



UNIVERSITÉ
TOULOUSE III
PAUL SABATIER



INSU
Observer & co



METEO FRANCE

TRANSPORT ET QUALITE DE L'AIR AU DESSUS DE LA MEDITERRANEE

TRANSPORT AND AIR QUALITY ABOVE THE MÉDITERRANEAN BASIN

Programme **PRIMEQUAL 2**

Rapport de fin de contrat

Attié, J.-L.^{1,3}, F. Ravetta², P. Durand¹, L. El Amraoui³, P. Ricaud³, P. Nabat³, C. Di Biaggio⁴, F. Dulac⁵, J.-B. Renard⁶, C. Delon¹, F. Gheusi¹, M. Mallet¹, J. C. Raut², G. Ancellet², R. Abida³, F. Bernard³, P. Formenti⁴, C. Gaimoz⁴, N. Grand⁴, E. Hache^{1,3}, C. Jambert¹, C. Jarnot¹, E. Jaumouillé³, J. Parmentier³, J. Pelon², B. Piguet³, M. Sicard⁷, M. Jeannot⁶, L. Fleury⁸, H. Ferré⁸, A. Bourdon⁹, et N. Verdier¹⁰

1-LA, CNRS/Université de Toulouse, France; 2-LATMOS, CNRS/Université Pierre et Marie Curie (Paris 6), France; 3-CNRM-GAME, CNRS/Météo-France, Toulouse, France; 4-LISA, CNRS/Université de Versailles-Saint-Quentin-en-Yvelines, Paris, France; 5-LSCE, CEA-CNRS-UVSQ, Gif-sur-Yvette, France; 6-LPC2E, CNRS/University of Orléans, France; 7-Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain; 8-OMP/SEDOO, CNRS/University of Toulouse, France; 9-SAFIRE, Météo-France-CNRS-CNES, Toulouse, France; 10- CNES, Toulouse, France.

Laboratoire d'Aérodynamique

14, Av. Edouard Belin, 31400 Toulouse

J.-L. Attié, jean-luc.attie@aero.obs-mip.fr

Date : 10/02/2014

N° de contrat : 0962C0022

Date du contrat : 17/11/2009

TRANSPORT ET QUALITE DE L'AIR AU DESSUS DE LA MEDITERRANEE

Table des matières

Transport et Qualité de l'air au dessus de la Méditerranée	1
<i>Résumé</i>	6
<i>Note de synthèse</i>	16
<i>I-Pollution sur le bassin Méditerranéen</i>	16
I.1 Contexte de l'étude.....	16
I.2 La campagne expérimentale TRAQA	17
I-3 Réalisation de la campagne TRAQA-2012	18
I.3.1 Zone expérimentale de survol au dessus de la Méditerranée.....	19
I.3.2 Configuration instrumentale de l'ATR-42	20
I.3.3 Dispositif des ballons utilisés dans l'expérience	21
I.3.4 Autres instruments impliqués.....	23
I.3.5 Modélisation mise en œuvre pour TRAQA.....	25
I.3.5.1 Le modèle de Chimie Transport MOCAGE	25
I.3.5.2 Le modèle de trajectographie BAMED.....	26
I.4 Les Périodes d'Observation Intensive pendant TRAQA	27
I.4.1 POI-1: Cas du 26 Juin 2012 : Pollution dans le golfe de Gênes	27
I.4.1.1 Situation météorologique.....	27
I.4.1.2 Résultats.....	27
I.4.2 POI-2: Cas du 27 juin 2012 :mistral modéré établi	31
I.4.2.1 Situation météorologique.....	31
I.4.2.2 Résultats.....	33
I.5 POI-3: Cas du 29 Juin 2012 : Export de poussières désertiques	36
I.5.1 Situation météorologique	36
I.5.2 Résultats	37
I.6 POI-4: Cas des 3 et 4 Juillet 2012: Export de la pollution depuis Barcelone.....	40
I.6.1 Situation météorologique	40
I.6.2 Résultats	41
I.7 POI-5 : Cas des 6 et 7 Juillet 2012 : Pollution par mistral commençant	45
I.7.1 Situation météorologique	45
I.7.2 Résultats	47

I.7.3 Influence des cadastres d'émission sur la prévision d'O3 et de CO dans MOCAGE.....	50
I.8 POI-6: Cas du 7 Juillet 2012 : Mesure de flux de composés biogéniques..	53
I.8.1 Situation météorologique	53
I.8.2 Résultats	54
I.9 POI-7: Cas des 10 et 11 Juillet 2012 : Mesure de la pollution sur la côte occidentale	55
I.9.1 Situation météorologique	55
I.9.2 Résultats	56
<i>II-Mesure des aérosols pendant la campagne TRAQA</i>	<i>59</i>
II-1. Introduction	59
II-2. Caractérisation et impact radiatif des aérosols	59
II-2.1 Transport à grande distance et contexte régional	59
II-2.2 Composition chimique	62
II-2.3 Propriétés optiques	63
II-2.3.1 Analyse d'ensemble	63
II-2.3.2 Synergies instrumentales et estimation du rapport lidar.....	66
II-2.3.3 Fermeture optique pour l'estimation des valeurs de l'indice de réfraction complexe.	68
II-2.4 Impact radiatif	70
II.3 Mesures des aérosols par sondage (LOAC sous ballon)	71
II-4 Modélisation des cas d'études	75
II-4.1 Poussières sahariennes.....	75
II-3.2 Modélisation de la chimie et du transport à haute résolution de la pollution anthropique	81
<i>III- Mesures des flux biogéniques en zone Méditerranéenne</i>	<i>83</i>
III.1 Qualification de l'instrument MEDEE au cours de la campagne TRAQA .	83
III.2 La méthode DEC et le principe de fonctionnement de MEDEE	83
III.3 Validation de MEDEE au sol	84
III.4 Intégration de MEDEE en avion.....	85
III.5 Validation de MEDEE en avion	85
III.5.1 Procédures de vol utilisées	86
III.5.2 Traitement des données	87
III.5.3 Résultats : qualification de MEDEE	88
III.5.4 Estimation des flux de Composés Organiques Volatils Biogéniques .	89
III.6 Conclusion et perspectives.....	89
<i>IV Conclusion générale</i>	<i>91</i>
<i>IV Bibliographie</i>	<i>93</i>
<i>Annexe</i>	<i>98</i>
1-Actions de valorisation entreprises.....	98

2- Conférences internationales, colloques, Rapports, thèses.....	98
3-Publications en cours.....	100

Résumé

Entouré de chaînes de montagnes et par différents continents, et affecté par divers types de pollution, le bassin Méditerranéen est un véritable laboratoire naturel pour l'étude de la variabilité de la composition chimique dans les basses couches et l'interaction entre les polluants provenant de régions éloignées. Dans le cadre du programme ChArMEx (Chemistry and Aerosol Mediterranean Experiment), nous avons mené une campagne de terrain sur le bassin méditerranéen nord-ouest au cours de l'été 2012 pour documenter la pollution gazeuse et particulaire, en utilisant des moyens instrumentaux importants (avion instrumenté, des ballons pressurisés de couche limite et des sondages réguliers ..). Dans le cadre de cette expérience (TRAQA), quatre objectifs principaux étaient proposés :

1. La caractérisation des processus dynamiques d'export de masses d'air polluées depuis les régions-source du bassin
2. La quantification des échanges entre la couche limite et la troposphère libre
3. Le suivi lagrangien du vieillissement et du mélange des panaches de pollution dans la basse troposphère
4. L'analyse de la représentativité des cas d'étude sur une période de temps plus longue.

L'expérience TRQA a été réalisée en déclenchant sur alerte des périodes d'observation intensive (POI) avec les moyens aéroportés lorsque les conditions étaient favorables. Un total de 7 POIs ont été menées avec près de 60 h de vols de l'ATR-42 de SAFIRE et 5 vols de ballons de couche limite. Ainsi, nous avons pu documenter un épisode de pollution dans le golfe de Gênes, un cas de mistral modéré établi, un cas extrême de poussières africaines, un cas d'exportation de la pollution de Barcelone vers la mer Méditerranée, et un cas de départ de mistral. Les deux POIs restantes, menées dans des conditions anticycloniques d'été classiques, ont été consacrées à des mesures aéroportées des émissions biogéniques de végétations méditerranéennes, et à une documentation régionale des principales sources de pollution anthropique sur la côte française de la Méditerranée. Les données sont maintenant disponibles depuis le portail de la base de données ChArMEx <http://mistrals.sedoo.fr/ChArMEx/TRAQA/>

Mots clés : Méditerranée, Pollution, chimie atmosphérique, aérosols, qualité de l'air, transport

Abstract

Surrounded by mountains and several continents and affected by different types of pollution, the Mediterranean Sea is a natural laboratory for studying the variability of the chemical composition in the lower troposphere and the interaction between pollutants from distant regions. In the framework of the Chemistry and Aerosol Mediterranean Experiment (ChArMEx), we carried out a field campaign, using important instrumental means (instrumented aircraft, pressurized constant level balloons...) over the north-western Mediterranean basin during the summer 2012. In the framework of TRAQA, we focused on four main objectives :

1. The characterization of the dynamic processes of export of polluted air masses from remote continental regions around the Mediterranean Sea
2. The quantification of exchanges between the boundary layer and the free troposphere above the Mediterranean basin
3. The study of ageing and mixing of pollution plumes in the lower troposphere (gases and aerosols) with Lagrangian tracking.
4. The analysis of representative case studies against long-term measurements to estimate the impact of plumes of pollution on air quality.

The TRAQA field campaign was based on Intensive Observation Periods (IOPs) triggered on alert when the conditions were favorable. A total of seven IOPs were conducted with nearly 60 h of ATR-42 aircraft flights from SAFIRE and 5 flights of constant level pressurized balloons in the boundary layer. We documented an episode of pollution in the Genoa gulf, an established moderate mistral case, a strong African dust case, a case of export of pollution from Barcelona to the Mediterranean Sea, and an event of starting mistral. The two remaining IOPs, conducted under standard summer anticyclonic conditions, were devoted to aircraft measurements of biogenic emissions from Mediterranean vegetation, and to a regional survey to quantify the major sources of anthropogenic pollution on the Northern Mediterranean coast. The data are now available from <http://mistrals.sedoo.fr/ChArMEx/TRAQA/>

Key words: Mediterranean basin, pollution, atmospheric chemistry, air quality, transport

Note de synthèse

TRANSPORT ET QUALITE DE L'AIR AU DESSUS DE LA MEDITERRANEE (TRAQA)

PROGRAMME PRIMEQUAL

Nom du responsable scientifique du projet

J.-L. Attié

Proposants : P. Durand (resp. ballon), L. El Amraoui (resp. modélisation), F. Ravetta (resp. avion), C. Delon, F. Gheusi, M. Mallet, J. Pelon, G. Ancellet, J.-C. Raut, P. Ricaud et F. Dulac (financé par le programme MISTRALS/ChArMEx et l'ANR LOAC)

CONTEXTE GENERAL

Entouré de chaînes de montagnes et par différents continents, et affecté par divers types de pollution, le bassin Méditerranéen est un véritable laboratoire naturel d'étude de la variabilité de la composition chimique dans les basses couches et de l'interaction des polluants provenant de régions éloignées. Dans le cadre du programme ChArMEx (Chemistry and Aerosol Mediterranean Experiment), nous avons mené une campagne de terrain sur le bassin méditerranéen nord-ouest au cours de l'été 2012 pour documenter la pollution gazeuse et particulaire, en utilisant des moyens instrumentaux importants (avion instrumenté pour des mesures in situ et des mesures lidar, des ballons pressurisés de couche limite et des sondages réguliers). Le bassin Méditerranéen est un écosystème fragile et l'impact de la pollution est important dans un environnement dynamique complexe. Les principales motivations de ce projet sont de décrire et de comprendre des processus physiques et chimiques apparaissant sur le bassin Méditerranéen. Quels sont les différents processus impliqués dans le transport des gaz et des aérosols au dessus du bassin Méditerranéen ? Comment les panaches de pollution se mélangent-ils ? Quel est le degré de pollution sur le bassin Méditerranéen selon la situation météorologique ? Par exemple, quel est l'impact du mistral sur la dispersion de la pollution sur la Méditerranée ? Ces questions ont motivé le projet TRAQA.

OBJECTIFS GENERAUX DU PROJET

Quatre objectifs principaux sont proposés :

1. La caractérisation des processus dynamiques d'export de masses d'air polluées depuis les régions sources du bassin
2. La quantification des échanges entre la couche limite et la troposphère libre
3. Le suivi lagrangien du vieillissement et du mélange des panaches de pollution dans la basse troposphère
4. L'analyse de la représentativité des cas d'étude sur une période de temps plus longue.

QUELQUES ELEMENTS DE METHODOLOGIE (ET EVENTUELLES DIFFICULTES RENCONTREES)

La stratégie scientifique de l'expérience TRAQA était basée sur le déclenchement sur alerte de périodes d'observations intensives durant lesquelles étaient déployés un certain nombre de moyens de mesures extrêmement lourds à mettre en œuvre. Les alertes étaient données grâce à la prévision des situations météorologiques plusieurs jours à l'avance. Le jour J, les moyens étaient mis en alerte et envoyés sur le terrain si la situation voulue persistait. La situation était confirmée par des radio-sondages.

Cependant, des périodes d'observations où les ballons étaient impliqués ont évolué très rapidement : celle de 2 jours initialement envisagée s'est transformée en 2 périodes d'une journée (raisons: restriction des zones de vol avion et retour d'expérience avec des cas de mistral relativement plus forts que prévu). De plus, une des difficultés majeures lors de l'expérience a été la contrainte de circulation aérienne, surtout celle imposée par l'aviation civile française qui a donné très peu de liberté dans les plans de vols sur la Méditerranée. D'ailleurs, plusieurs vols ont dû être annulés ou écourtés compte tenu de cette contrainte.

RESULTATS OBTENUS

Autour de cette campagne, plusieurs laboratoires se sont regroupés pour permettre de réaliser la campagne expérimentale (LA, CNRM-GAME, LATMOS, LISA, LSCE et LPC2E). Durant l'expérience TRAQA, nous avons réalisé 7 périodes d'observation intensive totalisant environ une soixantaine d'heures avion sur 15 jours d'expérience. Ainsi, nous avons documenté un épisode de pollution dans le golfe de Gênes, un cas de mistral modéré établi, un cas extrême de poussières africaines, un cas d'export de la pollution de Barcelone vers la mer Méditerranée, et un cas de départ de mistral. Les deux périodes d'observation restantes, menées dans des conditions anticycloniques d'été classique, ont été consacrées à des mesures aéroportées des émissions biogéniques de végétations méditerranéennes, et à une documentation régionale des principales sources de pollution anthropique sur la côte nord de la Méditerranée.

Un premier résultat des mesures sur les cas de mistral montre d'une part que la pollution exportée sur la Méditerranée est relativement faible pendant les cas étudiés (pour les concentrations d'ozone) et d'autre part que le modèle de chimie transport impliqué dans la campagne surestime légèrement l'ozone et le monoxyde de carbone. Ceci que ce soit en comparaison avec les mesures aéroportées ou avec les mesures des Ballons Pressurisés de Couche Limite. Une première étude montre l'influence des cadastres d'émissions utilisés dans les modèles de chimie-transport.

Concernant les aérosols, nous avons entrepris de faire une inter-comparaison de modèles régionaux avec pour référence les observations de l'expérience TRAQA. Cette inter-comparaison a permis de montrer que la plupart des modèles sont capables de reproduire la variabilité spatio-temporelle quotidienne des aérosols désertiques sur le bassin méditerranéen, ainsi que des événements particuliers de remontées de ces poussières comme le cas exceptionnel de fin juin 2012 bien documenté pendant la campagne TRAQA. Cependant, de grandes différences ont été constatées entre les modèles, notamment en termes d'intensité et d'étendue des panaches d'aérosols. Le cas de fin juin 2012 est bien reproduit par les modèles malgré une sous-estimation des épaisseurs optiques. En termes de distribution verticale et granulométrique, les comparaisons de résultats des modèles montrent également des résultats satisfaisants. Un résultat intéressant est que la moyenne des

modèles fournit de meilleures comparaisons globales aux mesures que n'importe lequel des modèles pris individuellement.

Grâce à un instrument spécialement développé pour la mesure aéroportée des flux biogéniques, des valeurs satisfaisantes d'émissions d'isoprène et de monoterpènes ont pu être obtenues sur la forêt des Landes. Il est proposé de refaire des campagnes d'observation à partir de 2014 sur les végétations typiques de la région méditerranéenne (*quercus pubescens*, *quercus ilex*...), au sol et en avion, de façon à constituer un jeu de données permettant d'améliorer la paramétrisation des émissions de composés organiques volatils biogéniques.

IMPLICATIONS PRATIQUES, RECOMMANDATIONS, REALISATIONS PRATIQUES, VALORISATION

La mer Méditerranée est une zone très complexe pour réaliser des mesures aéroportées. Cette zone politiquement très sensible est partagée par une multitude de contrôles aériens civils et militaires, ce qui ne permet pas une grande liberté de circuler dans la couche atmosphérique au dessus de la Méditerranée. Les contrôles aériens militaires se sont avérés plus coopératifs que les contrôles civils, l'aviation civile française ayant été la plus restrictive. Ceci doit être pris en compte pour les campagnes expérimentales sur ces zones.

Cinq ballons spécialement instrumentés et calibrés pour voler dans la couche limite de la mer Méditerranée ont pu être lancés dont trois mesuraient l'ozone. Ceci constituait une première dans la mesure de l'ozone en couche limite marine sur d'aussi longues durées. De plus, le test d'un instrument de mesure des flux biogéniques, adapté sur l'avion instrumenté a pu être réalisé pour la première fois. Par ailleurs, nous avons réalisé 7 périodes d'observation intensive totalisant environ une soixantaine d'heures avion sur 15 jours d'expérience documentant différentes situations météorologiques au dessus du bassin Méditerranéen.

Pour l'instant, le groupe impliqué dans l'utilisation des mesures de la campagne TRAQA a participé à 25 présentations dans des conférences nationales et internationales. Il a réalisé 2 rapports scientifiques et certains résultats font partie d'une thèse qui a été soutenue en 2013. Une nouvelle thèse va commencer en octobre 2014 au CNRM-GAME. Actuellement, au moins cinq publications sont en cours de rédaction qui devront être soumises au numéro spécial concernant TRAQA et CHARME, conjoint entre les revues Atmos. Meas. Techniques et Atmos. Chem. Physics que nous avons mis en place (Parmi les éditeurs associés : J.-L. Attié, F. Dulac) pour soutenir l'effort de valorisation de l'expérience TRAQA. http://www.atmospheric-measurement-techniques.net/submission/scheduled_special_issues.html

De plus, nous avons construit une base de données où toutes les observations effectuées pendant la campagne TRAQA sont mises à disposition de la communauté scientifique nationale et internationale. Ces données sont maintenant disponibles via le site WEB de l'Observatoire Midi Pyrénées à Toulouse: <http://mistrals.sedoo.fr/ChArME/TRAQA/>

TRANSFERT POUR LES POLITIQUES PUBLIQUES

Nous avons pu observer pendant cette campagne un cas exceptionnel de poussières désertiques remontant de la partie Ouest de l'Afrique du Nord pour recouvrir complètement le bassin Méditerranéen et aussi se déposer relativement loin sur la France avec des impacts sur les teneurs en PM₁₀. Cela montre la nécessité de quantifier la contribution des poussières désertiques de façon opérationnelle dans les prévisions de qualité de l'air. Par ailleurs les résultats obtenus en parallèle

par ChArMEx en Corse montrent que les particules importées y dominent les concentrations en PM même en milieu urbain. La grande dispersion des polluants sur le bassin (Golfe de Gênes, région de Barcelone, Fos Berre...) observée pendant TRAQA, montre que si on veut prendre des décisions publiques quant à la qualité de l'air sur nos régions, il serait pertinent de le faire au moins à l'échelle régionale méditerranéenne au niveau français (Languedoc Roussillon-PACA-Corse par exemple) mais également au niveau européen selon un axe Espagne-France-Italie. D'autre part, compte tenu de l'importance du transport de pollution de longue distance trans-frontière (aérosols, gaz), nous pensons qu'il y a une certaine nécessité de surveiller la qualité de l'air depuis des stations de fond ou depuis l'espace, notamment par un géostationnaire pour capturer la variabilité de celle-ci.

PARTENARIATS MIS EN PLACE, PROJETS, ENVISAGES

Autour de cette campagne, plusieurs laboratoires se sont regroupés pour obtenir ces résultats (LA, CNRM-GAME, LATMOS, LISA, LSCE et LPC2E). Le Laboratoire d'Aérodologie (LA) avait la responsabilité de l'expérience, des ballons pressurisés de couche limite et de la mesure des flux biogéniques, le LATMOS de l'avion instrumenté, le CNRM-GAME de la modélisation et de la prévision des différentes espèces (gaz et aérosols) concernant la campagne TRAQA, le LISA de la mesure des aérosols et le LPC2E des mesures des aérosols par sondage. Le LSCE a également assuré la coordination scientifique et logistique de l'ensemble des opérations mises en œuvre pendant la pré-campagne ChArMEx 2012 articulée autour de la campagne aéroportée TRAQA, avec notamment le déploiement d'un super site au Cap Corse pour des mesures in situ complémentaires de gaz et d'aérosols. Ce groupement de laboratoires de recherche a reçu l'appui logistique de SAFIRE (Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement) ainsi que du CNES pour le lancer des ballons. Nous avons aussi un partenariat avec l'université de Barcelone pour la mesure des aérosols avec leurs LIDARs. Les observations sont maintenant mises à la disposition de la communauté scientifique grâce à la base de données MISTRALS/ChArMEx à l'OMP/SEDOO, facilitant le développement de nombreuses collaborations nouvelles.

TRANSPORT AND AIR QUALITY ABOVE THE MEDITERRANEAN BASIN (TRAQA)

PROGRAMME PRIMEQUAL

Principal investigator

J.-L. Attié

Proposants : P. Durand (resp. ballon), L. El Amraoui (resp. modélisation), F. Ravetta (resp. avion), C. Delon, F. Gheusi, M. Mallet, J. Pelon, G. Ancellet, J.-C. Raut, P. Ricaud et F. Dulac (financé par le programme MISTRALS/ChArMEx et l'ANR LOAC)

GENERAL CONTEXT

Surrounded by mountains and several continents and affected by different types of pollution, the Mediterranean Sea is a natural laboratory for studying the variability of the chemical composition in the lower troposphere and the interaction between pollutants from distant regions. In the framework of the Chemistry and Aerosol Mediterranean Experiment (ChArMEx), we carried out a field campaign, using important instrumental means (instrumented aircraft including in situ and lidar measurements, pressurized constant level balloons, ...) over the north-western Mediterranean basin (MB) during the summer 2012. The Mediterranean basin is a fragile ecosystem and the impact of pollution is important in a complex dynamical environment. The main motivation is to describe and understand some physical and chemical processes occurring over the MB. What are the different processes involved in the transport of gas and aerosols over the MB? How polluted plumes are mixing over the MB? What is the degree of pollution over the MB by different meteorological situations?. For example, what is the impact of the mistral wind on the pollution dispersion? These are the questions that motivated the project Transport and air quality above the Mediterranean basin (TRAQA).

