

# GeoQAIR : quantification de l'apport d'une plateforme satellitaire d'observations Géostationnaires pour la surveillance de la Qualité de l'Air en Europe

Maxim Eremenko(1), David Weissenbach(2), Pasquale Sellitto (3), Juan Cuesta (4), Gilles Forêt (5), Gaëlle Dufour (6)

(1) *maxim.eremenko@lisa.u-pec.fr, Laboratoire Inter-universitaire des Systèmes Atmosphériques, LISA/IPSL, Universités Paris Est Créteil et Paris Diderot, CNRS/INSU UMR 7583, Créteil, France*

(2) *david.weissenbach@upmc.fr, Institut de physique du globe de Paris, (CNRS / INSU / IDG), Paris, France*

(3) *pasquale.sellitto@lisa.u-pec.fr, Laboratoire Inter-universitaire des Systèmes Atmosphériques, LISA/IPSL, Universités Paris Est Créteil et Paris Diderot, CNRS/INSU UMR 7583, Créteil, France*

(4) *juan.cuesta@lisa.u-pec.fr, Laboratoire Inter-universitaire des Systèmes Atmosphériques, LISA/IPSL, Universités Paris Est Créteil et Paris Diderot, CNRS/INSU UMR 7583, Créteil, France*

(5) *gilles.foret@lisa.u-pec.fr, Laboratoire Inter-universitaire des Systèmes Atmosphériques, LISA/IPSL, Universités Paris Est Créteil et Paris Diderot, CNRS/INSU UMR 7583, Créteil, France*

(6) *gaelle.dufour@lisa.u-pec.fr, Laboratoire Inter-universitaire des Systèmes Atmosphériques, LISA/IPSL, Universités Paris Est Créteil et Paris Diderot, CNRS/INSU UMR 7583, Créteil, France*

## Overview :

Monitoring of air quality (AQ) and its transport at the continental scale, as well as the development of efficient forecast systems for air quality is one of the issues included in the GMES (Global Monitoring for Environment and Security) European Programme for the establishment of a European capacity for Earth Observation. The availability of satellite instruments which have the ability to monitor tropospheric ozone in the lowermost troposphere would be a step forward for this system. To monitor small scale and short term processes as involved in pollution event development, a geostationary Earth orbit (GEO) observing system is particularly well adapted. Future GEO missions dedicated to air quality monitoring using thermal infrared (TIR) instruments are planned to be operating over the USA, Japan and Korea, while existing and planned missions over Europe are not well adapted for this task. One of the objectives of the GeoQAIR project is to evaluate different satellite instrument concepts for their ability to monitor AQ and in particular quantify the possible impact for AQ forecasting. Four instruments have been considered for this study: the existing instrument IASI on MetOp-A (Low Earth Orbit – LEO – mission), the planned IASI-NG on the EPS-SG platform (LEO mission) and IRS on Sentinel4/MTG platform (GEO mission mainly dedicated to meteorology) and a new GEO mission concept, MAGEAQ, dedicated to AQ monitoring and proposed at the last Earth Explorer 8 call of ESA. Pseudo-observations for the four instruments have been generated to simulate one month of ozone observations over Europe. About 45 millions of individual measurements have been simulated using the EGI facilities. A first analysis of the performances of the different instruments to measure ozone in the lowermost troposphere demonstrates that the short time and space scale processes implied in air pollution development will not be correctly apprehended with the current existing and planned missions. Dedicated instrument with sufficient spectral resolution and signal to noise ratio, as proposed within the MAGEAQ mission concept, are necessary to correctly represent these processes.

