



**METEO FRANCE**  
Toujours un temps d'avance



Réf. : DRC-16-141139-03123A

le 25 mars 2014



## **Programme GMES du ministère du Développement durable (GMES-MDD)**

### **Rapport final du projet :**

### **ADONISS: Assimilation de DONnées de qualité de l'air IN-Situ et Satellite pour les services GMES Atmosphère**

**Laurence ROUÏL**, Responsable du Pôle Modélisation Environnementale et Décision,  
INERIS

#### **Document rédigé avec les contributions de :**

- M. Beekmann, A. Coman, G. Dufour, M. Eremenko, G. Foret, B. Gaubert (CNRS/LISA)
- Emanuele Emili, Elodie Jaumouillé (CERFACS)
- Virginie Marécal (CNRM-GAME)
- Frédéric Meleux, Laure Malherbe (INERIS)

## TABLE DES MATIERES

1	Rappel du contexte du projet.....	3
2	Cas de l'ozone.....	5
2.1	Données d'observations .....	5
2.1.1	IASI .....	5
2.1.2	IASI-GOME2 .....	6
2.2	Assimilation de données.....	8
2.2.1	MOCAGE-VALENTINA .....	8
2.2.2	CHIMERE-ENKF .....	9
2.2.3	CHIMERE KRIGING-based.....	9
2.3	Validation et résultats .....	9
2.3.1	Comparaison de différents produits IASI avec MOCAGE .....	10
2.3.2	Comparaison de différentes colonnes verticales IASI avec MOCAGE.....	11
2.3.3	Comparaison des analyses IASI avec CHIMERE et MOCAGE .....	12
2.3.4	Assimilation conjointe de plusieurs instruments avec MOCAGE (IASI, AIRBASE, MLS).....	15
2.4	avancées & apports du projet .....	16
2.4.1	Principales conclusions.....	16
2.4.2	Quelques limites.....	17
2.4.3	recommandations.....	17
3	Cas du dioxyde d'azote .....	18
4	Cas des Particules techniques d'assimilation développées.....	19
4.1	Description des travaux d'assimilation .....	19
4.1.1	MOCAGE-VALENTINA 3D-VAR .....	19
4.1.2	CHIMERE KRIGING-based approach.....	20
4.2	avancées & apports du projet .....	23
5	Conclusions .....	24
6	Références .....	25

## 1 RAPPEL DU CONTEXTE DU PROJET

Les services développés dans le cadre du programme COPERNICUS, initialement nommé GMES (Global Monitoring for Environment and Security), sont des systèmes opérationnels d'évaluation, de prévision et d'analyse des pollutions et des risques, afin de faciliter l'aide à la décision des autorités européennes, nationales voire locales, et d'appuyer la conception de législations environnementales. Ces services couvrent les différents compartiments de l'environnement, dont l'atmosphère. Les services atmosphère, récemment baptisés CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Services) par ECMWF qui en assure désormais la coordination par délégation de la Commission Européenne, couvrent aussi bien les questions de composition chimique de l'atmosphère à l'échelle globale (gaz à effet de serre, gaz réactifs, aérosols), que de qualité de l'air à l'échelle régionale (Europe), que d'exposition aux rayonnements UV.

Le projet ADONISS, financé par le programme GMES-MDD mis en place par le Ministère en charge de l'Environnement, s'inscrit dans l'optique du développement de travaux de recherche complémentaires à ceux dédiés à la mise en place de ces services européens de surveillance de l'atmosphère. Il a le double objectif de :

- 1. Développer des méthodes de représentation cartographique de la qualité de l'air à l'échelle régionale (Europe) permettant d'accéder à des cartes de haute qualité,**
- 2. Evaluer la possibilité d'utiliser à cette fin toutes données d'observation (in-situ ou satellite) disponibles.**

Cette capacité à produire des cartes des champs de concentrations de polluants atmosphériques qui soient les « plus proches possible » de la réalité est déterminante pour des applications liées à la surveillance réglementaire de la qualité de l'air. En effet, la mise en œuvre de la législation sur la qualité de l'air (Directive Unifiée sur la qualité de l'air 2008/50/CE) prévoit que les états membres doivent rapporter sur le nombre et l'intensité des dépassements des valeurs limites ( $PM_{10}$  et  $NO_2$ ), sur l'aire géographique et le nombre de personnes exposées à ces dépassements et sur l'origine des épisodes de pollution. Il s'agit du rapportage réglementaire qui s'appuie sur les données ponctuelles observées par les réseaux de mesure nationaux, et qui doivent donc être interprétées en termes cartographiques. Pour le gestionnaire de la qualité de l'air, national ou local, il s'agit d'un élément de compréhension de la nature et du comportement des phénomènes de pollution atmosphérique qui touchent les régions françaises. De plus les cartographies dites « analysées » qui combinent donc simulations et observations sont certainement le meilleur moyen de communiquer au public les informations nécessaires à sa sensibilisation sur les questions de pollution atmosphérique. En revanche cette approche novatrice par rapport à l'exploitation, plus traditionnelle, de mesures ponctuelles aux points d'observation, doit démontrer sa pertinence et sa fiabilité. L'inscrire dans un contexte opérationnel de production quotidienne d'informations sur la qualité de l'air nécessite de disposer de méthodes non seulement précises et robustes, mais aussi compatibles, en terme de temps de calcul avec les contraintes des utilisateurs décisionnaires.

**Le projet ADONISS** a donc pour objectif de mettre au point des méthodes de génération de cartes de champs de concentrations de polluants atmosphériques. Il s'appuie sur le développement de méthodes d'assimilation de données d'observation dans des modèles déterministes de qualité de l'air. Ainsi, il repose sur la mise en œuvre des deux modèles français de chimie-transport **CHIMERE** et **MOCAGE** qui ont participé aux projets préfigurant la mise en place des services CAMS (suite de projets MACC-I à MACC-III) et contribuent aujourd'hui à la production opérationnelle dans CAMS, de prévisions, d'analyses quotidiennes et de re-analyses annuelles de qualité de l'air, et sur l'exploitation de données d'observations in-situ et spatiales.

Il s'est focalisé sur le développement et l'évaluation de méthodes d'assimilation de données dans l'optique de contribuer à l'amélioration de la qualité des services bâtis sur CHIMERE et MOCAGE pour CAMS et de soutenir l'activité des équipes de recherche françaises sur ces sujets. L'idée est également d'améliorer la compétitivité des outils français pour CAMS vis-à-vis des travaux menés par les autres équipes européennes.

Les équipes participant au projet ADONISS ont toutes été impliquées dans les projets MACC. Leurs tâches dans le cadre du projet ADONISS concernent:

- **CNRM-GAME** : Evaluation des filières d'analyses développées par le CERFACS (système MOCAGE-VALENTINA), et intégration dans les chaînes opérationnelles MACC/CAMS.
- **CERFACS** : Développement du système d'assimilation de données MOCAGE-VALENTINA : extension aux PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub> et assimilation des données ozone de IASI.
- **CNRS/LISA** : Calcul de champs d'ozone observés à partir de IASI, mise à jour de la chaîne CHIMERE-EnKF pour assimiler les champs d'ozone et évaluation de différentes filières.
- **INERIS** : Intégration opérationnelle de la nouvelle chaîne CHIMERE-EnKF et remise à jour des méthodes d'interpolation optimale pour les PM<sub>10</sub>.

Il est important de noter que Météo France est désormais le pilote des services de production opérationnelle de prévision et de cartographie de la qualité de l'air (CAMS-50) et travaille sur ce projet en forte collaboration avec l'INERIS.

Le présent document synthétise les résultats obtenus à l'issue du projet. La plus grosse partie des travaux de recherche se sont focalisés sur l'ozone (O<sub>3</sub>) et le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) comme acté au moment du lancement du projet. Le projet a été l'occasion d'évaluer l'apport des observations satellites pour l'élaboration de cartographies de ces deux polluants et d'investiguer les difficultés potentielles induites par la mise en place de plates-formes d'assimilation multi-polluants. Pour les particules, nous nous sommes essentiellement focalisés sur les données issues des réseaux de mesures in-situ, et plutôt les réseaux réglementaires, qui permettent de bénéficier d'un nombre important de données remontées en temps réel par les états membres en application des Directives Européennes sur la qualité de l'air (en particulier la directive 2008/50/CE). Il présente donc les résultats obtenus pour chacun de ces polluants en déclinant les différentes étapes du projet :

- Collecte et caractérisation des observations
- Développement des méthodes d'assimilation de données
- Evaluation
- Intégration dans les systèmes opérationnels Copernicus et PREv'air.

Pour évaluer et contraindre les modèles, nous utilisons à la fois les observations fournies par les stations d'observation de surface mais aussi par certains satellites notamment pour les concentrations de NO<sub>2</sub> et d'O<sub>3</sub>.

Les données de surface utilisées dans le cadre d'ADONISS sont issues des réseaux de mesure réglementaires (O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>) développés dans les Etats Membres de l'Union Européenne, et dont les données sont rapportées selon un protocole réglementaire (Décision 2011/850/UE) dans la base AQ e-reporting (anciennement nommée AIRBASE) maintenue par l'Agence Européenne de l'Environnement (AEE). L'accès à ces données est organisé par l'INERIS dans le cadre de PREv'AIR et par le CNRM-GAME pour les services européens Copernicus, dans le cadre du projet CAMS.

Les données issues de réseaux de recherche, et notamment celles relatives à la composition chimique des aérosols (réseau ACTRIS [www.actris.net](http://www.actris.net)) n'ont pas été considérées dans le cadre du projet ADONISS.

Un travail important de développement a donc été mené sur le traitement et l'utilisation des données satellite. Les résultats qui s'y rapportent sont également détaillés ci-dessous.

## 2 CAS DE L'OZONE

L'assimilation des observations d'ozone de surface dans les modèles régionaux de chimie transport est relativement répandue, c'est notamment le cas dans les modèles CHIMERE (Blond et al, 2003 ; Gaubert et al, 2014) et MOCAGE (Jaumouillé et al, 2013) et notamment dans leurs versions « opérationnelles » (PREVAIR, Honoré et al, 2008 ; MACC-III, Marécal et al, 2015). Ces dernières années la disponibilité de données d'observations satellitaires d'ozone de bonne qualité dans la basse troposphère, notamment celles produites à partir de l'instrument IASI (Eremenko et al, 2008 ; Dufour et al., 2012), a ouvert de nouvelles perspectives pour la surveillance de l'ozone. Plusieurs études exploratoires ont déjà montré comment ces observations pouvaient être utilisées en combinaison avec les modèles de chimie-transport (Coman et al, 2012 ; Emili et al. 2014). Dans le cadre de ce projet, l'objectif était de compléter ces études en montrant la dépendance des résultats à la nature des observations utilisées, des modèles et des méthodes d'assimilation.

### 2.1 DONNEES D'OBSERVATIONS

Les observations satellitaires utilisées dans le cas de l'ozone sont toutes produites à partir de **l'instrument IASI (et GOME2 dans le cas du produit couplé UV-TIR)** et développées spécifiquement pour ce projet ou la suite de projets MACC-II/MACC-III.

