

# Rapport d'activité

Etude de la qualité de l'air dans un contexte d'évolution des émissions (naturelles et anthropiques) et de changement climatique.

**Projet :** A0070107232

**Responsable :** Guillaume Siour

*Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques (LISA).*

## Rappels liés à la demande initiale

Heures demandées TGCC Irene Skylake : 2.482.000

Heures accordées TGCC Irene Skylake : 1.500.000

Heures accordées TGCC Irene Rome : 1.000.000

## Heures complémentaires

Heures demandées TGCC Irene Rome : 815 000 heures

Heures accordées TGCC Irene Rome : 815 000 heures

## Consommation

TGCC Irene skylake : 1,108,495 heures le 27/08/2020

TGCC Irene Rome : 905,762 heures le 27/08/2020

Le projet déposé en 2019 et suivit d'une demande complémentaire portait sur 6 sous projets :

- Etude de la pollution aux échelles continentales par synergie modélisation/observations satellitaires
- Scénarios urbains d'aménagement et de politiques énergétiques (ANR VITE !)
- Interaction entre émissions biogéniques et anthropiques
- Modélisation des émissions d'aérosols terrigènes pour les régions semi-arides
- Etude des indicateurs d'impact sur la santé
- Etude de l'impact du chlore atomique sur la pollution en Europe

## 1) Etude de la pollution aux échelles continentales par synergie modélisation/observations satellitaires

L'observation de la composition atmosphérique par des instruments satellitaires s'est fortement développée depuis le début des années 2000. Le suivi d'évènements de pollution depuis l'espace est aujourd'hui possible (e.g. Dufour et *al.*, 2015 ; Cuesta et *al.*, 2018 ; Fortems-Cheiney et *al.*, 2016). De plus, les séries de données aujourd'hui disponibles sont suffisamment longues pour envisager des premières études de tendances (e.g. Dufour et *al.*, 2018). Nous développons au laboratoire un nouvel axe de recherche depuis quelques années qui visent à mettre en synergie l'observation satellitaire des polluants ou de leurs précurseurs et la modélisation atmosphérique, dans laquelle le LISA est très actif avec le co-développement de CHIMERE (Menut et *al.*, 2013 ; Mailler et *al.*, 2017), afin de mieux appréhender les problèmes de qualité de l'air aux échelles continentales. Ces activités sont développées au sein de plusieurs projets : ANR PoEASIA pour l'étude de la pollution asiatique, ADEME/PRIMEQUAL

AMP'AIR pour l'étude du rôle des émissions agricoles d'ammoniac dans les pics de pollution particulaire en France et en Europe, le projet ANR ARGONAUT pour l'étude des émissions de polluants et CO<sub>2</sub> à haute résolution spatiale en France, les projets CNES/TOSCA IASI, IASI-NG et SURVEYOZON pour le développement d'algorithmes d'analyse des données satellitaires et leur assimilation dans les modèles. Nous présentons ci-dessous le bilan de l'année pour les quatre grandes activités pour lesquelles nous avons utilisé les ressources du TGCC.

### 1.1. Modélisation inverse des émissions des précurseurs de polluants photo-oxydants et particulaires

Les incertitudes sur les émissions de polluants font partie des sources principales d'erreur des modèles de chimie transport et limitent les capacités des modèles à reproduire les pics de pollution. Avec les données satellitaires, disponibles depuis une bonne dizaine d'années maintenant et de bonnes qualités, l'utilisation des méthodes d'assimilation ou de modélisation inverse, contraintes par les observations satellitaires, ouvre une nouvelle ère pour la prescription d'inventaires d'émissions « dynamiques » en entrée des modèles, du fait de leur couverture spatio-temporelle sans précédent. Cette activité de recherche prometteuse est développée depuis plusieurs années au LISA. En particulier, nous développons conjointement avec le LSCE, l'outil d'assimilation variationnelle PYVAR-CHIMERE pour les gaz réactifs (Fortems-Cheiney et *al.*, GMD, 2019, en révision). Cependant, il semble que le système ait du mal à gérer la non-linéarité de la chimie (test d'inversion sur les NO<sub>x</sub> uniquement). Utilisant les données satellitaires de NO<sub>2</sub> pour contraindre les émissions de NO<sub>2</sub> seules, le système ne montre pas de problème de convergence (Fortems-Cheiney et *al.*, GMD, 2019, en révision). En revanche, quand il s'agit d'inverser les émissions de NO<sub>x</sub> (NO<sub>2</sub>+NO) – ce qui nous intéresse car la plupart des émissions (~90 %) sont sous forme de NO rapidement transformé en NO<sub>2</sub> dans l'atmosphère – le système rencontre de nombreux problèmes de convergence. Pour pallier ce problème, nous avons décidé conjointement avec le LSCE de migrer vers un nouvel outil de modélisation inverse, toujours basé sur le modèle de chimie-transport CHIMERE, mais beaucoup plus flexible, l'outil CIF (Community Inversion Framework – développé au LSCE dans le cadre du projet européen VERIFY). L'outil a été porté sur les machines du TGCC au cours des 6 derniers mois mais avec quelques ralentissements compte tenu de la crise sanitaire. Aujourd'hui le système est techniquement opérationnel au TGCC mais des tests sont encore nécessaires pour nos cas d'application et vérifier que l'on arrive à mieux gérer la convergence des inversions avec ce nouveau système. Les activités de recherche attachées à ce nouvel outil alimentent plusieurs projets de recherche (ANR PoEASIA, ANR ARGONAUT).

- **Projet ANR PoEASIA**

Les activités de modélisation inverse constituaient un point majeur du projet ANR PoEASIA, dédié à l'étude de la pollution en Asie et plus particulièrement en Chine. Ce projet visait une meilleure quantification de la distribution des polluants en Chine (ozone et aérosols), de leurs sources, de leurs variabilités et de leur évolution récente et future. En effet, le développement économique et l'urbanisation rapides des dernières décennies en Chine ont conduit à une forte hausse des émissions de polluants et ainsi à des concentrations dépassant largement les seuils de pollution recommandés par l'Organisation Mondiale de la Santé pour les polluants majeurs (O<sub>3</sub>, PM<sub>2.5</sub> et PM<sub>10</sub>). Mieux connaître, comprendre et surveiller la qualité de l'air en Chine est donc indispensable pour mieux évaluer les impacts de cette pollution à l'échelle

régionale mais aussi globale, améliorer les capacités de prévision et affiner les stratégies de régulation des émissions. Dans le cadre de ce projet, le LISA était engagé à fournir des inventaires d'émissions optimisés de  $\text{NO}_x$  sur la décennie récente (2007-2017) afin d'étudier les tendances et variabilités de ces émissions et les conséquences en terme de qualité de l'air. Une autre tâche du projet était d'évaluer la faisabilité de séparer les contributions anthropique et biogénique des émissions de COVs par modélisation inverse. Les observations utilisées ou prévues d'être utilisées pour contraindre l'inversion des émissions sont les colonnes troposphériques de  $\text{NO}_2$  pour les émissions de  $\text{NO}_x$  et de HCHO pour les COVs restituées à partir de l'instrument satellitaire OMI. Compte tenu des difficultés rencontrés avec l'outil de modélisation inverse, ces activités n'ont pas pu avancer autant que nous le souhaitions. Le projet prenant fin en mars 2021, nous avons décidé de recentrer les activités de modélisation inverse sur la seule inversion des émissions de  $\text{NO}_x$ . D'ici à la fin du projet DARI en cours (fin octobre), nous espérons pouvoir appliquer le nouvel outil CIF maintenant techniquement opérationnel pour une année de référence (2015) et évaluer les capacités du système pour l'inversion des  $\text{NO}_x$ . En fonction des résultats et du temps de calcul requis, nous évaluerons s'il est opportun de poursuivre l'exercice pour fournir les émissions de  $\text{NO}_x$  pour la période 2007-2017 comme initialement prévu. Pour les activités concernant les capacités à inverser les émissions de COVs, elles seront réalisées dans le cadre du projet ANR ARGONAUT qui a débuté en janvier 2020.

- **Projet ANR ARGONAUT**

Le projet ANR ARGONAUT (pollutAnts and gReenhouse Gases emissiOns moNitoring from spAce at high resoluTion) est un projet collaboratif qui regroupe le LISA (porteur), le LSCE, le CEREAs et l'INERIS. L'objectif principal d'ARGONAUT est de fournir des estimations des émissions anthropiques françaises à haute résolution pour les principaux polluants (oxydes d'azote -  $\text{NO}_x$ , monoxyde de carbone - CO et composés organiques volatils non méthaniques - NMVOCs) et le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) en s'appuyant sur l'inversion atmosphérique et la nouvelle génération de satellites d'observation de la composition atmosphérique (Sentinel-5P/TROPOMI, CO2M). L'imagerie haute résolution multi-espèces et la co-assimilation d'espèces seront exploitées pour mieux estimer les émissions de ces espèces. L'observation simultanée des polluants comme le  $\text{NO}_2$  et le CO, mesurés depuis longtemps depuis l'espace avec une bonne précision, apportera une contrainte supplémentaire pour l'inversion des émissions de certaines espèces co-émises comme le  $\text{CO}_2$  ou les NMVOCs, plus difficiles à mesurer à une précision utile. Progresser sur la question de la co-assimilation des polluants et du  $\text{CO}_2$  devrait aider à améliorer les inventaires d'émissions aussi bien pour les polluants que pour le  $\text{CO}_2$  et accroître la cohérence des réponses aux problèmes de la qualité de l'air et du changement climatique aux échelles nationales et sub-nationales. Avec la disponibilité récente d'images de l'instrument satellitaire TROPOMI, co-localisées de  $\text{NO}_2$ , de CO et de formaldéhyde (HCHO), et à l'avenir de  $\text{CO}_2$  et de  $\text{NO}_2$  provenant de CO2M, l'implémentation de telles approches inverses devient possible. Le projet ARGONAUT vise à développer un système d'inversion atmosphérique adapté à l'exploitation de cette imagerie à haute résolution et basé sur le système CIF. Les 6 premiers mois d'activité du projet ont permis de définir la configuration (domaine, résolution horizontale et verticale) et de récupérer et mettre au format adéquat les données d'entrées nécessaires au système

(inventaire d'émissions, données météorologiques, données satellitaires). D'ici à fin octobre, les simulations de référence sur le domaine européen et le domaine France du projet seront conduites et nous espérons que des premiers tests d'inversion des émissions pourront débuter notamment pour analyser les fortes réductions d'émissions durant la période de confinement du printemps 2020.

- **Projet ADEME/PRIMEQUAL AMP'AIR**

Un autre projet dans lequel nous sommes engagés avec des activités de modélisation inverse est le projet ADEME/PRIMEQUAL AMP'AIR. L'objectif du projet est d'améliorer la représentation spatiale et temporelle des émissions agricoles d'ammoniac afin d'améliorer les capacités de simulation et de prédiction des pics de pollution particulaire en France et plus largement en Europe. Plusieurs approches, dont la modélisation inverse, sont développées dans le cadre du projet pour améliorer cette représentation des émissions d'ammoniac. Notre participation à ce projet repose sur l'application de méthodes inverses, plus ou moins complexes, pour contraindre les émissions à partir des observations de la colonne troposphérique d'ammoniac par l'instrument satellitaire IASI. Pour réaliser les inversions, nous avons développé une méthode simplifiée dite de « mass balance ». En faisant l'hypothèse que la différence des colonnes simulées par le modèle CHIMERE et observées par IASI est entièrement due aux émissions du jour dans la maille du modèle considérée, il est possible de corriger ces émissions. Ainsi nous avons inversé les émissions journalières d'ammoniac en France pour l'année culturale 2010-2011 (juin à juin) une résolution spatiale de  $0.5 \times 0.25^\circ$  en longitude et latitude. L'inventaire corrigé obtenu a été comparé à deux autres : l'inventaire mécanistique CADASTRE-NH<sub>3</sub> développé par l'INRA et l'inventaire de référence TNO. Les premières comparaisons des inventaires TNO, NH<sub>3</sub>-SAT et CADASTRE-NH<sub>3</sub> montrent des résultats cohérents en termes de bilan annuel sur la France (différences < 20%). A l'échelle des régions, de fortes disparités apparaissent (Figure 1), l'inventaire TNO sous-estimant fortement les émissions de NH<sub>3</sub> dans le nord/nord-est de la France, les inventaires CADASTRE-NH<sub>3</sub> et NH<sub>3</sub>-SAT montrant un meilleur accord. Nous avons également montré que les inventaires CADASTRE-NH<sub>3</sub> et NH<sub>3</sub>-SAT apportaient une information mieux résolue temporellement que l'inventaire de référence TNO utilisé dans les modèles de qualité de l'air (Fortems-Cheiney et al., ACP, 2020, en révision).

