

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 μm et 2,5 μm (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 λ (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

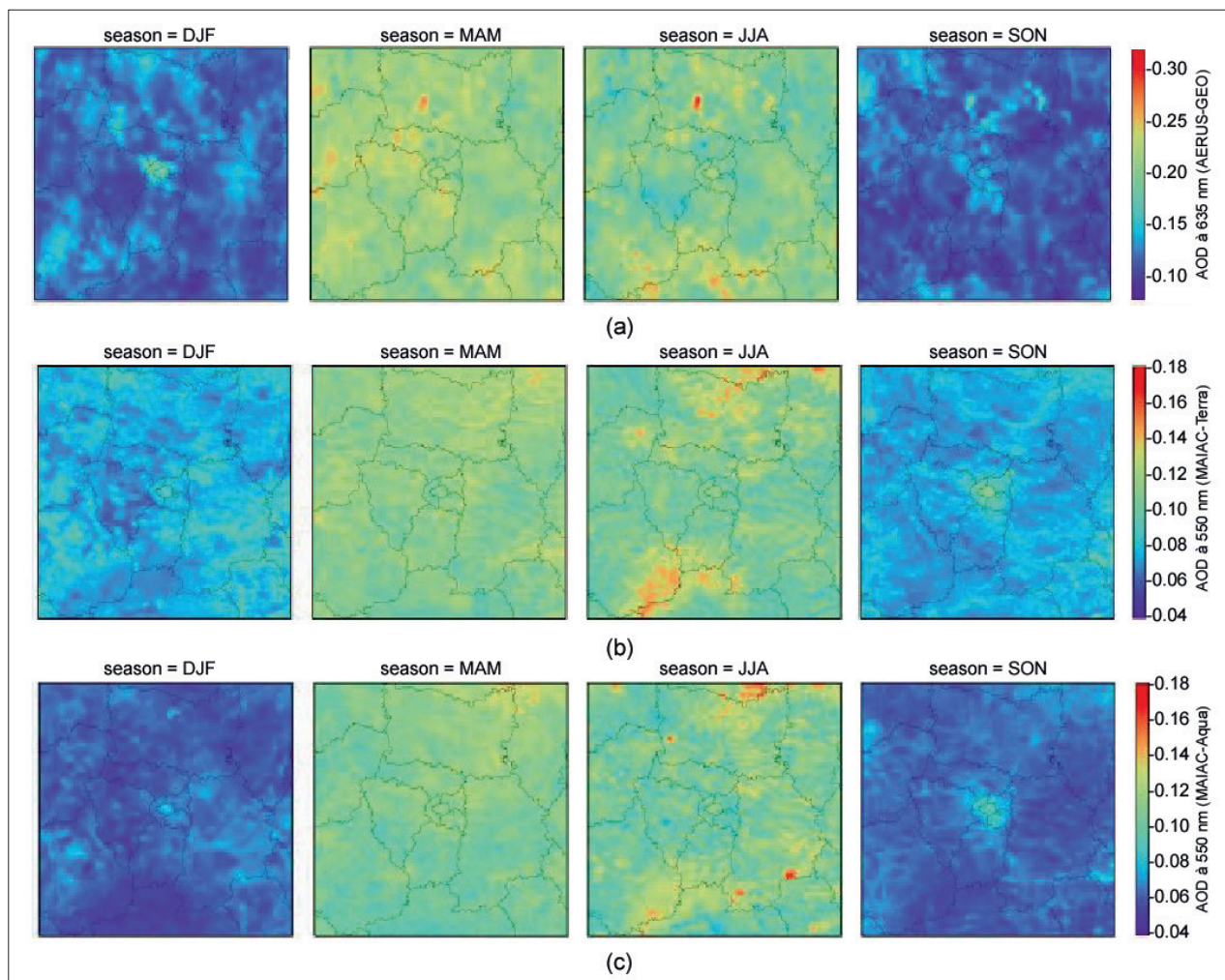


Figure 2: Moyennes saisonnières d'AOD sur le domaine de l'étude pour (a) AERUS-GEO, (b) MAIAC (Terra) et (c) MAIAC (Aqua)

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 :

