

MODÉLISATION DES IMPACTS DES ARBRES SUR LA QUALITÉ DE L'AIR, DE L'ÉCHELLE DE LA RUE À LA VILLE

Thèse d'Alice **MAISON**¹

Analysée par Alain **PERRIER**²

Directrice de thèse : Karine **KATA-SARTELET**, Directrice de recherche, CEREAA, Centre d'enseignement et de recherche environnement atmosphérique (ENPC)

Co-encadrante : Andrée **TUZET**, Chargée de recherche, UMR ECOSYS, Ecologie fonctionnelle et écotoxicologie des agrosystèmes (INRAE)

La thèse d'Alice Maison se place dans le cadre de l'amélioration du microclimat et de la réduction de la pollution en milieu urbain, et donc de la qualité de vie des habitants. Il s'agit en particulier, surtout compte tenu des changements climatiques et des pollutions grandissantes, de quantifier les diverses interactions au sein de ce milieu essentiellement inerte, mais englobant les habitants et incluant donc leurs activités : celles-ci modifient le microclimat et les pollutions. C'est bien dans ce milieu complexe que la doctorante a recherché à décrire, analyser et maîtriser les approches physiques et biologiques qui pourront conduire à mieux préciser le fonctionnement complexe de ce milieu urbain, dans le but de le maîtriser et de mieux l'adapter en multipliant les lieux de nature, dont les arbres dans les rues et tout espace disponible... Ils furent les prémices d'une nature en ville qui doit à terme se développer.

Pourquoi principalement les villes ? Car elles concernent un nombre considérable d'habitants et jouent un rôle très important sur le poids énergétique et hydrique des surfaces imperméabilisées du milieu urbain. Ces surfaces, très largement sèches, car sans eau en l'absence de pluies, de brouillard ou de rosée, accumulent de l'énergie et réchauffent par convection l'air ambiant. Ce réchauffement au niveau local contribue à amplifier le réchauffement climatique dû à l'effet de serre mondial, favorisant plus fréquemment les chaleurs pénibles et les canicules, accentuées par la taille des surfaces occupées par les grandes villes. Ces dernières deviennent de véritables déserts chauds du fait de la forte capacité thermique des bâtiments et des revêtements de sol imperméables, et sous l'action des différents rayonnements échangés (solaires et IR).

Cependant, n'oublions pas qu'on rencontre aussi au sein même de la ville des surfaces plus ou moins naturelles (parcs, jardins, bosquets et arbres d'alignement) qui au contraire vont favoriser l'évaporation qui consomme beaucoup d'énergie, et refroidit donc l'air ambiant qui balaie ces zones plus froides. Cet effet de refroidissement, en l'absence prolongée de pluies, est limité par la baisse de la transpiration des plantes et du dessèchement des surfaces de sol lié à l'évaporation (formation

¹Thèse de doctorat de l'École des Ponts Paris Tech, Ecole Doctorale N° 531, Sciences, Ingénierie et Environnement, préparée au CEREAA et à l'UMR 1402 ECOSYS, soutenue le 28/11/2023.

² Membre de l'Académie d'agriculture de France, section 7 « Environnement et territoires ».

d'un mulch naturel ou artificiel). Entre périodes sèches ou pluvieuses, la transpiration des plantes est d'autant plus importante que le système racinaire est plus profond et que l'eau de pluie a pu s'infiltrer, pour favoriser un maximum d'eau disponible pour les plantes en profondeur, paramètres cruciaux d'aménagement.

Rappelons aussi que les arbres peuvent également impacter la qualité de l'air en ville *via* différents processus. Le dépôt de polluants gazeux et particulaires sur les feuilles des arbres peut contribuer à la diminution des concentrations de pollutions présentes ou produites dans l'air. Par ailleurs, les arbres émettent aussi des composés organiques volatils biogéniques (COVb) qui peuvent participer à la formation d'ozone et d'aérosols organiques secondaires. De plus, l'effet aérodynamique des arbres modifie l'écoulement dans les rues canyons, en limitant la dispersion des polluants émis dans la rue vers les espaces supérieurs. Les émissions de COVb varient selon l'espèce d'arbre et leurs émissions sont aussi influencées par des facteurs climatiques (température, rayonnement) ainsi que par l'état hydrique des arbres.

