

Titre de la thèse	Modélisation haute résolution de la dynamique des aérosols en zone littorale méditerranéenne : application à la qualité de l'air en extérieur et en milieu confiné
Ecole Doctorale	ED548
Laboratoire(s)	MIO (UM 110)
Discipline(s)	Sciences de l'environnement
Directeur(s) de thèse Encadrant(s)	Jacques Piazzola et Pierre Sagaut
Partenaire cofinanceur	Laboratoire M2P2

Description du projet de recherche

(3 pages maximum - contexte scientifique, objectifs, calendrier prévisionnel, mots clés, références)

Résumé : Les particules d'aérosols atmosphériques, qu'elles soient issues de sources naturelles ou anthropiques, jouent un rôle majeur dans un grand nombre de processus physico-chimiques de la basse troposphère. En particulier, par le transport de polluants et des virus, l'aérosol contribue à la pollution de l'air et de l'eau avec des conséquences néfastes sur la santé humaine (Holgate et al. 1999). Les organismes de surveillance de la qualité de l'air chargés d'alerter les populations se trouvent confrontés à des difficultés liées aux variations spatio-temporelles. A l'échelle locale en particulier, l'estimation des sources d'aérosols et de leur devenir atmosphérique est primordiale pour la prévision de la qualité de l'air, mais reste encore un challenge scientifique important (e.g., Piazzola et al., 2016 ; Lewis et Schwartz, 2004). De plus, la crise sanitaire que l'on a vécue a montré la nécessité de mieux comprendre l'influence réelle des particules d'aérosols sur le transport atmosphérique des virus aussi bien en milieu confiné que dans l'air extérieur. Ceci requiert une modélisation pertinente de la dynamique de l'aérosol à échelle fine d'une rue, d'une plage ou d'un port et dans l'air l'intérieur (bureau, salle de cinéma...). Pour ce faire, nous souhaitons implémenter une modélisation à haute résolution de la dynamique atmosphérique des aérosols de type LES sur le littoral et en milieu confiné. Pour valider la

modélisation, nous proposons de développer une méthodologie expérimentale originale basée sur l'utilisation de capteurs portatifs sur des sites côtiers particulièrement vulnérables (plages, ports, routes littorales ...) correspondant à des zones spatialement limitées. Les mesures seront alors comparées aux prédictions des modèles à haute résolution de nouvelle génération.

1. Contexte et objectifs

L'atmosphère côtière méditerranéenne est caractérisée par la présence de nombreuses sources de particules atmosphériques et de gaz, d'origine anthropique ou naturelle dont l'impact sur la santé et l'écosystème littoral préoccupe grandement les autorités. Dans un contexte global de changement climatique et de la pression anthropique subie par les régions urbanisées côtières (Giorgi et Lionello, 2008), de larges incertitudes concernent l'évolution à moyen terme de la qualité de l'air en région SUD. C'est dans ce cadre que s'inscrit notamment le projet AER-NOSTRUM du dernier volet MARITIMO (Recagno et al., 2019) et financé par le programme INTERREG dédié au suivi et à la modélisation de la qualité de l'air dans les ports méditerranéens, et dans lequel le laboratoire MIO est impliqué. De plus, si plusieurs études récentes suggèrent le rôle important joué par l'aérosol dans les maladies respiratoires, via la dispersion et la transmission des virus infectieux en milieu confiné (Schwartz et Dockery, 1992), l'estimation précise de son impact reste un défi scientifique majeur. En particulier, l'influence des particules atmosphériques sur la virulence et la propagation des virus, y compris le SRAS-CoV-2 reste très mal connue. Il devient nécessaire de mieux comprendre l'influence réelle des particules d'aérosols sur la dynamique atmosphérique des virus aussi bien en milieu confiné que dans l'air extérieur. Dans ce contexte, la zone côtière présente un intérêt majeur du fait de la présence d'une multitude de sources, anthropiques et naturelles, entraînant une grande variation des propriétés physico-chimiques de l'aérosol. De plus, pour une région dont le tourisme est une ressource économique majeure et qui regroupe un certain nombre de sites marins préservés sous la gestion de Parcs Nationaux, ce sujet s'inscrit donc aussi dans le cadre de l'élaboration d'une stratégie d'adaptation au changement climatique pour les espaces naturels en termes d'impact de contaminants sur des zones protégées sur de faible emprise spatiale.