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

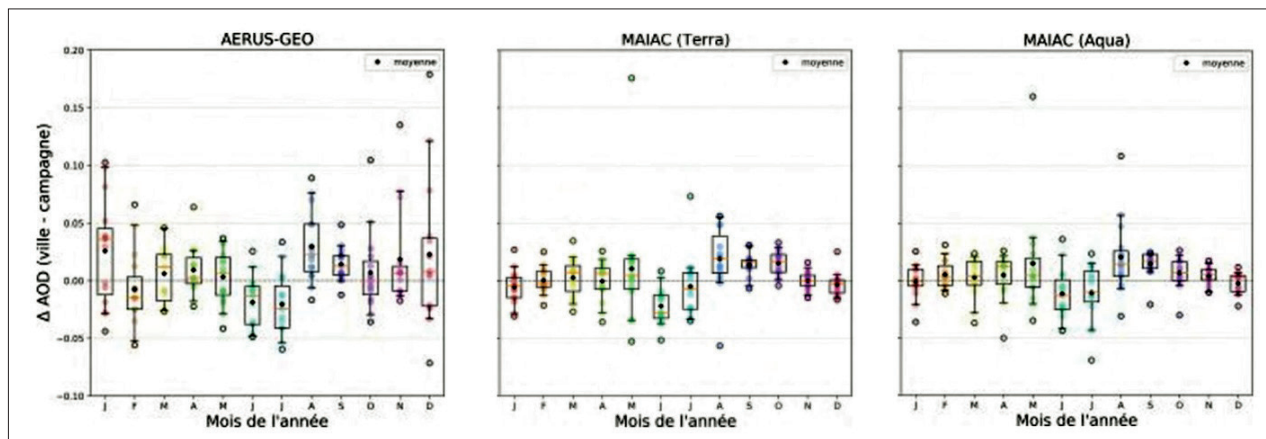


Figure 3: Distribution de la différence entre les moyennes mensuelles d'AOD des zones urbaine et rurale du domaine d'étude, pour AERUS-GEO, MAIAC (Terra) et MAIAC (Aqua), au cours de la période 2006-2020

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.

ANALYSE EN TYPES DE TEMPS SIGNIFICATIFS (TTS)

Influence des paramètres météorologiques

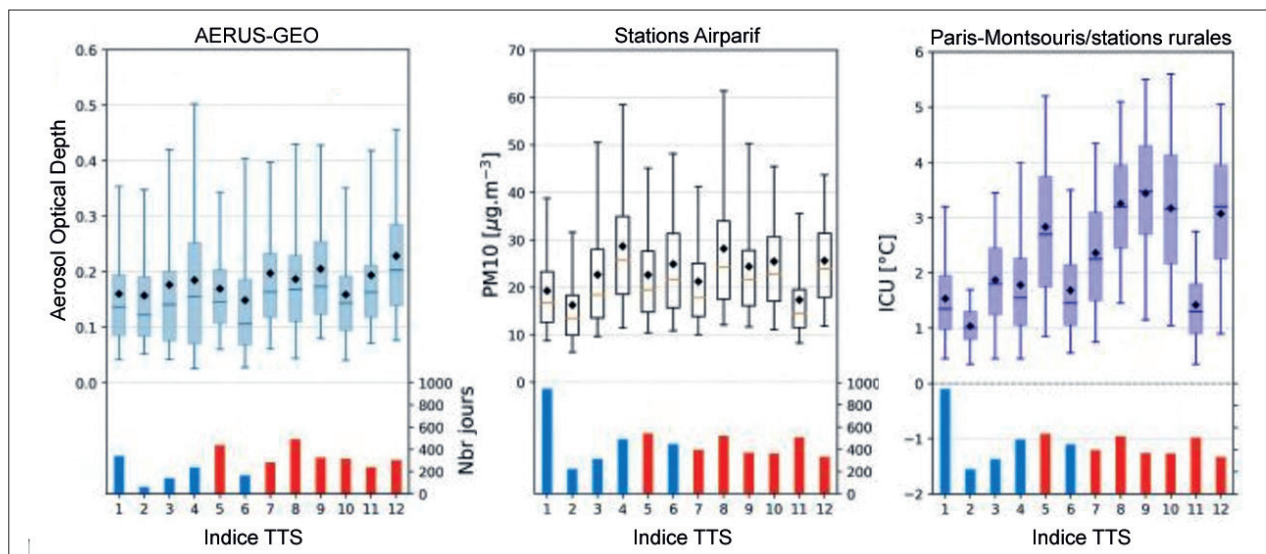


Figure 4: Distributions en fonction des 12 TTS sur la période 2006-2020, (de gauche à droite) de l'AOD satellitaire AERUS-GEO sur le masque urbain ; de la moyenne des concentrations en PM10 ; de l'ICU. Les barres bleues et rouges de l'histogramme indiquent le nombre de jours de données disponibles pour les TTS hivernaux et estivaux, respectivement