Tous ces aspects sont de première importance pour répondre efficacement à l'évolution sociologique actuelle qui entraîne de plus en plus les habitants à souhaiter favoriser au sein des villes une amélioration de leurs ressentis et un développement d'écosystèmes et de leur biodiversité. Ceci nécessiterait d'installer de nouveaux aménagements urbains et de revégétaliser les villes. C'est en vue de ces améliorations possibles, de plus en plus recherchées, que la thèse a été développée par Alice Maison avec beaucoup d'ouverture.

La thèse d'Alice Maison a eu pour objectif de quantifier les impacts de ces différents processus sur la qualité de l'air en ville, sachant que les arbres urbains ne sont généralement pas pris en compte dans les modèles de qualité de l'air, aussi bien à l'échelle régionale qu'à l'échelle de la rue. Une approche de modélisation a été choisie et développée par la doctorante. Des simulations numériques ont été réalisées sur la ville de Paris pendant l'été 2022 avec le modèle CHIMERE (modèle de qualité de l'air à l'échelle régionale) couplé à MUNICH (modèle de qualité de l'air à l'échelle des rues et des places), afin de quantifier l'impact des arbres sur les concentrations atmosphériques de polluants à l'échelle locale et régionale. Les concentrations simulées sont comparées à des mesures.

Dans le modèle central de sa thèse qu'est MUNICH, elle a introduit une meilleure paramétrisation du profil de vent, et ceci dans les rues avec ou sans arbres. Pour faire cela, elle s'est inspirée des travaux de Wang (2012, 2014) qui a développé cette approche pour des couverts épars. Cette méthode a été adaptée et testée pour les rues avec l'aide des simulations effectuées par le modèle SATURNE (modèle 2D de turbulence avec une fermeture d'ordre 1.5, modèle k-e- ϵ , de l'EDF). Cela fait l'objet de ses deux premiers articles (acceptés et déjà publiés).

Pour faire tourner le modèle MUNICH, elle a eu besoin des variables de forçage chimiques et météorologiques données par le modèle de chimie atmosphérique travaillant à l'échelle régionale (CHIMERE). Ce travail de simulation a nécessité également de développer une méthode pour estimer les caractéristiques des arbres (surface de feuille, biomasse sèche, taille du houppier, *etc.*) à partir de la base de données arbres de la Ville de Paris. Puis elle a introduit dans ce modèle les composés organiques volatils émis par les arbres. Ces derniers interagissent avec les composés azotés émis par le trafic routier pour former de l'ozone et des aérosols organiques secondaires (particules néfastes pour la santé). Le couplage MUNICH-CHIMERE, avec et sans arbres, sur toute la ville de Paris fait l'objet de deux publications (l'une est en cours de révision et l'autre est en cours de soumission).

Pour affiner les résultats et obtenir, en particulier, la température de surface des feuilles, le rayonnement solaire reçu et l'état hydrique des feuilles qui conditionnent beaucoup les émissions

de COVb, elle a couplé TEB (le modèle de bilan d'énergie de Météo France travaillant à l'échelle de la ville) avec le modèle SPAC développé à l'INRAE. Cela lui a permis d'avoir une estimation de l'absorption racinaire, de la transpiration, de l'état hydrique et de la température des feuilles. Les paramétrisations des émissions de COVb sont les relations empiriques du modèle MEGAN, communément utilisées dans les modèles de chimie atmosphérique.

