

# Modélisation des impacts des arbres sur la qualité de l'air de l'échelle de la rue à la ville

Présentation des travaux de thèse - Médailles d'argent Dufrenoy

Académie d'Agriculture de France

Alice MAISON

18 septembre 2024

Thèse supervisée par  
Karine SARTELET (CEREA, ENPC)

&

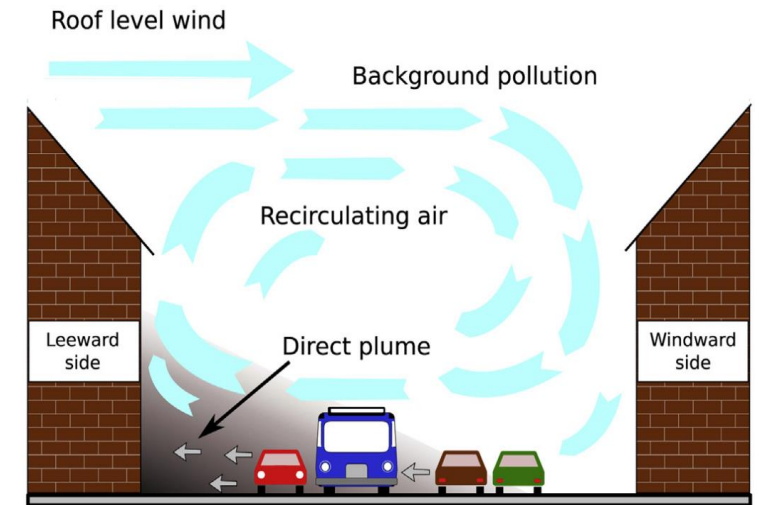
Andrée TUZET (UMR Ecosys,  
INRAE)

## Villes & qualité de l'air

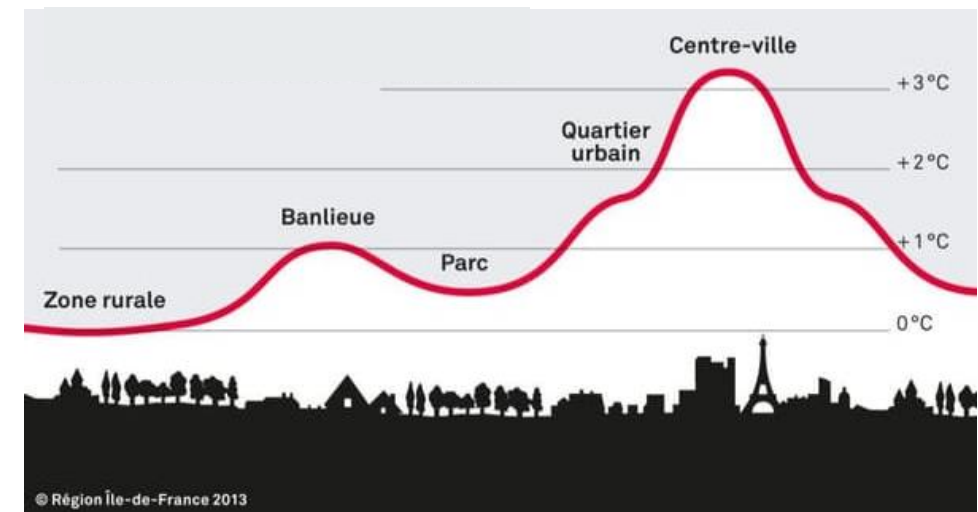
- zones **densément peuplées**
  - **émissions locales de polluants** élevées (trafic, industries ...)
  - **réduction de la ventilation** dans les rues à cause des bâtiments
- ⇒ **forts gradients de concentration** entre les rues et le fond au-dessus des rues
- ⇒ **exposition des personnes et risque** pour la santé humaine

## Microclimat urbain

- **densité et hauteur de bâtiments** élevées
  - **matériaux foncés** et imperméables
  - **réflexions** et piégeage des rayonnements
  - **émission de chaleur** anthropique (chauffage, climatisation, trafic ...)
  - **évapotranspiration réduite** (manque de végétation)
- ⇒ **modification du bilan énergétique**
- ⇒ **températures plus élevées en ville : îlot de chaleur urbain**



Représentation schématique de la **dispersion des polluants** dans une rue canyon (Silver et al., 2013).



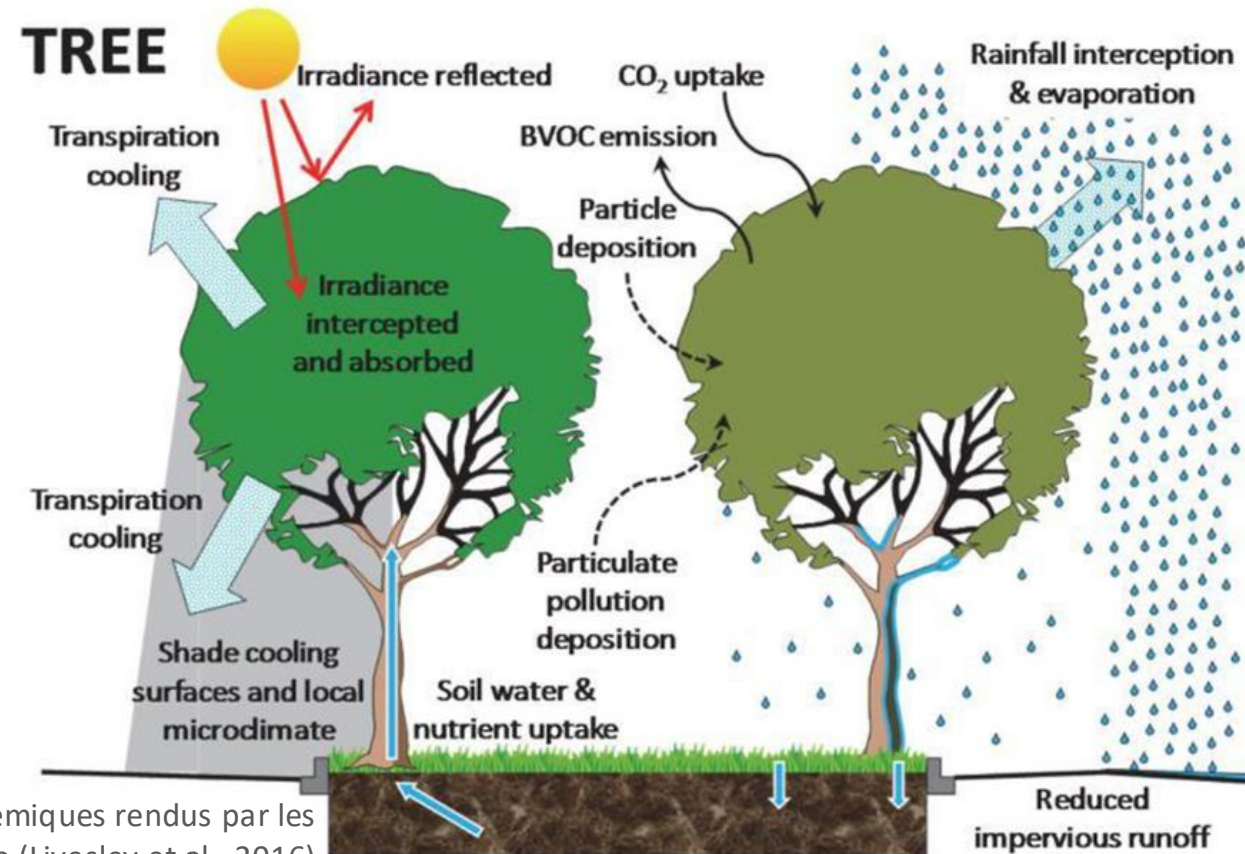
L'**îlot de chaleur urbain**, variations spatiales des températures nocturnes dans l'agglomération parisienne.

