

# Impact de la végétation sur le microclimat urbain et la qualité de l'air

*Directeur de recherche à l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA<sup>1</sup>), Yves Brunet fait partie de l'UMR ISPA (Interactions sol-plante-atmosphère). Membre de l'Académie d'Agriculture, il a été directeur de deux unités de recherche et chef adjoint du département Environnement et Agronomie de l'INRA. Ses travaux portent sur la formation des microclimats, le transport de particules dans la basse atmosphère, les échanges biosphère-atmosphère et l'impact des tempêtes sur les écosystèmes.*

Le confort thermique du citadin et la qualité de l'air qu'il respire sont des éléments essentiels à prendre en compte lorsqu'on s'intéresse au bien-être et à la santé de la population urbaine. Ce chapitre est consacré au rôle que peut exercer dans ce contexte la végétation urbaine, sous ses différentes formes (grands parcs urbains, jardins publics, squares, jardins de particuliers, ronds-points verts, alignement d'arbres et de haies le long des rues, réseau de noues végétales, coulées vertes, toits et façades végétalisés...). Peut-elle par

exemple avoir sur l'air une action rafraîchissante lors des pics de canicule ? Une action filtrante lors des épisodes de pollution ? À quelle échelle agit-elle en fonction de sa nature ? De quels outils dispose-t-on pour quantifier et prévoir ses impacts ?

Nous nous intéresserons ici à la fois au microclimat et à la pollution atmosphérique, deux aspects de l'environnement urbain qui sont très liés, notamment parce que de nombreuses réactions photochimiques<sup>2</sup> impliquant

2. Réaction photochimique : réaction dans laquelle la lumière fournit l'énergie d'activation nécessaire.

1. <https://inra.fr>

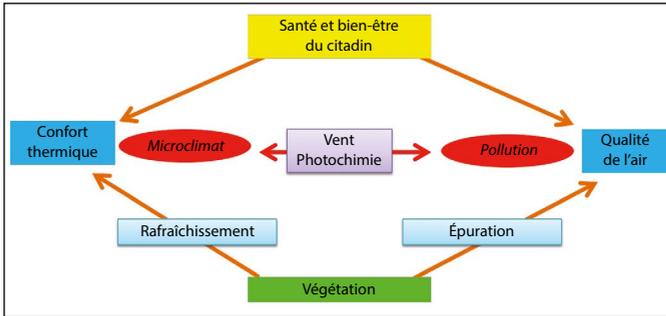


Figure 1

Dans quelle mesure la végétation peut-elle avoir un effet sur la santé et le bien-être du citoyen ?

les polluants sont sous la dépendance de composants essentiels du microclimat comme le rayonnement, la température et l'humidité de l'air (Figure 1). Une attention particulière sera portée sur le vent : il joue un rôle important sur l'intensité des échanges thermiques et, en assurant la ventilation des rues, sur la pollution atmosphérique dans l'espace urbain.

## 1 L'îlot de chaleur urbain

### 1.1. Un aspect emblématique du microclimat urbain

Bien que la démonstration de son existence remonte au début du XIX<sup>e</sup> siècle (observations de L. Howard à Londres), l'îlot de chaleur urbain a été mis en évidence de manière systématique dans les années 70 quand, avec les premières thermographies infrarouges<sup>3</sup>

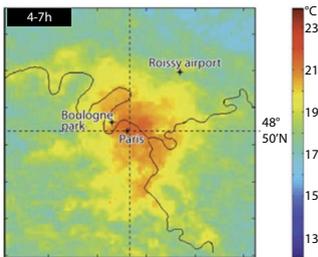


Figure 2

Thermographie de Paris et ses alentours (Landsat-5 TM, 9 août 2003, scène composite sur l'intervalle 4-7h) : Paris et sa proche banlieue constituent un îlot de chaleur urbain.

Source : Douset et coll. (2011). *Int. J. Climatol.*, 31 : 313-323.

de la surface de la Terre, il est apparu flagrant que les villes étaient plus chaudes que les espaces ruraux environnants, en particulier la nuit.

La Figure 2 montre un exemple d'image thermique de la ville de Paris et de ses alentours, enregistrée pendant la canicule de 2003. Les températures de surface indiquées sur l'échelle de droite ont été mesurées le 9 août en fin de nuit. On y voit un écart de 5 à 6 °C entre le cœur de Paris, aux alentours de 21-22 °C, et la campagne environnante dont la température n'est que de l'ordre de 16-17 °C.

Si l'on réalise dans la journée, à l'aide d'un dispositif mobile, un transect<sup>4</sup> de température de l'air à 2 mètres du sol, de l'ouest vers l'est de la région parisienne (Figure 3), on observe bien des températures plus élevées au centre de la ville (environ 28 °C dans cet exemple) qu'à ses alentours (environ 25 °C à l'ouest comme à l'est). On note aussi des fluctuations le long de ce transect, montrant des montées de température dans le centre de certaines villes de banlieue (voir Suresnes) ainsi que des baisses significatives lors de la traversée d'espaces verts (bois de Boulogne notamment, visible aussi sur la Figure 2). Cela constitue une première indication que la végétation des parcs peut constituer des îlots de fraîcheur au sein de l'îlot de chaleur urbain. Nous reviendrons largement sur ce point.

3. Thermographie infrarouge : technique permettant d'obtenir une image thermique d'une scène par analyse du rayonnement infrarouge.

4. Transect : dispositif d'observation de terrain où la représentation d'un espace, le long d'un tracé linéaire, est destinée à mettre en évidence la variation spatiale d'un phénomène.

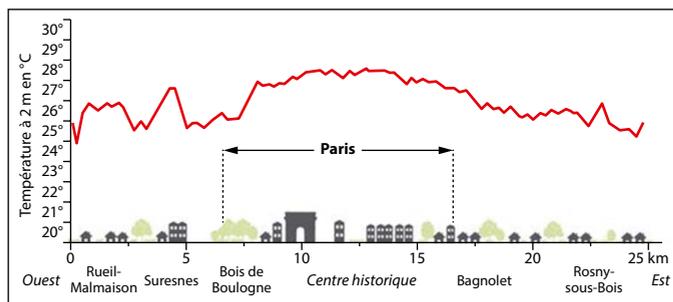


Figure 3

Mesure de la température de l'air le long d'un trajet linéaire de 25 km de l'ouest à l'est de Paris.