MAIN OBJECTIVES OF THE PROJECT

The main objectives of the TRAQA project are:

1. The characterization of the dynamic processes of export of polluted air masses (gas and aerosols) from remote continental regions around the Mediterranean Sea
2. The quantification of exchanges between the boundary layer and the free troposphere above the Mediterranean basin
3. The study of ageing and mixing of pollution plumes in the lower troposphere (gas and aerosols) with Lagrangian tracking.
4. The analysis of representative case studies in a context of long-term measurements to estimate the impact of plumes of pollution on air quality.

SOME ELEMENTS OF METHODOLOGY (AND EVENTUAL DIFFICULTIES)

The scientific strategy was based on Intensive Observation Periods triggered on alert during which important experimental means were deployed. The alerts were done by the meteorological forecast a few days in advance. The experimental means (aircraft, balloons) were put into alert and sent to the studied area if the situation was still persisting. The meteorological situation was confirmed by the launch of regular soundings. However, several periods with balloons involved have been changed because of a restriction of aircraft flight or a change in the meteorological situation. But, one of the most important difficulty during the experiment was the air control constraints (civil) which gave us almost no freedom for the flight plans over the Mediterranean sea. Consequently, several flights were canceled or shortened during the campaign.

RESULTS

For this campaign, several laboratories gathered together to perform the TRAQA campaign (LA, CNRM-GAME, LATMOS, LISA, LSCE and LPC2E). During this experiment, we performed seven intensive observation periods of approximately 60 hours of instrumented aircraft flights over 15 days. We documented a pollution case in the Gulf of Genoa, a moderate established mistral case, an extreme case of African dust, a case of an export of pollution from Barcelona to the Mediterranean Sea, and a case of starting mistral. The remaining two periods, conducted in typical summer anticyclonic conditions were devoted to airborne measurements of biogenic emissions of vegetation, and a regional documentation of the main sources of anthropogenic pollution on the northern coast of the Mediterranean Sea.

A first result observed from the cases of mistral shows that pollution exported to the Mediterranean sea is relatively low (for ozone concentration) and secondly that the chemistry transport model involved in the experiment slightly overestimates ozone and carbon monoxide. This was done in comparison with the airborne measurements and with balloons measurements in the boundary layer. A first study shows the influence of emission inventories in chemistry transport models.

For the aerosols, we made an inter-comparison of regional models using the observations of the TRAQA experiment as the reference. This inter-comparison showed that most of the models are able to reproduce the spatial-temporal variability of African dust in the Mediterranean basin, as well as special transport dust events as seen during the exceptional case at the end of June 2012. However, large differences were found between models, especially in terms of peak intensity of aerosols and their spatial extent. The case of end of June 2012 is well reproduced by the models despite an underestimation of the optical thicknesses. In terms of vertical distribution and size distribution, the first model comparisons also show satisfactory results. Interestingly we show that the average of models output provides better results than each individual model compared to the measurements.

For the first time, satisfactory values of isoprene and monoterpenes emissions have been obtained over the Landes forest thanks to an instrument developed for aircraft biogenic flux measurements. It is planned to repeat the observation campaigns in 2014 for typical Mediterranean vegetation (*Quercus pubescens*, *Quercus ilex*...) at the surface and by airplane to form a data set to improve parameterization of biogenic volatile organic compounds emissions.

PRACTICAL IMPLICATIONS, RECOMMENDATIONS, PRACTICAL ACHIEVEMENTS, VALORISATION

The Mediterranean Sea is a very complex zone to perform research aircraft flight. This politically sensitive area is shared by numerous military and civil air controls which give almost no freedom to circulate in the Mediterranean sea atmosphere layers. The military air control differs completely from the civil air control. This has to be taken into account in the future experiments over the Mediterranean basin.

We launched five balloons instrumented and calibrated to fly within the boundary layer and measured ozone. Such a measurement was done for the first time. In addition, we also tested for the first time a novel instrument to measure biogenic flux from an airplane.

During this experiment, we performed 7 intensive periods of observation with a total of about 60 h of aircraft flight over 15 days of experiment that allow us to document different meteorological situations over the Mediterranean basin.

By now, we made 22 presentations in international and national conferences. We made two scientific reports and results have been used in a PhD thesis defended in 2013. Moreover, at least 4 publications will be submitted to the special issue opened by our committee in both *Atm. Meas. Techniques* and *Atm. Chem. Physics* journals (among the associate editors : J.-L. Attié and F. Dulac). See

http://www.atmospheric-measurement-techniques.net/submission/scheduled_special_issues.html

Furthermore, we built a database in which all the campaign observations are available to the national and international scientific community. These data are available from the web site of Observatoire Midi Pyrenees in Toulouse: <http://mistrals.sedoo.fr/ChArMEx/TRAQA/>

TRANSFER TO PUBLIC POLICIES

We observed during this campaign an exceptional case of desert dust moving from the western part of North Africa to cover the Mediterranean basin and goes relatively far inland of France with impacts on PM₁₀ concentrations. This shows the need to quantify the contribution of African dust in the operational models of air quality. In addition, the results obtained by ChArMEx in Corsica show that imported particles dominate the PM concentration even in urban areas. The large dispersion of pollutants, observed during TRAQA, in the basin (Gulf of Genoa, region of Barcelona, Fos Berre ...) shows that if we want to take public decisions on regional air quality, this requires a common regional action at the French level (Languedoc-Roussillon-PACA-Corsica) but also at a European level along a axis Spain-France-Italy. Moreover, given the importance of trans-border long-range transport of pollution (aerosols, gases), we believe that there is some need to monitor air quality from ground-based stations or from space, in particular from a geostationary satellite that could capture the diurnal variability of the pollutants.

COLLABORATIONS, FUTURE AND ENVISAGED COLLABORATIONS

For this experiment, several laboratories gathered together to achieve these results (LA, CNRM-GAME, LATMOS, LISA, LSCE and LPC2E). LA was responsible for the general experiment, pressurized balloons in the boundary layer and the measurements of biogenic flux, LATMOS for the instrumented aircraft measurements, CNRM-GAME for modeling and forecast of different species (gases and aerosols) during TRAQA experiment, LISA for measurements of aerosols and LPC2E for the aerosol

soundings. LSCE also led the scientific and logistic coordination of the pre-ChArMEx campaign around the aircraft campaign TRAQA with a super site at Cap Corse for complementary in situ measurements of gas and aerosols. This group of research laboratories received logistical support from SAFIRE (Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement) and CNES to launch balloons. We also have a partnership with the University of Barcelona for measuring aerosols with their LIDARs. The observations are now available to the scientific community thanks to the database MISTRALS/ChArMEx at Observatoire Midi Pyrénées facilitating the development of numerous collaborations.

I-Pollution sur le bassin Méditerranéen

I.1 Contexte de l'étude

Véritablement enclavée entre l'Europe, l'Asie et l'Afrique, le bassin Méditerranéen subit la pollution de ces continents tout au long de l'année. L'impact de ces diverses sources de pollution, relativement complexe, est encore mal connu. Les sources locales sont variées et proviennent essentiellement des villes côtières fortement urbanisées et très peuplées (par exemple, Marseille, Nice, Barcelone, Valence, Athènes, Tunis, Le Caire, ou encore Rome) ou des feux de biomasse qui sévissent en été sur tout le pourtour Méditerranéen (Sud Est de la France, Grèce, Corse, etc...). Cependant, la pollution affectant cette région peut aussi provenir de régions plus lointaines de l'Asie (en période de Mousson), de l'Afrique (par des poussières désertiques notamment) et de l'Amérique du Nord (par les vents d'Ouest). La diversité des écosystèmes, des modes de vie des habitants, des économies des pays l'entourant, fait du bassin Méditerranéen une région unique dont l'impact pèse fortement sur les différents pays frontaliers. La pollution anthropique y est très importante et son étude est fondamentale surtout dans le contexte actuel où l'amélioration de la qualité de l'air est un problème essentiel pour les populations (contexte GMES). La Méditerranée est une zone géographique particulièrement habitée et industrialisée : l'immense majorité de la population et des activités de transformation et de production industrielles des pays méditerranéens est concentrée sur le littoral. La Méditerranée est aussi marquée par une aridité de plus en plus importante, une gestion de l'aménagement urbain peu concertée et un manque criant de politique environnementale. De plus, de par sa position, centré sur une mer quasi fermée, cerné de montagnes, alimenté par de nombreux cours d'eau, le bassin Méditerranéen est particulièrement sensible au changement global.

Les routes principales pour le transport de pollution atmosphérique sur la Méditerranée sont relativement bien connues (Lelieveld, et al, 2002). Cependant, une meilleure compréhension des processus de transport à travers les frontières et dans le bassin méditerranéen est nécessaire pour quantifier leur impact sur la composition chimique de la troposphère et ainsi mieux fermer le bilan de l'ozone troposphérique.

D'autre part, il est évident que beaucoup de polluants sont transportés sur de longues distances à l'échelle globale. Ce transport à grande échelle de polluants joue un rôle primordial sur la qualité de l'air à l'échelle régionale car il influence les concentrations de fond des gaz-trace et des aérosols. Dans l'hémisphère Nord, la connaissance de ces flux est importante pour comprendre les problèmes de pollution atmosphérique dans les zones peuplées et leurs impacts (*Keating et al., 2007*). Des résultats de modélisation à l'échelle globale (*Auvray et Bey, 2005*) suggèrent que l'impact le plus fort venant de la pollution anthropique d'Amérique du Nord se retrouve dans la couche limite sur la région méditerranéenne. Ces résultats sont confortés par des observations de l'impact du transport intercontinental des feux de biomasse canadiens et de la pollution nord américaine sur le niveau de fond de l'ozone et sur la stratification verticale en région méditerranéenne (*Ravetta et al., 2007, Real et al., 2007*).

Par ailleurs, dans la région ouest méditerranéenne, le transport vertical est considérable et conduit à de multiples couches tandis que la composante horizontale de transport domine dans la partie Est. En général, l'échelle de temps du transport des masses d'air depuis l'Europe vers le Moyen-Orient est approximativement de 2 à 3 jours tandis que le transport de la partie Ouest de la Méditerranée vers le sud-est de l'Europe est de l'ordre de 1-2 jours. Enfin, le transport de la partie Ouest de la Méditerranée vers le Moyen-Orient et l'Afrique du nord-est est, en général, plus long avec 3-4 jours. Pendant l'été, la Zone de Convergence Intertropicale est localisée sur l'Afrique du Nord, le sud du littoral méditerranéen (25°-30°N), sur le sud de la Libye et l'Égypte, où il y a quelques lignes de convergence fortes. Les masses d'air d'Europe devraient atteindre les couches de la moyenne troposphère de la zone de convergence intertropicale dans un ordre de temps de quelques jours (4-6). Ceci a pour résultat un transport ascendant important de divers polluants âgés. La qualité d'air

dans les secteurs urbains du sud-est de l'Europe, l'Afrique du nord, et le Moyen-Orient, est significativement affectée par le transport à longue distance décrit ci-dessus. Ceci est dû aux échelles de temps impliquées dans ces processus dynamiques qui sont plus petites que les temps de vie de la plupart des polluants. Plusieurs études et plusieurs campagnes expérimentales ont mis en évidence les routes de transport à longue distance à l'échelle transcontinentale. Cependant, à cause d'un manque de données, il y a peu d'expériences établissant un export de pollution européenne vers l'Asie (Stohl et al, 2002).

D'autre part, des aérosols nombreux et variés affectent le bassin méditerranéen localisé à la croisée des masses d'air transportant des particules naturelles (poussières désertiques, sels marins, cendres volcaniques, etc..) et anthropiques (carbone suie, sulphate, etc..). A cause de leurs propriétés optiques et microphysiques, ces aérosols peuvent affecter fortement le bilan radiatif régional (Bergamo et al., 2008) avec un impact sur le climat (Zanis et al., 2012 ; Spyrou et al., 2013, Nabat et al., 2014) et sur les écosystèmes méditerranéens (Guieu et al., 2010). Parmi ces aérosols, les poussières désertiques sahariennes représentent une contribution importante des aérosols dans cette région (Barnaba and Gobbi, 2004; Nabat et al., 2013). En effet ces particules en suspension, saltation associées à l'érosion éolienne peut venir d'Afrique du Nord pour arriver sur la Mer Méditerranée et l'Europe (Moulin et al., 1997; Papadimas et al., 2008; Gkikas et al., 2013). Ces panaches d'aérosols dépendent principalement des conditions météorologiques (Gkikas et al., 2012). Ils sont plus fréquents en hiver et printemps dans le bassin est, dans le bassin central au printemps et dans le bassin ouest en été (Moulin et al., 1998).

L'étude proposée se situe dans le cadre de la préparation des campagnes d'observation du projet global ChArMEx (Chemistry AeRosol Mediterranean EXperiment) du chantier Méditerranée MISTRALS (2010-2020) (<http://charmex.lsce.ipsl.fr>). Le projet ChArMEx vise à une meilleure estimation de l'impact de la composition chimique et particulaire de l'atmosphère sur la qualité de l'air et sur le changement climatique à l'échelle du bassin Méditerranéen. Le projet TRAQA vise, pour son volet expérimental, à mieux documenter les interactions entre couche limite et troposphère libre près des sources d'émissions (région industrielle de Fos, forêts provençales), ainsi que le vieillissement des masses d'air sur le bassin méditerranéen.

I.2 La campagne expérimentale TRAQA

On s'intéresse dans cette étude à l'impact du transport à longue distance des polluants tels que CO, O₃, aérosols sur la composition chimique de la basse troposphère influant ainsi sur la qualité de l'air dans les différentes régions autour de la Méditerranée. Leur parcours, leur transformation chimique seront aussi étudiés. Le bassin méditerranéen, du fait de sa position, mer entourée de massifs montagneux et de différents continents, affecté par différentes pollutions, est un véritable laboratoire pour étudier l'interaction entre polluants venant de régions lointaines et la composition chimique dans les basses couches. Nous proposons dans ce projet d'analyser la variabilité inter-annuelle de certains composés trace dans l'atmosphère (CO, O₃) pour comprendre les processus dynamique et de chimie dans les couches les plus basses de cette région et de qualifier des cas de référence. Nous proposons aussi de quantifier l'import de pollution provenant des masses d'air lointaines impactant le bassin Méditerranéen en utilisant les données collectées au cours d'une campagne expérimentale et différents modèles (lagrangien et modèle de chimie transport essentiellement). L'export de pollution depuis le bassin Méditerranéen fera lui aussi l'objet d'études. L'expérience proposée sur le bassin Méditerranéen pour quantifier les processus de transport et de mélange dans la basse troposphère a été réalisée pendant l'été 2012 (du 26 Juin au 11 Juillet 2012). Les objectifs de la campagne sont réalisés sur des Périodes d'Observations Intensives (POI) déclenchées sur alerte quand les conditions paraissent le plus favorable possible. Nous proposons ces quatre objectifs principaux :

1. Caractérisation des processus dynamiques d'export de masses d'air polluées depuis les régions sources du pourtour méditerranéen
2. Quantification des échanges entre la couche limite atmosphérique et la troposphère libre au-dessus du bassin méditerranéen
3. Suivi lagrangien du vieillissement et du mélange des panaches de pollution dans la basse troposphère (gaz et aérosols)
4. Analyse de la représentativité des cas d'étude et des séries de mesures longues pour estimer l'impact des panaches de pollution sur la qualité de l'air

Cette expérience a bénéficié de nombreux moyens instrumentaux (avion instrumenté, ballons pressurisés et libres, mesures sols, Lidar). Les résultats sont confrontés avec les simulations numériques des modèles impliqués dans la campagne. Le retour d'expérience de cette campagne permet aussi de proposer la meilleure stratégie possible (utilisant satellites, moyens sols, avions) pour les périodes d'observation spéciales ou intensives du volet ChArMEx (CHemistry and AeRosol Mediterranean EXperiment) prévue pour 2013.

Dans ce rapport, nous proposons de présenter les mesures que nous avons pu traiter à ce jour. En tout sept POIs ont été réalisées avec près de 60h de vol avion et presque autant pour les ballons pressurisés de couche limite (5 vols). Nous proposons donc de présenter ces résultats après avoir décrit la campagne et les principaux moyens de mesures utilisés pendant la campagne expérimentale.

I-3 Réalisation de la campagne TRAQA-2012

La campagne TRAQA était initialement programmée pour juillet 2011, mais a finalement été décalée pour l'été 2012. L'année 2011 a permis de trouver des crédits complémentaires pour un surcoût des heures avion et de permettre au CNES de mettre au point le lâcher de ballons pressurisés de couche limite (BPCL). Le programme MISTRALS (avec 67 k€ pour l'avion SAFIRE comme principale contribution), l'Observatoire Midi Pyrénées, le Laboratoire d'Aérodynamique et l'IPSL ont donc contribué au financement de la campagne TRAQA en plus du CNES (158 k€ pour la partie ballon) et de l'ADEME. De plus l'ANR/Ecotech a contribué au financement des tests du granulomètre LOAC sous ballon sonde pendant la campagne. Cette tâche de recherche de crédit a été extrêmement coûteuse en temps et a dû mobiliser l'équipe TRAQA continuellement. Mais, elle a permis de disposer de l'ATR-42 pour l'expérience sur un peu plus de 15 jours (en comptant les journées de test) et de réaliser environ 60 h de mesures sur 15 vols dédiés à la campagne déclenchés sur alerte pendant 7 Périodes d'Observation Intensive. De plus les plans de vol avion ont pu être affinés pendant cette année. Par ailleurs, durant cette année, le CNES a développé et finalisé son dispositif de lâcher de ballons (suivi, contrôle des trajectoires et protocole) et la recherche d'un site adéquat. TRAQA a été un véritable test de toutes les nouvelles améliorations apportées à ce dispositif. En tout 5 BPCLs ont été lancés lors de 2 POIs avec des cas de mistral. La campagne aéroportée TRAQA, a donc été réalisée dans la région de Fos/Mer sur la côte méditerranéenne, mais aussi au large de Barcelone (voir **Figure I.1**), dans le golfe de Gênes et tout autour des côtes.

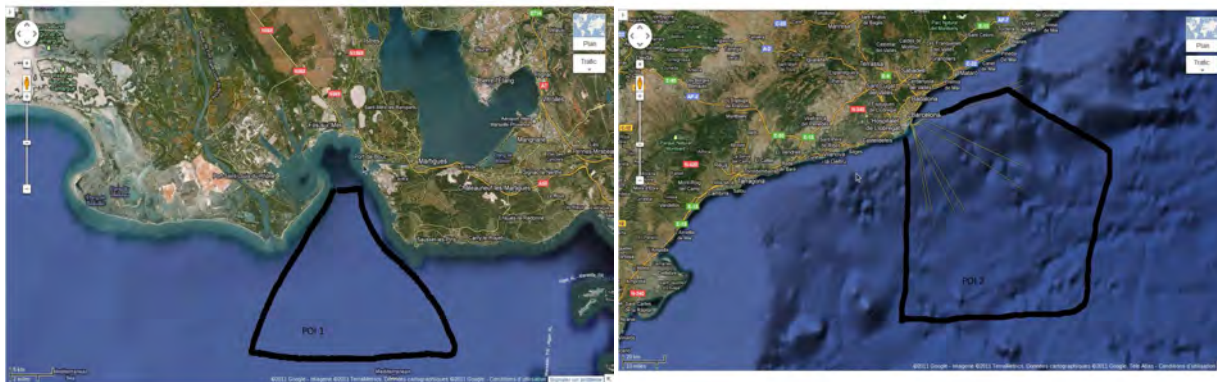


Figure 1.1: Régions Méditerranéennes concernées par l'expérience TRAQA : Région de Fos-Berre (à gauche) et région de Barcelone (à droite).

1.3.1 Zone expérimentale de survol au dessus de la Méditerranée

Nous proposons de décrire les principaux moyens instrumentaux et le contexte à prendre en compte pour faire une expérience aéroportée sur la Méditerranée. En effet, celle-ci est une zone maritime et aérienne extrêmement fréquentée compte tenu de sa position stratégique sur le plan géopolitique et économique. De ce fait, cela en fait une région relativement complexe pour conduire une expérience aéroportée. Elle est divisée en nombreux secteurs dont la responsabilité aérienne appartient à différentes entités (militaires et civiles, différents états). La **Figure 1.2** présente assez "clairement" la complexité de cette zone.

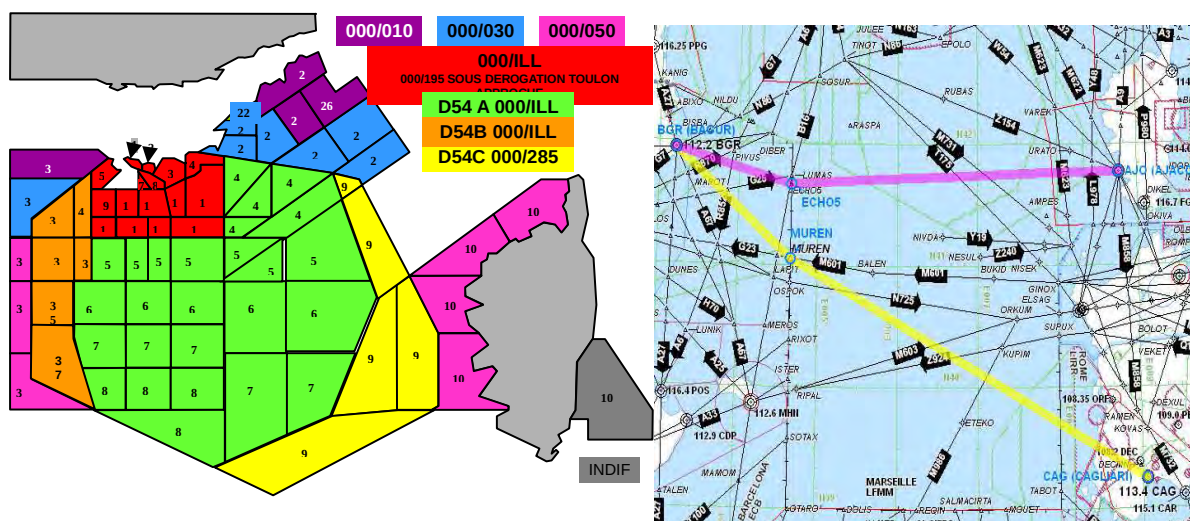


Figure 1.2: Gauche : Secteurs de vol indiquant l'appartenance à différents contrôles aériens, par exemple la zone D54, principale zone d'intérêt est sous contrôle militaire français, ces secteurs sont limités horizontalement et verticalement et soumis à acceptation des différents contrôles aériens. Droite : Couloirs aériens et délimitations des zones décrites sur la figure de gauche.