En région côtière, des aérosols produits par des processus naturels, comme l'aérosol marin issu du déferlement des vagues, permettent aussi le transport atmosphérique d'une grande variété de matière organique et de contaminants (Ringuet et al., 2012). Une meilleure compréhension de la dynamique atmosphérique des particules et de leurs transformations possibles dans l'atmosphère est nécessaire pour mieux anticiper l'évolution de la qualité de l'air (Piazzola et al., 2015). L'utilisation des calculs de modèles numériques dits de « chimie et de transport » plus connus

sous leur nom anglais, Chemistry Transport Model (CTM) peut s'avérer une aide précieuse dans l'évaluation de la dynamique atmosphérique des aérosols et du suivi des contaminants atmosphériques (e.g., Skamarock et al., 2005). De plus, ces outils numériques dans lesquels est généralement implanté un inventaire des émissions, devraient être d'une grande utilité dans le cadre de la mise en place de plans d'actions pour la réduction des émissions, notamment les émissions soufrées dans les ports méditerranéens qui constituent le point central du projet AER-NOSTRUM. Cependant, la résolution ce type de modélisation reste encore insuffisante pour étudier des zones spatialement réduites comme une plage, une rue ou un port. C'est pourquoi, nous proposons de coupler un modèle CTM utilisé au MIO, le modèle Méso-NH (Aumond et al., 2013) à une modélisation à haute résolution nouvelle génération de type LES (Large Eddy Simulation) actuellement développée par le laboratoire M2P2 de l'AMU (Sagaut et al., 2005), le code ProLB. Cet outil original est basé sur les méthodes de Boltzmann sur Réseau, qui permettent une réduction drastique du temps nécessaire au traitement des configurations réalistes à échelle 1 par rapport aux outils traditionnels. Des résultats antérieurs ont déjà conduit à la production d'une version de ProLB dédiée à la micro-météorologie et à la physique urbaine (voir paragraphe 2). Le modèle actuel prend en compte les phénomènes de stratification (stable/neutre/instable), les termes de Coriolis, de vent géostrophique, le forçage à méso-échelle et les effets radiatifs, ainsi qu'un modèle d'air humide (avec le suivi des fractions de vapeur d'eau et d'eau liquide et les mécanismes de changement de phase associés). L'objectif est de fournir des simulations numériques pouvant permettre à terme de prévoir la dispersion de contaminants sur une zone de surface de quelques dizaines de mètres carrés, notamment pour des applications opérationnelles. De plus, l'amélioration des prévisions de ces modèles pour les zones côtières urbanisées nécessite la possibilité de comparer les simulations avec des données expérimentales pertinentes. Pour ce faire, il sera nécessaire de conduire une série de campagnes expérimentales dédiées à l'analyse physico-chimique des particules transitant en zone côtière, combinant différentes techniques d'analyse et méthodologies expérimentales innovantes et sur différents sites côtiers. Ce projet devra permettre de mettre en place des mesures sur des sites côtiers particulièrement vulnérables (plages, ports, routes littorales ...) correspondant à des zones spatialement limitées en utilisant des capteurs portatifs d'aérosols pour un échantillonnage fin de la zone investiguée. Dans le cadre de ce projet, nous proposons de mettre en place une collaboration des laboratoires MIO, IM2NP et M2P2 permettant la mise en commun de moyens de mesures, d'analyse et de modèles numériques pour investiguer différents lieux de la zone méditerranéenne nord-occidentale et divers espaces sur un même lieu, en l'occurrence une plage, une rue et le port de Toulon. Grâce à l'IM2NP, on pourra proposer la mise en place de capteurs de suivi de la pollution chimique gazeuse de l'air en zone urbaine et en zone de référence. Ces dispositifs constitueront un réseau de capteurs autour du littoral varois. De plus, il semble pertinent que ce réseau soit constitué de

stations en zone urbaine et quelques-unes plus éloignées des zones anthropisées. C'est pourquoi, pour la contribution de l'université de Toulon, une partie des mesures seront conduites à la station du MIO sur l'île de Porquerolles qui permettra de mieux appréhender la dynamique atmosphérique des polluants vis-à-vis d'une zone urbaine. Deux séries de campagne expérimentale seront conduites : une première série dans un lieu ciblé, tel que décrit plus haut pour échantillonner dans la source des panaches et une autre dans le même temps à la station du MIO sur l'île de Porquerolles qui permettra de mieux appréhender la dynamique atmosphérique des polluants à partir d'une zone urbaine.