On observe que les types de temps sensibles favorables à un ICU marqué, à de fortes concentrations en PM10 et de fortes valeurs d'AOD ne sont pas tout à fait les mêmes. Il existe néanmoins un bon lien entre PM10 et AOD. Les caractéristiques de chacun des types de temps sensibles indiquent tout d'abord que tous les types de temps favorables aux valeurs élevées d'ICU, de PM10 et d'AOD correspondent à des journées sans précipitations. Cependant, les caractéristiques sont différentes pour les autres paramètres météorologiques.

- L'ICU est favorisé lors des journées comportant une grande amplitude thermique et un vent faible sans direction privilégiée, c.-à-d. des situations anticycloniques estivales.
- Les fortes concentrations en PM10 sont plutôt favorisées lors des journées avec un vent modéré de secteur nord-est.
- Les AOD élevées sont plus importantes lors des journées avec un vent modéré de secteur nord. Le vent, par sa force et sa direction, semble donc être le principal facteur à l'origine des différences de concentrations en aérosols.

Les contextes météorologiques étant assez différents en fonction des saisons été et hiver, les origines et les conséquences des pics de pollution ne sont pas les mêmes suivant la période de l'année, comme discuté ci-après.

Approche sur un événement de pollution hivernal

Le comportement des produits satellitaires est ici étudié sur les quatre premiers mois de 2012 comportant plusieurs pics de pollution aux particules fines assez intenses au niveau de l'agglomération parisienne (Figure 5).

L'analyse des types de temps sensibles (TTS) sur la période considérée montre que les pics de pollution sont principalement associés au TTS 4 jusqu'en février puis au TTS 8 de mars à avril. Il s'agit de deux types de temps sensibles favorables à de fortes concentrations en PM10 en surface et à des valeurs d'AOD plus importantes. Leurs caractéristiques communes sont l'absence de précipitations et le vent faible à modéré de secteur nord-est, ce qui est en accord avec les conditions météorologiques observées lors des différents pics de pollution. La prépondérance de ce régime de vent, combinée à l'absence de signal urbain dans les $\Delta(AOD)$ issus des produits satellitaires lors de cet épisode (non montré) suggère que la pollution observée résulte d'un transport de particules advectées par le vent depuis des régions situées au-delà du domaine.

Dans certaines situations, l'agglomération parisienne n'est donc que partiellement responsable de la pollution de fond et des pics de pollution aux particules fines enregistrés localement, le phénomène de transport régional pouvant jouer un rôle aggravant voire prépondérant. Ceci souligne l'importance de la coordination des stratégies de régulation de la qualité de l'air et de réduction des émissions entre régions et pays voisins.

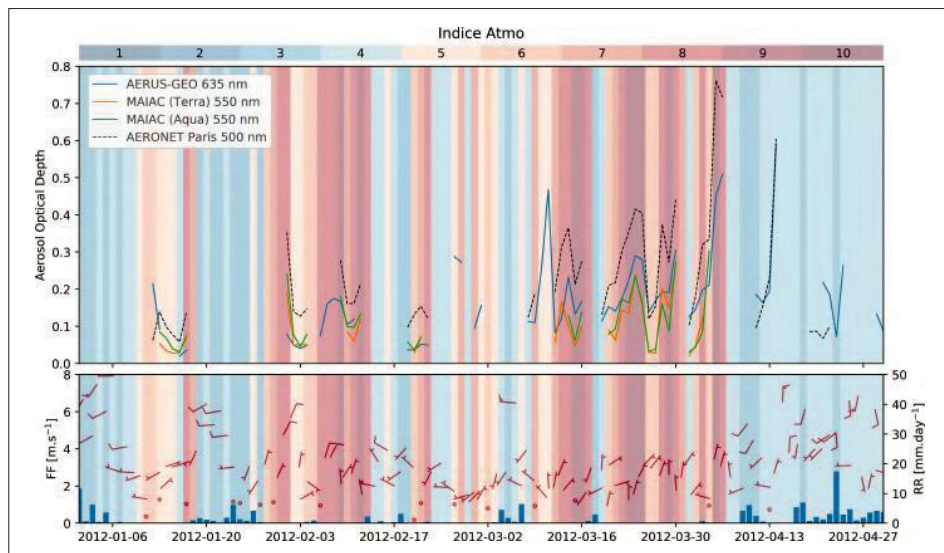


Figure 5: Séries temporelles des AOD observées par la station AERONET de Paris et en moyenne sur le masque urbain pour les produits satellitaires (AERUS-GEO et MAIAC) entre le 1er janvier et le 30 avril 2012. Les couleurs en filigrane correspondent aux indices Atmo quotidiens de l'agglomération parisienne fournis par Airparif pour la pollution aux particules fines PM10. La partie inférieure de la figure présente les conditions météorologiques quotidiennes de force (FF) et de direction du vent, sous forme de barbulles, et de précipitations (RR) représentées par les histogrammes