Figure I.3: Position des différents paliers avion réalisés pendant l'expérience complète TRAQA. En tout 60 h de mesures ont pu être réalisées sur 7 POIs. Les couleurs représentent les différents vols réalisés pendant la campagne.

I.3.2 Configuration instrumentale de l'ATR-42

Le principal vecteur de mesure de la campagne TRAQA est l'ATR-42 (**Figure I.4**) avec une configuration instrumentale augmentée par rapport à l'instrumentation en mode standard SAFIRE (ozone et monoxyde de carbone (instrument MOZART), vapeur d'eau et dioxyde de carbone (Li7500), pression, température, PCASP-SPP200 (distribution de la taille des aérosols de 0.1 à 3 μm) et vent (lent et rapide). A cette configuration en mode standard, se rajoute la mesure du rayonnement (Tri-bande IR (« Climat » / Cimel-CE332), LW et SW hémisphériques (K-Z)). Le lidar LNG (LATMOS) était embarqué permettant de donner la stratification atmosphérique en aérosols (profils verticaux @355, 532, 1064 nm et la dépolarisation à 355 nm). De plus se rajoutait à cette configuration la veine AVIRAD et les instruments associés (prélèvements sur filtres, néphélomètre et granulomètre) ainsi qu'un PTR-MS (LISA-LATMOS) pour la mesure de composés organiques volatils et le système MEDEE (LA) pour la mesure de flux par méthode DEC (Disjunct eddy correlation). Une photo du dispositif instrumental de l'avion est aussi présentée sur la **Figure I.4**. Les mesures des différents paramètres collectés pendant la campagne TRAQA sont maintenant toutes dans la base de données <http://mistrals.sedoo.fr/ChArMEx/TRAQA/>. Celles-ci sont maintenant accessibles à l'ensemble de la communauté scientifique.



Figure 1.4: Photos de l'avion instrumenté par SAFIRE (ATR-42), vecteur de mesure dans la campagne TRAQA. Photo de la baie instrumentale à bord de l'ATR-42 (Mesures de base, Lidar LNG, PTRMS, etc..) (Photo de G. Ancellet).

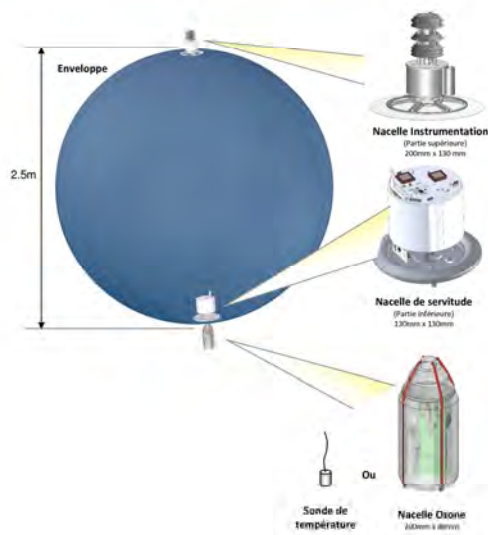
1.3.3 Dispositif des ballons utilisés dans l'expérience

Pour la campagne TRAQA, le CNES nous a mis à disposition son infrastructure de lâcher de ballons (**Figure 1.5**) ainsi que 5 Ballons Pressurisés de Couche Limite (BPCL) (**Figure 1.6**) dont trois disposaient de sondes PTU et ozone et deux uniquement de sondes PTU. Un système de suivi des ballons en temps réel sur internet permettait de suivre les trajectoires des BPCL (**Figure 1.7**). Pour les POIs de suivi Lagrangien (cas du 27 Juin et cas du 6 et 7 Juillet), le couplage « avion – BPCL » a évolué dès le début de la campagne d'une stratégie de 1 POI de 2 jours à 2 POIs d'une journée à cause des zones de survol réduites (contrôle aérien) et d'un retour d'expérience entre les POIs. En effet, le suivi de la masse d'air le lendemain a paru difficile et risqué à cause de sa vitesse et de la limitation de la zone de survol. Pendant les deux POIs de suivi lagrangien, des sondages libres (**Figure 1.8**) étaient lancés sur le site de lâcher pour pouvoir échantillonner la structure verticale de l'atmosphère (PTU, vent et pour certains les aérosols (LOAC)) et aussi contrôler la bonne direction du vent pour le lancer des BPCL.



Figure 1.5 : Infrastructure du site de lâcher des ballons proche de Martigues à Sausset-les- Pins (photos de F. Dulac).

9. ANNEXE 1 : CONFIGURATION DES BPCL TRAQA



BPCL

Instrumentation
complémentaire:
température ou
Ozone (sonde ECC
intermittente)

Figure I.6: Schéma du dispositif d'un ballon pressurisé de couche limite (BPCL) avec l'instrumentation complémentaire (soit une sonde de température supplémentaire, soit une sonde de mesure de l'ozone)

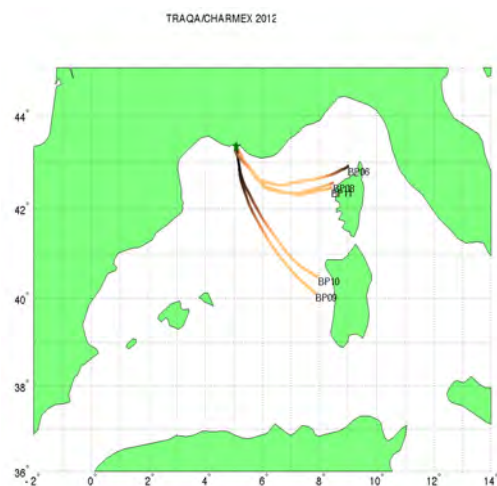
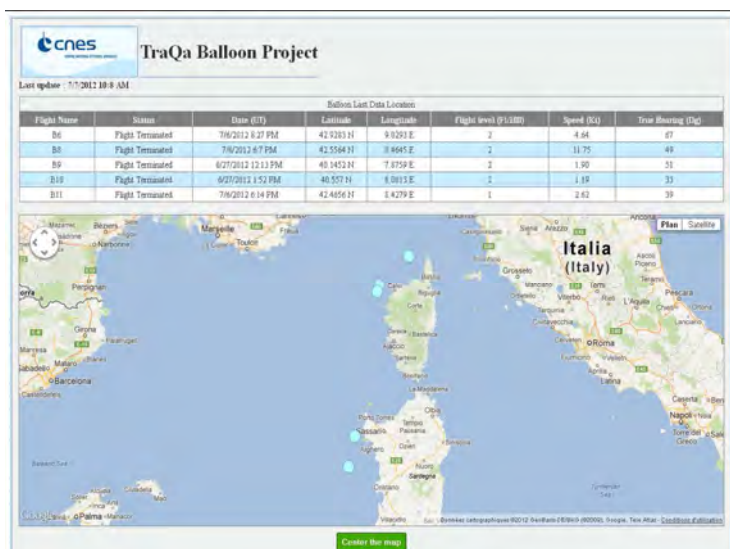


Figure I.7: Système en temps réel de suivi des BPCLs (à gauche) et trajectoires des ballons réalisées en temps quasi réel par C. Basdevant (LMD) (à droite). Trois BPCLs ont atteint la Corse et deux la Sardaigne.

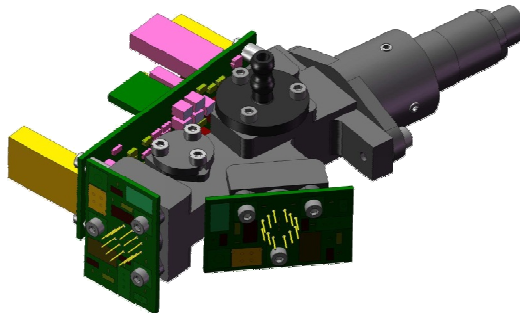


Figure I.8 : *Gauche* : Sonde pour la mesure de l’ozone ; *droite* : sonde pour la mesure des aérosols (LOAC pour Light Optical Particle Counter).

I.3.4 Autres instruments impliqués

Il ne s'agit pas dans ce paragraphe de faire la liste exhaustive de tous les paramètres qui vont être utilisés pour aider à la compréhension des mesures TRAQA. En effet TRAQA se réalisait en même temps que d'autres expériences qui se faisaient sur la Méditerranée (mesures sol dans la région de Marseille, mesures bateau sur la Méditerranée, mesures sol sur la Corse, mesures d'aérosol par ULM sur la Corse, mesures à partir d'un ballon dirigeable (expérience PEGASOS)). Il est prévu de travailler ensuite en synergie pour étudier les différents cas. Dans ce paragraphe, nous nous contentons de présenter certaines mesures qui ont été spécialement faites dans le cadre de TRAQA. Des mesures supplémentaires ont été réalisées dans le cadre de TRAQA par l'observatoire de haute Provence (mesures ballons et Lidar - voir **Figures I.9 et I.10**) et des mesures par le dispositif LIDAR de l'université de Barcelone (**Figure I.11**) ont aussi été réalisées spécialement pour la campagne TRAQA.

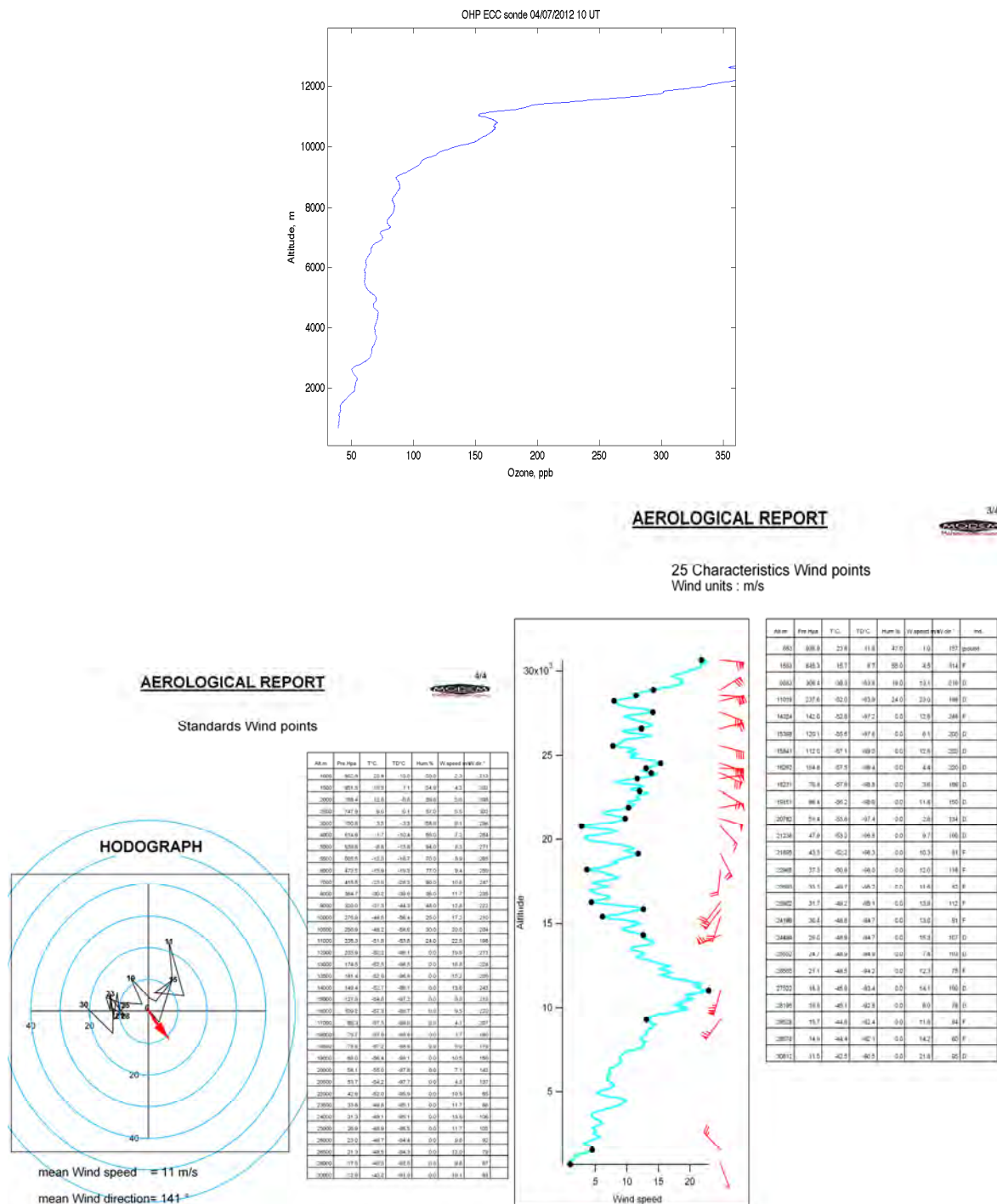


Figure I.9 : Exemple de profils obtenus de l'ozone [ppbv] (en haut) ; du vent module [m/s] et direction [°] (en bas) effectués par sondage in situ sur le site de l'observatoire de Haute Provence.

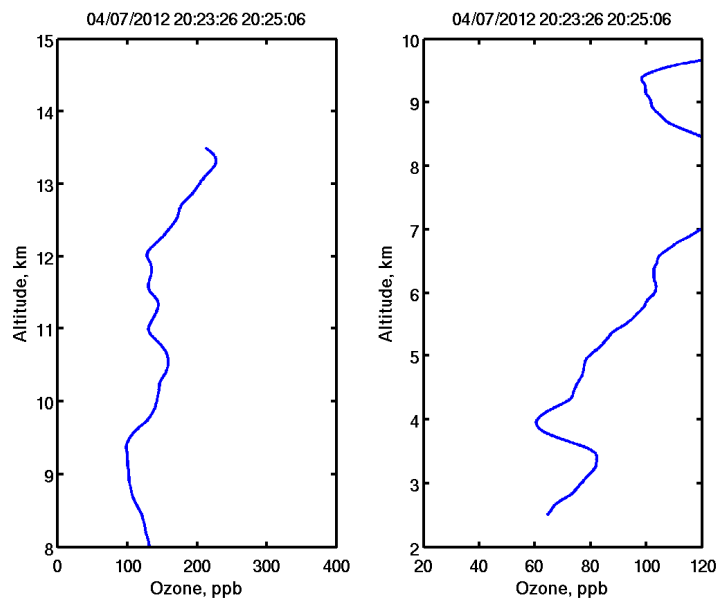


Figure I.10 : Exemple de profils d'ozone [ppbv] obtenus à partir du Lidar de l'Observatoire de Haute Provence pour le 4 Juillet 2012.

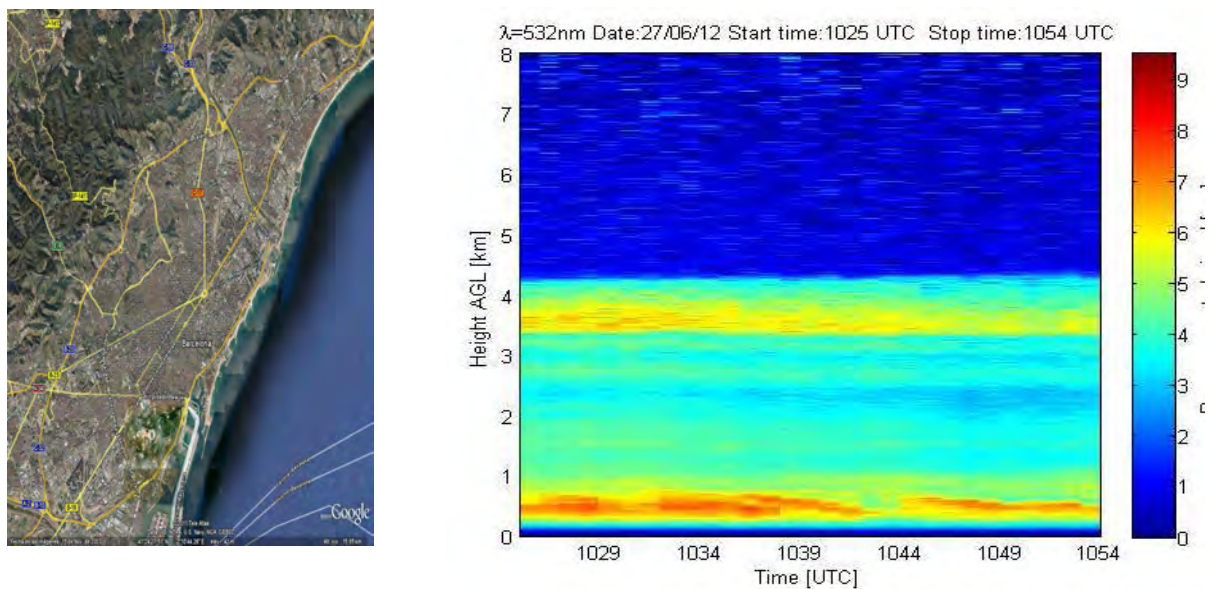


Figure I.11 : Emplacement du lidar de Barcelone (UPC Lidar) (à gauche); coefficient de rétro diffusion pour le cas du 27 Juin 2012 (droite). Une première couche d'aérosol est bien visible entre 3 et 4 km d'altitude ainsi que la signature de la couche limite atmosphérique en dessous de 1000 m d'altitude;

	UPC lidar	MPL
Wavelengths (emission)	355, 532, 1064 nm	532 nm
Wavelengths (reception)	355, 532, 1064 nm + 387, 607, 407 nm	532 nm + 532 nm cross pol.
PRF	20 Hz	2500 Hz
Typical temporal resolution	60 s	30 s
Vertical resolution	3,75 m	15, 30 or 75 m
Max. adquisition range	30720 m	45000 m
Products	α 355, β 355, LR355 α 532, β 532, LR532 β 1064 Color ratio AE355-532, AE532-1064	β 532, δ p,532
Advanced products	Fine/coarse mode of α	

Tableau I.1 : Caractéristiques instrumentales du lidar basé à Barcelone.

Concernant les mesures Lidar des aérosols faites par l'Université de Barcelone (voir **Figure I.11** et **Tableau**), elles sont réalisées de façon régulière trois fois par semaine dans le cadre du programme EARLINET (Lundi à 14:00 local +/- 1 h et au coucher du soleil à +2 /- 3 h, le jeudi au coucher du soleil avec +2/-3 h) avec une résolution de 1 min sur un temps de mesure de 30 min. De plus il y a 1 mesure de 150 min (nuit) et 1 mesure de 30 min (le jour) en coïncidence avec les mesures de l'instrument spatial CALIPSO. Pour TRAQA et surtout dans le cadre de la POI 4, il y a eu des mesures de jour en coïncidence avec les vols de l'ATR-42. Ces données sont exploitées en collaboration avec l'université de Catalogne, Barcelone (resp : M. Sicard).

I.3.5 Modélisation mise en œuvre pour TRAQA

De même, dans ce paragraphe, il ne s'agit pas de présenter toute la modélisation qui va être faite, mais celle qui a été utilisée le plus, en mode analyse ou en mode prévision, spécialement pendant la campagne expérimentale TRAQA (le CTM MOCAGE et le modèle de trajectographie BAMED). D'autres modèles ont aussi été utilisés tels que AROME, mais aussi le logiciel américain de trajectographie sur le Web (HYSPLIT) qui a l'avantage d'être interactif et très convivial mais l'inconvénient d'avoir une résolution relativement faible sur la Méditerranée. Ce modèle a servi à la prévision des trajectoires des BPCLs en complément du modèle BAMED développé au CNRM et au LMD.

I.3.5.1 Le modèle de Chimie Transport MOCAGE

MOCAGE (Modèle de Chimie Atmosphérique à Grande Echelle) est le Modèle de Chimie Transport (CTM en anglais) tridimensionnel, multi-échelles, stratosphérique et troposphérique de Météo-France. MOCAGE couvre une large gamme d'objectifs scientifiques, depuis l'étude des interactions entre la chimie et le climat, en passant par la simulation à grande échelle de la pollution troposphérique, en particulier par l'ozone et ses précurseurs, jusqu'à la modélisation de la chimie troposphérique à l'échelle régionale. Pour cela, MOCAGE peut considérer plusieurs niveaux de domaines imbriqués à double sens; la définition de ces différents domaines est flexible, une dizaine de configurations existent à ce jour. MOCAGE est capable de simuler les interactions entre dynamique, physique, microphysique et chimie dans la basse stratosphère et la troposphère (voir **Figure I.12**). MOCAGE peut considérer différents schémas chimiques, selon l'application étudiée, par exemple le schéma RACMOBUS, qui regroupe les schémas RACM (Regional Atmospheric Chemistry

Mechanism (Stockwell et al. 1997) pour la troposphère, et REPROBUS pour la stratosphère (Lefèvre et al., 1994). La chimie de 118 espèces est traitée, dont 89 ont une durée de vie assez longue pour être transportées. Il utilise un forçage météorologique "off line" pour traiter les phénomènes atmosphériques, tels le transport des composés chimiques ou leur lessivage, ainsi que les échanges entre l'atmosphère et la surface du modèle. Il décrit l'évolution chimique d'un certain nombre d'espèces ainsi que leur transport, vertical et horizontal, dans la troposphère et la stratosphère. MOCAGE est aussi le modèle opérationnel de Météo-France pour la prévision à J+3 de polluants, dont l' ozone, le dioxyde d'azote et les particules. Les prévisions sont disponibles sur la plate-forme nationale PREV'AIR: des cartes représentant les concentrations moyennes et les maxima journaliers sont établies chaque matin pour le jour même, le lendemain et le surlendemain, pour chacun des polluants, à différentes échelles spatiales. Cette version est également employée dans le cadre des projets européen GMES (GEMS, PROMOTE, MACC), qui préfigurent la mise en place du futur service opérationnel européen « GMES Atmospheric Service ». Des résultats d'évaluation de MOCAGE qualité de l'air sont présentés dans (Dufour et al., 2006) et, à plus grande échelle, par exemple dans (Bousserez et al., 2007).

