⁽¹⁾ Université libre de Bruxelles (ULB), Service de Chimie Quantique et Photophysique, Avenue F. D. Roosevelt 50, 1050 lxelles Tel : +32 (0)2 650 24 15 ou 22 36, Fax : +32 (0)2 650 42 32, yrhoni@ulb.ac.be

Étude de la chimie et du transport d'espèces réactives dans les panaches de feux à l'aide du sondeur IASI

1. Introduction

Les feux de végétation, en émettant de grandes quantités de gaz et de particules dans l'atmosphère, constituent une source importante de pollution, impliquant des impacts tant au niveau local que global [1]. Localement, les panaches diminuent la visibilité et altèrent la qualité de l'air. Ils modifient également le système à plus grande échelle car, lorsque les composés sont émis dans l'atmosphère, ils réagissent photochimiquement et sont transportés par les vents loin de leurs sources d'émission. À titre d'exemple, les feux de biomasse dans les régions boréales du Canada ou de l'Alaska, en émettant des gaz (CO₂, CO et autres composés organiques) et des aérosols carbonés peuvent, selon la direction des vents, influencer les régions reculées de l'arctique ou, via la production d'ozone (O_3) dans le panache, affecter la qualité de l'air dans les zones urbaines à l'échelle continentale. Globalement, les feux représentent également des acteurs importants du climat et contribuent, directement ou non, à la modification du budget radiatif. Bien que des avancées scientifiques aient été réalisées au cours des dernières années sur l'observation globale des feux, de nombreuses incertitudes demeurent en ce qui concerne les quantités de gaz et de particules émises, mais aussi la formation des produits secondaires, dont l'ozone en particulier, et les mécanismes d'injection.

Avec l'avènement d'outils de télédétection sophistiqués, des mesures quantitatives de différentes espèces gazeuses peuvent être obtenues et, via la confrontation avec des modèles, amener des informations de première importance pour notre compréhension des mécanismes de chimie et de transport dans les panaches de feux. Notre travail de thèse est une contribution à cette thématique. Il repose sur l'étude des émissions des feux de végétation, de leur impact sur la composition atmosphérique locale à globale et par extension de leur rôle dans diverses problématiques environnementales. Notre recherche s'appuie sur les données de l'instrument spatial IASI (Interférogramme de sondage atmosphérique dans l'infrarouge). Celui-ci a été embarqué sur la plateforme MetOp en octobre 2006. Il fournit 1.300.000 spectres par jour et une couverture globale bi-journalière [2]. Cette spécificité du sondeur, qui offre la possibilité de suivre l'évolution des concentrations des espèces présentes en faible quantité dans l'atmosphère, est déterminante pour notre étude de la chimie dans les panaches de feux.

2. Composition gazeuse des panaches de feux à l'aide du sondeur IASI

Les premières observations des feux par IASI faites durant notre travail de thèse ont mis en évidence, en plus du monoxyde de carbone habituellement utilisé comme traceur de combustion, la présence d'espèces chimiquement actives, dont l'ammoniac (NH₃) et divers composés organiques. Via une analyse approfondie des spectres, nous montrons dans notre travail qu'au total 24 espèces gazeuses sont détectées dans les spectres IASI (Figure 1), ce qui représente une avancée majeure dans la détection par les sondeurs infrarouges Chimie de l'environnement

au nadir [3] (Un sondage au nadir se fait dans la direction verticale à la surface de la Terre). 10 espèces sont habituellement observées dans les spectres [le dioxyde de carbone (CO₂), l'oxyde d'azote (N₂O), les chlorofluorocarbures (CFC-11 et CFC-12), le sulfure de carbonyle (OCS), l'eau (H₂O) et ses isotopes, le méthane (CH₄), l'ozone (O₃), le monoxyde de carbone (CO), et l'acide nitrique (HNO₃)], 12 sont observées dans les panaches de feux [l'ammoniac (NH₃), l'éthy-lène (C₂H₄), le méthanol (CH₃OH), l'acide formique (HCOOH), le nitrate de peroxyacétyle (PAN), l'acide

acétique (CH₃COOH), le formaldéhyde (HCHO) et le propylène (C₃H₆), en plus de 4 autres molécules qui n'ont jamais été observées auparavant depuis l'espace et par un instrument avec une géométrie au nadir : l'acide nitreux (HONO), mesuré dans les branches Q, à 790.50 et 852.25 cm⁻¹, le furane (C₄H₄O) à 744.50 cm⁻¹, le cyanure d'hydrogène (HCN) à 712.25 cm⁻¹ ainsi que l'acétylène (C₂H₂) à 730.50 cm⁻¹], et finalement H₂S et SO₂ qui sont observés essentiellement dans les panaches volcaniques.