Source : Météo France, CSTB, Mairie de Paris.

Cet îlot de chaleur, observé systématiquement dans les espaces urbains, présente habituellement un cycle journalier caractérisé par une intensité maximale en fin de nuit. Des observations faites dans différentes villes du monde montrent aussi, de manière générale, que l'intensité de l'îlot de chaleur urbain est d'autant plus important que les villes sont grandes et peuplées, avec une graduation qui se fait par grande région géographique : pour une même population, cette intensité augmente selon que l'on va des régions tropicales à l'Europe puis à l'Amérique du Nord, où les sources de chaleur internes à la ville sont multiples (transport, climatisation, industrie...).

L'îlot de chaleur urbain peut avoir un impact sur la santé humaine lorsqu'il se combine à des températures caniculaires. Les statistiques de surmortalité quotidienne observées durant la canicule de 2003 à Paris correspondent à la période d'une dizaine de jours pendant laquelle l'inten-

sité de l'îlot de chaleur était de l'ordre de 8 °C sur la température de l'air, au lieu des 4 °C couramment enregistrés aux mêmes dates lors d'un été « normal ».

## 1.2. Pourquoi l'îlot de chaleur urbain ?

Toute scène urbaine, avec son bâti, sa voirie, sa végétation, ses plans d'eau éventuels, est un lieu d'échange de rayonnement, dont le bilan (apports-pertes) conditionne l'énergie radiative disponible ; elle échange aussi avec l'atmosphère de la vapeur d'eau, de l'énergie, ainsi que du gaz carbonique (CO<sub>2</sub>), de l'oxygène (O<sub>2</sub>), et un ensemble de gaz et de particules diverses. Le tout est régulé en partie par le vent, dont la circulation en ville peut s'avérer complexe.

Pour comprendre le phénomène d'îlot de chaleur, il faut examiner ces différents échanges de surface survenant en ville (Figure 4) ; il est commode pour cela de comparer les bilans d'énergie d'une surface urbaine

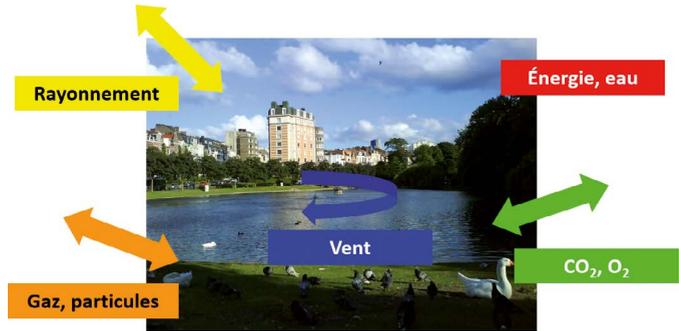


Figure 4

Ensemble des échanges qui régissent la température urbaine.

et d'une surface végétale. Considérons en premier lieu le bilan radiatif.

*1.2.1. L'apport énergétique : le bilan radiatif, ou rayonnement net*

Le bilan radiatif constitue le forçage<sup>5</sup> radiatif, c'est-à-dire la quantité d'énergie incidente disponible au niveau de la surface urbaine. Il résulte (Figure 5) :

- du rayonnement global ( $R_g$ ) : c'est le rayonnement solaire incident qui, durant sa traversée de l'atmosphère, est sujet à de multiples réflexions sur les nuages présents ; une partie de ce rayonnement est réfléchi par la surface à proportion de son albédo<sup>6</sup>  $a$  ;
- de la différence entre le rayonnement thermique émis par l'atmosphère ( $R_a$ ) et le

rayonnement thermique émis par la surface de la terre ( $R_t$ ). Le bilan, appelé rayonnement net  $R_n (= R_g (1-a) + R_a - R_t)$ , représente la quantité d'énergie disponible au niveau d'une surface donnée. Typiquement, ce rayonnement net culmine à quelques centaines de  $W \cdot m^{-2}$  pendant le jour et est négatif pendant la nuit, entraînant dans ce dernier cas un refroidissement radiatif.

*1.2.2. Le bilan d'énergie*

En ville existent d'autres sources d'énergie que le rayonnement net ( $R_n$ ) : ce sont les sources de chaleur interne ( $Q$ ) dues à la circulation automobile, à la climatisation, au chauffage, à la présence d'industries, etc. Sur les surfaces urbaines, l'ensemble de ces sources d'énergie se convertissent en trois grands flux : un flux de chaleur qui, par conduction<sup>7</sup>, pénètre dans le sol ( $G$ ), et deux

5. Forçage radiatif : c'est la différence entre l'énergie radiative reçue et l'énergie radiative émise par un système climatique donné.

6. Albédo : pouvoir réfléchissant d'une surface, soit le rapport de l'énergie lumineuse réfléchi à l'énergie lumineuse incidente.

7. Conduction : mode de transfert de chaleur provoqué par une différence de température entre deux régions d'un même milieu ou entre deux milieux en contact sans déplacement appréciable de matière.

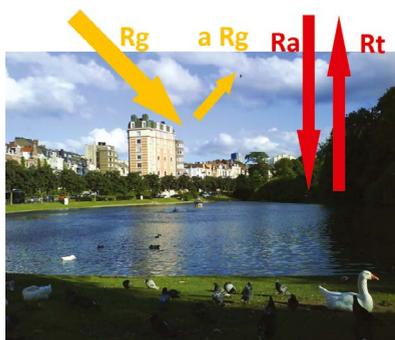


Figure 5

Bilan des échanges radiatifs en ville.

flux qui sont échangés avec l'atmosphère, un flux de chaleur sensible (H) et un flux de chaleur latente (LE)<sup>8</sup>, ce dernier représentant le flux de chaleur associé au flux de vapeur d'eau car il faut de l'énergie pour vaporiser l'eau liquide. Il faut aussi tenir compte de l'échauffement ou du refroidissement des surfaces, et donc introduire un terme de stockage de chaleur (S).