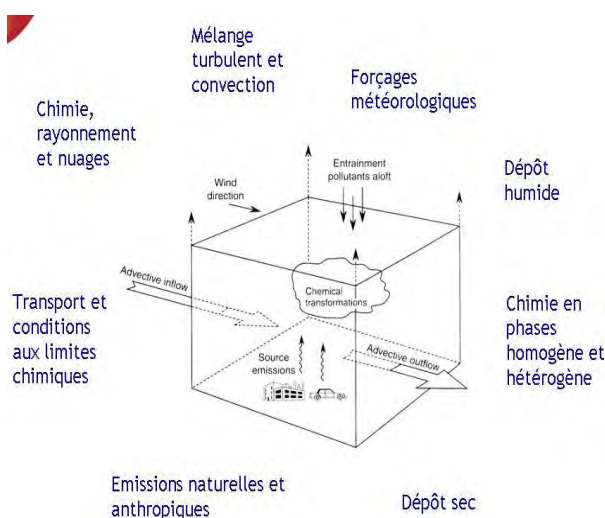


Figure I.12: Éléments constituant le modèle de Chimie-Transport MOCAGE

I.3.5.2 Le modèle de trajectographie BAMED

Le modèle opérationnel de trajectographie développé par le CNRM/Météo-France et le LMD a été réalisé pour l'expérience BAMED dans le cadre de la campagne expérimentale HYMEX. Il peut simuler notamment les ballons isopycnes (iso densité) du type ballon pressurisé de couche limite (**Figure I.13**). En entrée, il peut utiliser les données météorologiques du centre européen (CEP) dans leur plus fine résolution (0.25°), aussi bien celles des modèles opérationnels de Météo France tels que ARPEGE et AROME. Il est utilisé pour la première fois en mode opérationnel pendant la campagne TRAQA.

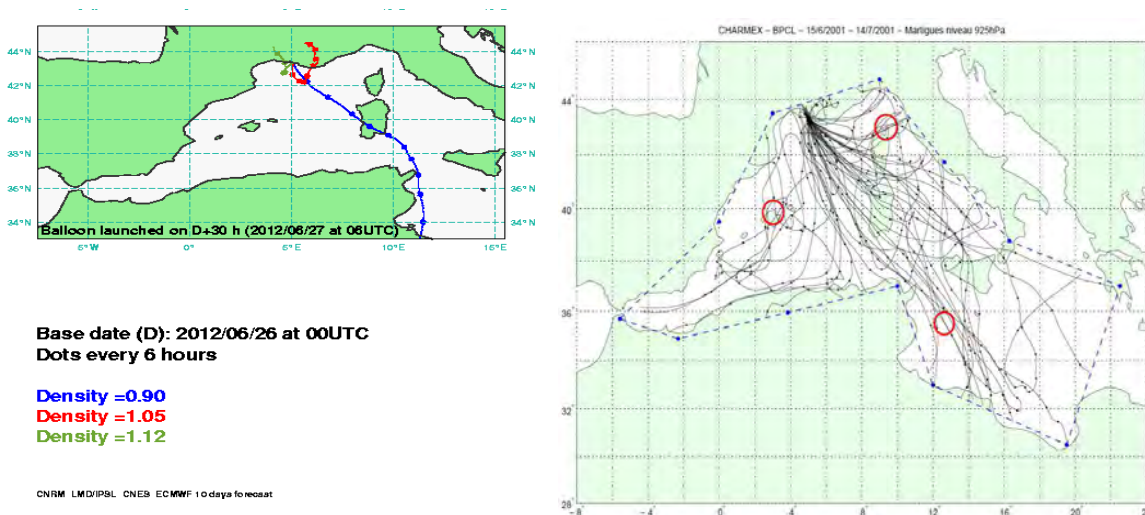


Figure 1.13 : A gauche: exemple de trajectoires prévues pendant la campagne par le modèle BAMED. Le modèle peut utiliser en entrée les champs de vents provenant du CEP, ARPEGE ou AROME. Les différentes densités sont représentées dans plusieurs couleurs. Ces densités correspondent à celles qui seront utilisées pour gonfler correctement les BPCL et avoir le niveau de vol désiré. Chaque point représente une échéance de 6 h. A droite: Simulation de trajectoires réalisée sur une longue période pour optimiser le lieu du site de lâcher.

I.4 Les Périodes d'Observation Intensive pendant TRAQA

Dans ce paragraphe sont présentées les situations météorologiques des sept différentes périodes d'observations intensives ainsi que des résultats obtenus dans le cadre des études de chimie de l'atmosphère. Les mesures aéroportées et ballon sont aussi présentées. Une partie spéciale est dédiée aux aérosols compte tenu de l'importance des observations collectées (voir **partie II**). De plus la **partie III** traite explicitement des flux biogéniques mesurés pendant la campagne compte tenu de l'originalité de la méthode.

Cependant, l'exploitation scientifique pour la chimie, comme pour les aérosols est loin d'être finie étant donné la richesse des mesures réalisées lors de la campagne TRAQA. Nous nous proposons donc de passer en revue les différents cas réalisés avec les résultats obtenus. Les 7 POIs ont donc été réalisées dans la période comprise entre le 26 Juin et le 11 Juillet 2012, ce qui fait environ 60h de mesures in situ faites par l'avion instrumenté ATR-42.

I.4.1 POI-1 : Cas du 26 Juin 2012 : Pollution dans le golfe de Gênes

I.4.1.1 Situation météorologique

La situation du 26 Juin 2012 est une situation de mistral relativement fort qui a dissipé la pollution sur la zone Méditerranéenne. De part et d'autre du courant de mistral, deux zones sont relativement calmes avec des vents faibles à 500 m sur la mer. De 9:00 TU à 12:00 TU, les concentrations d'ozone se renforcent dans la zone Sud-Ouest comme dans la zone Nord Est (**Figure 1.14**). La situation est favorable pour une exploration du comportement de la chimie dans le golfe de Gênes. Une zone d'exploration sous contrôle militaire aérien italien (entre le Nord de la Corse et la côte italienne) est accessible dans le Golfe de Gênes, là où la pollution semble s'intensifier.

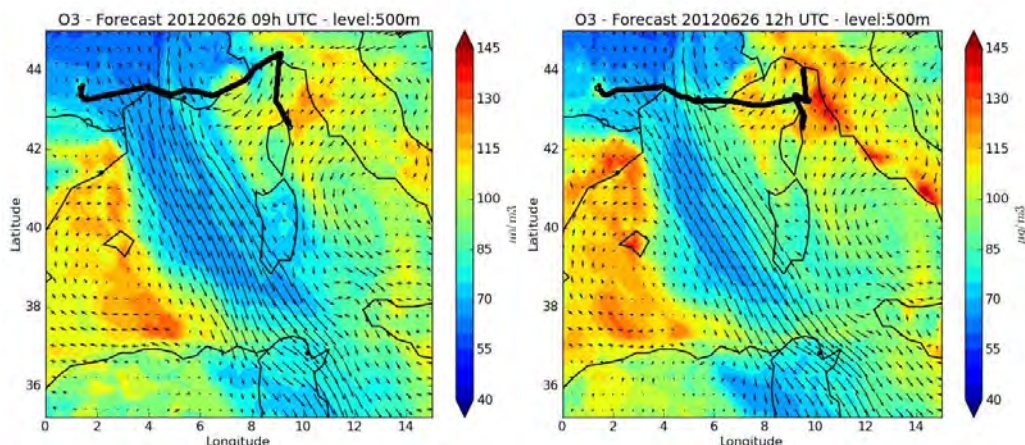


Figure I.14 : Champs d'ozone [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] et de vent horizontal (représenté par les flèches) prévus par le modèle MOCAGE à 500 m d'altitude pour la journée du 26 juin 2012 à 9:00 TU (gauche) et 12:00 TU (droite) avec la trajectoire de l'avion en trait plein noir.

I.4.1.2 Résultats

Deux vols de l'avion ont été effectués, l'un le matin entre 7:00 TU et 9:00 TU et l'autre entre 10:00 TU et 14:00 TU. La **Figure I.15** présente les mesures d'ozone et de vent puis de monoxyde de carbone mesuré par l'ATR-42 le long de sa trajectoire (départ Toulouse et arrivée en Corse). Les couleurs sur les concentrations de monoxyde de carbone indiquent si l'avion était sur la terre ou sur la mer (bleu pour la mer et vert pour la terre). Le vol a été réalisé à relativement haute altitude (environ 5000 m) avant de faire un sondage pour échantillonner les couches les plus basses (plus proches de 500 m). Seule la concentration en CO semble augmenter en fin de sondage indiquant soit l'impact de la pollution corse, soit un transport de pollution de longue distance. Cependant des études plus poussées de trajectographies doivent être entreprises pour lever l'ambiguïté.

La **Figure I.16** montre la suite des mesures avion avec un décollage depuis la Corse et retour sur Toulouse avec une exploration à bas niveau sur le Golfe de Gênes. Les concentrations d'ozone comme de CO sont relativement plus fortes aux bas niveaux plutôt qu'aux hauts (respectivement 30 et 60 ppbv pour l'ozone et 50 et 100 ppbv pour le CO). Mais deux maxima intéressants d'ozone qui apparaissent en pleine mer ne coïncident ni avec une diminution du CO, ni avec une augmentation. Les autres paramètres seront analysés (vapeur d'eau par exemple) pour comprendre l'origine de cette masse d'air. Les profils moyens d'ozone et de CO présentent des caractéristiques habituelles avec une légère décroissance en fonction de l'altitude pour le CO et relativement constant pour l'ozone (**Figure I.17**). On remarque tout de même un maximum d'ozone (**Figure I.17**) vers 3000 m montrant de nouveau les maxima obtenus sur les séries temporelles. Le profil de CO est difficile à interpréter compte tenu de la forte valeur mesurée sur l'aéroport. Cependant, la signature sur l'ozone semble présenter celle d'une entrée stratosphérique, mais l'analyse des autres paramètres permettra sans doute de conclure. Sur cette figure, nous présentons aussi une coupe hauteur-temps du lidar LNG sur la trace du vol 18 (26 juin) qui montre qu'en dessous d'un kilomètre d'altitude, il y a un fort contraste. Il y a donc peu d'aérosols dans le golfe du Lion avec peu de signal mais en revanche un signal intense (rouge) au large du Golfe de Gênes.

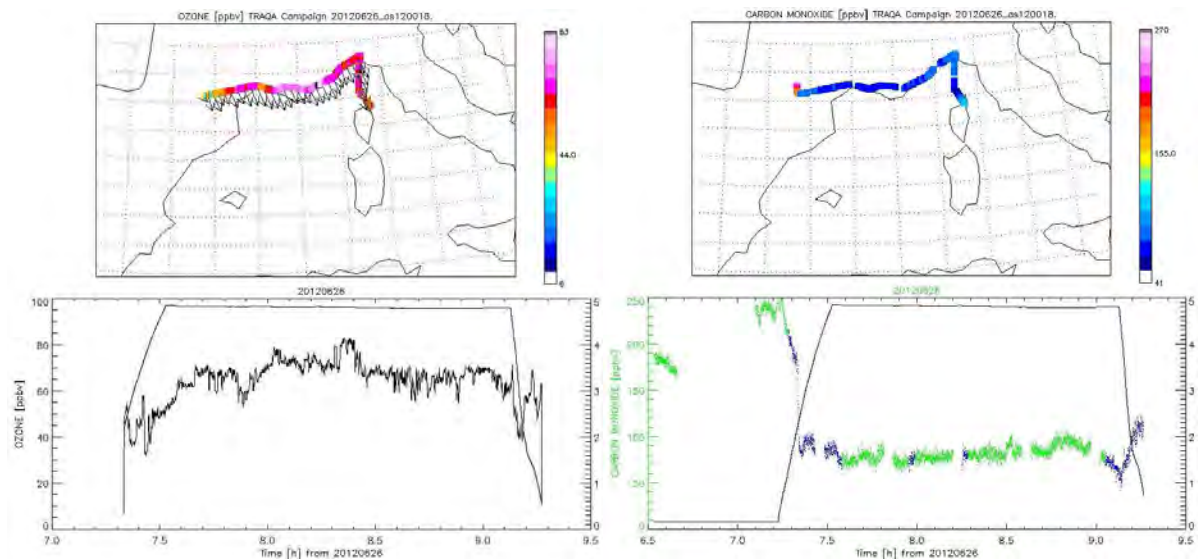


Figure I.15 : En haut à gauche : Mesure de la concentration en ozone [ppbv] (les flèches représentant le vent horizontal mesuré par l'avion). En bas à gauche : Concentration d'ozone en ppbv (fluctuations) avec l'altitude de l'avion (axe droit compris entre 0 et 5 km d'altitude). En haut à droite: Concentration de monoxyde de carbone [ppbv] mesuré par l'avion. En bas à droite : Concentration de monoxyde de carbone le long de la trajectoire avion en ppbv (fluctuations en couleur; Les zones bleues correspondent approximativement à des zones maritimes tandis que celles qui sont vertes correspondent aux mesures sur les terres) avec l'altitude correspondante de l'avion (trait plein noir). Ces données correspondent au vol 18, cas du 26 Juin.

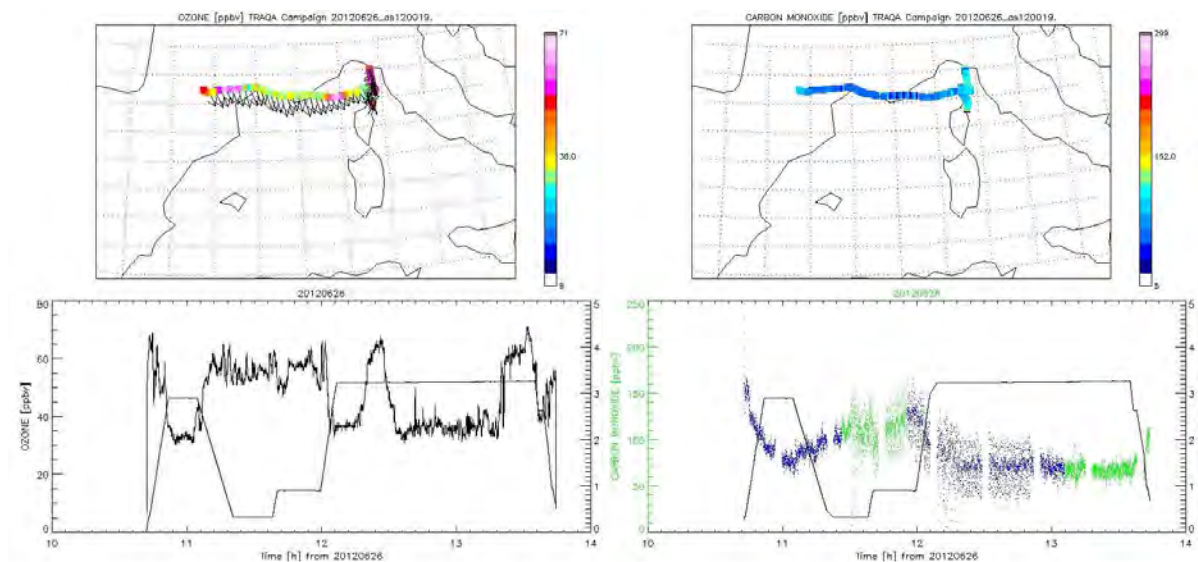


Figure I.16 : Même légende que celle de la **Figure I.15** mais pour le vol compris entre 10:00 TU et 14:00 TU (cas du 26 Juin, vol 19).

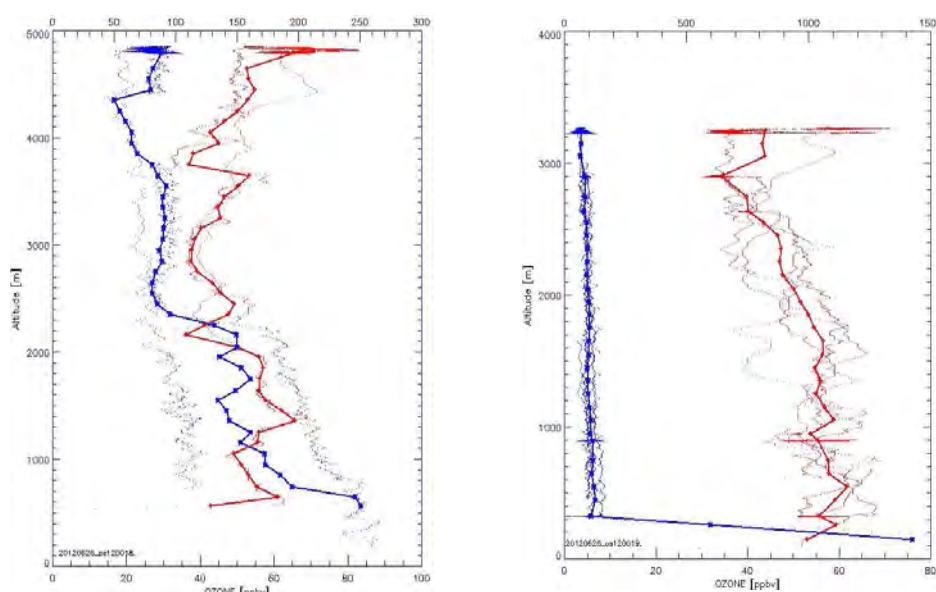
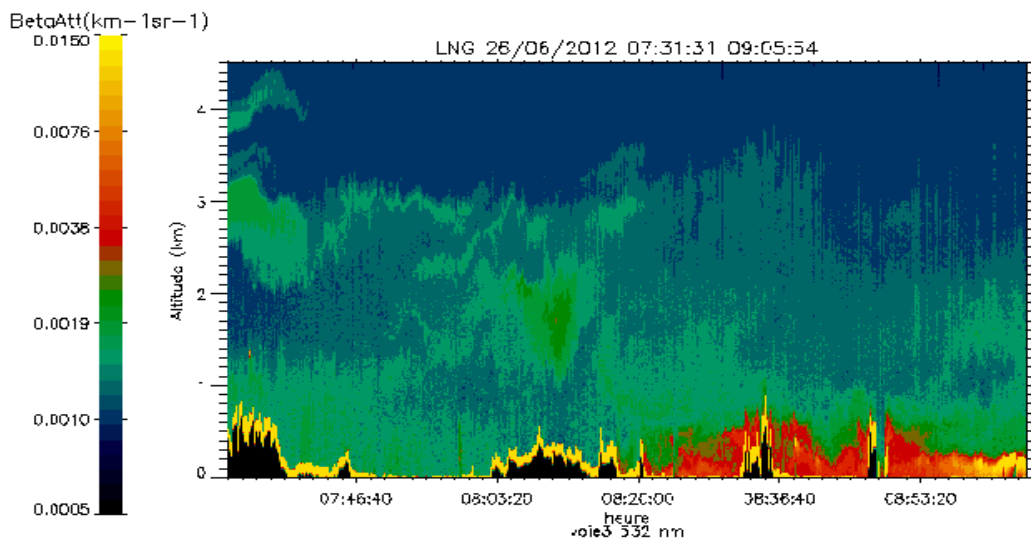


Figure I.17 : (haut) Coefficient de rétro diffusion [u.a] observé par le lidar LNG embarqué pour la journée du 26 juin 2012. (bas et à droite). Profils d'ozone (axe x du bas et couleur rouge) et de monoxyde de carbone (axe x du haut et couleur bleue) en ppbv suivant l'altitude en m. En trait plein : moyennes obtenues sur les données dans des boîtes qui représentent 100 m d'altitude. En trait pointillé : ensemble des données mesuré par l'avion. Profils du 26 Juin 2012 (vol 18 et 19 de la gauche vers la droite)

Des études ont été menées pour confronter ces observations avec les résultats du modèle de chimie-transport MOCAGE. La **Figure I.18** présente la comparaison de l'ozone et du monoxyde de carbone sur la trajectoire de l'avion entre MOCAGE et les observation de la campagne TRAQA. La comparaison entre les deux jeux de données semble réaliste pour les deux espèces avec généralement une légère surestimation de MOCAGE surtout à haute altitude pour le monoxyde de carbone comme pour l'ozone. En revanche, il semble que la variabilité soit capturée par le modèle. Une étude sur les inventaires d'émission utilisés dans le modèle MOCAGE est donc réalisée pour y quantifier leur impact sur ces deux espèces. Cette étude est encore en cours mais des résultats

préliminaires sont proposés dans le présent document pour la journée du 6 juillet. Ce cas semble intéressant pour l'analyse plus fine de la chimie entre le matin et l'après midi en relation avec la modélisation, mais aussi pour comprendre l'origine des maxima mesurés sur les séries temporelles de l'ozone.

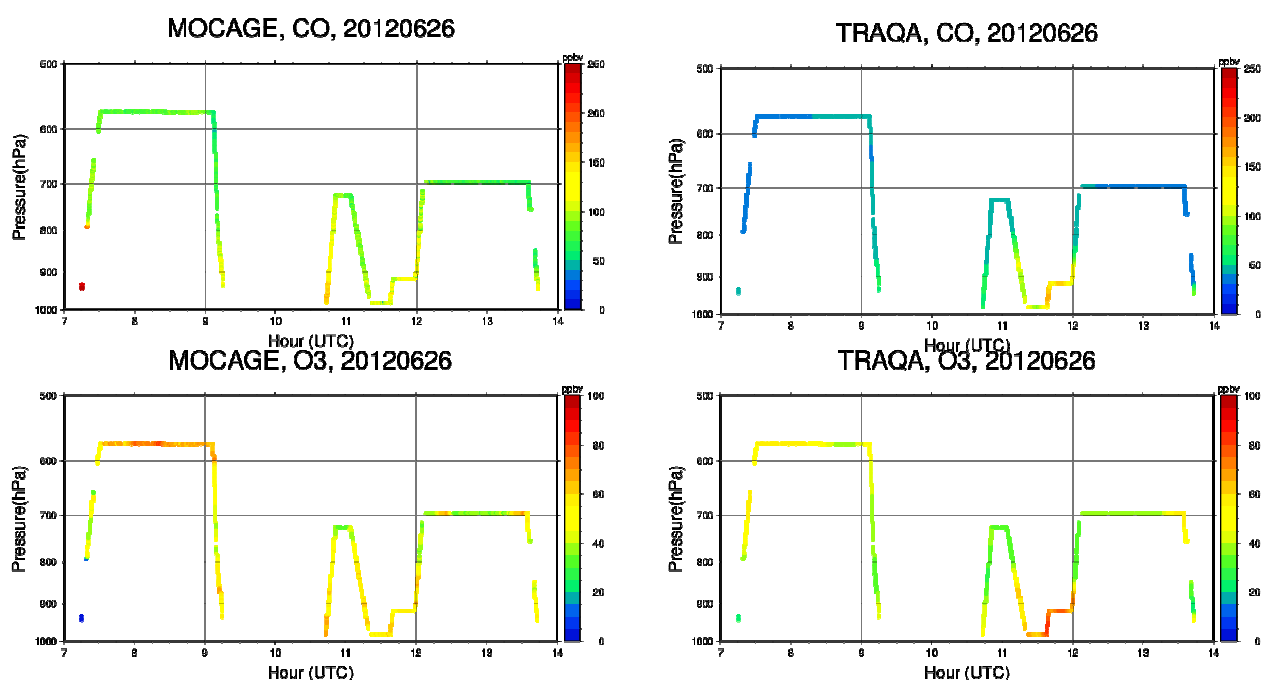


Figure I.18 : Comparaison entre les résultats de MOCAGE (à gauche) pour le monoxyde de carbone [ppbv] (en haut) et l'ozone [µg/m3] (en bas) et les observations aéroportées faites pendant la campagne TRAQA le 26/06.