**Renaturalisation des villes** pour atténuer les effets négatifs de l'urbanisation

En particulier les arbres qui rendent plusieurs **services écosystémiques** :

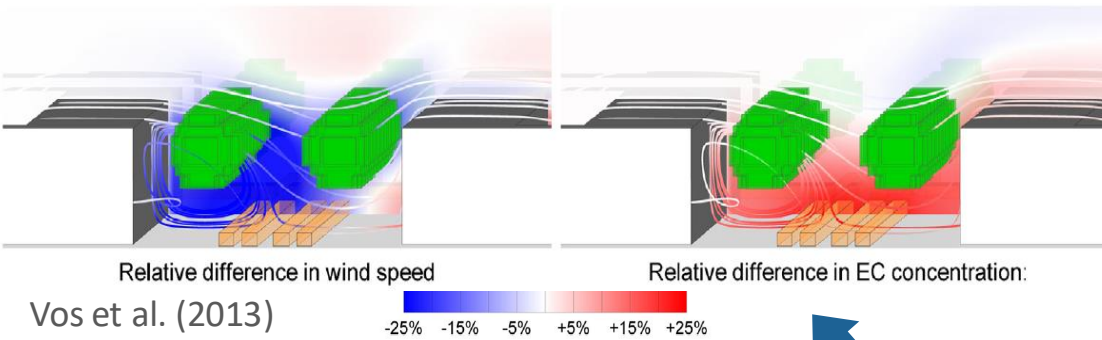
- + amélioration du **confort thermique** (évapotranspiration et interception du rayonnement)
  - + limitation du **ruissellement** (interception d'eau et conservation de sols perméables)
  - + absorption du CO<sub>2</sub> et stockage du **carbone**
  - + favorise la **biodiversité**
  - + amélioration du **bien-être** humain
- ⇒ **solution basée sur la nature** pour améliorer la **qualité de vie** en ville et s'adapter au **changement climatique**

*Effets sur la qualité de l'air ?*

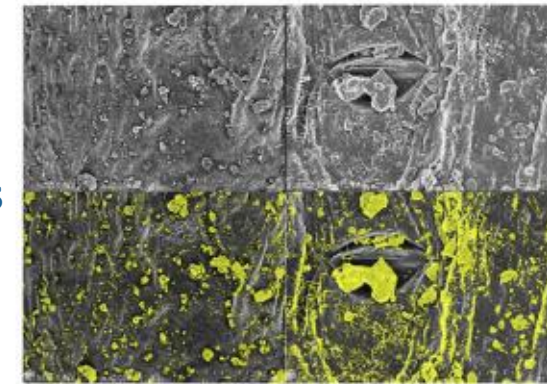


Services écosystémiques rendus par les arbres en ville (Livesley et al., 2016)

## 2) effet aérodynamique



## 3) dépôt sur les feuilles

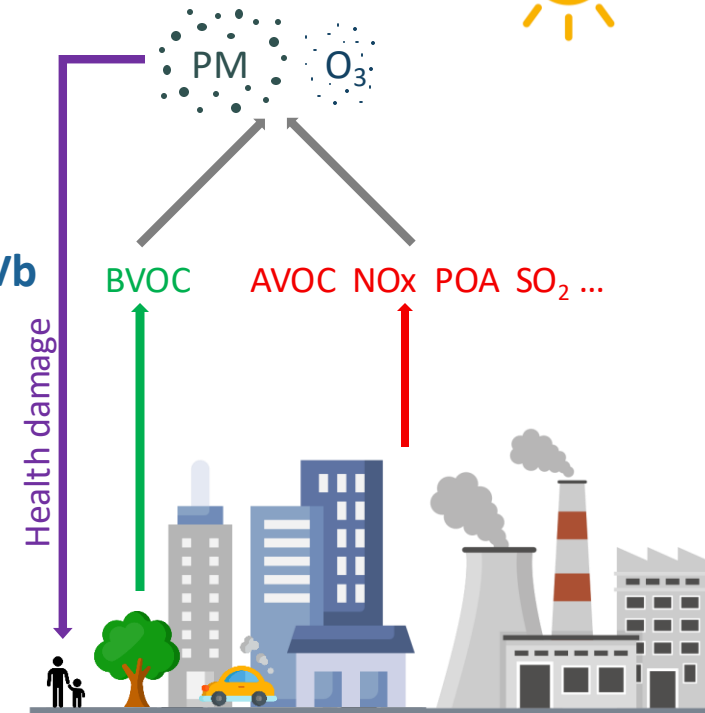


Lin et al. (2017)

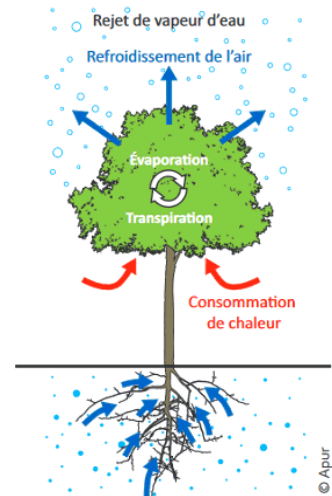
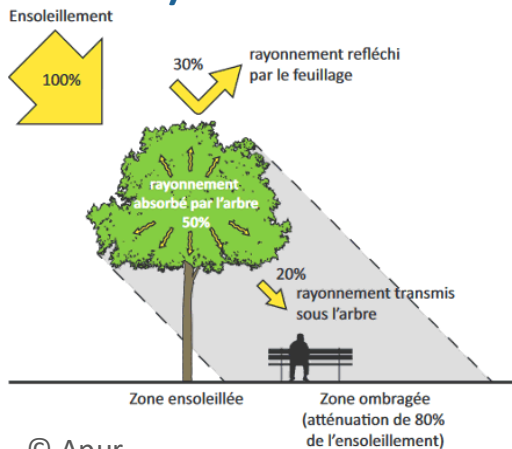


## Effets des arbres sur la qualité de l'air

## 1) émissions de COVb



## 4) effet thermo-radiatif



## 5) effet indirect des stress abiotiques

- **stress thermique** (températures plus élevées)
- **stress hydrique** (plantation dans des volumes de sol restreints)



