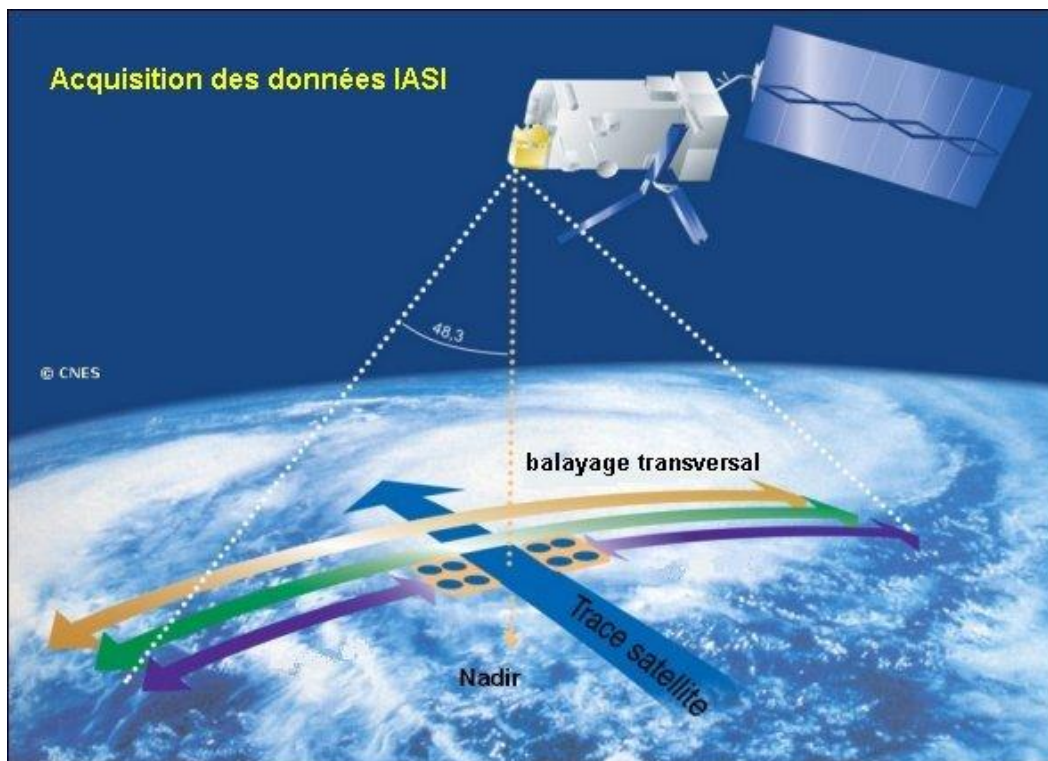


## Rapport de stage

### Impact de la variabilité spatio-temporelle des profils de concentration en $\text{CO}_2$ sur la restitution des profils de température à partir de IASI

Stage effectué au Centre National de Recherches Météorologiques au sein du Groupe de Modélisation et d'Assimilation pour la Prévision, encadré par Vincent Guidard, du 8 avril au 31 mai 2013.



Acquisition des données IASI ©CNES

## **Remerciements**

Nous tenons à remercier Dominique Lambert, Sylvain Coquillat et Jean-Pierre Chaboureau d'assister à la soutenance de notre stage en tant que jury.

Nous souhaitons également remercier Philippe Bougeault, directeur de la Recherche de Météo-France et directeur du GAME, pour nous avoir accueillis au sein de son établissement, et Nadia Fourrié pour avoir pris le temps d'échanger sur nos résultats.

Merci aux stagiaires présents dans le bureau, avec qui nous avons partagé respect et entraide.

Enfin, nous tenons à remercier particulièrement Vincent Guidard pour nous avoir encadré durant ce stage de façon organisée et pour avoir été présent pour nous.

## Table des matières

Remerciements.....	2
Introduction.....	4
I- Description de la variabilité spatio-temporelle des profils de concentration en CO <sub>2</sub> .....	4
1) Variabilité géographique .....	4
2) Variabilité mensuelle .....	5
3) Evolution temporelle .....	5
4) Profils obtenus .....	6
II- Résultats sur les simulations de spectres IASI avec un profil de CO <sub>2</sub> variable.....	6
1) Equation du transfert radiatif .....	6
2) Sensibilité des simulations au profil de CO <sub>2</sub> .....	6
3) Impact sur les simulations de cas réels .....	7
4) Impact sur la qualification des nuages.....	8
III- Impact sur la restitution des profils de température.....	9
1) Notions sur l'assimilation de données.....	9
2) Différences d'analyses .....	9
3) Incréments d'analyse.....	10
Conclusion .....	11
Bibliographie.....	12

## Introduction

Un des instruments contribuant le plus à la prévision numérique du temps est l'Interféromètre Atmosphérique de Sondage Infrarouge (IASI). Embarqué à bord du satellite MetOp-A depuis 2006 et MetOp-B depuis 2012, il a été conçu pour réaliser des sondages météorologiques opérationnels avec une très grande précision. Il mesure le rayonnement au sommet de l'atmosphère dans la gamme de longueur d'onde entre 3.7 et 15.5  $\mu\text{m}$ , i.e. 645 et 2760  $\text{cm}^{-1}$ , à 8461 longueurs d'onde différentes (8461 canaux). Ainsi, il fournit une information indirecte sur de nombreuses variables atmosphériques : profils de température avec une précision de 1 K pour 1 km, profils d'humidité avec une précision de 10%, contenus nuageux, aérosols, composition chimique.

