

Régulation du climat thermique urbain par les arbres : ombrage et température du couvert.

M. Saudreau, Pierre Kastendeuch, Jérome J. Ngao, Georges Najjar, Thierry Ameglio

▶ **To cite this version:**

M. Saudreau, Pierre Kastendeuch, Jérome J. Ngao, Georges Najjar, Thierry Ameglio. Régulation du climat thermique urbain par les arbres : ombrage et température du couvert.. CIAg : Ville à haute intensité écologique : place du végétal, Sep 2015, Angers, France. pp.23-34. hal-02743096

HAL Id: hal-02743096
https://hal.inrae.fr/hal-02743096

Submitted on 3 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Régulation du climat thermique urbain par les arbres : ombrage et température du couvert

Saudreau M.[1,2], Kastendeuch P.[3], Ngao J.[1,2], Najjar G.[3] et Améglio T.[1,2]

[1] INRA, UMR547 PIAF, F-63100 Clermont-Ferrand

[2] Clermont Université, UMR547 PIAF, F-63 Aubière

[3] Laboratoire Icube UMR 7357, Université de Strasbourg, 300 bd Sébastien Brant - CS 10413 - F-67412 Illkirch

Correspondance : marc.saudreau@clermont.inra.fr

Résumé

La structuration spatiale, la capacité d'intercepter la lumière et de transpirer des feuilles confèrent aux arbres un potentiel d'action sur le climat urbain notamment thermique. Les travaux d'expérimentation et de modélisation entrepris depuis une vingtaine d'années ont permis de quantifier ce potentiel à différentes échelles : de la rue à la ville en passant par le quartier. Plus particulièrement les arbres agissent sur le climat urbain en modifiant le bilan radiatif (effet d'ombrage du sol et des bâtiments) et diminution de la température d'air via la transpiration. La compréhension de ce mécanisme permet de mieux formaliser les interactions entre une strate arborée (arbre seul ou parc) et le climat urbain, et d'identifier les conditions nécessaires qui permettront d'assurer une régulation thermique. Parmi ces conditions l'accès à l'eau apparaît comme primordial.

Mots-clés : Ville, Température Feuille, Evapotranspiration, Conductance stomatique

Abstract: Thermal regulation of urban climate by trees: shade and canopy temperature

Trees can potentially have a positive effect on the thermal urban climate due to their 3D spatial structure, their ability to intercept light and to evaporate water. Experimental and modelling works done since twenty years enabled to verify and quantify this potential at different scales: from the street to the city through the neighborhood. More particularly it has been shown that trees impact the urban climate system by altering the urban radiation balance by shading soil and buildings, and by lowering air temperature through transpiration process. Understanding these mechanisms makes it possible to better formalize interactions between a tree cover (single tree or park) and urban climate, and to identify conditions that will ensure a thermal regulation. Among these conditions water availability appears to be crucial.

Keywords: City, Leaf Temperature, Evapotranspiration, Stomatal Conductance

Introduction

La ville est le lieu qui connaît les plus fortes concentrations humaines et elle est devenue (dans bien des cas) le lieu de vie de la majorité de la population : la population urbaine dans le monde égalait en 2008 et pour la première fois de l'histoire la population rurale (UNFPA, 2007). Or, le milieu urbain présente des particularités qui le rendent extrêmement vulnérable du point de vue du confort climatique (pointes de températures). Ces aspects se révèlent particulièrement prégnants si on rajoute la perspective d'un changement climatique dont on ne sait pas encore précisément évaluer la magnitude,

même si les projections climatiques indiquent une variabilité plus importante du climat avec une occurrence plus fréquente des extrêmes climatiques (IPCC, 2007). La préparation de la « ville durable » au changement climatique passe par une amélioration du confort thermique à l'intérieur du milieu urbain, notamment lors des phénomènes de fortes chaleurs. Dans ce cas, il faut envisager une protection efficace de la population, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur des bâtiments, lors du pic de chaleur de l'après-midi, et des moyens efficaces pour provoquer une diminution significative de l'Îlot de Chaleur Urbain (ICU). L'ICU est un phénomène climatique qui se manifeste surtout la nuit et qui correspond à une différence positive des températures entre la ville et la campagne voisine qui peut aller de 2 à 3°C, jusqu'à plus de 10° pour de très grandes villes lorsque tous les facteurs sont réunis (Heino, 1979 ; Oke, 1987 ; Coutts et al., 2013). En France, aucune de nos grandes villes n'est vraiment épargnée par les évènements caniculaires. Les vagues de chaleurs qui ont frappé le pays lors des étés 2003 et 2015 en sont la preuve. De même, la plupart de nos villes connaissent des phénomènes d'ICU nocturnes importants. Par exemple, les études menées sur une ville moyenne comme Strasbourg ont permis d'observer des ICU de 8°C (Kastendeuch et al., 2010).

La préparation d'une ville plus « durable » au changement climatique passe par plusieurs étapes : (*i*) identifier les situations et les processus climatiques qui mènent à de l'inconfort ou qui donnent naissance à l'ICU ; (*ii*) améliorer la gestion des flux d'eau et des flux thermiques incriminés et évaluer les gains possibles; (*iii*) proposer des solutions concrètes comme : végétalisation du sol, des bâtiments, isolation de l'habitat, modification des formes de l'habitat, etc … (Ong, 2003 ; Rosenzweig et al., 2009 ; Onerc, 2010 ; Apur, 2012). Dans tous les cas, il s'agit soit d'une action indirecte, ou préventive, qui consiste à agir sur la source de chaleur i.e. le rayonnement solaire ou son stockage, en modifiant l'albédo du sol et du bâti urbain, soit d'une action plus directe, ou symptomatique, de lutte contre l'augmentation de la température en rafraîchissant l'atmosphère par climatisation naturelle (enherbement, parcs arborés) ou artificielle (arrosage des chaussées). Parmi l'éventail de solutions, l'augmentation des surfaces végétales en introduisant davantage de pelouses et d'arbres semble une solution prometteuse, car au-delà de l'aspect thermique, elle offre aussi une large palette de services : sociétaux, environnementaux et économiques (Mullaney, 2015).

