



# AIRFRESH

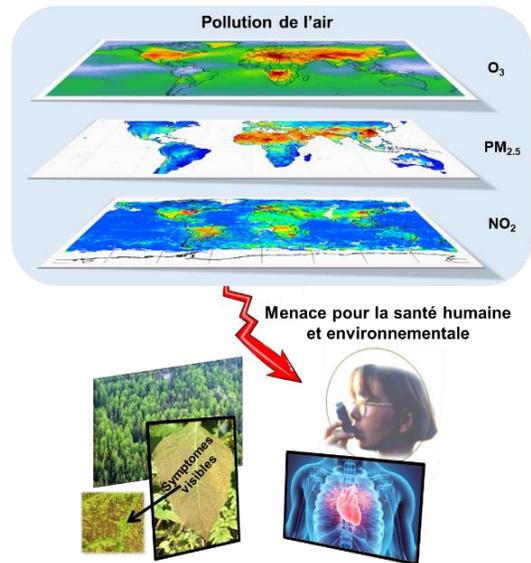
Réduction de la pollution de l'air par  
les arbres en ville pour un meilleur  
bien-être des citoyens



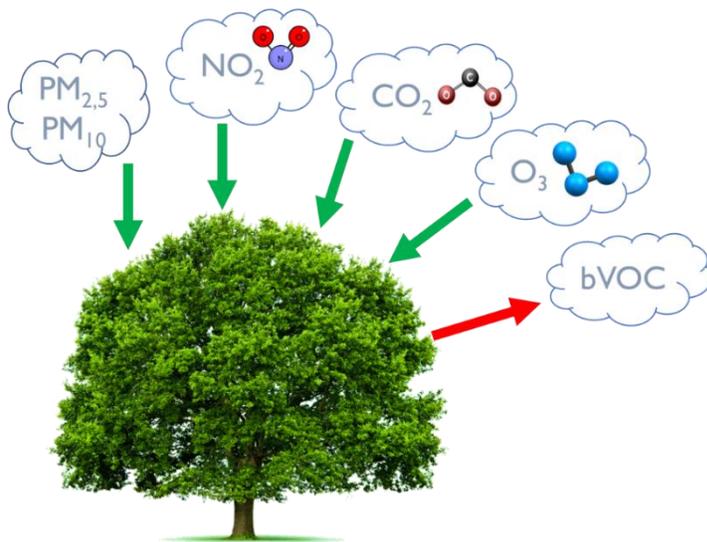
*par*



L'**urbanisation de masse** est l'un des défis les plus urgents du 21<sup>ème</sup> siècle: 82% de la population de l'Union Européenne vivra en ville en 2030. La pollution de l'air et le changement climatique sont étroitement liés et la **pollution de l'air** est un des plus grands risques environnementaux auxquels sont confrontées les villes modernes, ce qui nécessite une coopération internationale et des **efforts de recherche unifiés**. Les émissions des véhicules, des activités industrielles et de la consommation d'énergie contribuent à l'augmentation des niveaux de polluants de l'air tels que les particules fines (PM), le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) et l'ozone troposphérique (O<sub>3</sub>). Ces polluants constituent une **menace pour la santé humaine** (par exemple, maladies respiratoires et cardiovasculaires, asthme, cancer du poumon) et **les écosystèmes naturels**.



### Cadre et objectifs du projet



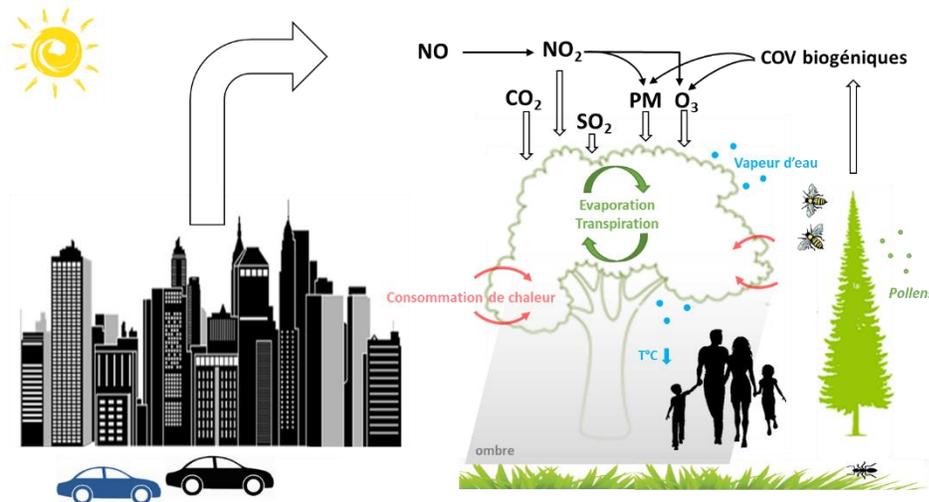
Le **reboisement urbain**, par exemple en augmentant la densité des arbres dans les villes, et le reboisement périurbain à proximité des villes densément peuplées où il n'est pas facile de planter des arbres, peuvent aider à **améliorer la qualité** de l'air et à respecter les normes de qualité de l'air dans les villes.