Le couplage entre ces différents modèles permet de prendre en compte la météorologie locale de la rue, et aussi de calculer plus précisément les émissions de COVb, en les faisant varier avec la température de surface des feuilles et le rayonnement solaire reçu par elles dans la rue (prenant en compte les réflexions entre les différentes surfaces et les effets d'ombrage). Pour quantifier l'effet de ces émissions sur la qualité de l'air, elles sont intégrées dans le modèle régional de qualité de l'air CHIMERE. A titre d'exemple, en moyenne sur les mois de juin et juillet 2022 à Paris, les émissions biogéniques locales des arbres induisent une augmentation de 1,0 % d'O₃, 4,6 % de PM₁ organiques et 0,6 % de PM_{2.5}. L'augmentation de concentration atteint localement 2,4 % pour l'O₃, 11,5 % pour les PM₁ organiques et 1,6 % pour les PM_{2.5}. Les émissions de terpène de la végétation urbaine et suburbaine influençant fortement la formation de particules organiques, il est important de les prendre en compte dans les modèles de qualité de l'air.

L'effet aérodynamique induit une augmentation des concentrations des composés émis dans la rue par le trafic. Cette augmentation peut atteindre +37 % pour le NO₂ dans les rues avec une surface de feuilles importante et un trafic élevé. Pour limiter cette augmentation de concentration, il est donc recommandé de limiter le trafic dans des rues contenant des arbres avec un large houppier et une grande surface de feuille ou d'éviter de planter ce type d'arbres dans les rues à fort trafic.

Le couplage complet entre les modèles de qualité de l'air (MUNICH), de surface urbaine (TEB) et de *continuum* sol-plante-atmosphère (SPAC) permet de déterminer l'état hydrique du sol et des arbres, et d'introduire l'impact direct du stress hydrique sur les émissions d'isoprène. Les émissions ainsi calculées sont plus élevées, entre +23 et +48 % selon l'espèce de COVb. Le contenu en eau du sol simulé par le modèle de surface urbaine est aussi utilisé pour estimer l'impact direct du stress hydrique sur les émissions d'isoprène en comparant trois paramétrisations de la littérature. Les trois paramétrisations montrent une diminution des émissions d'isoprène à partir de la sécheresse (15/06/22), mais qui est d'intensité variable (entre -28 et -58 % de diminution moyenne des émissions d'isoprène sur les deux mois). Ces variations soulignent l'importance de la météorologie locale sur les émissions de COVb.

Le travail d'Alice Maison met en jeu de nombreux modèles relativement complexes qui s'appuient sur de nombreuses données relatives tant aux arbres qu'aux rues qui ont été utilisées pour paramétrer les modèles. Sa formation d'ingénieur agronome (AgroParisTech) fut suivi de deux masters : CLUES Climate « Land Use and Ecosystem Services », AgroParisTech, et SGE « Air-Atmosphère intérieure et extérieure », UPEC. Leur obtention lui a permis d'acquérir les connaissances nécessaires pour appréhender tous les processus qui affectent aussi bien les échanges énergétiques et turbulents au niveau d'une rue que les dépôts et émissions de polluants, leur transport et l'impact des facteurs du climat sur ces échanges de polluants. Elle a ainsi pu acquérir rapidement une excellente maîtrise des différents modèles, ce qui lui a permis de les adapter les uns aux autres, de les coupler et finalement d'appréhender ce milieu urbain complexe.

Alice Maison a un esprit d'analyse et de synthèse très développé et de nombreuses facilités pour rédiger aussi bien en français qu'en anglais ; l'intérêt de son travail et la rapidité de sa mise en œuvre lui ont permis de rédiger quatre articles scientifiques au cours de sa thèse et de participer en tant que co-auteur à d'autres articles de son laboratoire. Cela montre son ouverture scientifique et son esprit collaboratif. Cette ouverture scientifique, son autonomie et son tempérament lui ont permis de s'intégrer très facilement dans trois laboratoires, CEREAS, ECOSYS, CNRM (Centre national de recherches météorologiques) et d'effectuer son travail de thèse, qui a donné lieu à un mémoire

particulièrement bien écrit et très bien illustré, ceci au cours d'une période relativement complexe du fait de l'épidémie de covid et du télétravail.