I.4.2 POI-2 : Cas du 27 juin 2012, mistral modéré établi

I.4.2.1 Situation météorologique

La journée du 27 Juin est une journée typique de mistral établi avec un vent modéré. La force du vent est proche de 10 m/s avec une moyenne relativement plus faible (**Figure I.19**). Comparé à la journée du 26 Juin, le mistral est dans sa phase de ralentissement. Les prévisions d'ozone montrent des concentrations relativement faibles dans la zone affectée par le mistral comparées aux zones hors impact du mistral (**Figure I.20**). Les plans de vols sont représentés sur cette figure. Deux vols sont réalisés en recherchant la co-localisation avec les BPCLs. La co-localisation a été réussie même si le vol de l'ATR a été écourté à cause du contrôle aérien civil dans la zone plus au sud du plan de vol. Le second vol identique prévu plus tard n'a pas été permis par le contrôle aérien et il est donc remplacé par un vol dans le nord-est de la Méditerranée. Le but est d'échantillonner la masse d'air de la veille (26 Juin) qui se trouve dans le golfe de Gênes.

L'ATR-42 et les ballons (BPCL et sondages) sont utilisés en coïncidence pour cette POI. Pour avoir des mesures co-localisées avec les BPCLs, on utilise les trajectoires calculées par le modèle BAMED (**Figure I.21**) qui sont dirigées vers la Sardaigne. Deux ballons pressurisés de couche limite sont lâchés à 1:00 TU (500 et 600 m asl) dont un qui transporte un capteur de mesure de l'ozone. Ils sont stoppés à l'approche de la côte ouest de la Sardaigne après 9 h de vol en accord avec le protocole établi par le CNES. De plus, deux sondages d'ozone sont réalisés sur le site de lancement des ballons à 0:00 TU et 12:00 TU (voir **Figure I.22** pour la chronologie des lâchers).

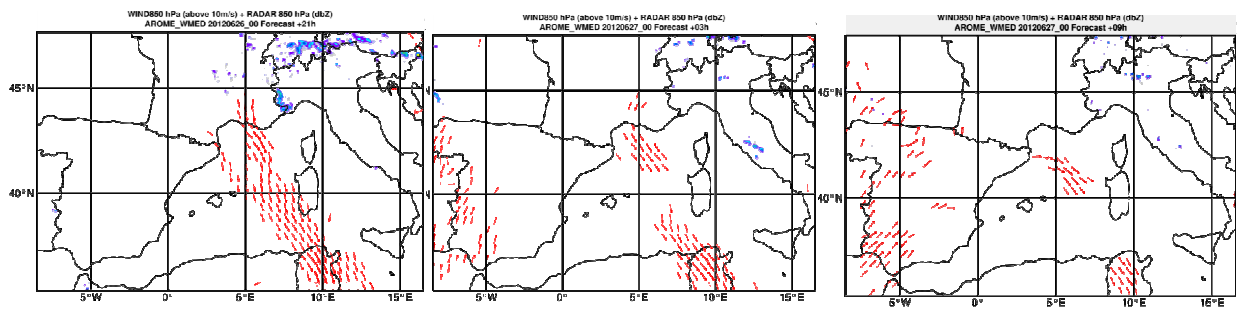


Figure 1.19 : De la gauche vers la droite : Évolution de la prévision du champ de vent horizontal à 850 hPa du 26 Juin à 21:00 TU, le 27 Juin à 03:00 TU et le 27 Juin à 09:00 TU calculé par le modèle de prévision numérique de Météo-France AROME. Les flèches reportées sont celles qui ont des valeurs de vent supérieures à 10 m/s.

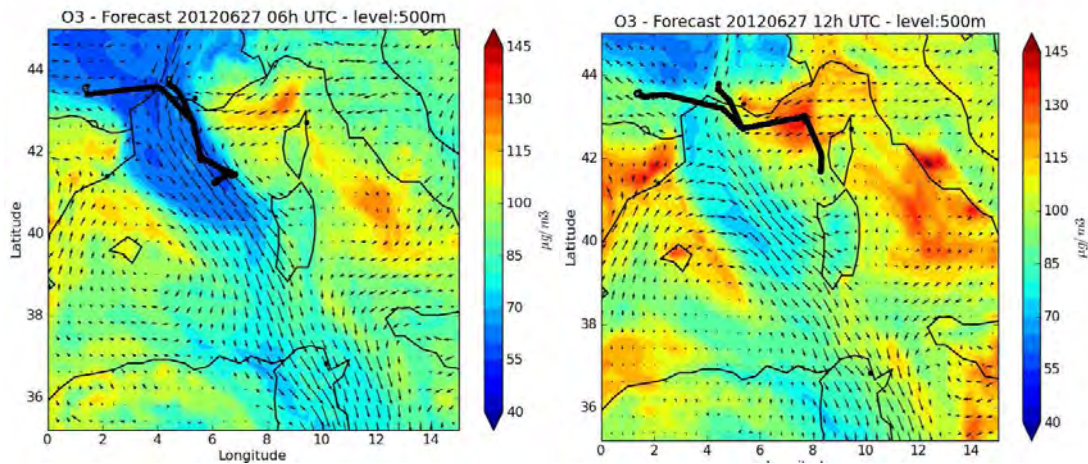


Figure 1.20 : Champs d'ozone [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] et de vent horizontal (représenté par les flèches) prévus par le modèle MOCAGE à 500 m d'altitude pour la journée du 27 Juin 2012 à 6:00 TU (gauche) et 12:00 TU (droite) avec la trajectoire de l'avion en trait plein noir.

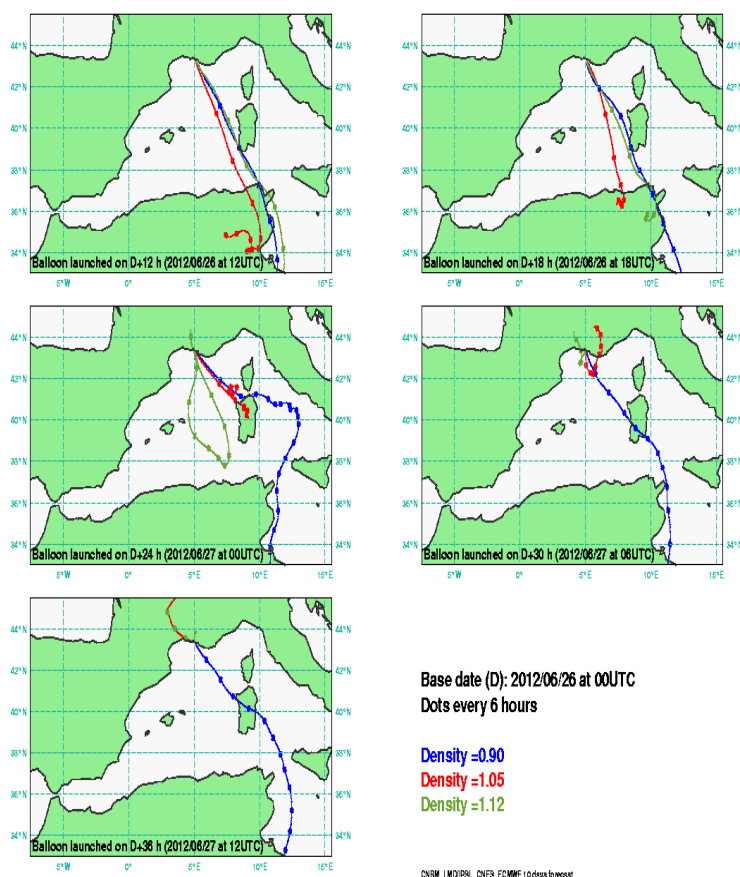


Figure I.21 : Trajectoires obtenues par le logiciel de trajectographie BAMED. Prévisions pour le 26 et le 27 Juin 2012. Les couleurs des trajectoires correspondent à plusieurs densités que peuvent prendre les BPCLs pour garder un niveau constant.

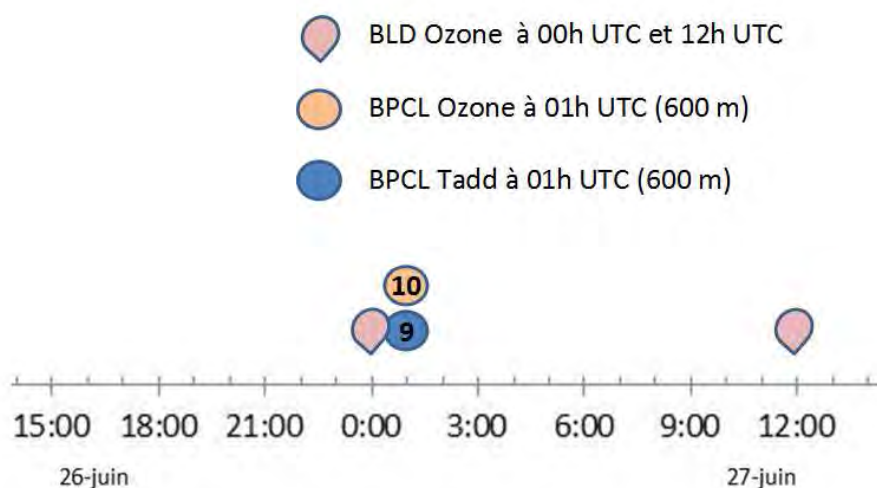


Figure I.22: Chronologie de lancement des différents ballons pour la POI-2. BLD correspond à Ballon Léger Dilatable et BPCL à Ballon Pressurisé de Couche Limite.

I.4.2.2 Résultats

La **Figure I.23** présente les données aéroportées d'ozone et de CO mesurées le matin. La série temporelle d'ozone montre 2 maxima à bas niveau sur la mer avec des valeurs d'environ 60 ppbv (à comparer avec 20-30 ppbv autour) entre 06:00 TU et 07:00 TU. Ces deux pics mesurés à bas niveaux sont assez remarquables d'autant plus que la signature sur le CO n'est pas évidente. Il est à noter que les premières mesures du BPCL (avec ozone) semblent aussi présenter un maximum sur la même période de temps (**Figure I.24**).

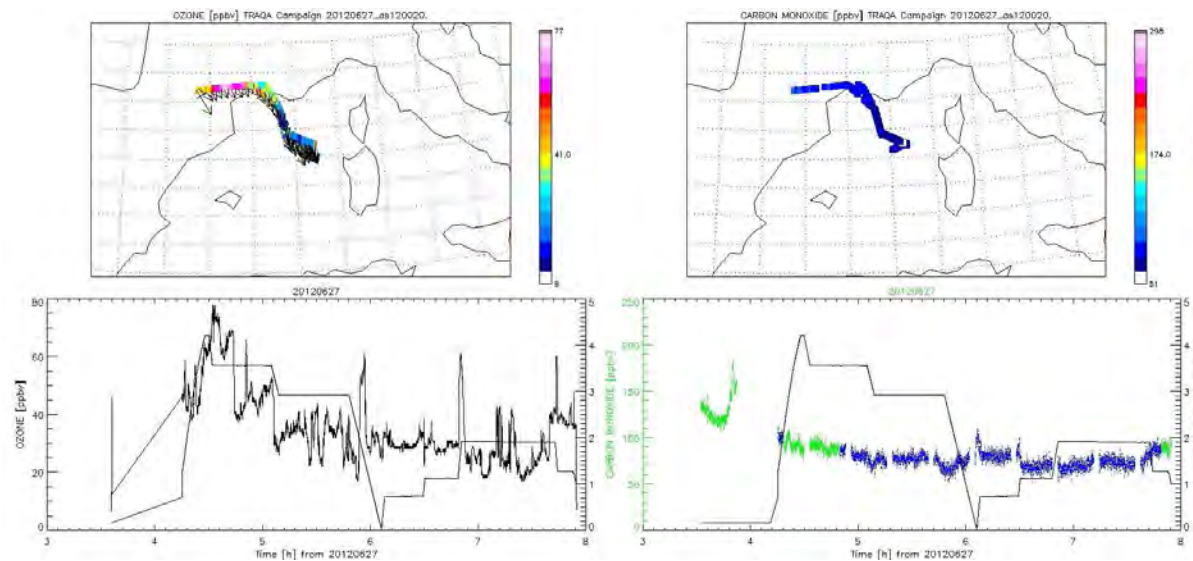


Figure I.23 : En haut à gauche : Mesure de la concentration en ozone [ppbv] (les flèches représentant le vent horizontal mesuré par l'avion). En bas à gauche : Concentration d'ozone en ppbv (fluctuations) avec l'altitude de l'avion (axe droit compris entre 0 et 5 km d'altitude). En haut à droite: Cconcentration de monoxyde de carbone [ppbv] mesuré par l'avion. En bas à droite : Concentration de monoxyde de carbone le long de la trajectoire avion en ppbv (fluctuations en couleur; Les zones bleues correspondent approximativement à des zones maritimes tandis que celles qui sont vertes correspondent aux mesures sur les terres) avec l'altitude correspondante de l'avion (trait plein noir). Ces données correspondent au vol 20, cas du 27 Juin.

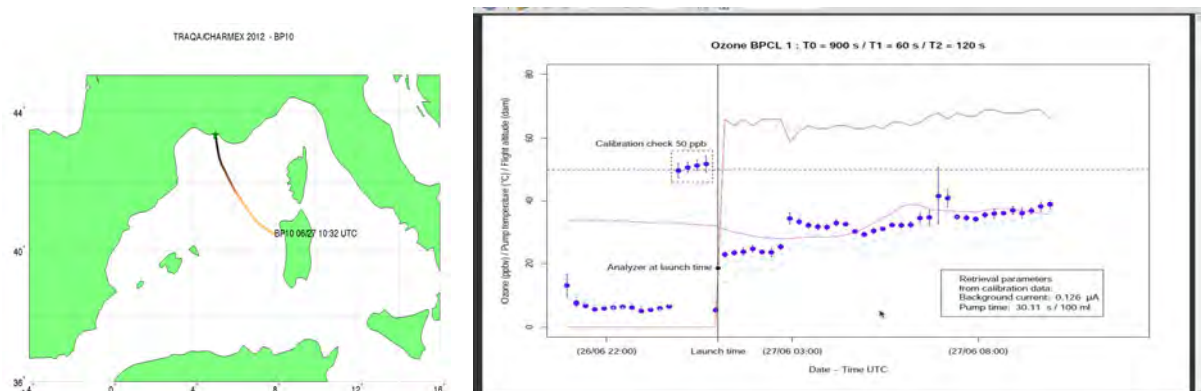


Figure I.24 : Trajectoire d'un des deux BPCL (à gauche) et concentration de l'ozone (points bleus) mesurée par ce ballon (ppbv). Cas du 27 Juin 2012

Le cas de l'après midi (**Figure I.25**) est relativement plus complexe et doit être analysé en fonction de la masse d'air de la veille. Des concentrations d'ozone relativement plus fortes (80 ppbv) sur la mer à bas niveau sont relevées en correspondance avec une élévation de la concentration de CO (entre 10:30 TU et 11:30 TU). Ceci correspond en première approximation à un transport de pollution mais des analyses plus fines devront préciser s'il s'agit de la masse d'air échantillonnée la veille ou non.

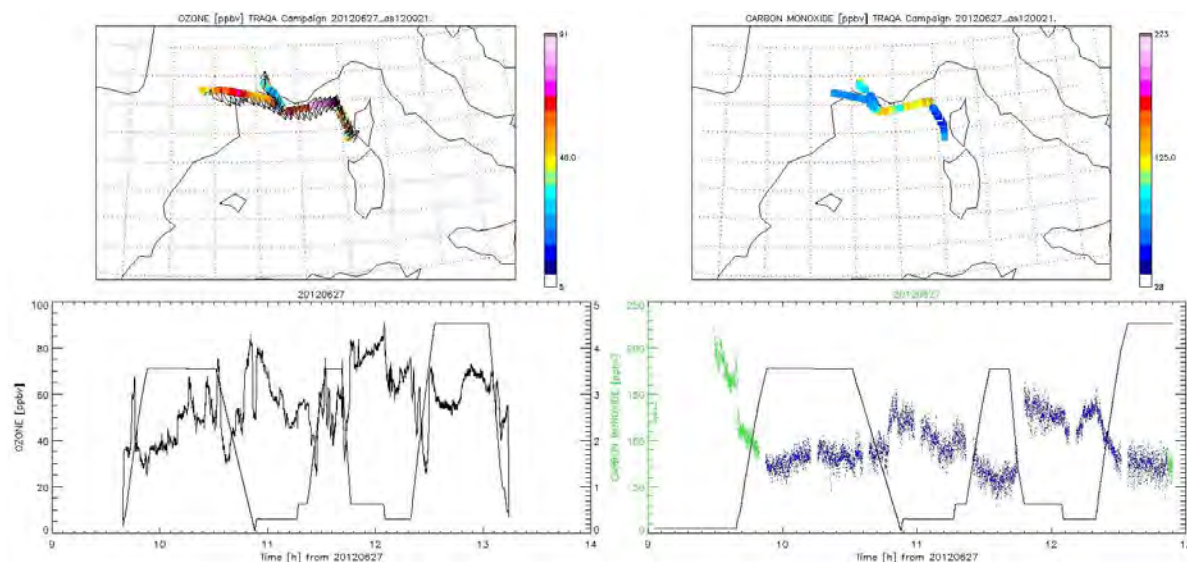


Figure I.25: Même légende que celle de la **Figure I.23** mais pour un vol compris entre 09:00 TU et 13:30 TU (cas du 27 Juin, vol 21).

Les profils verticaux d'ozone, de CO et des autres paramètres thermodynamiques (**Figure I.26**, vol 20) mesurés par l'avion révèlent un maximum d'ozone vers 1500 m d'altitude pour le vol du matin et une couche limite entre 0 et 1500 m d'altitude. La structure du profil vertical concernant le vol 21 est elle aussi un peu plus compliquée mais présente une couche (visible sur l'ozone et le CO) entre 0 et 1000 m d'altitude.

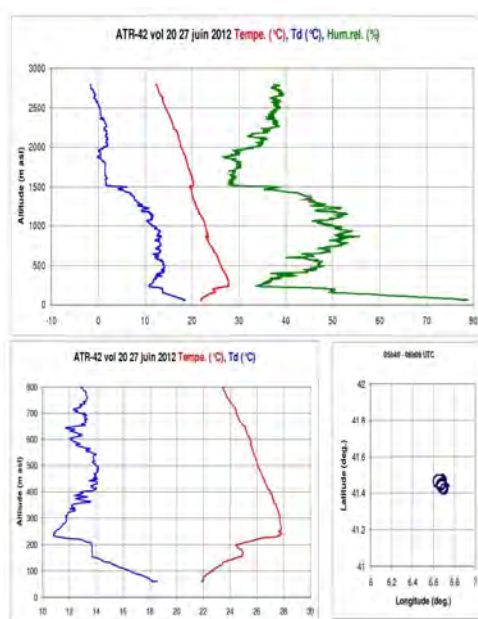
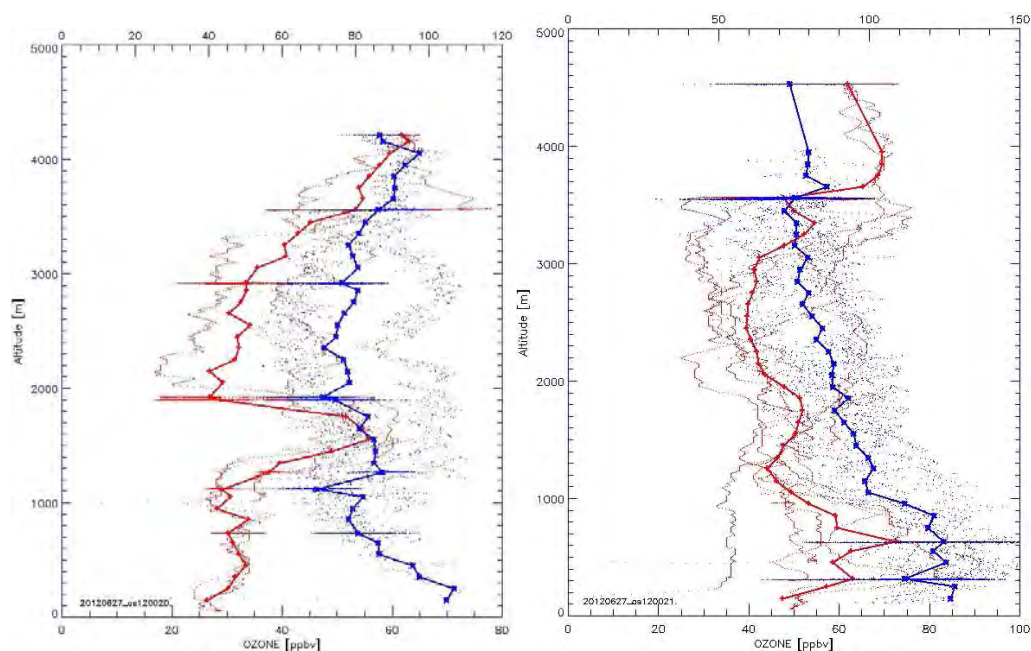


Figure I.26 : (Haut) Profils d'ozone (axe du bas et couleur rouge) et de monoxyde de carbone (axe du haut et couleur bleue) en ppbv suivant l'altitude en m. En trait plein : moyennes obtenues sur les données dans des boîtes qui représentent 100 m d'altitude. En trait pointillé : ensemble des données mesuré par l'avion. Journée 27 Juin 2012 (vol 20 et 21 de la gauche vers la droite). On a rajouté la température et l'humidité qui concernent le vol 20 (droite).

Une première comparaison avec le modèle de chimie-transport MOCAGE montre, comme pour le cas du 26 juin une légère surestimation des concentrations d'ozone et de monoxyde de carbone par rapport à la mesure durant TRAQA. La **Figure I.27** présente cette comparaison que globalement les prévisions de MOCAGE sont surestimées par rapport aux observations faites pendant la campagne.