Parmi ces canaux, certains sont sensibles au dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ). Afin d'utiliser les données de IASI dans les modèles météorologiques, il est nécessaire de simuler des observations IASI à partir de profils atmosphériques de température et d'humidité, d'informations de surface et de profils atmosphériques de certains constituants chimiques, dont le  $\text{CO}_2$ . Actuellement, les modèles de Météo-France utilisent un profil climatologique de  $\text{CO}_2$  invariant dans l'espace et dans le temps.

L'Union Européenne finance un projet coordonné par le Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (ECMWF en anglais). C'est le projet MACC-II : Monitoring Atmospheric Composition and Climate - Interim Implementation. MACC-II combine un modèle atmosphérique de pointe avec les observations pour délivrer de nombreuses informations, notamment sur la qualité de l'air et la composition atmosphérique. Le but est de réanalyser les données de la composition atmosphérique du passé et du présent. Des données de  $\text{CO}_2$  sont donc disponibles dans le cadre de ce projet.

Comment le fait de prendre en compte la variabilité spatio-temporelle des concentrations en  $\text{CO}_2$  impacterait-il la restitution des profils de températures ?

Pour répondre à cette question nous nous sommes tout d'abord basés sur des données de moyennes mensuelles de  $\text{CO}_2$  disponibles sur les dix dernières années afin d'en estimer la variabilité spatiale et temporelle. Dans un second temps, nous avons évalué l'impact de cette variabilité sur les simulations des données IASI. Enfin, nous avons étudié l'impact sur les températures restituées.

### I- Description de la variabilité spatio-temporelle des profils de concentration en $\text{CO}_2$

Pour décrire la variabilité spatio-temporelle des concentrations en  $\text{CO}_2$  nous disposons de données de 2003 à 2011 pour 21 niveaux verticaux isobares sur tout le globe de 1000 hPa à 1 hPa, fournies par le projet MACC-II. Nous avons aussi les données concernant le profil "climatologique" qui est une moyenne de différents profils typiques, et comporte 43 niveaux isobares de 1013.25 hPa à 0.005 hPa.

#### 1) Variabilité géographique

Au regard des cartes, aucun découpage géographique naturel n'est possible tant la variabilité est importante et différente d'un niveau à l'autre. Les données ont donc été traitées par tranches de latitudes de 20 degrés. Ainsi, la figure 1 montre le profil moyen sur les 9 années pour chacune des régions considérées : {0-20, 20-40, 40-60, 60-90} nord et {0-20, 20-40, 40-60, 60-90} sud.

Les similitudes d'allure de ces profils - dans les basses couches notamment- permettent un regroupement en trois domaines : nord (20N à 90N), sud (90S à 20S) et tropiques (20S à 20N). Ce découpage est classiquement utilisé dans plusieurs applications comme la vérification de la qualité des prévisions météorologiques.

Profils de co2 par tranches de latitudes

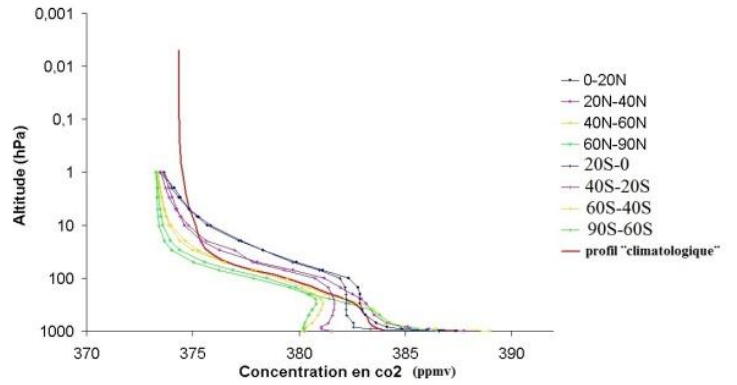
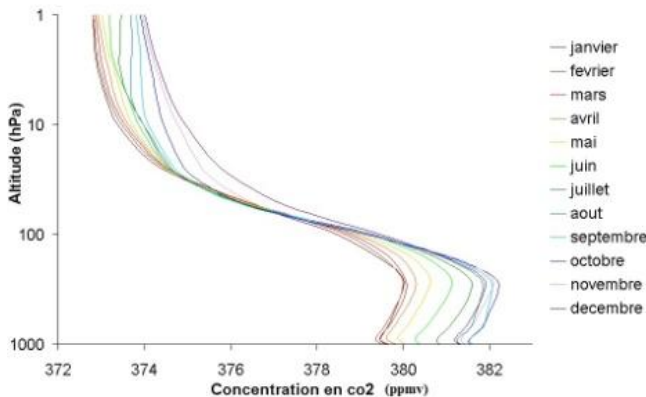


