heisler, 1986). La modification de la consommation énergétique va se répercuter, par voie de conséquence, sur les émissions de polluants par les chaudières et les centrales électriques. Il est donc essentiel que les arbres soient correctement disposés à proximité des immeubles de façon à obtenir des économies d'énergie optimales. Les arbres urbains dans les 48 États américains contigus sont à l'origine d'une économie annuelle d'énergie de 5,4 milliards de dollars dans les constructions à usage d'habitation, et évitent l'émission de milliers de tonnes de polluants permettant une économie évaluée à 2,7 milliards de dollars par an (Nowak et Greenfield, 2018).

Dépollution atmosphérique

Les arbres éliminent la pollution atmosphérique gazeuse principalement par absorption à travers les stomates de leurs feuilles, mais captent aussi certains gaz sur la surface de la plante. Les arbres ont de surcroît un effet direct sur les particules en suspension dans l'atmosphère grâce à l'interception de particules, l'émission de particules (notamment le pollen) et à la remise en suspension des particules captées à la surface de la plante. Un nombre considérable de particules parmi celles interceptées finissent par être remises en suspension dans l'atmosphère, sont emportées par la pluie ou tombent à terre en même temps que les feuilles et les brindilles. De ce fait, la végétation ne constitue qu'un lieu de stockage temporaire pour beaucoup de particules atmosphériques. Quant à l'élimination des polluants gazeux, elle a un caractère plus permanent car les gaz sont souvent absorbés à l'intérieur des feuilles où ils subissent une transformation (Smith, 1990).

D'importantes quantités de pollution atmosphérique sont susceptibles d'être éliminées par la présence d'arbres sains dans les villes. C'est dans et autour des zones où le couvert végétal comporte majoritairement des arbres (par exemple, les peuplements forestiers) que l'élimination de la pollution et les réductions potentielles des concentrations en polluants atmosphériques seront les plus importantes. Les arbres sains de grande taille (diamètre de tige à 1,37 m du sol > 76 cm) éliminent environ 60-70 fois plus de pollution atmosphérique annuellement que les arbres sains de petite taille (diamètre de tige < 7,6 cm) (Nowak, 1994). Le taux d'élimination de la pollution par la végétation varie selon les régions en fonction du volume du couvert végétal, la quantité de pollution atmosphérique, la durée de la période pendant laquelle les arbres gardent leurs feuilles, les précipitations et d'autres variables météorologiques.

Au niveau des essences, l'élimination des polluants sera fonction des taux de transpiration des arbres (taux des échanges gazeux) et des surfaces foliaires. Les taux d'élimination des particules en suspension vont dépendre des caractéristiques de la surface foliaire et de sa superficie. Les essences à couronne dense et de texture fine dont le système foliaire est complexe, composé de petites feuilles rugueuses, auront une faculté de capture et de rétention des particules supérieure à celles dont les couronnes sont ouvertes et de texture grossière avec des feuilles lisses simples de grande taille (Little, 1977 ; Smith, 1990). Les arbres à feuilles persistantes éliminent les particules toute l'année. Une estimation du classement des essences du point de vue de l'élimination de la pollution est proposée par l'utilitaire i-Tree Species (www.itreetools.org).

De nombreuses études ont établi un lien entre qualité de l'air et effets sanitaires, mais très peu ont exploré les effets pour la santé de l'élimination de polluants par les arbres. Au Royaume-Uni, on a estimé que les zones boisées réduisent de 5 à 7 décès le nombre de morts par an et évitent 4 à 6 hospitalisations grâce à la réduction du dioxyde de soufre et des particules en suspension de moins de 10 microns (PM₁₀) (Powe et Willis, 2004) qu'elles opèrent. À Londres, on estime qu'un taux de couvert végétal de 25 % offert par les arbres élimine 90,4 tonnes de pollution par PM₁₀ par an, ce qui correspond à une baisse de mortalité de 2 décès et 2 hospitalisations en moins par an (Tiwary *et al.*, 2009). Nowak *et al.* (2013) ont rapporté qu'en 2010 la quantité totale de PM_{2,5} éliminée par les arbres chaque année dans dix villes américaines variait entre 4,7 tonnes à Syracuse à 64,5 tonnes à Atlanta, ce qui correspond à une valeur sanitaire allant de 1,1 million de dollars à Syracuse à 60,1 millions de dollars à New York.