## Enjeux scientifiques, besoin en calcul, stockage et visualisation :

Bien que la pollution de l'air soit le fait d'émissions localisées et se développe à l'échelle locale la plupart du temps urbaine, des processus comme le transport, les échanges verticaux, l'interaction avec des sources d'émissions naturelles moins localisées renforçant la production de polluants induisent un impact jusqu'à une échelle continentale voire hémisphérique. Il est donc nécessaire d'être capable de surveiller et quantifier la qualité de l'air, en particulier l'ozone, à grande échelle. Dans le cadre du programme européen GMES (Global Monitoring for Environment and Security), des systèmes de surveillance et prévision de la qualité de l'air couplant modèles et observations se mettent en place. Concernant les observations, les réseaux de mesure de surface actuels ne permettent pas une couverture optimale de l'Europe. Par ailleurs, ces observations ne permettent pas de documenter les échanges verticaux et la représentativité des mesures n'est pas toujours en adéquation avec celle des modèles. Les observations satellitaires permettent de palier en partie à ces limitations en apportant une information sur la verticale, une couverture spatiale homogène (en l'absence de nuages) et une résolution horizontale en accord avec la résolution des modèles. Le développement des observations satellitaires dans l'infrarouge thermique et de méthodes d'analyse performantes (Eremenko et al., 2008) ces dernières années a permis une avancée en particulier avec l'instrument IASI sur le satellite MetOp-A (Clerbaux et al., 2009). Plusieurs études ont montrées l'intérêt de telles données pour la détection et le suivi d'évènements de pollution à l'ozone (Eremenko et al., 2008, Dufour et al., 2010) ainsi que pour l'évaluation et l'assimilation dans les modèles (Zyryanov et al., 2012, Coman et al., 2012). Cependant, pour une surveillance pertinente de la qualité de l'air, il est nécessaire de disposer d'instruments adaptés à la mesure d'ozone dans les plus basses couches de la troposphère et au suivi de processus se développant sur des échelles spatio-temporelles relativement faible. Un des objectifs du projet GeoQAIR est d'évaluer différents concepts d'instrument satellitaire

pour mesurer l'ozone dans la basse troposphère et quantifier l'impact de telles observations dans un système de prévision de la qualité de l'air européenne. Quatre instruments sont considérés dans cette étude : l'instrument IASI en opération sur le satellite MetOp-A, les instruments prévus, vers 2020, IASI-NG sur la plateforme EPS-SG et IRS sur la plateforme Sentinel4/MTG ainsi qu'un nouveau concept de mission, MAGEAQ, dédiée spécifiquement à la surveillance de la qualité de l'air. Des pseudo-observations pour les 4 instruments ont été simulées pour représenter un mois d'observations sur l'Europe. Cela a nécessité la génération d'environ 45 millions de mesures individuelles, sachant que la simulation d'une mesure prend environ une minute. Trois mois de production intensive sur la grille EGI a été nécessaire pour générer l'ensemble des pseudo-observations.

## Développements, outils, utilisation des infrastructures :

La génération des pseudo-observations satellitaires consiste à simuler le signal qui serait mesuré par l'instrument (la radiance) à partir d'une atmosphère vraie de référence, donnée généralement par un modèle de chimie transport atmosphérique et d'en extraire l'information concernant la distribution verticale de la molécule cible, ici l'ozone. Il s'agit de l'inversion des mesures. Pour cela, nous utilisons le code de transfert radiatif KOPRA et son module d'inversion KOPRAFIT [http://www-imk.fzk.de/asf/ame/publications/kopra\\_docu/](http://www-imk.fzk.de/asf/ame/publications/kopra_docu/)

- Code de transfert radiatif KOPRA

Le code de transfert radiatif KOPRA a été développé par l'IMK (Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Karlsruhe, Allemagne). Il permet de résoudre l'équation du transfert radiatif dans le domaine spectral de l'infrarouge pour des instruments de type spectromètres et ainsi de calculer la radiance vue par ce type d'instrument pour différentes géométries d'observation (limbe, nadir). Pour le calcul du transfert radiatif, l'atmosphère est découpée en couches concentriques (100m d'épaisseur) dites homogènes, c'est-à-dire dans lesquels température, pression et concentration de chaque espèce moléculaire présente dans la couche sont considérées constantes. Le processus d'interaction matière-rayonnement (absorption, émission etc) sont résolus et la radiance à la sortie de la couche considérée calculée en fonction du trajet optique dans la couche. Par une procédure itérative, la radiance au niveau de l'observateur (le satellite) est ainsi calculée et convoluée par les caractéristiques instrumentales

- Code d'inversion KOPRAFIT

Le code d'inversion KOPRAFIT permet, via la minimisation de la norme entre la radiance observée et la radiance calculée (par KOPRA) de restituer la concentration de l'espèce cible en fonction de l'altitude. Le problème étant non linéaire, une procédure itérative est nécessaire pour atteindre une convergence raisonnable.

Le traitement d'une mesure satellitaire (un spectre de radiance) est une tâche de très courte durée (environ 1min). En revanche, la couverture spatiale et la rapidité de la mesure conduisent à des flux importants des données. Pour donner un ordre de grandeur, pour le traitement des observations d'un instrument en basse orbite (IASI par exemple) sur l'Europe environ 15000 pixels sont à traiter pour chaque passage (matin ou soir). Dans le cas d'un instrument géostationnaire il s'agit de l'ordre de 600000 pixels par jour. Les tâches d'analyse étant courtes et indépendantes font de ce type de traitement une application particulièrement bien adaptée à la grille car elles peuvent être exécutées en parallèle et sans synchronisation.