Figure 1 : Profils moyens de CO2 par tranches de latitudes

## 2) Variabilité mensuelle

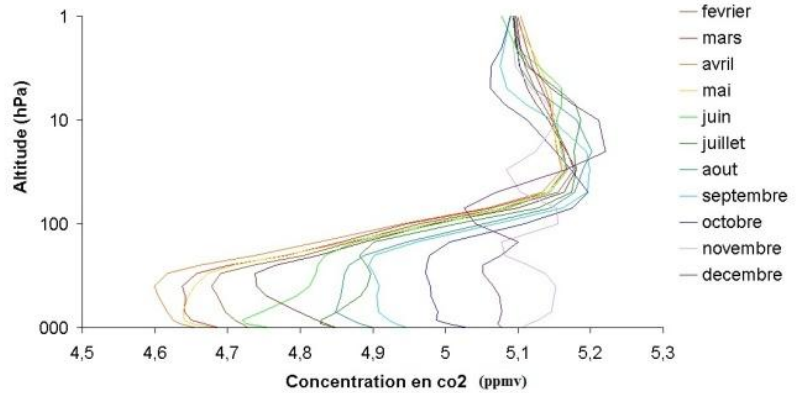
Nous avons par la suite étudié la distribution temporelle des concentrations en CO<sub>2</sub> pour les trois zones géographiques définies précédemment. Un regroupement des mois est possible à l'échelle de l'année, mais il n'est pas identique d'une année sur l'autre. Par exemple, les feux de biomasse en Afrique modifient considérablement les concentrations en CO<sub>2</sub> dans les basses couches et peuvent être décalés d'un mois suivant l'année. Afin de visualiser des éventuels regroupements, il est utile de considérer les profils mensuels moyennés sur toutes les années ainsi que leurs écarts-types.

Profils mensuels pour 20S-90S



a) Profils mensuels pour 90S-20S

Ecarts types mensuels pour 20S-90S



b) Ecarts-types mensuels pour 90S-20S

Figure 2 : Profils et écarts types mensuels pour le domaine sud

Les profils et les écarts-types mensuels représentés sur la figure 2, pour la région sud et ceux traités pour les autres régions, mènent à la conclusion qu'il serait plus réaliste de ne pas regrouper les mois ensemble.

## 3) Evolution temporelle

Etant donné que les concentrations en CO<sub>2</sub> augmentent dans le temps, il était important de décrire l'évolution temporelle des profils de CO<sub>2</sub>. Une augmentation annuelle est nettement visible sur la figure 3 qui rassemble le profil moyen de chaque année. Le profil "climatologique" se rapproche le plus de celui pour l'année 2007, lui-même semblable au profil moyen. Ainsi, les profils constitués correspondent à l'année 2007.

Profils moyens

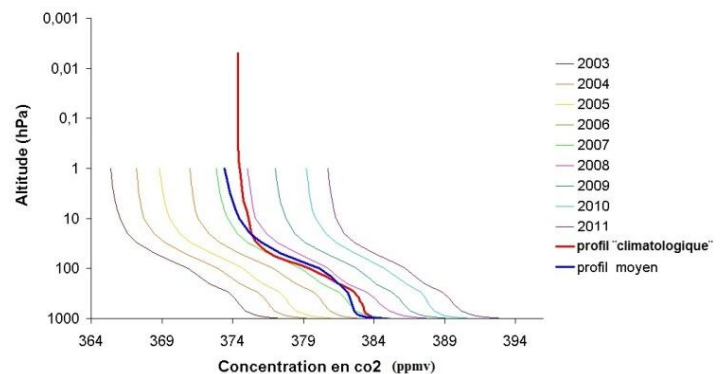


Figure 3 : Profils annuels moyens

Pour quantifier l'augmentation des concentrations en CO<sub>2</sub>, nous avons tracé un profil des coefficients directeurs de la pente de régression linéaire des concentrations moyennes en fonction des années. En moyenne, nous obtenons une augmentation de 1.92 ppmv par an. Cette valeur est proche de celle trouvée par Thierry Phulpin (CNES) dans une étude qui est indépendante des données fournies par le projet MACC.

#### 4) Profils obtenus

Au final, le découpage spatial choisi se décompose en 3 domaines (nord, sud, tropiques) et le découpage temporel est mensuel, ce qui implique de réaliser 3\*12=36 profils différents. La figure 3 illustre le profil obtenu pour chaque région ainsi que le profil "climatologique" pour le mois de mars. L'objectif étant de pouvoir utiliser ces profils par la suite, il a fallu interpolier et extrapoler les valeurs obtenues sur les 21 niveaux fournis par MACC afin qu'à chacun des 43 niveaux renseignés pour le profil "climatologique" corresponde une valeur de concentration en CO<sub>2</sub> pour les profils réalisés.

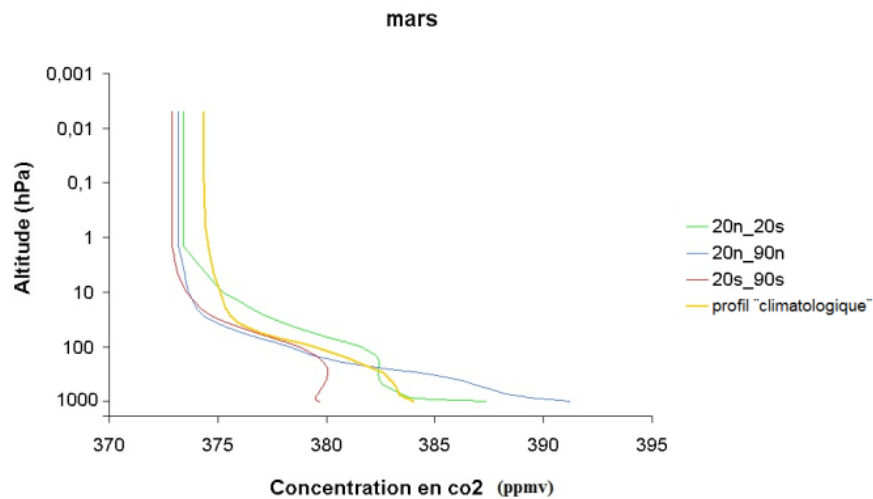


Figure 4 : Profils obtenus pour le mois de mars

Les profils variables obtenus semblent assez différents du profil "climatologique", on peut donc espérer voir un impact sur les simulations de données IASI.