#### 2.1.1 IASI

Les observations IASI d'ozone et les « retrievals » associés ont déjà été évalués (Dufour et

al, 2012) et utilisés pour de nombreuses études de la composition de l'atmosphère (e.g. Doche et al., 2014 ; Safieddine et al., 2014 ; Dufour et al., 2015 ; Tocquer et al., 2015). On peut rappeler brièvement que ces observations sont réalisées dans le domaine de l'infrarouge thermique. L'orbite basse de la plateforme héliosynchrone METOP et le balayage de l'instrument IASI (environ 2200 km) permettent d'obtenir un temps de revisite bi-journalier sur un domaine aussi large que l'Europe. La résolution spatiale est d'environ 25 km x 25 km au nadir (avec des pixels de 12 km de diamètre). Les caractéristiques plus détaillées de l'instrument IASI sont notamment décrites par Clerbaux et al 2009.

Des travaux ont été menés dans le cadre d'ADONISS pour développer des colonnes troposphériques partielles Ozone issues de l'instrument IASI (Eremenko et al, 2008). Nous avons notamment travaillé sur l'amélioration de l'algorithme de traitement des observations IASI, en développant une nouvelle technique de régularisation auto-adaptative pour extraire le maximum d'information sur l'ozone d'IASI selon les conditions atmosphériques et géographiques. Ainsi, une version améliorée du produit LISA validé (Dufour et al, 2012) a été développée notamment en optimisant les "a priori" utilisés pour l'inversion de sources. Le produit IASI disponible au LISA (colonnes 0-6km et 0-12km) a été évalué par rapport à des sondages d'ozone (Dufour et al, 2012) montrant un biais faible (<5%) et une erreur raisonnable (<20%). En effet, les profils a priori d'ozone utilisés dans l'inversion sont maintenant mieux adaptés aux faibles latitudes européennes et l'émissivité des surfaces les plus « brillantes » telles que les zones désertiques (Espagne, Turquie, Afrique du Nord) est mieux considérée. La conséquence de ces améliorations porte sur l'augmentation du nombre de pixel (fiables) dans la partie sud de l'Europe notamment sur le bassin Méditerranéen (ces pixels étant auparavant écartés).

Ces observations sont disponibles pour l'Europe et pour les mois d'été 2007 à 2013 sous la forme de colonnes intégrées entre 0 et 6 kilomètres d'altitude avec les « averaging kernel » correspondants. La production d'observations pour l'hiver sera conduite en fonction de la demande. Il doit être noté que ces observations sont validées de façon systématique à partir des sondages d'ozone disponibles.

Enfin, nous avons également comparé le nouveau produit LISA avec d'autres produits ozone issus de IASI et soumis à des chaînes de traitements différents :

- FORLI-ULB (Boynard et al, 2009),
- SOFRID-LA (Barret et al, 2011).

Ces trois produits ont été intercomparés et évalués et ont démontré une bonne capacité à restituer les colonnes d'ozone troposphériques totales et même partielles (Keim et al, 2009; Dufour et al, 2012).

## 2.1.2 IASI-GOME2

IASI+GOME2 est une approche multispectrale innovante combinant les mesures satellitaires de IASI dans l'infrarouge thermique et GOME-2 dans l'ultraviolet. La réalisation de la combinaison des données issues de ces deux instruments a permis la première observation des panaches d'ozone dans la très basse troposphère (au-dessous de 3 km d'altitude) sur terre et sur mer (Cuesta et al, 2013). Cette capacité unique de IASI+GOME-2 est obtenue grâce à une augmentation significative de la sensibilité à l'ozone dans la très basse troposphère, avec un maximum autour de 2 km d'altitude. C'est

une avancée importante pour l'analyse des événements de pollution à l'ozone et pour l'évaluation des modèles de chimie-transport, ainsi que pour leur correction via l'assimilation de données.

Les observations IASI+GOME-2 (Figure 1) produites dans le cadre d'ADONISS ont été validées par rapport aux mesures de sondes d'ozone en Europe (Cuesta et al, 2013) et à l'échelle globale (Caumont et al, 2014, EUMETSAT). La résolution horizontale de IASI+GOME2 est la même que celle de IASI, des pixels de 12 km de diamètre écartés de 25 km au nadir, et le produit est disponible pour des couvertures nuageuses inférieures à 30 % par rapport aux pixels de GOME-2 et des passages satellitaires du matin (à environ 9h30 heure locale).

A noter qu'à partir de 2016, les observations multispectrales IASI+GOME2 seront produites massivement à l'échelle globale et mise à disposition de la communauté par le pôle national de données atmosphériques AERIS.

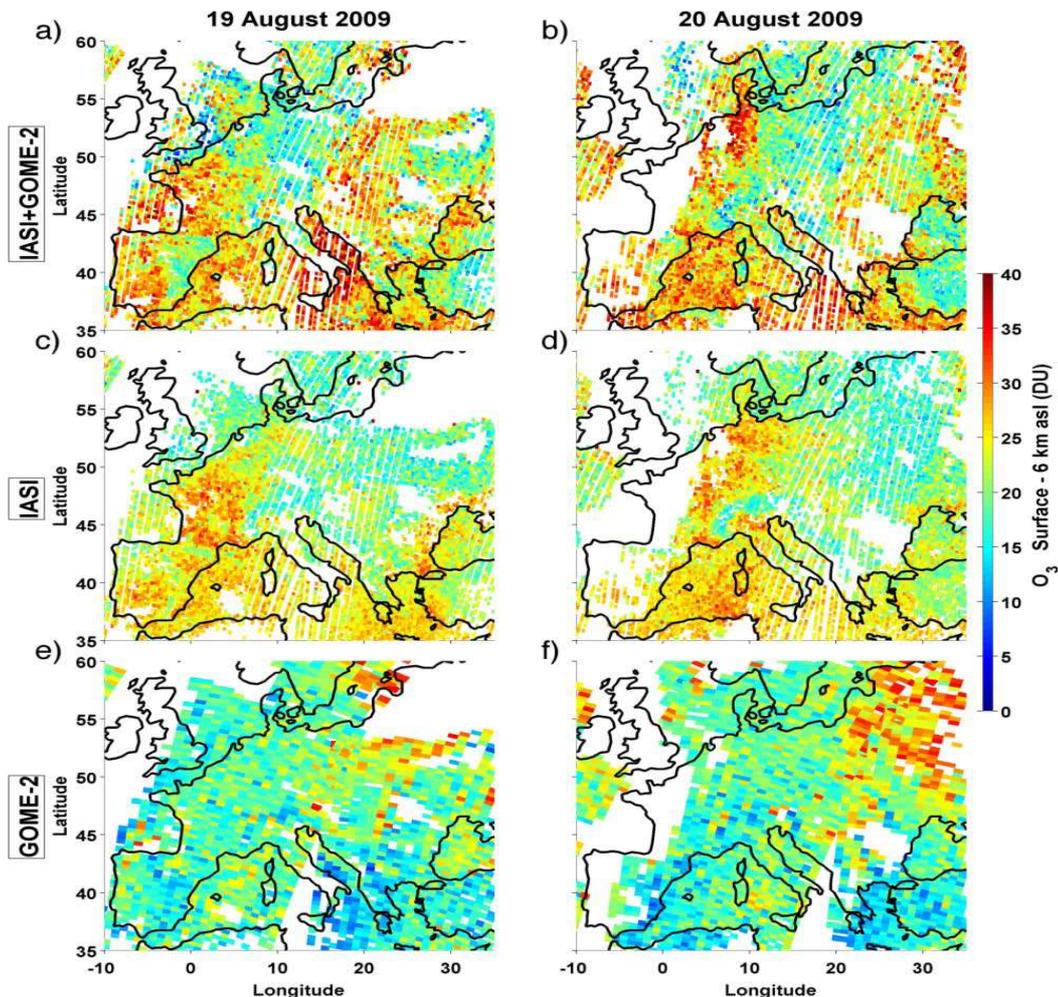


Figure 1. Ozone observations (DU) in the lower troposphere partial column (LT, up to 6 km a.s.l.) over Europe on 19 (left) and 20 (right) August 2009 from (a and b) IASI + GOME-2, (c and d) IASI only and (e and f) GOME-2 only approaches From *cuesta et al, 2013, Figure 9*).

## 2.2 ASSIMILATION DE DONNEES

### 2.2.1 MOCAGE-VALENTINA

La chaîne d'assimilation MOCAGE-VALENTINA pour les analyses de qualité de l'air à l'échelle Européenne repose sur un algorithme de type 3D-Var avec des cycles d'assimilation d'une heure (Figure 2).

Avant le début du projet ADONISS le système opérationnel était utilisé exclusivement pour l'assimilation des mesures d'ozone de surface de la base européenne de données de qualité de l'air in-situ AIRBASE (Jaumouillé et al, 2012). Des développements ont été menés au CERFACS dans le cadre d'ADONISS pour permettre l'assimilation conjointe de plusieurs types d'instruments (**surface et satellites**).

Ces développements ont principalement concerné la matrice de covariance d'erreur d'ébauche (**B**), qui détermine l'ampleur et la distribution spatiale (3D) de la correction appliquée au modèle (incrément). La configuration existante reposait en fait sur une simplification de **B** sur l'axe vertical, adaptée à l'assimilation de mesures à la surface ou satellites, mais pas à l'utilisation conjointe des deux. La nouvelle version du système permet la spécification des termes de corrélation verticale dans **B** en fonction des niveaux verticaux de MOCAGE. Ainsi le nouveau **B** permet une description cohérente des corrélations d'erreur d'ébauche sur toute la verticale et peut être utilisé avec toute combinaison d'instrument à assimiler.

Un autre développement a concerné la spécification des variances d'erreur d'ébauche (termes diagonaux dans **B**). La possibilité de spécifier la variance comme le maximum entre une valeur en pourcentage du champ chimique et une valeur de concentration donnée a été rajouté. Cela permet de traiter certains cas où le modèle sous-estime fortement la concentration réelle localement (cas du NO<sub>2</sub> ou PM<sub>10</sub>), tout en gardant une composante dynamique dans **B** (dûe à la valeur de variance en %). Les expériences d'assimilation décrites dans la section résultats s'appuient sur ces développements.