Ainsi le bilan d'énergie exprime-t-il la conversion de l'énergie incidente, sur une scène urbaine, en flux d'énergie et en variation de stockage interne (Figure 6).

### 1.2.3. Bâti et végétation : bilans comparés

Prenons deux exemples extrêmes : une scène où ne figure que de la végétation (Figure 7A) et une scène où seul le bâti est présent (Figure 7B). Plusieurs processus concourent à gé-

8. La chaleur sensible est échangée sans transition de phase physique, entre plusieurs corps formant un système isolé, tandis que la chaleur latente est absorbée lors d'un changement de phase (ici, de l'eau liquide à la vapeur d'eau).

nérer le phénomène d'îlot de chaleur urbain :

- la faiblesse, en milieu bâti, de l'évaporation (E) car les surfaces artificielles sont sèches, sauf immédiatement après une pluie, alors que les surfaces végétales transpirent une bonne partie de l'eau qu'elles prélèvent dans le sol. Lorsque l'évaporation est faible, l'énergie qui n'est pas utilisée pour vaporiser l'eau contribue à réchauffer

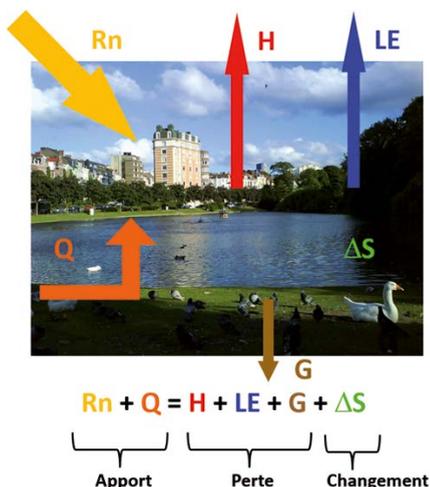


Figure 6

Bilan d'énergie appliqué à la surface urbaine.

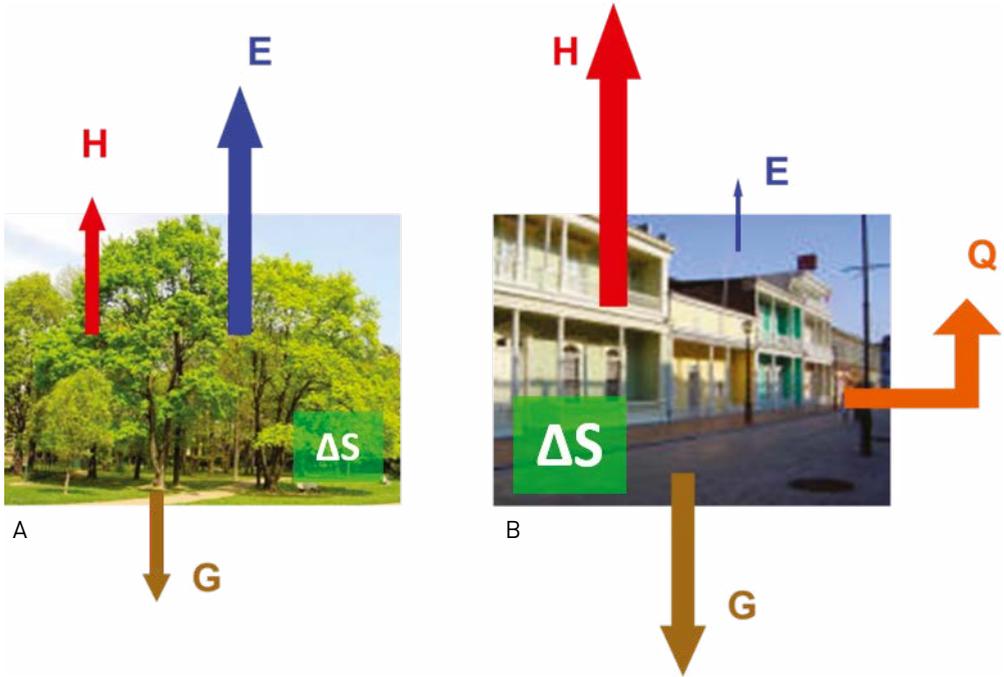


Figure 7

Bilan d'énergie sur une scène végétale (A) et une scène de bâti (B). En ville la faible évaporation (E), les sources internes (Q), le meilleur stockage ( $\Delta S$ ) et la plus faible vitesse des vents favorisent l'échauffement.

les surfaces et, par voie de conséquence, l'atmosphère ;

- une plus grande interception de l'énergie radiative en raison du faible albédo (faible pouvoir réfléchissant) de nombreux matériaux urbains et du rôle de « piège radiatif » joué par la présence des bâtiments, en particulier dans les rues étroites bordées de hauts immeubles (« canyons urbains ») ;
- un bien meilleur stockage de chaleur ( $\Delta S$ ) par les matériaux urbains (bâtiments, revêtements...), du fait de leurs propriétés thermiques (les plantes ont une faible inertie thermique et n'emmagasinent que très peu de chaleur) ;

- l'existence de sources de chaleur interne à la ville (Q), qui n'ont pas d'équivalent dans une scène végétale (production de chaleur par les transports, le chauffage, la climatisation, l'industrie...) ;
- enfin, des vents plus faibles en moyenne à l'échelle de la ville, modérant les échanges thermiques avec l'atmosphère (même si localement peuvent se produire des accélérations, en fonction de la configuration des bâtiments).

Ces cinq grandes raisons permettent de comprendre l'origine de l'îlot de chaleur urbain. Un milieu urbain étant constitué d'un mélange, en proportions variables, d'es-

paces bâtis et d'espaces végétalisés, les deux premières de ces raisons laissent penser que la présence de végétation en ville est de nature à limiter l'échauffement de l'air (et favoriser son humidification par la transpiration végétale). Aussi des espaces végétalisés sont-ils aptes à constituer des îlots de fraîcheur au sein de l'îlot de chaleur urbain. C'est la question que nous allons maintenant aborder.