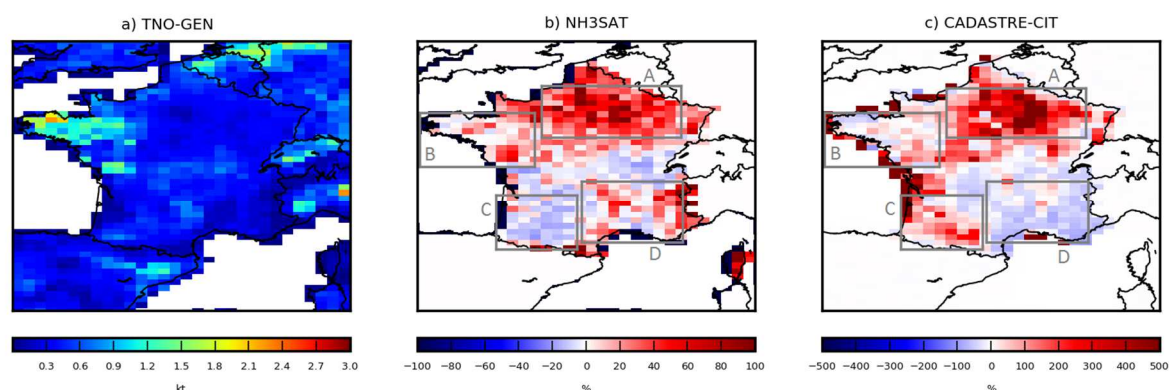


Figure 1 : Emissions françaises d'ammoniac estimées par l'inventaire TNO-GEN (a) et les différences relatives des inventaires (b) NH<sub>3</sub>-SAT (basé sur IASI) et (c) CADASTRE-CIT de l'INRA (Fortems-Cheiney et al., ACP, 2020 en révision).

## 1.2. Modélisation atmosphérique : évolution récente des polluants en Chine

Dans le cadre du projet ANR PoEASIA, une étude récente a montré que les tendances d'ozone observées avec l'instrument satellitaire IASI étaient négatives dans les régions fortement urbanisées (Pékin, Shanghai) entre 2008 et 2016 (Dufour et *al.*, 2018). Ce résultat est surprenant car en contradiction avec les tendances issues des observations de surface. Plusieurs hypothèses ont été avancées pour expliquer ces résultats dont une dérive des performances de l'instrument IASI. Une étude approfondie a cependant montré la bonne stabilité des observations satellitaires sur toute la période. Une des hypothèses avancées pour expliquer cette incohérence est la différence de régime chimique à la surface et vers 3-4 km d'altitude, là où les observations IASI sont les plus sensibles. En effet, les premiers tests de sensibilité avec le modèle CHIMERE ont montré que la réponse de l'ozone à la diminution des émissions de NO<sub>x</sub> actuellement observée en Chine était de signe opposé : positif à la surface et négatif en altitude (voir Fig. 10 de Dufour et *al.*, 2018). Pour investiguer plus précisément cette hypothèse, nous avons conduit des simulations en utilisant un nouvel inventaire d'émissions pour la Chine disponible pour chaque année depuis 2010 et accessible sur demande depuis début 2019 (inventaire MEIC de l'université Tsinghua de Pékin). Nous avons effectué 7 années de simulations avec CHIMERE sur la Chine en utilisant ce nouvel inventaire pour couvrir la période 2010-2017. Les tendances d'ozone déduites des simulations à la surface et entre 3 et 5 km d'altitude (zone de sensibilité maximale des observations IASI) confirment l'hypothèse précédente. En effet, le modèle montre des tendances récentes positives à la surface dans la région de la Plaine du Nord et négatives aux altitudes de sensibilité du satellite (Figure 2).

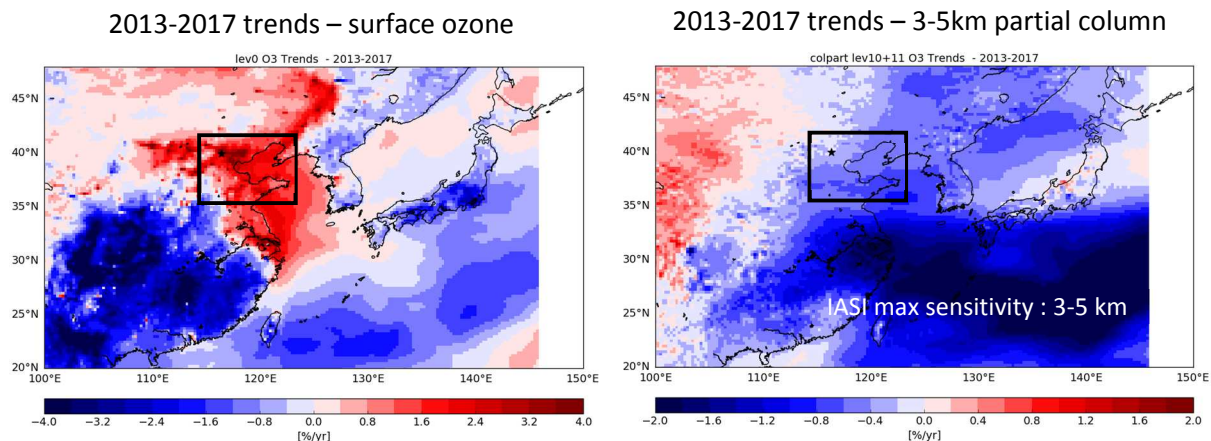


Figure 2 : Emissions françaises d'ammoniac estimées par l'inventaire TNO-GEN (a) et les différences relatives des inventaires (b) NH3-SAT (basé sur IASI) et (c) CADASTRE-CIT de l'INRA (Fortems-Cheiney et al., ACP, 2020 en révision).

Outre ces résultats, les simulations incluant le nouvel inventaire d'émissions régional chinois MEIC prenant en compte les récentes réductions de NO<sub>x</sub> et SO<sub>2</sub> induites par les nouvelles réglementations de la qualité de l'air en Chine ont servi de base à un stage de Master 2 réalisé entre mars et juillet 2020. Le stage a permis de montrer les bonnes performances de CHIMERE et d'étudier les tendances des particules fines (PM<sub>2.5</sub>) et de leurs principaux précurseurs inorganiques (NO<sub>x</sub> et SO<sub>2</sub>). Les résultats montrent une diminution effective des concentrations de polluants depuis 2013 comme dans la région Beijing-Tianjin-Hebei (Figure 3).

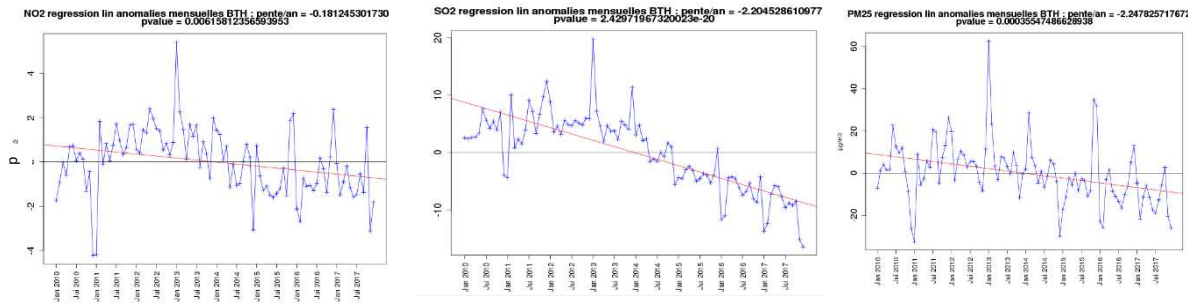


Figure 3 : Séries temporelles des anomalies des concentrations mensuelles de surface de NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> et PM<sub>2.5</sub> simulées avec CHIMERE sur la période 2010-2017 sur la région Beijing-Tianjin-Hebei.

Par ailleurs, en plus de la contribution des sources anthropiques aux PM, des phénomènes naturels comme les tempêtes de poussières désertiques issues des déserts asiatiques, peuvent émettre de large quantité de PM et conduire à des épisodes de pollution jusque dans les grandes mégapole chinoises. Pour quantifier la dégradation de la qualité de l'air par les poussières désertiques à Pékin, Shanghai et Chengdu, nous avons utilisé des simulations du modèle CHIMERE pour trois années (2011, 2013, 2015) incluant la simulation des émissions de poussière et leur transport dans le modèle. Une première partie du travail a consisté en la validation des simulations grâce à des observations satellitaires (MODIS et IASI) et des observations de surface. L'analyse des simulations a montré que les contributions annuelles des poussières au budget des PM<sub>10</sub> à Pékin, Chengdu et Shanghai était 6.6%, 9.5% et 9.3% respectivement. Les évènements de poussières contribuent largement à la dégradation de la qualité de l'air au printemps avec une contribution respective de 22%, 52% et 43% aux épisodes de pollution printaniers aux PM<sub>10</sub> à Pékin, Chengdu et Shanghai). Ces résultats ont récemment été publiés (Lachatre et *al.*, 2020).

### 1.3. Reprocessing de données satellitaires d'ozone de IASI

Nous développons au LISA des algorithmes de restitution des profils verticaux de concentrations d'ozone à partir des observations satellitaires issues des sondes infrarouges IASI à bord des satellites européens météorologiques Metop. Ces algorithmes sont de type « recherche » et non à visée opérationnelle et à ce titre ne sont pas éligibles à une production opérationnelle dans les centres de données nationaux (*e.g.* AERIS). Cependant, nos produits sont utilisés dans le cadre de nos différents projets mais également dans le cadre de divers grands exercices internationaux comme par exemple, le récent rapport sur l'ozone troposphérique ([www.igacproject.org/activities/TOAR](http://www.igacproject.org/activities/TOAR)) auquel nous avons participé (Gaudel et *al.*, 2018, Tarasick et *al.*, 2019). Suite aux conclusions de ce rapport et notamment aux incohérences relevées entre les différentes observations satellitaires qui montrent des tendances d'ozone plutôt positives pour les sondes dans l'ultraviolet et plutôt négative pour les sondes dans l'infrarouge, ce projet se poursuit notamment pour mieux documenter les performances de chacun des instruments satellitaires et algorithmes d'inversion. En prévision de notre participation à la deuxième phase du TOAR qui a débuté en 2020 et dans le cadre de nos divers projets (ANR PoIEASIA, projets TOSCA), nous cherchons continuellement à améliorer nos algorithmes de restitution des profils verticaux de concentrations d'ozone en prenant mieux en compte certaines composantes du transfert radiatif ou en faisant progresser les méthodes d'inversion en elles-mêmes. Ainsi, dans la nouvelle version de notre produit (v3.0), une meilleure prise en compte de l'interférence de l'ozone avec la vapeur d'eau dans les spectres a été implémentée dans l'algorithme. Au cours de l'année écoulée, nous

avons donc reprocessé les données IASI avec cette nouvelle version pour l'instrument IASI sur le satellite Metop-A (en opération depuis de 2007) pour la Chine et l'Europe (période 2008-2018). Dans le cadre du projet ANR PoIEASIA, nous avons pu comparer les tendances d'ozone obtenues avec cette nouvelle version aux sorties du modèle de chimie-transport global LMDz-INCA avec un très bon accord entre le modèle et les observations dans la région de plus haute sensibilité de IASI – colonne partielle 3-6km (Figure 4).