Il est donc nécessaire d'**optimiser les espaces verts urbains** pour des villes plus saines. L'Union Européenne a lancé la **Stratégie Biodiversité à l'horizon 2030**, qui demande aux municipalités de plus

de 20 000 habitants d'élaborer des plans de végétalisation ambitieux.

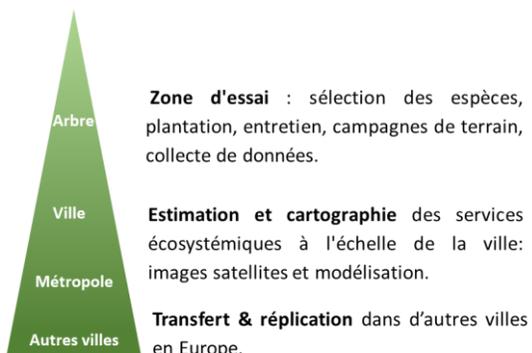
Toutefois, il faut **sélectionner soigneusement les espèces** afin d'éviter des effets secondaires indésirables, comme l'émission de composés organiques volatils biogènes (COVb) qui contribuent à la formation d'O<sub>3</sub>. Certaines municipalités ont planté à la hâte n'importe quelle espèce d'arbre, et ces stratégies ont dégradé la qualité de l'air.





**Figure 1** - Au-delà de l'atténuation de la pollution, les arbres urbains fournissent des services écosystémiques supplémentaires, notamment la régulation de la température, la séquestration du carbone et l'amélioration de la biodiversité.

Pour réduire efficacement la pollution de l'air et avoir des **villes neutres en carbone et résilientes au changement climatique**, une évaluation quantitative et concrète du rôle des arbres urbains sur la qualité de l'air et la température en ville ainsi **qu'une sélection appropriée d'espèces d'arbres** sont nécessaires. Dans LIFE AIRFRESH, nous avons sélectionné **Aix-en-Provence** dans le sud-est de la France (143 000 habitants) et **Florence** en Italie (380 000 habitants) comme **laboratoire vivant** où la population est régulièrement exposée à des niveaux de PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub> et O<sub>3</sub> au-dessus des seuils limites de l'Organisation Mondiale de la Santé.



**Pour la première fois, AIRFRESH a permis de:**

- Quantifier\* les **bénéfices environnementaux et sanitaires** apportés par une zone nouvellement plantée. \* à partir de données in situ
- Quantifier l'**élimination de la pollution de l'air** par les arbres urbains à l'échelle de la ville.
- Proposer des **recommandations pour des politiques de reforestation** pour améliorer la qualité de l'air.