## II- Résultats sur les simulations de spectres IASI avec un profil de CO<sub>2</sub> variable

### 1) Equation du transfert radiatif

L'équation du transfert radiatif relie l'état de l'atmosphère et la radiance incidente au sommet de l'atmosphère mesurée par le sondeur satellitaire – IASI dans notre cas. Cette radiance est calculée à partir de la fonction de Planck et de la transmission des différentes couches atmosphériques pour chacun des gaz traversés. La radiance monochromatique de fréquence  $\nu$  allant de l'atmosphère vers l'espace avec un angle d'incidence  $\theta$  se calcule à l'aide de l'équation du transfert radiatif :

$$R\nu(\theta) = \varepsilon\nu(\theta)B\nu[T(z_0)]\tau\nu(z_0, \theta) + \int_{z_0}^{\infty} B\nu[T(z)] \frac{d\tau\nu(z, \theta)}{dz} + \psi$$

avec  $\varepsilon\nu$  l'émissivité de surface à la fréquence  $\nu$ ,  $z_0$  l'altitude du sol,  $B\nu$  la fonction de Planck,  $T$  la température,  $\tau\nu(z, \theta)$  la transmittance à la fréquence  $\nu$  entre la couche  $z$  et l'espace. Le terme  $\Psi$  représentant un ensemble de processus complexes n'est que très rarement pris en compte.

### 2) Sensibilité des simulations au profil de CO<sub>2</sub>

Le spectre de températures de brillance IASI représenté figure 5, nous renseigne sur la sensibilité des canaux aux constituants de l'atmosphère. Le CO<sub>2</sub>, gaz qui nous intéresse, est

absorbant pour un nombre d'onde compris entre 645 et 800  $\text{cm}^{-1}$  environ et pour deux bandes fines au delà de 2200  $\text{cm}^{-1}$ . Ces dernières ne nous intéressent pas puisque le bruit est trop important. Ainsi, les canaux à considérer sont ceux pour un nombre d'onde entre 645 et environ 800  $\text{cm}^{-1}$ , soit les 500 premiers canaux. On peut utiliser la relation suivante :

nombre d'onde ( $\text{cm}^{-1}$ ) = 645 + (numéro de canal-1)/4.

Des simulations ont été réalisées en remplaçant le profil "climatologique" de  $\text{CO}_2$  par un profil variable qui considère le profil réalisé suivant la zone géographique et le mois de l'année. De plus, pour simuler des spectres pour une année considérée, il faut tenir compte de l'évolution temporelle en ajoutant 1.92 ppmv fois le nombre d'années entre l'année considérée et l'année de référence qu'est 2007. Par exemple, pour l'année 2013, il faut ajouter  $1.92 \times 6 = 11.52$  ppmv aux valeurs du profil de 2007.

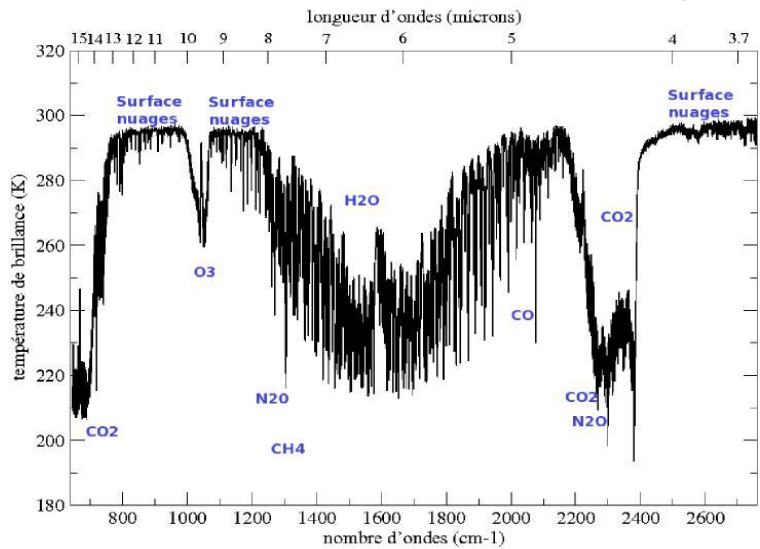


Figure 5 : Spectre de températures de brillance IASI

### 3) Impact sur les simulations de cas réels

Afin d'étudier l'impact du profil variable, des simulations de cas réels ont été réalisées en considérant que tous les points sont en ciel clair. Ces simulations ont été effectuées pour une fenêtre temporelle de 6 heures centrée sur le 1<sup>er</sup> mars 2013 à 00 UTC. A cause de contraintes de temps d'exécution des modèles opérationnels, seul un sous-ensemble de 314 canaux est utilisé en temps réel.

Pour les canaux sensibles au  $\text{CO}_2$ , nous avons rassemblé les différences de températures de brillance entre celles obtenues à l'aide du profil climatologique et celles avec le profil variable sur la figure 6 afin de visualiser l'impact du profil variable sur les simulations IASI. A première vue, le comportement des courbes est la même pour les trois régions. Cela semble cohérent du fait que chaque canal sonde toujours dans la même région de l'atmosphère. La figure 6 nous montre que les canaux de la stratosphère sont simulés plus chauds et ceux de la troposphère plus froids qu'avec le profil climatologique.

