

# Analyse climatologique et tendances d'évolution des aérosols urbains sur la région parisienne par mesures satellitaires

Valentin VIGERIE

INPT-ENM, Toulouse, France

## RÉSUMÉ

Les aérosols ont un impact important sur le climat global mais aussi localement, et en particulier en ville, sur l'environnement et la santé. À Paris, des stations de surface mesurent ces concentrations, mais les observations satellitaires offrent un réel potentiel pour le suivi spatial et temporel des aérosols en zone urbaine. Une climatologie de restitutions d'épaisseur optique des aérosols (AOD, Aerosol Optical Depth), issue des données collectées sur la région parisienne de 2006 à 2020 par les satellites défilants Terra et Aqua et géostationnaire MSG, a donc été constituée et analysée. Le cycle moyen de l'AOD est décrit à différentes échelles de temps et un signal de la ville est mis en évidence à l'échelle climatologique. Une décroissance tendancielle de l'AOD, attribuée aux politiques de réduction des émissions, est aussi détectée sur le domaine. Enfin, le rôle des conditions météorologiques locales est exploré. Elles peuvent favoriser le transport d'aérosols depuis des régions voisines pour certains épisodes de pollution enregistrés sur Paris. Elles peuvent aussi favoriser l'intensification de l'îlot de chaleur urbain en été, mettant en lumière des enjeux combinés de qualité de l'air et de stress thermique.

Mots clés : *épaisseur optique des aérosols, produits satellitaires, zone urbaine, qualité de l'air.*

## INTRODUCTION

Les aérosols d'origine naturelle ou anthropique exercent un forçage radiatif sur le bilan énergétique du système Terre par différents processus :

- un effet radiatif direct dû à l'absorption et la diffusion du rayonnement solaire et tellurique par les aérosols ;
- un forçage radiatif indirect dû à la modification des propriétés microphysiques des nuages et de leur cycle de vie ;
- l'évaporation de nuages favorisée par le réchauffement local de l'atmosphère dû à l'absorption du rayonnement par les aérosols.

Ces effets radiatifs influencent donc le climat global et son évolution future. Mais ils ont aussi un impact plus localisé, en particulier sur le microclimat urbain. Les aérosols urbains affectent le rayonnement et influent sur l'îlot de chaleur urbain (ICU : anomalie positive de température entre ville et zones rurales environnantes) comme le montrent quelques rares études (Li et al., 2020). Les particules les plus fines, d'un diamètre inférieur à 10  $\mu\text{m}$  et 2,5  $\mu\text{m}$  (PM10 et PM2,5) ont aussi des conséquences sur l'environnement et la santé, favorisant des maladies respiratoires et cardiovasculaires. Les populations des grandes métropoles (région parisienne, nord-est de la France et axe Lyon-Marseille) où existent des sources importantes d'aérosols fins d'origine anthropique sont particulièrement exposées.

Que ce soit à partir d'observations in situ en surface ou depuis l'espace, la mesure et le suivi de ces particules sont essentiels pour des enjeux climatiques et de qualité de l'air. De nombreuses méthodes appliquées aux mesures de télédétection actives et passives par satellite ont été développées à cette fin et ont démontré leur capacité à détecter et identifier différents types d'aérosols (par exemple Russell et al., 2014). Les principaux produits satellitaires issus de ces méthodes sont des cartes d'AOD (Aerosol Optical Depth).

Dans ce contexte, l'objectif scientifique de cette étude est d'évaluer le potentiel des données satellitaires restituant l'AOD pour le suivi et l'étude climatologique des aérosols au-dessus de Paris et sa région. Les données sont issues des mesures des spectroradiomètres imageurs MODIS et SEVIRI. Les séries temporelles d'AOD sont aujourd'hui assez longues pour mener des études climatologiques et leurs résolutions horizontales respectives de 1 km et d'environ 5 km aux moyennes latitudes peuvent fournir un aperçu de la pollution urbaine et repérer un potentiel effet de la ville.

La première section présente le domaine d'étude et les données utilisées. Ensuite on présente l'analyse climatologique qui décrit les variations saisonnières d'AOD, les tendances et les différences entre ville et campagne. Le lien avec les conditions météorologiques locales est exposé dans la troisième section afin de mettre en lumière certains enjeux sanitaires liés à la présence d'aérosols en ville. Enfin, la quatrième section conclut et ouvre certaines perspectives d'étude.