Toutefois, la mise en œuvre du levier végétal nécessite de bien comprendre le fonctionnement de la végétation et de ses interactions avec le microclimat urbain. Les interactions entre un arbre et son environnement sont complexes car un arbre est un organisme vivant qui par sa plasticité (croissances aérienne et racinaire par exemple) peut s'adapter à un nouvel environnement (taille, contrainte climatique) et par son fonctionnement peut modifier son environnement proche (Hallé, 2005). Plasticité et fonctionnement sont intimement liés mais nous nous focalisons ici sur le fonctionnement (sa physiologie) en lien avec sa forme et son environnement climatique et pédoclimatique. Sur ce point, le bénéfice d'une strate arborée en milieu urbain repose sur la capacité des arbres à transpirer et sur l'ombrage qu'ils génèrent. Un des objectifs de cet article est tout d'abord de rappeler les principes physiques et physiologiques sous-jacents. La partie « régulation thermique par la transpiration » sera plus particulièrement développée car c'est un mécanisme plus complexe et moins bien vulgarisé que l'ombrage qui est plus facilement perçu et compris. Ces mécanismes sont ensuite replacés dans l'environnement urbain via des exemples issus d'expérimentations ou de simulations. Ils permettront de mieux cerner les possibilités d'action et leurs limites.

1. Les principaux mécanismes

La principale spécificité du fonctionnement d'un arbre est la mise en place d'un flux d'eau (sève brute) entre les racines qui absorbent l'eau et des nutriments, et les feuilles où l'eau s'évapore (Figure 1, Points 2). Le moteur de ce flux est le système foliaire qui évacue de l'eau sous forme de vapeur (transpiration) ; cette transpiration va induire une montée de l'eau par ses vaisseaux conducteurs dans le bois. Parallèlement, les feuilles absorbent le dioxyde de carbone (CO_2) présent dans l'air. Sous l'effet

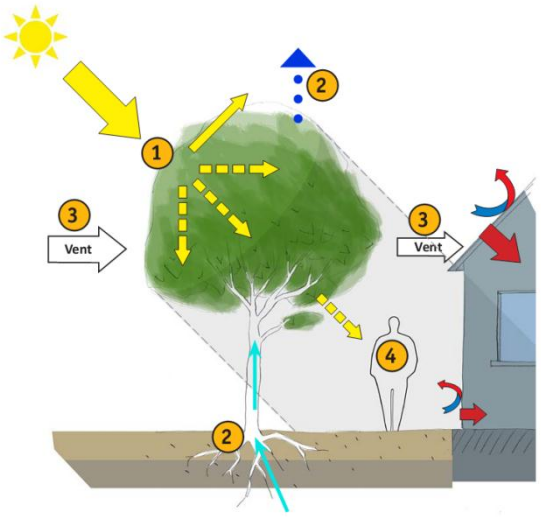


Figure 1 : Schéma descriptif du fonctionnement d'un arbre et des différents mécanismes de régulation du climat urbain (VegDUD – 2014)

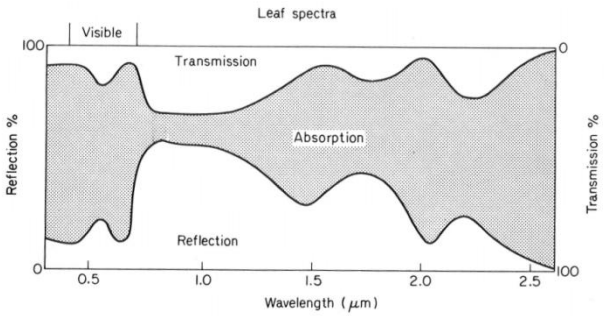


Figure 2 : Propriétés spectrales d'une feuille verte (Monteith et Unsworth, 1990)

du rayonnement solaire intercepté par les feuilles (Figure 1, Point 1), ce CO_2 est alors transformé en sucres par la plante par le processus de photosynthèse. Ces composés sont ensuite redistribués aux différents organes via la sève phloémienne, ou sève élaborée, et alloués aux différentes fonctions physiologiques telles que la croissance, la maintenance des tissus, l'élaboration des composés de défenses ou de réserve (Lacointe, 2000).

Les deux fonctions qui impactent le climat thermique urbain sont l'ombrage, qui va réduire l'énergie transmise au sol, au bâti ou aux passants, et la transpiration qui va contribuer au rafraichissement de l'environnement. Ces deux aspects sont développés ci-dessous.

1.1 Ombrage

La capacité d'interception du rayonnement solaire direct (Figure 1, Point 1) dépend des propriétés radiatives des feuilles et de leur agencement dans l'espace. La quantité de rayonnement absorbé par le feuillage varie tout d'abord en fonction de la longueur d'onde du rayonnement (Figure 2). Pour une feuille, plus de 80% du rayonnement solaire qui participe à la photosynthèse (de 400 à 700 nm) est intercepté. Les 20% restants sont transmis vers le sol (Figure 1, Point 4) ou réfléchis vers l'atmosphère. Inversement, 15% seulement du rayonnement dans le proche infrarouge (de 700 à 1100 nm) est absorbé. Une plus grande quantité est alors transmise au sol ou réfléchie vers l'atmosphère ou les bâtiments voisins. Ce schéma valable pour une feuille saine et verte varie tout au long de la saison de végétation en fonction de l'âge des feuilles et de leur état sanitaire (maladie, insecte).

A l'échelle d'un houppier, la répartition spatiale des feuilles va induire également une plus ou moins grande porosité du feuillage. Ainsi pour un arbre donné, la surface foliaire interceptrice est fonction de nombreux paramètres géométriques du couvert : densité foliaire, dispersion et orientation angulaire des feuilles, forme du houppier (Ross 1981 ; Parveaud et al., 2008). Par exemple une essence avec une densité foliaire élevée fera plus d'ombre qu'une essence caractérisée par un feuillage plus aéré. De nombreuses formulations plus ou moins détaillées des liens entre la structure d'un couvert et son efficience d'interception du rayonnement ont été développées depuis de nombreuses années (voir Varlet-Grancher et al., 1993) car l'efficacité d'interception d'un couvert est fortement liée au potentiel photosynthétique de l'arbre.