## **Description de la méthodologie mise en place**

### ***Zone test : plantation d'arbres, entretien et campagnes de terrain***

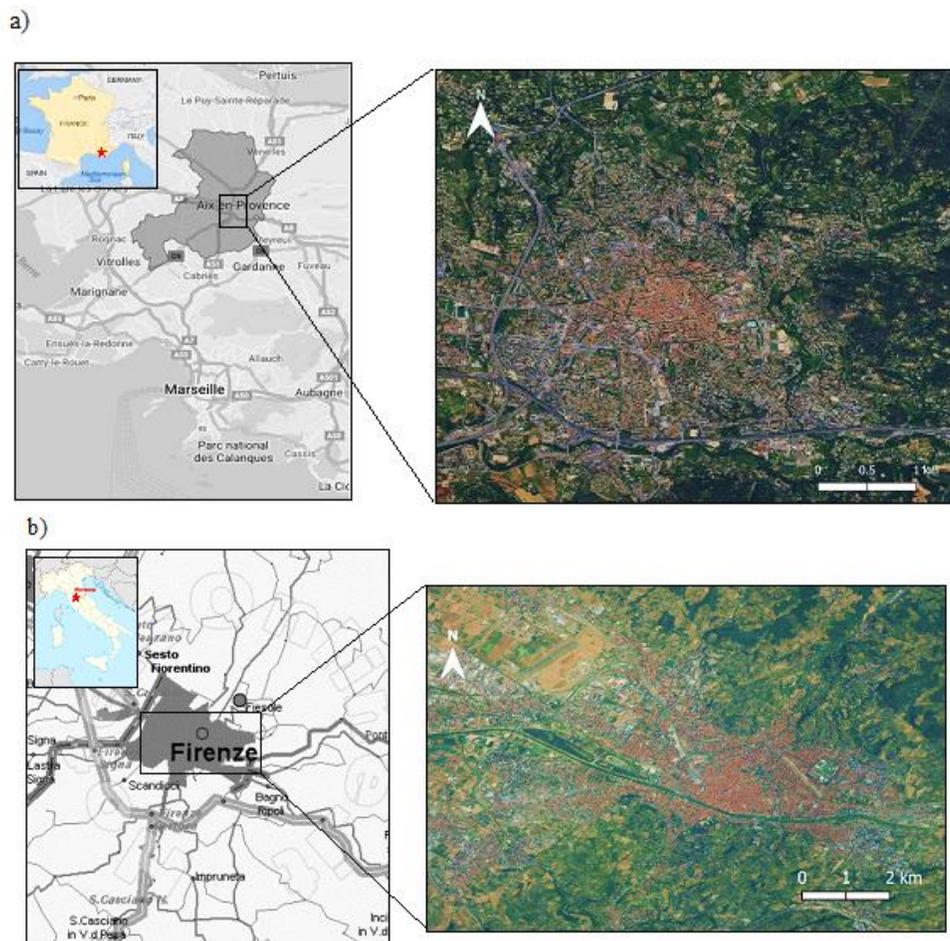
Deux zones tests ont été mises en place en janvier 2022 (400 arbres à croissance rapide, mélange d'espèces, > 3 m de haut, 1 hectare). Les bénéfices environnementaux ont été estimés avant et après reboisement grâce à des indicateurs clés. Des mesures continues de polluants atmosphériques et de la météorologie ont été effectuées dans et autour de la zone, au-dessus et en dessous de la canopée, avant et après la plantation des arbres à l'aide de capteurs AirQino (température de l'air, humidité relative, direction et vitesse du vent, particules (PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>) et polluants atmosphériques gazeux (NO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>). Une évaluation de la biodiversité (flore et faune) a été réalisée (par exemple, la biodiversité des sols, ADN environnemental). Concernant les émissions de CO<sub>2</sub>, une analyse du cycle de vie a été réalisée pour calculer l'empreinte carbone liée à la culture en pépinière, à la plantation des arbres et à l'entretien au fil du temps.



**Figure 2** – Mise en place d'une zone test nouvellement plantée dans les deux villes: sélection des espèces d'arbres, plantation, entretien et campagnes de mesures à l'aide de capteurs AirQino.

### *Distribution, classification, et cartographie des espaces verts*

[Sicard et al., 2023](#) ont développé une **approche par satellite** pour détecter, délimiter et classer la végétation urbaine dans les zones **publiques et privées**, avec la sélection de **caractéristiques spectrales et texturales** pertinentes pour chaque espèce végétale. Les principales caractéristiques des arbres individuels (par exemple, l'espèce, la hauteur, la couverture de la canopée) sont dérivées à l'aide d'une approche de classification, de techniques de prétraitement comprenant la correction atmosphérique, le pan-sharpening et la correction spatiale pour dériver l'indice de végétation à partir d'**images satellite à très haute résolution** WorldView-2 ou Pleiades (résolution spatiale de 0,5 m).



**Figure 3** - Localisation des deux zones d'étude: Aix-en-Provence (a) et Florence (b). La zone d'étude, couverte par l'image satellite, s'étend sur 50 km<sup>2</sup> à Aix-en-Provence et 80 km<sup>2</sup> à Florence.

### *Cartographie et évaluation des services écosystémiques*

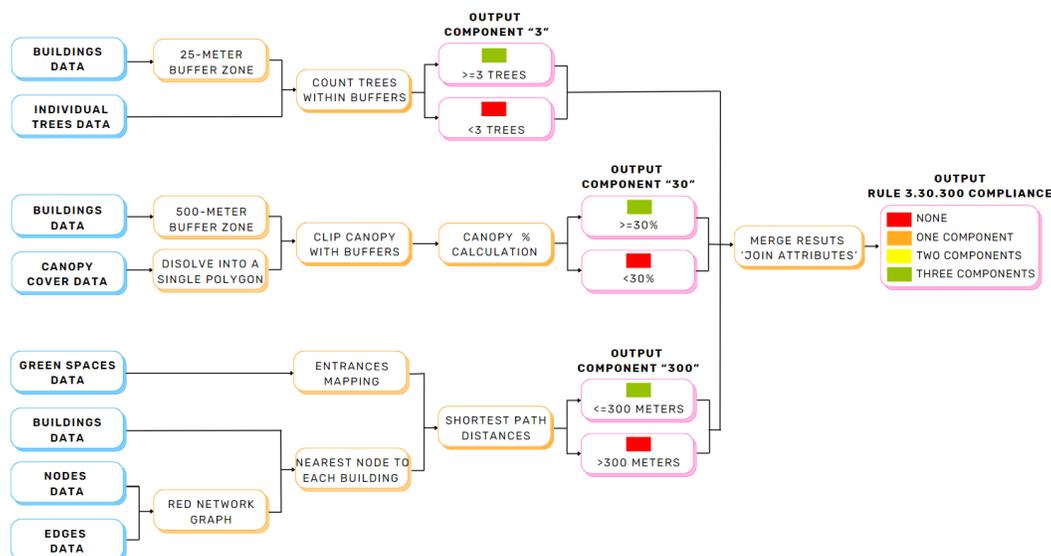
Nous avons développé un modèle innovant (**FlorTree**) pour quantifier et cartographier la capacité d'élimination des polluants atmosphériques d'environ **220 espèces végétales**, par exemple CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> et NO<sub>2</sub>. L'effet de refroidissement de la végétation est également quantifié. Les données météorologiques et les concentrations de polluants atmosphériques sont obtenues avec le modèle WRF-CHIMERE et une résolution spatiale de <1 km.