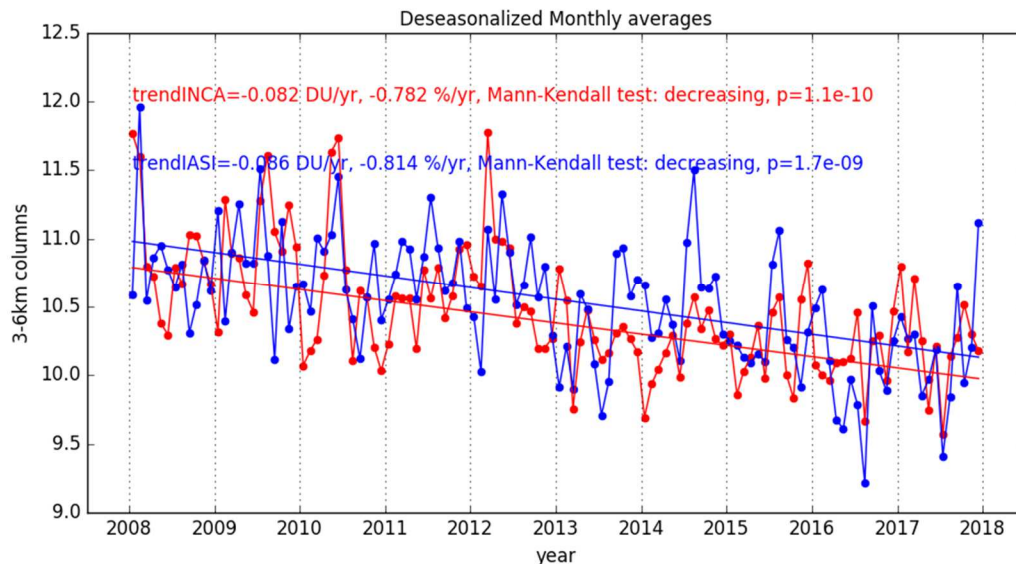


Figure 4 : séries temporelles mensuelles désaisonnalisées des colonnes partielles entre 3 et 6 km observées par IASI (bleu) et simulées par LMDz-INCA (rouge).

#### 1.4. Assimilation des données IASI/IASI+GOME2

En 2019, concernant l'assimilation, nos recherches s'étaient orientées sur le domaine asiatique (un domaine couvrant la partie est de la Chine et le Japon) en lien direct avec le projet ANR PoIEASIA et le projet SURVEYOZON portés tous deux par le laboratoire. Les dernières simulations effectuées nous ont montré la limite du système d'assimilation et cela nous a forcé à revenir sur les observations satellitaires pour nous interroger sur leur apport en information. Premièrement, l'estimation des erreurs de IASI+GOME2 fournie au système d'assimilation a été revisitée. Le nouveau calcul tient compte des erreurs associés aux instruments et aux incertitudes issues d'autres paramètres ajustés, mais il exclut les erreurs de lissage (un terme dominant sur l'erreur totale). En effet, l'erreur des observations était surestimée et donc l'impact de l'assimilation était diminué. La deuxième adaptation du produit a été de fournir une nouvelle version appelée de niveau L3, version lissée du produit IASI+GOME2 qui a remplacé la version L2 antérieure. Cette version a été mise au point par lissage et regrillage des mesures IASI+GOME2 de niveau L2 (ce passage est illustré dans la Figure 5). En effet, les données IASI+GOME2 fournies au système d'assimilation

ressemblent plus aux champs simulés par le modèle : une grille régulière et des variations lissées.

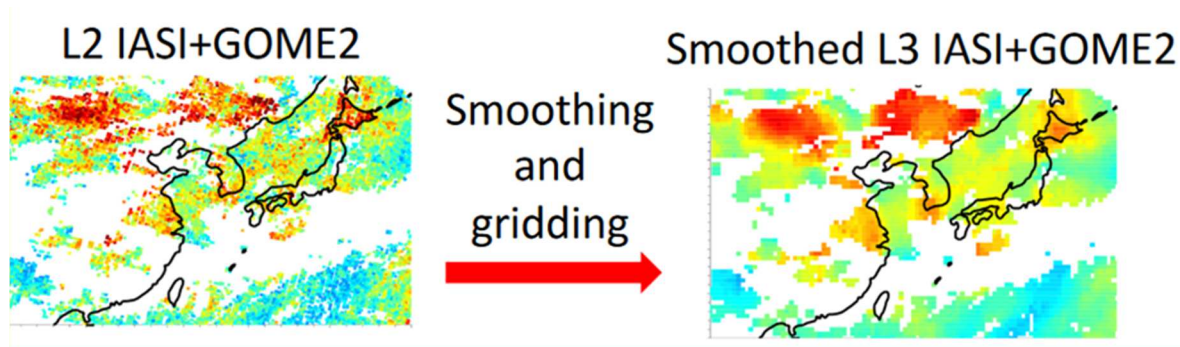


Figure 5 : Illustration pour le 1 Juin 2015 de la nouvelle version du produit IASI+GOME2 de niveau L3 obtenu par lissage et regridage du produit niveau L2.

Ce nouveau produit a été assimilé en utilisant le système CHIMERE-EnKF pour tout le mois de Juin 2015. Afin d'évaluer l'impact de l'assimilation, nous avons comparé les champs assimilés aux mesures in situ au Japon (environ 80 stations). Les résultats de la comparaison sont montrés dans la Figure 6. Nous constatons une diminution du biais positif des prévisions du modèle CHIMERE et donc une amélioration nette, grâce à l'assimilation du produit L3 IASI+GOME2. Cette réduction du biais est constatée pratiquement sur tout le Japon (voir Figure 6 a, b). Elle correspond à environ 5 ppb en moyenne journalière sur tout le mois, et en relatif une diminution de 34,5% du biais pour les prévisions et de 22,4% pour les analyses (Figure 6, c, d).

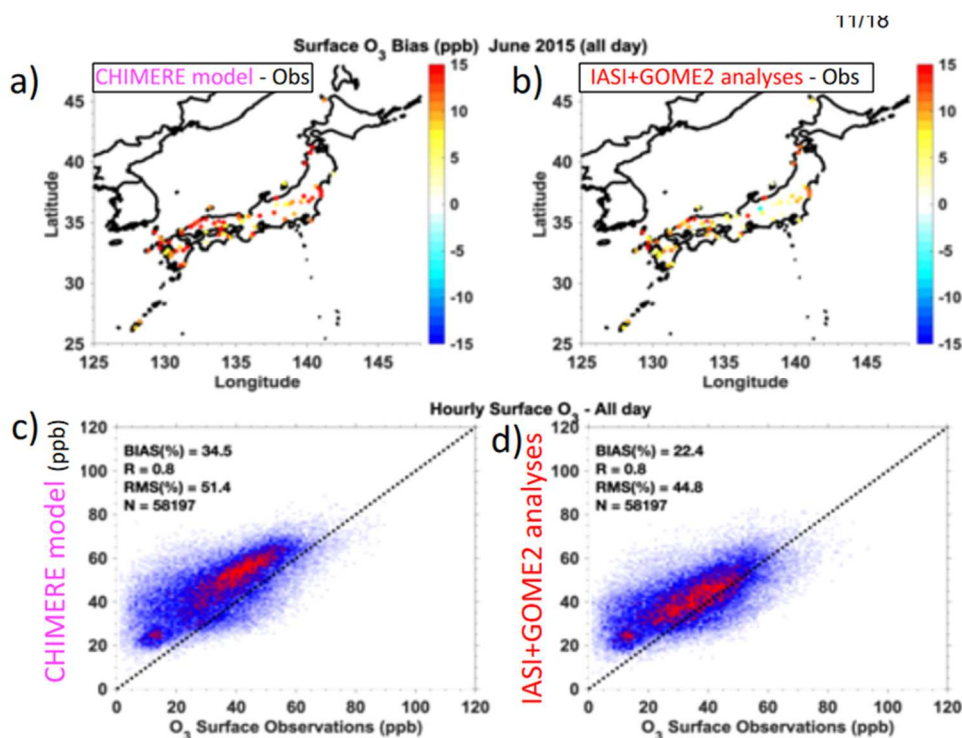


Figure 6 : Comparaison des résultats des simulations CHIMERE en prévision (à gauche) et de l'assimilation de IASI+GOME2 (à droite) pour l'ozone de surface par rapport aux mesures in situ de surface au Japon en Juin 2015. Les panneaux (a,b) montrent les biais moyens.

Les séries temporelles horaires de la Figure 7 nous montrent que la diminution du biais est plus importante durant la journée (ce qui est attendu car l'assimilation est faite à



environs 9h du matin en heure locale, c'est-à-dire l'heure du passage du satellite MetOp). Vers midi en heure locale, même si les prévisions montrent un biais plus faible par rapport aux mesures in situ (18%), la réduction du biais est encore plus importante (58%) après l'assimilation de IASI+GOME2. La surestimation des concentrations d'ozone durant la nuit est classique pour ce genre de modèle. Ici les analyses arrivent aussi à diminuer cette erreur par propagation des corrections faites au matin par rapport aux mesures satellitaires, même si cette correction reste faible. Par ailleurs, les différences en moindres carrées (RMS) diminuent aussi, mais surtout à cause de la réduction du biais. Comme constaté par des études précédentes, les coefficients de corrélation ne sont pas améliorés

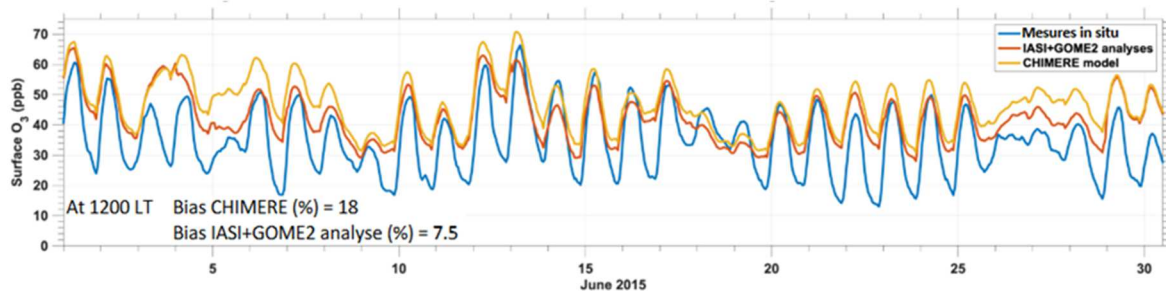


Figure 7: Séries temporelles horaires moyennées (sur 80 stations au Japon) des concentrations de surface, issues des mesures in situ (en bleu), analyses IASI+GOME2 (en rouge) et les prévisions CHIMERE (en jaune).

## 2) Scénarios urbains d'aménagement et de politiques énergétiques (ANR VITE !)

Depuis plusieurs décennies, d'importants efforts ont été menés afin d'identifier, dans les politiques publiques et dans les actions de la transition énergétique, des leviers permettant d'agir conjointement sur l'air et le climat et d'espérer une dynamique co-bénéfique sur l'ensemble des volets de l'environnement atmosphérique. Ce sous-projet vise à apporter des éléments de diagnostic sur le sujet. Il propose (1) d'analyser les effets de différents scénarios d'organisation urbaine pensés pour la transition énergétique, sur la qualité de l'air et l'exposition en zone urbaine, (2) il ouvre une réflexion sur le paradoxe de la densité urbaine, à la fois source d'économie énergétique et à l'origine d'un confinement excessif des individus dans des espaces hautement émetteurs de polluants, (3) il propose une analyse quantitative des impacts du transport de marchandise en ville sur la santé des populations urbaines, et (4) de caractériser l'exposition dynamique et cumulée des individus à la pollution de l'air par une approche hautement résolue (à l'échelle de quelques mètres).

Le travail présenté ci-dessous est la résultante d'un ensemble de collaborations dans le cadre de l'ANR VITE ! ainsi que du projet de l'ADEME, PRIMEQUAL POLL-EXPO. Ce travail de structuration et de développement d'une chaîne de modélisation urbaine multidisciplinaire, innovante, s'appuie principalement sur l'expertise et les outils de 4 laboratoires de recherche (CIRED, LATTs, LISA, LVMT). La chaîne de modélisation est constituée des modèles NEDUM/MODUS – FRETURB – OLYMPUS – WRF – CHIMERE (Toilier et *al.*, 2005 ; Viguié, 2012 ; Mailler et *al.*, 2016 ; Elessa Etuman & Coll, 2018) et permet de simuler sur l'ensemble d'une agglomération les relations entre l'organisation urbaine, les contraintes politiques, socio-économiques et énergétiques, la mobilité et les pratiques de consommation des citoyens, le transport de marchandise

en ville, les émissions de polluants et enfin la qualité de l'air à l'échelle kilométrique (Figure 8).