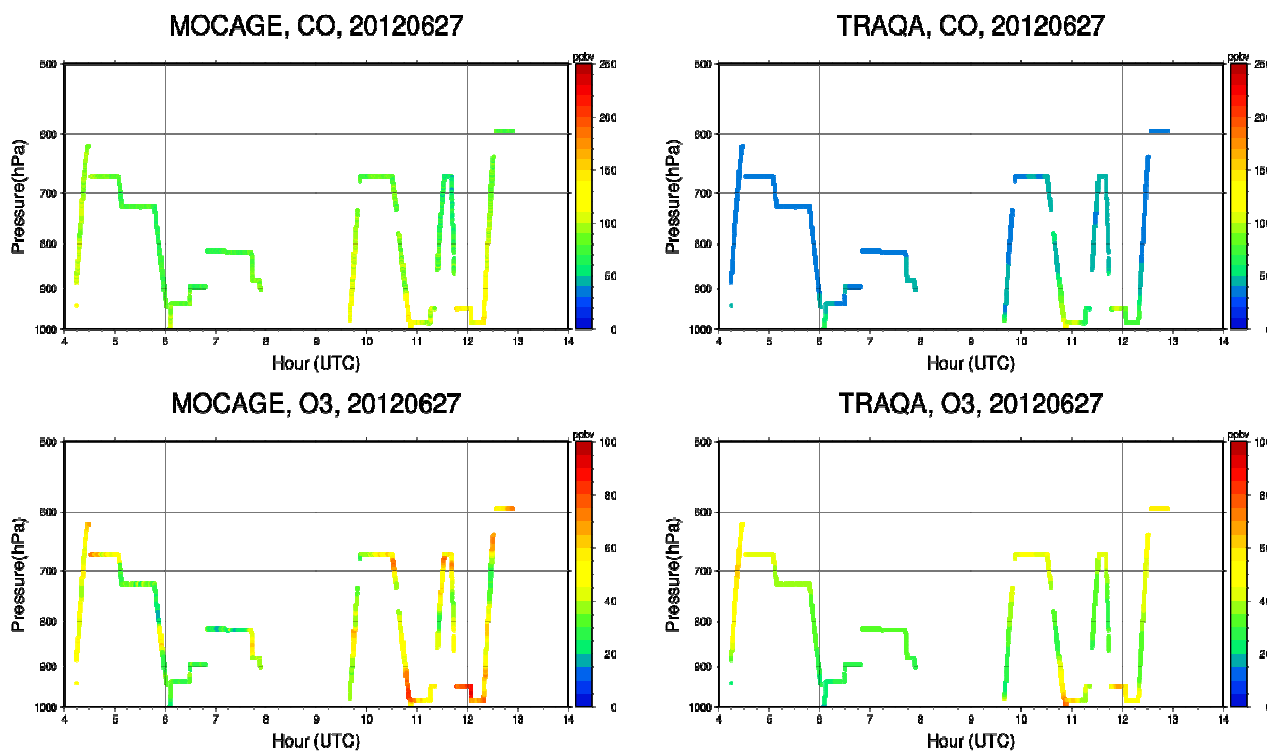


Figure I.27 : Comparaison entre les résultats de MOCAGE (à gauche) pour le monoxyde de carbone [ppbv] (en haut) et l'ozone [µg/m3] (en bas) et les observations aéroportées faites pendant la campagne TRAQA pour le 27 Juin 2012 à 6:00 TU (gauche) et 12:00 TU (droite).

En résumé, la première partie de cette POI (vol 20) présente des caractéristiques intéressantes qui semblent bien coïncider avec les mesures des BPCL. Ce cas mérite une analyse plus complète pour comprendre ces pics d'ozone sur la mer. Mais la première difficulté est de comprendre pourquoi les modèles surestiment les concentrations de monoxyde de carbone et d'ozone sur cette zone. Une première explication pourrait venir de l'initialisation du modèle par des concentrations de CO en terme de niveau de fond trop forte au départ. De plus, le deuxième vol est un vrai cas d'étude pour comprendre le comportement et le vieillissement des masses d'air si l'échantillonnage par l'avion de la même masse d'air de la veille se confirme. Cette POI reste extrêmement intéressante par le fait des différences que l'on a avec le modèle. Elle devra permettre de caler la modélisation au niveau des espèces chimiques et en particulier de l'ozone. Une étude de sensibilité des émissions du modèle MOCAGE est entamée pour comprendre ces différences. Un premier résultat est présenté pour la journée du 6 juillet (section I.7).

I.5 POI-3: Cas du 29 Juin 2012 : Export de poussières désertiques

I.5.1 Situation météorologique

Le 29 Juin est un cas assez fort de transport de poussière désertique sur l'Europe. Comme le montrent les **Figures I.28 et I.29**, un vent relativement fort de sud-ouest (plus de 20 m/s) à 500 hPa, transporte des poussières depuis le Sahara. Nous nous proposons de regarder dans cette partie les mesures de l'ozone et du monoxyde de carbone. Les mesures exceptionnelles obtenues lors de ce cas sont analysées dans plusieurs études et par plusieurs groupes dans la **partie II**.

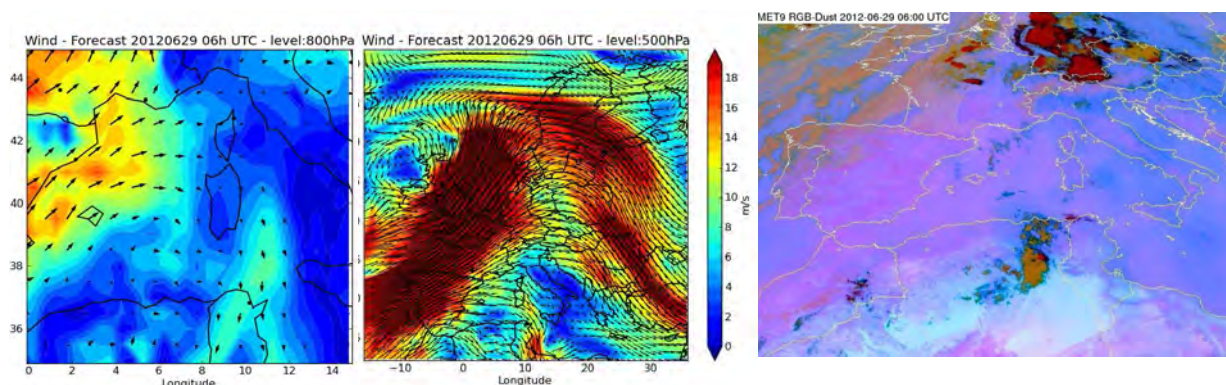


Figure I.28 : De la gauche vers la droite : Respectivement force [m/s] et direction du vent à 800 hPa et à 500 hPa et image Météosat qui montrent l'étalement des poussières désertiques sur l'Espagne, une partie de la France et la Mer Méditerranée (couleur rosée) pour 06:00 TU le 29 Juin 2012.

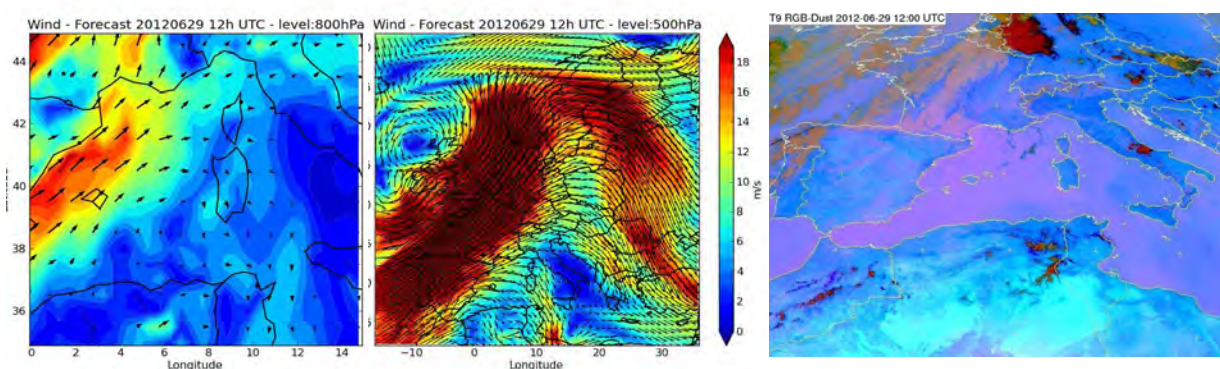


Figure I.29 : Même légende que celle de la **Figure I.28** mais pour 12:00 TU

I.5.2 Résultats

Les **Figures I.30 et I.31** présentent les mesures d'ozone et de CO pour les deux vols réalisés lors de cette POI (vol 22 et 23). Le premier vol va de Toulouse à Bastia et le second de Bastia à Toulouse. Le vol du matin (vol 22) présente des concentrations d'ozone relativement plus fortes au dessus de 4000 m d'altitude qui diminuent faiblement sur ce palier au fur et à mesure que l'on s'approche de la mer. Le comportement des concentrations de monoxyde de carbone présente des similitudes. Ce cas est sans doute à étudier comme un cas de transport à longue distance. Mais déjà les résultats obtenus par les modèles (**Figure I.32**) montrent une entrée d'air plus riche en ozone provenant du sud-ouest avec des concentrations équivalentes à celles mesurées par les avions à très bas niveau sur la mer (autour de 12:00 TU). Ces concentrations sont en corrélation avec un maximum de CO montrant ainsi un transport de pollution à ce niveau. Il sera donc intéressant d'analyser cette POI en relation avec les résultats de la modélisation pour comprendre d'où vient cette masse d'air. Les profils verticaux (**Figure I.33**) montrent en ce qui concerne le CO un maximum vers 1000 m d'altitude correspondant en première approximation à des concentrations mesurées au dessus de la Corse. Ce maximum (vol 22) est sans doute à mettre en perspective avec d'éventuels feux dans cette région.

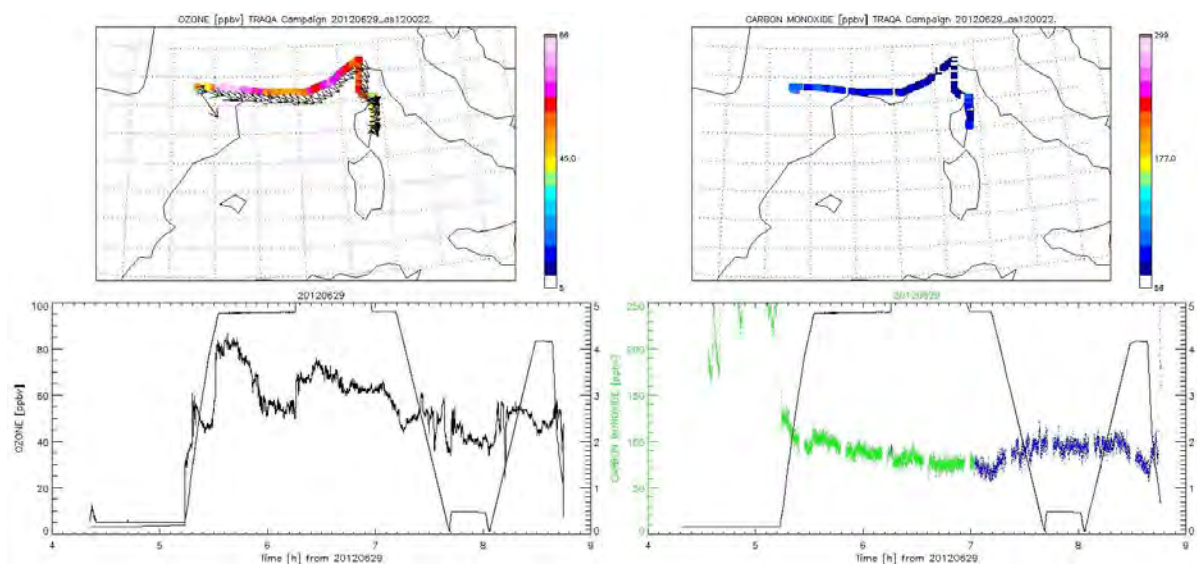


Figure I.30 : En haut à gauche : Mesure de la concentration en ozone [ppbv] (les flèches représentant le vent horizontal mesuré par l'avion). En bas à gauche : Concentration d'ozone en ppbv (fluctuations) avec l'altitude de l'avion (axe droit compris entre 0 et 5 km d'altitude). En haut à droite: Concentration de monoxyde de carbone [ppbv] mesuré par l'avion. En bas à droite : Concentration de monoxyde de carbone le long de la trajectoire avion en ppbv (fluctuations en couleur; Les zones bleues correspondent approximativement à des zones maritimes tandis que celles qui sont vertes correspondent aux mesures sur les terres) avec l'altitude correspondante de l'avion (trait plein noir). Ces données correspondent au cas du 29 Juin pour un vol compris entre 04:00 TU et 09:00 TU (vol 22).

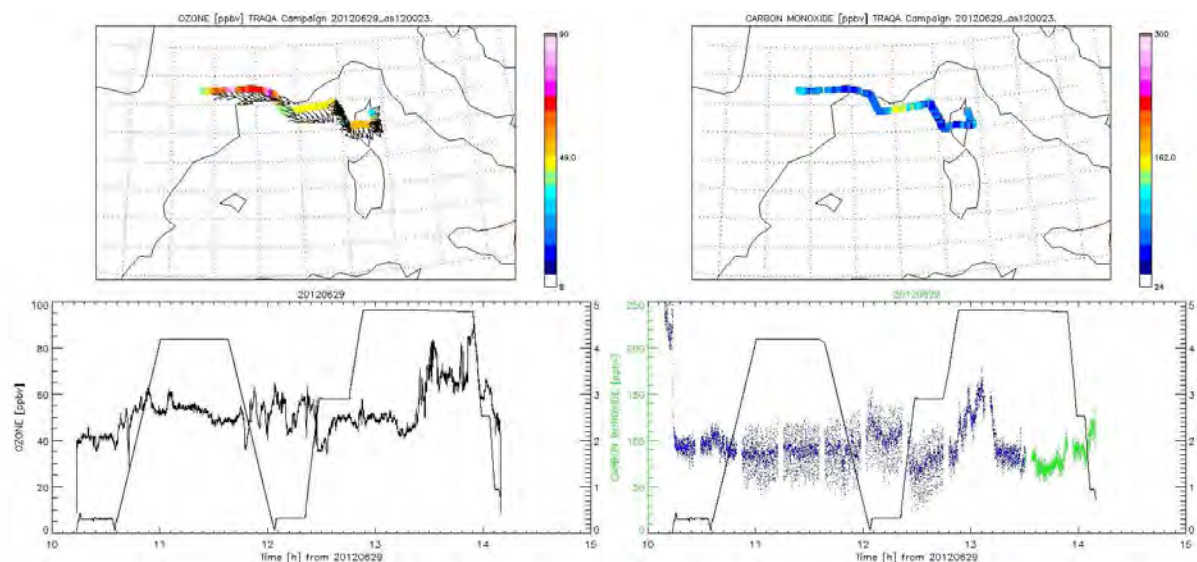


Figure I.31 : Même légende que celle de la **Figure I.30** mais pour un vol compris entre 10:00 TU et 14:00 TU (cas du 29 Juin, vol 23).

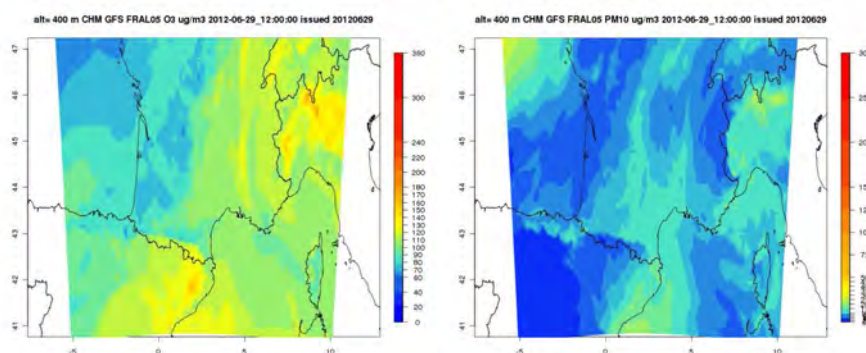


Figure I.32 : Champ d'ozone et PM_{10} calculés par le modèle du CEP MACC (en $\mu g/m^3$) pour l'échéance de 12:00 TU du 29 Juin 2012 à 400 m d'altitude.

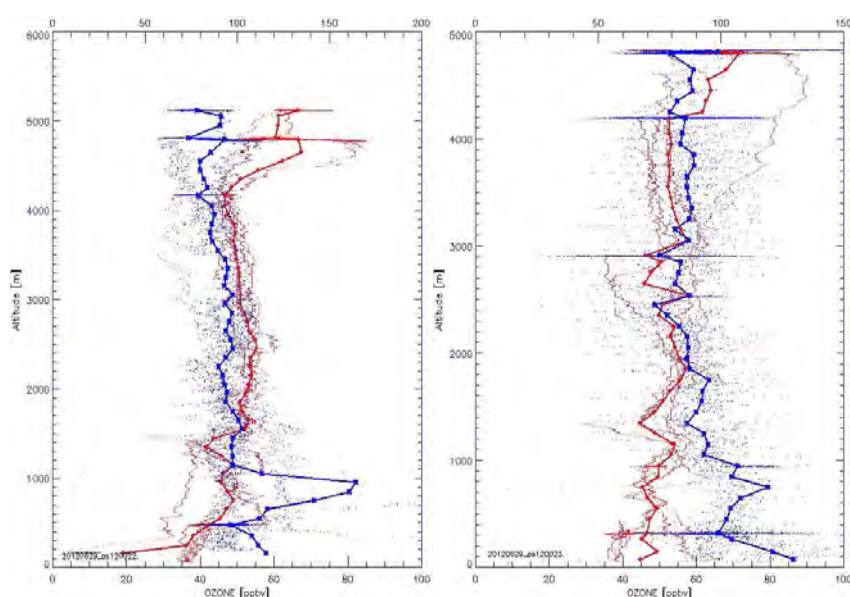


Figure I.33 : Même légende que celle de la **Figure I.26** mais pour le 29 Juin 2012 (vol 22 et 23 de la gauche vers la droite)

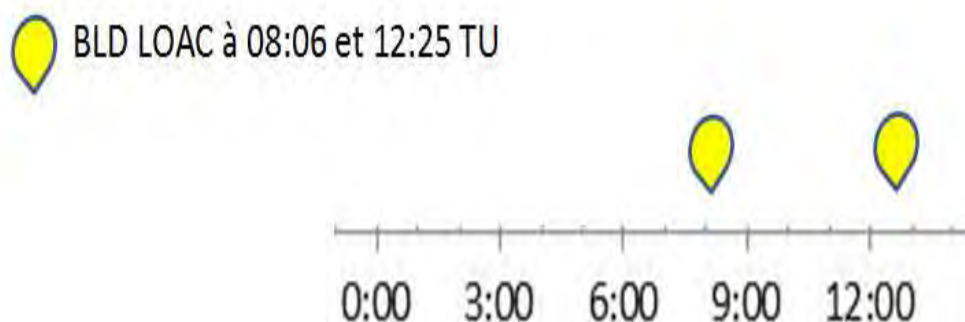


Figure I.34 : Chronologie de lâcher des Ballons Légers Dilatables emportant des LOAC pour mesurer les aérosols.

En résumé, cette POI est extrêmement complète en ce qui concerne la mesure des aérosols et surtout des poussières désertiques. Il est à noter qu'un transport d'ozone de longue distance est aussi à analyser ainsi que les concentrations de CO élevées qui doivent provenir de feux. La **partie II** de ce document présente les études qui ont pu être réalisées en étudiant les poussières désertiques.

I.6 POI-4 : Cas des 3 et 4 Juillet 2012 : Export de la pollution depuis Barcelone

I.6.1 Situation météorologique

Les journées du 3 et du 4 Juillet présentent toutes deux un flux de sud-ouest modéré provenant de la région de Barcelone, confirmé plus finement par une étude de trajectographie (non présentée). La **Figure I.35** présente la situation concernant la distribution en ozone. Un premier maximum d'ozone est repéré au large de la côte barcelonaise vers 15:00 TU, le 3 juillet, et une langue de pollution semble provenir de cette même région vers 18:00 TU le lendemain. Trois plans de vol sont proposés pour échantillonner cet évènement (voir **Figures I.36, I.39 et I.40**): l'un le 3 juillet entre 13:00 TU et 17:00 TU, le second et le troisième le 4 Juillet entre 06:00 TU et 11:00 TU et entre 15:00 TU et 18:30 TU.

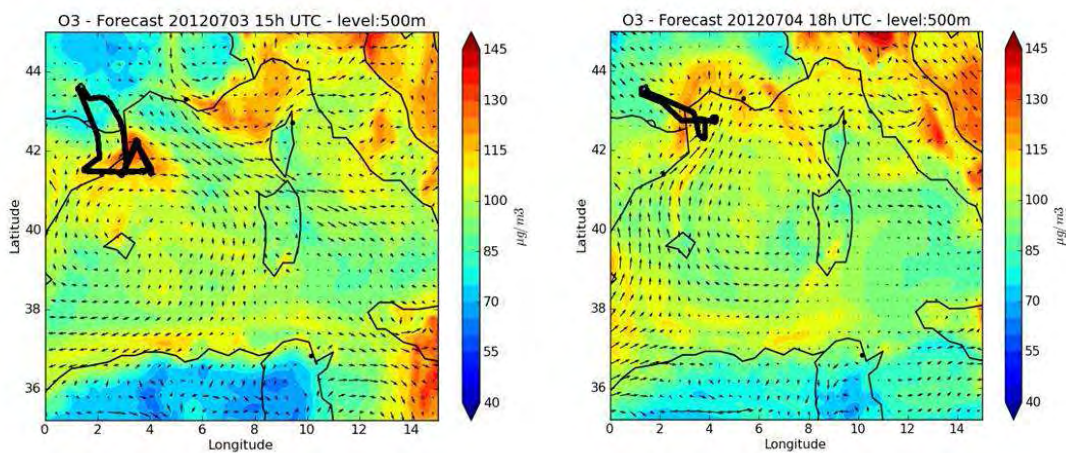


Figure I.35 : Champs d'ozone [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] et de vent horizontal (représenté par les flèches) prévus par le modèle MOCAGE à 500 m d'altitude pour la journée du 3 Juillet 2012 à 15:00 TU (gauche) et du 4 Juillet à 18:00 TU (droite) avec la trajectoire de l'avion en trait plein noir.

I.6.2 Résultats

Les vols sont faits à plusieurs niveaux pour véritablement échantillonner la structure verticale du panache de Barcelone que l'on voit bien sur les mesures du lidar LNG (**Figure I.36**) entre 13:00 TU et 15:00 TU le 3 Juillet. Après 15:00 TU et ce, jusqu'à 16:30 TU, les mesures sont faites sur la mer et les séries temporelles d'ozone et de CO semblent relativement bien corrélées pour la journée du 3 Juillet (**Figure I.37**). Ce qui peut se traduire par un transport de pollution. L'origine exacte (sans doute de la région barcelonaise) et le comportement de cette masse d'air restent encore à être analysées dans les détails. Les mesures du LNG (**Figure I.38**) montrent aussi une structure verticale avec une couche d'aérosol qui pourrait mesurer jusqu'à 1000 m d'épaisseur. Il semble aussi que les profils horizontaux de coefficient de rétro diffusion (rouge, vert, bleu) présentent des similitudes de forme avec les mesures d'ozone et de CO. Les résultats obtenus sur les **Figures I.39 et I.40** nécessitent quant à eux plus d'analyse. En effet, autant le vol 26 présente une certaine similitude dans le comportement entre l'O₃ et le CO, autant il est difficile de conclure à ce stade pour le vol 25 (**Figures I.39 et I.40**). De même pour les profils mesurés par l'avion (**Figure I.41**), il y a bien 2 maxima relatifs sur l'ozone, l'un à bas niveau vers 500 m d'altitude et l'autre à plus haut niveau vers 4000 m d'altitude pour les journées du 3 Juillet et du 4 au matin, mais cette signature a disparu l'après midi du 4 Juillet. Il est à noter que les concentrations d'ozone mesurées ne sont pas extrêmes.