Pour le déploiement de l'analyse sur EGI, les codes KOPRA et KOPRAFIT ont été adaptés pour permettre une compilation statique pouvant s'exécuter sur tous les types de machines de la grille. Un moteur de gestion des jobs sur la grille GEPS (Generic engine for parametric studies) a été développé et permet de gérer l'envoi, les calculs sur la grille de nos applications et la récupération des résultats sur une machine locale pour leur utilisation géophysique ultérieure.

Le GEPS est basé sur les technologies disponibles sur la grille et sur les applications existantes. La référence sur un exemple de telles applications peut être trouvé sur le site de '4th EGEE User Forum' :

<http://indico.cern.ch/contributionDisplay.py?sessionId=22&contribId=1&confId=40435>

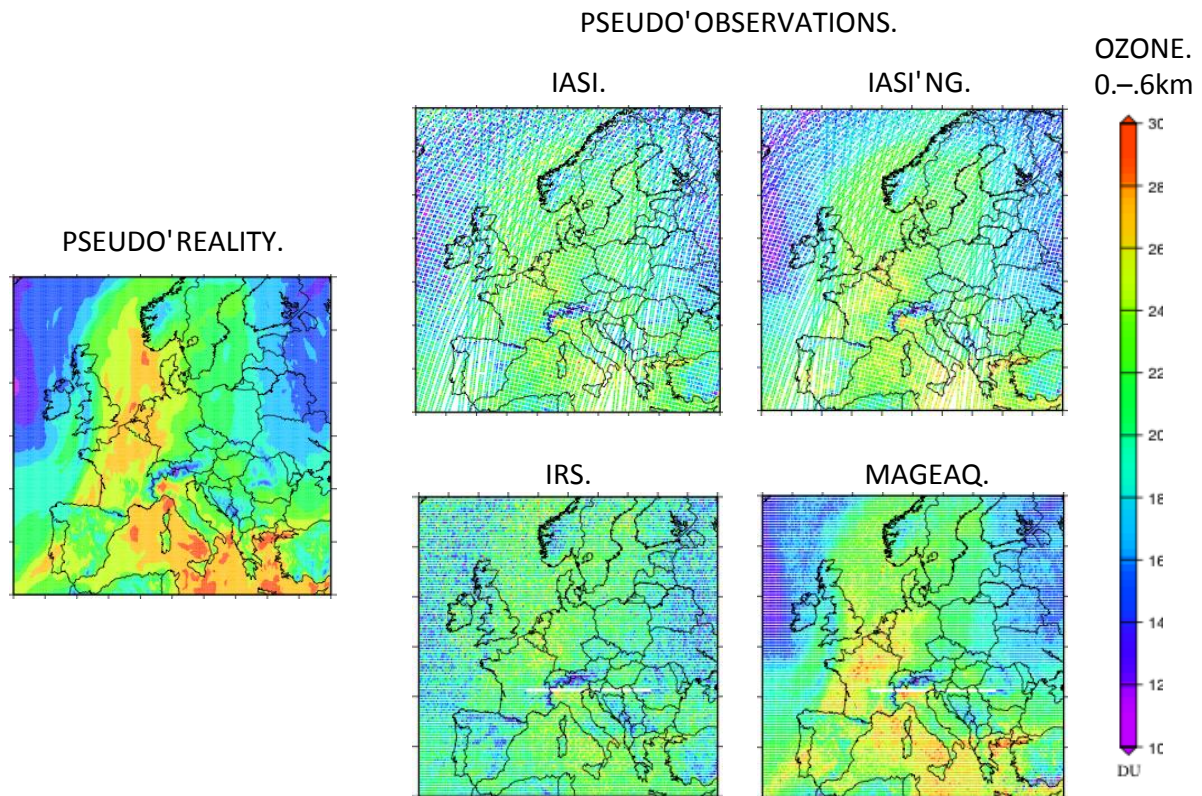
L'organisation virtuelle (VO) utilisée est ESR (Earth Science Research). Les ressources de cette VO ont été sollicitées durant environ 4 mois pour effectuer les calculs. Les tâches d'analyse ont été groupées par 200 pour optimiser le temps d'envoi des entrées et de récupération des résultats. De faibles pertes de données ont été constatées ce qui a demandé une exécution réitérée pour les résultats perdus. Le volume et le temps de cette tâche n'était pas important par rapport à la production totale.