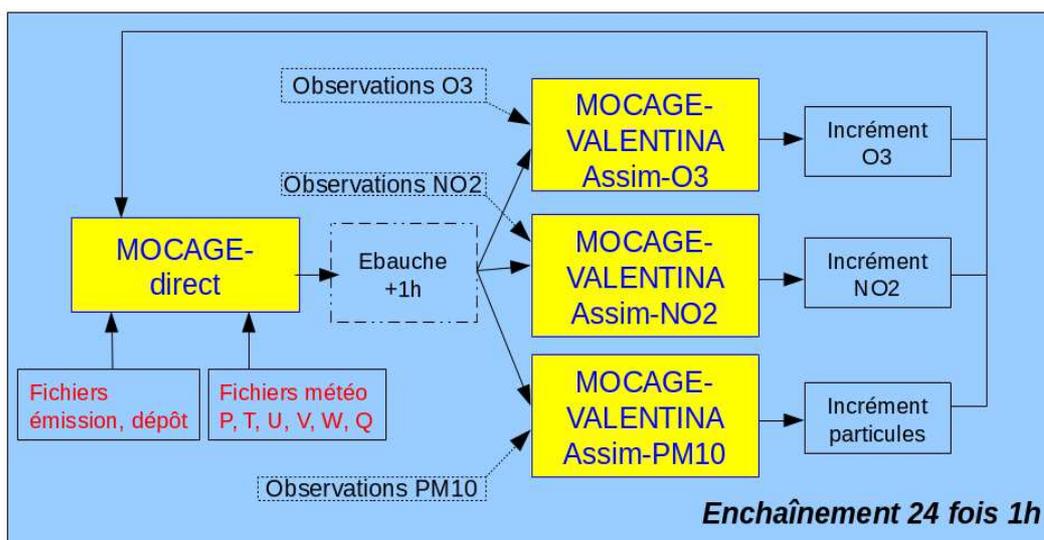


Figure 2. Principe de la chaîne d'assimilation multi-espèces MOCAGE 3D-Var conjointe pour l'ozone, le dioxyde d'azote, et les particules PM<sub>10</sub>. A chaque heure, les observations de chaque espèce sont assimilées indépendamment dans l'ébauche. Les incréments sont ensuite ajoutés dans l'ébauche, qui sert de conditions initiales pour le calcul de l'ébauche à l'heure suivante.

## 2.2.2 CHIMERE-ENKF

La deuxième chaîne d'assimilation est constituée de deux éléments : le modèle de chimie-transport CHIMERE et un Filtre de Kalman d'Ensemble.

L'erreur modèle est représentée dans ce système par des perturbations pseudo-gaussiennes appliquées aux champs 3D d'ozone, perturbations caractérisées par une certaine longueur de decorrélation spatiale (fixée à 200 km) et une certaine variance proportionnelle aux concentrations d'ozone simulées (typiquement 15%).

Il y a deux façons différentes de prendre en compte les observations dans un Filtre de Kalman d'Ensemble :

- 1) stochastique quand on perturbe les observations (opération nécessaire quand on utilise un seul jeu d'observations pour corriger tous les membres d'ensemble, car autrement il y aura une forte réduction de la variance de l'ensemble et donc cela peut conduire à une divergence du filtre),
- 2) déterministe appelée Ensemble Square Root Filter (EnSRF) dans laquelle on privilégie une forme de type racine carrée pour la matrice de covariance d'erreur de l'ensemble et qui évite ainsi l'introduction des erreurs d'échantillonnage supplémentaires dans le système.

Cette dernière méthode a été préférée après évaluation. La taille de l'ensemble a été fixée à 40 membres et la taille du voisinage pris en compte lors de l'analyse locale, choisie pour palier à une possible divergence du filtre et aux fausses corrélations spatiales, a été de 20 pixels maximum dans un rayon de 200 km autour de la maille concernée. Le système d'assimilation Chimere/EnKF décrit ici a été utilisé pour effectuer une simulation couvrant une période de 2 semaines en Juillet 2010 en utilisant deux produits : d'une part des colonnes satellitaires 0-6 km (d'ozone) provenant de IASI(KOPRA), et d'autre part un produit couplé IASI-GOME2.

## 2.2.3 CHIMERE KRIGING-BASED

Pour mémoire, le système opérationnel d'assimilation de donnée ozone utilisé par CHIMERE sur les plateformes PREV'AIR et CAMS repose actuellement sur une procédure de krigeage des données in-situ. Plusieurs approches ont été testées. Initialement, l'analyse était calculée d'après le krigeage des innovations (différences entre mesure et modèle aux points des sites d'observation). Puis la technique a évolué vers un krigeage des données d'observation avec CHIMERE en dérive externe jugé plus efficace qu'un co-krigeage entre observations et CHIMERE. Les données temps réel et validées issues des réseaux d'observation en surface sont ainsi assimilées sur la France et l'Europe, fournissant des résultats de référence pour l'évaluation des techniques d'assimilation de données satellitaires.

## 2.3 VALIDATION ET RESULTATS

Plusieurs expériences d'assimilation d'ozone ont été menées au CERFACS et au LISA, le but étant de quantifier l'apport de l'assimilation des mesures satellites aux analyses opérationnelles d'ozone. On a considéré les observations suivantes pour l'assimilation:

- Le réseau AIRBASE pour contraindre l'ozone à la surface (seulement avec MOCAGE et le krigeage CHIMERE).

- IASI+GOME2 pour contraindre la colonne d’ozone dans la basse troposphère ;
- IASI pour contraindre la colonne troposphérique d’ozone;
- MLS pour contraindre l’ozone en basse stratosphère (seulement avec MOCAGE).

Les mesures des radiosondages d’ozone et une sélection de sites AIRBASE ont été utilisées pour la validation des analyses ainsi obtenues. Une période hivernale et une estivale ont été considérées pour l’étude mais les résultats ne sont présentés ici que pour la période estivale (4-21 Juillet 2010), qui présente plusieurs pics de concentration d’ozone dépassant le seuil réglementaire Européen de 60 ppb d’ozone pour la moyenne sur 8 heures entre 9 et 18 UTC (Figure 3). Pour cette période on a pu utiliser 35 profils d’ozone mesurés par les sondes Européennes et 253 sites AIRBASE pour la validation des champs des modèles (900 sites ont ainsi été assimilés).

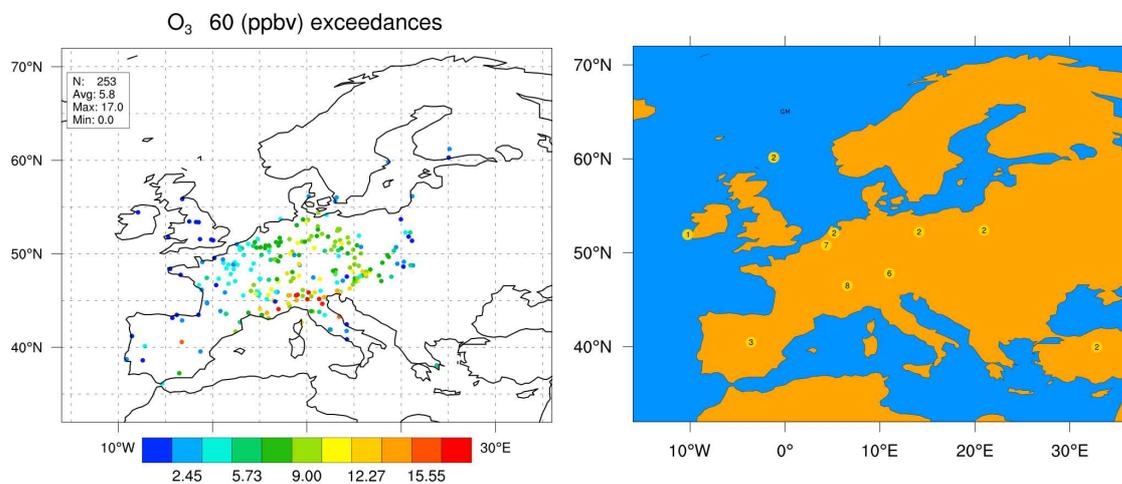


Figure 3. A gauche, position géographique des sites AIRBASE utilisés pour valider les résultats des modèles et nombre de jours de dépassement du seuil journalier d’ozone (60 ppb) dans la période d’étude d’été (4-21/7/2010). A droite, position géographique et nombre de radiosondages utilisés pour valider les profils d’ozone des modèles pendant la même période.

### 2.3.1 COMPARAISON DE DIFFERENTS PRODUITS IASI AVEC MOCAGE

Les 3 produits évalués par Dufour et al. (2012) ont été considérés pour comparer les 3 analyses MOCAGE obtenues en les assimilant avec les radiosondages d’ozone disponibles (Figure 4). La colonne troposphérique (240-1000 hPa,  $\approx$  0-11 km, renommée TOC) issue de chacun des 3 produits a été assimilée, en utilisant les ‘averaging kernels’ respectifs. La même erreur d’observation de 15% a été utilisée pour l’assimilation des trois produits.

Les résultats montrent que les produits développés au LISA (KOPRA) et au LA (SOFRID) donnent des résultats proches et corrigent partiellement le biais négatif du profil de MOCAGE dans la troposphère libre. Le produit développé par le LATMOS-ULB (FORLI) augmente le biais négatif du modèle en troposphère libre sur cet épisode. Une analyse plus approfondie est en cours pour comprendre les raisons de cet écart. On constate que la correction apportée sur la verticale (entre 800 et 300hPa) est cohérente avec la structure des averaging kernels « classiques » de IASI. Comme attendu et du fait de la faible sensibilité de l’instrument dans les plus basses couches de la troposphère, aucun

produit n'améliore significativement l'ozone du modèle dans la couche limite, qui reste fortement biaisé par rapport aux sondes (+30%). On constate également la dispersion des biais (et des erreurs) de ces analyses qui traduit les différences entre les produits satellitaires. Cette variabilité est une information qui doit permettre de caractériser (en partie) l'erreur associée aux observations utilisées. Cet aspect n'a pas pu encore être pleinement exploité mais une analyse d'erreur basée sur un ensemble d'analyse (l'assimilation des trois produits par CHIMERE-EnKF sera ajoutée) sera conduite dans la continuité du projet.

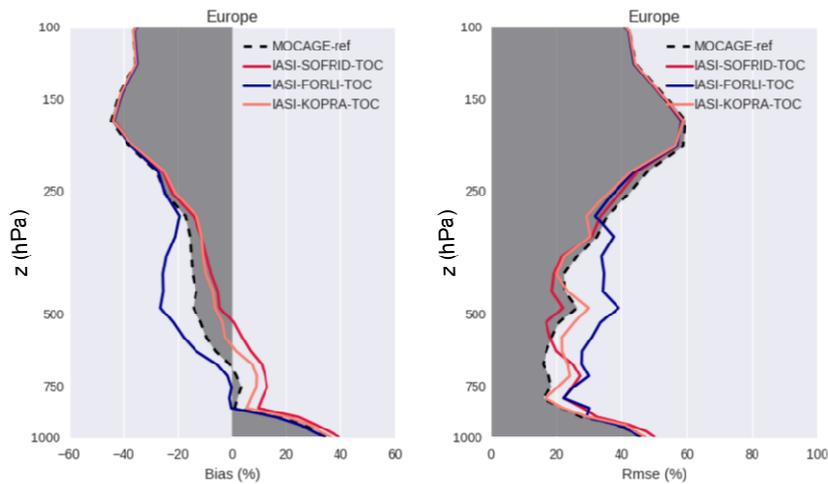


Figure 4. Différences relatives (biais à gauche et RMSE à droite) entre les profils MOCAGE et les radiosondages, pendant la période 4-21/7/2010 en assimilant la colonne troposphérique (240-1000 hPa,  $\approx$ 0-11 km) issue des 3 produits IASI. La simulation de référence sans assimilation est en noir pointillé, en rouge l'analyse avec le produit SOFRID, en bleu avec le produit FORLI et en saumon avec le produit LISA-KOPRA.