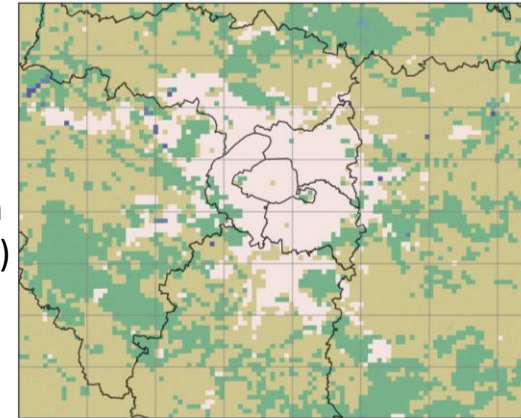
<https://opendata.paris.fr/explore/dataset/les-arbres/>



caractéristiques des arbres

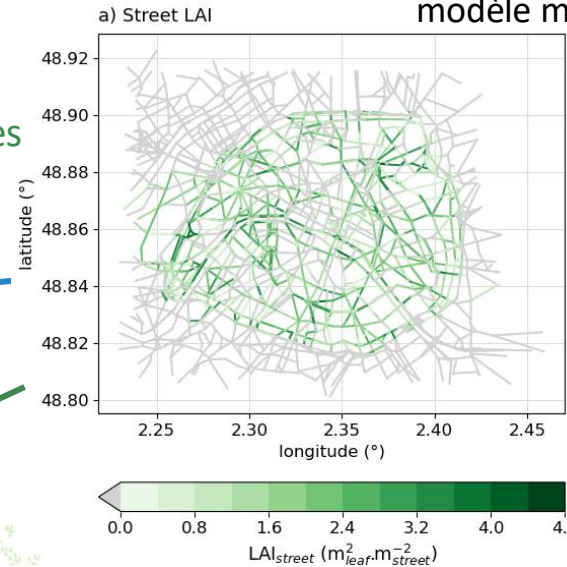


Modèle de chimie-transport couplé à un modèle météo. (WRF)



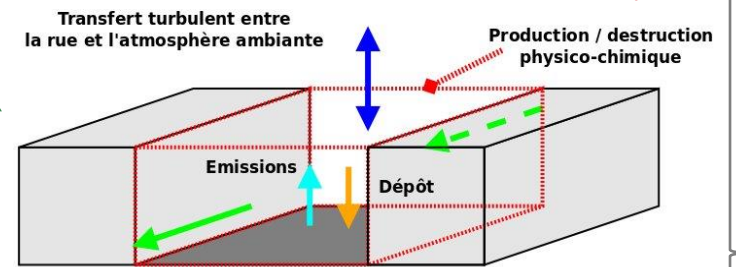
Résolution: 1km<sup>2</sup>

fond régional



météo.

concentrations de fond (au-dessus des rues)



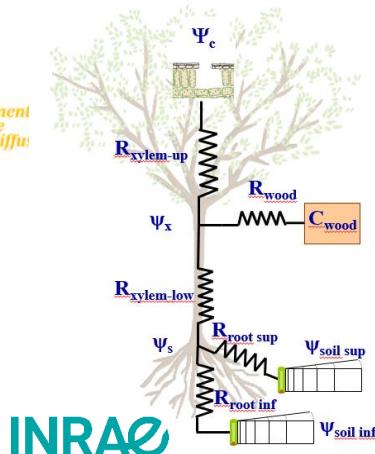
rue



TEB-Tree

Town Energy Balance

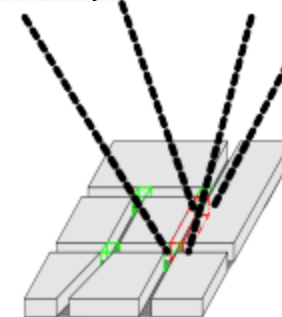
(Masson, 2000; Lemonsu et al., 2012; Redon et al., 2017; 2020)



Soil Plant Atmosphere Continuum Model (SPAC) (Tuzet et al., 2017)

+ validation des modèles avec mesures météo. et de concentrations en air ambiant

Advection par le vent moyen

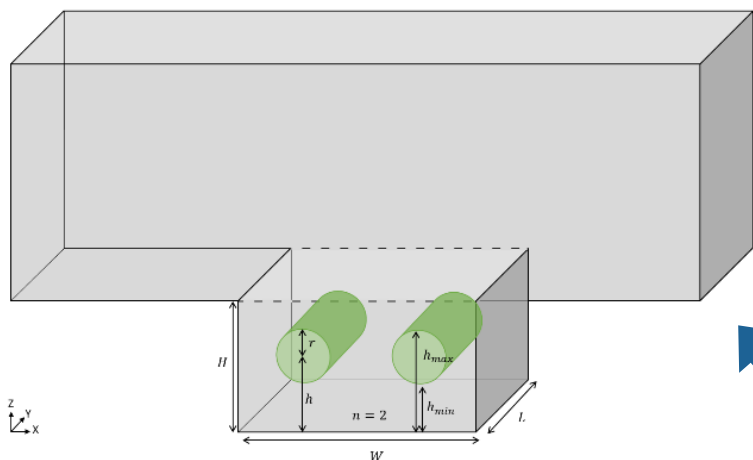


Model of Urban Network of Intersecting Canyons and Highways

(Kim et al., 2018; 2022)

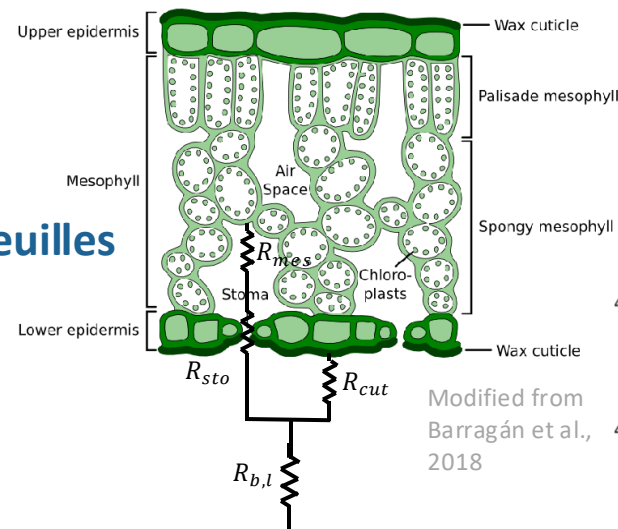


## 2) effet aérodynamique



MUNICH paramétré avec un modèle de mécanique des fluides (Maison et al., 2022a; 2022b)