Lien avec l'îlot de chaleur urbain

On a vu qu'en hiver et en ville, l'enjeu central lié aux aérosols est la qualité de l'air. En été, celle-ci peut être sérieusement dégradée par le microclimat urbain, en particulier par l'ICU. Le but de cette section est donc de mettre en relation les mesures d'AOD et de concentrations en PM10 en surface avec l'ICU, lors de journées estivales favorables à ce phénomène.

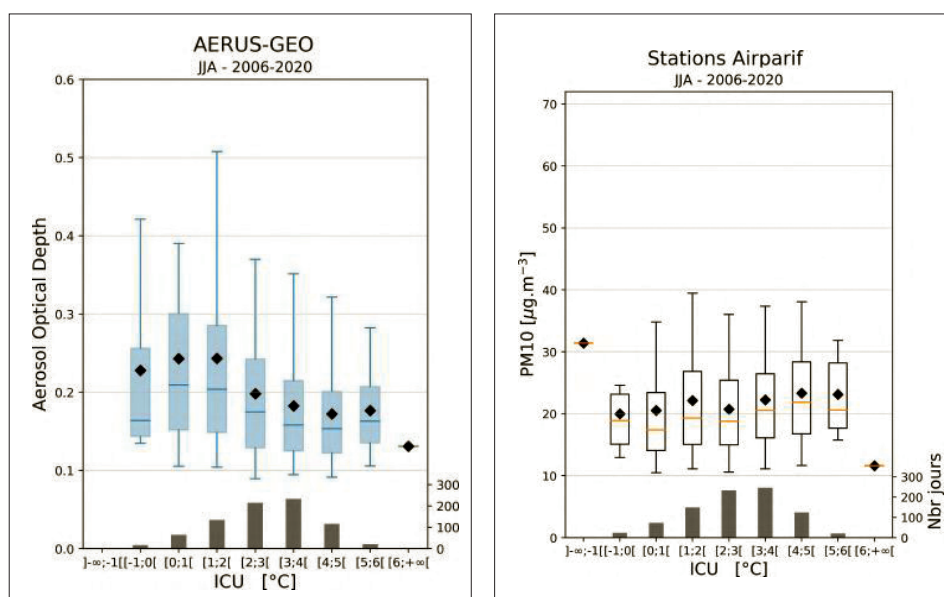


Figure 6: Distributions en fonction de l'ICU et pour les TTS favorables à l'établissement de fortes valeurs de l'ICU sur la saison été (JJA) et sur la période 2006-2020, de l'AOD satellitaire AERUS-GEO sur le masque urbain et la moyenne des concentrations en PM10. La partie inférieure de la figure indique par un histogramme le nombre de jours de données disponibles

Pour les TTS les plus favorables (Figure 6), les intensités les plus fréquentes d'ICU sont de l'ordre de + 2 °C à + 4 °C, avec quelques cas excédant + 6 °C. En moyenne pour les AOD satellitaires et AERONET, plus l'ICU est marqué, plus l'AOD observée est faible. À l'inverse, plus l'ICU est important, plus les concentrations en PM10 mesurées en surface sont élevées. Ce résultat est intéressant puisque l'on s'attendrait plutôt à ce que l'évolution des AOD soit similaire à celle des PM10. Ces signaux contraires pourraient être le signe que les produits d'AOD ne représentent pas une source de données suffisante, notamment lors de pics de chaleur estivaux en ville, pour détecter des événements de pollutions localisés, très proches de la surface, dans la couche limite. Les variations de hauteur de la couche limite, qui est en général plus haute en été et potentiellement plus développée en ville, notamment en conditions stables estivales favorables à l'ICU, pourraient être une explication à nos observations.