## 2 La végétation urbaine, un îlot de fraîcheur ?

Les éléments d'explication de l'îlot de chaleur urbain que nous venons d'évoquer dessinent, *a contrario*, le rôle potentiel de la végétation urbaine comme régulateur du microclimat : elle induit avant tout un rafraîchissement de l'air par des effets d'ombrage (interception du rayonnement qui, de fait, ne contribue pas à réchauffer les surfaces bâties) et par son action sur

l'évaporation de l'eau du sol (via la transpiration foliaire en particulier), phénomène consommateur en énergie qui tend à limiter l'échauffement des surfaces végétales. Bien sûr, l'ampleur de ces effets dépend considérablement du type de végétation urbaine concerné et de la quantité de biomasse végétale présente.

### 2.1. Effet de la végétation à l'échelle de la ville

La **Figure 8A** présente une thermographie infrarouge à fine échelle réalisée sur la ville de Rotterdam. Cette thermographie a été comparée avec une carte d'occupation du sol donnant le pourcentage de surface végétale calculé quartier par quartier. Le résultat de la comparaison est frappant, car la température décroît pratiquement linéairement avec le pourcentage d'espace vert (**Figure 8B**) : avec 60 % de surface végétale, la température n'est que de 22-23 °C, alors qu'au cœur

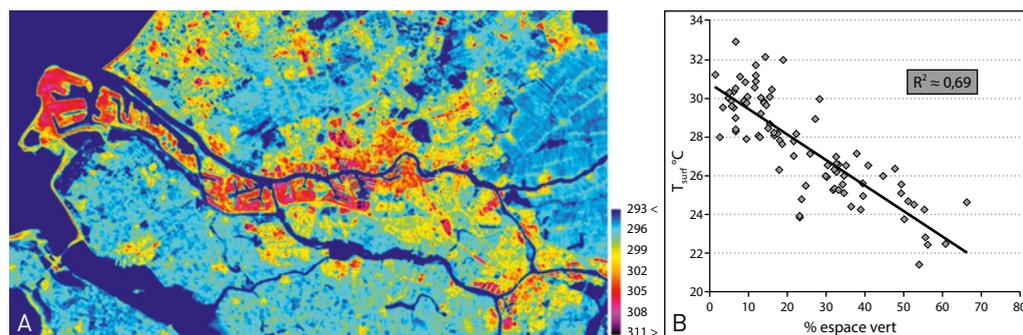


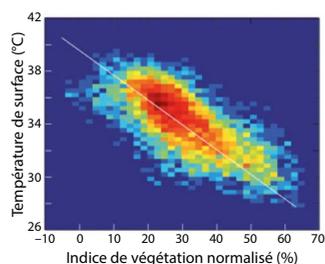
Figure 8

A) Thermographie de la ville de Rotterdam (Landsat ETM, résolution 60 m) ; le code couleur est tel que les zones en rouge sont plus chaudes que les zones en bleu ; B) relation entre la température de surface et le pourcentage de surface végétalisée sur chaque pixel de 1×1 km considéré.

Source : Réimprimé à partir de *The surface heat island of Rotterdam and its relationship with urban surface characteristics*, *Resour. Conserv. Recy.*, Klock et coll., copyright 2012, avec l'autorisation d'Elsevier.

de la ville où tout est minéral, elle est 6 ou 7 °C plus élevée. La présence de végétation s'accompagne donc d'une baisse significative de la température de surface ; il faut toutefois noter que sur une telle scène urbaine, les quartiers les plus végétalisés peuvent être aussi ceux où la production d'énergie anthropique (chauffage, industrie, circulation automobile...) est la plus faible.

Si nous reprenons maintenant l'exemple de la thermographie de Paris pendant la canicule, on observe une relation équivalente à celle vue pour la **Figure 8** à Rotterdam (**Figure 9**). Les parties les plus végétales de l'agglomération parisienne, notamment les bois de Boulogne et de Vincennes évoqués plus haut, ont les températures les plus faibles. Les parties très minérales, au cœur du nuage rouge, ont les températures les plus élevées.



**Figure 9**

*Les parties végétalisées de Paris ont une température plus faible que les parties minérales (l'indice en abscisses est une évaluation de la quantité de surface végétale présente sur une zone donnée ; la température est en ordonnées).*

Source : PARIS, août 2003 (Dousset et coll., 2011).

## 2.2. Les parcs urbains

Pour examiner l'influence de la végétation urbaine sous ses différentes formes, commençons par les parcs urbains. Une étude a comparé un parc dans la ville de Mexico, d'une taille d'environ 2-3 km de large, à un autre beaucoup plus petit à Kumamoto (Japon), de 200 m de diamètre. Au cœur du parc mexicain, la température au petit matin était de 5 °C inférieure à celle mesurée à quelque distance de là ; pour le parc japonais, la différence était deux fois plus faible. Même si ces exemples sont pris dans des contextes très différents (tissu urbain, saison, espèces présentes...), ils révèlent néanmoins une observation plus générale : la température de l'air est plus faible au cœur du parc qu'à l'extérieur (de quelques degrés au maximum, à un moment donné), et l'intensité de l'îlot de fraîcheur généré dépend de la taille du parc, un petit parc n'affectant que localement la température de l'air alors qu'un grand parc conduit à une baisse plus forte, qui s'étend sur une zone plus étendue. La zone d'influence s'avère être de l'ordre de la taille du parc : un parc de 500 mètres de diamètre diminue la température de manière notable sur environ 500 mètres autour. Ainsi, quelques grands parcs arborés provoqueraient un plus grand refroidissement que de nombreux petits parcs de même surface totale : la surface affectée est la même, mais les températures sont plus basses dans le premier cas.