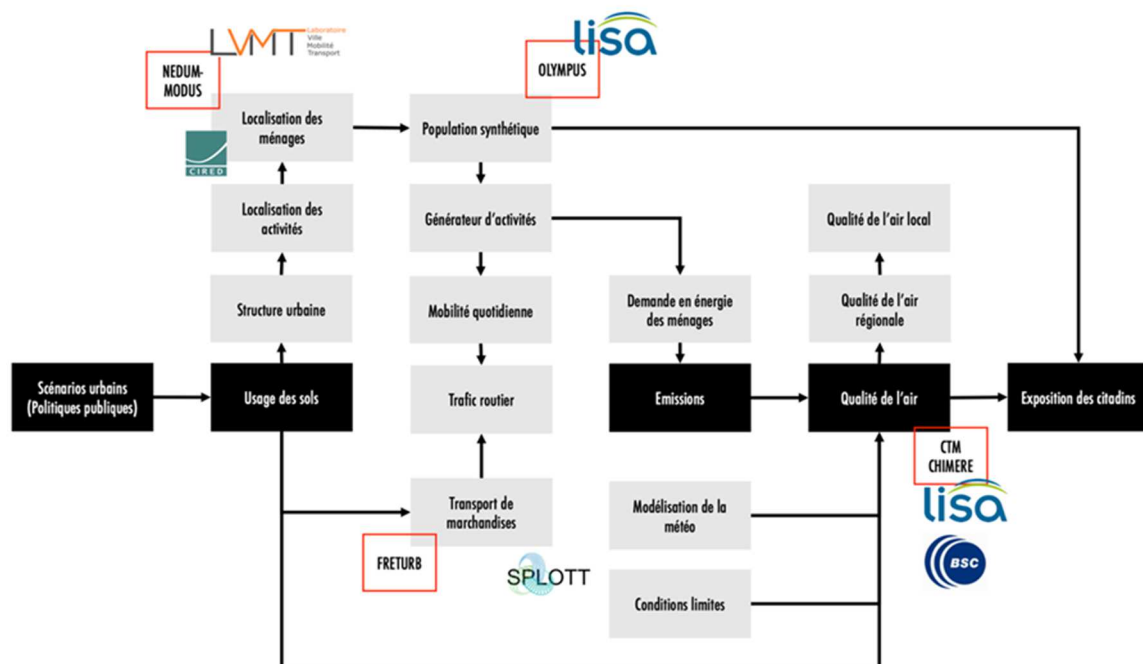


Figure 8 : Représentation de la plateforme de modélisation des impacts de planifications urbaines sur la qualité de l'air et l'exposition des populations.

Le travail mené cette année visait à apporter des éléments de quantification de l'impact environnemental de différents scénarios urbains prospectifs ou hypothétiques. L'objectif principal du projet est de produire un diagnostic urbain innovant sur l'exposition des populations urbaines aux polluants anthropiques gazeux et particulaires primaires (oxydes d'azote et particules fines notamment).

## 2.1. Caractérisation du rôle de l'aménagement urbain sur les activités, sur les flux de véhicules, sur les émissions

Afin d'évaluer le rôle de l'aménagement urbain sur les activités émettrices et leurs nuisances environnementales, nous avons conçu des scénarios prospectifs intégrés sur l'Île de France. Ces scénarios à l'horizon 2030 ont été comparés afin de distinguer les effets de leviers de différentes politiques urbaines. (1) Un scénario « au fil de l'eau » (BAU) prenant en compte les actions en cours, hors documents planificateurs non encore en vigueur. (2) Un scénario dit « U-DENS » visant à transcrire les ambitions de densification urbaine du schéma directeur de la région Île de France, au travers de la localisation des ménages et des activités. (3) Un scénario dit « GPE » pour « Grand Paris Express », simulant l'effet de la reconfiguration du réseau régional de transports en commun. (4) Un scénario U-PLAN permettant d'étudier de potentiels effets antagonistes ou de synergie entre ces deux précédents volets d'action. Nous avons pu observer que les différentes actions ont un impact sur la répartition de la population sur le territoire. Ce qui engendre par ailleurs des comportements de mobilités différents dans chacun des scénarios. Pour exemple, la Figure 9 représente les différences absolues des émissions d'oxydes d'azote entre les scénarios et la situation au fil de l'eau. Les résultats du scénario GPE montrent une certaine tendance des modèles à

relocaliser les populations encore plus en périphérie du cœur de l'agglomération et augmenter les émissions de polluants en grande couronne. Nous préparons d'ailleurs une publication pour quantifier les impacts en termes d'exposition des populations aux oxydes d'azote et aux particules fines dans ces différents scénarios.

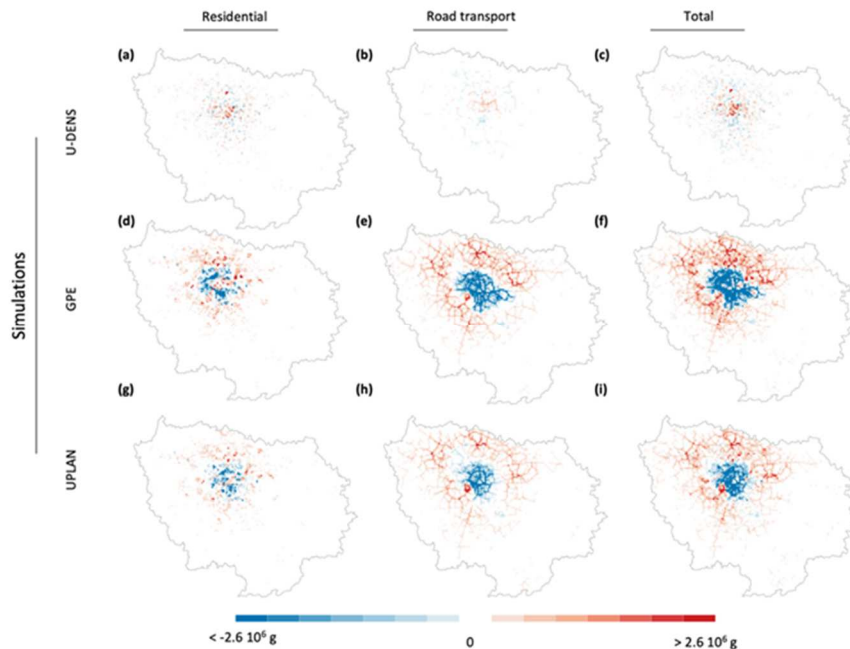


Figure 9 : Cartes des différences absolues des émissions annuelles d'oxydes d'azote (NOx) entre les scénarios (U-DENS, GPE et U-PLAN) et BAU pour 2030. (OLYMPUS).

## 2.2. Caractérisation des liens entre la structure, l'organisation et le fonctionnement de la ville et la qualité de l'air

Afin d'apporter des éléments quantifiés sur les avantages et inconvénients des modèles urbains (structure, organisation et fonctionnement d'une aire urbaine) pour la qualité de l'air, il est nécessaire de poser un diagnostic sur le lien entre forme urbaine, mobilité et consommation d'énergie, émissions de polluants, qualité de l'air et même exposition des citoyens. Nous avons réalisé des simulations pour définir, prioriser et spatialiser la mobilité quotidienne des individus, ainsi que définir la demande énergétique par bâtiment des différentes formes urbaines et différents territoires dont l'Île-de-France (IDF) - une métropole dense et très bien desservie par les transports publics, abritant 12 millions d'habitants - et les Pays de la Loire (PDL) - une zone urbaine polycentrique organisée autour de villes moyennes au sein d'un espace très rural. Dans une publication actuellement en relecture, nous présentons une analyse du modèle OLYMPUS sur l'IDF et les PDL en termes de densité de population, de mobilité et d'émissions (Figure 10).

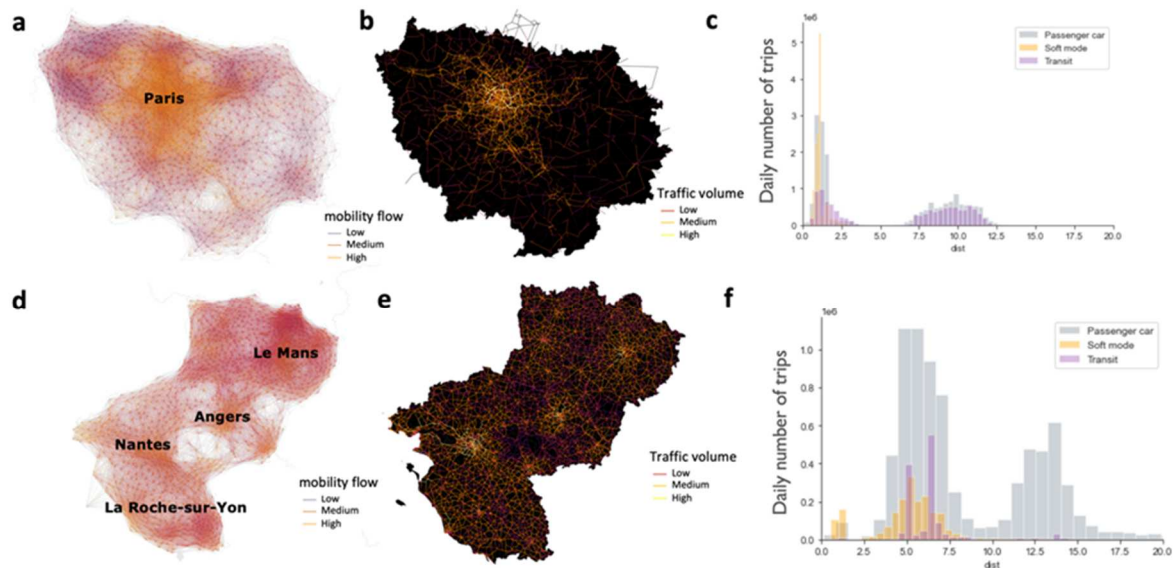


Figure 10 : (a) Représentation des flux de mobilité quotidienne en Ile de France. (b) Représentation des volumes de trafic routier moyen en Ile de France. (c) Distribution en nombre de déplacement par type de mobilité en Ile-de-France. (d) Représentation des flux de mobilité quotidienne dans les Pays de la Loire. (e) Représentation des volumes de trafic routier moyen dans les Pays de la Loire. (f) Distribution en nombre de déplacement par type de mobilité dans les Pays de la Loire.

Nous avons également étudié les atouts théoriques de différentes formes d'urbanisation : monocentrique, polycentrique ou structurées autour de couloirs de transport. Le fait de travailler sur des formes urbaines contrastées permet de mettre en exergue leur capacité à agir comme un levier environnemental. Pour finir, la capacité de transformation de l'espace urbain étant propre à chaque ville, et les bénéfices attendus par un changement de politique d'aménagement étant très dépendants du lieu d'étude, nous avons choisi ici de ne pas étudier un territoire spécifique, mais de nous attacher à définir de manière plus générique les effets environnementaux que l'on peut attendre de différentes typologies d'organisation urbaine. Ces travaux sont détaillés dans un ouvrage collectif du projet ANR VITE ! (Planification spatiale, consommation d'énergie et qualité de l'air en ville). Nous y présentons les résultats de la modélisation de 4 formes théoriques d'expansion urbaine : une structure compacte (COMPACT), étalée (SPRAWL), une métropole polycentrique (STARS) et une organisation en couloirs (CORRIDOR), toutes imaginées sur la surface du territoire francilien. L'ensemble des simulations a été réalisé avec les conditions météorologiques de l'année 2009. Nous avons comparé les résultats des 4 scénarios entre eux mais aussi par rapport aux sorties d'une simulation de la situation francilienne réelle pour l'année 2009.