Les arbres situés dans les 48 États américains contigus ont éliminé 22,4 millions de tonnes de pollution atmosphérique en 2010, avec des effets sur la santé humaine évalués à 8,5 milliards de dollars américains. La plus grande partie de cette élimination de la pollution s'effectue dans les zones rurales, alors que la majorité des bienfaits pour la santé se produisent dans les zones urbaines. Leurs effets favorables sur la santé ont permis d'éviter 850 incidences de mortalité humaine à quoi viennent s'ajouter une réduction de plus de 670 000 incidences de symptômes respiratoires aigus, de 430 000 incidences d'exacerbation de l'asthme et de 200 000 jours d'absence de l'école (Nowak *et al.*, 2014). L'amélioration moyenne en matière de qualité de l'air apportée par les arbres dans les villes pendant la journée durant la saison où les arbres conservent leurs feuilles s'établit à moins de 1 %. Cependant, dans les zones où le couvert végétal est constitué exclusivement d'arbres, l'amélioration apportée en termes de pollution de l'air est en moyenne 4 fois plus importante et elle peut même atteindre 16 % (Nowak *et al.*, 2006).

Émission de substances chimiques

Si les arbres ont pour effet de réduire la pollution atmosphérique en réduisant les températures de l'air et en éliminant directement les polluants, ils émettent également différentes substances chimiques susceptibles de contribuer à la pollution de l'air (Sharkey *et al.*, 1991). Les arbres sont à l'origine de l'émission de quantités variables de composés organiques volatils (par exemple, l'isoprène, les monoterpènes) (Geron *et al.*, 1994 ; Guenther, 2002). L'oxydation de composés organiques volatils est une composante importante dans le budget global du monoxyde de carbone (Tingey *et al.*, 1991). Les COV émis par les arbres sont également susceptibles de contribuer à la formation d'ozone et de particules en suspension (Sharkey *et al.*, 1991).

L'émission de COV varie selon les essences. Les neuf genres d'arbres auxquels sont attribués les taux d'émission normalisés d'isoprène les plus hauts, et donc l'effet relatif le plus important sur l'augmentation de l'ozone sont les filaos (*Casuarina* spp.), les eucalyptus (*Eucalyptus* spp.), les liquidambars (*Liquidambar* spp.), les gommiers noirs (*Nyssa* spp.), les platanes (*Platanus* spp.), les peupliers (*Populus* spp.), les chênes (*Quercus* spp.), les robiniers (*Robinia* spp.) et les saules (*Salix* spp.). Cependant, le simple fait que ces espèces ont des taux d'émission relativement élevés ne veut pas dire pour autant qu'elles conduisent à une production nette d'ozone puisqu'elles ont également la faculté d'éliminer de l'ozone et de faire baisser les températures de l'air.

En plus des émissions de COV dont sont responsables les arbres, il faut tenir compte de l'entretien qu'ils nécessitent et de leurs émissions de pollen. Certains types de végétation, surtout en milieu urbain, nécessitent une forte consommation d'énergie pour les activités d'entretien entraînant des émissions de polluants par les machines qui méritent d'être pris en compte. Les grains de pollen provenant des arbres peuvent provoquer des réactions allergiques (Cariñanosa *et al.*, 2014). Parmi les espèces végétales les plus allergisantes, on trouve *Acer negundo* (mâle), *Ambrosia* spp., *Cupressus* spp., *Daucus* spp., *Holcus* spp., *Juniperus* spp. (mâle), *Lolium* spp., *Mangifera*

indica, *Planera aquatica*, *Ricinus communis*, *Salix alba* (mâle), *Schinus* spp. (mâle) et *Zelkova* spp. (Ogren, 2000).

Effets globaux des arbres sur la pollution atmosphérique

Beaucoup de facteurs, à la fois positifs et négatifs, entrent en ligne de compte pour déterminer l'effet global des arbres sur la pollution. L'élimination de polluants, la réduction de la température de l'air et la baisse générale de la consommation énergétique ont pour effet d'améliorer la qualité de l'air, alors que l'émission de COV et les modifications de la vitesse du vent peuvent contrarier en partie cette amélioration.