### 2.3.2 COMPARAISON DE DIFFERENTES COLONNES VERTICALES IASI AVEC MOCAGE

Du fait de la sensibilité verticale des mesures infrarouges, l'information apportée par IASI porte majoritairement sur l'ozone de la troposphère libre. Cependant, le nombre de degrés de liberté (DOF) peut varier entre 0.1 et 1.3 selon la colonne considérée, l'algorithme de restitution utilisé et les caractéristiques du pixel observé (surface, profil de température etc.). Les restitutions du LISA montrent par exemple un DOF moyen de 0.5-0.6 pour la basse troposphère (colonne 0-6 km, renommée LTOC) au lieu de 0.2-0.5 pour le produit du LA (Dufour et al. 2012). Pour la colonne troposphérique (0-11 km, TOC) le DOF varie plutôt entre 0.7 et 1.1 pour le produit du LA et entre 1 et 1.3 pour le produit du LISA.

La possibilité d'avoir une résolution verticale meilleure est cruciale pour pouvoir corriger les modèles. Notamment, on aimerait pouvoir au moins décorrélérer haute (7-11km) et basse (0-6km) troposphère qui sont souvent impactées par des processus différents. Le produit IASI+GOME2 offre l'opportunité d'améliorer la sensibilité à la surface et cette résolution verticale. Ce produit montre enfin un DOF plus élevé (40 % de plus que le produit IASI-KOPRA) dans les basses couches (2-4 km) grâce au couplage des mesures réalisées dans l'infrarouge par IASI avec les mesures UV de GOME2. Même si le système d'assimilation prend en compte le DOF des restitutions à travers l'utilisation des

'averaging kernels', l'assimilation d'observations avec un DOF trop faible n'est pas envisageable et risque de rajouter du bruit dans les champs du modèle. Pour cette raison, nous avons testé l'assimilation de colonnes pour la troposphère entière (TOC) et pour la basse troposphère (LTOC) avec le produit SOFRID du LA et le produit IASI+GOME2 amélioré (Figure 5).

Les résultats montrent que la colonne SOFRID 0-6 km dégrade l'analyse en troposphère libre par rapport à l'assimilation de la colonne 0-11 km, en ayant toujours un impact négligeable dans la couche limite. L'assimilation de la colonne IASI+GOME2 0-6 km produit une amélioration significative dans la couche limite (réduction d'environ 20 % du biais), mais aussi une dégradation en troposphère libre. Ceci confirme que le produit IASI+GOME2 a une meilleure sensibilité à l'ozone dans la couche limite notamment par rapport à SOFRID. Cependant, il est possible que le biais dans la troposphère libre (700 à 400 hPa) introduit par l'assimilation de deux produits différents soit i) associé à la manière dont l'information est projetée sur la verticale par le système d'assimilation, ii) au besoin d'un degré de liberté supérieur pour la colonne partielle assimilée ou iii) à la manière dont l'erreur des observations satellite est prise en compte sur la verticale.

Pour répondre à ces interrogations, on propose d'assimiler les observations IASI-GOME2 dans CHIMERE. Ces résultats, en cours de production, montreront comment cette information apportée par le produit couplé est traité par un système d'assimilation différent.

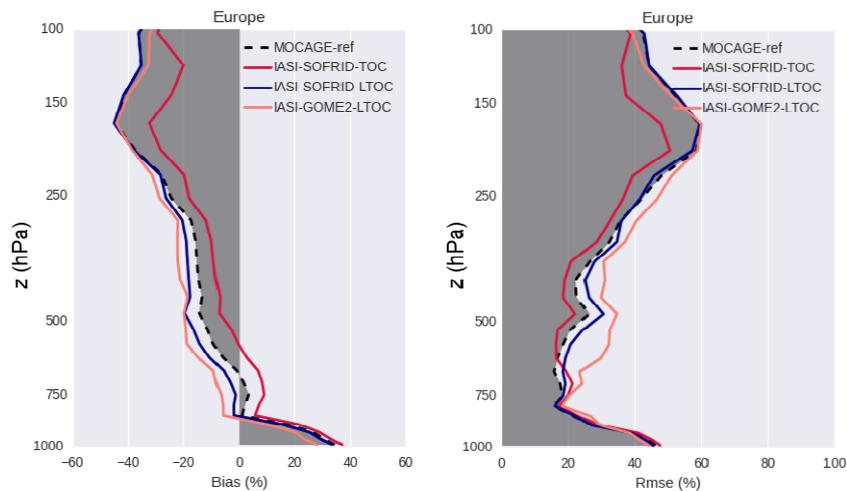


Figure 5. Différences relatives (biais à gauche et RMSE à droite) entre les profils MOCAGE et les radiosondages, pendant la période 4-21/7/2010 en assimilant différentes colonnes troposphériques issues du produit SOFRID et du produit IASI+GOME2. La simulation de référence sans assimilation est en noir pointillé, en rouge l'analyse avec la colonne 240-1000 hPa ( $\approx$ 0-11 km) du produit SOFRID, en bleu avec la colonne 450-1000 hPa ( $\approx$ 0-6 km) du produit SOFRID et en saumon avec la colonne 450-1000 hPa du produit IASI+GOME2.

### 2.3.3 COMPARAISON DES ANALYSES IASI AVEC CHIMERE ET MOCAGE

Les résultats obtenus avec CHIMERE-EnKF sur le cas d'étude estival sont présentés dans cette section, ainsi que les comparaisons des deux systèmes d'assimilation (désignés par la suite par le nom des modèles utilisés MOCAGE et CHIMERE) par rapport aux mêmes données de validation indépendantes (radiosondages et mesures de surface). L'assimilation des observations LISA-KOPRA (colonnes 0-6km) dans CHIMERE montre

l'introduction d'un léger biais négatif par rapport à la simulation de référence (Figure 6). Par ailleurs, on constate que la correction apportée est également partiellement « transférée » dans la couche limite ce qui peut traduire, au vu de la sensibilité verticale des observations IASI, une corrélation verticale des erreurs du modèle (calculées avec un ensemble de simulations) trop importante. Par ailleurs, nous avons comparé, les analyses effectuées en assimilant la colonne 0-6 km de IASI (produit SOFRID pour MOCAGE et LISA-KOPRA pour CHIMERE). Les résultats (Figure 7) montrent dans les deux cas l'introduction d'un léger biais négatif et donc une légère dégradation du profil d'ozone en troposphère libre en assimilant la colonne IASI 0-6 km. Pour obtenir une réponse plus robuste, nous sommes en train de compléter le jeu d'analyses disponibles pour constituer un Ensemble.

Ainsi des analyses CHIMERE issues de l'assimilation de FORLI et SOFRID viendront compléter l'ensemble d'analyses établi avec le système MOCAGE. Cet ensemble permettra d'établir/caractériser l'existence de biais et d'évaluer l'erreur intégrée des analyses, dans le sens où les erreurs des modèles, des systèmes d'assimilation et des observations elles-mêmes seront prises en compte simultanément. Par ailleurs, l'analyse de la Figure 7 montre la difficulté des modèles à également reproduire les concentrations d'ozone en haute troposphère (forte erreurs relatives).

L'analyse de la série temporelle d'ozone à la surface (Figure 8) montre par contre une légère diminution du biais positif de deux modèles comme conséquence de l'assimilation de IASI. Cette diminution traduit le fait que les observations introduisent un biais négatif sur la troposphère libre qui est faiblement « transféré » vers la surface où les modèles de référence sont biaisés positivement sur ce cas d'étude. Cependant l'impact reste faible (ce qui est cohérent avec la sensibilité faible des observations dans la couche limite) et par contre d'autres statistiques sont légèrement dégradées (corrélation horaire et écart type, pas montré).

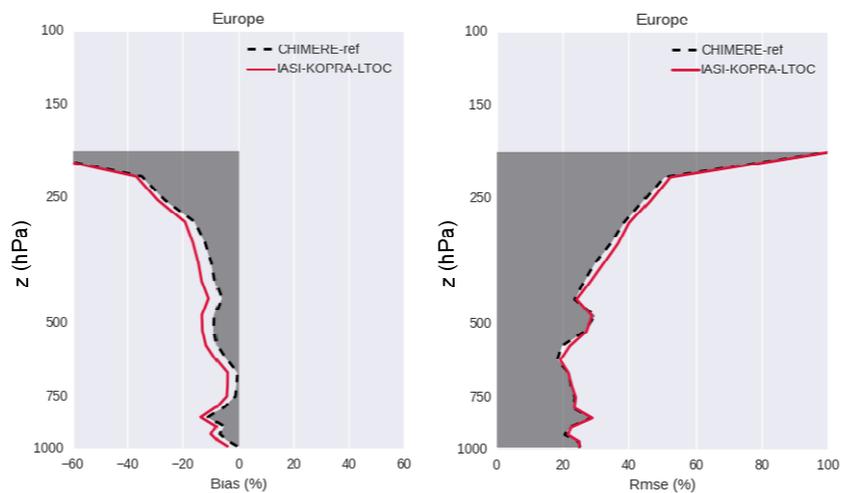


Figure 6. Différences relatives (biais à gauche et RMSE à droite) entre les profils CHIMERE et les radiosondages, pendant la période 7-21/7/2010 en assimilant la colonne troposphérique (0-6 km) issue du produit LISA-KOPRA. La simulation de référence sans assimilation est en noir pointillé, en rouge l'analyse.