Le jury de thèse a été très élogieux et la discussion avec Alice Maison a montré ses capacités à développer un cheminement méthodologique, avec un esprit critique sur la cohérence des processus bio-physico-chimiques en jeu, avec leurs interactions complexes. Les rapports de thèse et le PV de soutenance montrent qu'Alice Maison est une personne très sérieuse, très travailleuse, très ouverte et très autonome. Elle a donc vraiment toutes les qualités et les compétences pour devenir une très bonne chercheuse. Ayant des relations scientifiques très ouvertes et faciles, elle a obtenu aisément après sa thèse un post-doc de deux ans au LMD (Jussieu - Sorbonne Université) où elle pourra acquérir de nouvelles compétences dans le domaine atmosphérique et continuer à s'épanouir dans le milieu de la recherche qui semble tout à fait lui convenir.

L'analyse des travaux de cette thèse, dont la portée scientifique et sociétale en milieu urbain a été soulignée par le jury, a toute sa place sur le site de l'Académie d'agriculture de France et dans le Mensuel, à titre de valorisation.

Liste de publications

Maison, A., Flageul, C., Carissimo, B., Tuzet, A., & Sartelet, K. (2022). Parametrization of Horizontal and Vertical Transfers for the Street-Network Model MUNICH Using the CFD Model Code_Saturne. *Atmosphere*, 13(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/atmos13040527>

Maison, A., Flageul, C., Carissimo, B., Wang, Y., Tuzet, A., & Sartelet, K. (2022). Parameterizing the aerodynamic effect of trees in street canyons for the street network model MUNICH using the CFD model Code_Saturne. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2(14), 9369–9388 <https://doi.org/10.5194/acp-22-9369-2022>

Maison, A., Lugon, L., Park, S.-J., Baudic, A., Cantrell, C., Couvidat, F., D'Anna, B., Di Biagio, C., Gratien, A., Gros, V., Kalalian, C., Kammer, J., Michoud, V., Petit, J.-E., Shahin, M., Simon, L., Valari, M., Vigneron, J., Tuzet, A., & Sartelet, K. (2023). Significant impact of urban-tree biogenic emissions on air quality estimated by a bottom-up inventory and chemistry-transport modeling. *EGUsphere* [preprint] <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-2786> (en cours de review pour une publication dans le journal *Atmospheric Chemistry and Physics*).

Maison, A., Lugon, L., Park, S.-J., Boissard, C., Faucheux, A., Gros, V., Kalalian, C., Kim, Y., Leymarie, J., Petit, J.-E., Roustan, Y., Sanchez, O., Squarcioni, A., Valari, M., Viatte, C., Vigneron, J., Tuzet, A., & Sartelet, K. Contrasting effects of urban trees on air quality: From the aerodynamic effects in streets to impacts of biogenic emissions in cities. Soumission au journal *Science of The Total Environment*.

Lugon, L., Maison, A., Sarica, T., Roustan, Y., Valari, M., Zhang, Y., André, M., & Sartelet, K. (2022). MUNICH v2.0: A street-network model coupled with SSH-aerosol (v1.2) for multi-pollutant modelling. *Geoscientific Model Development*, 15(19), 7371–7396. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-7371-2022>

Lin, C., Ooka, R., Kikumoto, H., Flageul, C., Kim, Y., Wang, Y., Maison, A., Zhang, Y., & Sartelet, K. (2023). Large-eddy simulations on pollutant reduction effects of road-center hedge and solid barriers in an idealized street canyon. *Building and Environment*, 110464. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110464>

Sarica, T., Maison, A., Roustan, Y., Ketzel, M., Jensen, S. S., Kim, Y., Chaillou, C., & Sartelet, K. (2023). Modelling concentration heterogeneities in streets using the street-network model MUNICH. *Geoscientific Model Development*, 16(17), 5281–5303. <https://doi.org/10.5194/gmd-16-5281-2023>

Wang, Y., Flageul, C., Maison, A., Carissimo, B., & Sartelet, K. (2023). Impact of trees on gas concentrations and condensables in a 2-D street canyon using CFD coupled to chemistry modeling. *Environmental Pollution*, 323, 121210. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.1212>