

# Impact de la végétation sur la qualité de l'air: de l'échelle de la rue à la ville

Karine SARTELET<sup>1</sup>, Alice MAISON<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>CEREA/ Ecole des Ponts ParisTech, <sup>2</sup>INRAE, <sup>3</sup>now at LMD

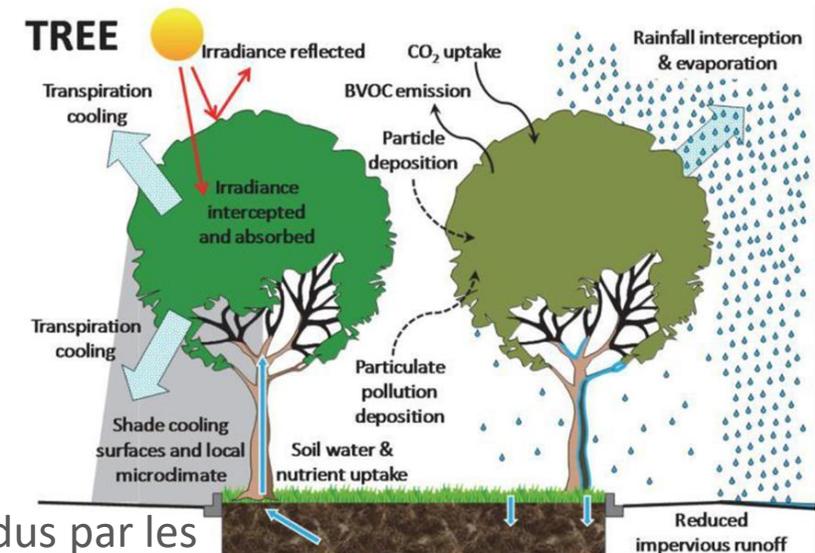
# Les arbres urbains

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

En particulier les arbres,

- déjà largement implantés en ville (plus de 200 000 arbres dans les rues et espaces verts à Paris (hors bois)).
  - rendent plusieurs **services écosystémiques** :
    - + amélioration du **confort thermique** (évapotranspiration et interception du rayonnement)
    - + limitation du **ruissellement** (interception d'eau et conservation de sols perméables)
    - + stockage du **carbone** (dans leurs tissus)
    - + 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)

# La pollution de l'air

- **Risques pour la santé humaine** (maladies aiguës et chroniques):
  - La pollution de l'air **aux particules fines  $PM_{2.5}$**  a provoqué le décès de 253.000 personnes dans l'Union européenne en 2021, selon un rapport de l'Agence européenne de l'environnement (AEE)
  - 52.000 décès prématurés sont attribuables à l'exposition au **dioxyde d'azote ( $NO_2$ )** et 22.000 à **l'ozone ( $O_3$ )**
  - En France :
    - perte d'espérance de vie **15 mois** dans les zones **urbaines** et 9 mois dans les zones rurales (Santé Publique France)
    - Entre **68 et 97 milliards d'euros par an** pour la France de coûts sanitaires dus à la pollution de l'air
- (Source : "Rapport sur le coût économique et financier de la pollution atmosphérique", Sénat, 2015)

# La pollution de l'air

- Plus de 85% de l'impact sanitaire est dû aux particules
- La masse  $PM_{2.5}$  est réglementée mais l'impact sanitaire varie avec la composition et la taille des particules (fines, ultrafines)
  - BC est considéré comme polluant prioritaire par l'OMS depuis 2021
  - Forts impacts des composés organiques OM (potentiel oxydant)

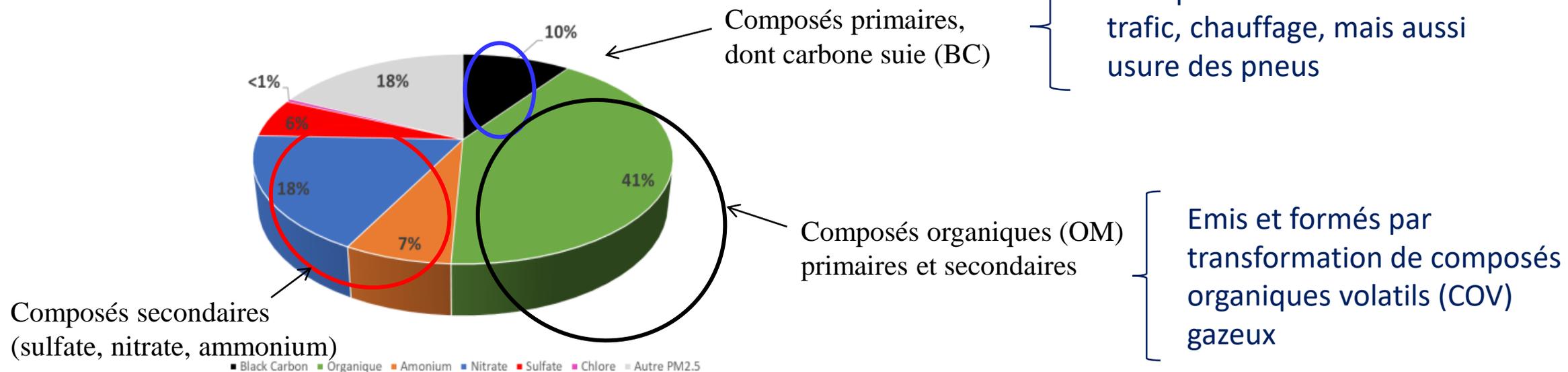


Figure 3 : composition chimique moyenne annuelle des  $PM_{2.5}$  en situation de fond urbain (Mesures ACSM / AE33)