## Résultats scientifiques :

Notre approche consiste à utiliser un champ d'ozone simulé par un modèle de chimie-transport (MOCAGE) qui est considéré comme la référence ou « pseudo-réalité ». Un code de transfert radiatif (KOPRA) permet de simuler les spectres de radiance qui seraient mesurés par chaque instrument. Les pseudo-observations d'ozone troposphérique sont alors obtenues en inversant ces spectres à partir du code d'inversion KOPRAFIT. Nous avons évalué les performances de différents instruments satellitaires (IASI, IASI-NG, IRS et MAGEAQ) en comparant la qualité de ces pseudo-observations.

Notre étude a permis de quantifier de manière détaillée l'apport des instruments spatiaux de nouvelle génération : IASI-NG

et MAGEAQ, par rapport à un instrument existant (IASI) ou un déjà programmé (IRS). Les résultats ont montré que l'amélioration de la résolution verticale apportée par IASI-NG est d'environ 50%, avec une sensibilité moyenne à une altitude 0,5 km plus basse que celle d'IASI. L'évolution des panaches d'ozone troposphérique à l'échelle régionale et locale est sensiblement mieux caractérisée par IASI-NG. Nous avons constaté une amélioration significative pour le suivi des panaches à l'échelle temporelle de 2-3 jours, ce qui est important pour l'étude de la pollution urbaine. Pour les deux capteurs embarqués sur satellites géostationnaires, MAGEAQ et IRS, les pseudo-observations ont permis de démontrer très clairement qu'IRS, la seule nouvelle mission géostationnaire européenne utilisant la bande de l'infrarouge thermique, n'a pas la capacité pour observer l'ozone dans la basse troposphère. Par contre, MAGEAQ, l'instrument proposé qui serait dédié à l'observation de l'ozone troposphérique, serait capable de mieux observer les concentrations d'ozone de la basse troposphère (avec un degré de liberté entre la surface et 6 km d'altitude et avec une sensibilité maximale à 3.0 km d'altitude) par rapport aux instruments existants (IASI). Un exemple de pseudo-observations pour les 4 instruments spatiaux est montré sur la figure ci-dessous (concentration d'ozone intégrée entre la surface et 6 km d'altitude, en Dobson Units – DU, pour le 20 Aout 2009 à 1000 TU). Un autre aspect qui a été étudié avec les pseudo-observations produites par l'EGI est l'erreur introduite dans les OSSEs (Expériences de Simulation de Systèmes d'Observation) en utilisant des approximations pour réduire le temps de calcul. En effet, nous avons pu montrer que les approximations de pseudo-observations utilisées pour d'autres études (Claeyman et al., 2011; Zoogman et al., 2012) peuvent être trop optimistes dans les cas où la tropopause est basse ou lorsque les concentrations d'ozone troposphérique sont co-localisées avec des zones de faible contraste thermique entre la surface et l'air près de la surface.



*Colonnes partielles d'ozone intégrées entre la surface et 6 km d'altitude au-dessus du niveau de la mer pour le 20 Aout 2009 à 1000 TU. A gauche, la pseudo-réalité utilisée comme référence (sorties du modèle de chimie-transport MOCAGE) et à droite, les pseudo-observations calculées sur la grille EGI pour les 4 instruments spatiaux (IASI, IASI-NG, IRS et MAGEAQ)*

Les résultats de notre étude ont été présentés dans différentes conférences internationales (voir, e.g., Sellitto et al., 2011) et elles sont en cours de publications dans des journaux scientifique internationaux (Sellitto et al, 2012a; Sellitto et al, 2012b).

## **Perspectives :**

Disposant de l'ensemble des pseudo-observations simulées pour les 4 instruments (IASI, IASI-NG, IRS, MAGEAQ), nous pouvons maintenant envisager d'évaluer l'apport de ces instruments dans un système de prévision de la qualité de l'air. Pour cela, la méthode communément utilisée pour évaluer, à moindre coût, l'apport d'un nouveau système d'observations n'existant pas encore est la mise en œuvre d'Expériences de Système d'Observations Simulé ou OSSEs (Lahoz et al., 2005). Ces OSSEs consistent à utiliser les pseudo-observations de chaque instrument pour corriger, via l'assimilation, les

modèles de prévision de la qualité de l'air. L'objectif est de consolider le concept de mission MAGEAQ, dédié à la surveillance de la qualité de l'air en Europe. Pour cela, nous devons démontrer que ce concept de mission spatiale est robuste et nous devons quantifier son apport pour démontrer son intérêt aux agences spatiales française et européenne. Les OSSEs réalisées dans le projet permettront de quantifier l'impact de pseudo-observations MAGEAQ par rapport à : (1) des observations satellitaires existantes – IASI ; (2) des observations satellitaires programmées – instrument IRS sur MTG/Sentinel 4 et IASI-NG au sein du programme EPS-SG d'Eumetsat; (3) les observations des réseaux de surface. De plus, des nouvelles configurations instrumentales devront être évaluées. Notamment, à partir du couplage des observations à multiples bandes spectrales (infrarouge thermique, ultraviolet et visible) pour caractériser l'ozone à proximité de la surface. Pour cela, un générateur des pseudo-observations d'ozone à partir du couplage TIR+VIS+UV devra être développé et intégrée aux systèmes OSSEs déjà mis en place pour les pseudo-observations TIR seul (décrites précédemment).