Globalement la quantité de rayonnement absorbé (R_{abs}) est reliée à la quantité de rayonnement solaire incident (R_{inc}) suivant une loi de type Beer-Lambert (Chartier, 1966). Dans le cas le plus simple (couvert homogène, distribution uniforme des angles foliaires), elle peut s'exprimer ainsi :

$$R_{abs} = R_{inc} (1- exp (-Kc * LAI)) \qquad (1)$$

où *LAI* (Leaf Area Index) est la somme de la surface foliaire totale ramenée à la surface projetée sur le sol du houppier (Watson, 1947), et *Kc* est un coefficient d'extinction qui dépend de l'agrégation du feuillage et de la position de la source de rayonnement (Varlet-Grancher et al, 1993). L'utilisation de l'équation (1) permet alors simplement, pour des paramètres *LAI* et *Kc* connus, de donner un ordre de grandeur de l'efficacité de l'ombrage d'un couvert (Figure 3). La Figure 3 montre clairement que le *LAI* et le coefficient d'extinction *Kc* ont une importance forte sur la capacité d'interception du rayonnement. Ces paramètres sont très variables d'une essence à l'autre (Figure 4) et ils évoluent au cours de la journée (*Kc* est fonction de la position du soleil par exemple) et de la saison de végétation et en fonction de la gestion des arbres (notamment le *LAI*) (Bréda, 2003 ; Zhang et al., 2014). En fonction du type d'ombrage voulu, le choix d'une essence et sa conduite sont cruciaux.

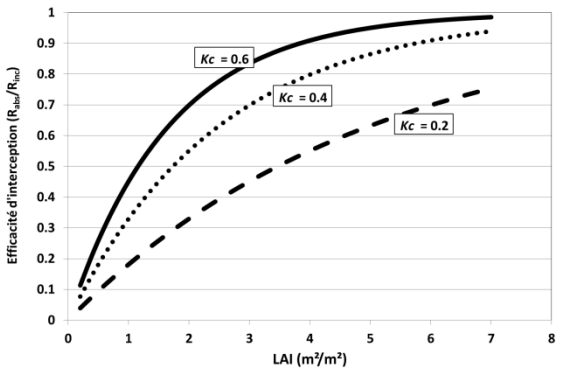
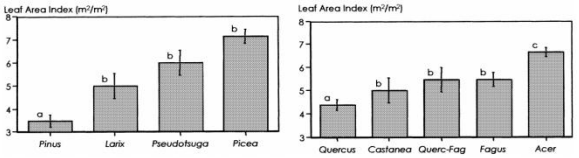


Figure 3 : Illustration de l'évolution de la quantité de rayonnement absorbé en fonction du *LAI* et du coefficient d'extinction *Kc* et suivant la loi de Beer-Lambert (équation 1).



Coniferous stands	*k*	Broad leaved stands	*k*
Abies sp.	0.31	*Betula* sp.	0.57
Larix sp.	0.32	*Eucalyptus globulus*	0.50
Picea abies	0.28–0.37	*Fagus* plantation	0.40–0.48
Pinus contorta	0.29–0.56	*Fagus sylvatica*	0.43–0.44
Pinus radiata	0.50	*Larix decidua*	0.58
Pinus resinosa	0.42	Mixed broadleaved	0.50
Pinus strobus	0.45	*Nothofagus solandri*	0.42
Pseudotsuga menziesii	0.40	*Quercus petraea*	0.29–0.58
Average	0.40	Average	0.47

Figure 4 : Exemples de *LAI* et de coefficients d'extinction *Kc* pour des couverts forestiers (Bréda, 2003).

Ce type de formulation est utilisée dans les modèles de climat urbain, notamment certains modèles de « surface » ou lorsque qu'un ensemble d'arbres assimilable à un couvert continu est considéré (parc, peuplement) (Loridan et al., 2013 ; Vidrih et Medved, 2013 ; Muller et al., 2014). Dans ces cas, la forme 3D des arbres n'est pas prise en compte. Cette formulation perd de son sens pour des arbres urbains isolés ou d'alignement car leurs formes 3D prennent plus d'importance pour le calcul des surfaces projetées au sol ou l'atténuation du rayonnement au sein du houppier. Dans ce cas, des modèles toujours basés sur la loi de Beer-Lambert mais plus complexes en terme de géométrie doivent être mis en œuvre, dans lesquels le *LAI* et le *Kc* n'apparaissent plus comme des variables pertinentes. Elles sont alors remplacées par des variables géométriques plus précises comme la densité foliaire (LAD) et les angles d'inclinaison des feuilles par exemple (Ross, 1981 ; Sinoquet et al., 2001).

1.2 Transpiration et température du couvert

La transpiration correspond au processus de vaporisation de l'eau (passage de l'état liquide à l'état gazeux) par une voie physiologique, au niveau des feuilles. Ce processus est consommateur de chaleur. Il est dit endothermique. En consommant de la chaleur, ce processus a un effet refroidissant sur son environnement proche. C'est ce processus qui est mis en œuvre par les plantes pour réguler leur température foliaire. Ce processus est piloté à la fois par le climat (la demande évaporative), et par la réponse fonctionnelle de la plante qui régule via les stomates ses pertes en eau en fonction de contraintes climatiques, physiologiques et pédoclimatiques. Dans le cadre du climat urbain, la transpiration des couverts correspond à un flux de chaleur latente qui vient contrebalancer l'apport de c haleur par rayonnement et permet une évacuation efficace de l'énergie (moins de stockage). En présence d'un houppier sain, bien alimenté en eau, la température de surface des feuilles éclairées

sera largement inférieure à celle d'une surface minérale quelconque, ce qui contribue à faire baisser globalement les températures de la zone (Oke, 1987).