### 2.3. Couplage de modèles pour estimer la contribution du transport de marchandises à la dégradation de la qualité de l'air en Ile-de-France

Le transport routier de marchandise en ville (TMV) est une source majeure d'émissions de polluants, avec des conséquences à la fois pour l'environnement et la santé humaine. Notre travail vise à caractériser l'impact TMV sur l'exposition des populations urbaines aux polluants atmosphériques à travers la plateforme de modélisation du projet. Ici le volet TMV est géré par le modèle FRETURB. Le modèle permet d'estimer le nombre de livraisons/enlèvements générés dans une agglomération par les

établissements économiques qui y sont localisés. Un des enjeux de calcul de la mobilité et des émissions de polluants associées a été de parvenir à représenter la congestion routière avec le plus de finesse possible. L'occupation des voies influence en effet directement la vitesse et donc les temps de parcours et l'intensité des émissions par kilomètre parcouru, mais aussi indirectement l'affectation du réseau (chemin alternatif). Le rôle du transport de marchandises est sur ce point critique, car les camions constituent une très forte contrainte de capacité du réseau routier. Pour cela, nous avons implémenté des boucles de rétroactions pour intégrer des changements de comportements de mobilités liés à la congestion du réseau routier (Wardrop & Whitehead, 1952). Le principe de fonctionnement est d'approximer à chaque itération une fonction du coût total du transport. Le but est de minimiser cette fonction. Nous travaillons actuellement à la modélisation de différents scénarios de TMV dont un panel de scénarios sur la modernisation de flotte de véhicules utilitaires légers et de poids lourds. La Figure 11 représente des différences d'émissions poids-lourds (PL) / véhicules particuliers (VP) pour un échantillon de population à 1/1000. Les émissions des PL sont plus importantes sur le territoire et principalement sur les grands axes routiers. Nous travaillons actuellement à la modélisation de l'ensemble de la population de l'Île de France.

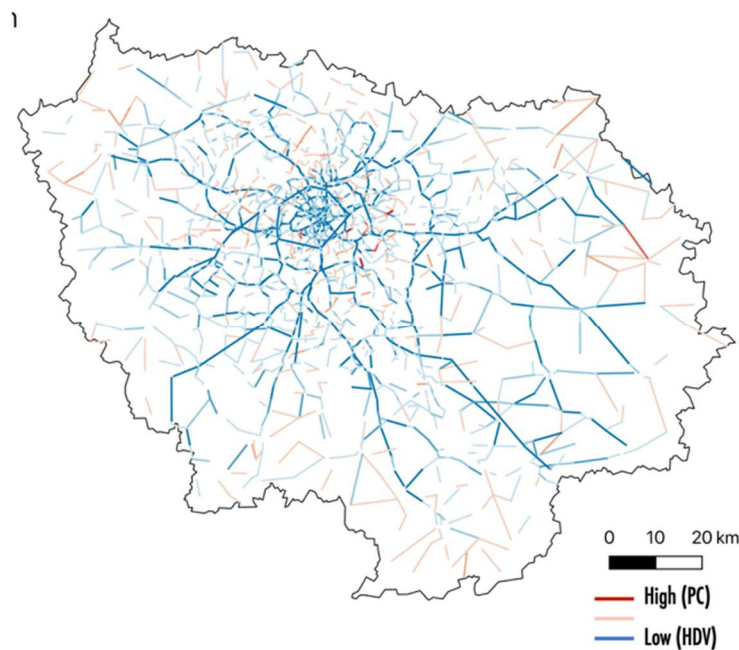


Figure 11 : Différences absolues d'émissions d'oxydes d'azote de poids lourds – Véhicules particulier. Modélisation des émissions de polluants sur la base d'un échantillon de population (1/1 000).

#### 2.4. Modélisation de la pollution de proximité. Application à un quartier

Par définition, la pollution de proximité représente la combinaison de la pollution de fond urbain avec les valeurs locales du trafic au niveau de la rue considérée. L'approche statistique développée se base sur cette équation de la proximité aux émissions à laquelle est ajouté un poids, calculé statistiquement via itération et comparaison avec les RMSE, différent pour chacune de ses parties. Ce poids a pour but principal d'ajuster les valeurs calculées par CHIMERE en les confrontant aux mesures effectuées par Airparif. Une action supplémentaire a dû être réalisée pour permettre d'ajuster d'avantage les résultats en intégrant un paramètre qui puisse représenter l'accumulation des émissions au sein des rues. En effet, CHIMERE est un

modèle qui va considérer une rugosité moyenne de la surface qui ne permet pas de prendre en compte le bâti et son effet sur le blocage de la dispersion des polluants. Il est, sans rappeler, que le but premier de l'approche est de permettre son application à des scénarios prospectifs et il est primordial de s'affranchir de cette étape de comparaison avec les mesures. Un travail de caractérisation des environnements considérés a été effectué pour retrouver par le calcul les différents coefficients intervenants dans la correction des sorties de CHIMERE. Ce travail a permis de montrer que l'influence du taux de trafic était un élément clé de cette étape. Le taux de trafic représente le nombre de véhicules traversant la rue considérée par rapport au trafic total de la maille. Ces valeurs de comptages ont pu être récupérées sur l'ensemble du domaine grâce aux données du modèle OLYMPUS. Cette approche a permis de générer des résultats satisfaisants pour l'année (2009) et les polluants considérés ( $\text{NO}_2/\text{PM}_{10}$ ) comme le montre la Figure 12. La suite du travail consiste à valider l'approche de correction développée grâce aux données de l'année 2009.

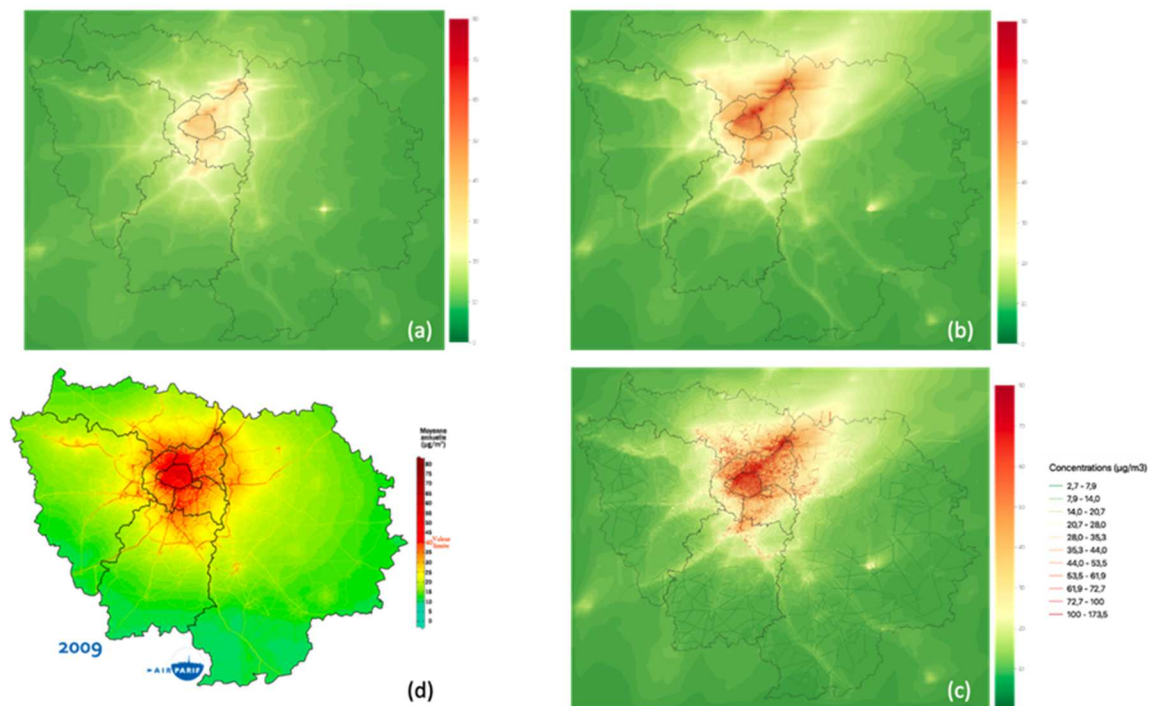


Figure 12 : . Comparaison des cartographies des moyennes annuelles en  $\text{NO}_2$  simulées par CHIMERE (a), avec correction sur le fond urbain (b), avec correction sur le fond urbain et à proximité du trafic (c) et mesurées par Airparif (d). Toutes les valeurs sont en  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

### 3) Interaction entre émissions biogéniques et anthropiques

La représentation des concentrations d'aérosols organique (AO) demeure très incertaine dans les modèles de chimie-transport. Le projet LUCAS (Land use, regional climate and atmospheric chemistry), nous donne l'opportunité d'utiliser les mesures obtenues lors de la campagne LANDEX (the LANDes EXperiment). Ces mesures détaillées des précurseurs d'AOS (aérosol organique secondaire) et des oxydants atmosphériques nous permettent d'évaluer les modules d'aérosols organiques dans les modèles de chimie transport. Ce projet a pour but de créer des scénarios de changement d'utilisation du sol de la forêt des Landes, d'évaluer l'impact de ces scénarios sur le climat régional, d'améliorer nos connaissances sur la formation, le vieillissement et les sources de formation d'aérosol organique secondaire afin de

quantifier l'impact de changement d'utilisation du sol sur les concentrations d'aérosol. L'intérêt d'étudier cette région pour la formation d'aérosol organique secondaire se trouve dans la nature très homogène de type de composés organiques volatils biogéniques, essentiellement des terpènes, assez loin de sources anthropiques. Ces données devront alors nous permettre d'améliorer la simulation de la formation d'aérosols organiques secondaires biogéniques dans le modèle de chimie-transport CHIMERE (Menut et *al.*, 2013).

Pour la région Landaise, trois domaines sont utilisés : un domaine continental (25 km de résolution horizontale), un domaine français (résolution de 5 km) et un domaine centré sur la forêt des Landes avec une résolution d'1 km. La période des simulations reste restreinte à 40 jours en été 2017, pendant lesquelles les observations détaillées de la campagne sont disponibles. Plusieurs séries des simulations ont été effectuées pour ces trois domaines afin de quantifier les effets de changement des données d'entrées (météorologie, émissions biogéniques et anthropiques, utilisation du sol et paramétrisation des échanges verticaux). Il s'agissait de remplacer des bases de données ou traitements générique pour la configuration Européenne du modèle par ceux spécifiques pour la forêt des Landes. Plusieurs séries de simulations météorologiques avec des paramétrisations différentes ont été effectuées et comparées à la station à Bilos (Salles), au milieu de la forêt des Landes. Les deux séries reproduisant le mieux les observations ont été utilisées pour effectuer le test de sensibilité concernant des entrées météorologiques. Pour le test de sensibilité d'utilisation du sol, plusieurs bases de données ont été comparées et le test de sensibilité a été effectué avec la base de donnée la plus récente et la plus précise. Les émissions biogéniques ont été modifiées en utilisant les mesures in-situ sur les émissions des arbres et en prenant en compte la nouvelle base de donnée d'utilisation du sol. Les informations retenues par l'AASQA (l'atmo nouvelle-aquitaine) ont été utilisées pour le test de sensibilité des émissions anthropiques. Enfin, la paramétrisation suggéré par Ogée et *al.*, 2003 a été utilisé pour paramétrer les échanges verticaux (Kz) entre les deux premières couches du domaine. Les simulations ont montré que pour la forêt des Landes la formation d'aérosol organique est sensible aux changement des émissions biogéniques, à l'utilisation du sol et aussi aux échange verticaux (Figure 13). La formation d'aérosol organique à partir de chaque oxydant et précurseur a été explorée et comparée aux mesures in-situ. En conclusion de ces travaux, nous avons montré que l'affinement des simulations proposées permet un meilleur accord avec les observations disponibles. La configuration standard de CHIMERE ne tient pas suffisamment compte des spécificités des Landes. Un article et en cours de préparation englobant ces deux sujets (Cholakian et *al.*, 2020, in prep).