- Dans les modèles de qualité de l'air locaux et régionaux, les **arbres urbains ne sont pas pris en compte** (sauf pour les grands bois)

→ nécessité de représenter les processus liés aux arbres dans les différents modèles pour comprendre l'impact des arbres pour guider les **politiques publiques d'aménagement du territoire** pour améliorer la qualité de l'air

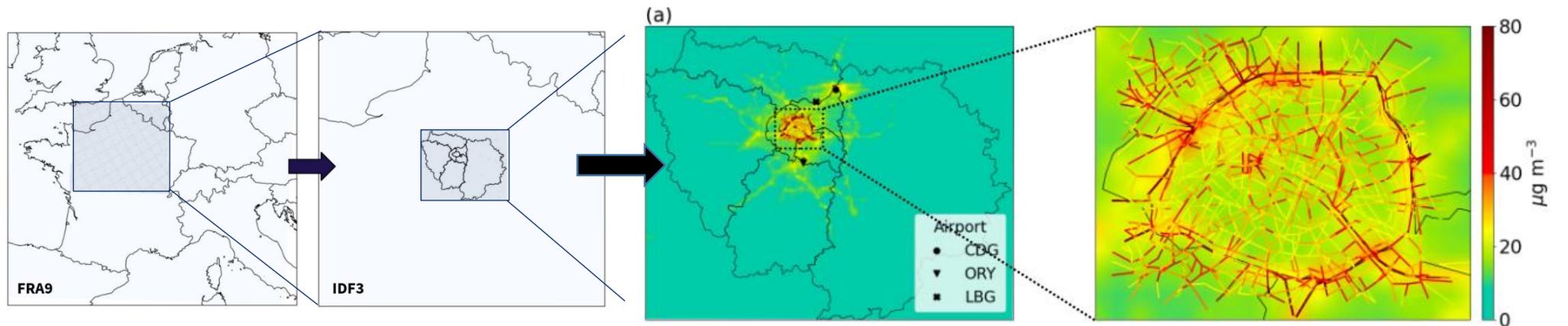
- Projet ANR sTREEt: (01/11/2019 – 30/04/2024)

Impact of sTress on uRban trEEs and on city air quality

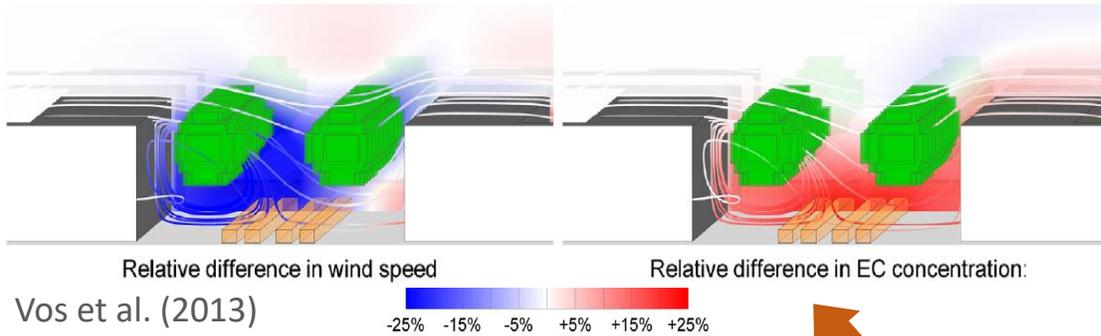
Thèse d'Alice Maison Ecole des Ponts/INRAE , soutenue le 28/11/2023 (encadrement K. Sartelet et A. Tuzet)

- Chaîne de modélisation multi-échelles => concentrations de polluants jusqu'à l'échelle de la rue
- Période de simulation du **6 juin au 31 juillet 2022** (été et campagnes de mesures) – **projet H2020 RI-urbans** (Park et al. Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2024)
- Tests de sensibilité du 13 au 26 juin

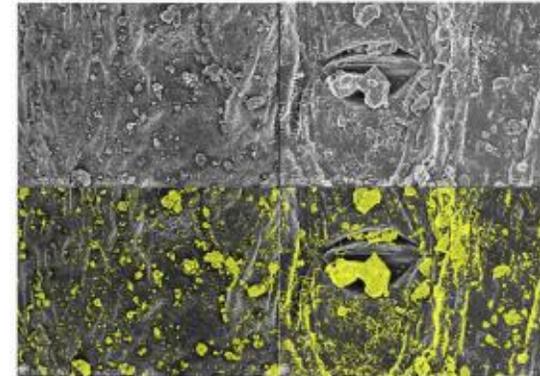
	FRA9	IDF3	IDF1	MUNICH
Domaine	France	Nord de la France	Ile-de-France	Paris
Résolution horizontale	9×9 km	3×3 km	1×1 km	rue
Emissions anthropiques	EMEP 2020	EMEP 2020	Airparif (inventaire régional 2019 et trafic 2022)	Airparif (trafic 2022)



## Effet aérodynamique



Vos et al. (2013)



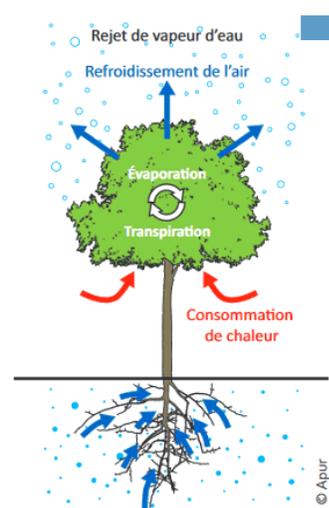
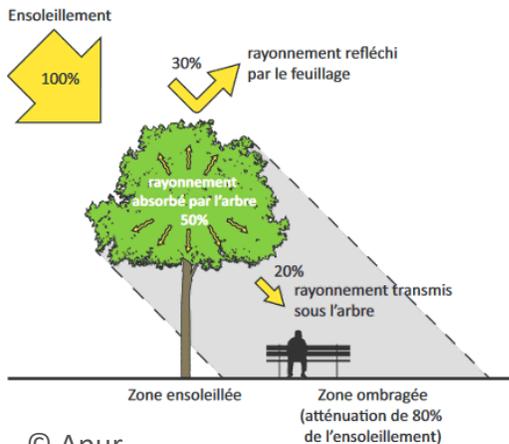
Lin et al. (2017)