1.2.1 A l'échelle foliaire…

La transpiration se déroule au niveau des feuilles et plus particulièrement via les stomates qui sont des pores situés sur la surface inférieure et/ou supérieure des feuilles. Par ces orifices, les flux de matière ont lieu : sortie d'eau et entrée de CO_2 principalement. Cette surface d'échange est variable car les plantes ont la capacité de plus ou moins ouvrir leurs stomates, par exemple lorsque l'arbre vient à manquer d'eau. Cette capacité de réguler ses flux gazeux est formalisée par le concept de conductance stomatique g_s. Le flux de chaleur latente, λE $(W.m^{-2})$, peut se formaliser comme suit (Monteith et Unsworth, 1990) :

$$\lambda E \approx g_s \,.\, (e_{sat}(T_l) - e_{vap}(T_a)) = g_w \,.\, VPD \qquad (2)$$

où g_s $(m.s^{-1})$ est la conductance stomatique, $e_{sat}(T_l)$ la pression de vapeur saturant de l'eau à la température de la feuille T_l et $e_{vap}(T_a)$ est la pression de vapeur de l'eau dans l'air à la température de cette dernière, T_a. La différence $(e_{sat}(T_l) - e_{vap}(T_a))$ correspond au déficit de pression de vapeur et est notée *VPD*.

L'équation (2) montre clairement que la transpiration est directement pilotée (*i*) par le climat via le *VPD* et (*ii*) par l'arbre via la conductance stomatique g_s. Malgré sa simplicité, la résolution de l'équation (2) et donc l'estimation de λE ne sont pas triviales. En effet, de nombreux travaux ont été et sont toujours menés sur l'explicitation des mécanismes qui pilotent la conductance stomatique (Damour et al., 2010). Les données acquises montrent que g_s dépend à la fois des conditions climatiques comme le rayonnement, l'hygrométrie et la température de l'air, le vent, la teneur en dioxyde de carbone de l'air, et de l'état physique (température, teneur en eau) et physiologique (teneur en azote) de la feuille et de l'état hydrique du sol (Figure 5). De même la température foliaire, T_l, résulte de l'équilibre thermique entre apport d'énergie (le rayonnement) et les pertes par transpiration et convection (flux de chaleur sensible - effet du vent) (Monteith et Unsworth, 1990). T_l n'est donc pas connue *a priori*. L'estimation de λE nécessite alors de formaliser plus avant cette notion d'équilibre thermique. Citons notamment l'équation de Penman-Monteith qui, parmi les formulations existantes basées sur cette notion d'équilibre thermique, est la plus connue et la plus utilisée (Penman 1948 ; Monteith et Unsworth, 1990).

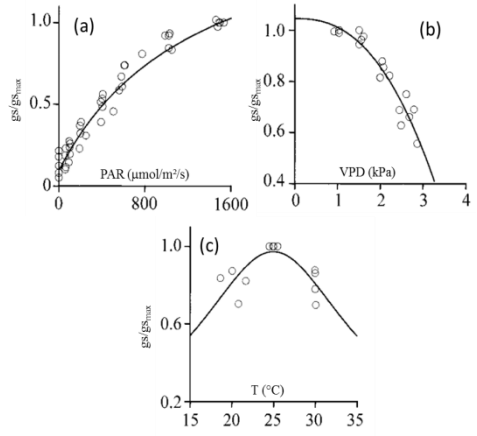


Figure 5: Evolutions caractéristiques de la conductance stomatique normalisée $g_s/g_s max$ en fonction : (a) du rayonnement reçu (PAR), (b) du VPD et (c) de la température foliaire (Pincebourde et al., 2007).

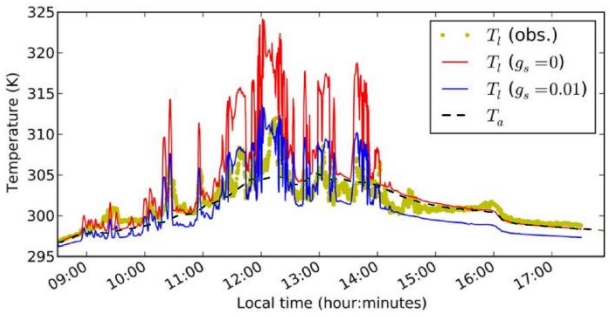


Figure 6 : Exemple de dynamiques journalières de la température d'une feuille (points vert) et de l'air (tiret vert) observées, et des dynamiques simulées avec régulation stomatique (trait bleu) et sans régulation (trait rouge) (Schymanski et al., 2013).

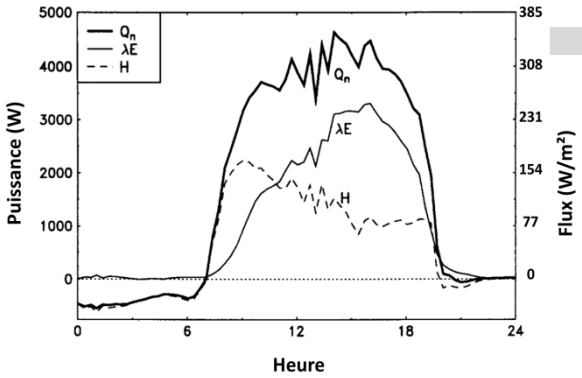


Figure 7 : Exemple de dynamique journalière des différentes composantes du bilan thermique d'un arbre isolé. Q_n est le flux total absorbé (mesuré), λE le flux de transpiration (calculé suivant Penman-Monteith), et H le flux de chaleur sensible (déduit de $H = Q_n - \lambda E$) - Noyer, Surface foliaire 13m², d'après Green al. (1993).

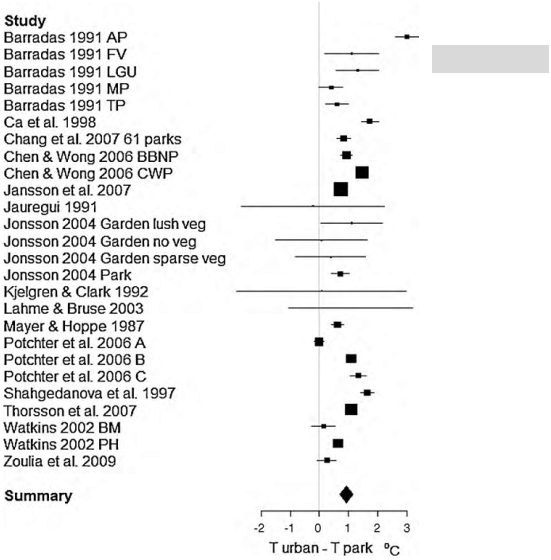


Figure 8 : Revue bibliographique de l'effet des couverts arborés sur la température de l'air en milieu urbain (Bowler et al., 2010).