Une synthèse bibliographique a récemment été conduite

sur environ vingt-cinq parcs urbains, en vue d'étudier leur influence sur la réduction moyenne de la température de l'air. Sur la période diurne (6h-20h) comme pendant la nuit (22h-6h), cette réduction moyenne est de l'ordre de 1 °C (les cas extrêmes étant d'environ 2 °C). Les parcs tendent également à humidifier l'air, par transpiration de la végétation et évaporation de l'eau contenue dans les sols ; peu de données sont disponibles sur ce point.

### 2.3. Les arbres de rue

L'arbre en ville a d'abord un effet d'ombrage local, limitant l'apport d'énergie radiative sur le piéton, mais aussi sur les surfaces de sol et de bâtiments affectés par l'ombre. Cette baisse de rayonnement incident dépend notamment de la densité de feuillage, de la taille des feuilles et de la géométrie de la couronne ; elle peut entraîner une baisse significative de la température de surface des bâtiments, et donc des dépenses de climatisation et du transfert de chaleur à l'atmosphère, ce qui tend à diminuer le phénomène d'îlot de chaleur urbain. Les arbres à feuilles caduques ont l'avantage de laisser passer le rayonnement en hiver tout en offrant de l'ombrage en été.

Cet effet d'ombrage, qui a fait l'objet de nombreuses études, reste très limité spatialement à l'échelle d'un arbre. En revanche, un ensemble d'arbres d'alignement, comme il en existe sur de nombreuses avenues (*Figure 10*), peut avoir un effet significatif sur le microclimat à une échelle plus

grande. On a pu mettre en évidence des refroidissements de l'air de l'ordre de 2 à 3 °C par une belle journée d'été, ainsi qu'une humidification de l'air. Cet effet est d'autant plus important que la température de l'air est plus élevée. S'il peut être ressenti en dehors de la zone arborée (rues adjacentes), il décroît néanmoins rapidement avec la distance, prise perpendiculairement à l'avenue, et disparaît au bout de quelques dizaines de mètres au maximum.

L'effet d'ombrage peut avoir d'autres conséquences indirectes : on a par exemple montré que la présence d'arbres sur les parkings permettait de limiter l'émission de COV (composés organiques volatils, voir plus loin), occasionnée par l'évaporation du carburant des véhicules. De manière générale, la baisse



*Figure 10*

*Arbres d'alignement à Paris (boulevard de Rochechouart et boulevard de Clichy).*

de température occasionnée par la végétation est de nature à diminuer les émissions de polluants et ralentir la chimie dans lesquels ils sont impliqués.

#### 2.4. La végétalisation des sols urbains

Au-delà du cas des parcs urbains et des arbres de rue, la végétalisation de divers types de surfaces urbaines peut apparaître comme une solution prometteuse pour abaisser la température de la ville. Des simulations ont par exemple été réalisées pour déterminer ce qui se serait passé à Paris pendant la canicule de 2003, si 25 %, 50 % ou 75 % des surfaces disponibles de type trottoir ou rond-point (toute surface au sol hors chaussée) avaient été engazonnées. Les résultats de l'étude ont montré que même avec 75 % de surface végétalisée, la température minimale ne diminuerait que d'environ 0,5 °C, tandis que la température maximale, elle, diminuerait de 1 à 2 °C. Les baisses obtenues par engazonnement des surfaces disponibles sont donc réelles, mais restent modérées ; l'engazonnement ne produit pas d'ombrage, il agit essentiellement sur le flux d'évaporation.

#### 2.5. Toitures et façades vertes

De nombreuses études ont été menées sur ce sujet ces dernières années (voir aussi le [Chapitre de J.-P. Viguier](#) dans cet ouvrage *La chimie et les grandes villes*, EDP Sciences,

2017). Quatre points sont à retenir :

- si la végétation y est suffisamment dense, ces façades et toitures végétales sont de bons isolants qui améliorent de façon significative la consommation énergétique, aussi bien en hiver pour le chauffage qu'en été pour la climatisation ;

- l'impact de ces façades végétales sur la température de l'air est faible, à moins que tous les murs soient couverts de végétation. Compte tenu de leur taille limitée, et même si leur température de surface est plus faible que sur des toitures non végétales, les toitures végétales ont également un impact limité sur la température de l'air ; comme elles concernent des couches d'atmosphère plus élevées, elles n'ont en outre pas beaucoup de conséquences sur le confort du piéton ;

- au-delà du bénéfice visuel qu'elles peuvent apporter, les façades vertes peuvent néanmoins améliorer le confort thermique du piéton, non par un effet sur la température de l'air mais plutôt par un effet radiatif : la végétation s'échauffant beaucoup moins qu'un mur au soleil, elle reste pratiquement à la température de l'air et induit donc une charge radiative plus faible sur le piéton ;

- il faut savoir que l'irrigation de ces façades et toitures végétales consomme beaucoup d'eau, ce qui, en plus de lourdes contraintes techniques liées à l'étanchéité, peut poser des problèmes dans les régions où la ressource en eau n'est pas abondante.

### 3 Végétation et polluants urbains

#### 3.1. La végétation, lieu d'échanges

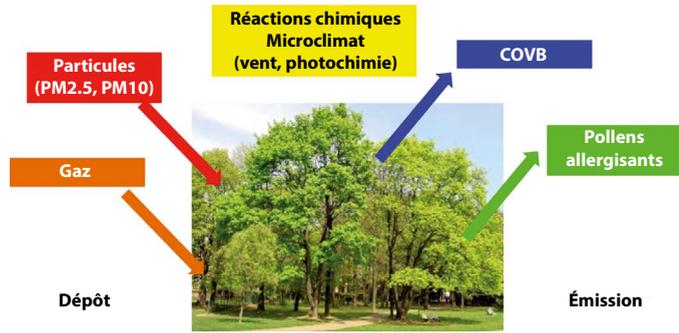
La **Figure 11** résume les différents échanges de polluants entre la végétation et l'atmosphère. Un certain nombre de composés, sous forme de gaz ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_3$ , COV, etc.) et de particules (dans une gamme de diamètres typiques allant de 1 à 60 microns ( $\mu\text{m}$ ) pour ces dernières) peuvent se déposer sur la végétation par différents mécanismes : diffusion, interception, impaction, sédimentation (voir les **Chapitres de J. Moussafir et F. Thévenet** dans *La chimie et les grandes villes*)...