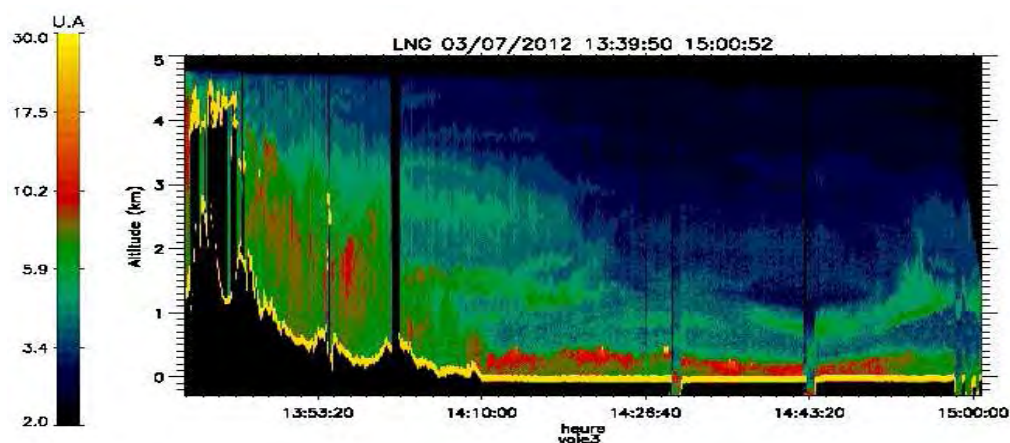


Figure I.36 : Coefficient de rétro diffusion [u.a.] observé par le lidar embarqué LNG pour la journée du 3 Juillet 2012 de 13:39 à 15:00. On distingue nettement une couche d'aérosol qui diminue au fur et à mesure du temps.

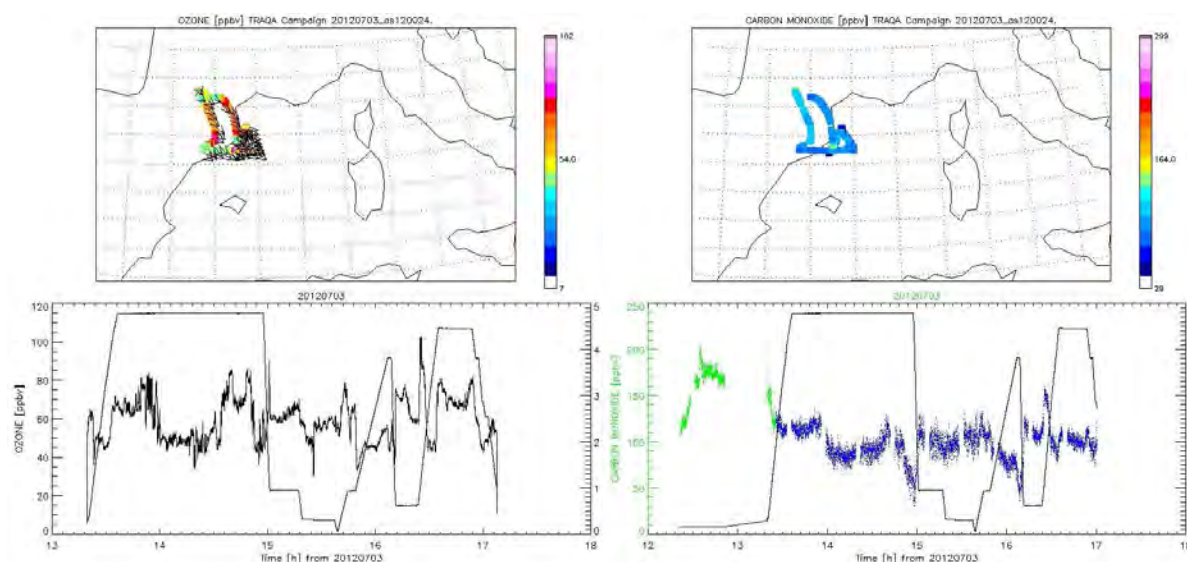


Figure I.37 : En haut à gauche : Mesure de la concentration en ozone [ppbv] (les flèches représentant le vent horizontal mesuré par l'avion). En bas à gauche : Concentration d'ozone en ppbv (fluctuations) avec l'altitude de l'avion (axe droit compris entre 0 et 5 km d'altitude). En haut à droite: Mesure de la concentration de monoxyde de carbone [ppbv] mesuré par l'avion. En bas à droite : Concentration de monoxyde de carbone le long de la trajectoire avion en ppbv (fluctuations en couleur; Les zones bleues correspondent approximativement à des zones maritimes tandis que celles qui sont vertes correspondent aux mesures sur les terres) avec l'altitude correspondante de l'avion (trait plein noir). Ces données correspondent au cas du vol compris entre 13:00 TU et 17:00 TU (cas du 3 Juillet, vol 24).

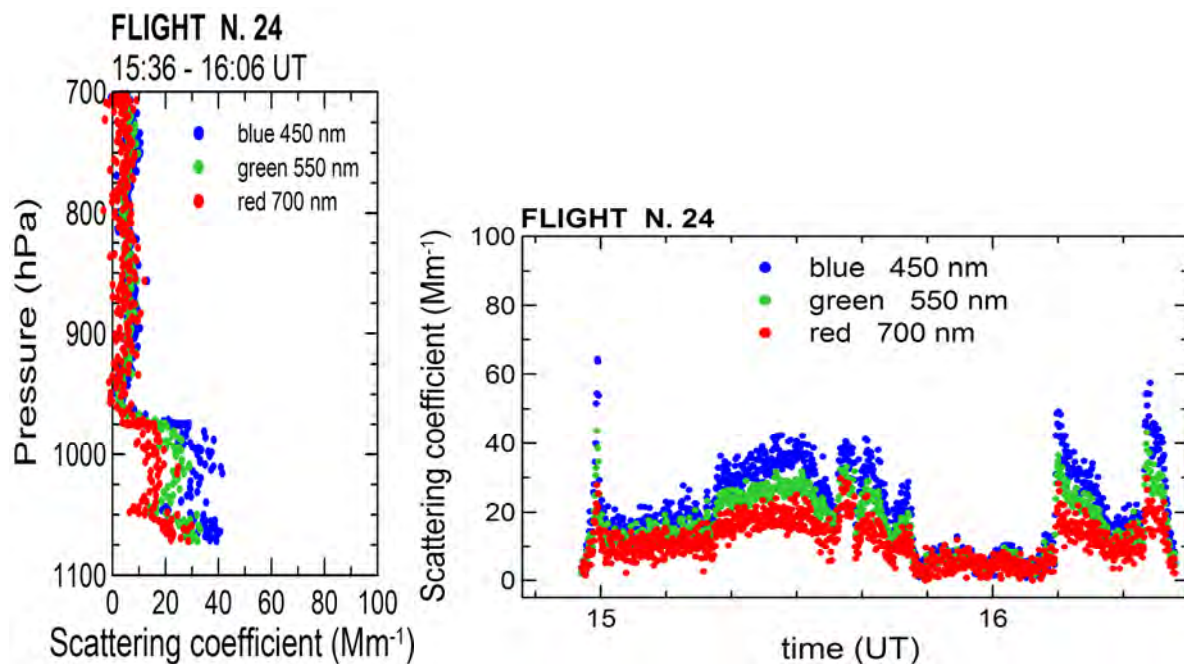


Figure I.38 : Profil de coefficient de rétro diffusion (longueurs d'onde rouge, vert, bleu) obtenus à partir du LIDAR embarqué LNG [en Mm^{-1}] entre 15:30 TU et 16:00 TU et série temporelle obtenue lors du vol entre 15:00 TU et 16:30 TU. Vol 24, cas du 3 Juillet.

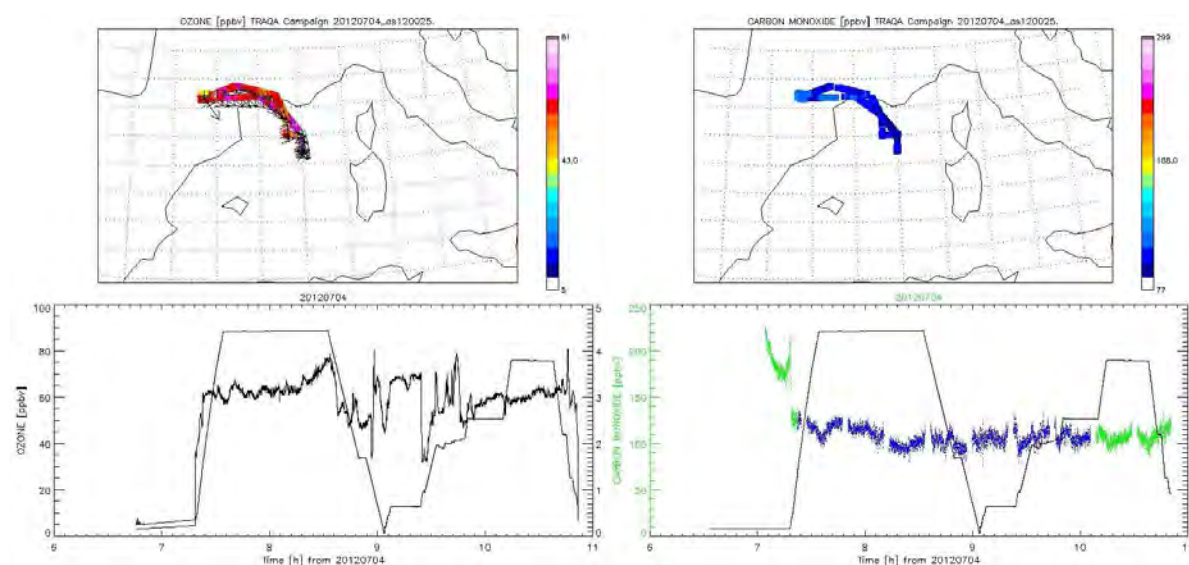


Figure I.39 : Même légende que celle de la Figure I.37 mais pour un vol compris entre 06:00 TU et 11:00 TU (cas du 4 Juillet, vol 25).

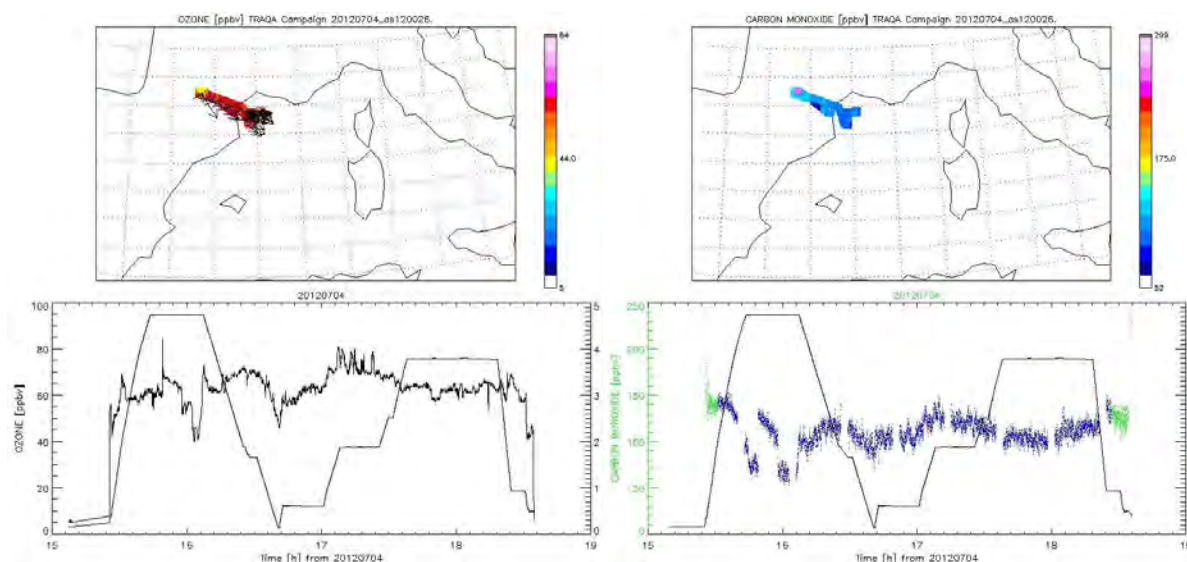


Figure I.40 : Même légende que celle de la **Figure I.37** mais pour un vol compris entre 15:00 TU et 18:30 TU (cas du 4 Juillet, vol 26).

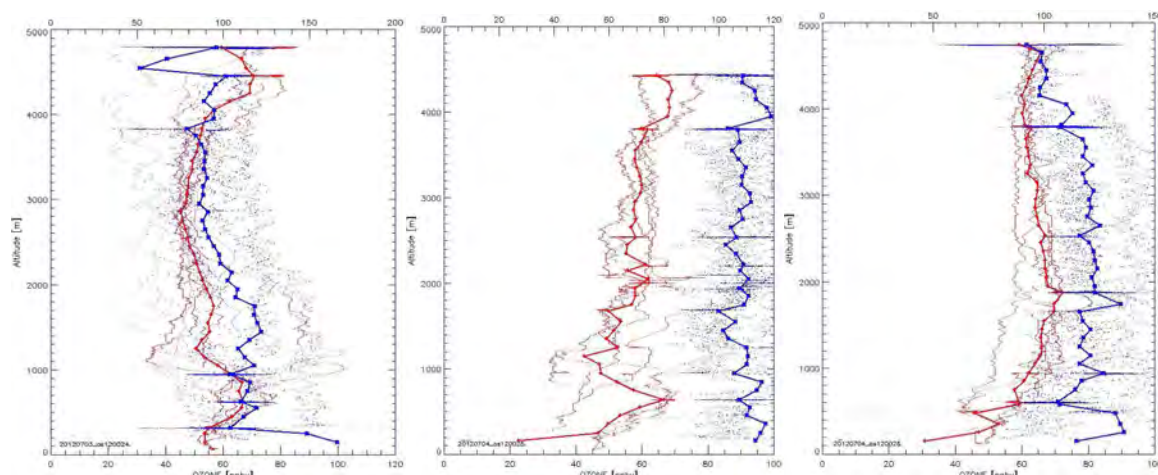


Figure I.41 : Profils d'ozone (axe du bas et couleur rouge) et de monoxyde de carbone (axe du haut et couleur bleue) en ppbv suivant l'altitude en m. En trait plein : moyennes obtenues sur les données dans des boîtes qui représentent 100 m d'altitude. En trait pointillé : ensemble des données mesuré par l'avion. Journées du 3 et le 4 Juillet 2012 (vol 24, 25 et 26 dans l'ordre de la gauche vers la droite)

La comparaison entre le modèle MOCAGE et les mesures aéroportées effectuées durant la journée du 3 juillet sont représentées sur la **Figure I.42** pour l'ozone et pour le monoxyde de carbone. L'accord entre les deux jeux de données est relativement bon pour l'ozone dans le sens où la variabilité spatiale de l'espèce est respectée avec des valeurs relativement proches. On note quand même, comme pour les cas précédents une légère surestimation des concentrations calculées par le modèle. Les masses d'air polluées, mises en évidence, présentent des valeurs proches de 90 ppbv entre 900 et 700 hPa. Pour le CO, la comparaison entre le modèle MOCAGE et les mesures avion montre que le modèle a tendance à surestimer légèrement les valeurs de CO. Les mêmes tendances sont retrouvées pour la journée du 4 juillet (**Figure I.43**)

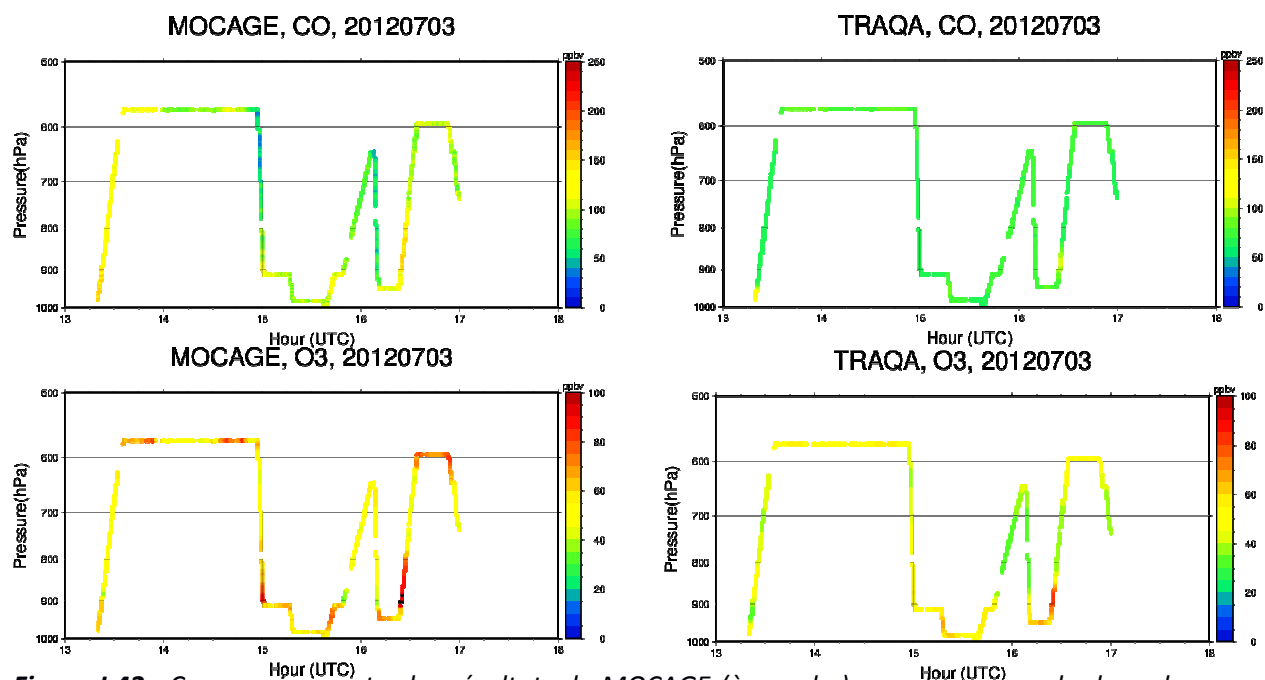


Figure 1.42 : Comparaison entre les résultats de MOCAGE (à gauche) pour le monoxyde de carbone [ppbv] (en haut) et l'ozone [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] (en bas) et les observations aéroportées faites pendant la campagne TRAQA pour le 3 juillet 2012.

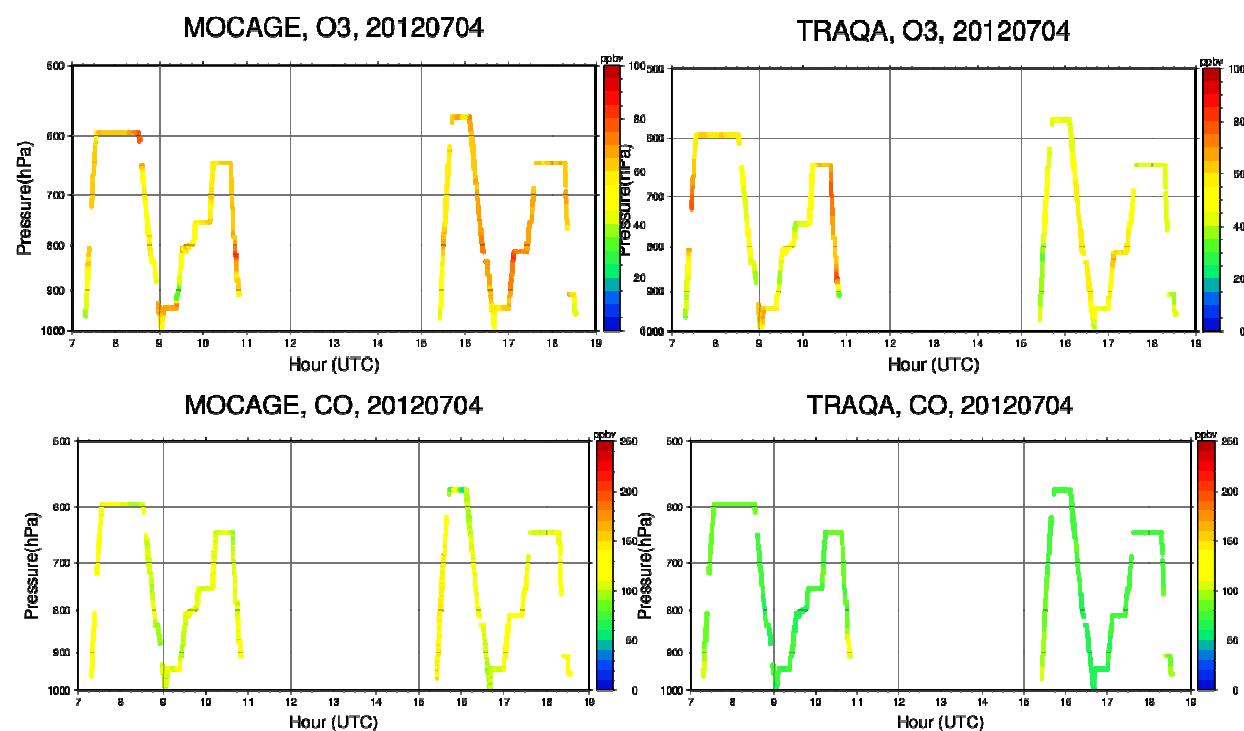


Figure 1.43 : Même légende que celle de la Figure 1.42 mais pour le 4 juillet.

En résumé, cette POI est très intéressante sur le point de vue chimique et il faudrait évidemment analyser les autres paramètres chimiques (avec le PTRMS par exemple) afin d'étudier plus en détail ces journées. De plus, il semble intéressant de regarder les différentes transformations chimiques sur

le trajet entre Barcelone et les côtes françaises. Il est à noter que les sorties de modélisation présentent toujours une surestimation légère mais chronique comparée aux observations aéroportées pendant cette campagne expérimentale.

I.7 POI-5 : Cas des 6 et 7 Juillet 2012 : Pollution par mistral commençant

I.7.1. Situation météorologique

Cette POI a été réalisée suite au retour d'expérience de la POI-2 qui montrait peu de concentration forte en espèces chimiques mesurées. L'idée était de voir, avant que le mistral établi ait tout dissipé sur la Méditerranée, l'importance de la pollution rejetée sur la mer par mistral juste commençant. La situation du 6 et du 7 Juillet est propice pour ce genre d'expérience avec un déclenchement du mistral prévu pour le vendredi 6 Juillet très tôt le matin. Le 6 Juillet, le mistral commence avec un peu de Tramontane qui fait circuler la masse d'air vers l'est de la Méditerranée. Les trajectoires montrent des directions de masses d'air partant de Sausset-les-Pins et qui se dirigent vers le Golfe de Gênes (Figure I.44).