## Conformité à la règle 3-30-300 : un outil géospatial pour la planification urbaine



La **règle 3-30-300**, introduite en 2021, exige que chaque citoyen voit au moins trois arbres matures depuis son domicile, vive dans un quartier avec au moins 30 % de couverture forestière et se trouve à moins de 300 mètres d'un espace vert de qualité.

Pour établir des **stratégies de verdissement efficaces**, nous avons développé un **outil géospatial** utilisant la télédétection et les techniques du système d'information géographique (SIG) pour évaluer la conformité avec la règle 3-30-300. L'outil utilise des images satellite à très haute résolution pour détecter les arbres et estimer la couverture végétale et intègre les données **OpenStreetMap** pour évaluer la proximité des espaces verts. L'**outil géospatial à l'échelle de la ville** est essentiel pour aider les villes à élaborer des **plans de verdissement urbain résilients et neutres pour le climat**. Les résultats de cette étude offrent une feuille de route essentielle pour **identifier les zones prioritaires** de verdissement dans les villes en développement rapide et densément peuplées.

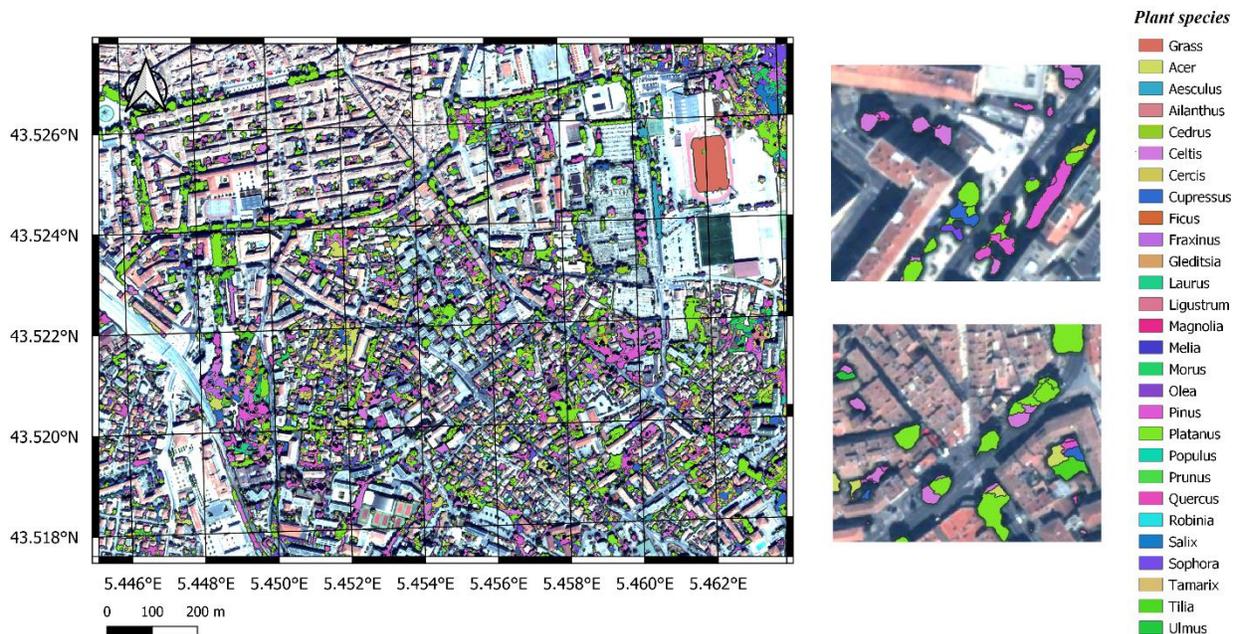


**Figure 4** - Organigramme de la méthodologie de l'algorithme créé pour la conformité à la règle 3-30-300: les cases bleues représentent les données d'entrée, les cases orange désignent les processus principaux et les cases roses désignent les sorties.