Un exemple de la dynamique de température de feuille est donné en Figure 6. Il montre d'une part l'écart entre la température d'une feuille et la température de l'air, et l'effet de la conductance stomatique sur l'intensité du refroidissement de la feuille. Lorsque le rayonnement solaire est maximal en milieu de journée, la transpiration permet de contrebalancer l'apport d'énergie et de refroidir la feuille de 5 à 10°C (courbe rouge sans transpiration et bleue avec transpiration

1.2.2 A l'échelle du houppier …

A l'échelle du houppier, la quantité de rayonnement absorbable suit une loi de type Beer-Lambert (équation 1 et Figure 3). La réponse fonctionnelle, g_s, qui dépend de nombreux facteurs, à la fois climatiques (Figure 5) et physiologiques, va également varier localement suivant le rayonnement disponible et la température des feuilles (Ngao et al., 2013). La combinaison de tous ces facteurs conduit à un flux transpiré total très variable dans le temps et qui est fonction de la forme de l'arbre et de l'espèce considérée. La mesure du flux total d'eau transporté par un arbre (méthode des flux de sève par exemple (Granier, 1985) ou la résolution des équations de Penman-Monteith à l'échelle d'un houppier permet d'estimer les différents flux du bilan thermique (Figure 7) (Ngao et al., 2015 ; Green, 1993). Il ressort que dans certaines conditions (vitesse du vent faible notamment) la part du flux transpiré contribue très largement au bilan total.

Les caractères multifactoriel et non-linéaire des composantes qui pilotent le flux de transpiration d'un arbre ont conduit à des formalisations très variées, de la plus simpliste à des modèles 3D, suivant l'échelle considérée et la précision souhaitée : ville, quartier, rue. Elles sont ainsi basées sur des variables très différentes : *LAI* et *Kc* (Järvi et al., 2011), *LAD* (Krayenhoff et al., 2014).

2. Dans un contexte urbain

Les capacités potentielles des arbres à réguler le climat thermique urbain semblent évidentes au vu des connaissances issues de leur fonctionnement. Cette capacité est confirmée par les études, expérimentations et modélisations, effectuées depuis une vingtaine d'années (Bowler et al., 2010). (Figure 8) et de plus en plus nombreuses sur le sujet : en 20 ans, le nombre de publications par an sur ce thème a été multiplié par 20 – passant de 20 en 1994 à 400 en 2014 – source Web of Science – mots clefs «Urban Tree Climate» ou «Urban Forest Climate»).

L'impact des arbres sur le climat urbain peut être caractérisé par la mesure de la température de l'air. La température de l'air est largement utilisée car c'est une variable qui est facilement mesurable. C'est également une donnée importante qui entre dans la définition des évènements de type caniculaire

(MétéoFrance). Une méta-analyse des données publiées sous forme d'articles ou de rapports scientifiques permet de confirmer que la présence de couverts arborés diminue jusqu'à 2°C la température de l'air (Figure 8) (Bowler et al., 2010). Toutefois, la température de l'air n'est pas le meilleur indicateur du confort thermique d'une personne. En effet, la température ressentie par une personne est, tout comme la température des feuilles d'un arbre, le résultat d'un bilan d'énergie entre apports et pertes d'énergie par rayonnement, transpiration, convection. D'autres indicateurs comme le « Physiological Equivalent Temperature » (PET) (Matzarakis et al., 1999) ou le « Universal Thermal Comfort Index » (UTCI) (Coutts et al., 2015) ont ainsi été développés. Ces indicateurs même s'ils reflètent mieux l'impact du climat sur le confort thermique des habitants sont plus délicats à estimer car ils nécessitent la mesure simultanée d'autres variables climatiques: le rayonnement, le vent, la température d'air, et l'hygrométrie. Cette difficulté est accrue par la complexité tridimensionnelle du paysage urbain qui induit des sources de rayonnement très divers : rayonnements de courte et longue longueurs d'onde réfléchis par le sol et les bâtiments, rayonnements absorbés, émis (Lee et al., 2013), et des directions et vitesses de vent très variables (Blocken et al., 2012). Ce constat a conduit au développement de capteurs dédiés (Thorsson et al., 2007) et au développement de modèles numériques capables de prendre en compte la diversité des formes et caractéristiques physiques du paysage urbain. Il existe une diversité de modèles développés depuis quelques années : du modèle de qui simule le mouvement des masses d'air dans les rues (Bruse et Fleer, 1998), au modèle qui prédit les échanges radiatifs au sein d'un paysage urbain (Kastendeuch et al., 2010) en passant par des modèles qui se focalisent sur la température de confort des résidents (Matzarakis, 2010). Les études récentes montrent clairement que les arbres sont très efficaces pour réduire la température ressentie. La Figure 9 issue des travaux récents de Coutts et al. (2015) montre que la présence d'arbres, via l'ombrage notamment, permet de réduire la température ressentie, et donc le stress thermique, de plus de 6°C.