## CADRE D'ÉTUDE ET MÉTHODE

Le domaine d'étude est une zone de 200 km x 200 km, centrée sur Paris, avec une résolution spatiale d'environ 1 km. Elle comprend la région Île-de-France et une partie de ses départements adjacents. Elle se situe au cœur du bassin parisien, traversé d'est en ouest par la Seine, se caractérisant par une absence de relief marqué et une aire urbaine densément peuplée d'environ 12 millions d'habitants.

### Description des sources de données d'AOD

La principale grandeur d'intérêt est l'épaisseur optique des aérosols (AOD) qui estime la part du rayonnement éteint (diffusé et absorbé) par toute la colonne d'atmosphère en présence d'aérosols:

$$AOD_{\lambda} = \int_0^{TOA} k_{ext}(\lambda, z) dz$$

avec  $\lambda$  (m) la longueur d'onde et  $k_{ext}$  ( $m^{-1}$ ) le coefficient d'extinction des aérosols. L'AOD est un paramètre sans dimension très dépendant de la longueur d'onde, mais il est aussi fonction de la nature et de la concentration des aérosols.

Les restitutions d'AOD utilisées dans cette étude proviennent des produits satellitaires AERUS-GEO (Carrer et al., 2014) et MAIAC (Lyapustin et al., 2018), dont les caractéristiques sont précisées dans la Figure 1. À partir de ces données, on constitue une climatologie de l'AOD, sur la période 2006-2020 et à l'échelle quotidienne, en interpolant les restitutions satellitaires que l'on a sélectionnées comme étant de meilleure qualité possible à l'aide d'indicateurs, sur le domaine d'étude et à la résolution de 1 km.

Sur la même période, l'AOD est aussi obtenu par mesures depuis le sol grâce au réseau de mesure AERONET, aux stations de Paris et Palaiseau et aux longueurs d'onde 440 nm, 500 nm et 675 nm.

	AERUS-GEO	MAIAC
Donnée	AOD 635 nm	AOD 500 nm
Instrument	SEVIRI	MODIS
Plateforme	MSG	Terra et Aqua
Orbite	Geostationnaire (+0° E)	Héliosynchrone quasi-polaire
Résolution spatiale	~5 km aux moyennes latitudes	1 km dans la fauchée
Résolution temporelle de la restitution	1 jour (moyenne d'observations)	1 jour (observation unique)

Figure 1: Description des données satellitaires d'AOD.

### Données complémentaires pour l'analyse

Afin d'étudier l'influence du climat local parisien sur l'AOD notamment, on utilise les 12 types de temps sensibles (TTS) définis par Jouglu et al. (2019) sur la région de Paris à partir de données quotidiennes d'amplitude thermique journalière, des moyennes journalières d'humidité spécifique, de précipitations, de force et de direction du vent. De plus, les niveaux de pollution aux particules fines proches de la surface ont été

estimés en moyennant pour chaque jour les concentrations en PM10 mesurées par les 11 stations urbaines de fond du réseau Airparif. Enfin, l'îlot de chaleur urbain (ICU), c.-à-d. la différence de température entre ville et campagne, a été calculé quotidiennement à partir des températures minimales enregistrées à la station de Paris-Montsouris et à deux stations rurales.