Une simulation par modèle illustre le fait qu'une perte de 20 % de la couverture forestière dans la région d'Atlanta à cause de l'urbanisation a conduit à une augmentation des concentrations en ozone de 14 % (Cardelino et Chameides, 1990). Bien que de ce fait il y ait eu moins d'arbres susceptibles d'émettre des composés organiques volatils, l'augmentation des températures de l'air à Atlanta imputable à la perte des arbres et à la formation d'un îlot de chaleur urbain a conduit à des émissions de COV plus importantes par les arbres restants et par d'autres sources et transformé la chimie de l'ozone de telle manière que les concentrations en ozone ont augmenté.

Une autre simulation par modèle du bassin atmosphérique de la côte méridionale de la Californie suggère que les impacts sur la qualité de l'air de l'extension du couvert arboré en zone urbaine peuvent être localement positifs ou négatifs en ce qui concerne les concentrations en ozone. Cependant, l'effet net d'un accroissement de la végétation urbaine sur le bassin pris dans son ensemble est de diminuer les concentrations si les arbres supplémentaires sont faiblement émetteurs de COV (Taha, 1996).

Une modélisation des effets d'une extension du couvert arboré en zone urbaine sur les concentrations en ozone dans la région qui s'étend depuis Washington DC jusqu'au centre du Massachusetts a révélé que les arbres en milieu urbain réduisent en général les concentrations en ozone dans les villes mais tendent à augmenter légèrement les concentrations moyennes en ozone au niveau régional. Les effets dominants des arbres sur l'ozone sont imputables à l'élimination de polluants et aux modifications des températures de l'air, des champs de vent et des hauteurs de la couche de mélange (Nowak *et al.*, 2000). Une modélisation de l'agglomération de New York a également révélé qu'une augmentation de 10 % du couvert arboré avait pour effet de diminuer les pics d'ozone d'environ 4 µg/kg. Une telle réduction équivaut à environ 37 % de la quantité nécessaire permettant d'atteindre la norme de qualité de l'air pour l'ozone, montrant ainsi que le couvert arboré peut avoir un impact significatif sur la réduction des pics de concentrations en ozone dans cette région (Luley et Bond, 2002).

Si la réduction des vitesses du vent peut augmenter les concentrations de polluants localement à cause d'une moindre dispersion des polluants et parce qu'elle diminue la hauteur de la couche de mélange, ces modifications des trajectoires des vents exercent parfois un effet positif. Les couverts forestiers peuvent potentiellement empêcher que la pollution présente en haute altitude n'atteigne les basses altitudes. Les différences de concentration en ozone mesurées au-dessus et en dessous de la canopée dans les montagnes de San Bernardino en Californie dépassent les 50 µg/kg (concentration 40 % plus faible sous la canopée) (Bytnerowicz *et al.*, 1999). Le couvert forestier peut limiter les mélanges entre haute et basse altitude, ce qui entraîne des améliorations significatives dans la qualité de l'air sous le couvert. Cependant, là où le couvert abrite de nombreuses sources de polluants (par exemple, issus des automobiles), la canopée peut freiner la dispersion des polluants, les empêchant ainsi de s'éloigner des basses altitudes de sorte que les concentrations en polluants augmentent (photo 1, p. 303). Cet effet serait particulièrement important dans les zones très boisées qui accueillent une circulation importante de voitures sous

le couvert arboré. À l'échelle locale, les concentrations en polluants sont susceptibles d'augmenter si les arbres :

- piègent les polluants sous le couvert végétal à proximité des sources d'émission (par exemple, le long des routes) (Gromke et Ruck, 2009 ; Wania *et al.*, 2012 ; Salmond *et al.*, 2013 ; Vos *et al.*, 2013) ;
- limitent la dispersion à cause de la réduction de la vitesse du vent ;
- ou abaissent la hauteur des couches de mélange à cause de la réduction de la vitesse du vent (Nowak *et al.*, 2000, 2014).



Photo 1 Les aménagements verts à proximité des routes doivent minimiser leurs effets potentiellement négatifs, notamment le piégeage des polluants.

À l'inverse, une personne se tenant debout au milieu des peuplements d'arbres va être entourée d'air plus pur à condition qu'aucune source d'émission au niveau du sol ne se trouve à proximité (par exemple, émissions des voitures). Plusieurs études (Dasch, 1987 ; Cavanagh *et al.*, 2009) ont décrit la réduction des concentrations en polluants au milieu des peuplements forestiers comparée à leur périphérie.