La végétation émet elle-même des composés organiques volatils dits biogéniques<sup>9</sup>, ou COVB, produits par des processus chimiques et physiologiques (isoprène<sup>10</sup>, terpènes<sup>11</sup>...) ; ces composés, en interagissant avec d'autres gaz (en particulier les oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ) présents dans les gaz d'échappement), sont des précurseurs de l'ozone ( $\text{O}_3$ ) et jouent un rôle important dans son cycle. Les plantes émettent également des pollens qui, pour certaines espèces, s'avèrent allergisants et contribuent ainsi

9. Biogénique : qui engendre la vie ou la favorise.

10. Isoprène : composé chimique produit par les plantes dans leurs chloroplastes, à partir du diméthylallyl-pyrophosphate (DMAPP).

11. Terpènes : classe d'hydrocarbures, produits par de nombreuses plantes, en particulier les conifères, dont le squelette carbonique est constitué d'unités isoprène.



**Figure 11**

La végétation capte des substances « polluantes », mais en émet également.

à une autre forme de pollution de l'air urbain, affectant directement la santé des individus réceptifs.

Ainsi la végétation peut-elle jouer un rôle à la fois pourvoyeur (émission) et épurateur (dépôt) de polluants. Ces processus de dépôt et d'émission sont sous l'influence du microclimat – notamment le rayonnement, le vent, la température et l'humidité. Leur bilan est donc très variable selon les saisons et les quartiers, en fonction des espèces présentes et de leur densité, des conditions météorologiques et de la morphologie du tissu urbain.

#### 3.2. Dépôt de gaz et particules

Les polluants gazeux pénètrent essentiellement dans la feuille par diffusion au travers de petits pores, les stomates (**Figure 12**) ; ils peuvent ensuite être métabolisés dans les cellules. Cet aspect stomatique est important parce que c'est aussi par les stomates que passe le  $\text{CO}_2$  utilisé

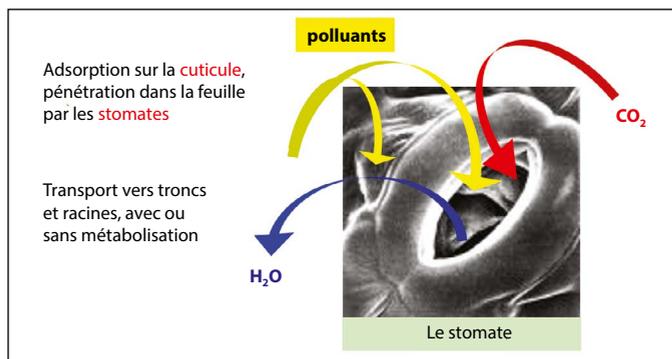


Figure 12

Les stomates des plantes sont utiles à la photosynthèse et captent aussi les polluants. Ils se ferment plus ou moins selon les conditions climatiques et le niveau d'alimentation hydrique de la plante.

pour la photosynthèse et que sort la vapeur d'eau lors du processus de transpiration. Les stomates se ferment à des degrés divers selon les conditions microclimatiques (rayonnement, température, humidité de l'air, stress hydrique, pollution...) et l'état de la plante. Il existe ainsi un fort couplage entre le microclimat et la capacité de la végétation à « dépolluer l'air ».

Les particules transportées par l'air, quant à elles, peuvent être interceptées par les feuilles et se déposer à leur surface par adsorption : les feuilles recouvertes de cuticule<sup>12</sup> (comme on en trouve notamment chez les espèces résineuses), ainsi que les feuilles à la surface rugueuse, collante ou dotée de poils, sont particulièrement efficaces. Ces particules peuvent ensuite tomber au sol

12. Cuticule : couche cireuse externe qui recouvre et protège les organes aériens des végétaux, ainsi que les organes de certains animaux.

par gravité, être remises en suspension dans l'air ou lessivées par la pluie.

Qu'il s'agisse de gaz ou de particules, la capacité de filtration de la végétation est très variable. Elle dépend en premier lieu de la surface foliaire présente et du volume d'air occupé : les arbres sont en général plus efficaces que les haies, elles-mêmes plus efficaces que les pelouses. Cette capacité dépend aussi des espèces : par exemple les arbres à feuilles caduques semblent plus efficaces pour assimiler les oxydes d'azote, alors que les conifères piègent mieux les grosses particules (entre 2,5 et 10 µm).

Sous réserve qu'elle occupe une surface suffisamment importante, la végétation urbaine permet de réduire les concentrations atmosphériques en polluants gazeux. Une étude réalisée sur 55 villes américaines donne des réductions locales allant jusqu'à 16 % pour certains composants tels que l'ozone (O<sub>3</sub>) et le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), et 9 % pour le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>). Cependant, la moyenne horaire n'est que de l'ordre de 1 à 4 %, et la moyenne annuelle est inférieure à 1 % pour les polluants réglementés. L'effet est donc notable, tout au moins à certaines époques, mais il n'est pas très sensible sur de grandes périodes de temps ; il peut s'avérer particulièrement profitable à certains moments, en permettant par exemple d'écarter des pics de pollution.

En ce qui concerne les particules atmosphériques, cette même étude montre que les

réductions de concentration ne dépassent jamais 8 %, avec une moyenne annuelle, là encore, de l'ordre de 1 %. Si l'on note des accumulations sur les feuilles les plus efficaces pour capter les particules, ces feuilles ne captent en fait qu'une petite partie de l'ensemble des particules présentes dans l'air.