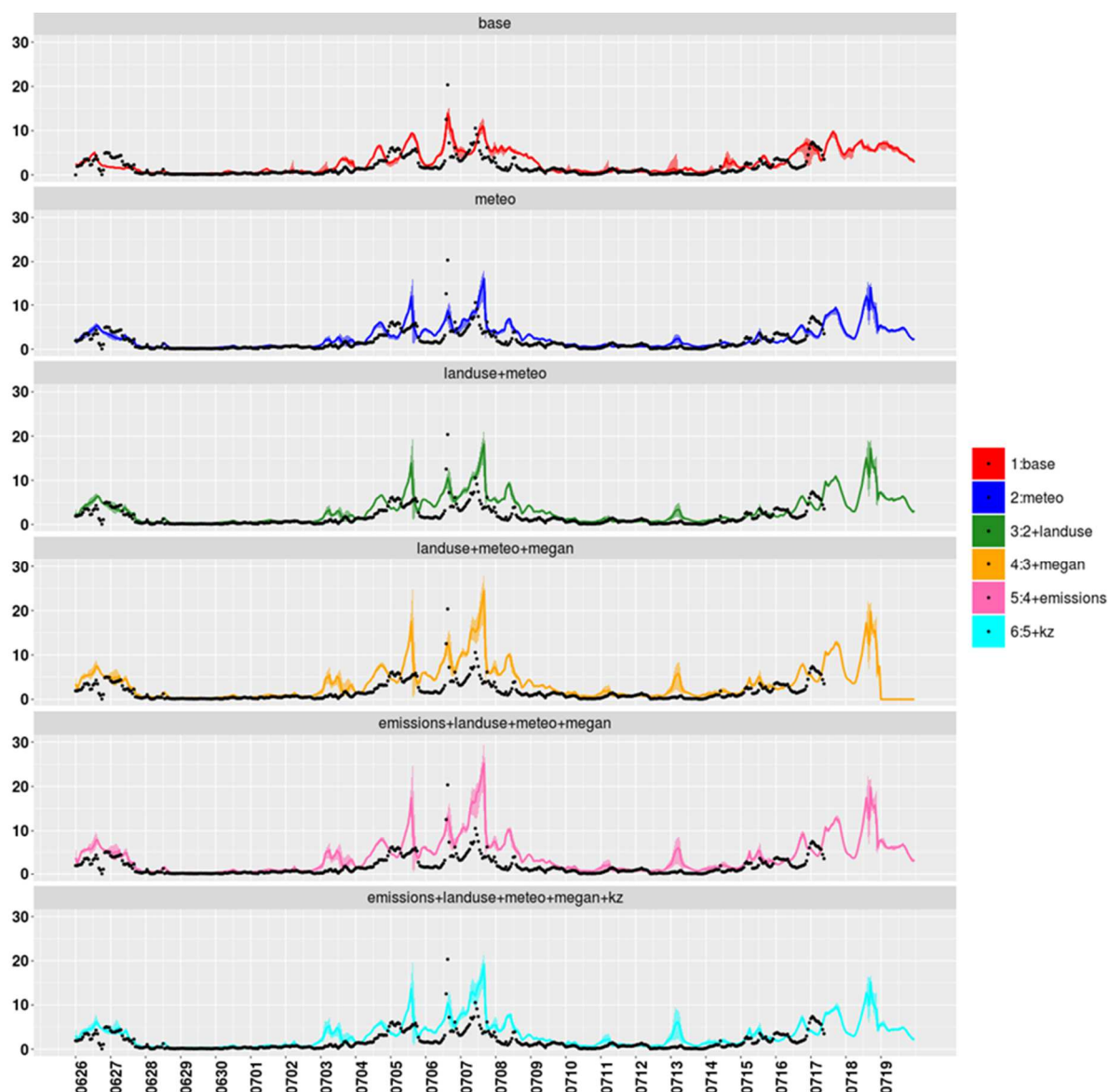


Figure 13 : Changement de la concentration d'aérosol organique dans les tests de sensibilité : points noirs montrent les mesures au site de mesure de Bilos, Salles. Les courbes montrent les simulations pour chaque test de sensibilité.

Les simulations avec les différents schémas de simulations d'aérosol organique ont été aussi effectuées utilisant 3 schémas de simulation de cet aérosol : un schéma de 2-produits (Bessagnet et al., 2008) et deux schémas basés sur la méthode « volatility basis set (VBS) » prenant en compte le vieillissement d'aérosol organique secondaire biogénique (Donahue et al., 2006), la fragmentation et la formation d'aérosol organique secondaire non volatile (Shrivastava et al., 2015). Les simulations sont planifiées jusqu'à la fin d'allocation en cours avec un autre schéma de simulation de cet aérosol basé aussi sur la méthode VBS qui a été développé utilisant le modèle 0D de GECKO-A (Lannuque et al., 2018). Le post-processing de ces simulations est maintenant en cours. Un autre article est planifié pour ces simulations pour l'année prochaine.



#### 4) Modélisation des émissions d'aérosols terrigènes pour les régions semi-arides

Ce sous-projet s'inscrit dans le cadre du projet WIND-O-V (WIND erOsion in presence of sparse Vegetation) financé par l'ANR (<https://www6.inra.fr/anr-window>) et vise à quantifier les émissions d'aérosols terrigènes pour les régions semi-arides.

Les schémas d'émission d'aérosols terrigènes présents dans les modèles climatiques pour prédire le cycle de ces aérosols et leurs impacts locaux à globaux donnent des prévisions différentes les unes des autres en raison de leur mauvaise représentation des vents et de la végétation proche de la surface. Pour surmonter ces limitations, le projet WIND-O-V tente de développer une nouvelle génération de modèles d'érosion éolienne prédisant la quantité et la composition des aérosols terrigènes émis par les surfaces végétalisées nues et clairsemées, typiques des régions semi-arides.

Pour ce faire, de nouvelles paramétrisations seront mises en place dans le modèle d'érosion éolienne et d'émission d'aérosols terrigènes développé par Marticorena and Bergametti (1995) pour les régions arides et testées à l'échelle régionale grâce au modèle de chimie-transport CHIMERE (Menut et *al.*, 2013). La région modélisée sera le sud de la Tunisie, région pour laquelle nous disposons d'une base de données des caractéristiques de la surface des sols en fonction de leur usage à une résolution horizontale de 10x10 km (Labiadh, 2011). La qualification des développements réalisés sera effectuée en utilisant (i) les mesures d'érosion éolienne acquises au cours d'un précédent projet (LEFE, 2014-2015) ainsi qu'au cours des années 2017 (Dupont et *al.*, 2018) et 2018 dans le projet WIND-O-V, (ii) les données de concentration en PM<sub>10</sub> et d'épaisseur optique disponibles sur le site de l'Institut des Régions Arides de Médenine depuis 2013, et (iii) les épaisseurs optiques MODIS. Pour le moment, 2 configurations ont été testées :

- a) une simulation dite de référence avec le modèle CHIMERE dans sa configuration originelle (2012→2018),
- b) une simulation incluant l'impact du labour pour les surfaces cultivées (Kardous et *al.*, 2005) pour les années 2013-2014. La Figure 14 représente les émissions annuelles de DUST en 2014 pour cette simulation.

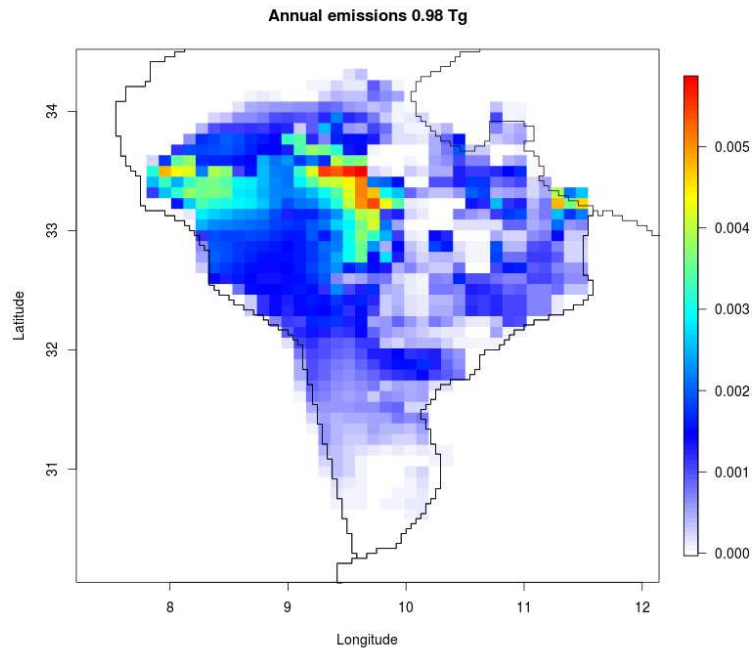


Figure 14 : émissions annuelles de DUST en 2014 prenant en compte l'impact du labour.

## 5) Etude des indicateurs d'impact sur la santé

La masse des particules d'un diamètre inférieur à  $2,5 \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2.5}$ ) a été traditionnellement utilisée comme indicateur de l'impact de la pollution particulaire sur la santé. Néanmoins, il est reconnu que l'impact sanitaire de l'aérosol dépend de sa taille et de sa spéciation chimique. En particulier, des espèces carbonées à fort pouvoir oxydant et certains métaux de transition peuvent exercer ou favoriser un stress oxydant sur les cellules, et entraîner des réactions inflammatoires. Le potentiel oxydant (PO) mesure cette capacité des particules à apporter ou produire des espèces réactives oxydantes. Il peut être caractérisé dans des échantillons d'air ambiant par des tests extra cellulaires, et varie en fonction de la source de l'aérosol.

Le groupe « modélisation » du LISA co-développe le modèle de qualité de l'air CHIMERE (Menut et al., 2013 ; Mailler et al., 2017), également utilisé pour la prévision de la qualité de l'air. Le LISA a une grande expérience de simulation des différents polluants dans un contexte de pollution urbaine ou d'échelle régionale/continentale (Zhang et al., 2013 ; Cholakian et al., 2018). Il a entre autres mené des travaux d'évaluation de différents modules d'aérosol organique et d'assimilation de données.

Dans ce contexte, un nouvel axe des travaux de recherche pour les prochaines années consiste à rendre ces simulations les plus pertinentes possibles pour l'évaluation de l'impact de la pollution de l'air sur la santé humaine. En parallèle, le groupe de chimie atmosphérique de l'IGE est à la pointe de l'état de l'art sur la métrique d'intérêt sanitaire du Potentiel Oxydant des aérosols (Weber et al., 2018 ; Weber et al., 2019). Il développe une approche multidisciplinaire aux frontières de la géochimie, de la toxicologie, de l'épidémiologie et de la modélisation visant à valider/invalidier le PO comme une nouvelle métrique de la qualité de l'air. Dans ce contexte, un stage de Master 2 a eu lieu afin d'initier la modélisation du potentiel oxydant de l'aérosol avec

le modèle CHIMERE. Les travaux de l'équipe de l'IGE ont permis d'obtenir expérimentalement des potentiels oxydants (PO) intrinsèques pour différentes sources de l'aérosol (Weber et *al.*, 2018 ; Calas et *al.*, 2019) : trafic routier, chauffage de bois, industrie, poussières, sources secondaires). Il s'agit alors de simuler ces mêmes sources avec le modèle WRF-CHIMERE, en utilisant une technique dite de coloration (« taggage »), permettant de quantifier la contribution d'une source à la concentration d'une espèce ou d'une famille chimique (Belis et *al.*, 2019). Ce développement vient d'être inclus dans la version de WRF-CHIMERE. Les premiers tests ont été réalisés sur une simulation de 25 km de résolutions pour le mois de janvier 2014. Un premier calcul de deux indicateurs représentant le Potentiel oxydant a été réalisé. La Figure 15 illustre ce résultat sur le site de Talence. On peut constater que le PO DTT (en rouge) est généralement supérieur au PO AA (en bleu) à Talence, ceci s'explique notamment par l'impact des sels marins. Si on observe le pic du 11 janvier, les PO AA et DTT sont quasiment identiques puisque les contributions des sources de PM de la combustion de biomasse (en jaune) et des sels de mer (bleu) sont équivalents. En revanche, le pic du 26 Janvier montre une grande différence entre les PO causée par une prédominance des sels de mer.