## RÉSULTATS DE L'ANALYSE CLIMATOLOGIQUE

### Moyennes climatologiques

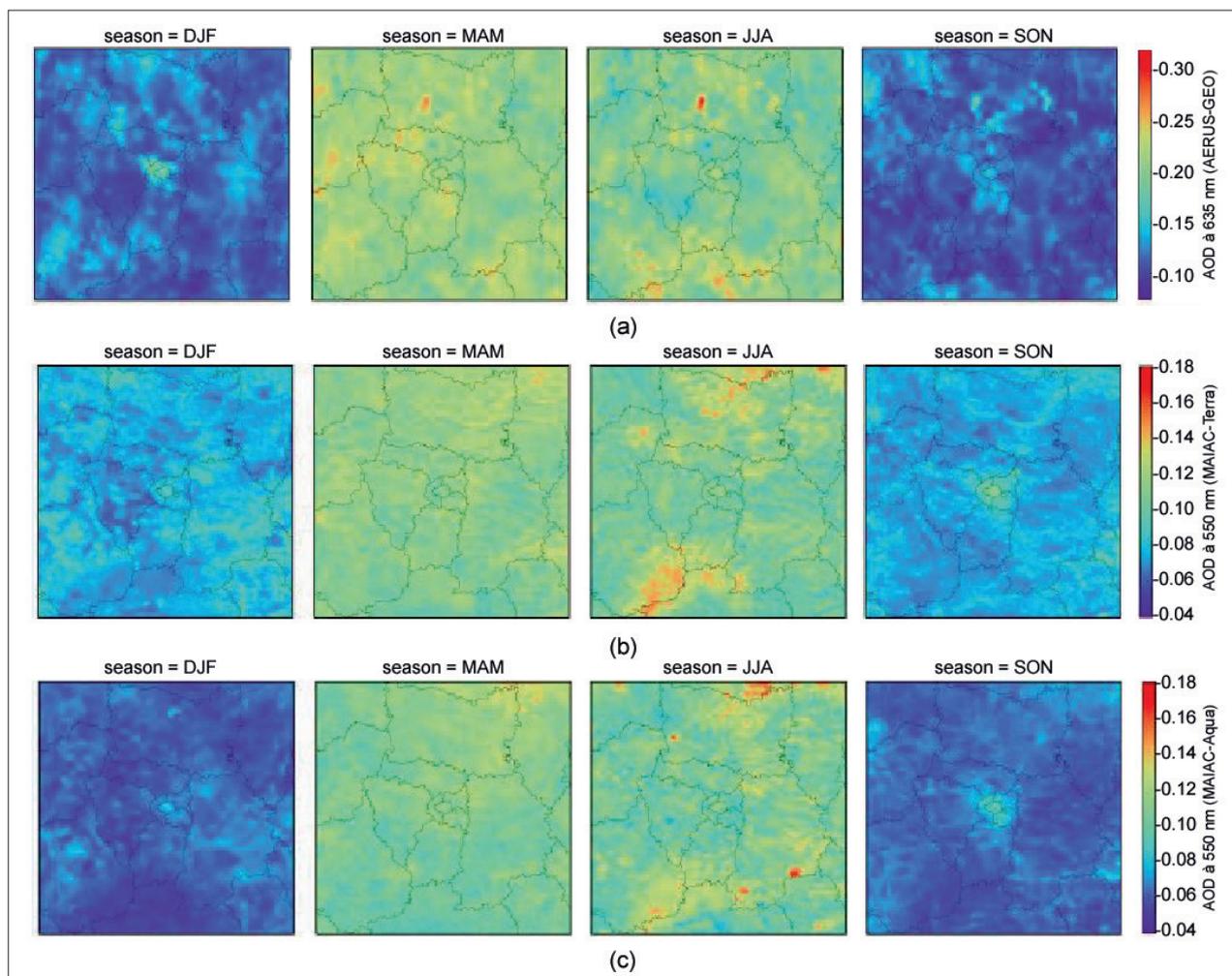


Figure 2: Moyennes saisonnières d'AOD sur le domaine de l'étude pour (a) AERUS-GEO, (b) MAIAC (Terra) et (c) MAIAC (Aqua)

À l'échelle saisonnière et mensuelle, les trois variables d'AOD, à 635 nm pour AERUS-GEO et 550 nm pour MAIAC (Terra et Aqua), sur la période 2006-2020, présentent un cycle assez marqué. Sur le domaine, un maximum est atteint au printemps et en été, et un minimum est atteint en automne et en hiver (Figure 2). Les valeurs, comprises entre 0,06 et 0,30 ponctuellement selon la longueur d'onde, sont typiques de valeurs de fond pour des atmosphères continentales en Europe. Par ailleurs, des disparités spatiales de l'AOD apparaissent. En été (juin et juillet), on constate des signaux particulièrement forts d'AOD au sud-ouest et au nord du domaine dans les trois produits, correspondant à de vastes régions de cultures céréalières dans la Beauce et en Picardie. Ces signaux ne correspondent vraisemblablement pas à la présence d'aérosols en grande quantité mais sont plutôt dus à un changement brutal de la réflectance de surface à cette période, résultant du fauchage des cultures, ce qui perturbe des algorithmes de restitution de l'AOD satellitaire. Entre août et novembre, un signal d'AOD relativement important est visible au-dessus de la zone urbaine de Paris, surtout pour MAIAC (Terra et Aqua). En hiver, une AOD plus forte au-dessus de Paris est visible pour AERUS-GEO, semble-t-il liée à un artefact de mesure. Enfin, au printemps, l'AOD est relativement uniforme sur le domaine. Ces cycles de variation détectés dans les AOD satellitaires sont globalement en accord avec les données AERONET.