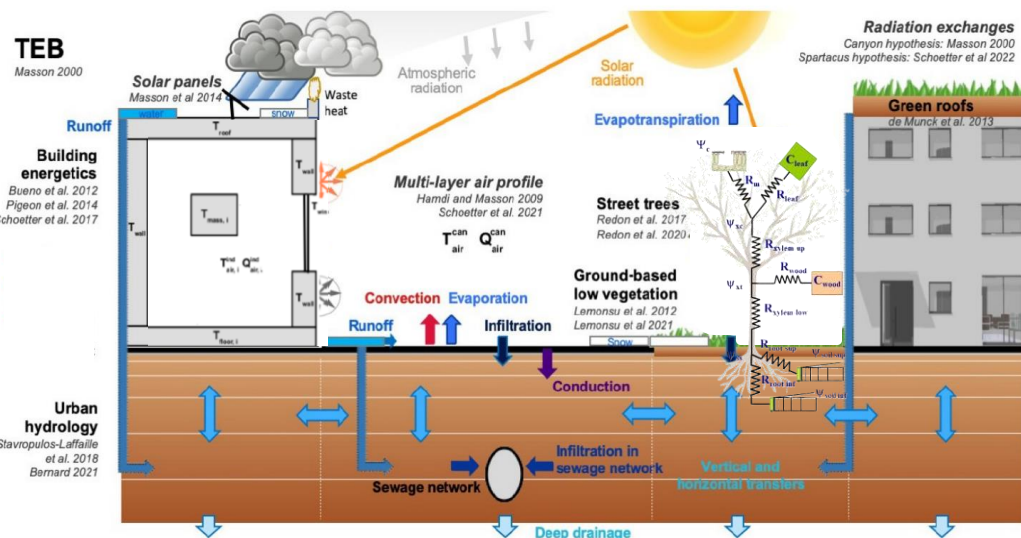
## 3) dépôt sur les feuilles



Modified from Barragán et al., 2018

## Effets des arbres sur la qualité de l'air

## 4) effet thermo-radiatif

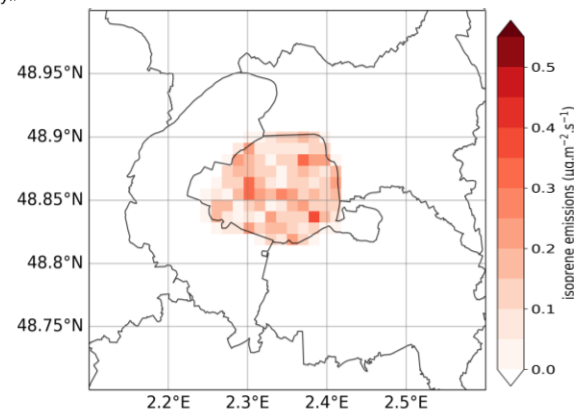


## 5) effet indirect des stress abiotiques (stress hydrique et thermique)

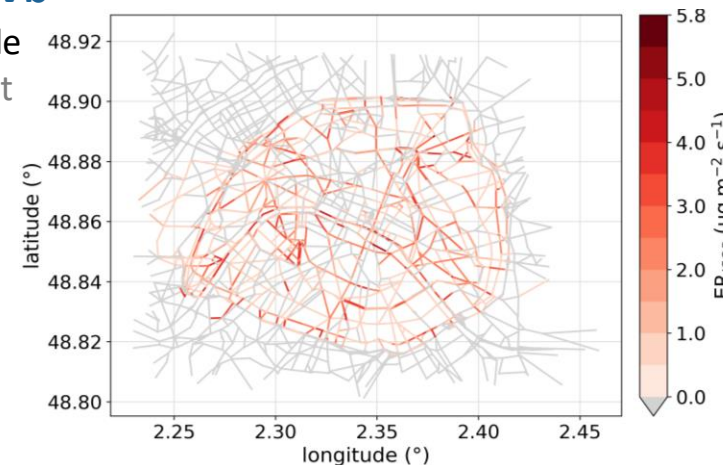
couplage TEB-SPAC

## 1) émissions de COVb

sur la base du modèle MEGAN (Guenther et al., 1995; 2012)



émissions d'isoprène mailles CHIMERE (1km<sup>2</sup>) (Maison et al., 2024a; 2024b)

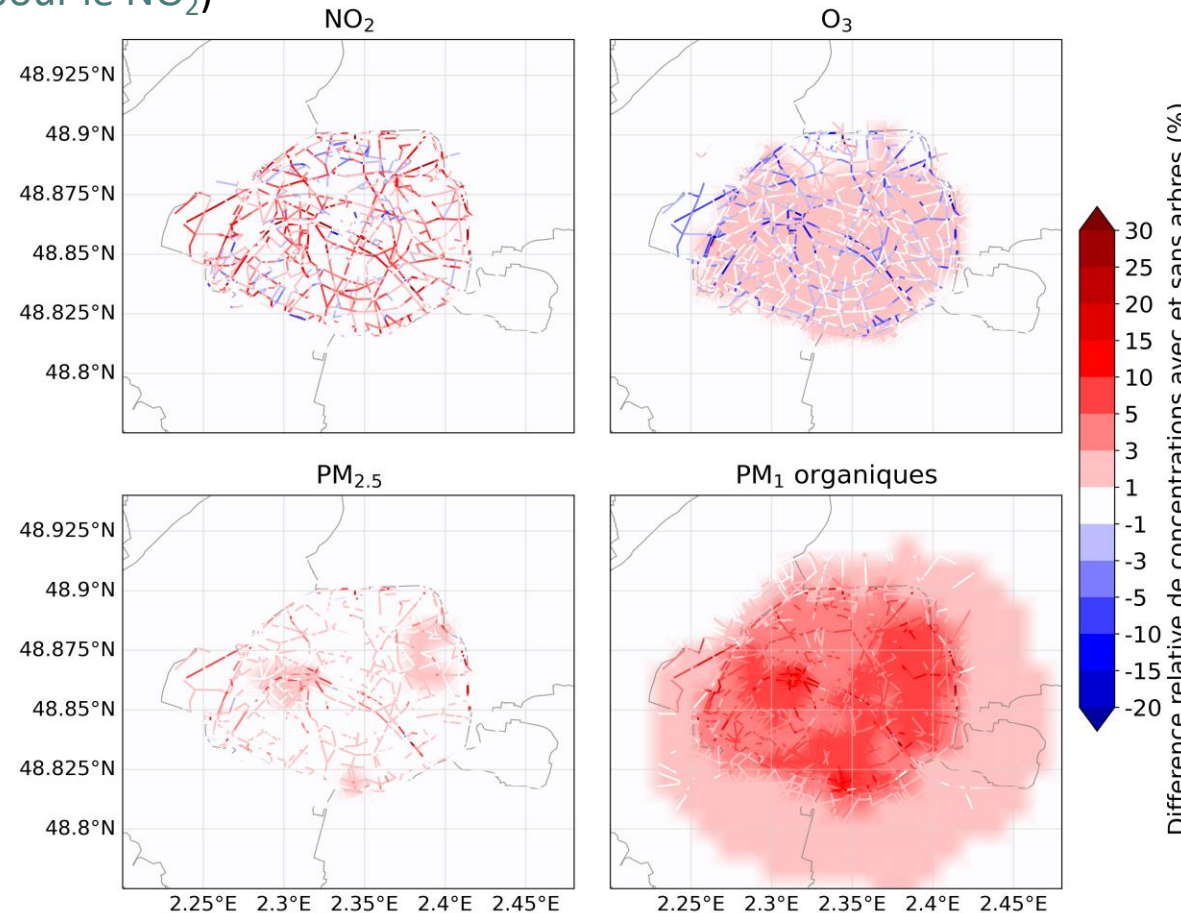


émissions d'isoprène réseau de rues MUNICH

## L'effet aérodynamique

⇒ limite la dispersion **des composés émis dans la rue** ( $\text{NO}_2$ , particules primaires) et induit donc une **augmentation des concentrations** (+4,6% en moyenne et jusqu'à +37% pour le  $\text{NO}_2$ )

⇒ augmente avec l'intensité du trafic



## Le dépôt sec sur les feuilles

⇒ induit une **légère diminution des concentrations de gaz et de particules** (-0,6% en moyenne et jusqu'à -2,5%)

## Les émissions de COVb

⇒ entraînent principalement une **augmentation des concentrations de particules organiques** (+4,6% en moyenne et jusqu'à +11,5%) et, dans une moindre mesure, de l'**O<sub>3</sub>** (+1,0% en moyenne et jusqu'à +2,4 %).