## Références :

- Claeyman, M., Attié, J.-L., Peuch, V.-H., El Amraoui, L., Lahoz, W. A., Josse, B., Joly, M., Barré, J., Ricaud, P., Massart, S., Piacentini, A., von Clarmann, T., Höpfner, M., Orphal, J., Flaud, J.-M., and Edwards, D. P.: A thermal infrared instrument onboard a geostationary platform for CO and O<sub>3</sub> measurements in the lowermost troposphere: Observing System Simulation Experiments (OSSE), *Atmos. Meas. Tech.*, 4, 1637-1661, doi:10.5194/amt-4-1637-2011, 2011
- Clerbaux, C., Boynard, A., Clarisse, L., George, M., Hadji-Lazaro, J., Herbin, H., Hurtmans, D., Pommier, M., Razavi, A., Turquety, S., Wespes, C., and Coheur, P.-F.: Monitoring of atmospheric composition using the thermal infrared IASI/MetOp sounder, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 6041-6054, 2009.
- Coman A., G. Foret, M. Beekmann, M. Eremenko, G. Dufour, B. Gaubert, A. Ung, C. Schmechtig, J.-M. Flaud, and G. Bergametti, Assimilation of IASI partial tropospheric columns with an Ensemble Kalman Filter over Europe, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 2513-2532, 2012.
- Dufour G., M. Eremenko, J. Orphal, J.-M. Flaud, IASI observations of seasonal and day-to-day variations of tropospheric ozone over three highly populated areas of China: Beijing, Shanghai, and Hong Kong, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 3787-3801, 2010.
- Eremenko M., G. Dufour, G. Foret, C. Keim, J. Orphal, M. Beekmann, G. Bergametti, and J.-M. Flaud: "Tropospheric ozone distributions over Europe during the heat wave in July 2007 observed from infrared Nadir spectra measured by IASI", *Geophysical Research Letters* 35, doi:10.1029/2008GL034803, 2008.
- Lahoz, W. A., R. Brugge, D. R. Jackson, S. Migliorini, R. Swinbank, D. Lary et A. Lee, An observing system simulation experiment to evaluate the scientific merit of wind and ozone measurements from the future SWIFT instrument, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 131, 503–523, 2005.
- Sellitto, P., Dauphin, P., Dufour, G., Eremenko, M., Coman, A., Forêt, G., Beekmann, M., Gaubert, B., Flaud, J.-M., Performance assessment of future LEO and GEO satellite infrared instruments to monitor air quality, *Proceedings of the EUMETSAT Conference 2011, Oslo, Norway*, 2011
- Sellitto, P., Dufour, G., Eremenko, M., Coman, A., Cuesta, J., Dauphin, P., Forêt, G., Flaud, J.-M., Performance comparison of IASI and IASI-NG lower tropospheric ozone pseudo-observations, to be submitted to *Atmos. Meas. Tech.*, 2012a
- Sellitto, P., Dufour, G., Eremenko, M., Cuesta, J., On the averaging kernels parametrization for the implementation of fast observing system simulation experiments targeted on tropospheric ozone observations, to be submitted to *Atmos. Meas. Tech.*, 2012b
- Zoogman, P., D.J. Jacob, K. Chance, L. Zhang, P. Le Sager, A.M. Fiore, A. Eldering, X. Liu, V. Natraj, S.S. Kulawik, Ozone Air Quality Measurement Requirements for a Geostationary Satellite Mission. *Atmos. Environ.*, 45, 7, 143-7, 150, 2011
- Zyryanov D., G. Foret, M. Eremenko, M. Beekmann, J.-P. Cammas, M. D'Isidoro, H. Elbern, J. Flemming, E. Friese, I. Kioutsioutkis, A. Maurizi, D. Melas, F. Meleux, L. Menut, P. Moinat, V-H Peuch, A. Poupkou, M. Razinger, M. Schultz, O. Stein, A. M. Suttie, A. Valdebenito, C. Zerefos, G. Dufour, G. Bergametti and J.-M. Flaud, 3D evaluation of free tropospheric ozone simulations by an ensemble of regional Chemical Transport Models, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 3219-3240, 2012.