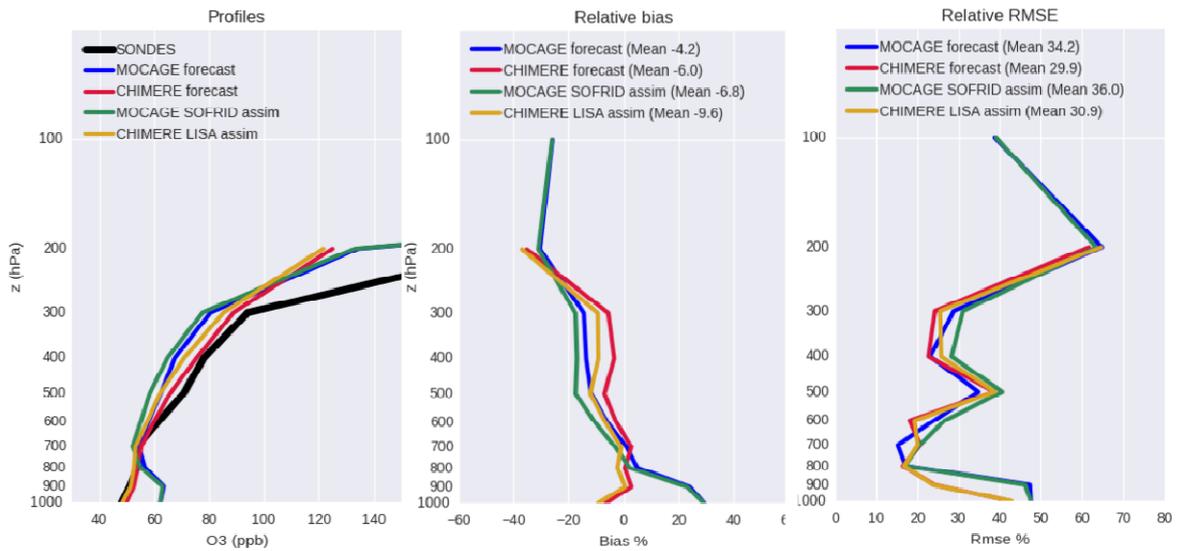


Figure 7. Profils d'ozone MOCAGE et CHIMERE co-localisés sur un sous-ensemble des radiosondages et différences relatives (biais au milieu et RMSE à droite) entre les profils modèle et les radiosondages, pendant la période 7-21/7/2010. En bleu et rouge les simulations de références MOCAGE et CHIMERE, en vert l'analyse MOCAGE avec la colonne 450-1000 hPa issue du produit SOFRID et en jaune l'analyse CHIMERE avec la colonne 0-6 km issue du produit LISA-KOPRA.

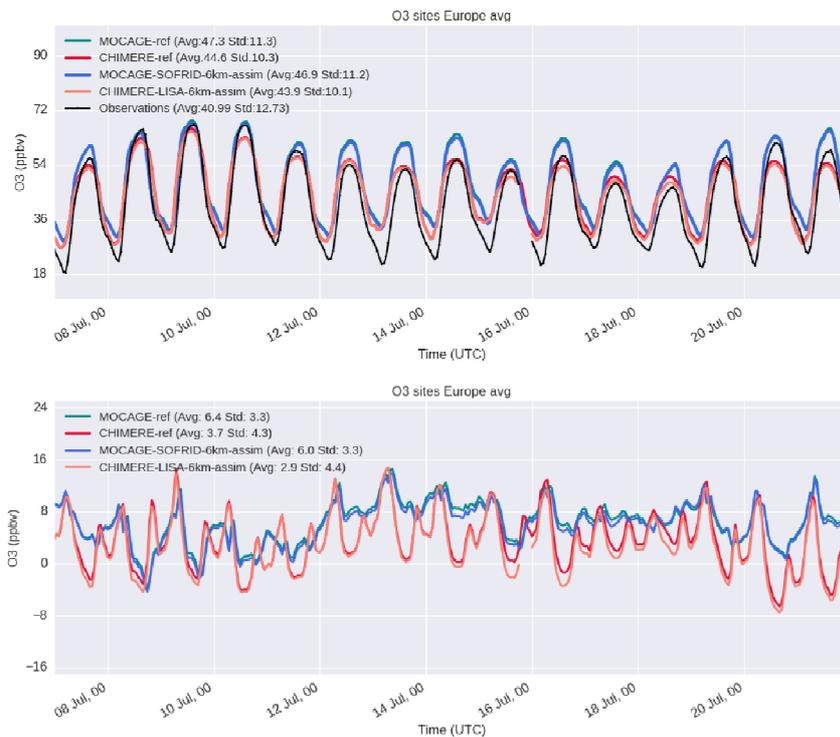


Figure 8. En haut les séries d'ozone à la surface issues des simulations MOCAGE et CHIMERE sur les sites de validation AIRBASE. En noir la moyenne spatiale des observations AIRBASE et en couleur les valeurs correspondants pour les simulations de référence MOCAGE et CHIMERE et les respectives analyses avec la colonne 0-6 km IASI. En bas la moyenne spatiale des différences entre simulations et observations. Les moyennes et les écarts type temporels sont donnés pour chaque série entre parenthèses.

### 2.3.4 ASSIMILATION CONJOINTE DE PLUSIEURS INSTRUMENTS AVEC MOCAGE (IASI, AIRBASE, MLS)

Au-delà des erreurs intrinsèques associées aux observations IASI, une des limitations majeures est liée à la résolution verticale des profils restitués. La stratégie envisageable pour parvenir à une bonne description du profil d’ozone dans toute la troposphère est donc celle d’assimiler plusieurs instruments à la fois. On relègue ainsi IASI à contraindre l’ozone dans la troposphère libre en assimilant la colonne 240-1000 hPa, le réseau AIRBASE pour une correction dans la couche limite et le capteur MLS pour la basse stratosphère. L’assimilation de MLS pourrait se révéler efficace dans le cas de descentes de masses d’air stratosphérique riches en ozone.

Les résultats d’une telle simulation sont présentés en Figure 9, où on peut observer la complémentarité de l’assimilation conjointe et une amélioration du profil d’ozone presque sur tous les niveaux. La validation de l’analyse conjointe et de celle avec le seul produit IASI+GOME2 par rapport au réseau de surface (sites de validation) est enfin présentée en Figure 10. On constate, comme attendu, que l’assimilation des mesures de surface reste la meilleure stratégie pour améliorer significativement les performances du modèle pour ce qui concerne la concentration à la surface (en tout cas pour les régions avec une bonne couverture spatiale des réseaux de surface). Toutefois, on remarque une amélioration issue de l’assimilation de IASI+GOME2 plus significative que pour les autres produits IASI (Figure 8). La stratégie d’assimiler le produit IASI+GOME2 pourrait donc se révéler gagnante pour les régions peu couvertes par le réseau de surface, comme par exemple l’Europe de l’est ou sur la mer (par exemple le bassin Méditerranéen) et les régions côtières ou fortement marquées par le relief pour lesquelles la représentativité des stations de surface est parfois réduite. Concernant la haute troposphère/basse stratosphère, on constate que l’assimilation des observations IASI et MLS permet d’améliorer les analyses comparativement aux simulations de référence comme déjà observé avec l’assimilation des observations IASI sur la colonne 0-12km dans MOCAGE (Figure 5).

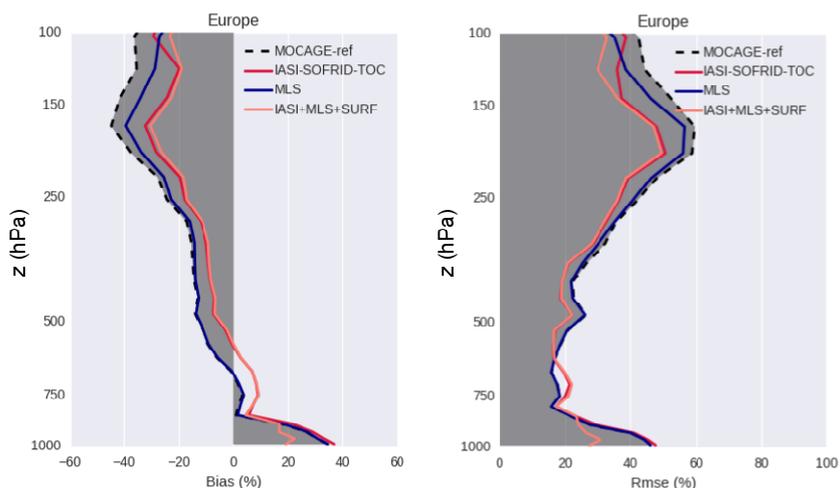


Figure 9. Différences relatives (biais à gauche et RMSE à droite) entre les profils MOCAGE et les radiosondages, pendant la période 4-21/7/2010 en assimilant différentes combinaisons d’instruments. La simulation de référence sans assimilation est en noir pointillé, en rouge l’analyse avec la colonne 240-1000 hPa ( $\approx 0-12$  km) du produit SOFRID, en bleu avec le profil stratosphérique de MLS et en saumon avec tous les instruments disponibles (MLS, IASI et mesures AIRBASE).

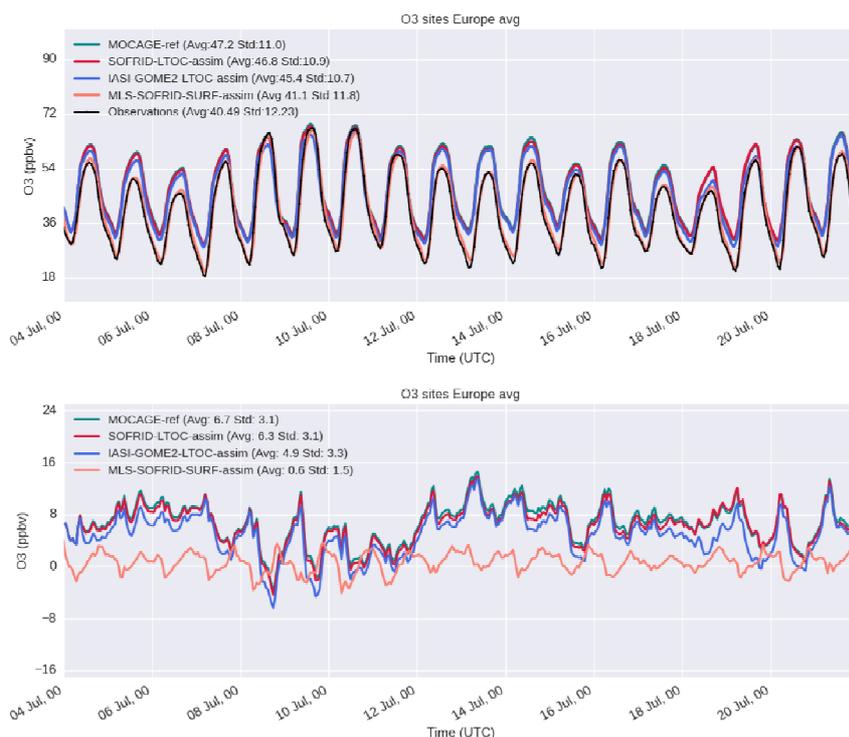


Figure 10. En haut les séries d’ozone à la surface issues des simulations MOCAGE sur les sites de validation AIRBASE. En noir la moyenne spatiale des observations AIRBASE et en couleur les valeurs correspondants pour les simulations de référence MOCAGE et les analyses avec différentes combinaisons d’instruments (colonne SOFRID 450-1000 hPa en rouge, colonne IASI+GOME2 450-1000 hPa en bleu, MLS+SOFRID 240-1000 hPa+AIRBASE en saumon). En bas la moyenne spatiale des différences entre simulations et observations. Les moyennes et les écarts type temporeux sont donnés pour chaque série entre parenthèses.

## 2.4 AVANCEES & APPORTS DU PROJET

### 2.4.1 PRINCIPALES CONCLUSIONS

Ce projet a été l’opportunité de réaliser des exercices d’assimilation pour l’ozone uniques. En effet, c’est la première fois, pour l’ozone troposphérique, qu’un projet sur l’assimilation de données propose la mise en œuvre de d’une assimilation multi-produits (3 produits satellitaires IASI + IASI-GOME2), multi modèles (CHIMERE-EnKF, MOCAGE-VALENTINA) et aussi multi instrument (MLS, IASI et observations de surface).