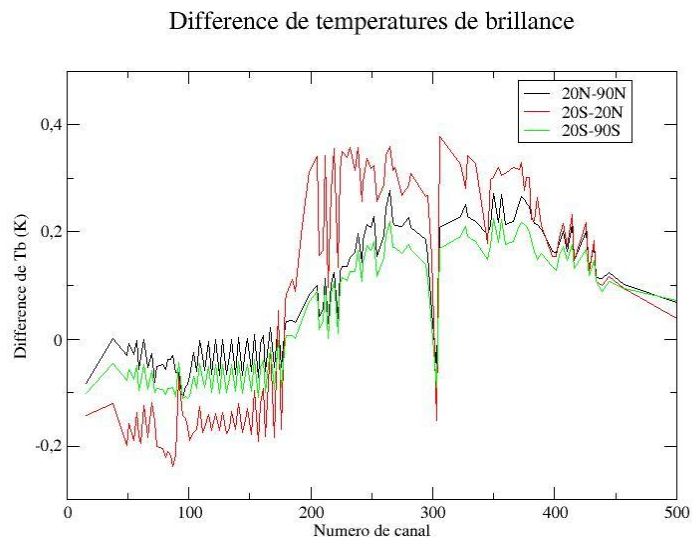


Figure 6 : Différence de températures de brillance pour les 500 premiers canaux IASI

Les différences les plus importantes se retrouvent sur la région tropicale et peuvent atteindre 0.4 K alors que celles des régions Sud et Nord ne dépassent pas 0.28 K. Les profils de  $\text{CO}_2$  sont différents selon ces trois régions, ce qui explique en partie ces différences de sensibilité. Il faut noter que les profils de températures sont aussi très différents ce qui peut renforcer les différences



dues au CO<sub>2</sub> Les 200 premiers canaux sondent à haute altitude et induisent de faibles différences car une petite partie du profil de CO<sub>2</sub> est prise en compte. Pour les canaux entre 200 et 500 qui sondent plus bas, les différences sont nettement plus importantes.

Les résultats présentés par la suite ont été obtenus avec le canal 265 qui sonde à mi/haute-troposphère, dont la sensibilité maximale à 400 hPa est représentée sur la Figure 7-a)

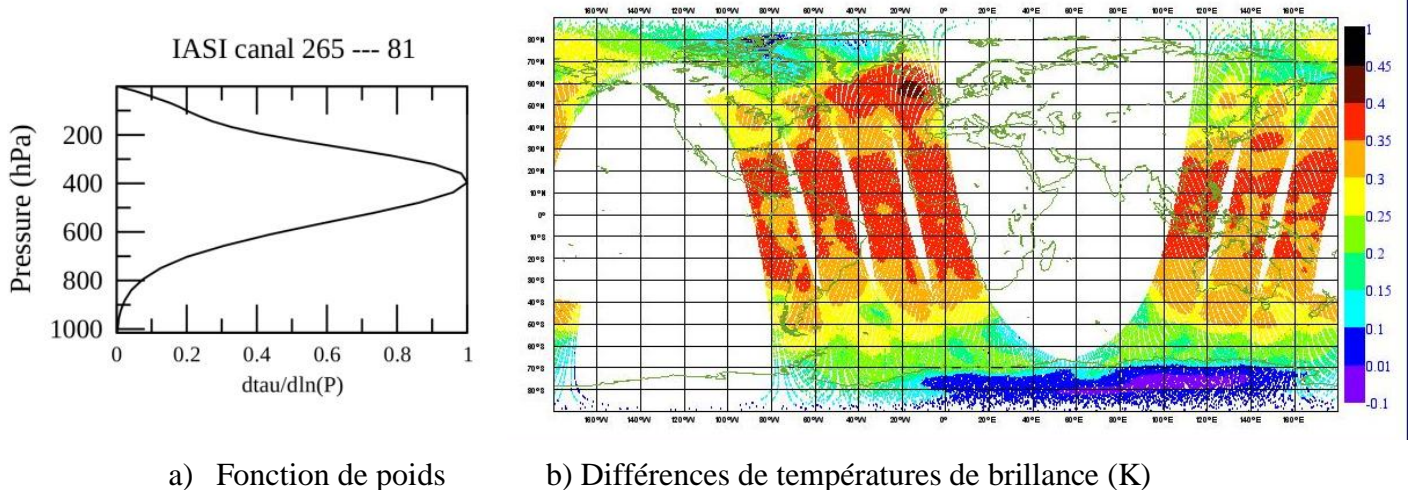


Figure 7 : Résultats pour le canal 265

Nous observons des différences de l'ordre du dixième de degré sur la figure 7-b). La répartition s'organise comme celle du champ de température : les valeurs sont plus fortes aux tropiques et diminuent vers les pôles. Ceci n'est pas un hasard puisque la température intervient dans l'équation du transfert radiatif. En effet, les mesures sont sensibles au profil de température et au profil de CO<sub>2</sub>. Ainsi, aux pôles, et plus particulièrement en Antarctique, le profil de température est très froid et isotherme alors qu'aux tropiques le profil est haut dans l'atmosphère et le gradient de température est fort. Nous constatons donc un impact de la surface dans les régions étendues à relief élevé et à températures faibles, telles que le Groenland et l'Antarctique. Nous observons également, dans l'Atlantique Nord, une zone où les variations de température sont très importantes. Celles-ci sont dues aux perturbations météorologiques régulières dans cette région.