⇒ augmentation plus importante pendant les périodes de **vague de chaleur**

Différence relative moyenne des concentrations de  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  et  $\text{PM}_1$  organiques avec les trois effets des arbres par rapport au cas sans arbre simulée avec CHIMERE-MUNICH (06/06-31/07/22) (Maison et al., 2024a, 2024b)

2 périodes :

**- 01/06 - 15/06 : eau non-limitante**

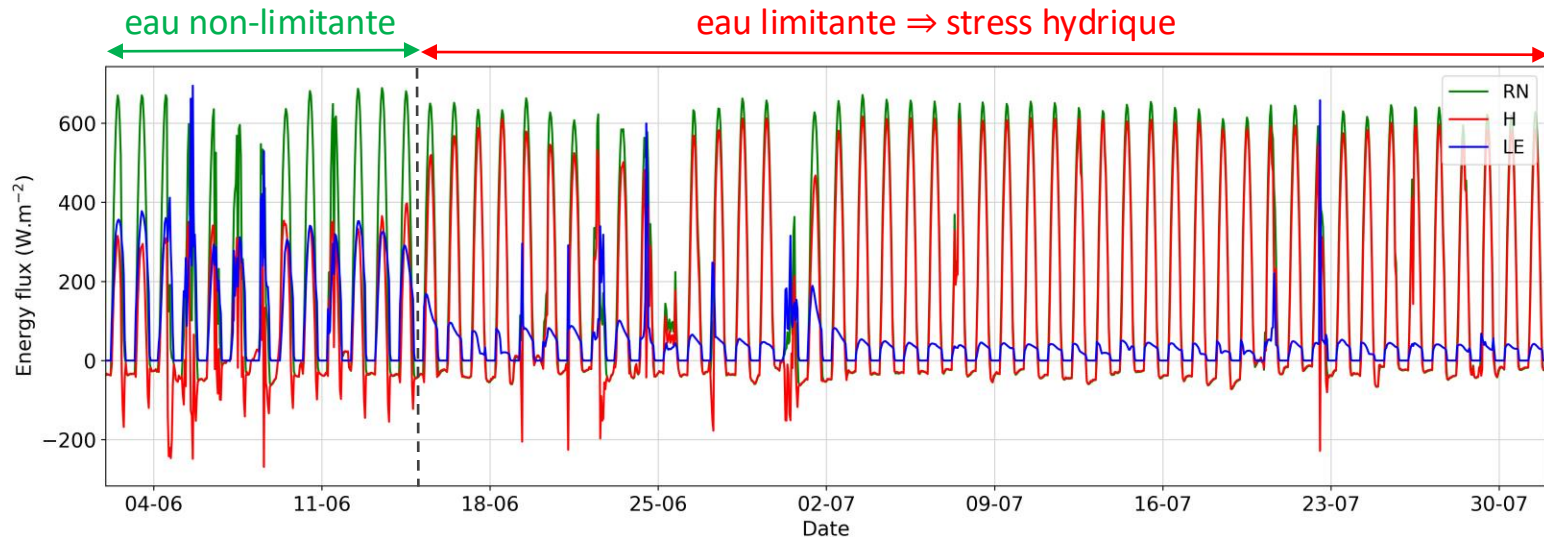
→ diminution des températures de  $-0.12^{\circ}\text{C}$  en moyenne le jour dans les rues avec arbres et jusqu'à  $-0.74^{\circ}\text{C}$

**- 16/06 - 31/07 : eau limitante** (faible contenu en eau du sol) → limitation de la transpiration

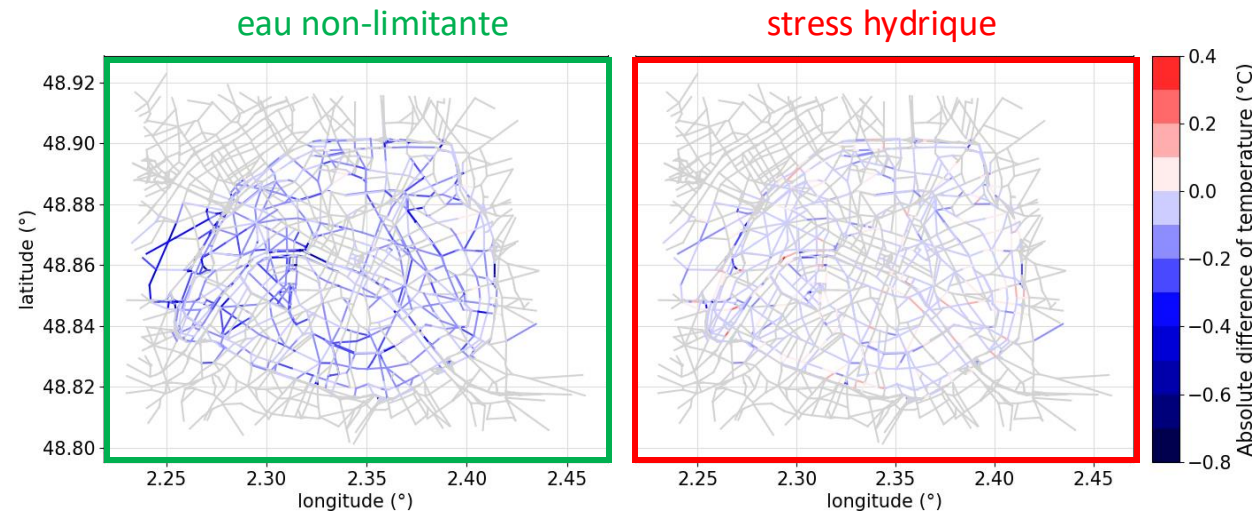
⇒ **stress hydrique**

→ diminution des températures de  $-0.03^{\circ}\text{C}$  en moyenne le jour dans les rues avec arbres et jusqu'à  $-0.52^{\circ}\text{C}$

⇒ **effet rafraîchissant** des arbres **moins efficace** pendant la période de stress hydrique



Variation temporelle des flux d'énergie (rayonnement net, flux de chaleur sensible, et latente) simulés dans le blv. Haussmann



Différence absolue de température de l'air dans la rue simulée avec TEB-SPAC avec et sans arbres moyennée le jour pendant les 2 périodes (02-15/06 et 16/06-31/07)



- Hypothèses sans TEB-SPAC :**

- $T_{\text{surface feuille}} = T_{\text{air}}$
- $RS_{\text{feuilles}}$  = rayonnement incident au-dessus de la ville

- Avec TEB-SPAC :**

- $T_{\text{surface feuille}} > T_{\text{air}}$  (+1.2°C en moyenne et entre +0.4 et +3.7°C)

→ en partie à cause du stress hydrique

- $RS_{\text{feuilles}}$  (avec réflexions et ombres dans le canyon) **plus hétérogène** (-15 W.m<sup>-2</sup> en moyenne)