2. Démarche scientifique

La mise en place d'un réseau de capteurs portables pouvant équiper des piétons constitue à la fois une alternative et un complément à la modélisation numérique à haute résolution qui devra permettre de décrire finement la charge et la dynamique en particulaires sur des petits espaces. Les mesures devront être alors comparées aux prédictions des modèles à haute résolution de nouvelle génération de type LES. Ce travail doit permettre de fournir au final une meilleure description du devenir des aérosols dans la couche limite atmosphérique en région littorale en développant plus spécifiquement trois axes de travail :

1- Modélisation de la dynamique atmosphérique des particules à haute résolution pour la zone littorale par modélisation LES

Le premier axe de travail consistera à développer une approche multi-échelle, le modèle régional résout généralement les équations de Navier-Stokes, permettant une résolution spatiale jusqu'à 1 km et une résolution temporelle généralement d'une heure. L'optimisation des performances du modèle de transport des aérosols à l'échelle littorale nécessite dans un premier temps une étude approfondie des conditions aux surfaces frontières et d'initialisation. Une comparaison des modèles WRF-Chem et MESO-NH sera menée dans un premier temps pour modéliser la dispersion atmosphérique des contaminants. Cependant, ces modèles CTM ne peuvent pas travailler à des résolutions inférieures à 500 mètres pour des raisons de stabilité numérique. La description de l'environnement à grande échelle ainsi obtenue servira donc à initialiser les calculs de modèles atmosphériques à haute résolution tels que les modèles LES (Large Eddy Simulation) capables de fournir une description de la dynamique petite échelle de l'atmosphère. Une stratégie de modèles imbriqués fournira des simulations haute résolution sur des sites présélectionnés dans l'objectif de valider par des mesures la modélisation proposée. Durant cette phase du projet, le modèle LES devra être enrichi pour prendre en compte la physique spécifique des aérosols. La modélisation actuellement développée au laboratoire M2P2 est basée sur la méthode de Lattice-

Boltzmann et sera couplée au modèle MESO-NH et a permis le développement d'un modèle opérationnel, le code ProLB dédié à la micro-météorologie et à la physique urbaine qui a montré des résultats encourageants pour des applications à la qualité de l'air interne et externe. Cet outil permet l'utilisation d'une résolution très réduite spatialement ($O(10\text{ cm})$) et temporellement $O(0,01\text{ s})$ sur des zones de l'ordre de 1 km^2 au sein de domaines plus vastes ($O(10\text{ km}^2)$) en usant de techniques de raffinement local. L'objectif est de fournir des simulations de la dynamique du virus pour une zone de quelques dizaines de mètres carrés. Le modèle est déjà à même de gérer des contaminants passifs avec une modélisation eulérienne, et il sera complété pour prendre en compte des mécanismes physiques nécessaires au projet, à savoir les spectres en taille de l'aérosol atmosphérique, les termes associés aux mécanismes microphysiques (nucléation, condensation, coagulation, hygroscopie) et les sources d'émission (exemple : arrachement des aérosols marins à l'interface eau/air) et de dépôt. Un développement statistique des relations entre les conditions météorologiques et la charge de l'atmosphère sera mis en place.

2- Validation expérimentale

La validation sera menée à partir d'une série de campagnes expérimentales menées par le MIO sur plusieurs sites toulonnais (plages, rues...) et correspondant à des zones spatialement limitées et dédiées à une analyse physico-chimique des particules. Dans un premier temps, on s'appuiera donc sur une campagne expérimentale de validation menée sur différents sites du littoral varois à partir d'une méthodologie innovante basée sur l'utilisation d'un ensemble des capteurs portatifs de concentrations d'aérosols. Les sites choisis pourront être le port de Toulon en période de trafic portuaire intense et une rue adjacente, ainsi que sur la plage du Mourillon à Toulon. Il est prévu d'équiper des piétons de capteurs portatifs qui permettront d'une part la mise en place d'un maillage fin des sites investigués et de mettre à contribution la population. Dans le même temps, une campagne de mesures long terme sera conduite sur l'île de Porquerolles à la station du laboratoire située au Grand-Langoustier pour étudier la dispersion des polluants vers un territoire extérieur à la zone source anthropisée. On mesurera les distributions granulométriques de l'aérosol à partir d'un compteur BAM 1020, utilisé par la surveillance de la qualité de l'air, mais aussi de deux sondes PMS, la CSASP-100 HV et le modèle ASASP-X pour la gamme de taille $0.1-45\text{ }\mu\text{m}$, assez large pour évaluer les transformations atmosphériques sur ces échelles de distances littorales et référent pour ma mesure en zone maritime. L'inter-comparaison entre les divers instruments utilisés permettra en outre, de vérifier et ajuster la précision de ces capteurs portatifs qui représentent une nouvelle technologie. La validation des prédictions des modèles se fera essentiellement à partir des données acquises sur les Périodes d'Observations Intensives (POI) prévues dans le projet AER NOSTRUM. Une fois le modèle paramétré et validé sur une zone géographique donnée, par exemple le port de Toulon qui bénéficiera de l'apport de données