## Dépôt sur les feuilles

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

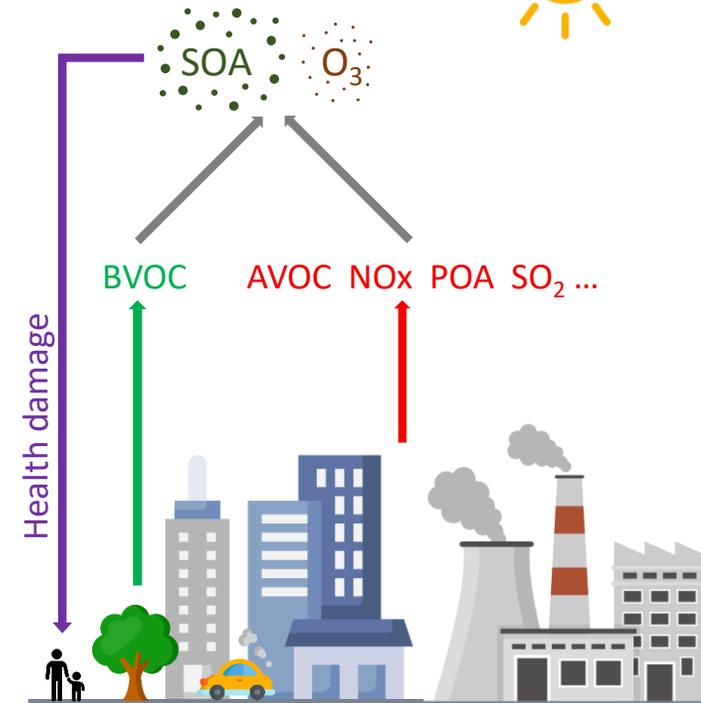
## Émissions de COVb

## Effet thermo-radiatif



## Effet indirect des stress abiotiques

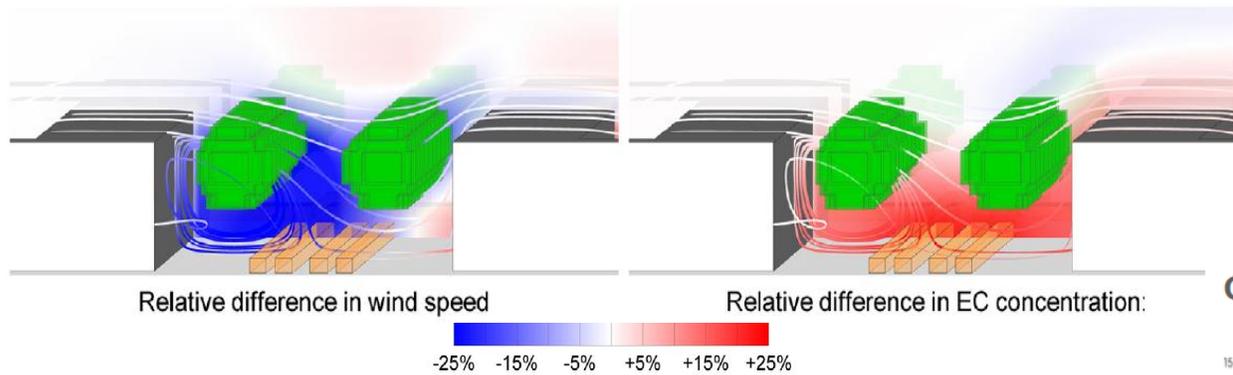
- stress thermique (températures plus élevées)
- stress hydrique (plantation dans des volumes de sol restreints)



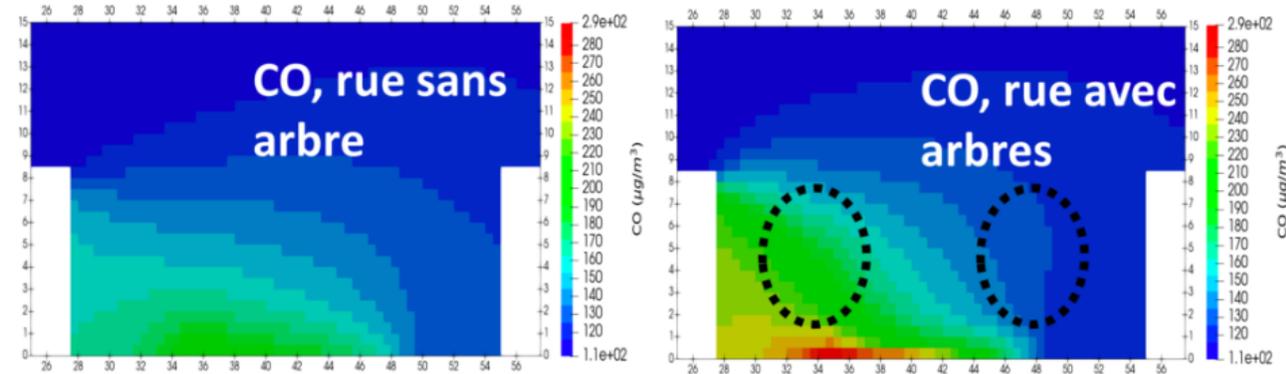
Émission de COVb = f(espèce, biomasse, température, rayonnement, âge, stress)



# Effets aérodynamiques



Coupe 2D d'une rue avec et sans arbre.