La Figure 2 schématise le progrès du sondage par télédétection infrarouge et au nadir pour mesurer les gaz en trace réactifs, depuis les premières observations faites par l'instrument IRIS (Interferometric Reflectance Imaging Sensor) en 1969. Il est cependant opportun de faire remarquer que ce progrès n'est pas seulement dû à l'amélioration faite au niveau de la résolution spectrale mais surtout aux performances radiométriques et l'amélioration de la couverture spatiale de IASI par rapport à ces prédécesseurs. Plus d'évènements sont détectés, et détectés beaucoup plus tôt par rapport au déclenchement de l'évènement. Ces observations inattendues ouvrent la voie à un examen approfondi de la réactivité dans les panaches, au cours de leur transport et en fonction des conditions météorologiques locales. Nous nous sommes attachés à cette étude en ciblant principalement deux évènements intenses et isolés. Le premier évènement est celui des feux d'Australie de février 2009, qui était particulier de par la hauteur d'injection du panache (haute troposphère voire basse stratosphère) mais aussi suite à la forte quantité d'aérosols émise. Le second évènement est celui des feux de Russie centrale de l'été 2010, qui se caractérisent par la durée de l'épisode (d'environ un mois) mais aussi par sa très large étendue.



Figure 2 : Aperçu historique des gaz en trace détectés à partir des sondeurs infrarouges en visée au nadir : IRIS [4], IMG [5], AIRS [6], TES [7] et IASI [8, 3]. Étant donné que la date exacte de la première détection est difficile à déterminer, ces espèces sont classées par date de lancement de leurs instruments respectifs.

3. Feux d'Australie de février 2009

À l'aide de l'algorithme FORLI (Fast Optimal Retrieval on Layers for IASI [9]) qui fournit entre autres les colonnes totales de CO en temps quasi réel, nous avons été en mesure d'observer deux fois par jour le panache émis par les feux survenus au sud-est de l'Australie le 7 février 2009, et de suivre son évolution au cours du temps. Nous illustrons dans la Figure 3 l'évolution du panache, montré pour le CO, entre le 6 et le 10 février 2009, à savoir le jour avant et les trois premiers jours qui suivent les feux. L'échelle de couleurs (allant de 0 à 4 10¹⁸ molec. cm⁻²) représente les colonnes totales de CO. Nous présentons, pour chaque jour séparément les orbites du matin (AM, à gauche) et du soir (PM, à droite). La Figure 3 révèle que le panache de feux a été observé par IASI, pour la première fois, sur l'orbite AM du 7 février 2009. Le panache a ensuite été transporté par les vents loin des sources d'émission vers la Nouvelle-Zélande, qu'il atteint le 7 février au soir, puis au-delà au-dessus de l'océan Pacific sud.

Dans la seconde partie de ce travail, nous avons procédé à la restitution des concentrations d'une multitude d'espèces réactives émises par les feux. Les distributions des colonnes totales pour chaque constituant, sur la période du 7 au 11 février 2009 et sur toute la zone d'étude sont données dans la Figure 4. Elles y sont comparées à la distribution des colonnes de CO, discutées précédemment (Figure 3).