### 3.3. Émission de COVB et pollens allergisants

Si la végétation absorbe de l'ozone par les stomates, un certain nombre d'espèces végétales émettent des COVB qui sont eux-mêmes précurseurs d'ozone et de monoxyde de carbone (CO), et deux à trois fois plus réactifs que les COV anthropogéniques. Ces émissions de COVB dépendent fortement de la physiologie de la plante, du moment de la saison et donc du microclimat. Le bilan est très variable selon les quartiers : il dépend de facteurs géographiques et morphologiques, de la densité de végétation, des essences présentes. Sans entrer dans le détail, l'absorption de l'ozone par la végétation fait en général plus que contrebalancer la création d'ozone due à l'émission des COVB ; le bilan de ces deux processus résulte donc en une dépollution de l'ozone par la végétation. Il vaut cependant mieux éviter en ville certaines espèces qui produisent de grandes quantités de COVB comme par exemple bouleaux, mahonias, liquidambers, platanes, saules, peupliers, chênes et la plupart des conifères.

De même, un certain nombre d'espèces végétales (arbres,

graminées, autres plantes) émettent des pollens allergisants, à des taux très variables selon les espèces et les saisons. Ces pollens sont porteurs d'allergènes en surface : soit des glycoprotéines, soit des particules ultrafines issues des moteurs diesels et de la nucléation de polluants secondaires par accréation surfacique. Là encore, il faut connaître les espèces les plus allergènes et éviter d'en planter en ville : saule, cyprès, armoise, plantain, ambroisie, ray-grass...

### 3.4. Ventilation des rues et effet d'écran

La ventilation des rues joue un rôle très important sur le transport et le dépôt des polluants, notamment particuliers. Pour comprendre son effet, considérons deux cas extrêmes, selon que le vent est dans l'axe de la rue ou perpendiculaire à ce dernier. Dans le premier cas, la ventilation est efficace et induit une très bonne dispersion des polluants ; dans l'autre cas, des mouvements tourbillonnaires (vortex) peuvent s'installer, entraînant le piégeage de particules dans l'espace de la rue. Ce dernier effet est d'autant plus important que le rapport largeur/hauteur (L/H) de la rue est faible. Pour de faibles valeurs de L/H (inférieures à 0,5 par exemple ; on parle alors de « canyons urbains »), plusieurs cellules de recirculation d'air superposées, plus ou moins indépendantes, peuvent se mettre en place, assurant un piégeage efficace de polluants à divers niveaux. Lorsque L/H augmente, la configuration de

l'écoulement d'air évolue : à  $L/H = 0,7$ , un seul vortex est observé, mais pour des valeurs supérieures peuvent émerger des zones protégées, ou au contraire des zones d'accumulation au sol ou sur l'une des faces de la rue.

La ventilation peut être affectée par la présence de végétation : pour peu que cette dernière soit suffisamment haute et dense, elle réduit la vitesse du vent en offrant une résistance au déplacement de l'air. Les processus de dispersion dans les rues, en particulier, peuvent être modifiés par la présence d'arbres d'alignement, dont l'effet d'écran a deux effets antagonistes sur la qualité de l'air : une partie de l'écoulement passe au travers du feuillage, qui peut alors capter des particules ; mais une autre partie peut être défléchie vers le sol, entraî-

nant éventuellement une accumulation des polluants au pied des arbres. La captation par les arbres est d'autant plus forte que les feuilles ont une surface rugueuse, une surface foliaire totale élevée et une structure de houppier permettant une bonne pénétration de l'air. Des mesures fines (sur maquettes en soufflerie par exemple) ou des simulations numériques peuvent s'avérer nécessaires pour prévoir le comportement de polluants dans des cas réels.

On peut simuler, ainsi, l'impact de différents écrans de végétation (Figure 13). On montre par exemple que la présence d'arbres plantés à forte densité et offrant un feuillage large et couvrant peut entraîner une forte réduction de la vitesse du vent ainsi qu'une déconnexion entre l'air au-

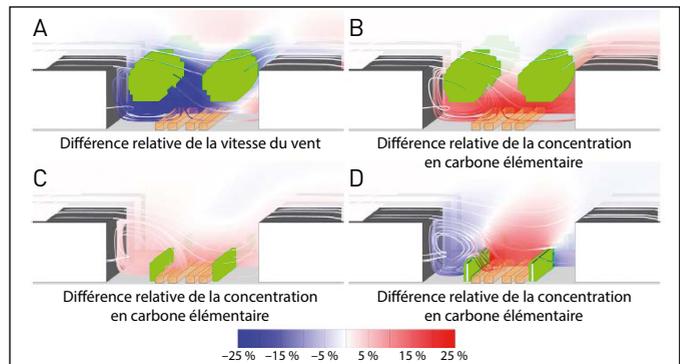


Figure 13

Influence de la nature de l'écran de végétation sur la diffusion d'un polluant (carbone élémentaire). A) Rue avec arbres : réduction de la vitesse du vent ; B) rue avec arbres : accumulation de la pollution au niveau de la rue et des trottoirs ; C) rue avec haie perméable : meilleure diffusion de la pollution ; D) rue avec haie imperméable : accumulation de la pollution au niveau de la rue et amélioration de la qualité de l'air sur les trottoirs.

Source : d'après Vos et coll. (2013). Improving local air quality in cities: To tree or not to tree?, *Environ. Poll.*, 183 :113-122.

dessus de la canopée<sup>13</sup> et l'air qui est en dessous : les polluants émis par les véhicules peuvent alors avoir tendance à s'accumuler dans les basses couches, là où se déplacent les automobilistes et les piétons. Dans d'autres simulations où les arbres sont remplacés en bordure de chaussée par des haies d'arbustes plus ou moins perméables, on observe que des haies peu perméables ont tendance à confiner la pollution au niveau de la chaussée et à la réduire sur les trottoirs, ce qui constitue un système efficace pour les piétons. Dans le cas de haies plus poreuses, on observe une meilleure diffusion de la pollution sur l'ensemble de la scène, avec des niveaux résultants plus homogènes et plus bas en moyenne. Enfin, on notera que les premières rangées d'arbres sont mieux ventilées par le vent incident, et qu'une configuration en bandes d'arbres est ainsi plus efficace pour la captation de la pollution qu'une disposition en blocs.