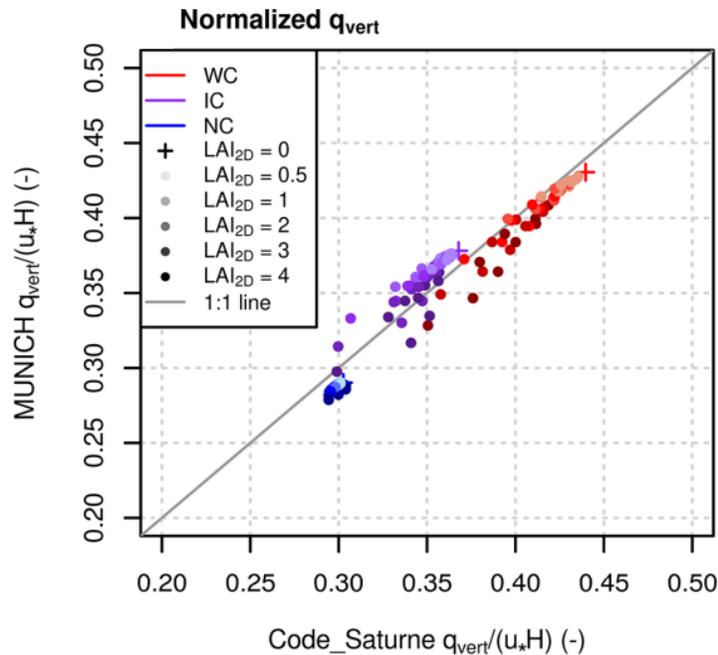
Concentrations de monoxyde de carbone (CO) dans une rue sans arbre (à gauche) et dans une rue avec arbre d'alignement (à droite). Les arbres d'alignement sont délimités sur la figure par des lignes pointillées. La rue avec des arbres d'alignement limite la dispersion des émissions du trafic au-dessus de la rue, et entraînant une accumulation des concentrations dans la rue. Ces simulations ont été effectuées avec le logiciel de mécanique des fluides code\_saturne.

Source: Sartelet, Ingénus, 2022.

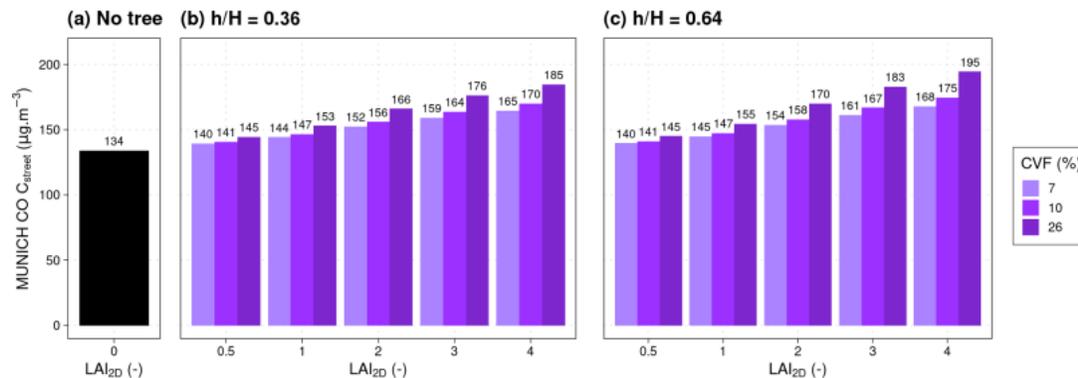
Dans les rues canyon, les arbres ont tendance à ralentir l'écoulement  
=> les polluants émis dans les rues y séjournent plus longtemps  
=> plus fortes concentrations des polluants émis par les véhicules

Source: Vos et al. Atmos. Environ. (2013)

# Effets aérodynamiques



- Les effets aérodynamiques des arbres dépendent des caractéristiques des rues et des arbres
  - LAI (Leaf area index)
  - Volume de rue occupé par les arbres (CVF = Crown Volume Fraction)
- Paramétrisations pour les modèles de réseaux de rue, à partir de simulations de mécanique des fluides



**Figure D1.** Comparison of CO concentration ( $C_{\text{street}}$ ) simulated with MUNICH in IC for different tree  $LAI_{2D}$ , CVF, and tree height ratios  $h/H$ . The graphic is divided into three columns corresponding to the treeless canyon (a) and to canyons with trees of height ratios  $h/H = 0.36$  (b) and  $0.64$  (c). The concentrations  $C_{\text{street}}$  (in  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) are specified with data labels.

Source: Maison et al Atmos. Chem. Phys. 2022.

# Dépôt sur les feuilles

Le dépôt sur les feuilles dépend du LAI de l'arbre, et diffère selon les polluants  
Des simulations de mécanique des fluides ont montré qu'il est plus important que le dépôt sur les surfaces des rues (murs et chaussées) mais faible devant l'effet aérodynamique

**Table 2**

Summary of tree impacts on the street-average concentrations of different species in the street. The column Ref. corresponds to the average concentrations of the case 1\_J. The columns VOC, Dep urb, Dep tree, Aerodyn. and Synth. correspond to the impact of VOC emissions, deposition on urban surfaces, deposition on trees, aerodynamic effects and overall effects, respectively.