### Principaux résultats obtenus

#### Cartographie des arbres urbains à l'échelle de la ville

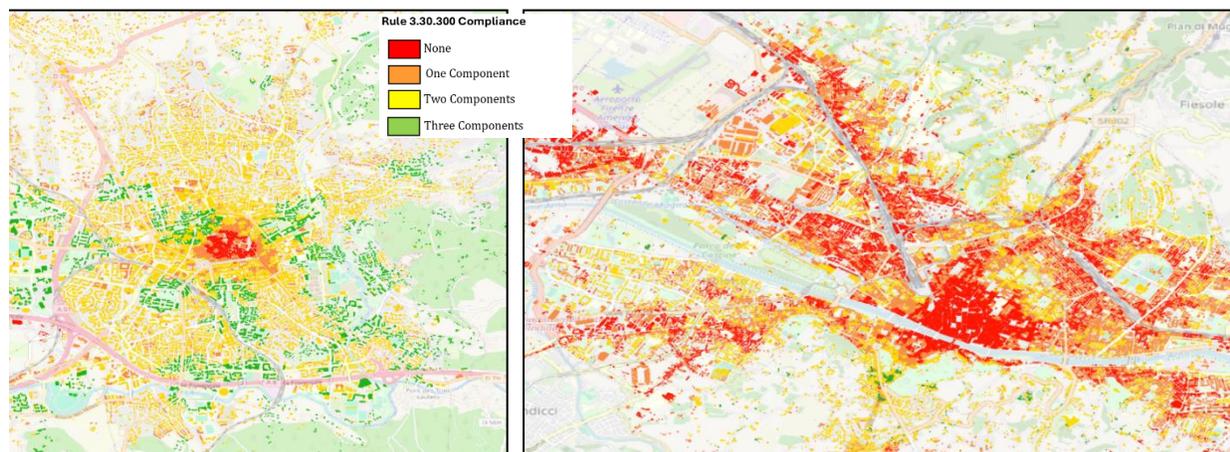
À Aix-en-Provence et Florence, **22 espèces végétales dominantes** et prairies ont été identifiées et classées avec une précision globale de 84% (Sicard et al., 2023). Les caractéristiques des arbres, des espaces verts ainsi que des **espaces ouverts potentiellement disponibles pour la renaturation** sont cartographiées dans un environnement SIG.



**Figure 5** – Détection, délimitation et classification de la végétation urbaine sur la zone d'étude à Aix-en-Provence (zoom sur la partie sud-est de la zone d'étude).

### Conformité à la règle 3-30-300 : zones prioritaires à verdir

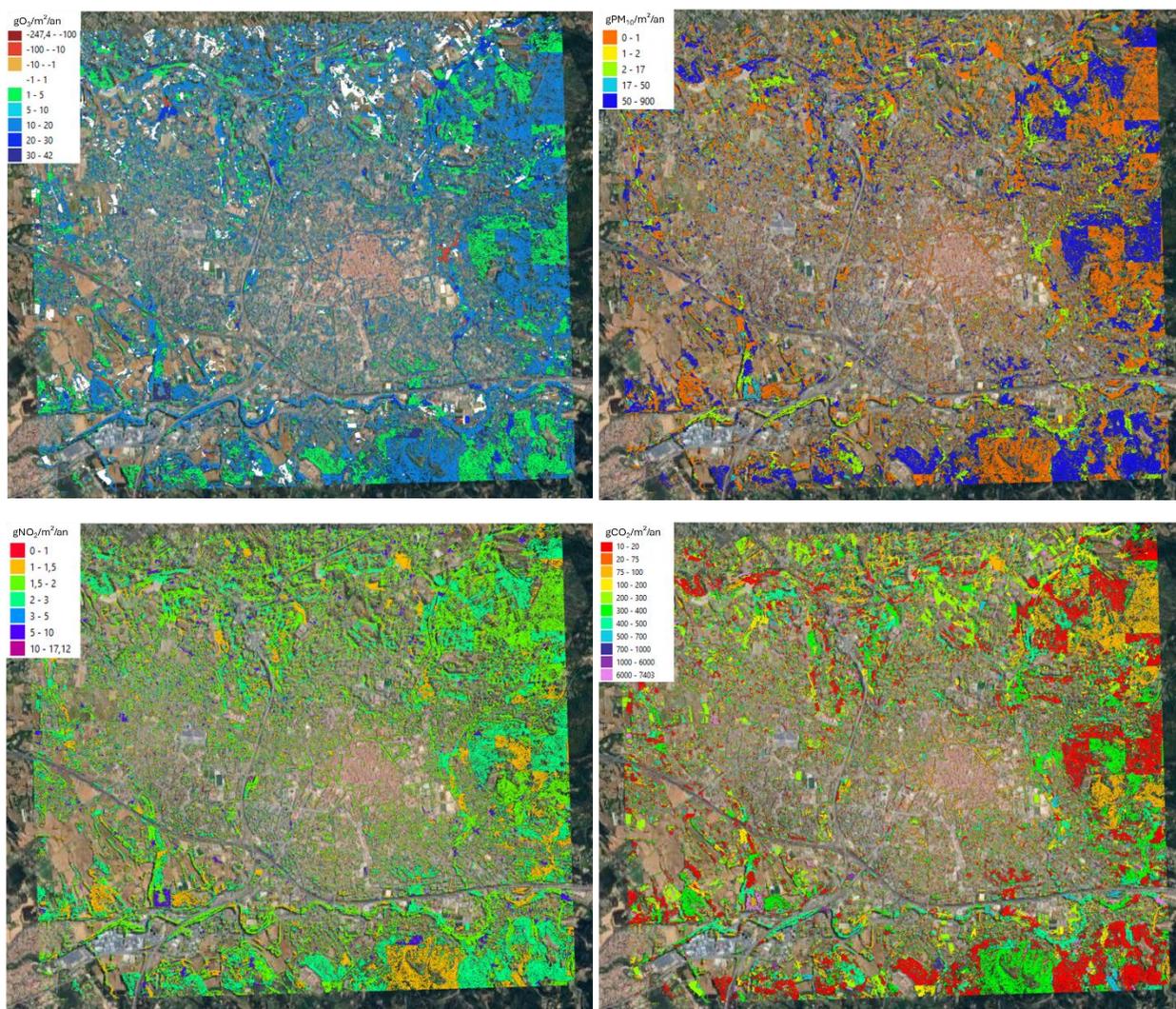
A **Aix-en-Provence**, **18% des bâtiments** sont conformes et 4% des bâtiments ne sont pas conformes à la règle 3-30-300. A **Florence**, **4% des bâtiments** sont conformes et 37% des bâtiments ne sont pas conformes à la règle 3-30-300. La conformité à deux composantes représente 56% et 19% des bâtiments à Aix-en-Provence et Florence.