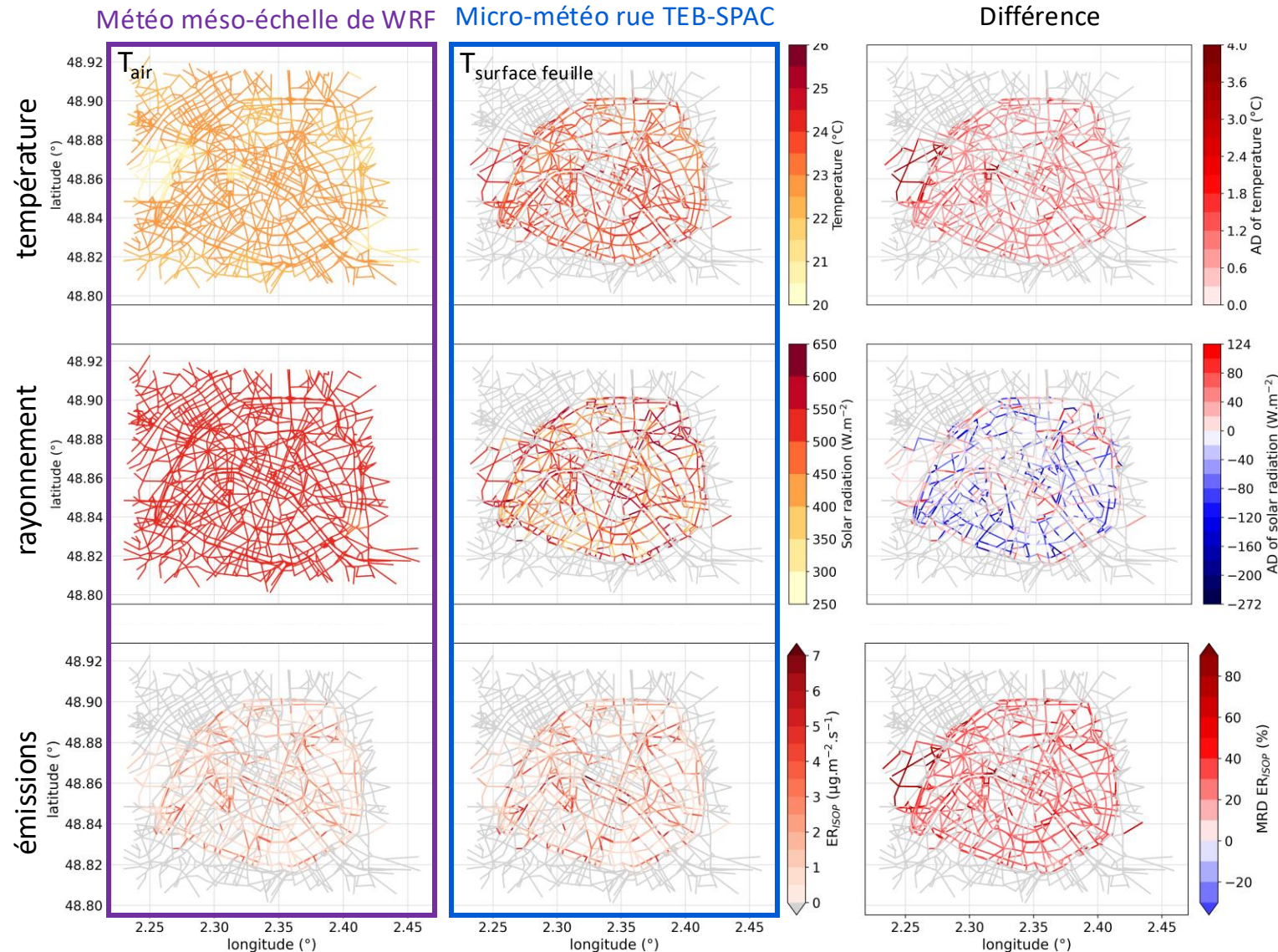
⇒ **augmentation des émissions biogéniques** (principalement due à la température)

+36% pour l'isoprène

+25% pour les monoterpènes

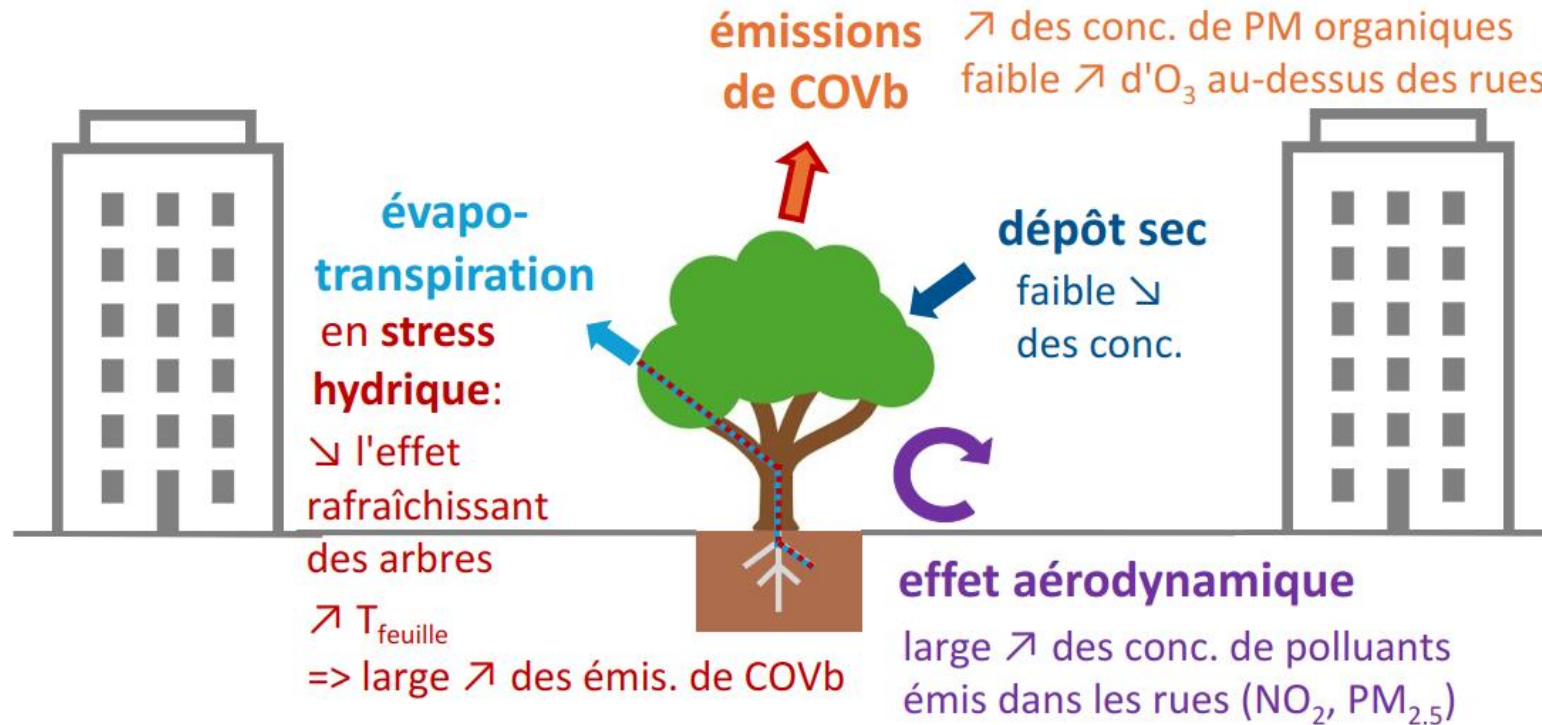
+48% pour les sesquiterpènes

+23% pour les autres COVb



Températures, rayonnements et émissions d'isoprène moyens sur les 2 mois simulés par WRF et TEB-SPAC et différence entre les deux