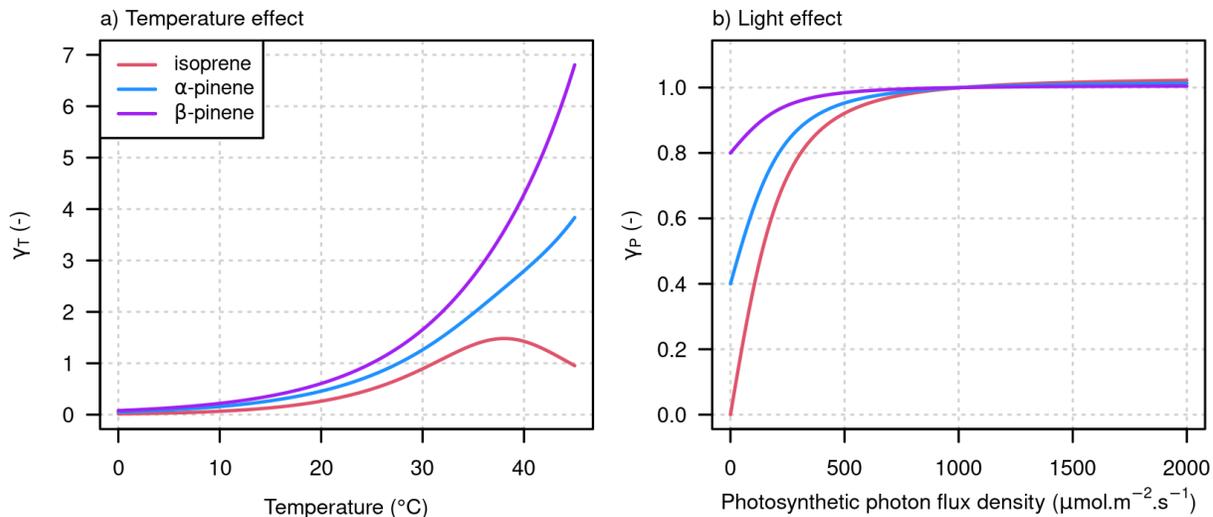
Species	Ref. 1_J $\mu\text{g m}^{-3}$	VOC % (2_J - 1_J) %	Dep urb (3_J - 1_J) %	Dep tree (4_J - 1_J) %	Aerodyn (ref_J - 0_J) %	Synth July (ref_J - 1_J) %	Synth April (ref_A - 1_A) %
NO	22.0	0.9	-0.4	-0.9	<b>-27.5</b>	-27.6	-27.8
NO <sub>2</sub>	42.3	-0.7	1.5	3.5	<b>-23.8</b>	-21.5	-16.1
NH <sub>3</sub>	2.8	0.0	1.2	3.6	-6.3	-2.0	-9.0
CO	158	0.0	0.0	2.2	<b>-10.5</b>	-8.7	-7.3
HNO <sub>3</sub>	2.6	0.7	5.9	<b>25.0</b>	0.3	21.8	26.2
O <sub>3</sub>	82.5	-0.3	0.9	3.2	6.1	8.8	10.7
OH	$3.1 \times 10^{-4}$	<b>17.4</b>	-0.4	-1.4	<b>13.6</b>	26.4	9.0
Bio cond.	4.3	-0.2	0.0	0.0	0.0	-0.2	-0.1
ELVOC	$1.6 \times 10^{-4}$	<b>-73.9</b>	0.7	2.4	<b>-14.3</b>	-78.0	-55.1
Ant cond.	0.8	0.1	0.0	-0.01	-0.2	-0.1	-0.2
ISVOC	5.5	0.04	0.1	0.7	<b>-15.0</b>	-14.1	-16.7

Simulations  
réalisées avec des  
« sophora »  
Source: Wang et al  
Environ. Poll 2023.

# Emissions de Composés Organiques Volatils

- En présence de rayonnement, les arbres émettent des COV biogéniques (isoprène, terpènes)
- Les COVb émis par les arbres varient selon les espèces d'arbres
  - Certaines espèces comme les platanes émettent surtout de l'isoprène => influence potentielle sur la formation d'ozone
  - Certaines espèces comme les sophoras ou les chênes verts émettent plus de terpènes => influence potentielle sur la formation d'aérosols organiques

**=> Nécessité de choisir les espèces d'arbres à planter en zone urbaine?**



Dépendance des facteurs d'activité aux variations de (a) température et (b) rayonnement pour trois COVb (Guenther et al., 1995, 2012)

# Effets thermo-radiatifs

## En ville :

- densité et hauteur des bâtiments élevées
- matériaux foncés et imperméables
- émission de chaleur anthropique

⇒ températures plus élevées en ville : îlot de chaleur urbain

La majeure partie de l'énergie solaire sur les surfaces sèches est convertie en chaleur sensible, qui réchauffe le sol et l'air situé au-dessus.

En été, les températures sur de telles surfaces peuvent excéder les 50°C

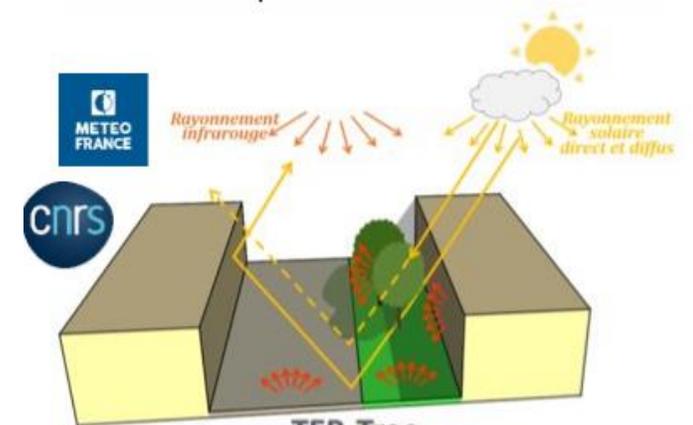
## Les arbres rafraichissent les villes localement :