**Figure 6** - Conformité à la règle 3.30.300 dans les zones d'étude d'Aix-en-Provence (à gauche) et de Florence (à droite) combinant les trois composantes: rouge pour non-conformité, orange pour conformité à une composante, jaune pour deux composantes et vert pour conformité totale.

### Capacité d'élimination de la pollution atmosphérique à l'échelle de la ville

À **Aix-en-Provence**, les surfaces végétalisées (arbres et herbes) couvrent 39,6% de la surface étudiée, et les **413 960 arbres adultes** ont éliminé en 2023: 225 tonnes O<sub>3</sub> (formation : 9 tonnes, élimination : 234 tonnes), 41 tonnes NO<sub>2</sub> (6 600 voitures<sup>1</sup>), 97 tonnes PM<sub>10</sub> (147 400 voitures<sup>1</sup>), 16 560 tonnes CO<sub>2</sub> (10 400 voitures<sup>1</sup>) et les pelouses/herbes ont éliminé 423 tonnes CO<sub>2</sub> (environ 2,6%). Les 414 000 arbres adultes ont éliminé 3,1% et 2,8% des émissions locales de NO<sub>x</sub> et de CO<sub>2</sub> et 36,7% des émissions de PM<sub>10</sub>. À **Florence**, les zones végétalisées couvrent 30,3% de la zone étudiée et les **553 450 arbres adultes** ont éliminé: 530 tonnes d'O<sub>3</sub> (formation : 22 tonnes, élimination : 552 tonnes), 73 tonnes de NO<sub>2</sub> (17 140 voitures<sup>1</sup>), 185 tonnes de PM<sub>10</sub> (281 550 voitures<sup>1</sup>), 25 205 tonnes de CO<sub>2</sub> (15 890 voitures<sup>1</sup>).



**Figure 7** – Répartition spatiale des quantités d'ozone (en haut à gauche), de PM<sub>10</sub> (en haut à droite), de NO<sub>2</sub> (en bas à gauche) et de CO<sub>2</sub> (en bas à droite) éliminées par les arbres individuels (g par m<sup>2</sup> de surface foliaire par an) à Aix-en-Provence pour l'année 2023.

<sup>1</sup> émissions moyennes des voitures particulières immatriculées en France ayant parcouru en moyenne 12 200 km au cours de l'année à une vitesse moyenne de 70 km/h.