Malgré le fait qu'une couverture arborée plus étendue élimine plus de pollution et réduit les températures de l'air en été, la gestion locale des forêts doit prendre en considération l'implantation des sources de polluants par rapport à la répartition des populations humaines afin de minimiser les concentrations de pollution et de maximiser la baisse de la température de l'air dans les zones plus peuplées. L'aménagement de forêts doit également tenir compte de nombreux autres effets des arbres sur la santé et le bien-être humains (par exemple, effets sur le rayonnement ultraviolet, la qualité de l'eau, considérations esthétiques, etc.).

AUTRES EFFETS DES ARBRES SUR LA SANTÉ HUMAINE

Du point de vue de la santé publique, il est important de prendre en considération le fait que même si le pourcentage d'amélioration de la qualité de l'air obtenue par les arbres est petit, celui-ci peut avoir un impact considérable sur la santé humaine (Cohen *et al.*, 2017). De même, l'importance de l'effet refroidissant des arbres ira en grandissant au fur et à mesure des évolutions dues au changement climatique (Gasparrini *et al.*, 2017). L'exposition aux arbres et à d'autres espaces verts comporte également d'autres bénéfices connexes pour la santé. De plus en plus de preuves viennent appuyer la thèse des effets sanitaires des arbres, notamment leur impact favorable sur la mortalité liée aux maladies cardiovasculaires et toutes causes confondues (Gascon *et al.*, 2016), l'issue des grossesses (Hystad *et al.*, 2014), la prévalence de l'asthme (Sbihi *et al.*, 2015), les troubles psychiques (Gascon *et al.*, 2015) et l'obésité (Lovasi *et al.*, 2013). Plusieurs voies et mécanismes pour ces effets sanitaires ont été proposés, en particulier une activité physique accrue (Sallis *et al.*, 2016), les interactions sociales (De Vries *et al.*, 2013) et des niveaux de stress réduits (Egorov *et al.*, 2017). Des études empiriques ont confirmé qu'il existe une association entre le fait de vivre dans des zones plus vertes et ces voies (Van den Bosch et Ode Sang, 2017). Un mode de vie sédentaire, la solitude et le stress chronique sont tous des facteurs de risque communs et contribuent à de nombreuses pathologies liées au mode de vie comme par exemple les maladies cardiovasculaires, la mortalité prématurée, l'obésité et la dépression (Forouzanfar *et al.*, 2015). En même temps qu'ils réduisent la pollution atmosphérique et la chaleur, les arbres peuvent jouer un rôle important en allégeant le fardeau des pathologies liées aux facteurs de mode de vie et de l'exposition à des environnements néfastes.

CONCLUSIONS

Pris dans leur globalité, les arbres ont un effet positif sur l'amélioration de la qualité de l'air, surtout par la réduction des températures de l'air et de la consommation énergétique, et par élimination directe de polluants. Cependant, les arbres ont également certains effets négatifs reliés à l'émission de COV et de pollen, et à la réduction des vitesses du vent. L'aménagement de forêts à l'échelle locale situées à proximité de sources de polluants doit prendre en considération les modifications opérées par les arbres sur le régime des vents et sur les flux entre sources de polluants (automobiles, par exemple) et êtres humains. Ainsi, les arbres sont susceptibles de limiter la dispersion de la pollution et donc d'augmenter les concentrations en polluants localement (par exemple, le long des routes), mais les arbres peuvent aussi protéger certains sites des émissions de polluants et réduire les concentrations de ces derniers (par exemple, à l'intérieur des peuplements forestiers). Mieux comprendre les mécanismes par lesquels les arbres agissent sur la qualité de l'air et sa température permet de mieux adapter les aménagements paysagers afin d'y intégrer les arbres dans le but d'améliorer la santé humaine.