## Les effets des arbres urbains sur la qualité de l'air



### Recommandations pour la gestion des arbres en ville

⇒ limiter la plantation d'espèces à fortes émissions de terpènes

⇒ limiter la plantation d'arbres avec un grand houppier dans les rues à fort trafic

⇒ assurer une bonne alimentation en eau des arbres en été

#### Limites

- arbres manquants dans la base de données (arbres privés et suburbains)
- manque de mesures pour évaluer les modèles

Merci pour votre attention

[alice.maison@lmd.ipsl.fr](mailto:alice.maison@lmd.ipsl.fr)

- APUR. Les arbres dans la Métropole du Grand Paris. Vers une base de données de décompte et d'identification. Technical report, Atelier parisien d'urbanisme, 2012. URL [https://www.apur.org/sites/default/files/4p203\\_arbres\\_mgp.pdf?token=lxP9tayU](https://www.apur.org/sites/default/files/4p203_arbres_mgp.pdf?token=lxP9tayU)
- Barragán, R.C., Strojnik, M., Rodríguez-Rivas, A., Torales, G.G., González, F.J., "Optical spectral characterization of leaves for Quercus Resinosa and Magnolifolia species in two senescent states ," Proc. SPIE 10765, Infrared Remote Sensing and Instrumentation XXVI, 1076511 (18 September 2018); <https://doi.org/10.1117/12.2321710>
- Bernard, E. (2021). Réponse hydro-climatique de Paris et sa petite couronne. PhD thesis, Université Toulouse 3 - Paul Sabatier
- Bonn, B., Magh, R.-K., Rombach, J., & Kreuzwieser, J. (2019). Biogenic isoprenoid emissions under drought stress: Different responses for isoprene and terpenes. *Biogeosciences*, 16(23), 4627-4645. <https://doi.org/10.5194/bg-16-4627-2019>
- Bozonnet, E., Musy, M., Calmet, I., & Rodriguez, F. (2013). Modeling methods to assess urban fluxes and heat island mitigation measures from street to city scale. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 10(1), 62-77. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctt049>
- Couvidat, F., Bessagnet, B., Garcia-Vivanco, M., Real, E., Menut, L., & Colette, A. (2018). Development of an inorganic and organic aerosol model (CHIMERE 2017b v1.0): Seasonal and spatial evaluation over Europe. *Geoscientific Model Development*, 11(1), 165-194. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-165-2018>
- Derognat, C., Beekmann, M., Baeumle, M., Martin, D., & Schmidt, H. (2003). Effect of biogenic volatile organic compound emissions on tropospheric chemistry during the Atmospheric Pollution Over the Paris Area (ESQUIF) campaign in the Ile-de-France region. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D17). <https://doi.org/10.1029/2001JD001421>
- De Munck, C. (2013). *Modélisation de la végétation urbaine et stratégies d'adaptation pour l'amélioration du confort climatique et de la demande énergétique en ville*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse)
- Guenther, A., Hewitt, C. N., Erickson, D., Fall, R., Geron, C., Graedel, T., Harley, P., Klinger, L., Lerdau, M., McKay, W. A., Pierce, T., Scholes, B., Steinbrecher, R., Tallamraju, R., Taylor, J., & Zimmerman, P. (1995). A global model of natural volatile organic compound emissions. *Journal of Geophysical Research*, 100(D5), 8873. <https://doi.org/10.1029/94JD02950>
- Guenther, A., Jiang, X., Heald, C. L., Sakulyanontvittaya, T., Duhl, T., Emmons, L. K., & Wang, X. (2012). The Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature version 2.1 (MEGAN2.1): An extended and updated framework for modeling biogenic emissions. *Geoscientific Model Development*, 5(6), 1471-1492. <https://doi.org/10.5194/gmd-5-1471-2012>
- Hamdi, R., & Masson, V. (2008). Inclusion of a Drag Approach in the Town Energy Balance (TEB) Scheme: Offline 1D Evaluation in a Street Canyon. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(10), 2627-2644. <https://doi.org/10.1175/2008JAMC1865.1>
- Hanna, S., & Chang, J. (2012). Acceptance criteria for urban dispersion model evaluation. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 116(3), 133-146. <https://doi.org/10.1007/s00703-011-0177-1>
- Hicks, B. B., Baldocchi, D. D., Meyers, T. P., Hosker, R. P., & Matt, D. R. (1987). A preliminary multiple resistance routine for deriving dry deposition velocities from measured quantities. *Water, Air, and Soil Pollution*, 36(3-4), 311-330. <https://doi.org/10.1007/BF00229675>
- Katul, G. G., Mahrt, L., Poggi, D., & Sanz, C. (2004). ONE- and TWO-Equation Models for Canopy Turbulence. *Boundary-Layer Meteorology*, 113(1), 81-109.

- Kim, Y., Wu, Y., Seigneur, C., & Roustan, Y. (2018). Multi-scale modeling of urban air pollution: Development and application of a Street-in-Grid model (v1.0) by coupling MUNICH (v1.0) and Polair3D (v1.8.1). *Geoscientific Model Development*, 11(2), 611-629.
- Kim, Y., 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>
- Kusaka, H., Kondo, H., Kikegawa, Y., & Kimura, F. (2001). A Simple Single-Layer Urban Canopy Model For Atmospheric Models: Comparison With Multi-Layer And Slab Models. *Boundary-Layer Meteorology*, 101(3), 329-358. <https://doi.org/10.1023/A:1019207923078>
- Lemonsu, A., Masson, V., Shashua-Bar, L., Erell, E., & Pearlmutter, D. (2012). Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modelling urban green areas. *Geoscientific Model Development*, 5(6), 1377-1393. <https://doi.org/10.5194/gmd-5-1377-2012>
- Lin, L., Yan, J., Ma, K., Zhou, W., Chen, G., Tang, R., & Zhang, Y. (2017). Characterization of particulate matter deposited on urban tree foliage: A landscape analysis approach. *Atmospheric Environment*, 171, 59-69. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.09.012>
- Livesley, S. J., McPherson, E. G., & Calfapietra, C. (2016). The Urban Forest and Ecosystem Services: Impacts on Urban Water, Heat, and Pollution Cycles at the Tree, Street, and City Scale. *Journal of Environmental Quality*, 45(1), 119-124. <https://doi.org/10.2134/jeq2015.11.0567>
- Lugon, L., Sartelet, K., Kim, Y., Vigneron, J., & Chrétien, O. (2019). *Street-in-Grid modeling of gas-phase pollutants in Paris city* [Preprint]. Gases/Atmospheric Modelling/Troposphere/Chemistry (chemical composition and reactions). <https://doi.org/10.5194/acp-2019-1087>
- Lugon, L., Sartelet, K., Kim, Y., Vigneron, J., & Chrétien, O. (2021). Simulation of primary and secondary particles in the streets of Paris using MUNICH. *Faraday Discuss.*, 226(0), 432-456. <https://doi.org/10.1039/D0FD00092B>
- Macdonald, R. W., Griffiths, R. F., & Hall, D. J. (1998). An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays. *Atmospheric Environment*, 32(11), 1857-1864.
- Maison, A., Flageul, C., Carissimo, B., Tuzet, A., & Sartelet, K. (2022a). Parametrization of Horizontal and Vertical Transfers for the Street-Network Model MUNICH Using the CFD Model Code\_Saturne. *Atmosphere*, 13(4), 527. <https://doi.org/10.3390/atmos13040527>
- Maison, A., Flageul, C., Carissimo, B., Tuzet, A., Wang, Y., & Sartelet, K. (2022b). 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 Discussions*, 2022, 1-28. <https://doi.org/10.5194/acp-2022-287>
- Maison, A. (2023). Modélisation des impacts des arbres sur la qualité de l'air de l'échelle de la rue à la ville. PhD thesis, École des Ponts ParisTech. <https://pastel.hal.science/tel-04604417>
- 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. (2024a). Significant impact of urban tree biogenic emissions on air quality estimated by a bottom-up inventory and chemistry transport modeling. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24(10), 6011-6046. <https://doi.org/10.5194/acp-24-6011-2024>