La Figure 4 révèle une diminution plus ou moins rapide des différents composés, et en particulier de ceux dont la durée de vie est connue comme étant particulièrement courte, à savoir HONO, NH₂, C₂H₄ et C₄H₄O. Pour ceux-ci, les mesures sont possibles uniquement les 12 h à 2 jours suivant le déclenchement des feux, suggérant une destruction chimique rapide dans les panaches. Pour C₂H₂, HCN, et CH₂OH, les mesures montrent des concentrations en excès sur de plus longues distances. En particulier, la structure persistante à haute altitude, au Nord de la Nouvelle-Zélande, révélée par l'analyse des distributions de CO, s'observe pour ces différentes espèces. Le filament transporté à plus basse altitude vers l'Amérique du Sud n'est quant à lui observé que pour CH₂OH. Il semble cependant déjà que parmi l'ensemble des espèces, PAN et tout particulièrement HCOOH, suivent une évolution différente, avec une augmentation des colonnes entre le début de l'évènement le 7 février et les jours suivants. Pour HCOOH, les colonnes maximales sont de l'ordre de 9.5 1015 molec.cm⁻² le 7 AM mais atteignent 1.5 10¹⁶ molec. cm⁻² le 9 AM. Il s'agirait donc d'une mise en évi-



Figure 3 : Distribution des colonnes totales de CO en molec.cm⁻² dans les panaches pour les orbites du matin (AM, à gauche) et du soir (PM, à droite) des feux survenus au sud-est de l'Australie du 6 au 10 février 2009.



Figure 4 : Distributions spatiales des colonnes (en molec.cm⁻²) de CO obtenues à partir de l'algorithme FORLI (la même qu'à la figure 3), comparées à celles de haut vers le bas et de gauche à droite (HONO, NH₃, C_4H_4O , HCOOH, PAN, HCN, C_2H_2 , C_2H_4 , et CH₃OH). La distribution spatiale des températures de brillance des aérosols de suie dans le panache de feux du «samedi noir» est fournie dans la figure du dessous, en utilisant les canaux 960.5 et 1130.75 cm⁻¹.

dence, pour HCOOH, d'une source secondaire dans le panache, ce qui constitue un résultat intéressant de cette étude. Nous verrons que des conclusions similaires sont tirées de l'analyse des feux en Russie (de juillet/août 2010) dans la section 4 ci-dessous. Pour le PAN, la formation secondaire est évidente en regard des mécanismes réactionnels connus dans la littérature et des émissions simultanées par les feux des composés organiques et d'oxydes d'azote (ces derniers ne peuvent pas être détectés par IASI).

4. Feux de Russie de Juillet/Août 2010

Une production secondaire de HCOOH a également été observée, non pas visuellement comme dans le cas des feux de l'Australie de févier 2009, mais par analyse des rapports d'enrichissement $\Delta X/\Delta CO$ (en anglais « Enhancement Ratios » [10]) nous permettant de nous affranchir de la dilution dans le panache. Il faut cependant faire la distinction entre deux grandeurs : les rapports d'émission sont calculés typiquement par les mesures in-situ (par exemple Delmas et al. [11]; Yokelson et al. [12]) et en laboratoire (par exemple, Andreae et al. [13]; Koppmann et al. [14]), tandis que les rapports d'enrichissement sont calculés dans des panaches âgés plus éloignés de la source. Ce sont ces dernières grandeurs qui peuvent être calculées à partir des mesures depuis l'espace. Lorsqu'un panache étendu est observé, les rapports d'enrichissement peuvent être obtenus en calculant la pente de la régression linéaire des concentrations restituées de X (avec X l'espèce d'intérêt) par rapport à celles de CO.

Nous nous sommes attachés dans cette analyse de feux de Russie [Note 1] de Juillet/Août 2010 en ciblant 3 constituants émis par la combustion de la végétation, à savoir CO, NH_3 , et HCOOH. La Figure 5 représente les colonnes totales moyennées (en molec.cm⁻²) de CO (a), NH_3 (b), et HCOOH (c) dans le panache de feux du 27 juillet au 27 août 2010, couvrant toute la zone affectée (allant de 30 à 80°N et de 0 à 150°E).

Les corrélations entre les colonnes restituées pour les 3 espèces sont représentées à la Figure 6 pour la région allant de 40 à 75°N et de 30 à 90°O. La figure 6a montre les corrélations des colonnes de NH₃ et de HCOOH par rapport au CO, pour les observations du 5 août 2010. Les corrélations élevées (coefficient de corrélation de 0.75 et 0.76 pour NH₂ et HCOOH respectivement) sont une indication de la source d'émission commune pour les trois espèces. Les concentrations de NH₂ inférieures à 1 10¹⁶ molec. cm⁻² et associées aux concentrations plutôt élevées de CO (supérieures à 4 1018 molec cm-2), correspondent probablement aux masses d'air plus âgées. La pente des droites de régression donne la valeur des rapports d'enrichissement $\Delta X/\Delta CO$. Pour le 5 août 2010, les rapports $\Delta NH_2/\Delta CO$ et $\Delta HCOOH/$ ΔCO sont respectivement de 0.032 ± 0.004 et 0.021 \pm 0.004. L'évolution des rapports $\Delta X/\Delta CO$ pour chaque orbite AM et sur toute la période de l'épisode de feux, du 27 juillet au 24 août 2010, est donnée dans la figure 6b.