évapo-transpiration

interception du rayonnement solaire et création d'ombre

⇒ amélioration du confort thermique humain

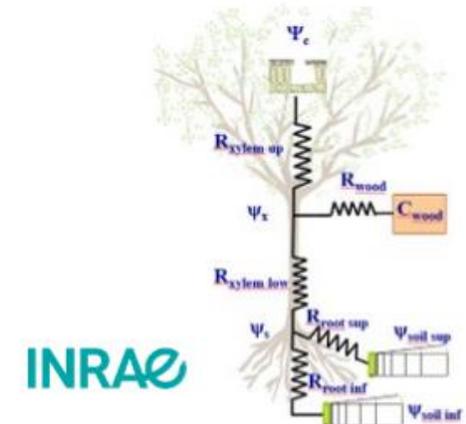
Prise en compte de ces effets thermo-radiatifs et de leurs impacts sur la qualité de l'air



TEB-Tree

Town Energy Balance

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



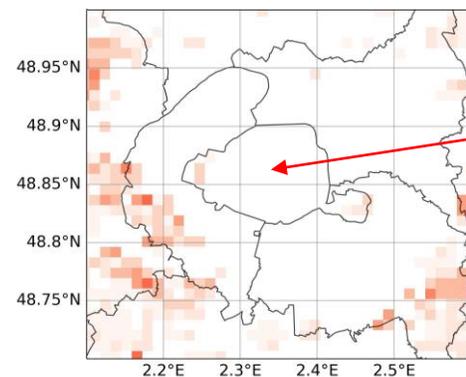
Soil Plant Atmosphere Continuum Model (SPAC) (Tuzet et al., 2017)

# Ajouts des arbres urbains dans les modèles de qualité de l'air

## Arbres de la ville de Paris répertoriés dans la base de données « Arbre »

- 1) Paramétrisation de l'**effet aérodynamique** des arbres dans les **rues canyons** du modèle de rue MUNICH à partir de simulations de **mécanique des fluides** Maison et al., 2022a *Atmosphere* ; Maison et al., 2022b *Atmospheric Chemistry and Physics*
- 2) Intégration dans MUNICH du **dépôt sec des polluants sur les feuilles** des arbres à partir de la littérature
- 3) Estimation des **émissions de COVb** des arbres urbains à partir de la **base de données Arbres de la ville de Paris**, d'**équations allométriques** et d'équations empiriques issues du **modèle d'émission MEGAN** Maison et al., 2023, *Atmospheric Chemistry and Physics*

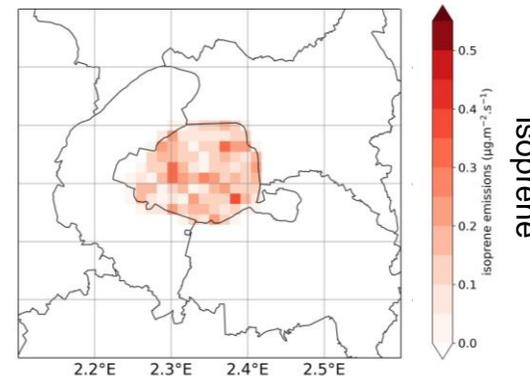
émissions de COVb dans les **modèles de chimie transport**



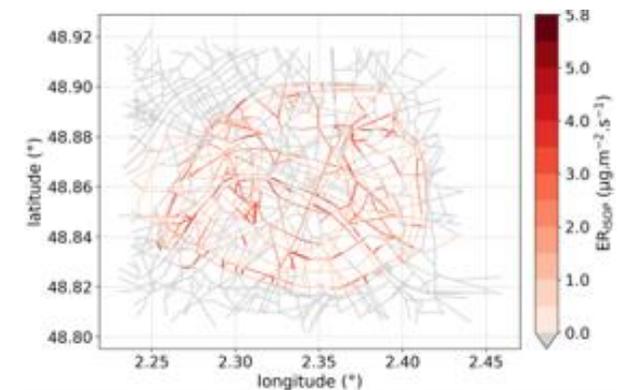
**pas d'émission  
(sauf grands bois)**



ajout des émissions provenant des **arbres urbains** de la ville de Paris



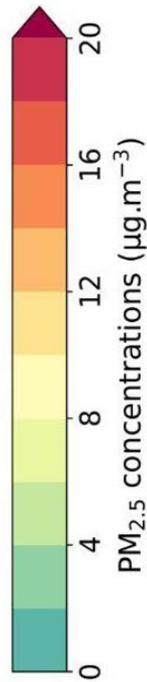
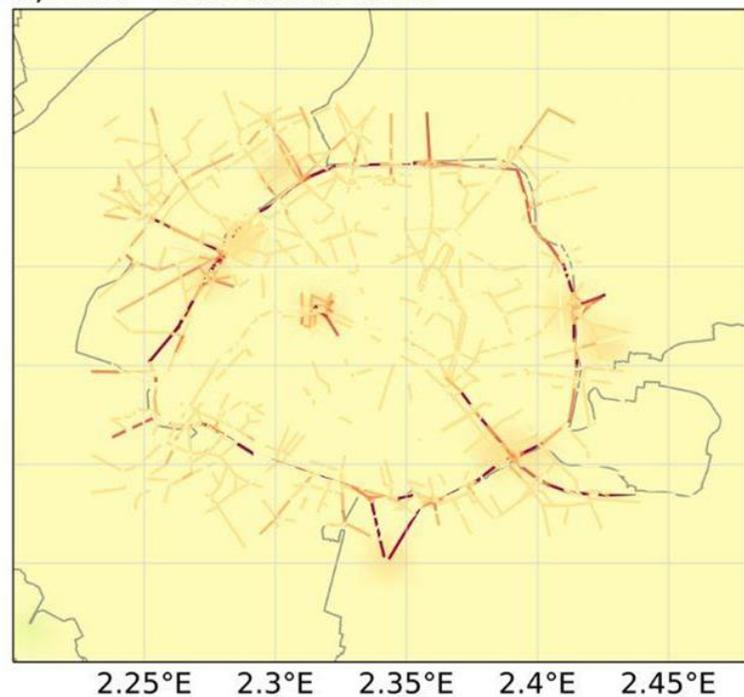
ajout des émissions provenant des **arbres de rues**