#### 4) Impact sur la qualification des nuages

Dans l'utilisation opérationnelle des observations IASI à Météo-France, certaines simulations sont réalisées en tenant compte des nuages. La méthode du CO<sub>2</sub>-slicing qui permet de restituer la pression de sommet moyen de nuage dans le pixel IASI est utilisée. On peut naturellement penser que la méthode du CO<sub>2</sub>-slicing restitue des pressions de nuages différentes suivant le profil de CO<sub>2</sub> utilisé. Pour étudier la restitution des pressions de sommet moyen par la méthode du CO<sub>2</sub>-slicing, il est intéressant de comparer les pressions obtenues avec le profil climatologique et variable. Les valeurs se répartissent suivant la diagonale correspondant à une restitution identique des pressions. Toutefois, pour une pression obtenue avec le profil de référence donnée,

Comparaison des pressions pour le profil variable et "climatologique"

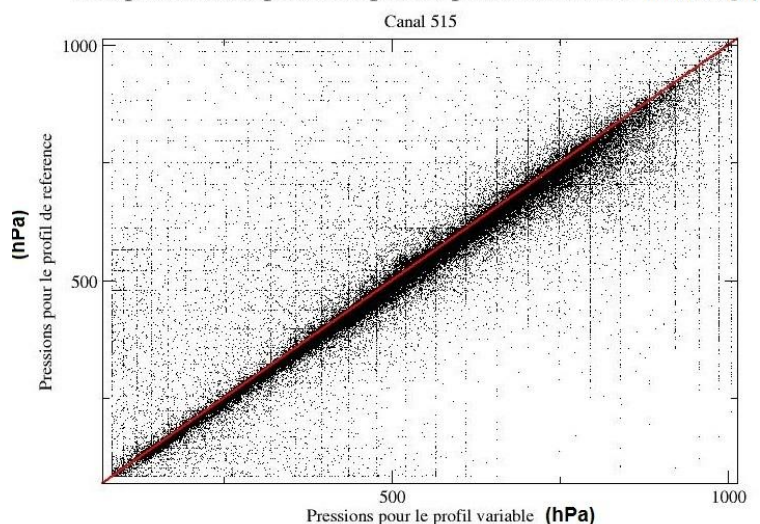


Figure 8 : Comparaison des pressions pour le profil variable et "climatologique" 8



nous obtenons dans la majorité des cas (quelque soit la hauteur du nuage) une pression plus élevée avec le profil variable. Ainsi, les simulations effectuées avec le profil variable ont tendance à abaisser les nuages.

Les différences de simulation restent modestes mais peuvent atteindre plusieurs dixièmes de Kelvin. Cela nous encourage à évaluer l'impact de la restitution des profils de température.

### III- Impact sur la restitution des profils de température

#### 1) Notions sur l'assimilation de données

L'assimilation des données est une méthode notamment utilisée dans les modèles numériques de prévision météorologique. Elle permet d'estimer l'état réel de l'atmosphère à l'aide de multiples données d'observation et d'une connaissance a priori (prévision à courte échéance, appelée ébauche). Le but est de faire un compromis entre les observations et les ébauches.

Cela revient à chercher l'état  $x^a$  (l'analyse) qui minimise la fonction  $J(x) = J_b(x) + J_o(x)$ , avec  $J_b(x)$  le rappel à l'ébauche et  $J_o(x)$  le rappel aux observations.

$$\text{La solution peut s'écrire : } x^a = x^b + K(y - H(x^b)) \quad (1)$$

avec  $x^a$  l'analyse,  $x^b$  l'ébauche,  $K$  la matrice de gain, et  $y - H(x^b)$  les innovations qui correspondent à la différence des observations et des simulations.  $H$  est l'opérateur d'observation qui permet de passer de l'espace du modèle à l'espace des observations. Dans notre cas, pour les données IASI, il s'agit du transfert radiatif utilisé dans la partie 2 pour faire les simulations.

Au cours des assimilations, chaque analyse résultant de ce compromis sert d'état initial afin d'établir une prévision qui sert d'ébauche pour l'assimilation suivante. Cette méthode, nécessitant des supercalculateurs capables d'effectuer des opérations en très grand nombre, a été utilisée pour une période entre le 10 et le 20 mars 2013 en tenant compte du profil climatologique ainsi que du profil variable.

#### 2) Différences d'analyses

Une première vue des différences d'analyses entre le profil "climatologique" et le profil variable est illustrée par la figure 9, pour la première assimilation qui a eu lieu le 10 mars 2013 à 00 UTC, pour la température sur le niveau isobare 400 hPa.