## FlorTree: Lignes directrices pour les urbanistes et les décideurs urbains



[FlorTree](#) est un modèle *d'arbre unique* conçu pour aider les urbanistes et les décideurs à sélectionner les espèces d'arbres les plus adaptées pour atténuer efficacement la pollution de l'air. Le modèle évalue les caractéristiques spécifiques

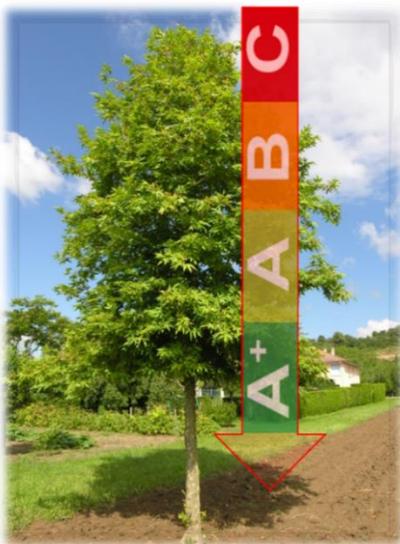
aux espèces et les conditions environnementales, en intégrant des facteurs tels que la morphologie de l'arbre, la conductance stomatique, la surface foliaire et les émissions de COVb. **FlorTree** permet aux utilisateurs de saisir des données spécifiques au site, telles que le climat local et les niveaux de pollution, pour générer des recommandations personnalisées.

### Principales caractéristiques de FlorTree:

- **Données spécifiques aux espèces:** capacité à éliminer les polluants pour 220 espèces d'arbres et d'arbustes.
- **Intégration du climat et de la pollution:** prise en compte des variables climatiques et de pollution locale.
- **Recommandations spécifiques aux polluants:** permet une sélection basée sur des polluants spécifiques ciblés.
- **Interface conviviale:** accessible aux urbanistes sans expertise technique avancée.



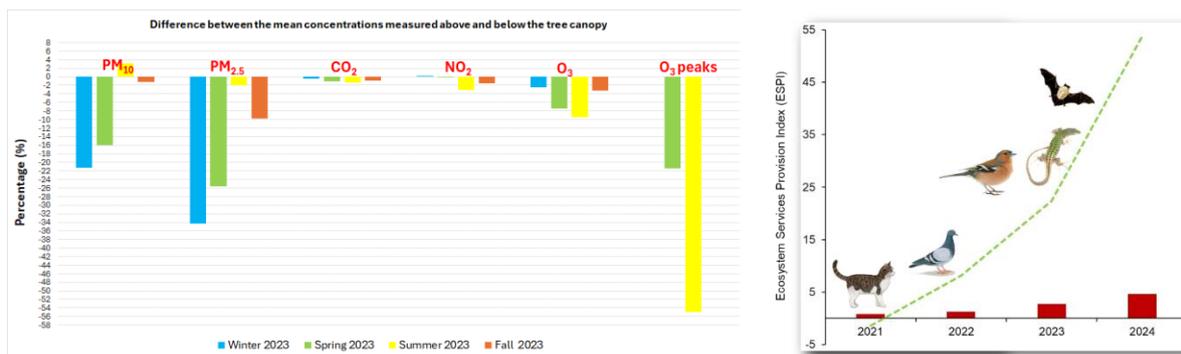
### Bénéfices environnementaux et socio-économiques du projet



Par rapport au couvert forestier actuel, chaque augmentation de **5% du couvert forestier** pourrait réduire de 3,0% et 1,4% les concentrations moyennes annuelles de PM<sub>2,5</sub> et de NO<sub>2</sub>, et de 1,3% les concentrations d'O<sub>3</sub>. Chaque **zone reboisée a éliminé** en 2023 1,5 tonne d'O<sub>3</sub>, 170 kg de NO<sub>2</sub> (40 voitures<sup>1</sup>), 150 kg de PM10 (220 voitures<sup>1</sup>), 21 tonnes de CO<sub>2</sub> (13 voitures<sup>1</sup>) et augmenté les stocks de carbone (2,6 tonnes). L'air ambiant est 1,5°C plus frais par rapport à la zone environnante. En été, nous avons observé une **réduction de 55 % des pics d'O<sub>3</sub>** au niveau des arbres. La plantation de forêts urbaines peut atténuer les effets du changement climatique car les arbres éliminent le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère. Cependant, en créant une nouvelle forêt urbaine, des émissions de gaz à effet de serre se produisent (culture, plantation, entretien). L'empreinte carbone était égale à 14,7 t d'équivalent CO<sub>2</sub>. Le modèle a mis en évidence qu'il fallait **13 ans** pour atteindre un bilan CO<sub>2</sub>

positif. Nous avons observé des augmentations significatives de i) la biodiversité des sols; ii) des vertébrés; iii) des espèces et du nombre d'oiseaux insectivores.





**Figure 9** - Différence des concentrations moyennes saisonnières au-dessus et au-dessous de la canopée des arbres dans la zone test d'Aix-en-Provence pour l'année 2023 (à gauche) et indice de potentiel de services écosystémiques avant et après reforestation en 2022.