# Evaluation du modèle par rapport aux mesures

Simulation sur **juin et juillet 2022** des concentrations des polluants avec la chaîne de modélisation **CHIMERE/MUNICH**

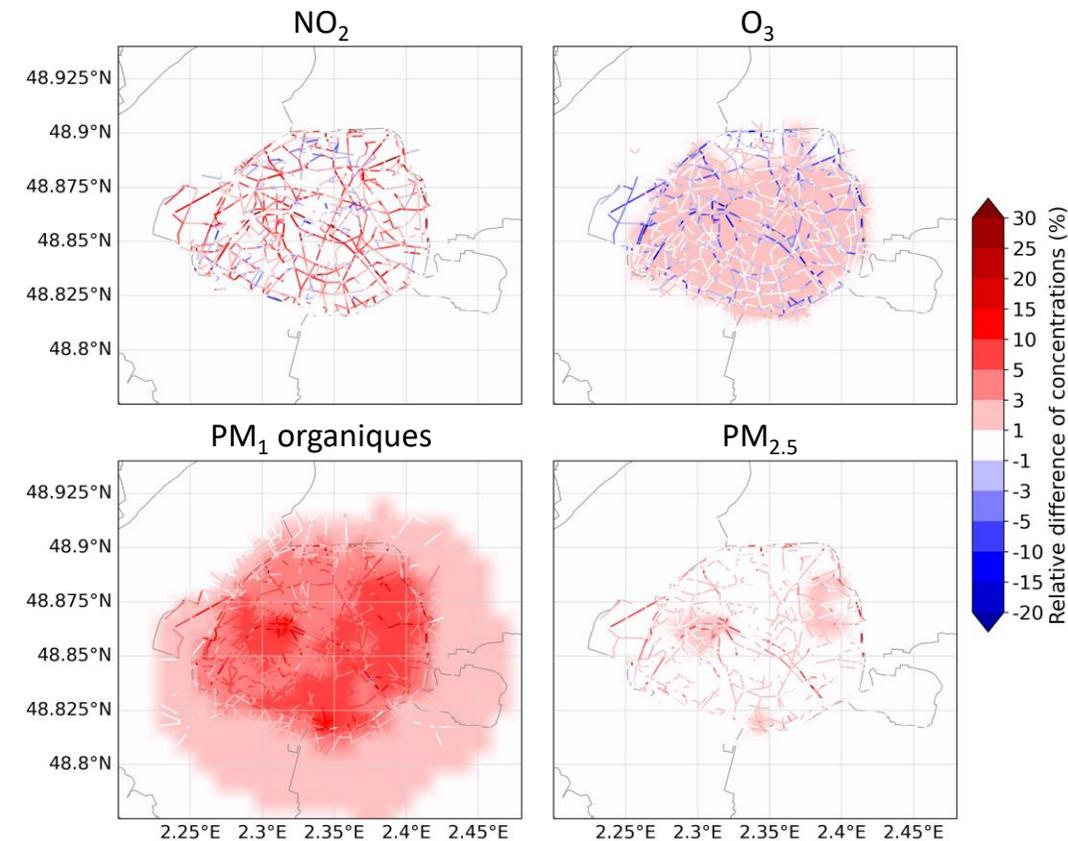
Forts gradients observés et simulés pour le  $\text{NO}_2$ , mais aussi le carbone suie, polluant émergent considéré « prioritaire » par l’OMS depuis 2021.



	Stat. Type	Nb stat.	Sim. ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	Obs. ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	MFE (%)
$\text{NO}_2$	Fond	19	16.6	15.5	34
$\text{NO}_2$	Traffic	9	39.2	39.5	26
$\text{PM}_{2.5}$	Fond	4	8.6	8.1	30
$\text{PM}_{2.5}$	Traffic	3	12.1	11.1	25
BC	Fond	3	0.5	0.5	36
BC	Traffic	3	1.3	1.2	40

# Impact des arbres urbains sur les concentrations de polluants dans Paris

- **Effet aérodynamique :**  
=> **augmentation des composés émis dans la rue** ( $\text{NO}_2$ , carbone suie) (+4.6% en moyenne et jusqu'à +37% pour le  $\text{NO}_2$ )  
=> **diminution des concentrations d' $\text{O}_3$  dans les rues** (-2.3% en moyenne dans les rues avec arbres et jusqu'à -23.2%)
- **Dépôt sec sur les feuilles :**  
=> **faible diminution des concentrations de gaz et particules** (-0.6% en moyenne et jusqu'à -2.5%)
- **Emissions de COVb :**  
=> **augmentation des concentrations de particules organiques** (+4.6% en moyenne et jusqu'à +11.5%) et d' $\text{O}_3$  (+1.0% en moyenne et jusqu'à +2.4%)