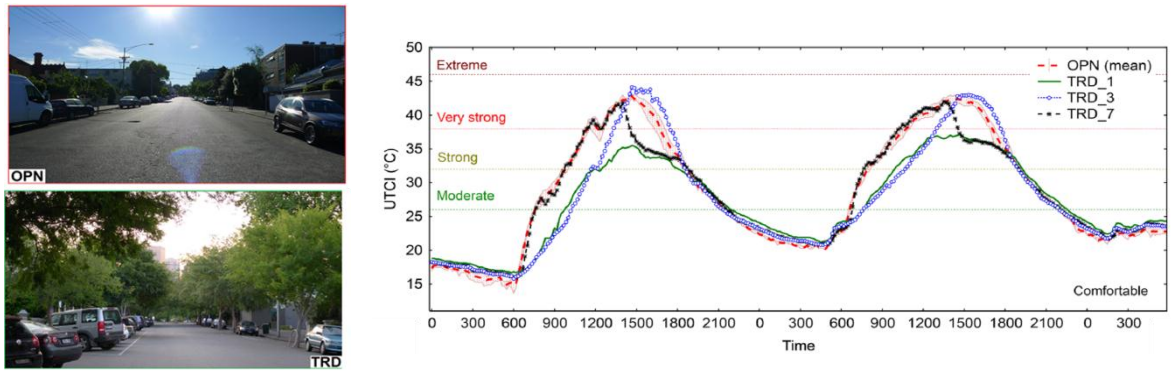


Figure 9 : Dynamique journalière d'un index de confort thermique (UTCI) calculé dans deux situations configurations différentes : rue avec très peu de végétation (OPN) et rue avec des arbres d'alignement adultes (TRD). Comparaison entre la moyenne du site OPN (4 capteurs) et 3 capteurs sur le site TRD (Coutts et al., 2015).

Si les effets bénéfiques des arbres sur la température ressentie ont été clairement démontrés en pleine journée, leur effet sur l'ICU nocturne fait encore l'objet de recherches, voire de débats. Grâce au phénomène d'ombre portée et par leur transpiration, ils permettent de diminuer la quantité d'énergie stockée dans le milieu urbain, ce qui devrait logiquement permettre de diminuer l'intensité de l'ICU. Cependant, certaines études démontrent qu'en s'interposant entre la chaussée et le ciel, les feuilles empêchent un refroidissement radiatif correct du sol en captant et en ré-émettant une partie du rayonnement infrarouge reçu (Bowler et al., 2010). C'est pourquoi des études complémentaires et spécifiquement destinées à étudier le rôle de l'arbre en ville sont encore nécessaires. Il semble notamment nécessaire de mieux caractériser la strate arborée car, comme explicité précédemment, son

effet ou non sur le climat urbain est largement tributaire de la forme et du fonctionnement du couvert rencontré. Cet objectif est d'autant plus prégnant que lors d'études climatiques en milieu urbain la description des caractéristiques de la strate arborée est souvent très succincte. Il est alors délicat de comparer et de discuter des résultats d'une étude à une autre. Ainsi la variabilité des effets observés (voir Figure 8) peut être attribuée à la diversité des types de couverts étudiés (Bowler et al., 2010). Le développement de campagne de recensement en milieu urbain permettant de caractériser la typologie des essences rencontrées (platanes, tilleuls, etc …), leurs formes (hauteur, taillés ou non), le type d'organisation spatiale (arbre isolé, arbre d'alignement, parcs, etc …) et de leurs variabilités fonctionnelles (fonctionnement stomatique, résistance à la sècheresse) apparaît alors primordial (Anquetil, 2010). De même dans le cas d'expérimentations *in situ,* des caractéristiques structurelles plus précises (volume, porosité, LAI, LAD,) devraient systématiquement être acquises.

L'absence d'un outil de mesure fiable et rapide des structures arborées explique en partie ce manque de données précises dans la littérature. L'adaptation des lasers scanners de type LiDar ("Light Detection and Ranging ») (Tomljenovic et al., 2015) qu'ils soient terrestre ou aéroporté, à la mesure des végétaux permettrait d'aller dans ce sens et d'accéder au « phénotypage » de la végétation urbaine (Béland et al., 2015). Toutefois l'adaptation de cet outil à des objets complexes que sont les arbres se heurte encore à des problèmes méthodologiques qu'il faudra surmonter (Landes et al., 2014).

Ce rôle de régulation suppose que les arbres puissent se développer et fonctionner de manière normale tout au long de leur saison de végétation. Or un arbre est soumis à de nombreux aléas et stress d'origine abiotique et biotique qui va l'impacter plus ou moins fortement. Parmi les multiples contraintes extérieures prégnantes pour l'arbre, l'accès à l'eau est primordial. En milieu urbain, l'efficacité de la régulation de l'ambiance thermique par les arbres et plus généralement des couverts végétaux doit ainsi être resitué dans le cadre d'une gestion raisonnée des sols (Oldfield et al., 2014) et notamment de la disponibilité en eau (Coutts et al., 2013). Pour assurer leur croissance, leur fonctionnement et résister aux différents stress qu'ils subissent, les arbres doivent nécessairement utiliser de l'eau. La quantité d'eau utilisée est très variable suivant l'espèce, la taille de l'arbre et les conditions climatiques. Par exemple, pour des tilleuls situés dans un parc, d'environ 8 m de haut et un houppier ayant environ 30 m^2 de surface projetée au sol, jusqu'à 100 L d'eau peuvent être transpirés par une journée d'été bien ensoleillée (Ngao et al., 2015). Or, le milieu urbain est particulièrement contraignant hydriquement, notamment pour les arbres isolés ou d'alignement. Ce constat est lié à la présence en surface de matériaux imperméables très drainants, limitant la recharge en eau des sols, et à des sols tassés ou pauvres. L'impact du manque d'eau va avoir un effet direct sur le potentiel de transpiration d'un arbre, ainsi que sur les capacités photosynthétiques. A court terme, l'arbre ne va donc plus avoir un effet rafraîchissant sur son environnement (Figure 6 : courbe rouge $g_s = 0$ versus courbe bleue $gs \neq 0$) ainsi son fonctionnement carboné sera impacté (croissance stoppée, réserves non renouvelées (McDowell et al., 2011)). A plus long terme, les occurrences de stress hydriques, seules ou en conjonction avec d'autres stress abiotiques (stress thermique ou carence minérale par exemple) ou biotiques (maladies ou insectes), peuvent conduire à un affaiblissement progressif de l'arbre, qui se manifeste par un développement moindre des feuilles, voire de dessèchement d'une pousse ou d'une branche. Les conséquences en chaîne induisent un dépérissement de l'arbre avec un niveau d'ombrage largement diminué. A plus long terme, la mort des arbres peut survenir (Niinemets et al., 2010).