David J. NOWAK
Senior Scientist
i-Tree Team Leader
U.S. Forest Service
Forest Inventory and Analysis
Northern Research Station
5 Moom Library, SUNY-ESF
SYRACUSE, NY 13210
ÉTATS-UNIS
(dnowak@fs.fed.us)

Matilda VAN DEN BOSCH
Assistant Professor
School of Population and Public Health
Department of Forest and Conservation Sciences
University of British Columbia
Forest Sciences Centre
2004 - 2424 Main Mall
VANCOUVER, BC V6T 1Z4
CANADA
(matilda.vandenbosch@ubc.ca)

BIBLIOGRAPHIE

- ANNAVARAPU R.N., KATHI S., 2016. Cognitive disorders in children associated with urban vehicular emissions. *Environmental Pollution*, 208, pp. 74-78.
- BASU R., 2009. High ambient temperature and mortality: a review of epidemiologic studies from 2001 to 2008. *Environmental Health*, 8, p. 40. doi:10.1186/1476-069X-8-40.
- BASU R., OSTRO B.D., 2008. A Multicounty Analysis Identifying the Populations Vulnerable to Mortality Associated with High Ambient Temperature in California. *American Journal of Epidemiology*, 168, pp. 632-637.
- BRAUER M., 2015. Air pollution, stroke, and anxiety: Particulate air pollution is an emerging risk factor for an increasing number of common conditions. *BMJ (Online)*, p. 350.
- BYTNEROWICZ A., FENN M.E., MILLER P.R., ARBAUGH M.J., 1999. Wet and dry pollutant deposition to the mixed conifer forest. pp. 235-269. In: Miller P.R., McBride J.R. (eds). *Oxidant Air Pollution Impacts in the Montane Forests of Southern California: A Case Study of the San Bernardino Mountains*. New York: Springer Verlag.
- CALDERÓN-GARCIDUEÑAS L., ENGLE R., MORA-TISCAREÑO A., STYNER M., GÓMEZ-GARZA G., ZHU H. *et al.*, 2011. Exposure to severe urban air pollution influences cognitive outcomes, brain volume and systemic inflammation in clinically healthy children. *Brain and Cognition*, 77(3), pp. 345-355.
- CARDELINO C.A., CHAMEIDES W.L., 1990. Natural hydrocarbons, urbanization, and urban ozone. *Journal of Geophysical Research*, 95(D9), pp. 13971-13979.
- CARIÑANOSA P., CASARES-PORCELA M., QUESADA-RUBIO J.M., 2014. Estimating the allergenic potential of urban green spaces: A case-study in Granada, Spain. *Landscape and Urban Planning*, 123, pp. 134-144.
- CAVANAGH J.E., ZAWAR-REZA P., WILSON J.G., 2009. Spatial attenuation of ambient particulate matter air pollution within an urbanised native forest patch. *Urban Forestry and Urban Greening*, 8, pp. 21-30.
- CHANG C., LI M., CHANG S., 2007. A preliminary study on the cool-island intensity of Taipei city parks. *Landscape and Urban Planning*, 80, pp. 386-395.
- COHEN A.J., BRAUER M., BURNETT R., ANDERSON H.R., FROSTAD J., ESTEP K. *et al.*, 2017. Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *The Lancet*, 389(10082), pp. 1907-1918.
- COMPTON J.L., 2016. Evolution of the “parks as lungs” metaphor: is it still relevant? *World Leisure Journal*, [Online] <http://dx.doi.org/10.1080/16078055.2016.1211171>
- COSTANZA R., DE GROOT R., SUTTON P., VAN DER PLOEG S., ANDERSON S.J., KUBISZEWSKI I. *et al.*, 2014. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 26, pp. 152-158.
- CROWTHER T.W., GLICK H.B., COVEY K.R., BETTIGOLE C., MAYNARD D.S., THOMAS S.M. *et al.*, 2015. Mapping tree density at a global scale. *Nature*, 525, pp. 201-205.
- DASCH J.M., 1987. Measurement of dry deposition to surfaces in deciduous and pine canopies. *Environmental Pollution*, 44, pp. 261-277.
- DEMATTE J.E., O'MARA K., BUESCHER J., WHITNEY C.G., FORSYTHE S., MCNAMEE T. *et al.*, 1998. Near-Fatal Heat Stroke during the 1995 Heat Wave in Chicago. *Annals of Internal Medicine*, 129(3), pp. 173-181.
- DE VRIES S., VAN DILLEN S.M.E., GROENEWEGEN P.P., SPREEUWENBERG P., 2013. Streetscape greenery and health: Stress, social cohesion and physical activity as mediators. *Social Science & Medicine*, 94(0), pp. 26-33.
- EGOROV A.I., GRIFFIN S.M., CONVERSE R.R., STYLES J.N., SAMS E.A., WILSON A. *et al.*, 2017. Vegetated land cover near residence is associated with reduced allostatic load and improved biomarkers of neuroendocrine, metabolic and immune functions. *Environmental Research*, 158, pp. 508-521.
- FANN N., LAMSON A.D., ANENBERG S.C., WESSON K., RISLEY D., HUBBELL B., 2012. Estimating the national public health burden associated with exposure to ambient PM_{2.5} and ozone. *Risk Analysis*, 32, pp. 81-95.
- FOROUZANFAR M.H., ALEXANDER L., ANDERSON H.R., BACHMAN V.F., BIRYUKOV S., BRAUER M. *et al.*, 2015. Global, regional, and national comparative risk assessment of 79 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks in 188 countries, 1990-2013: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2013. *The Lancet*, 386(10010), pp. 2287-2323.
- GASCON M., TRIGUERO-MAS M., MARTÍNEZ D., DADVAND P., FORNS J., PLASÈNCIA A. *et al.*, 2015. Mental health benefits of long-term exposure to residential green and blue spaces: a systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(4), p. 4354.
- GASCON M., TRIGUERO-MAS M., MARTÍNEZ D., DADVAND P., ROJAS-RUEDA D., PLASÈNCIA A. *et al.*, 2016. Residential green spaces and mortality: A systematic review. *Environment International*, 86, pp. 60-67.