Chaque augmentation de 5% de la couverture arborée permettrait d'éviter environ 4 700 décès prématurés liés à la pollution de l'air chaque année dans les 744 villes européennes de plus de 50 000 habitants. Atteindre une couverture arborée de 30% dans chaque ville pourrait éviter près de 12 000 décès prématurés chaque année. À Aix-en-Provence et à Florence, chaque augmentation de 5% de la couverture arborée pourrait éviter un **total de 18 décès prématurés** chaque année. Un excédent de 61 décès prématurés serait observé dans un scénario hypothétique « sans arbre ». Pour traduire la réduction annuelle des décès prématurés en économies économiques, la valeur statistique d'une vie peut être utilisée comme indicateur. En Europe, la valeur statistique moyenne d'une vie est estimée à 4,3 millions d'euros.

### Au-delà de LIFE AIRFRESH - Transférabilité des résultats du projet

FlorTree peut être appliquée dans n'importe quelle ville. En élargissant les ensembles de données socio-économiques, climatiques, d'urbanisme, de sols, de phénologie et de pollution atmosphérique (Zagreb, Bucarest, Vilnius, Tokyo), notre approche a été validée et les lignes directrices affinées. D'autres villes pourront s'appuyer sur les connaissances générées dans les deux villes pionnières pour développer leurs propres plans urbains locaux afin de reproduire et d'adapter les solutions fondées sur la nature à leur contexte local.

### Le jumeau numérique comme outil d'aide à la décision et de planification

En combinant l'approche LIFE AIRFRESH avec des scénarios de changement climatique et de qualité de l'air, un **jumeau numérique** peut être conçu pour aider les urbanistes à évaluer les avantages de divers scénarios de planification. Le jumeau numérique contribue à accélérer la résilience climatique urbaine en simulant des scénarios de changement climatique, en identifiant les zones sujettes à l'effet d'îlot de chaleur urbain et les populations à haut risque, et en localisant les opportunités d'intégrer davantage de nature dans les villes. Les données et les modèles sont disponibles ([Manzini et al., 2023](#); [Sicard et al., 2023](#); [Anav et al., 2024](#)) pour répliquer nos travaux.

## **Messages clés**

- Une nouvelle méthodologie a été développée pour détecter, classer et cartographier les arbres individuels et les espaces verts à l'échelle de la ville, et quantifier la quantité de polluants de l'air qu'ils éliminent.
- Les résultats permettent d'identifier les zones prioritaires pour la végétalisation dans les villes densément peuplées.
- Les forêts périurbaines influencent les conditions climatiques et la qualité de l'air dans les villes. Les zones périurbaines peuvent être une cible pour les stratégies de végétalisation.
- Les arbres privés à Aix-en-Provence et à Florence représentaient plus de 80 % du total, soulignant la nécessité de politiques pour les propriétaires privés.
- Les arbres éliminent les polluants de l'air, par exemple les PM<sub>10</sub>, le NO<sub>2</sub>, l'O<sub>3</sub> et le CO<sub>2</sub>, mais leur efficacité dépend des espèces et des conditions climatiques locales.
- Des recommandations scientifiquement fondées sur les meilleures/pires espèces végétales ont été mises à disposition. Les recommandations diffèrent selon les villes.
- La quantité de polluants éliminés peut compenser les émissions de milliers de voitures, par exemple à Aix-en-Provence, les arbres éliminent chaque année 41 tonnes de NO<sub>2</sub> (correspondant aux émissions de 6 600 voitures), 97 tonnes de PM<sub>10</sub> (147 400 voitures) et 16 560 tonnes de CO<sub>2</sub> (10 400 voitures).
- Une méthodologie a été développée pour vérifier la conformité de chaque bâtiment avec la règle 3-30-300.
- Augmenter la couverture forestière à Aix-en-Provence et Florence à 30% pourrait éviter 50 décès prématurés chaque année.
- La valeur économique de l'élimination de la pollution de l'air et de la réduction de l'îlot de chaleur urbain par la végétation actuelle, estimée en termes de décès prématurés évités, était de 550 M€ pour Florence et de 150 M€ pour Aix-en-Provence.
- C'est la première fois que la réduction de la pollution de l'air et du réchauffement par les forêts urbaines est quantifiée en tandem.
- Ces résultats aident à la mise en œuvre des stratégies de l'UE, par exemple sur la protection de la biodiversité et le Pacte vert, qui vise à planter 3 milliards d'arbres d'ici 2030 dans l'UE.

**Début:** 1<sup>er</sup> septembre 2020

**Fin:** 1<sup>er</sup> décembre 2024

**Coordinateur** Dr Pierre Sicard, ACRI-ST, France

**Partenaires:** ACRI-ST (FR), AIR-Climat (FR), ENEA (IT), IRET-CNR (IT), municipalités d'Aix-en-Provence (FR) et de Florence (IT)

**Budget Total:** 1,20 millions €

**Contribution de la Commission Européenne:** 661 250 €