acquises lors d'une campagne expérimentale prévue dans le cadre du projet MARITIMO, une réflexion sera menée sur l'extension des travaux vers la modélisation en temps réel par la définition d'un modèle réduit basé sur les résultats LES pour la zone portuaire d'étude (stade, centre, bâtiments en périphérie du ports) avec les panaches des navires (de croisière et ferries). Le modèle réduit visé devrait rendre possible la fourniture des animations de polluants pendant les escales des navires, avec une analyse fine de l'impact sur les bâtiments contigus au port de Toulon Centre. Si possible, il sera proposé une analyse systématique des panaches provenant des navires comprenant les flux autour des bâtiments et l'enveloppe 3D du panache. Les nouvelles connaissances sur la dynamique atmosphérique de l'aérosol marin acquises au cours de ce travail de thèse devront en outre, permettre de mettre en place de nouveaux outils opérationnels pour mesurer et prédire la qualité de l'air sur des zones de petite échelle spatiale.

Collaborations et projets en soutien :

Le projet pourra bénéficier du projet AER-NOSTRUM financé sur le dernier volet du programme, INTERREG MARITMO et des travaux de modélisation prévus dans le cadre du projet ANR "MATRAC" porté par le MIO et pour lequel le CNRM est impliqué pour les comparaisons WRF-Chem/ Mésos-NH, en collaboration notamment avec Christine Lac (IR), spécialiste de la modélisation météorologique et M. Mallet (CR1) spécialiste de l'aérosol. Il est possible aussi que les directeurs de thèse sollicitent un soutien au programme national LEFE (Les Enveloppes Fluides et l'Environnement - CNRS Insu) dont le prochain appel d'offres est programmé pour septembre 2020.

Références

Aumond, P., V. Masson, C. Lac, B. Gauvreau, S. Dupont and M. Berengier (2013). Including the drag effects of canopies : real case large-eddy simulation studies, *Boundary-Layer Meteorol.* 146, 65-80.

Dockery, D.W., Pope, C.A. (1994) Acute respiratory effects of particulate air pollution. *Annu. Rev. Public Health*, 15: 107–132.

Giorgi, F. and P. Lionello, (2008) Climate change projections for the Mediterranean region, *Global Planet. Change*, 63, 90–104, doi:10.1016/j.gloplacha.2007.09.005.

Holgate, S (1999) "Air Pollution and Health," Eds: Robert Maynard, Stephen Holgate, Hillel Koren and Jonathan Same, ISBN: 978012352335, Academic Press Published on the 21st April 1999.

Lewis, E.R. and S.E. Schwartz (2004) Sea Salt Aerosol Production: Mechanisms, Methods, Measurements and Models-A Critical Review, Geophysical Monogr. Ser. 152, AGU Washington DC, pp.413.

Piazzola, J. Mihalopoulos, N. Canepa, E. Tedeschi, G. Prati, P. Zarmas, P. Bastianini, M. Missamou T. et L. Cavaleri (2016) Characterization of aerosols above the Northern Adriatic Sea: case studies of offshore and onshore wind conditions, Atmospheric Environment n° 132. pp. 153–162, doi:10.1016/j.atmosenv.2016.02.044.

Piazzola, J. Tedeschi, G et Demoisson A (2015) A model for the transport of sea-spray aerosols in the coastal zone, Boundary-Layer Meteorology, vol. 155, n° 2, 350-369, doi10.1007/s10546-014-9994-3.

Recagno, S et al. (2019) AER NOSTRUM « Projets visant à la création d'un Observatoire transfrontalier pour la surveillance de la qualité de l'air dans les ports".

Ringuet, J., Leoz-Garziandia, E., Budzinski, H., Villenave, E., and Albinet, A., 2012. "Particle Size Distribution of Nitrated and Oxygenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (NPAHs and OPAHs) on Traffic and Suburban Sites of a European Megacity: Paris (France)." Atmospheric Chemistry and Physics 12 (18): 8877–8887.

Sagaut, P (2005) Large-eddy simulation for incompressible flows, third edition, Springer

Schwartz, J., Dockery, D.W (1992) Particulate Air Pollution and Daily Mortality in Steubenville, Ohio. Am. J., Epidemio, 135, 12–19.

Skamarock, W. C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O., Barker D. M., Wang W., Powers J. G (2005) A description of the Advanced Research WRF Version 2, NCAR Tech Notes- 468+STR.