- GASPARRINI A., GUO Y., SERA F., VICEDO-CABRERA A.M., HUBER V., TONG S. *et al.*, 2017 Projections of temperature-related excess mortality under climate change scenarios. *Lancet Planet Health*, [On line] [http://dx.doi.org/10.1016/S2542-5196\(17\)30156-0](http://dx.doi.org/10.1016/S2542-5196(17)30156-0)
- GERON C.D., GUENTHER A.B., PIERCE T.E., 1994. An improved model for estimating emissions of volatile organic compounds from forests in the eastern United States. *J. Geophys. Res.*, 99(D6), pp. 12773-12791.
- GROMKE C., RUCK B., 2009. On the impact of trees on dispersion processes of traffic emissions in street canyons. *Boundary-Layer Meteorology*, 131(1), pp. 19-34.
- GUENTHER A., 2002. The contribution of reactive carbon emissions from vegetation to the carbon balance of terrestrial ecosystems. *Chemosphere*, 49, pp. 837-844.
- HARLAN S.L., RUDDELL D.M., 2011. Climate change and health in cities: impacts of heat and air pollution and potential co-benefits from mitigation and adaptation. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 3, pp. 126-134.
- HEISLER G.M., 1986. Energy savings with trees. *Journal of Arboriculture*, 12(5), pp. 113-125.
- HISTORY HOUSE. What are the Lungs of London? [cited 2017 Nov 20]. Available from: http://www.historyhouse.co.uk/articles/lungs_of_london.html
- HOWARD L., 1818-1820. *The climate of London, deduced from Meteorological observations, made at different places in the neighbourhood of the metropolis*. 2 volumes. London.
- HYSTAD P., DAVIES H.W., FRANK L., LOON J.V., GEHRING U., TAMBURIC L. *et al.*, 2014. Residential greenness and birth outcomes: evaluating the influence of spatially correlated built-environment factors. *Environmental Health Perspectives*, 122(10), pp. 1095-1102.
- LAURIE M., 1986. *An Introduction to Landscape Architecture*. New York: Elsevier. 248 p.
- LITTLE P., 1977. Deposition of 2.75, 5.0, and 8.5 μm particles to plant and soil surfaces. *Environ. Pollut.*, 12, pp. 293-305.
- LOVASI G.S., SCHWARTZ-SOICHER O., QUINN J.W., BERGER D.K., NECKERMAN K.M., JASLOW R. *et al.*, 2013. Neighborhood safety and green space as predictors of obesity among preschool children from low-income families in New York City. *Preventive Medicine*, 57(3), pp. 189-193.
- LULEY C.J., BOND J., 2002. *A plan to integrate management of urban trees into air quality planning. Report to Northeast State Foresters Association*. Kent, OH: Davey Resource Group. 73 p.
- MARINO E., CARUSO M., CAMPAGNA D., POLOSA R., 2015. Impact of air quality on lung health: myth or reality? *Therapeutic Advances in Chronic Disease*, 6(5), pp. 286-298.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT, 2005. *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Washington, DC: Island Press. 137 p.
- MYRUP L.O., MCGINN C.E., FLOCCHINI R.G., 1991. An analysis of microclimate variation in a suburban environment. pp. 172-179. *Seventh Conference on Applied Climatology*, American Meteorological Society, Boston, MA.
- NOWAK D.J., 1994. Air pollution removal by Chicago's urban forest. In: McPherson E.G, Nowak D.J., Rowntree R.A., *Chicago's Urban Forest Ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project*. Radnor, PA: USDA Forest Service General Technical Report NE-186, pp. 63-81.
- NOWAK D.J., CIVEROLO K.L., RAO S.T., SISTLA G., LULEY C.J., CRANE D.E., 2000. A modeling study of the impact of urban trees on ozone. *Atmospheric Environment*, 34, pp. 1601-1613.
- NOWAK D.J., CRANE D.E., STEVENS J.C., 2006. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry and Urban Greening*, 4, pp. 115-123.
- NOWAK D.J., GREENFIELD E.J., 2018. US urban forest statistics, values, and projections. *Journal of Forestry*, 116(2), pp. 164-177.
- NOWAK D.J., HIRABAYASHI S., BODINE A., HOEHN R., 2013. Modeled P.M._{2.5} Removal by trees in ten U.S. cities and associated health effects. *Environmental Pollution*, 178, pp. 395-402.
- NOWAK D.J., HIRABAYASHI S., ELLIS A., GREENFIELD E.J., 2014. Tree and forest effects on air quality and human health in the United States. *Environmental Pollution*, 193, pp. 119-129.
- OGREN T.L., 2000. *Allergy-Free Gardening*. Berkeley, CA: Ten Speed Press. 267 p.
- POPE C.A., BURNETT R.T., THUN M.J., CALLE E.E., KREWSKI D., ITO K. *et al.*, 2002. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *Journal of the American Medical Association*, 287(9), pp. 1132-1141.
- POWE N.A., WILLIS K.G., 2004. Mortality and morbidity benefits of air pollution (SO₂ and PM₁₀) absorption attributable to woodland in Britain. *Journal of Environmental Management*, 70, pp. 119-128.
- ROBINE J.M., CHEUNG S.L., LE ROY S., VAN OYEN H., GRIFFITHS C., MICHEL J.P. *et al.*, 2008. Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *C. R. Biologies*, 331, pp. 171-178.