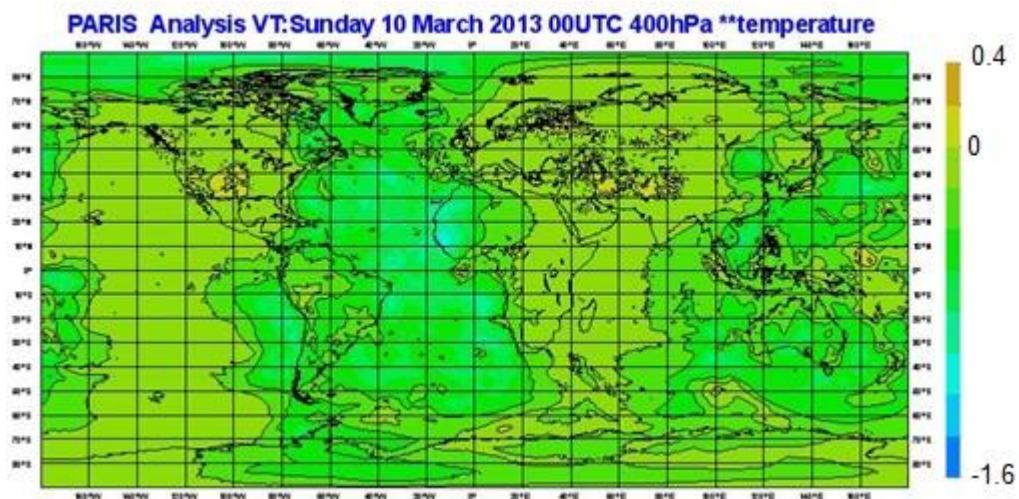


Figure 9 : Différences d'analyses entre le profil "climatologique" et variable en K

Nous retrouvons bien des différences de températures aux endroits correspondant aux traces IASI du réseau 00 UTC que l'on peut observer sur la figure 7-b). Le niveau isobare à 400 hPa est sélectionné pour cette étude car les différences y sont les plus importantes.

La figure 10 représente les différences d'analyse au cours des assimilations successives. Celles-ci sont importantes, et avoisinent les -0.3K lors de la première assimilation puis diminuent en raison des corrections apportées à chaque analyse. Les différences d'analyses semblent converger, ce qui implique des corrections de plus en plus faibles. Cette période de 10 jours ne permet toutefois pas de visualiser une convergence, il faudrait poursuivre les assimilations sur une période plus longue.

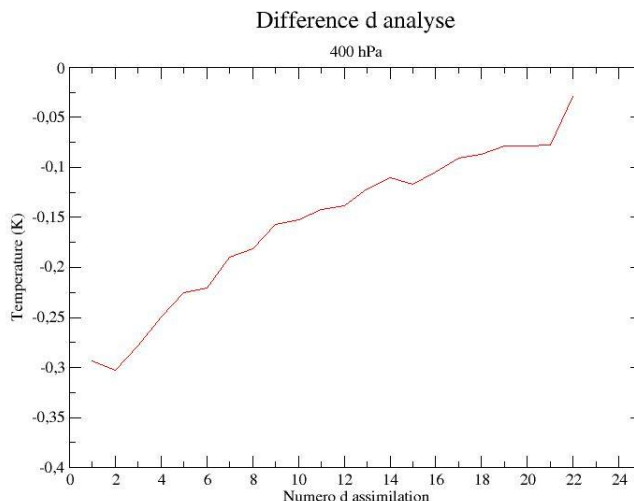


Figure 10 : Différences d'analyse au cours du temps

### 3) Incréments d'analyse

Les incréments d'analyses représentent la correction apportée à chaque assimilation. Ce sont les différences entre les analyses et les ébauches. L'incrément d'analyse moyen obtenu avec le profil "climatologique" est quasiment constant autour de 0, ce qui est normal car c'est le profil actuellement utilisé. Pour la première assimilation, les ébauches sont identiques car proviennent de l'analyse du réseau précédent effectuée avec le profil "climatologique". Ainsi, l'incrément d'analyse obtenu avec le profil variable est important, dépassant 0.3 K. Au cours des assimilations suivantes, il diminue et la différence des incréments obtenus avec les deux profils converge rapidement. En effet, dès l'assimilation du 11/03 à 12H UTC elle semble se stabiliser au bout de 7 assimilations.

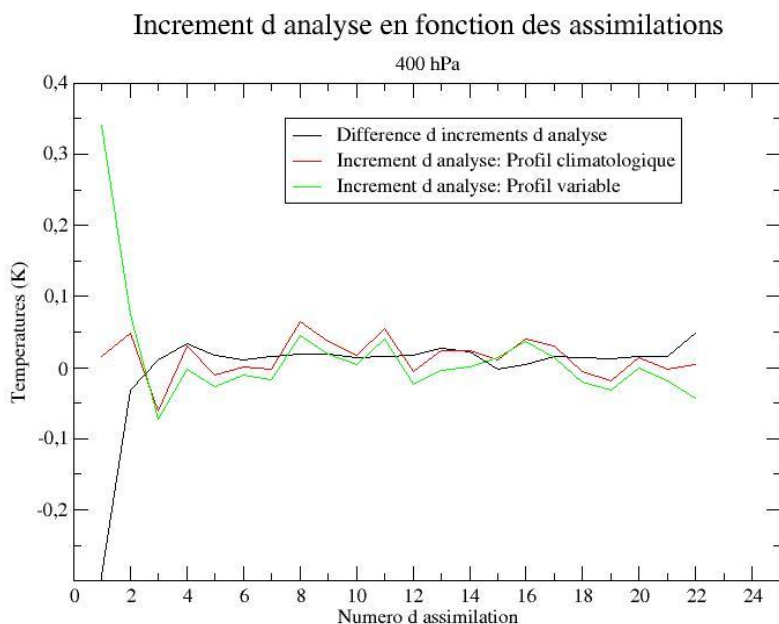


Figure 11 : Incrément d'analyse au cours du temps

Les innovations obtenues avec le canal 265, dont la sensibilité est maximale à 400hPa pour la région sud valent respectivement 0.105 K avec le profil "climatologique" et 0.156 K avec le profil variable en moyenne sur la journée du 10/03. Ces innovations plus grandes pour le profil variable induisent bien des incréments plus grands autour de 400 hPa comme nous le montre la figure 12. Ces résultats sont bien en accord la formule (1).