Les rapports $\Delta NH_3/\Delta CO$ mesurés par IASI (qui varient entre 0.010 et 0.052) sont comparables aux valeurs rapportées dans la littérature par Akagi *et al.* [16], typiques des émissions de feux de forêts boréales (0.035) et extratropicales (0.033). Ils sont par contre significativement plus faibles que la valeur tabulée (0.097) pour la combustion de la tourbe [16]. Pour HCOOH, les rapports d'enrichissement varient entre 0.010 et 0.032, et sont 10 fois plus élevés que les valeurs rapportées par Akagi *et al.* [16], qui valent 2.7 10⁻³ pour les forêts boréales et extratropicales et de 1.8 10⁻³ pour les forêts de tourbe, ce qui laisse à supposer une production secondaire de HCOOH dans les panaches de feux [15].

La restitution des colonnes totales de CO, NH₃ et HCOOH, nous permet de déterminer également les masses totales journalières sur toute la période des feux autour de la région affectée par ceux-ci. La colonne gauche de la Figure 7 représente l'évolution temporelle journalière des masses totales calculées respectivement pour CO, NH₃ et HCOOH (courbes en noir) à partir des observations de IASI d'une année complète. Ces données ont été lissées (courbes en rouge) sur un intervalle de 10 jours permettant une meilleure observation. Par ailleurs, nous avons calculé, à partir de ces données, les concentrations de fond de chaque espèce (courbes bleues), jour par jour, comme étant la masse totale minimale observée sur un intervalle de 10 jours. Cette méthode est





Figure 5 : Observations journalières des panaches de feux de Russie par IASI au cours de l'été 2010. Les 3 images, de haut en bas, indiquent les colonnes totales moyennées de CO, NH₃ et HCOOH en molec. cm⁻² dans une grille 0.5° $\times 0.5^{\circ}$ pendant un mois, du 27 juillet au 27 août 2010 [15].

Figure 6 : (a) Corrélations entre NH₃/CO (en rouge) et HCOOH/CO (en bleu) pour les colonnes totales du 5 août 2010. Les valeurs des pentes qui en résultent, leurs erreurs et les coefficients de corrélation (R2) sont indiquées sur la figure. (b) Évolution temporelle des rapports d'enrichissement de NH, et HCOOH par rapport au CO, du 27 juillet au 24 août, dans la région entre 40-75°N et 30-90°O. Les barres d'erreurs représentent les erreurs des pentes correspondantes [15].

similaire à celle utilisée par Yurganov *et al.* [17] dans son étude du même évènement. Ce choix a été fait intentionnellement afin de faciliter l'analyse comparative. Comme nous pouvons le voir sur la Figure 7, les masses totales atteignent, vers mi-août, des maxima d'émission de 36.1 Tg pour CO, 0.06 Tg pour NH₃, et 0.70 Tg pour HCOOH [15].

Les masses totales représentées dans la colonne de gauche de la Figure 7 incluent à la fois les émissions dues aux feux mais aussi les autres contributions,

comme les émissions biogéniques pour HCOOH et les émissions anthropiques pour NH_3 et CO. À partir des masses totales journalières, nous estimons la part émise par les feux. La méthode consiste à soustraire, pour chaque constituant considéré, les valeurs de fond (en bleu) des valeurs des masses totales (en noir) pour la période allant du 29 juin au 27 septembre 2010. Les masses ainsi obtenues («burden» en anglais) sont données dans la colonne centrale de la Figure 7. Elles atteignent à leur maximum la valeur de 9.64, ~0.06 et 0.25 Tg respecti-