- SALMOND J.A., WILLIAMS D.E., LAING G., KINGHAM S., DIRKS K., LONGLEY I., HENSHAW G.S., 2013. The influence of vegetation on the horizontal and vertical distribution of pollutants in a street canyon. *Science of the Total Environment*, 443, pp. 287-298.
- SALLIS J.F., CERIN E., CONWAY T.L., ADAMS M.A., FRANK L.D., PRATT M. *et al.*, 2016. Physical activity in relation to urban environments in 14 cities worldwide: a cross-sectional study. *Lancet*, 28:387(10034), pp. 2207-2217.
- SBIHI H., TAMBURIC L., KOEHOORN M., BRAUER M., 2015. Greenness and incident childhood asthma: A 10-year follow-up in a population-based birth cohort. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 192(9), pp. 1131-1133.
- SHARKEY T.D., HOLLAND E.A., MOONEY H.A., eds, 1991. *Trace gas emissions by plants*. New York: Academic Press. 365 p.
- SMITH W.H., 1990. *Air pollution and forests*. New York: Springer Verlag. 618 p.
- TAHA H., 1996. Modeling impacts of increased urban vegetation on ozone air quality in the South Coast Air Basin. *Atmospheric Environment*, 30(20), pp. 3423-3430.
- TINGEY D.T., TURNER D.P., WEBER J.A., 1991. Factors controlling the emissions of monoterpenes and other volatile organic compounds. pp. 93-119. *In*: Sharkey T.D., Holland E.A., Mooney H.A., eds. *Trace gas emissions by plants*. New York: Academic Press.
- TIWARY A., SINNETT D., PEACHEY C., CHALABI Z., VARDOLAKIS S., FLETCHER T. *et al.* 2009. An integrated tool to assess the role of new plantings in PM₁₀ capture and the human health benefits: A case study in London. *Environmental Pollution*, 157, pp. 2645-2653.
- US CENSUS BUREAU. *U.S. and World Population Clock* [cité le 16 avril 2018]. [Online] <https://www.census.gov/popclock/>
- US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2010. *Our nation's air: status and trends through 2008*. Triangle Park, NC: EPA-454 / R-09-002. Office of Air Quality Planning and Standards. 49 p.
- VAN DEN BOSCH M., ODE SANG Å., 2017. Urban natural environments as nature-based solutions for improved public health – A systematic review of reviews. *Environmental Research*, 158, pp. 373-384.
- VIEIRA S., 2015. The health burden of pollution: the impact of prenatal exposure to air pollutants. *International Journal of COPD*, 10, pp. 1111-1121.
- VOS P.E.J., MAIHEU B., VANKERKOM J., JANSSEN S., 2013. Improving local air quality in cities: To tree or not to tree? *Environmental Pollution*, 183, pp. 113-122.
- WANIA A., BRUSE M., BLOND N., WEBER C., 2012. Analysing the influence of different street vegetation on traffic-induced particle dispersion using microscale simulations. *Journal of Environmental Management*, 94, pp. 91-101.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2014. *7 million premature deaths annually linked to air pollution*. Geneva (Switzerland): World Health Organization. Available at: <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/en/> [cited 2017 Nov 20].
- WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2016. *Ambient air pollution: a global assessment of exposure and burden of disease*. Geneva (Switzerland): World Health Organization. 131 p.