Conclusions

La structuration spatiale, la capacité d'intercepter la lumière et de transpirer des feuilles confèrent aux arbres un potentiel d'action sur le climat urbain notamment thermique. Les travaux d'expérimentation et de modélisation entrepris depuis des vingtaines d'années ont permis de quantifier ce potentiel à différentes échelles : de la rue à la ville en passant par le quartier, via son impact sur les différentes composantes du système climatique urbain : rayonnement, température d'air et vent (ce dernier point

n'a pas été abordé ici). Plus récemment, le rapprochement de l'écophysiologie végétale et de la climatologie urbaine a permis de formaliser et de mieux comprendre les interactions entre une strate arborée (arbre seul ou parc) et le climat urbain. Toutefois, la complexité du système urbain en termes de forme, de microclimat, de sol, et de pédoclimat rend les réponses fonctionnelles et les services rendus des arbres très variables. Ainsi de nombreuses questions de recherche ou appliquées restent à aborder. Sur le fonctionnement même des couverts, citons par exemple le fonctionnement des arbres en situation de stress thermique ou leurs résiliences lors de la conjonction ou de la succession de différents stress. Sur leurs impacts sur le climat urbain, citons la question de la zone d'influence spatiale d'une structure arborée sur l'ambiance thermique urbaine.

L'imbrication de différentes échelles spatiales et d'une multitude d'interactions entre les différents acteurs du climat urbain rend très difficile des projections à long terme et les anticipations sur les aménagements futurs. Cette complexité spatiale est exacerbée par les différentes dynamiques temporelles en jeu : évolution du microclimat urbain, évolution au cours de la saison de végétation de la forme (mise en place du feuillage) et des réponses fonctionnelles des feuilles en fonction de leurs âges physiologiques ; capacité d'adaptation (plasticité) des arbres à leur environnement. Face à ce constat, le développement d'outils de modélisation plus précis intégrant l'essentiel des mécanismes impliqués apparaît comme un outil nécessaire pour comprendre, quantifier et hiérarchiser les mécanismes et pour proposer des pistes d'aménagement. La tendance actuelle en modélisation est à l'intégration des mécanismes avec notamment une description plus réaliste des couverts végétaux. Le succès des prédictions futures nécessitent également la mise en place de campagnes de collecte de données afin de paramétrer les modèles (réponses des arbres et agencement spatial du paysage urbain), et de les valider. Parmi les actions de terrain nécessaires, citons l'importance d'une cartographie spatiale exhaustive des variables en jeu (température, rayonnement, vent) et la caractérisation de la diversité des formes et des espèces ligneuses.

Références bibliographiques

Anquetil V., 2010. Typologie et fonctions écosystémiques de la végétation urbaine. Contributions méthodologiques. Mémoire de fin d'études, AgroCampus Ouest, INHP

APUR, 2012. Les Îlots de Chaleur Urbains à Paris. Cahiers #1 et #2

Beland M., Widlowski J. L., Fournier R. A., Cote J. F., Verstraete M. M., 2011. Estimating leaf area distribution in savanna trees from terrestrial LiDAR measurements. Agricultural and Forest Meteorology 151 (9), 1252-1266.

Blocken B., Janssen W.D., abd van Hooff T., 2012. CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas: general decision framework and case study for the Eindhoven University campus. Environmental Modelling & Software 30, 15–34.

Bowler D.E., Buyung-Ali L., Knight T.M., Pullin A.S., 2010. Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. Landscape and Urban Planning 97(3), 147-155.

Bréda N.J.J., 2003. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. Journal of Experimental Botany 54(392), 2403-2417.

Bruse M., Fleer H., 1998. Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. Environmental Modelling & Software 13 (3–4), 373-384.

Coutts A.M., Tapper N.J., Beringer J., Loughnan M., Demuzere M., 2013. Watering our cities: The capacity for Water Sensitive Urban Design to support urban cooling and improve human thermal comfort in the Australian context, Progress in Physical Geography 37 (1), 2–28

Coutts A.M., White E.C., Tapper N.J., Beringer J., Livesley S.J., 2015. Temperature and human thermal comfort effects of street trees across three contrasting street canyon environments. Theoretical and Applied Climatology, Online first: 1-14, DOI:10.1007/s00704-015-1409-y

Damour G., Simonneau T., Cochard H., Urban L., 2010. An overview of models of stomatal conductance at the leaf level. Plant Cell and Environment 33 (9), 1419-1438.

Granier A., 1985. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. Annales des Sciences Forestières 42, 193–200.

Green S.R., 1993. Radiation balance, transpiration and photosynthesis of an isolated tree. Agricultural and Forest Meteorology 64 (3–4), 201-221.

Hallé F., 2005. Plaidoyer pour l'arbre. Actes-Sud, 212 p

Heino R., 1979. Urban effect on climatic elements in Finland. Geophysica 15, 171-188

IPCC, 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, Geneva, Switzerland.

Järvi L., Grimmond C.S.B., Christen A., 2011.The Surface Urban Energy and Water Balance Scheme (SUEWS): Evaluation in Los Angeles and Vancouver. Journal of Hydrology 411 (3–4), 219-237.

Kastendeuch P., Najjar G., Lacarrere P., Colin J., 2010. Modélisation de l'îlot de chaleur urbain à Strasbourg. Climatologie 7, 21-37

Krayenhoff E.S., Christen A., Martilli A., Oke T.R., 2014. A Multi-layer Radiation Model for Urban Neighbourhoods with Trees. Boundary-Layer Meteorology 151(1), 139-178

Lacointe A., 2000. Carbon allocation among tree organs: A review of basic processes and representation in functional-structural tree models. Annals of Forest Sciences 57, 521-533

Landes T., Hayot C., Najjar G., Kastendeuch P., Saudreau M., Colin J., Luhahe R., Guillemin S., 2014. Modélisation 3D d'arbre pour comprendre le climat urbain. Un projet multidisciplinaire ambitieux. Revue XYZ de l'Association Française de Topographie 141, 61 - 68

Lee D., Pietrzyk P., Donkers S., Liem V., van Oostveen J., Montazeri S., Boeters R., Colin J., Kastendeuch P., Nerry F., Menenti M., Gorte B.G.H., Verbree E., 2010. Modelling and observation of heat losses from buildings: The impact of geometric detail on 3D heat flux modelling. Proceedings 33rd AERSel Symposium "Towards Horizon 2020: Earth Observation and Social Perspectives", Matera, Italy, 3-6 June 2013

Loridan T., Lindberg F., Jorba O., Kotthauss S., Grossman-Clarke S., Grimmond C.S.B, 2013. High Resolution Simulation of the Variability of Surface Energy Balance Fluxes Across Central London with Urban Zones for Energy Partitioning. Boundary-Layer Meteorology 147(3), 493-523.