- 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. (2024b). Contrasting effects of urban trees on air quality : From the aerodynamic effects in streets to impacts of biogenic emissions in cities. *Science of The Total Environment*, 946, 174116. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174116>
- Masson, V. (2000). A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models. *Boundary-Layer Meteorology*, 94(3), 357-397. <https://doi.org/10.1023/A:1002463829265>
- Masson, V., Grimmond, C. S. B., & Oke, T. R. (2002). Evaluation of the Town Energy Balance (TEB) Scheme with Direct Measurements from Dry Districts in Two Cities. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 41(10), 1011-1026. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2002\)041<1011:EOTTEB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2002)041<1011:EOTTEB>2.0.CO;2)
- McPherson, E. G., van Doorn, N. S., & Peper, P. J. (2016). *Urban tree database and allometric equations* (PSW-GTR-253; p. PSW-GTR-253). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station. <https://doi.org/10.2737/PSW-GTR-253>
- Menut, L., Bessagnet, B., Briant, R., Cholakian, A., Couvidat, F., Mailler, S., Pennel, R., Siour, G., Tuccella, P., Turquety, S., & Valari, M. (2021). The CHIMERE v2020r1 online chemistry-transport model. *Geoscientific Model Development*, 14(11), 6781-6811. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-6781-2021>
- Otu-Larbi, F., Bolas, C. G., Ferracci, V., Staniaszek, Z., Jones, R. L., Malhi, Y., Harris, N. R. P., Wild, O., & Ashworth, K. (2020). Modelling the effect of the 2018 summer heatwave and drought on isoprene emissions in a UK woodland. *Global Change Biology*, 26(4), 2320-2335. <https://doi.org/10.1111/gcb.14963>
- Redon, E. C., Lemonsu, A., Masson, V., Morille, B., & Musy, M. (2017). Implementation of street trees within the solar radiative exchange parameterization of TEB in SURFEX v8.0. *Geoscientific Model Development*, 10(1), 385-411. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-385-2017>
- Redon, E., Lemonsu, A., & Masson, V. (2020). An urban trees parameterization for modeling microclimatic variables and thermal comfort conditions at street level with the Town Energy Balance model (TEB-SURFEX v8.0). *Geoscientific Model Development*, 13(2), 385-399. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-385-2020>
- Sarica, T., Maison, A., Roustan, Y., Ketznel, 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 Discussion [Preprint]*. <https://doi.org/10.5194/gmd-2023-70>
- Sartelet, K., Couvidat, F., Wang, Z., Flageul, C., & Kim, Y. (2020). SSH-Aerosol v1.1: A Modular Box Model to Simulate the Evolution of Primary and Secondary Aerosols. *Atmosphere*, 11(5), 525. <https://doi.org/10.3390/atmos11050525>
- Silver, J. D., Ketznel, M., and Brandt, J. (2013). Dynamic parameter estimation for a street canyon air quality model. *Environmental Modelling & Software*, 47, 235-252. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.05.012>
- Stavropoulos-Laffaille, X., Chancibault, K., Brun, J.-M., Lemonsu, A., Masson, V., Boone, A., & Andrieu, H. (2018). Improvements to the hydrological processes of the Town Energy Balance model (TEB-Veg, SURFEX v7.3) for urban modelling and impact assessment. *Geoscientific Model Development*, 11(10), 4175-4194. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-4175-2018>
- Team, U., Bontemps, S., Defourny, P., Van Bogaert, E., Team, E., Arino, O., Kalogirou, V., and Perez, J. R. Globcover 2009 products description and validation report, 2011.

- Tuzet, A., Granier, A., Betsch, P., Peiffer, M., & Perrier, A. (2017). Modelling hydraulic functioning of an adult beech stand under non-limiting soil water and severe drought condition. *Ecological Modelling*, 348, 56-77. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.01.007>
- Tuzet, A., Perrier, A., & Leuning, R. (2003). A coupled model of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration. *Plant, Cell and Environment*, 26(7), 1097-1116. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2003.01035.x>
- Wang, H., Lu, X., Seco, R., Stavrakou, T., Karl, T., Jiang, X., Gu, L., & Guenther, A. B. (2022). Modeling Isoprene Emission Response to Drought and Heatwaves Within MEGAN Using Evapotranspiration Data and by Coupling With the Community Land Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 14(12). <https://doi.org/10.1029/2022MS003174>
- Walmsley, J. L., & Wesely, M. L. (1996). Modification of coded parametrizations of surface resistances to gaseous dry deposition. *Atmospheric Environment*, 30(7), 1181-1188. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(95\)00403-3](https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00403-3)
- Wesely, M. L. (1987). Parameterization of surface resistances to gaseous dry deposition in regional-scale numerical models. *Atmospheric Environment*, 23(6), 1293-1304.
- Zaïdi, H., Dupont, E., Milliez, M., Musson-Genon, L., & Carissimo, B. (2013). Numerical Simulations of the Microscale Heterogeneities of Turbulence Observed on a Complex Site. *Boundary-Layer Meteorology*, 147(2), 237-259.
- Zhang, L. (2001). A size-segregated particle dry deposition scheme for an atmospheric aerosol module. *Atmospheric Environment*, 35(3), 549-560. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00326-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00326-5)
- Zhang, L., Brook, J. R., & Vet, R. (2003). A revised parameterization for gaseous dry deposition in air-quality models. *Atmos. Chem. Phys.*, 16.
- Zhang, L., Moran, M. D., Makar, P. A., Brook, J. R., & Gong, S. (2002). Modelling gaseous dry deposition in AURAMS: A unified regional air-quality modelling system. *Atmospheric Environment*, 36(3), 537-560. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00447-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00447-2)
- Photos : <https://dailyscience.be/NEW/wp-content/uploads/2019/08/arbres-en-ville-modif.jpg>
- <https://www.archdaily.com/800562/the-planners-guide-to-trees-in-the-urban-landscape/560ac385e58ece0d3d00008a-the-planners-guide-to-trees-in-the-urban-landscape-image>
- [https://www.bfmtv.com/meteo/les-ilots-de-chaaleur-urbain-pourquoi-fait-il-plus-chaud-en-ville\\_AN-201706010072.html](https://www.bfmtv.com/meteo/les-ilots-de-chaaleur-urbain-pourquoi-fait-il-plus-chaud-en-ville_AN-201706010072.html)