LES EFFETS DES ARBRES ET DE LA FORÊT SUR LA QUALITÉ DE L'AIR ET LA SANTÉ HUMAINE DANS ET AUTOUR DES ZONES URBAINES (Résumé)

On connaît depuis plus d'un siècle les problèmes dans les villes liés à la pollution de l'air et à des températures de l'air plus élevées et également l'impact favorable des arbres et de la forêt sur la qualité de l'air et leurs effets régulateurs sur sa température. La recherche scientifique a enrichi nos connaissances sur les différentes façons dont les arbres agissent sur la qualité de l'air et sa température. Les arbres ont une incidence à la fois positive et négative sur la qualité de l'air et par conséquent sur la santé humaine car ils modifient les microclimats locaux, modifient la consommation d'énergie dans les constructions, éliminent certains polluants atmosphériques et émettent certaines substances chimiques. Si l'effet global des arbres et de la forêt se solde par une amélioration de la qualité de l'air, la gestion des forêts à l'échelon local doit tenir compte des modifications du vent induites par les arbres et des effets que cela peut avoir sur la dispersion des polluants et sur leurs concentrations relevées localement. Les forêts limitent dans certains cas la dispersion de la pollution, ce qui augmente les concentrations en polluants localement (par exemple, le long des routes), mais à l'inverse peuvent protéger certains sites des émissions de polluants et jouer un rôle important dans la réduction des concentrations en polluants localement (par exemple, à l'intérieur des peuplements forestiers). Une meilleure compréhension des mécanismes par lesquels les arbres influencent la qualité de l'air et sa température permet de mieux adapter les plans d'aménagement des paysages et d'utiliser les arbres et la forêt pour améliorer la santé humaine.

TREE AND FOREST EFFECTS ON AIR QUALITY AND HUMAN HEALTH IN AND AROUND URBAN AREAS (Abstract)

The problems associated with air pollution and higher air temperatures in cities have been known for over a century, but so have the impacts of trees and forests on improving air quality and regulating air temperatures. Science has advanced our understanding on the various ways that trees affect air quality and temperatures. Trees affect air quality and consequently human health in both positive and negative ways by regulating air temperatures, altering the local microclimates, altering building energy use, removing air pollutants and emitting various chemicals. While the overall effect of trees and forests is an improvement in air quality, local scale forest designs near pollutant sources need to be considered as trees alter wind flow and can affect pollutant dispersion and local concentrations. Forests can limit pollution dispersion and increase local pollutant concentrations (e.g., along streets), but can also protect sites from pollutant emissions and have substantial impacts on lowering local pollution concentrations (e.g., in forest stands). By understanding how trees affect air quality and air temperatures, better landscape designs can be implemented to use trees and forests to improve human health.