Cette approche permet notamment de mieux apprécier l’apport des observations satellitaires d’ozone dans la troposphère. A ce stade, on peut confirmer que l’assimilation des observations de colonnes troposphériques permet de conclure à :

- l’amélioration des analyses dans la partie haute de la troposphère (au-dessus de 500 hPa).
- L’impact limité, quel que soit le produit utilisé ou le système d’assimilation utilisé, pour l’amélioration des champs d’ozone dans la basse troposphère est plus limitée.
- Le décalage entre la qualité initiale des simulations de référence sur l’Europe, très élevée (en tout cas pour les valeurs d’ozone moyennes) et la qualité des observations satellitaires, déjà très bonne, qui doit probablement être améliorée.
- Au-delà de la qualité de ces observations, le besoin d’amélioration de la résolution

verticale de ces données. A ce titre, ce projet a montré que l'utilisation des observations IASI-GOME2 (assimilées pour la première fois dans ce projet) est une piste prometteuse tant au niveau de la résolution verticale que de la sensibilité accrue dans la couche limite.

## 2.4.2 QUELQUES LIMITES..

Il faut cependant souligner trois aspects légèrement limitant du projet :

- Une partie des exercices d'assimilation initialement prévus n'a pas pu être réalisé, notamment pour la production des analyses CHIMERE dont la méthode d'assimilation a dû être revue en cours de projet.
- Ainsi, l'absence d'analyse CHIMERE pour deux des trois produits IASI et pour IASI-GOME2 limite un peu nos conclusions à ce stade. Par contre ces analyses sont en cours de production et une analyse complète est prévue dans les mois à venir qui s'ils ne sont pas dans le rapport du projet pourront être publiés dans un journal scientifique.
- Le coût de calcul des approches d'assimilation n'a pas permis de réaliser des exercices sur des périodes très longues. On espère néanmoins dans le cas des observations IASI-GOME2 que d'autres exercices seront réalisés pour mieux caractériser l'apport de ces observations.
- Enfin, si on s'intéresse aux observations satellitaires elles-mêmes, on peut souligner à nouveau, le manque de résolution verticale et de sensibilité à la surface des observations IASI, notamment pour les applications qualité de l'air en Europe mais ces aspects sont rediscutés dans la section recommandation.

## 2.4.3 RECOMMANDATIONS

Dans une perspective de mise en œuvre opérationnelle, il nous est possible d'émettre les recommandations suivantes :

1. Si l'utilisation des observations IASI pour améliorer les systèmes de prévision de la qualité de l'air à **la surface et dans la basse troposphère** sur l'Europe semble d'une **portée limitée, leur utilisation pour contraindre l'ozone troposphérique à l'échelle hémisphérique des latitudes moyennes doit être envisagée**. En effet, on a pu montrer que l'assimilation des observations IASI permettait d'améliorer les analyses dans la haute troposphère et on peut supposer qu'elles puissent également servir à mieux contraindre les modèles de grande échelle qui sont nécessaires **pour fixer les conditions aux limites des systèmes régionaux et pour étudier le transport longue distance de l'ozone**. On doit également noter que les observations d'ozone IASI vont sans doute permettre d'apporter une bonne contrainte aux modèles dans les régions où les observations sont moins nombreuses et les forçages des modèles (notamment les émissions) moins bien caractérisés.
2. **Le potentiel des observations couplant UV et IR comme les observations IASI-GOME2 doit être encore investigué**. La possibilité d'avoir une meilleure résolution

verticale et une sensibilité plus importante dans la basse troposphère répond à une partie des limitations des observations IASI. On peut également souligner que ce type de couplage pourrait être encore potentiellement amélioré (en terme de sensibilité à la surface et donc de résolution verticale) par l'ajout des bandes spectrales du visible dans les inversions.

3. **Une nouvelle génération d'instruments sera disponible dans le futur** (IASI-NG, UVNS). Ces instruments devraient être plus précis. La **combinaison** d'instruments plus précis et pouvant être couplés offre des perspectives prometteuses pour la surveillance de la qualité de l'air. L'étude de ces instruments à travers des expériences d'observations simulées est d'ores et déjà possible et doit permettre de préparer/imaginer les futurs systèmes opérationnels. La possibilité d'avoir des observations plus fréquentes est aussi un des enjeux de ce genre d'exercice.
4. L'aspect opérationnalisation n'a pas été réellement abordé dans le projet mais les **éléments sont réunis pour que les observations satellitaires d'ozone soient utilisées dans une chaîne d'analyse de la qualité de l'air opérationnelle** de type CAMS ou PREv'air. Concernant IASI, le produit opérationnel EUMETSAT (basé sur l'algorithme FORLI) est disponible à l'échelle globale. C'est une opportunité de tester son assimilation notamment dans le cadre des exercices de ré-analyses annuelles de Copernicus pour avoir une vision de leur potentiel sur des périodes plus longues. Ces ré-analyses peuvent être menées aussi bien par des systèmes régionaux que globaux. Par ailleurs, le produit IASI-GOME2 est aussi en voie d'opérationnalisation par le CNES, toujours à l'échelle globale et de ce fait son utilisation (notamment pour les ré-analyses) est envisageable à partir de 2016.

### 3 CAS DU DIOXYDE D'AZOTE

Concernant les observations satellitaires, les observations de NO<sub>2</sub> de l'instrument OMI (Boersma et al. 2004, 2011) développées par le KNMI sont récupérées (et utilisées) à partir du site <http://www.temis.nl/airpollution/no2.html> en temps quasi-réel.

Les investigations ont été réalisées sur le modèle MOCAGE et les principales conclusions sont rapportées ci-dessous.

Les colonnes troposphériques de NO<sub>2</sub> calculées à partir des observations de OMI et GOME2 ont été assimilées dans MOCAGE. Ces développements ont pu être mis en œuvre de manière opérationnelle dans le cadre du projet MACC-III. Les erreurs d'observation et les 'averaging kernels' présents dans les produits ont été pris en compte pour l'assimilation. Comme il n'existe pas de réseau de mesure des profils troposphériques de NO<sub>2</sub> (contrairement aux radiosondages pour l'ozone), la validation a été réalisée avec le réseau de surface AIRBASE.

Les séries temporelles de NO<sub>2</sub> pour les seuls sites marqués comme ruraux sont montrés en Figure 11 (39 sites). L'impact de l'assimilation des observations satellitaires de NO<sub>2</sub> est observable seulement durant la période hivernale (Janvier-Février 2012), étant donnée la

durée de vie du NO<sub>2</sub> trop courte en été pour que la fréquence d'observations des satellites (2 passages par jour) puisse apporter une correction significative au modèle.

Cependant, l'effet reste faible aussi en hiver et la correction est positive seulement pour les sites ruraux. **On peut conclure que l'assimilation des colonnes satellitaires de NO<sub>2</sub> n'est pas pertinente avec le système d'assimilation actuel.** L'assimilation conjointe des satellites et des observations AIRBASE n'est pas censée rapporter plus de précision que la seule assimilation des mesures de surface. Le développement d'une méthode de correction des sources d'oxydes d'azote du modèle à travers l'assimilation pourrait permettre dans le futur de mieux contraindre le modèle avec des observations de NO<sub>2</sub> peu fréquentes telle que celles de OMI et GOME2.

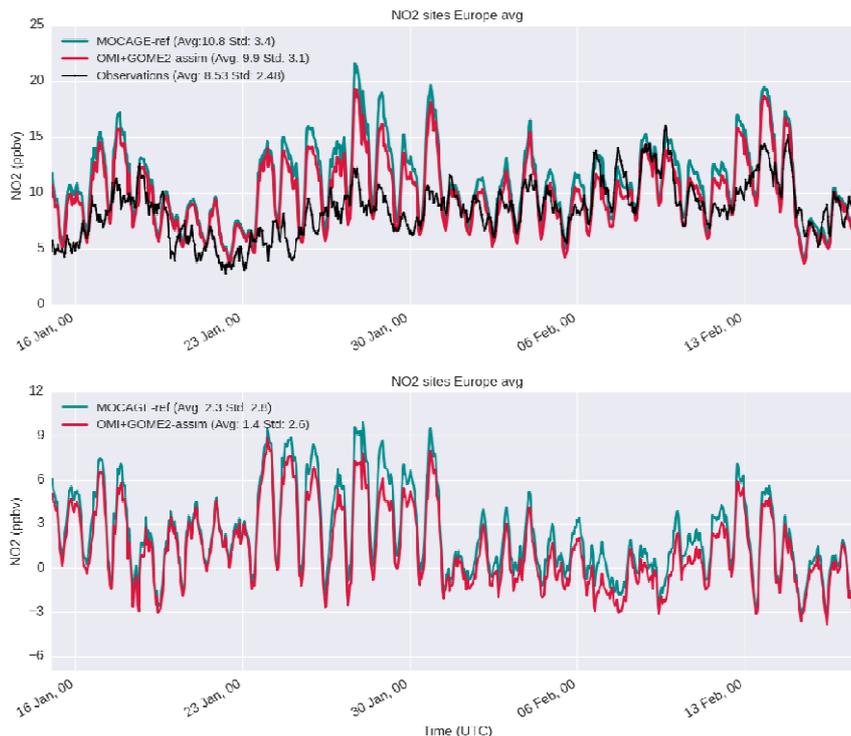


Figure 11. En haut les séries de NO<sub>2</sub> à la surface issues des simulations MOCAGE sur les sites de validation AIRBASE (type 'rural') pendant la période 15-1-2012/ 18-2-2012. En noir la moyenne spatiale des observations AIRBASE et en couleur les valeurs correspondants pour la simulation de référence MOCAGE et l'analyse avec la colonne troposphérique OMI et GOME2 issue du produit KNMI. En bas la moyenne spatiale des différences entre simulations et observations. Les moyennes et les écarts type temporels sont donnés pour chaque série entre parenthèses.

## 4 CAS DES PARTICULES TECHNIQUES D'ASSIMILATION DEVELOPPEES

### 4.1 DESCRIPTION DES TRAVAUX D'ASSIMILATION

#### 4.1.1 MOCAGE-VALENTINA 3D-VAR

Une chaîne d'assimilation MOCAGE-VALENTINA 3D-VAR des observations de surface de PM<sub>10</sub> a été implémentée au CNRM-GAME à partir de travaux de développement réalisés au CERFACS sur le système d'assimilation MOCAGE-VALENTINA. Cette chaîne intègre aussi

les nouveaux développements des aérosols secondaires inorganiques dans MOCAGE (Guth et al, 2015), qui permettent d'enrichir la représentation des aérosols dans le modèle et ainsi d'améliorer les performances du modèle direct, ce qui est un pré-requis à des analyses de bonne qualité. L'assimilation 3D-VAR des PM<sub>10</sub> a été insérée dans la chaîne conjointe d'assimilation d'ozone et NO<sub>2</sub> (Figure 12). La différence majeure avec l'assimilation des espèces gazeuses réside dans le fait que la variable assimilée n'est pas directement une variable simulée par le modèle, mais la somme de toutes les espèces d'aérosols dont la taille est inférieure à 10 µm. A l'étape d'assimilation, l'incrément de PM<sub>10</sub> est ainsi réparti dans les différentes espèces et classes de taille de particules inférieures à 10 µm, à proportion égale de leur répartition dans l'ébauche.