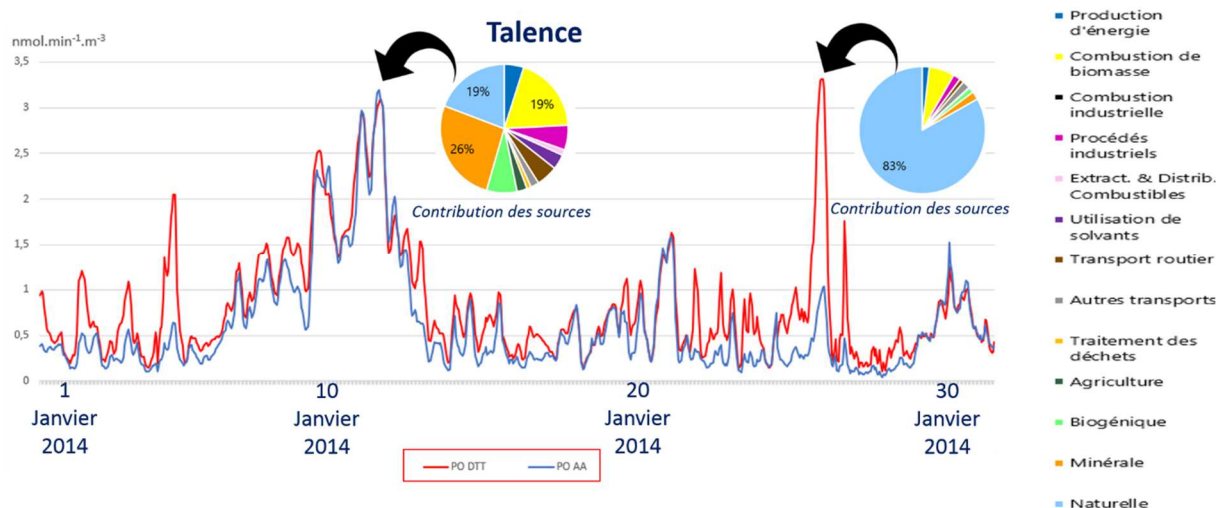


Figure 15 : Simulation du potentiel oxydant sur le site de Talence en Janvier 2014 pour 2 méthodes DDT et AA.

## 6) Etude de l'impact du chlore atomique sur la pollution en Europe

Les Composés Organiques Volatils (COV) émis par les activités anthropiques et biogéniques sont principalement oxydés en journée par le radical hydroxyle. Des études récentes ont montré que la réactivité des COV dans des régions côtières pouvait être dominée par le chlore atomique notamment le matin.

La principale source de chlore atmosphérique provient des émissions de sels de mer (chlorures). Sous cette forme, le chlore n'est pas réactif vis-à-vis des COV. Cependant la réaction hétérogène entre le  $\text{N}_2\text{O}_5$  et les sels de mer permet de former du chlorure de nitrile gazeux ( $\text{ClNO}_2$ ). Ce composé est suffisamment photo sensible pour être

photolysé rapidement et ainsi libérer du chlore atomique sous forme gazeuse et du  $\text{NO}_2$ .

Cette étude a pour but d'explorer l'impact du radical Cl sur l'oxydation des COV, sur leur durée de vie et sur la formation de photo-oxydants en Europe. Une paramétrisation (Bertram et Thornton, 2009) représentant la conversion des sels de mer en  $\text{ClNO}_2$  a été ajoutée au modèle WRF-CHIMERE. L'oxydation des COV par le radical Cl est prise en compte dans le mécanisme chimique SAPRC-07A (Carter, 2010). Un an de simulation (2012) à une résolution de 25 km a été réalisé afin de quantifier la variabilité saisonnière des concentrations de  $\text{ClNO}_2$  en Europe, et de comparer les résultats obtenus à une campagne de mesure réalisée près de Londres (Bannan et al. 2014 ; Sommariva et al., 2018). La Figure 16 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** représente la variabilité saisonnière des concentrations de  $\text{ClNO}_2$  en Europe simulée par CHIMERE. Les concentrations de  $\text{ClNO}_2$  sont simulées avec les bons ordres de grandeurs en moyennes mensuelles. La variabilité diurne des concentrations de  $\text{ClNO}_2$  est conforme à celle mesurée. Le matin, la réactivité des COV avec le Cl est du même ordre de grandeur que celle avec OH. L'impact de la prise en compte du Cl, entraîne une diminution des  $\text{HO}_x$ , OH et  $\text{NO}_2$  et une augmentation des concentrations d' $\text{O}_3$  avec un impact maximal en Mars due à une plus grande surface d'aérosols disponible.

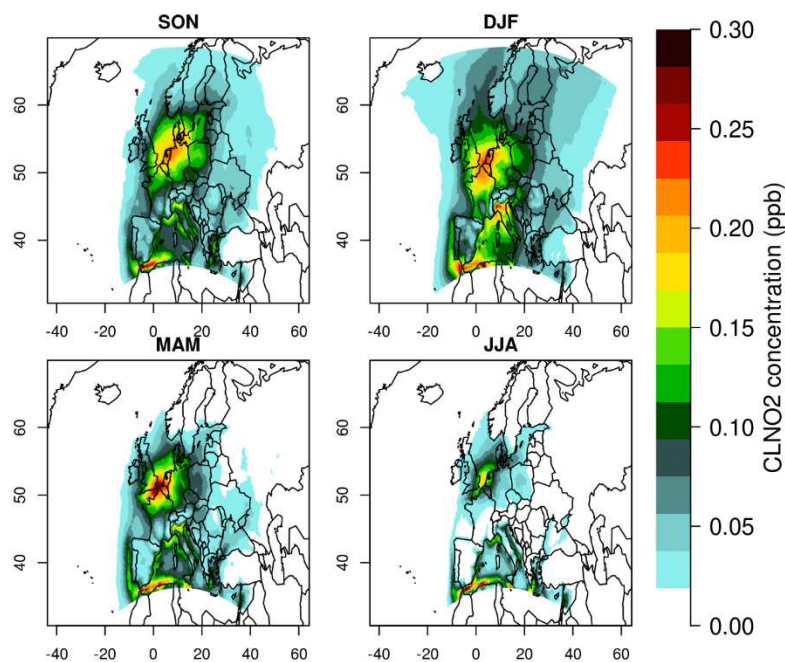


Figure 16 : Concentrations saisonnières de  $\text{ClNO}_2$  simulées par CHIMERE.

### **Publications en préparation**

A. Elessa Etuman, I. Coll., V. Riveira-salas, OLYMPUS: an emission model to connect urban form, individual practices and atmospheric pollutant release. *Atmospheric Environment*.

A. Elessa Etuman, I. Coll., V. Viguié and N. Coulombel, Simulating the impact of urban planning on air quality: application to Greater Paris - Part 1: Reproducing the base case

A. Elessa Etuman, I. Coll., V. Viguié and N. Coulombel, Simulating the impact of urban planning on air quality: application to Greater Paris - Part 2: Urban planning scenarios

Fortems-Cheiney, A., Pison, I., Dufour, G., Broquet, G., Berchet, A., Potier, E., Coman, A., Siour, G., and Costantino, L.: Variational regional inverse modeling of reactive species emissions with PYVAR-CHIMERE, *Geosci. Model Dev. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/gmd-2019-186>, in review, 2019.

Fortems-Cheiney, A., Dufour, G., Dufossé, K., Couvidat, F., Gilliot, J.-M., Siour, G., Beekmann, M., Foret, G., Meleux, F., Clarisse, L., Coheur, P.-F., Van Damme, M., Clerbaux, C., and Générumont, S.: Do alternative inventories converge on the spatiotemporal representation of spring ammonia emissions in France?, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/acp-2020-292>, in review, 2020.

I. Makni, I. Coll, A. Elessa Etuman and T. Benoussaid, Characterization of atmospheric pollution at local scales - Implementation of a downscaling method.

V. Riveira-Salas, A. Elessa Etuman, I. Coll., Exploring the linkages between urban form, mobility and emissions with OLYMPUS: a comparative analysis in two French regions

### **Publications**

Cholakian, A., Colette, A., Coll, I., Ciarelli, G., and Beekmann, M.: Future climatic drivers and their effect on PM10 components in Europe and the Mediterranean Sea, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 4459-4484, <https://doi.org/10.5194/acp-19-4459-2019>, 2019a.

Cholakian, A., Beekmann, M., Coll, I., Ciarelli, G., and Colette, A.: Biogenic secondary organic aerosol sensitivity to organic aerosol simulation schemes in climate projections, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 13209–13226, <https://doi.org/10.5194/acp-19-13209-2019>, 2019b.

Elessa Etuman, A, Coll, I, Makni, I, Benoussaid, T, 2020. Addressing the issue of exposure to primary pollution in urban areas: Application to Greater Paris. *Atmospheric Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117661>.

Mathieu Lachatre, Gilles Foret, Benoit Laurent, Guillaume Siour, Juan Cuesta, Gaëlle Dufour, Fan Meng, Wei Tang, Qijie Zhang and Matthias Beekmann: Air Quality Degradation by Mineral Dust over Beijing, Chengdu and Shanghai Chinese Megacities, *Atmosphere* 11, 708, 2020.

### **Conférences et posters**

I. Coll, H. Charreire, T. Benoussaïd and I. Makni, Analyse socio-spatiale de l'exposition des populations à la pollution atmosphérique en zone urbaine, 10e congrès annuel en santé environnementale de la Société Francophone de Santé et Environnement

(SFSE) : « Les inégalités socio-environnementales de santé - Pour une approche interdisciplinaire », 27 - 28 novembre 2019, University Paris Diderot, Paris

Dufour G., M. Lachâtre, A. Cheiney, G. Siour, M. Eremenko, B. Zheng, Q. Zhang, M. Beekmann, O. Cooper, J. Cuesta, G. Foret, A. Gaudel, D. Hauglustaine, W. Lin, V. Thouret, X. Xu, Y. Zhang, Impact of the Precursors Emissions Reductions on the Recent Evolution of Pollutants in China, American Geophysical Union (AGU) Fall meeting, 9-13 December 2019 (invited)

I. Makni, I. Coll, A. Elessa-Etuman and T. Benoussaïd, Towards a better assessment of individual exposure: a simple statistical approach to describe the heterogeneity of urban air quality, Air quality conference 2020, Thessaloniki.

## Références

Dupont S., J.-L. Rajot, M. Labiadh, G. Bergametti, S. Alfaro, C. Bouet, R. Fernandes, B. Khalfallah, E. Lamaud, B. Marticorena, J.-M. Bonnefond, S. Chevaillier, D. Garrigou, T. Henry-des-Tureaux, S. Sekrafi, and P. Zapf (2018), Aerodynamic parameters over an eroding bare surface: reconciliation of the Law-of-the-wall and Eddy-Covariance determinations. *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, 123(9), 4 490-4 508, 2018.

Bannan, T. J.; Booth, A. M.; Bacak, A.; Muller, J. B. A.; Leather, K. E.; Le Breton, M.; Jones, B.; Young, D.; Coe, H.; Allan, J.; Visser, S.; Slowik, J. G.; Furger, M.; Prevot, A. S. H.; Lee, J.; Dunmore, R. E.; Hopkins, J. R.; Hamilton, J. F.; Lewis, A. C.; Whalley, L. K.; Sharp, T.; Stone, D.; Heard, D. E.; Fleming, Z. L.; Leigh, R.; Shallcross, D. E.; Percival, C. J., The first UK measurements of nitryl chloride using a chemical ionization mass spectrometer in central London in the summer of 2012, and an investigation of the role of Cl atom oxidation. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 2014, 120, (11), 5638-5657.

C.A. Belis, D. Pernigotti, G. Pirovano, O. Favez, J.L. Jaffrezo, J. Kuenen, H. Denier van Der Gon, M. Reizer, V. Riffault, L.Y. Alleman, M. Almeida, F. Amato, A. Angyal, G. Argyropoulos, S. Bande, I. Beslic, J.-L. Besombes, M.C. Bove, P. Brotto, G. Calori, D. Cesari, C. Colombi, D. Contini, G. De Gennaro, A. Di Gilio, E. Diapouli, I. El Haddad, H. Elbern, K. Eleftheriadis, J. Ferreira, M. Garcia Vivanco, S. Gilardoni, B. Golly, S. Hellebust, P.K. Hopke, Y. Izadmanesh, H. Jorquera, K. Krajsek, R. Kranenburg, P. Lazzari, F. Lenartz, F. Lucarelli, K. Maciejewska, A. Manders, M. Manousakas, M. Masiol, M. Mircea, D. Mooibroek, S. Nava, D. Oliveira, M. Paglione, M. Pandolfi, M. Perrone, E. Petralia, A. Pietrodangelo, S. Pilon, P. Pokorna, P. Prati, D. Salameh, C. Samara, L. Samek, D. Saraga, S. Sauvage, M. Schaap, F. Scotto, K. Sega, G. Siour, R. Tauler, G. Valli, R. Vecchi, E. Venturini, M. Vestenius, A. Waked and E. Yubero: Evaluation of receptor and chemical transport models for PM10 source apportionment, *Atmospheric Environment: X*, 5, 2019.