Figure 7 : **Colonne gauche :** évolution temporelle des masses totales, exprimées en Tg de CO, de NH₃ et de HCOOH (en noir) sur la zone entre 40-75°N et 30-150°O pour CO et HCOOH et sur la zone entre 40-75°N et 30-90°O pour NH₃. Les lignes rouges représentent les masses totales lissées dans un intervalle de 10 jours et les lignes bleues représentent les masses totales représentatives des valeurs de fond. **Colonne centrale :** contributions des feux aux masses totales de CO, de NH₃ et de HCOOH émises (Tg) en éliminant les valeurs de fond. **Colonne droite :** flux d'émission en Tg,jr⁻¹ de CO, NH₃ et HCOOH [15].

vement pour CO, NH₃ et HCOOH. Les ~10 Tg de CO, émis sur un jour, représentent à eux seuls plus que 85% de l'émission totale anthropique de CO sur une année entière dans cette région [18]. Les valeurs journalières maximales de NH₃ et HCOOH, représentent à elles seules respectivement 5 et 20% des émissions annuelles totales provenant de toutes les forêts extratropicales [10] ce qui témoigne du caractère exceptionnel de cet évènement.

Les flux journaliers sont donnés, en Tg par jour, dans la colonne de droite de la Figure 7, pour la même période du 29 juin au 27 septembre 2010. Compte tenu du fait que nous ne disposons pas de valeurs de référence pour les durées de vie de ces espèces dans les panaches, nous avons effectué le calcul des flux d'émission pour différentes durées de vie. Nous avons considéré des durées de vie de 7 et 15 jours pour le CO (notées σ_{eff} préalablement estimées par des modèles dans l'étude de Yurganov et al. [17]), de 6, 12 et 24 heures pour NH₃, et finalement de 2, 4 et 10 jours pour HCOOH. Les valeurs maximales calculées avec les différentes hypothèses sur les durées de vie sont de 1.41-1.87 Tg.jr⁻¹, 0.04-0.08-0.16 Tg.jr⁻¹ et 0.07-0.11-0.19 Tg.jr⁻¹ pour le CO, NH₃ et HCOOH respectivement, avec les plus grandes valeurs logiquement pour les petites valeurs de σ_{eff} . Finalement, nous avons calculé les émissions totales dues aux feux de végétation, en intégrant les flux entre le 25 juillet et le 31 août 2010. Nos estimations sont, à nouveau suivant les hypothèses sur σ_{eff} , de 19-33 Tg pour le CO, 0.7-2.6 Tg pour $\rm NH_{3},$ et 0.9-3.9 Tg pour HCOOH. Pour NH₂ et HCOOH, les valeurs rapportées ici sont comparables à ce qui est normalement émis sur une année entière par tous les feux de forêts extratropicaux [19, 20].

5. Conclusions

Le travail présenté dans cette thèse repose sur l'analyse principalement locale mais aussi globale des panaches de feux, en ciblant 3 constituants émis par la combustion de la végétation, à savoir CO, NH₃, et HCOOH. Notre recherche s'est appuyée sur les spectres dans l'infrarouge thermique enregistrés par le sondeur IASI sur la plateforme MetOp. Nous avons tout d'abord analysé les mesures fournies par l'instrument IASI des panaches issus des feux afin de mieux caractériser quantitativement la composition de ceux-ci et d'évaluer les performances des mesures depuis l'espace dans les environnements particuliers. Nous avons avec succès isolé dans les radiances les signatures spectrales d'une multitude de composés dont la plupart a été détecté dans les panaches concentrés et de haute altitude des feux d'Australie de février 2009.

Cette richesse spectrale, couplée à l'exceptionnel échantillonnage et à la bonne résolution spatiale de IASI, nous a permis d'effectuer une étude détaillée de la composition des panaches des feux d'Australie en février 2009 et de suivre leur évolution au cours du temps. Nous avons par la suite restitué la concentration des différentes molécules (C_2H_2 , C_2H_4 , C_4H_4O , HCN, HCOOH, HONO et NH₃) dans le panache.