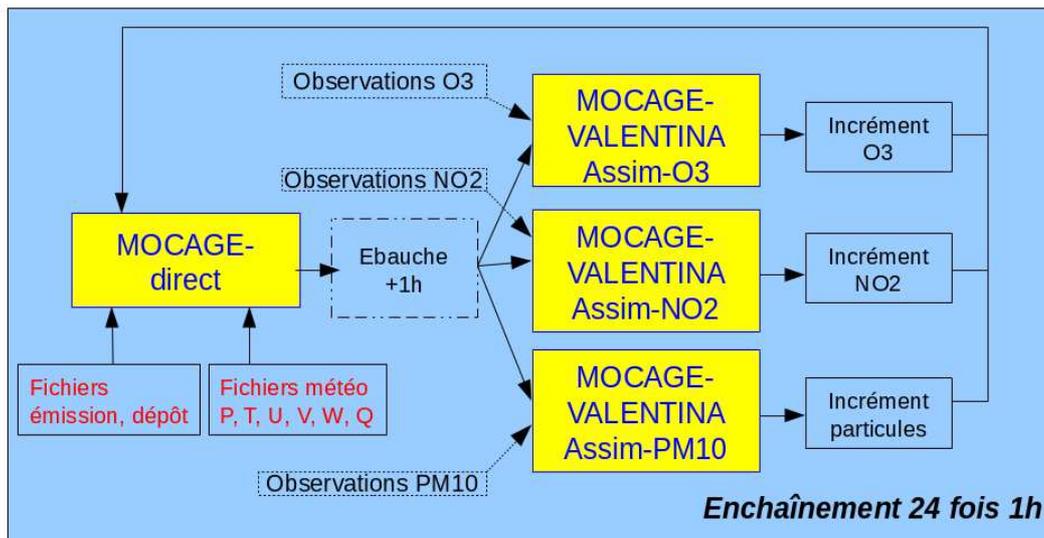


Figure 12. Principe de la chaîne d'assimilation multi-espèces MOCAGE 3D-Var conjointe pour l'ozone, le dioxyde d'azote, et les particules PM<sub>10</sub>. A chaque heure, les observations de chaque espèce sont assimilées indépendamment dans l'ébauche. Les incréments sont ensuite ajoutés dans l'ébauche, qui sert de conditions initiales pour le calcul de l'ébauche à l'heure suivante.

La chaîne développée a consisté finalement à ajouter une étape d'assimilation des PM<sub>10</sub> dans la chaîne d'assimilation conjointe O<sub>3</sub>+NO<sub>2</sub> mentionnée plus haut, ce qui permet, grâce à une parallélisation efficace, de limiter la durée des calculs.

#### 4.1.2 CHIMERE KRIGING-BASED APPROACH

Le système opérationnel d'assimilation de donnée utilisé par CHIMERE sur les plateformes PREV'AIR et CAMS pour les PM<sub>10</sub> repose sur une procédure de krigeage. Plusieurs approches issues des travaux dédiés à l'ozone ont été testées puis adaptés aux PM<sub>10</sub>. La technique actuellement utilisée en opérationnel est celle du co-krigeage des observations et de CHIMERE. Celle-ci fait l'objet de plusieurs travaux d'amélioration en cours, notamment avec la prise en compte des données d'émission en variables auxiliaires ou encore pour analyser l'apport d'une approche krigeage des observations avec CHIMERE en dérive externe.

L'accroissement constant du nombre de point de mesure dédié au PM<sub>2.5</sub> rend également intéressant le gain de qualité que peut avoir une approche de krigeage combinant les observations de PM<sub>10</sub> et de PM<sub>2.5</sub>. Le système mis en place pour cela s'appuie sur le co-

krigeage.

Les analyses de PM<sub>10</sub> ont été évaluées sur l'année 2013, à partir de deux jeux de données, l'un destiné à l'assimilation, et l'autre pour la validation. La Figure 13 compare les prévisions (sans assimilation) et les analyses (avec assimilation des observations dédiées) par rapport aux observations de validation. L'assimilation de mesures de surface de PM<sub>10</sub> permet clairement au modèle de se rapprocher des observations. Les résultats en termes de scores sont remarquables.

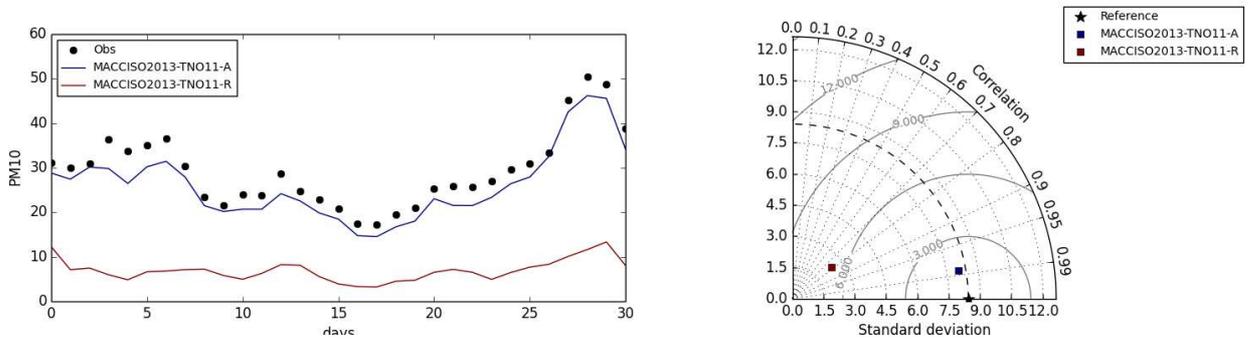


Figure 13. Comparaison des prévisions de PM<sub>10</sub> (MACCISO2013-TNO2011-R, en rouge) et des analyses de PM<sub>10</sub> (MACCISO2013-TNO2011-A, en bleu), montrant l'apport de l'assimilation des données de surface de PM<sub>10</sub> en mars 2013. Sur le panneau de gauche, les séries temporelles des moyennes de PM<sub>10</sub> sont affichées pour les prévisions, analyses et observations de validation. Sur le panneau de droite, le diagramme de Taylor comparant les performances des prévisions et des analyses - la performance parfaite correspondant à l'étoile.

Concernant CHIMERE, l'intégration des PM<sub>2.5</sub> permet d'améliorer la représentation des PM<sub>10</sub> en surface par rapport à un calcul utilisant uniquement les observations PM<sub>10</sub> (Figure 14). Les scores présentés montrent une corrélation améliorée et une RMSE également meilleure que ce que produit une prise en compte uniquement des PM<sub>10</sub>.

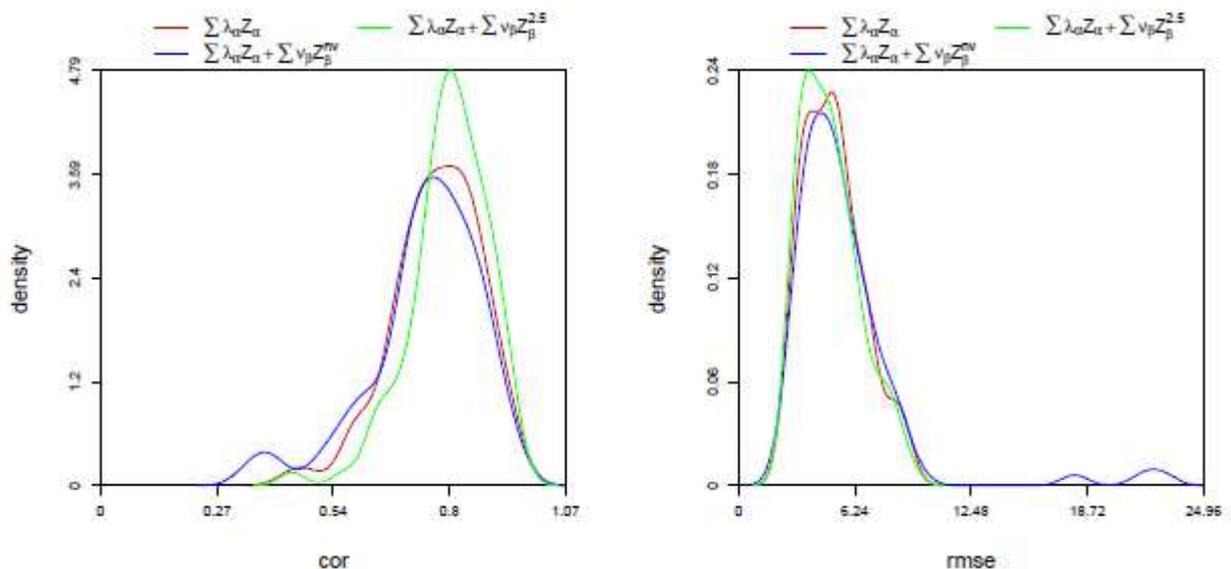


Figure 14. Corrélation et RMSE pour différentes procédures de krigeage PM<sub>10</sub>. Rouge krigeage PM<sub>10</sub> et vert co-krigeage PM<sub>10</sub> et PM<sub>2.5</sub>.

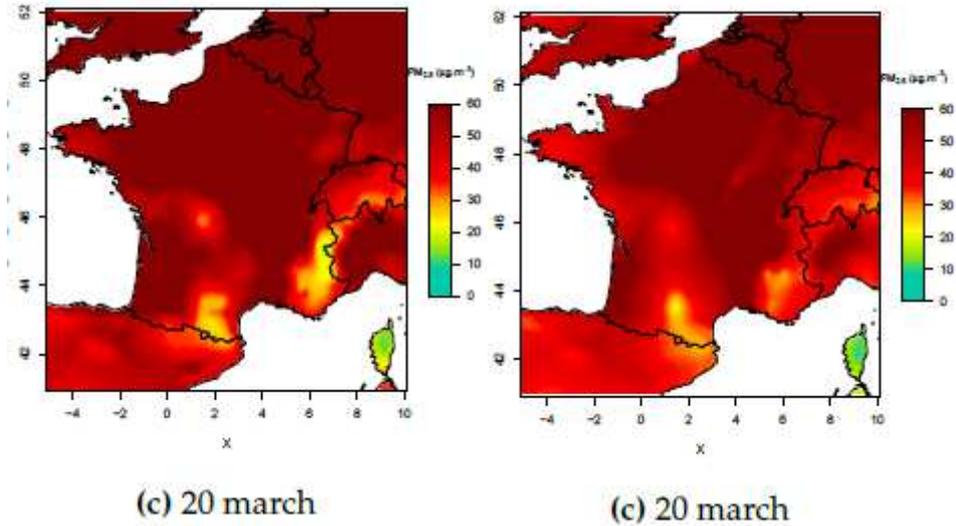


Figure 15. Concentrations de surface en  $PM_{2.5}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) lors de l'épisode de pollution du mois de mars 2015 (20/03/2015) établies selon un krigeage des  $PM_{2.5}$  en dérive externe et un cokrigeage en dérive externe des  $PM_{10}$  et  $PM_{2.5}$ .