Bertram, T. H.; Thornton, J. A., Toward a general parameterization of N2O5 reactivity on aqueous particles: the competing effects of particle liquid water, nitrate and chloride. *Atmos. Chem. Phys.* 2009, 9, (21), 8351-8363.

Bessagnet, B., Menut, L., Curd, G., Hodzic, A., Guillaume, B., Liousse, C., Moukhtar, S., Pun, B., Seigneur, C. and Schulz, M.: Regional modeling of carbonaceous aerosols over Europe-focus on secondary organic aerosols, *J. Atmos. Chem.*, 61(3), 175–202, doi:10.1007/s10874-009-9129-2, 2008.

Calas, A.; Uzu, G, Besombes, J.; Weber S; Charron, A.; Martins, J.; Albinet, A.; Favez, O.; Brulfert, G.; Meshba, B.; Redaelli, M.; and Jaffrezo, J., Seasonal variations and chemical predictors of Oxidative Potential of PM measured with 2 different methods, for 7 urban French sites, *Atmosphere*, 2019.

Carter, W. (2010). Development of the saprc-07 chemical mechanism. *Atmos Environ*, 44(40):5324 – 5335.

Cholakian, A., Beekmann, M., Colette, A., Coll, I., Siour, G., Sciare, J., Marchand, N., Couvidat, F., Pey, J., Gros, V., Sauvage, S., Michoud, V., Sellegri, K., Colomb, A., Sartelet, K., Langley DeWitt, H., Elser, M., Prévot, A. S. H., Szidat, S., Dulac, F.: Simulation of fine organic aerosols in the western Mediterranean area during the ChArMEx 2013 summer campaign, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 7287-7312, 2018.

Cuesta, J., Kanaya, Y., Takigawa, M., Dufour, G., Eremenko, M., Foret, G., Miyazaki, K., and Beekmann, M.: Transboundary ozone pollution across East Asia: daily evolution and photochemical production analysed by IASI + GOME2 multispectral satellite observations and models, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 9499-9525, <https://doi.org/10.5194/acp-18-9499-2018>, 2018.

Donahue, N. M., Robinson, A. L., Stanier, C. O. and Pandis, S. N.: Coupled partitioning, dilution, and chemical aging of semivolatile organics, *Environ. Sci. Technol.*, 40(8), 2635–2643, doi:10.1021/es052297c, 2006.

Dufour, G., Eremenko, M., Cuesta, J., Doche, C., Foret, G., Beekmann, M., Cheiney, A., Wang, Y., Cai, Z., Liu, Y., Takigawa, M., Kanaya, Y., and Flaud, J.-M.: Springtime daily variations in lower-tropospheric ozone over east Asia: the role of cyclonic activity and pollution as observed from space with IASI, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 10839-10856, doi:10.5194/acp-15-10839-2015, 2015.

Dufour, G., Eremenko, M., Beekmann, M., Cuesta, J., Foret, G., Fortems-Cheiney, A., Lachâtre, M., Lin, W., Liu, Y., Xu, X., and Zhang, Y.: Lower tropospheric ozone over the North China Plain: variability and trends revealed by IASI satellite observations for 2008–2016, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 16439-16459, <https://doi.org/10.5194/acp-18-16439-2018>, 2018.

Elessa Etuman, A., Coll, I., 2018. OLYMPUS v1.0: Development of an integrated air pollutant and GHG urban emissions model - Methodology and calibration over the greater Paris. *Geoscientific Model Development Discussions*, : 1-29. DOI : <https://doi.org/10.5194/gmd-2018-154>.

Fortems-Cheiney, A., Dufour, G., L. Hamaoui-Laguél, G. Foret, G. Siour, M. Van Damme, F. Meleux, P.-F. Coheur, C. Clerbaux, L. Clarisse, O. Favez, M. Wallasch, and M. Beekmann, Unaccounted variability in NH<sub>3</sub> agricultural sources detected by IASI contributing to European spring haze episode, *Geophys. Res. Lett.*, 43, doi:[10.1002/2016GL069361](https://doi.org/10.1002/2016GL069361), 2016.

Gaudel, A., O. R. Cooper, G. Ancellet, B. Barret, A. Boynard, J. P. Burrows, C. Clerbaux, P.-F. Coheur, J. Cuesta, E. Cuevas, S. Doniki, G. Dufour, F. Ebojje, G. Foret, O. Garcia, M. J. Granados-Munoz, J. W. Hannigan, F. Hase, B. Hassler, G. Huang, D. Hurtmans, D. Jaffe, N. Jones, P. Kalabokas, B. Kerridge, S. Kulawik, B. Latter, T. Leblanc, E. Le Flochmoen, W. Lin, J. Liu, X. Liu, E. Mahieu, A. McClure-Begley, J. L. Neu, M. Osman, M. Palm, H. Petetin, I. Petropavlovskikh, R. Querel, N. Rapp, A. Rozanov, M. G. Schultz, J. Schwab, R. Siddans, D. Smale, M. Steinbacher, H.

Tanimoto, D. W. Tarasick, V. Thouret, A. M. Thompson, T. Trickl, E. Weatherhead, C. Wespes, H. M. Worden, C. Vigouroux, X. Xu, G. Zeng, J. Ziemke, Tropospheric Ozone Assessment Report: Present-day distribution and trends of tropospheric ozone relevant to climate and global atmospheric chemistry model evaluation. *Elem Sci Anth*, 6: 39. DOI: <https://doi.org/10.1525/elementa.291>, 2018.

Kardous M., G. Bergametti, and B. Marticorena, Wind tunnel experiments on the effects of tillage ridge features on wind erosion horizontal fluxes, *Ann. Geophys.*, 23, 3 195-3 206, 2005.

Labiadh M. T., Quantification de l'érosion éolienne sur des surfaces anthropisées: simulations des flux en masse à l'échelle des zones arides tunisiennes, Thèse de doctorat de l'Université Paris Diderot, 2011.

Lannuque, V., Camredon, M., Couvidat, F., Hodzic, A., Valorso, R., Madronich, S., Bessagnet, B. and Aumont, B.: Exploration of the influence of environmental conditions on secondary organic aerosol formation and organic species properties using explicit simulations: development of the VBS-GECKO parameterization, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 1–33, doi:10.5194/acp-2018-233, 2018.

S. Mailler, L. Menut, D. Khvorostiyarov, M. Valari, F. Couvidat, G. Siour, S. Turquety, R. Briant, P. Tuccella, B. Bessagnet, A. Colette, and F. Meleux: [CHIMERE-2017: from urban to hemispheric chemistry-transport modeling](#), *Geosci. Model Dev.*, 10, 2397-2423, 2017.

Marticorena B., and Bergametti G.: Modeling the atmospheric dust cycle: 1. Design of a soil-derived dust emission scheme, *J. Geophys. Res.*, 100(D8), 16 415-16 430, 1995.

Menut, L., B. Bessagnet, D. Khvorostyanov, M. Beekmann, N. Blond, A. Colette, I. Coll, G. Curci, G. Foret, A. Hodzic, S. Mailler, F. Meleux, J.-L. Monge, I. Pison, G. Siour, S. Turquety, M. Valari, R. Vautard, and M. G. Vivanco, CHIMERE 2013: a model for regional atmospheric composition modeling, *Geosci. Model Dev.*, 6, 981–1028, 2013.

Ogée, J., Brunet, Y., Loustau, D., Berbigier, P. and Delzon, S.: MuSICA, a CO<sub>2</sub>, water and energy multilayer, multileaf pine forest model: Evaluation from hourly to yearly time scales and sensitivity analysis, *Global Change Biology*, 9(5), 697–717, doi:10.1046/j.1365-2486.2003.00628.x, 2003.

Shrivastava, M., Easter, R. C., Liu, X., Zelenyuk, A., Singh, B., Zhang, K., Ma, P., Chand, D., Ghan, S., Jimenez, J. L., Zhang, Q., Fast, J., Rasch, P. J. and Tiitta, P.: Global transformation and fate of SOA: Implications of low-volatility SOA and gas-phase fragmentation reactions, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120(9), 4169–4195, doi:10.1002/2014JD022563. Received, 2015.

Sommariva, R.; Hollis, L. D. J.; Sherwen, T.; Baker, A. R.; Ball, S. M.; Bandy, B. J.; Bell, T. G.; Chowdhury, M. N.; Cordell, R. L.; Evans, M. J.; Lee, J. D.; Reed, C.; Reeves, C. E.; Roberts, J. M.; Yang, M. X.; Monks, P. S., Seasonal and geographical variability of nitryl chloride and its precursors in Northern Europe. *Atmospheric Science Letters* 2018, 19, (8).

Tarasick, D., Galbally, I.E., Cooper, O.R., Schultz, M.G., Ancellet, G., Leblanc, T., Wallington, T.J., Ziemke, J., Liu, X., Steinbacher, M., Staehelin, J., Vigouroux, C., Hannigan, J.W., García, O., Foret, G., Zanis, P., Weatherhead, E., Petropavlovskikh, I., Worden, H., Osman, M., Liu, J., Chang, K.-L., Gaudel, A., Lin, M., Granados-Muñoz, M., Thompson, A.M., Oltmans, S.J., Cuesta, J., Dufour, G., Thouret, V., Hassler, B.,



Trickl, T. and Neu, J.L., 2019. Tropospheric Ozone Assessment Report: Tropospheric ozone from 1877 to 2016, observed levels, trends and uncertainties. *Elem Sci Anth*, 7(1), p.39. DOI: <http://doi.org/10.1525/elementa.376>, 2019.

Toillier, F., Alligier, L., Patier, D., Routhier, J.-L., 2005. Vers un modèle global de simulation de la logistique urbaine: FRETURB, version 2. : 187.

Viguié, V., 2012. Urban dynamics modelling : application to economics assessment of climate change. phdthesis, Université Paris-Est.

Wardrop, J. G., Whitehead, J. I., 1952. Correspondence. Some theoretical aspects of road traffic research. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1, 5 : 767-768. DOI : 10/frrdcn.

Weber, S.; Uzu, G.; Calas, A.; Chevrier, F.; Besombes, J. L.; Charron, A.; Salameh, D.; Ježek, I.; Močnik, G.; Jaffrezo, J. L., An apportionment method for the oxidative potential of atmospheric particulate matter sources: application to a one-year study in Chamonix, France. *Atmos. Chem. Phys.*, 18 (13), 9617-9629, 2018.

Weber, S.; Salameh, D.; Albinet, A.; Alleman, L.Y.; Waked, A.; Besombes, J.-L.; Jacob, V.; Guillaud, G.; Meshbah, B.; Rocq, B.; Hulin, A.; Dominik-Sègue, M.; Chrétien, E.; Jaffrezo, J.-L.; Favez, O. Comparison of PM10 Sources Profiles at 15 French Sites Using a Harmonized Constrained Positive Matrix Factorization Approach. *Atmosphere* 2019, 10, 310.

Q.J. Zhang, M. Beekmann, F. Drewnick, F. Freutel, J. Schneider, M. Crippa, A. Prevot, U. Baltensperger, L. Poulain, A. Wiedensohler, J. Sciare, V. Gros, A. Borbon, A. Colomb, V. Michoud, J-F. Doussin, H. A. C. Denier van der Gon, M. Haeffelin, J.-C. Dupont, G. Siour, H. Petetin, B. Bessagnet, S.N. Pandis, A. Hodzic, O. Sanchez, C. Honoré, and O. Perrussel: Formation of organic aerosol in the Paris region during the MEGAPOLI summer campaign: evaluation of the volatility-basis-set approach within the CHIMERE model, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 5767-5790, 2013.