Nous avons, sur base des mesures par IASI de NH₂, CO, et HCOOH, également analysé un autre cas extrême, à savoir les feux de Russie de juillet/août 2010. Nous avons estimé les masses totales sur base des colonnes totales restituées, et par la suite les flux d'émission de chacun des constituants. Ces émissions sont de 19-33 Tg pour le CO, 0.7-2.6 Tg pour NH₂, et 0.9-3.9 Tg pour HCOOH. Les valeurs rapportées ici sont, pour NH, et HCOOH par exemple, comparables à ce qui est normalement émis sur une année entière par tous les feux de forêts extratropicaux, ce qui montre le caractère exceptionnel de cet évènement de feux. Nous avons également déterminé les rapports d'enrichissement de NH₂ et HCOOH relatifs au CO sur toute la période des feux. Si les rapports sont comparables aux valeurs rapportées dans la littérature typiques aux émissions de feux de forêts boréales et extratropicales de cette région pour $\Delta NH_2/\Delta CO$, nous montrons qu'ils sont jusqu'à 10 fois plus élevés pour Δ HCOOH/ Δ CO. Ces valeurs élevées de rapports d'enrichissement de HCOOH dans les panaches âgés confirment ainsi l'hypothèse de formation secondaire de HCOOH dans les panaches de feux évoquée pour les feux australiens de 2009.

Notes

[Note 1] : Survenus plus précisément le 27 juillet 2010 et ont duré plus ou moins un mois.

<u>Références</u>

- [1] Crutzen, P. J. and Andreae, M. O. : Biomass Burning in the Tropics
 : Impact on Atmospheric Chemistry and Biogeochemical Cycles, Science, 250(4988), 1669–1678, doi :10.1126/ science.250.4988.1669, 1990.
- [2] 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, doi :10.5194/acp-9-6041-2009, 2009.
- [3] Clarisse, L., R'Honi, Y., Coheur, P.-F., Hurtmans, D., and Clerbaux, C. : Thermal infrared nadir observations of 24 atmospheric gases, Geophys. Res. L., 38, L10 802, 5, doi :10.1029/2011GL047271, 2011.
- [4] Hanel, R. A., Conrath, B. J., Kunde, V. G., Prabhakara, C., Revah, I., Salomonson, V. V., and Wolford, G. : The Nimbus 4 infrared spectroscopy experiment : 1. Calibrated thermal emission spectra, Journal of Geophysical Research, 77, 2629–2641, doi :10.1029/JC077i015p02629, 1972.
- [5] Clerbaux, C., Hadji-Lazaro, J., Turquety, S., Mégie, G., and Coheur, P.-F. : Trace gas measurements from infrared satellite for chemistry and climate applications, Atmospheric Chemistry and Physics, 3, 1495–1508, doi :10.5194/acp-3-1495-2003, 2003.
- [6] Carn, S. A., Strow, L. L., de Souza ?Machado, S., Edmonds, Y., and Hannon, S. : Quantifying tropospheric volcanic emissions with AIRS : The 2002 eruption of Mt. Etna (Italy), Geophys. Res. Lett., 32, L02 301, doi :10.1029/2004GL021034, 2005.
- [7] Beer, R., Shephard, M. W., Kulawik, S. S., Clough, S. A., Eldering, A., Bowman, K. W., Sander, S. P., Fisher, B. M., Payne, V. H., Luo, M., Osterman, G. B., and Worden, J. R. : First satellite observations of lower tropospheric ammonia and methanol, Geophysical Research Letters, 35, Issue 9, doi :10.1029/2008GL033642, 2008.
- [8] Coheur, P.-F., Clarisse, L., Turquety, S., Hurtmans, D., and Clerbaux, C. : IASI measurements of reactive trace species in biomass burning plumes, Atmos. Chem. Phys., 9, 5655–5667, doi :10.5194/acp-9-5655-2009, 2009.
- [9] Hurtmans, D., Coheur, P.-F., Wespes, C., Clarisse, L., Scharf, O., Clerbaux, C., Hadji-Lazaro, J., George, M., and Turquety, S. : FORLI radiative transfer and retrieval code for IASI, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf., 113(11), 1391–1408, doi :10.1016/j. jqsrt.2012.02.036, 2012.
- [10] Andreae, M. O. and Merlet, P. : Emission of trace gases and aerosols from biomass burning, Global Biogeochem. Cycles, 15(4), 955–966, doi :10.1029/2000GB001382, 2001.
- [11] Delmas, R., Lacaux, J., and Brocard, D. : Determination of biomass burning emission factors : Methods and results, Environ. Monit. Assess., 38, 181–204, doi :10.1007/BF00546762, 1995.
- [12] Yokelson, R. J., Goode, J. G., Ward, D. E., Susott, R. A., Babbitt, R. E., Wade, D. D., Bertschi, I., Griffith, D. W. T., and Hao, W. M. : Emissions of formaldehyde, acetic acid, methanol, and other trace gases from biomass fires in North Carolina measured by airborne Fourier transform infrared spectroscopy, J. Geophys. Res., 104(D23), 30,109–30,125, doi :10.1029/1999JD900817, 1999.