Ce type d'application a aussi été dérivé pour la réalisation de cartographies de surface de  $PM_{2.5}$  (Figure 15).

Les scores montrent que l'approche combinant les observations des 2 types de particules fournit la meilleure représentation du champ de concentration de  $PM_{2.5}$  en surface.

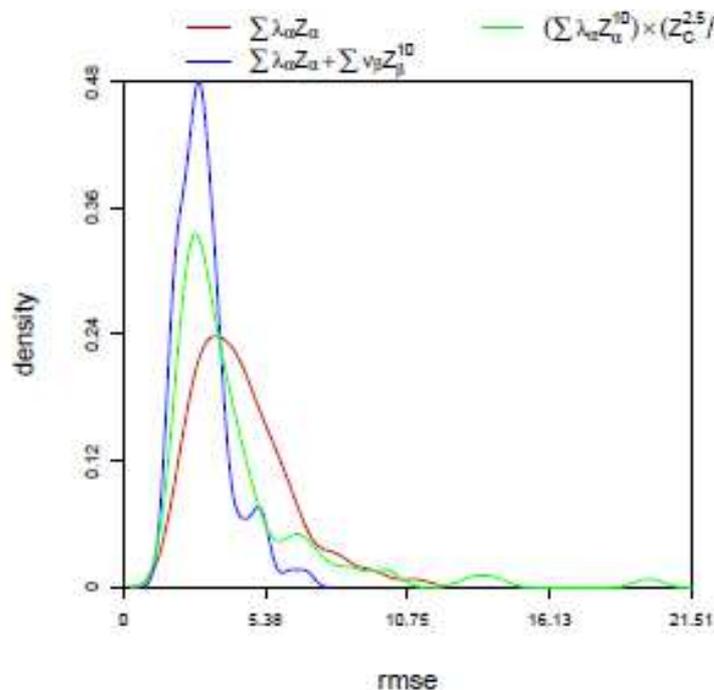


Figure 16. RMSE pour différentes procédures de krigeage  $PM_{2.5}$ . Rouge krigeage  $PM_{2.5}$  et vert cokrigeage  $PM_{2.5}$  et  $PM_{10}$ .

Ces résultats prometteurs ont permis, pour la première fois, de produire les réanalyses MOCAGE de  $PM_{10}$  dans le cadre de l'exercice MACC-III/EVA 2013. Il convient de noter

cependant qu'un bug survenu en milieu d'expérience et indépendant de l'assimilation elle-même, n'a pas permis d'exploiter sur l'ensemble de l'année les sorties de PM<sub>10</sub> de MOCAGE. Ce bug a été corrigé a posteriori.

De plus, la chaîne de réanalyse des PM<sub>10</sub> en temps réel est en cours d'implémentation pour une mise en opérationnelle au plus tard en mars 2016.

Les travaux CHIMERE sont en cours d'opérationnalisation avec les objectifs d'améliorer les analyses consacrées aux PM<sub>10</sub> et d'ajouter à la liste des polluants analysés en production opérationnelle les PM<sub>2.5</sub>. Ces améliorations seront effectives courant 2016.

## 4.2 AVANCEES & APPORTS DU PROJET

Les travaux d'ADONISS ont ainsi permis de développer une chaîne d'assimilation MOCAGE-VALENTINA 3D-VAR pour les PM<sub>10</sub>. Les résultats sont tout à fait positifs. Les chaînes de ré-analyses et d'analyse en quasi-temps réel seront pleinement opérationnelles pour le service régional CAMS\_50 en 2016. Elles contribueront aussi à la mise en œuvre d'un ensemble d'analyses (basé sur la méthode de la médiane) en quasi-temps réel des PM<sub>10</sub>.

La mise en production opérationnelle d'une carte analysée PM<sub>2.5</sub> représente une réelle avancée dans les produits de CHIMERE disponibles sur les plateformes CAMS et PREV'AIR.

Il faut cependant noter que les observations de surface de PM<sub>10</sub> assimilées apportent une information partielle par rapport aux variables simulées par les modèles, qui représentent les espèces d'aérosols sur différentes classes de taille, en 3 dimensions. De nouvelles observations, à la surface mais aussi en altitude, seraient utiles à la fois pour la validation et pour l'assimilation.

Dans une perspective future, il nous semble donc important de poursuivre les travaux de recherche sur l'assimilation des données de particules et d'aérosol en investiguant :

- l'amélioration de la représentation des aérosols dans les modèles, et valider les produits de la modélisation et de l'assimilation en les confrontant à des observations de différentes espèces d'aérosols,
- développer l'assimilation d'observations d'aérosols en altitude (couche limite) qui peuvent être disponibles (réseau de LIDAR aérosol),
- analyser la pertinence de travailler sur l'assimilation des composés chimiques des particules qui sont de plus en plus disponibles via les réseaux de recherches (de type ACSM)
- Investiguer le potentiel de l'observation satellitaire pour les particules (non couvert dans le présent projet).

## 5 CONCLUSIONS

Le projet ADONISS s'est focalisé sur le développement et l'évaluation de méthodes d'assimilation de données de qualité de l'air dans les modèles de chimie-transport, en vue de la production de cartographies en temps quasi-réel (analyses) ou a posteriori (re-analyses) des champs de concentrations de polluants atmosphériques. Les polluants ciblés sont l'ozone, le dioxyde d'azote, et les particules (PM<sub>10</sub> et PM<sub>2.5</sub>) pour lesquels des valeurs limites et objectifs de qualité sont définis par la réglementation (Directive qualité de l'air 2008/50/CE).

L'objectif final est de soutenir le positionnement et le développement des modèles nationaux CHIMERE et MOCAGE dans le cadre des services européens Copernicus pour la surveillance de l'atmosphère qui ont vocation à intégrer résultats de modèles, observations satellites et observation in-situ. Ainsi nous avons axé nos travaux dans le cadre d'ADONISS sur des aspects pour lesquels nous considérons que des développements de recherche complémentaires étaient nécessaires.

Un travail particulièrement important a été mené sur l'ozone par tous les laboratoires, tant sur la production de données issues d'observation satellites à partir des instruments IASI et GOME-2 (travaux menés par le CNRS/LISA), que sur les systèmes d'assimilation dans CHIMERE et MOCAGE.

Nous avons pu établir la valeur ajoutée du produit IASI développé par le LISA dans les plus hautes couches de l'atmosphère (l'intérêt est plus limité au niveau de la surface), et l'intérêt de coupler plusieurs instruments (IASI-GOME2) pour améliorer la représentation des profils de concentrations dans la couche de surface. Enfin un test d'assimilation multi-instruments (IASI-MLS- AIRBASE) a été mené pour la première fois avec des résultats très prometteurs pour simuler les niveaux de pollution dans les différentes couches de l'atmosphère.

Pour le dioxyde d'azote, des travaux ont été menés sur MOCAGE pour assimiler les données issues d'OMI et traitées par le KNMI. D'après les premiers résultats obtenus, la valeur ajoutée de la procédure d'assimilation est relativement limitée, ce qui compte tenu du cadre un peu contraint d'ADONISS, nous a conduit à ne pas pousser les investigations plus avant pour ce polluant.

En revanche des travaux ont été menés sur l'assimilation des données in-situ de particules. CNRM/GAME et le CERFACS ont étendu le système d'assimilation VALENTINA couplé à MOCAGE aux PM<sub>10</sub> et l'INERIS a mis en place un système d'assimilation couplé des PM<sub>10</sub> et des PM<sub>2.5</sub> dans CHIMERE par des méthodes de co-krigeage. Une amélioration des résultats de cartographie obtenus (par rapport à des observations de surface) a pu être constatée.

Ainsi ADONISS a permis des avancées significatives des capacités d'assimilation des modèles CHIMERE et MOCAGE. Une partie des résultats de ces travaux seront portés dans les versions opérationnelles des modèles qui sont mises en œuvre dans les systèmes de prévision et de cartographie PREV'air et CAMS.

## 6 REFERENCES

- Barret, B., Le Flochmoen, E., Sauvage, B., Pavelin, E., Matricardi, M., & Cammas, J. P. (2011). The detection of post-monsoon tropospheric ozone variability over south Asia using IASI data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(18), 9533–9548. doi:10.5194/acp-11-9533-2011
- Boersma, K.F., H.J. Eskes, R. J. Dirksen, R. J. van der A, J. P. Veefkind, P. Stammes, V. Huijnen, Q. L. Kleipool, M. Sneep, J. Claas, J. Leitao, A. Richter, Y. Zhou, and D. Brunner, An improved retrieval of tropospheric NO<sub>2</sub> columns from the Ozone Monitoring Instrument, *Atmos. Meas. Tech.*, 4, 1905-1928, 2011
- Boersma, K.F., H.J. Eskes and E.J. Brinksma, Error Analysis for Tropospheric NO<sub>2</sub> Retrieval from Space, *J. Geophys. Res.* 109 D04311, doi:10.1029/2003JD003962, 2004.
- Boynard, A., Clerbaux, C., Coheur, P.-F., Hurtmans, D., Turquety, S., George, M., Hadji-Lazaro, J., Keim, C., and Meyer-Arnek, J.: Measurements of total and tropospheric ozone from IASI: comparison with correlative satellite, ground-based and ozonesonde observations, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 6255-6271, doi:10.5194/acp-9-6255-2009, 2009
- Dufour, G., Eremenko, M., Griesfeller, A., Barret, B., Leflochmoën, E., Clerbaux, C., Hurtmans, D. (2012). Validation of three different scientific ozone products retrieved from IASI spectra using ozonesondes. *Atmospheric Measurement Techniques*, 5(3), 611–630. doi:10.5194/amt-5-611-2012
- Emili, E., Barret, B., Massart, S., Le Flochmoen, E., Piacentini, A., El Amraoui, L., Pannekoucke, O., and Cariolle, D.: Combined assimilation of IASI and MLS observations to constrain tropospheric and stratospheric ozone in a global chemical transport model, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 177-198, doi:10.5194/acp-14-177-2014, 2014
- Guth, J., Josse, B., Marécal, V., and Joly, M. : Simulating Secondary Inorganic Aerosols using the chemistry transport model MOCAGE version R2.15.0, *Geosci. Model Dev. Discuss.*, 8, 3593-3651, 2015.
- Jaumouillé, E., Massart, S., Piacentini, A., Cariolle, D., & Peuch, V.-H. (2012). Impact of a time-dependent background error covariance matrix on air quality analysis. *Geoscientific Model Development*, 5(5), 1075–1090. doi:10.5194/gmd-5-1075-2012.