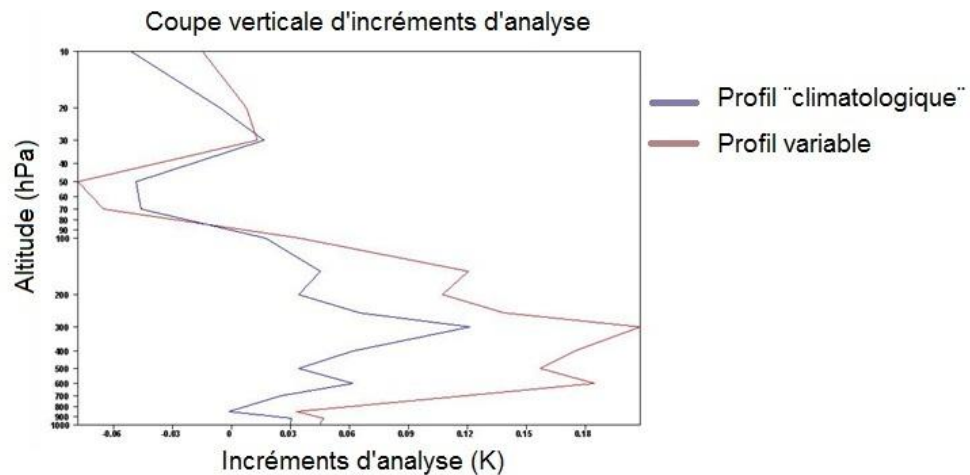


Figure 12 : Coupe verticale d'incrément d'analyse

## Conclusion

Le sondeur IASI restitue actuellement des profils de températures en considérant un profil "climatologique" de CO<sub>2</sub> invariant dans l'espace et dans le temps. Les données MACC étudiées conduisent à un profil de CO<sub>2</sub> moyen proche du profil de l'année 2007. En estimant l'augmentation annuelle des concentrations en CO<sub>2</sub> de 1.92 ppmv, il est facile d'obtenir un profil caractéristique de chaque année. Un découpage géographique en trois domaines (nord, sud et tropiques) ainsi qu'une prise en compte de la variabilité mensuelle permet d'élaborer un profil de CO<sub>2</sub> variable dans le temps et l'espace. Les simulations IASI montrent que la prise en compte de ce profil donne des différences de températures de brillance différentes d'un ordre de grandeur du centième au dixième de Kelvin. Ces différences sont d'autant plus importantes que le gradient de profil de température est fort. Ainsi, la région la plus impactée par le profil variable est la zone tropicale. De plus, les simulations avec ce profil ont tendance à abaisser les nuages. Enfin, l'assimilation des données réalisée montre un impact sur les analyses de températures.

Toutefois, il serait intéressant de comparer les analyses obtenues à des données indépendantes pour vérifier si le profil variable améliore les analyses ou non. En outre, il est courant de calculer des prévisions à moyenne échéance (de j+1 à j+4) et de calculer des scores sur ces prévisions pour voir si celles qui sont issues d'assimilation avec le profil variable sont meilleures.

D'un point de vue personnel, nous sommes entièrement satisfaits de ce stage grâce auquel nous avons pu découvrir le monde de la recherche. Le travail en binôme s'est très bien déroulé et nous a permis d'avancer efficacement. Nous nous sommes répartis les différentes tâches à effectuer tout en nous relayant afin de travailler de façon équitable sur celles-ci. Nous avons gagné en autonomie et approfondi notre connaissance de l'environnement UNIX.

## Bibliographie

Données MACC sur le site Internet : <http://copernicus-atmosphere.eu>

Documentation Metview depuis le site Internet de ECMWF : <http://ecmwf.int>

**D. Renaut**, 2004 : Les satellites météorologiques. *La Météorologie*, 45, 33-37.

**T. Phulpin, C. Camy-Peyret, J. Taylor, C. Clerbaux, P. Coheur, C. Crevoisier, D. Edwards, A. Gambacorta, V. Guidard, F. Hilton, N. Jacquinet, R. Knuteson, L. Lavanant, T. McNally, M. Matricardi, H. Revercomb, C. Serio, L. Strow, P. Schlüssel, D. Klaes, C. Larigauderie**, 2011 : Les résultats exceptionnels de Iasi, sondeur atmosphérique hyperspectral de Metop. *La Météorologie*, 72, 19-29.

**F-R. Cayla**, 2001 : L'interféromètre IASI, Un nouveau sondeur satellitaire à haute résolution. *La Météorologie 8<sup>e</sup> série*, 32, 23-39.

**R. Engelen, P. Bauer**, 2011 : The use of variable CO<sub>2</sub> in the data assimilation of AIRS and IASI radiances. *ECMWF Technical Memoranda*

**T. Phulpin, F. Rabier, L. Lavanant**, 2003 : Le sondage satellitaire et son évolution. *La Météorologie*, 40, 80-84

**J. Pailleux**, 2002 : Les besoins en observations pour la prévision numérique du temps. *La Météorologie*, 39, 29-35

**R. Rizzi, R. Saunders**, 1998 : Principles of remote sensing of atmospheric parameters from space. *Meteorological Training Course Lecture Series*.

**J-R. Eyre**, 1991 : Inversion methods for satellite sounding data. *Meteorological Training Course Lecture Series*.