- [13] Andreae, M. O., Browell, E. V., Garstang, M., Gregory, G. L., Harriss, R. C., Hill, G. F., Jacob, D. J., Pereira, M. C., Sachse, G. W., Setzer, A. W., Dias, P. L. S., Talbot, R. W., Torres, A. L., and Wofsy, S. C. : Biomass-Burning Emissions and Associated Haze Layers Over Amazonia, J. Geophys. Res., 93(D2), 1509–1527, doi : 10.1029/JD093iD02p01509, 1988.
- [14] Koppmann, R., von Czapiewski, K., and Reid, J. S. : A review of biomass burning emissions, part I : gaseous emissions of carbon monoxide, methane, volatile organic compounds, and nitrogen containing compounds, Atmos. Chem. Phys. Discuss., 5, 10 455–10 516, doi :10.5194/acpd-5-10455-2005, 2005.
- [15] R'Honi, Y., Clarisse, L., Clerbaux, C., Hurtmans, D., Duflot, V., Turquety, S., Ngadi, Y., and Coheur, P.-F. : Exceptional emissions of NH3 and HCOOH in the 2010 Russian wildfires, Atmospheric Chemistry and Physics, 13, 4171–4181, doi : 10.5194/acp-13-4171-2013, 2013.
- [16] Akagi, S. K., Yokelson, R. J., Wiedinmyer, C., Alvarado, M. J., Reid, J. S., Karl, T., Crounse, J. D., and Wennberg, P. O. : Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models, Atmos. Chem. Phys., 11, 4039– 4072, doi :10.5194/acp-11-4039-2011, 2011.
- [17] Yurganov, L.N., Rakitin, V., Dzhola, A., August, T., Fokeeva, E., George, M., Gorchakov, G., Grechko, E., Hannon, S., Karpov, A., Ott, L., Semutnikova, E., Shumsky, R., and Strow, L.: Satellite- and ground-based CO total column observations over 2010 Russian fires : accuracy of top-down estimates based on thermal IR satellite data, Atmos. Chem. Phys., 11, 7925-7942, doi:10.5194/acp-11-7925-2011, 2011.
- [18] Konovalov, I. B., Beekmann, M., Kuznetsova, I. N., Yurova, A., and Zvyagintsev, A. M.: Atmospheric impacts of the 2010 Russian wildfires : integrating modelling and measurements of an extreme air pollution episode in the Moscow region, Atmospheric Chemistry and Physics, 11, 10 031–10 056, doi :10.5194/acp-11-10031-2011, 2011.
- [19] Galloway, J., Dentener, F., Capone, D., Boyer, E., Howarth, R., Seitzinger, S., Asner, G., Clevelands, C., Green, P., Holland, E., Karl, D., Michaels, A., Popter, J., Townsend, A., and Vöosmarty, C. : Nitrogen cycles : Past, present and future, Biogeochemistry, 70(2), 153–226, doi :10.1007/ s10533-004-0370-0, 2004.
- [20] Stavrakou, T., Guenther, A., Razavi, A., Clarisse, L., Clerbaux, C., Coheur, P.-F., Hurtmans, D., Karagulian, F., De Mazière, M., Vigouroux, C., Amelynck, C., Schoon, N., Laffineur, Q., Heinesch, B., Aubinet, M., Rinsland, C., and Müller, J.-F. : First space-based derivation of the global atmospheric methanol emission fluxes, Atmospheric Chemistry and Physics, 11, 4873–4898, doi :10.5194/acp-11-4873-2011, 2011.