En premier lieu, les produits d'AOD resteraient donc plutôt adaptés à la détection et au suivi d'événements plus marqués à l'échelle régionale, qui impactent aussi la qualité de l'air en région parisienne en se mélangeant à la couche limite. Il existe toutefois un potentiel de ces produits satellitaires d'AOD pour le suivi de la qualité de l'air, notamment en période estivale.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude explore le potentiel des restitutions satellitaires d'AOD (épaisseurs optiques) à détecter et suivre les aérosols à différentes échelles de temps, sur l'agglomération parisienne.

Pour cela, une climatologie a été constituée à partir des observations issues de satellites (AERUS-GEO et MAIAC) et de stations au sol (AERONET), sur la période 2006-2020 et sur un domaine de 200 x 200 km centré sur Paris. L'analyse de cette climatologie a mis en lumière l'existence d'un cycle saisonnier marqué, avec des disparités spatiales au sein du domaine. Il est possible de suivre les variations d'AOD au-dessus de la ville, mais le signal urbain détecté est faible et ne ressort pas forcément de manière égale selon la période de l'année. En revanche, à l'échelle hebdomadaire, il semble y avoir une différence plus ou moins constante de + 0,01 unité d'AOD en faveur de la ville, en moyenne sur 15 ans. Sur la période d'étude, une diminution tendancielle de l'AOD de quelques pourcents par an est en outre observée, certainement une conséquence des politiques de réduction des émissions de particules aux échelles nationale et européenne. L'analyse des conditions météorologiques locales met en évidence le rôle prépondérant du vent sur les fortes valeurs d'AOD et de PM10. Ainsi en hiver, les régimes de nord-est favorisent le transport de particules depuis les régions voisines sur Paris. En été, la mise en relation de l'AOD et de la concentration en PM10 en surface avec l'ICU montrent des tendances opposées qui nécessitent des analyses complémentaires. En particulier, des profils verticaux d'aérosols à l'échelle événementielle permettraient d'obtenir une information sur la répartition verticale des aérosols, dans la couche limite. Le type d'aérosols est aussi une information intéressante qui peut être fournie par des mesures de télédétection mais aussi par analyse chimique d'échantillons prélevés in situ.

Concernant les produits satellitaires, l'étude montre l'existence d'écarts entre les différents produits d'AOD étudiés. Ces écarts sont dus aux différences de longueur d'onde d'observation en premier lieu, mais aussi à d'autres facteurs tels que les résolutions spatiales et temporelles, la calibration des instruments, le masque nuageux appliqué ou encore les hypothèses utilisées dans les méthodes de restitution. Cependant, les produits s'accordent qualitativement sur les variations d'AOD observées aux échelles climatologiques annuelles, saisonnières, mensuelles et même hebdomadaires. En ce qui concerne l'application de ces produits satellitaires d'AOD en tant qu'outil pour le suivi de la qualité de l'air localement en ville, il existe un certain potentiel à développer. Mais ce produit semble déjà assez bien adapté à la détection et au suivi des aérosols à l'échelle régionale, ce qui est intéressant puisque ceux-ci ont une contribution importante à la pollution enregistrée à Paris.

Remerciements. Merci à Marine, Aude et Xavier pour leur précieux encadrement pendant ce stage, pour leur disponibilité et leurs conseils qui ont beaucoup apporté à cette étude. Je remercie également l'équipe VILLE pour son accueil. 🌈

Références

- Carrer, D., X. Ceamanos, B. Six, and J.-L. Roujean, 2014: AERUS-GEO : A newly available satellite-derived aerosol optical depth product over Europe and Africa. *Geophysical Research Letters*, 41, 7731–7738, doi:10.1002/2014gl061707.
- Jougla, R., J. Hidalgo, and B. Poupponeau, 2019: Identification des situations météorologiques locales pour une cinquantaine de villes françaises. *La Météorologie* n°106, 59–68, doi:10.4267/2042/70370.
- Li, S. Sodoudi, J. Liu, and W. Tao, 2020: Temporal variation of urban aerosol pollution island and its relationship with urban heat island. *Atmospheric Research*, 241, 104 957, doi:10.1016/j.atmosres.2020.104957.
- Lyapustin, A., Y. Wang, S. Korkin, and D. Huang, 2018: Modis collection 6 maiac algorithm. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11, 5741–5765, doi:10.5194/amt-11-5741-2018.
- Russell, P. B., et al., 2014: A multiparameter aerosol classification method and its application to retrievals from spaceborne polarimetry. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119, 9838–9863, doi:10.1002/2013jd021411.