### Différences ville-campagne

Pour étudier l'effet potentiel de la ville sur les aérosols, on moyenne spatialement les AOD satellitaires sur les pixels des masques urbain et rural (définis selon la base de données d'occupation du sol ECOCLIMAP-II/ Europe) pour calculer la différence d'épaisseur optique des aérosols :

$$\Delta(AOD) = AOD_{urb} - AOD_{rur}$$

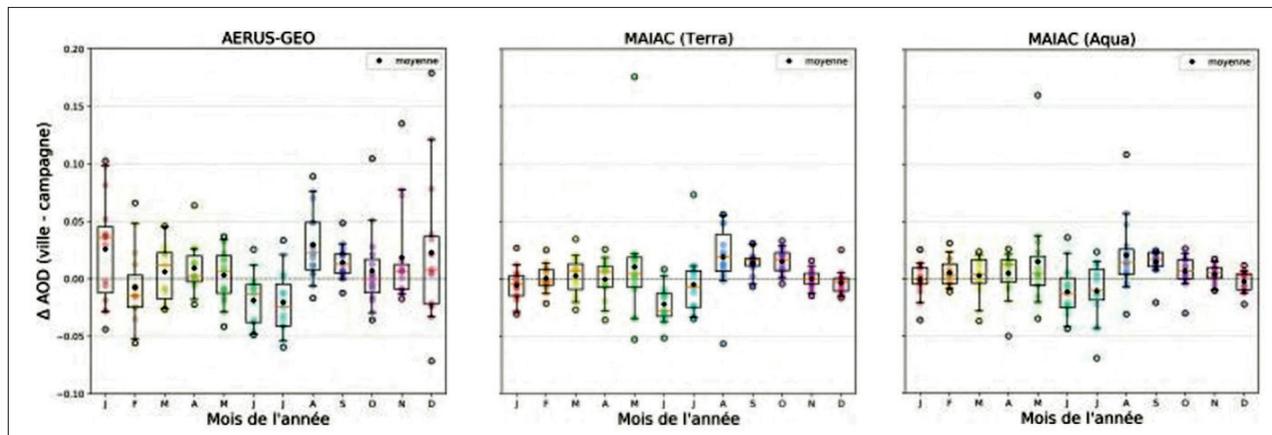


Figure 3: Distribution de la différence entre les moyennes mensuelles d'AOD des zones urbaine et rurale du domaine d'étude, pour AERUS-GEO, MAIAC (Terra) et MAIAC (Aqua), au cours de la période 2006-2020

À l'échelle mensuelle (Figure 3), on observe le même comportement du  $\Delta(AOD)$  dans les trois produits satellitaires, sauf pour AERUS-GEO en hiver pour lequel les données sont peu significatives. Le signal urbain d'AOD est faible au printemps et plus fort entre août et octobre. On note des  $\Delta(AOD)$  négatifs en juin et juillet, en raison de la forte AOD des régions agricoles à cette période.

À l'échelle hebdomadaire, l'AOD urbain est toujours, en moyenne, supérieur à celui de la campagne dans les trois produits satellitaires, avec une variabilité plus importante pour AERUS-GEO (non montré). Cependant, aucun jour ne semble se démarquer, les valeurs moyennes de cet écart étant à peu près constantes au cours de la semaine, de l'ordre de +0,01.

### Tendances d'évolution de l'AOD sur 2006-2020

Pour repérer une éventuelle tendance de l'AOD sur la période climatologique 2006-2020, une régression linéaire est appliquée sur les séries temporelles des moyennes mensuelles d'AOD sur les masques urbain et rural. On détermine aussi l'intervalle de confiance à 95 % de ces tendances. Les tendances détectées dans les produits satellitaires sont toutes négatives et statistiquement significatives (Table 1), ce qui est en accord avec l'ordre de grandeur des tendances obtenues avec les mesures AERONET. L'ordre de grandeur est comparable, bien que légèrement plus faible pour les produits satellitaires que pour AERONET (1,9 %. $an^{-1}$  contre 2,9 %. $an^{-1}$ ).

	ville	campagne
AERUS-GEO	-1.9 ± 1.1	-1.6 ± 1.1
MAIAC (Terra)	-1.8 ± 1.3	-2.3 ± 1.2
MAIAC (Aqua)	-1.9 ± 1.5	-1.9 ± 1.4

Table 1: Taux de variation relative de l'AOD (en %. $an^{-1}$ ) issu des produits satellitaires, sur la période climatologique 2006-2020, et intervalles de confiance à 95 %

Cette évolution, observée un peu partout en Europe, résulte en partie des politiques de réduction des polluants atmosphériques entreprises depuis le début des années 2000 face aux enjeux de qualité de l'air et ses conséquences sur la santé et l'environnement. Initiée par l'Europe, la réglementation française fixe des seuils limites de concentration en PM10 et PM2, et des objectifs de réduction des émissions anthropiques.