McDowell N.G., 2011. Mechanisms Linking Drought, Hydraulics, Carbon Metabolism, and Vegetation Mortality. Plant physiology 155 (3), 1051-1059.

Matzarakis A., Mayer H., Iziomon M., 1999: Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. Int. J. Biometeor 43, 76-84.

Matzarakis A., Rutz F., Mayer H., 2010. Modelling radiation flux in simple and complex environments: basics of the RyMan model. International Journal of Biometeorology 54, 131–139.

Météo France, 2015, Vagues de chaleur et canicules, http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/meteo-et-sante/canicules

Muller N., Kuttler W., Barlag A.B., 2014. Counteracting urban climate change: adaptation measures and their effect on thermal comfort. Theoretical and Applied Climatology 115 (1-2), 243-257.

Monteith J.L., Unsworth M.H., 1990. (Eds). Principles of environmental physics. Edward Arnold, London.

Mullaney J., Lucke T., Trueman T.J., 2015. A review of benefits and challenges in growing street trees in paved urban environments. Landscape and Urban Planning 134,157–166

Ngao J., Adam B., Charreyron M., Saudreau M., 2013. Spatial and temporal variability of leaf gas exchange and temperature responses of apple trees to drought assessed by a 3D turbid medium model. 7. International Conference on Functional-Structural Plant Models, Sariselka (Finlande), FSPM 2013.

Ngao J., Colin J., Ameglio T., Saudreau M., Kastendeutsch P., Granier A., Najjar G., 2015. Temporal variation of transpiration and latent heat fluxes from isolated linden crowns and lawns in a park at Strasbourg, France. Presented at ICUC9, Toulouse, France.

Niinemets Ü., 2010. Responses of forest trees to single and multiple environmental stresses from seedlings to mature plants: Past stress history, stress interactions, tolerance and acclimation. Forest Ecology and Management 260 (10), 1623-1639.

Oke T.R., 1987. Boundary Layer Climates (second ed.). Methuen, London, 435 p

Oldfield E.E., Felson A.J., Wood S.A., Hallett R.A., Strickland M.S., Bradford M.A., 2014. Positive effects of afforestation efforts on the health of urban soils. Forest Ecology and Management 313, 266-273.

ONERC, 2010. Rapport au Premier ministre et au Parlement : villes et adaptation au changement climatique, version pour une diffusion électronique assurée par la Documentation Française

Ong B.L., 2003. Green plot ratio: an ecological measure for architecture and urban planning. Landscape and Urban Planning 63, 197–211

Parveaud C.E., Chopard J., Dauzat J., Courbaud B., Auclair D., 2008. Modelling foliage characteristics in 3D tree crowns: influence on light interception and leaf irradiance. Trees-Structure and Function 22 (1), 87-104.

Penman H.L., 1948. Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences 193 (1032), 120-145.

Pincebourde S., Sinoquet H., Combes D., Casas J., 2007. Regional climate modulates the canopy mosaic of favourable and risky microclimates for insects. Journal of Animal Ecology 76 (3), 424-438.

Rosenzweig C., Solecki W.D., Cox J., Hodges S., Parshall L., Lynn B., Goldberg R., et al., 2009. Mitigating New York City's Heat Island: Integrating Stakeholder Perspectives and Scientific Evaluation. Bulletin of the American Meteorological Society 90(9), 1297-1312

Ross J. (Ed.), 1981. The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands. The Hague, Junk W. Pubs 420 p

Schymanski S.J., Or D., Zwieniecki M., 2013. Stomatal Control and Leaf Thermal and Hydraulic Capacitances under Rapid Environmental Fluctuations. Plos One 8(1), DOI: 10.1371/journal.pone.0054231

Sinoquet H., Le Roux X., Adam B., Améglio T., Daudet F.A., 2001. RATP: a model for simulating the spatial distribution of radiation absorption, transpiration and photosynthesis within canopies: application to an isolated tree crown. Plant Cell and Environment 24 (4), 395-406.

Tomljenovic I., Hofle B., Tiede D., Blaschke T, 2015. Building Extraction from Airborne Laser Scanning Data: An Analysis of the State of the Art. Remote Sensing 7 (4), 3826-3862.

Thorsson S., Lindberg F., Eliasson I., Holmer B., 2007. Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting. International Journal of Climatology 27 (14), 1983-1993.

UNFPA, 2007. Rapport du Fonds des Nations Unies pour la population sur l'état de la population mondiale 2007 - libérer le potentiel de la croissance urbaine, New-York, Etats-Unis d'Amérique 108 p

Varlet Grancher C., Bonhomme R., Sinoquet H., 1993. Crop structure and light microclimate. Characterization and applications. Science update. Paris, INRA.

VegDUD, 2014. Impacts du Végétal en Ville – Fiches de Synthèse, Projet ANR-09-VILL-0007-08 : Rôle du Végétal dans le Développement Urbain Durable, publié par Plante et Cité, France

Vidrih B., Medved S., 2013. Multiparametric model of urban park cooling island. Urban Forestry & Urban Greening 12 (2), 220-229.

Watson D.J., 1947. Comparative Physiological Studies on the Growth of Field Crops: I. Variation in Net Assimilation Rate and Leaf Area between Species and Varieties, and within and between Years. Annals of Botany 11 (1), 41-76.

Zhang L., Hu Z., Fan J., Zhou D., Tang F., 2014. A meta-analysis of the canopy light extinction coefficient in terrestrial ecosystems. Frontiers of Earth Science 8 (4), 599-609.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0)



https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « Innovations Agronomiques », la date de sa publication, et son URL)