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

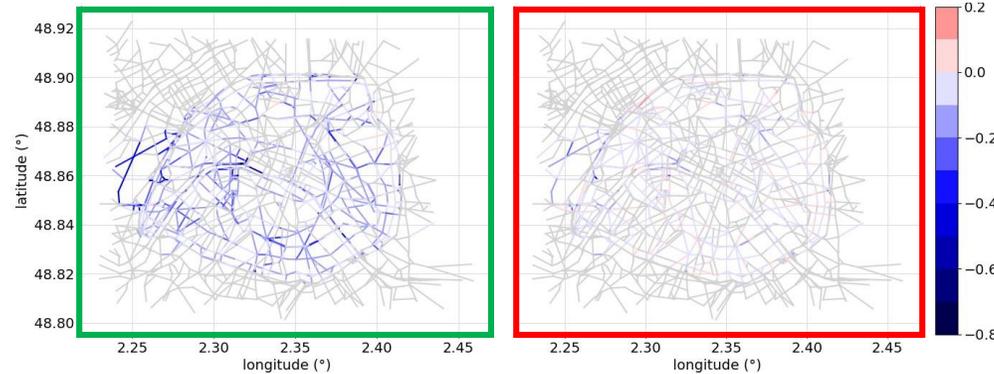
# Liens entre microclimat, stress hydrique et qualité de l'air

## Un couplage de différents modèles pour mieux représenter les liens entre microclimat, stress hydrique et QA

Couplage des modèles de continuum sol-plante-atmosphère (INRAE), de climat urbain TEB (Météo France) et de QA MUNICH (CEREA) à l'échelle de la ville de Paris

Les arbres plantés dans des volumes de sol restreints souffrent rapidement de stress hydrique  
=> diminue la transpiration et réduit l'effet rafraichissant des arbres

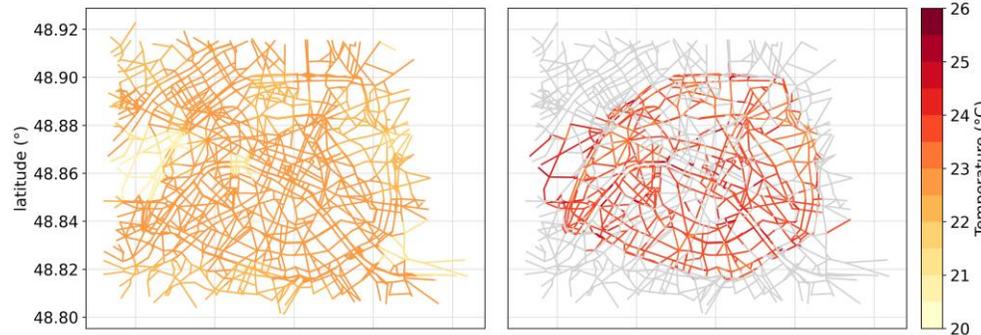
période eau non-limitante : diminution des températures de l'air dans la rue de -0.12°C en moyenne et jusqu'à -0.8°C



période de stress hydrique : diminution limitée -0.02°C en moyenne et jusqu'à -0.5°C

## Effet sur la température des feuilles

Température de l'air sans le couplage



Température des feuilles simulée avec TEB-SPAC

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

=> induit une augmentation des émissions de COVb

(+36% pour l'isoprène)

## Conclusion – impact sociétaux

Conséquences sur les **politiques publiques** avec la formulation de **recommandations pour la gestion des arbres en ville** :

- **limiter** l'implantation d'**arbres avec des grands houppiers dans les rues à fort trafic**  
=> limiter le trafic, canopée réduite
- assurer un **bon approvisionnement en eau des arbres** en été  
=> mise en place de fosses plus perméables, de systèmes arbres de pluie
- **limiter** l'implantation d'**espèces fortes émettrices de terpènes**  
=> sélection des espèces à planter

## Pistes de recherche - Perspectives

- Impacts significatifs des arbres urbains sur la qualité de l'air => Nécessité de les prendre en compte de manière plus systématique dans la modélisation
- **Mieux caractériser la végétation urbaine et suburbaine** avec le développement d'inventaire des arbres dans les municipalités, ou par exemple avec des approches par télédétection
- Nécessité d'avoir plus de **mesures expérimentales** pour :
  - évaluer les **paramétrisations du dépôt sec** en milieu urbain pour les composés qui partitionnent entre la phase particulaire et gaz
  - mieux estimer les **facteurs d'émission des COVb** des arbres urbains, notamment pour les terpènes
  - évaluer les **paramétrisations du stress hydrique** sur les émissions d'isoprène mais aussi des autres COVb
- Améliorer les schémas chimiques pour représenter la formation des particules organiques à partir des COVb dans les villes du futures (moins de NOx du traffic)

# Bibliographie

- 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>
- 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>
- 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>
- 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., Wang, Y., Tuzet, A., & 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*, 22(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., and 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>.
- Maison, A., Lugon, L., Park, S., Boissard, C., Faucheux, A., Gros, V., Kaladian, C., Kim, Y., Leymarie, J., Petit, J.-E., Roustan, Y., Sanchez, O., Squarcioni, A., Valari, M., Viatte, C., Vigneron, J., Tuzet, A., & Sartelet, K. (2024) Contrasting effects of urban trees on air quality: from the aerodynamic effects in streets to impacts of biogenic emissions in cities. Soumis à *Science of the Total Environment*
- Sartelet K. (2022), Comment le changement climatique impacte-t-il la qualité de l'air ? Ingénus, Ecole des Ponts.
- 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>
- Vos, P. E. J., Maiheu, B., Vankerkom, J., & Janssen, S. (2013). Improving local air quality in cities: To tree or not to tree? *Environmental Pollution*, 183, 113–122.
- 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*, 121210. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121210>

# Chaîne de modélisation: fonctionnement hydrique des arbres urbains, impact sur la micro-météo et sur la qualité de l'air à l'échelle de la rue