### 3.5. Ville, végétation et bilan de carbone

Le gaz carbonique n'est pas un polluant de l'air à proprement parler, mais un important gaz à effet de serre. Les activités anthropiques de la ville (industrie, transport, chauffage...) produisant beaucoup de CO<sub>2</sub>, il est légitime de se demander dans quelle mesure la végétation peut contribuer à absorber, par la photosynthèse, ce surplus de gaz carbonique. À cet effet, une com-

paraison a été menée entre deux villes : Baltimore, ville américaine très végétalisée, et Bâle, en Suisse, nettement moins « verte ». Dans le premier cas on a pu montrer que, sur toute une période de l'année (de mars à octobre et de 6h à 18h dans la journée), le flux de carbone capté par la photosynthèse l'emporte largement sur les flux de carbone émis par la ville. À l'opposé, à Bâle, le flux net de CO<sub>2</sub> urbain représente une émission : la quantité de végétation présente dans cette ville est insuffisante pour contrebalancer les émissions de CO<sub>2</sub>.

Ces observations peuvent être généralisées. Une synthèse d'études menées sur une trentaine de villes a montré qu'à l'échelle d'une année, on n'observe un stockage net de CO<sub>2</sub> que dans quelques rares cas de figure. Les villes réussissant à compenser les émissions anthropogéniques de CO<sub>2</sub> par la végétation sont donc encore peu nombreuses. Il faudrait pour cela une végétalisation très forte, paraissant actuellement illusoire, des villes à forte activité anthropique : on a montré par exemple que la séquestration annuelle de carbone par tous les arbres de l'agglomération de Chicago (États-Unis) était de 140 000 tonnes, ce qui ne représente que la quantité de carbone émise par les transports de la ville en une semaine (données de 1991).

## 4 La modélisation, un puissant outil

La modélisation est un puissant outil qui s'avère complémentaire des campagnes

13. Canopée : partie sommitale de la couronne des arbres en forêt.

d'observation menées en ville, dont le caractère souvent local et la lourdeur (mâts ou tours instrumentées) limitent la faisabilité et la portée. Ont ainsi été développés un grand nombre de modèles urbains reposant sur différentes formulations mathématiques des processus hygro-thermo-aérauliques qui se produisent dans l'environnement urbain. Les modèles les plus complets couplent le fonctionnement de l'atmosphère à celui des surfaces, et diffèrent tant par leur échelle de travail (ville, quartier, rue, voisinage d'un bâtiment) que par les processus qu'ils prennent en compte : vitesse du vent et turbulence, comportement du rayonnement au sol ou sur les murs, transpiration des arbres, régulation thermique des bâtiments, émission, diffusion et dépôt des particules polluantes, couplage avec l'hydrologie urbaine, etc. Ces modèles permettent par exemple de calculer le rayonnement atteignant chaque élément de la ville (murs, toits, chaussée, végétation...), les champs de vent et de température en tout point d'un paysage urbain, la dispersion de particules polluantes et leur dépôt sur la végétation. Des exercices d'intercomparaison de ces modèles ont été menés, faisant ressortir les points clés sans lesquels une bonne simulation des processus est illusoire : connaissance de l'albédo des surfaces, prise en compte de la morphologie urbaine pour le calcul des flux radiatifs thermiques, qualité de la description de la végétation.

Une fois que l'on a pu documenter les caractéristiques des surfaces et de la végétation urbaine, et que l'on s'est assuré de la capacité des modèles à reproduire les phénomènes observés, ces outils de modélisation peuvent être utilisés pour des analyses de sensibilité à la présence de la végétation urbaine. Un exemple simple de simulation, sur un domaine restreint, a été présenté en *Figure 13* : il s'agissait de tester l'influence de différents aménagements végétalisés sur la diffusion d'un polluant dans une rue. Au-delà de cet exemple particulier, on peut imaginer un grand nombre d'études possibles : par exemple, test de l'impact sur le microclimat et la qualité de l'air de tel schéma de végétalisation (parcs, arbres d'alignement, façades et toitures végétales...) dans telle configuration urbaine (réseau des rues, hauteur du bâti...) ; établissement de scénarios de végétalisation reposant sur certains types d'espèces disposés selon certaines configurations spatiales ; comparaison de schémas d'aménagement reposant, pour les uns, sur de nombreux espaces verts de dimension modeste, et pour les autres sur un faible nombre de grands espaces, etc.

Une quinzaine d'équipes françaises ont travaillé ensemble sur ces aspects de 2010 à 2013, dans le cadre du projet VegDUD (Végétation et développement urbain durable), financé par l'Agence nationale de la recherche. Les résultats de ces travaux ont été publiés dans le livre *Une ville verte – Les rôles du végétal en ville* (éditions QUAE).

## **Penser la ville verte**

Il est capital dans les futures études de considérer les interactions entre différents phénomènes, qui conduisent à penser les scénarios de verdissement urbain en termes de compromis : par exemple, comment assurer un rafraîchissement de l'air urbain par la végétation sans émettre une trop grande quantité de COVB qui pourrait entraîner une augmentation de la teneur en ozone ? Ou encore comment favoriser l'ombrage des rues sans restreindre trop fortement leur ventilation ? Comment favoriser la végétation urbaine sans conduire à une consommation d'eau qui pourrait s'avérer problématique dans un éventuel contexte de restriction ? Ces questions demandent de toute évidence une approche transdisciplinaire de la végétalisation des villes car elles débordent largement du strict cadre du microclimat et de la qualité de l'air : la végétation exerce aussi des effets avérés, non abordés dans ce chapitre, sur la propagation du bruit, l'infiltration de l'eau et le ruissellement, l'érosion du sol, la biodiversité ; et elle remplit des fonctions plus subjectives liés à l'esthétique, au bien-être du citoyen, au lien social que peuvent favoriser les espaces verts, etc. C'est bien l'ensemble des services écosystémiques que la végétation urbaine procure aux êtres humains qu'il faudra prendre en compte dès lors que l'on voudra imaginer et mettre en place des schémas de verdissement.