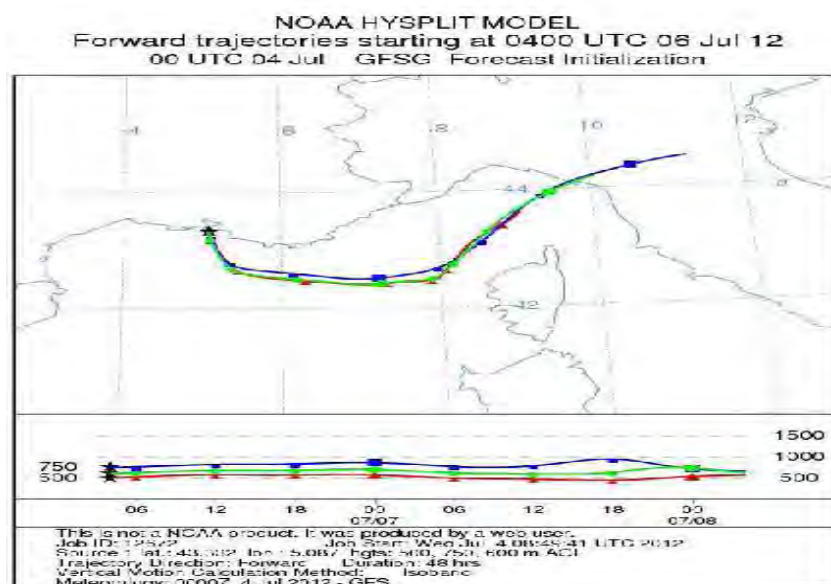


Figure I.44 : Trajectoires des masses d'air partant de Sausset-les-Pins prévues par le modèle HYSPLIT. Les données météorologiques de forçage utilisées sont celles du modèle de grande échelle GFSG et le calcul est fait à pression constante pour simuler au mieux le comportement des BPCLs. Cas du 6 Juillet 2012.

La situation chimique et dynamique prévue est différente de celle qui concernait la POI-2. La Méditerranée présente une distribution de concentration d'ozone plus forte avec des vents plus faibles et qui se traduit par un flux très modéré de nord-ouest (Figure I.45). Pour cette situation, nous présentons trois plans de vol et la possibilité de faire voler 3 BPCLs (dont 2 avec la mesure de l'ozone). La chronologie des lâchers de ballons est présentée sur la Figure I.46. Les lâchers des BLDs avant les BPCL permettent d'être sûr quant à la direction que va prendre le BPCL. Pour la journée du 6 Juillet, il est à noter que du transport de pollution se faisait vers 4000 m d'altitude comme détecté par les sondes à bord des BLDs (Figure I.47). Le but aussi est de réaliser des vols avion en coïncidence avec ceux des ballons pour échantillonner la même masse d'air et donc 2 vols avions sont réalisés l'un le matin pour mesurer la même masse d'air que le ballon au début de sa trajectoire et le second dans l'après midi pour documenter la fin de la trajectoire du ballon.

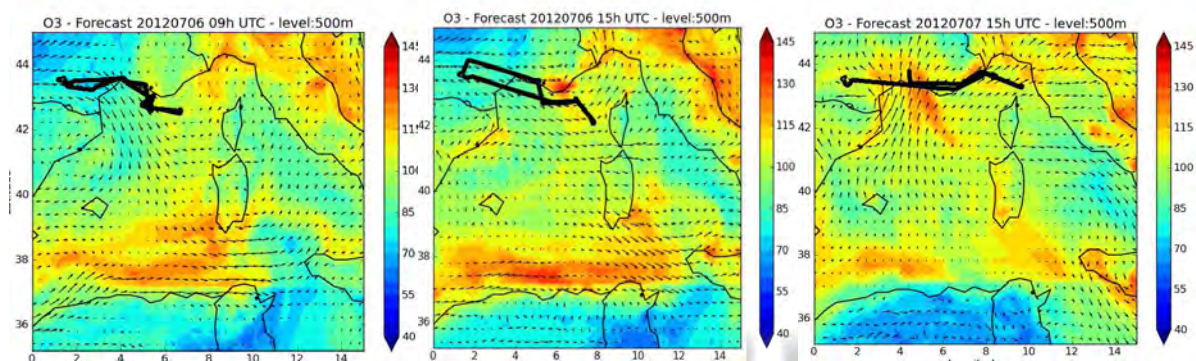


Figure 1.45 : De la gauche vers la droite : Champs d'ozone [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] et de vent horizontal (représenté par les flèches) prévus par le modèle MOCAGE à 500 m d'altitude pour la journée du 6 Juillet 2012 à 09:00 TU et 15:00 TU (gauche et centre) et du 7 Juillet à 15:00 TU (droite) avec la trajectoire de l'avion en trait plein noir.

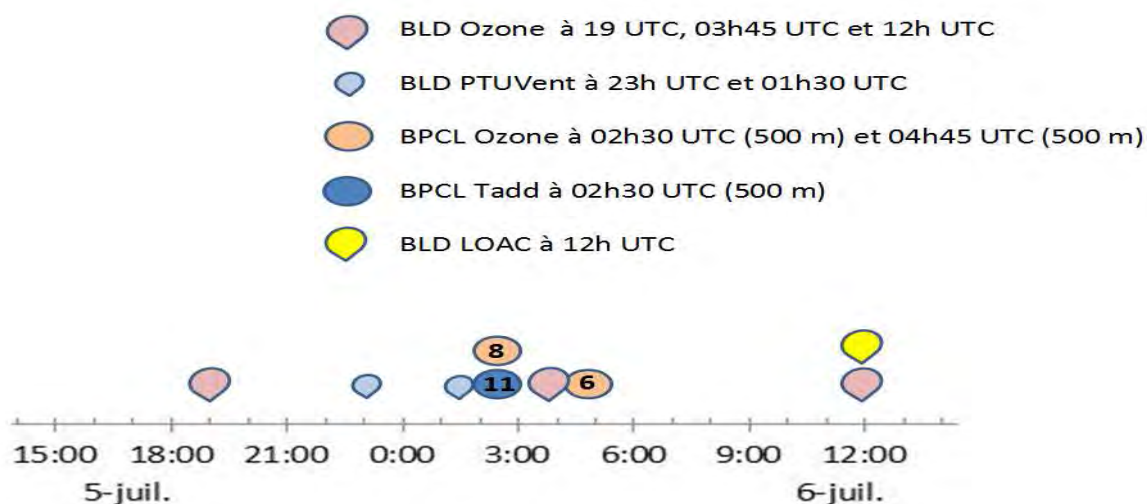


Figure 1.46 : Chronologie des différents lâchers de ballons pour la POI-5 (6-7 Juillet 2012). Les lâchers des BLDs avant les BPCL permettent d'être sûr sur la direction que va prendre le BPCL.

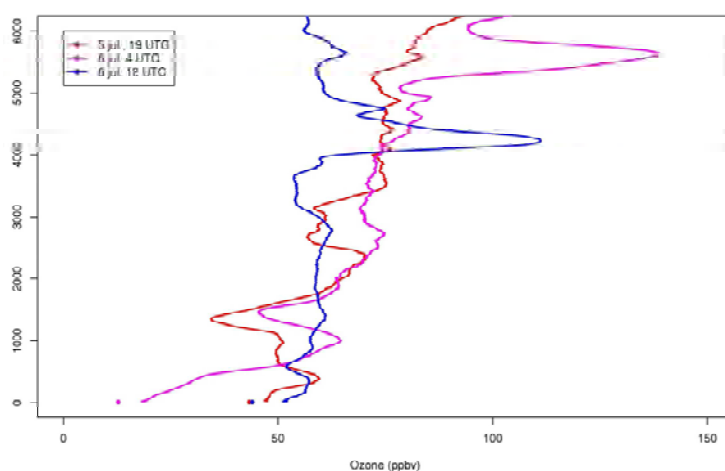


Figure 1.47: Profils d'ozone [ppbv] mesurés par les sondes des ballons légers dilatables dérivants depuis le site de Sausset-les-Pins. Les différentes couleurs correspondent à différentes heures de lâcher (voir capsule à l'intérieur du graphe).

I.7.2 Résultats

Les mesures d'ozone et de CO sur la mer présentent un maximum de CO et un minimum d'ozone sur la mer entre 09:30 TU et 10:00 TU à très bas niveau (**Figure I.48**). Les valeurs des concentrations de CO atteignent 150 ppbv quand celles de l'ozone sont de l'ordre de 40 ppbv. Dans tous les cas, les niveaux de concentration pour la journée du 6 Juillet (**Figure I.48 et I.49**) en ozone restent cohérents avec les mesures réalisées par les BPCLs (**Figure I.50**). La coïncidence a été assurée avec succès comme en témoigne la photo prise depuis l'avion instrumenté ATR-42 (**Figure I.51**). Les mesures faites par les ballons montrent une décroissance intéressante de l'ozone au fur et à mesure que l'on s'approche de la Corse à mettre en relation avec les mesures effectuées par l'avion durant cette journée.

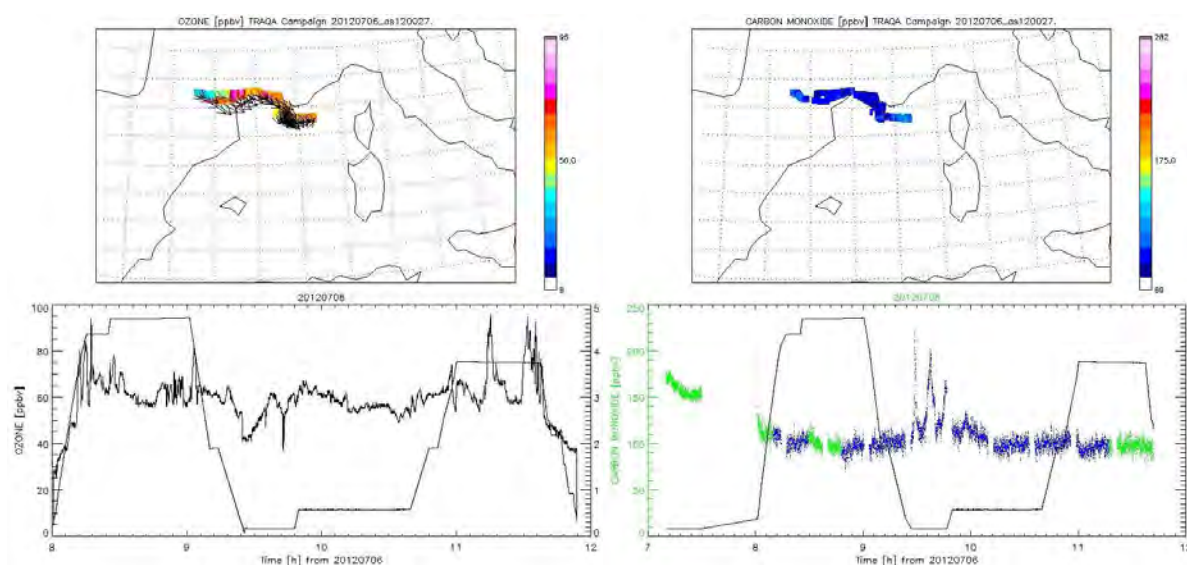


Figure I.48 : En haut à gauche : Mesure de la concentration en ozone [ppbv] (les flèches représentant le vent horizontal mesuré par l'avion). En bas à gauche : Concentration d'ozone en ppbv (fluctuations) avec l'altitude de l'avion (axe droit compris entre 0 et 5 km d'altitude). En haut à droite: Mesure de la concentration de monoxyde de carbone [ppbv] mesuré par l'avion. En bas à droite : Concentration de monoxyde de carbone le long de la trajectoire avion en ppbv (fluctuations en couleur; Les zones bleues correspondent approximativement à des zones maritimes tandis que celles qui sont vertes correspondent aux mesures sur les terres) avec l'altitude correspondante de l'avion (trait plein noir). Ces données correspondent au cas du vol compris entre 08:00 TU et 12:00 TU (cas du 6 Juillet, vol 27).

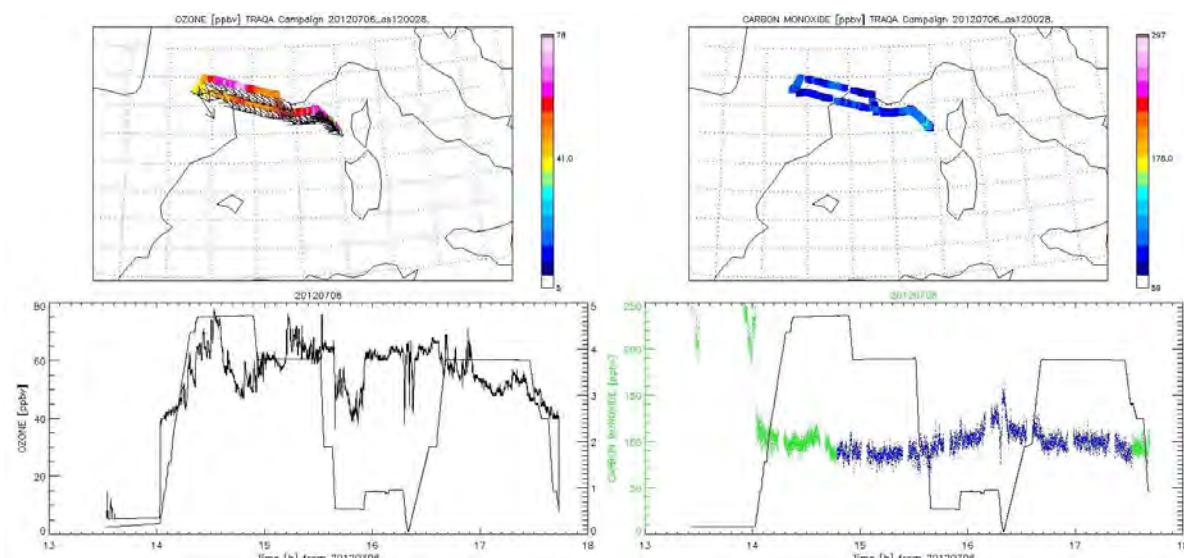


Figure I.49: Même légende que celle de la **Figure I.48** mais pour un vol compris entre 14:00 TU et 18:00 TU (cas du 6 Juillet, vol 28).

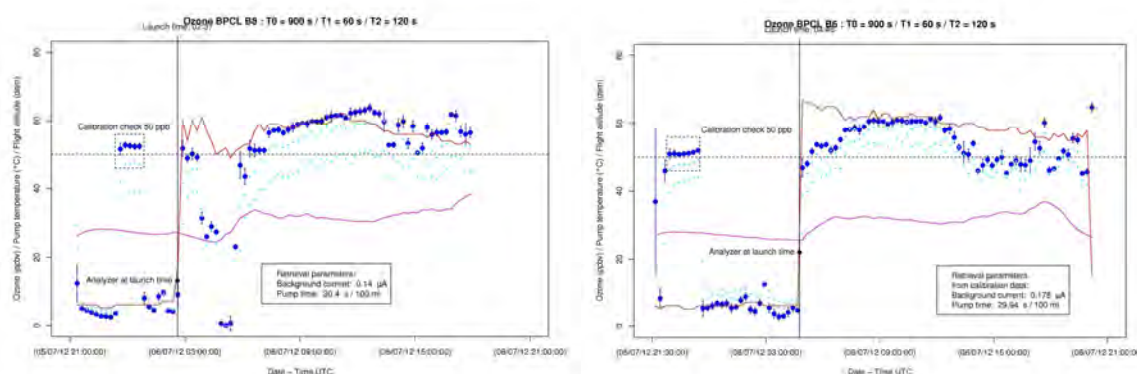


Figure I.50: Concentration d'ozone mesurée par 2 des ballons pressurisés de couche limite [ppbv] représentée par les points bleus et dont une trajectoire est présentée sur la **Figure I.51**.

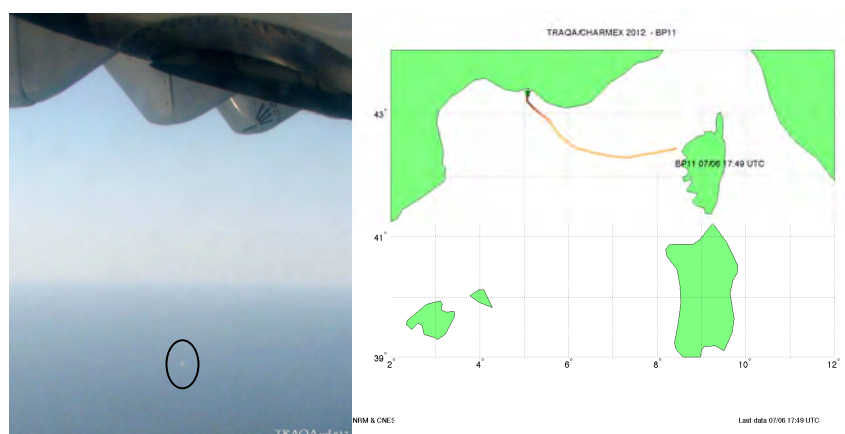


Figure I.51 : Photo du BPCL prise depuis l'ATR-42 (à gauche, le ballon est entouré) et trajectoire du Ballon Pressurisé de Couche Limite (à droite). (photo de C. Jambert)

Le vol du lendemain (7 Juillet) a été réalisé pour documenter la masse d'air de la veille qui se dirigeait vers le Golfe de Gênes (suivi de trajectoires non présenté dans ce document) et doit être mis en perspective avec les résultats du 6 Juillet. C'est actuellement assez difficile avec les données que l'on a d'analyser cette situation de façon fiable. Dans tous les cas, il semble intéressant de noter deux pics d'ozone (**Figure I.52**) entre 4 et 5 km d'altitude qui montrent les caractéristiques d'une descente stratosphérique sur la mer. Ce maximum est aussi repéré sur les profils moyens mesurés par les avions (**Figure I.53**). Il reste, cependant, à confirmer ce phénomène.

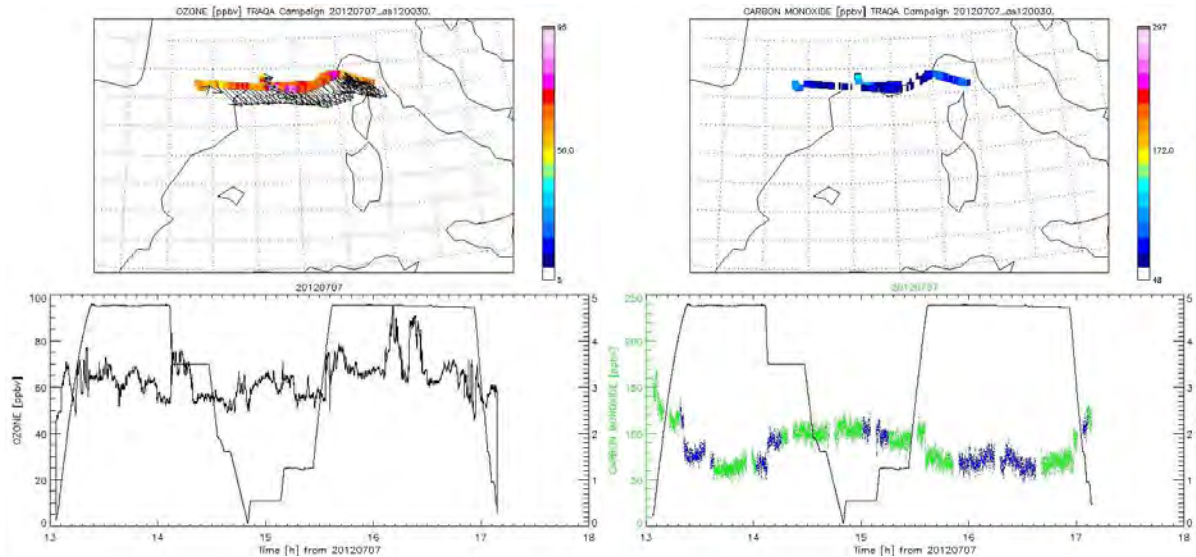


Figure I.52: Même légende que celle de la **Figure I.48** mais pour un vol compris entre 13:00 TU et 17:00 TU (cas du 7 Juillet, vol 30).

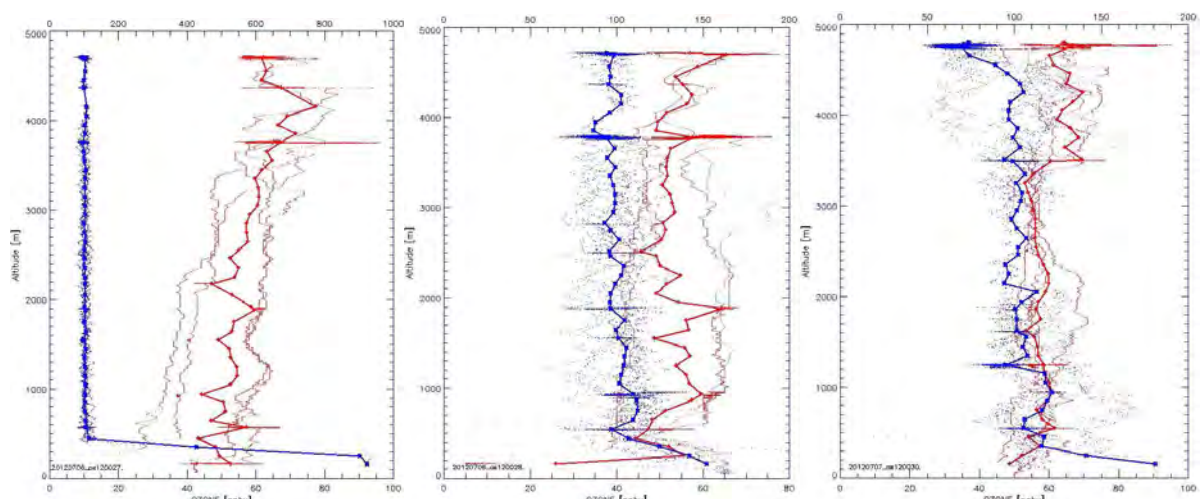


Figure I.53: Même légende que celle de la **Figure I.41** mais pour le 6 et le 7 Juillet 2012 (vol 27, 28 et 30 dans l'ordre de la gauche vers la droite). Le profil de CO du vol 27 a des valeurs très fortes au sol sans doute dues à la pollution sur l'aéroport.

En résumé, cette POI répond, comme la POI-2, à l'étude du suivi lagrangien avec cependant des valeurs d'ozone plus fortes. L'ensemble des données pour cette POI-5 est remarquable. Nous avons entrepris pour cette POI en particulier une étude de sensibilité des cadastres d'émission pour comprendre pourquoi le modèle MOCAGE surestimait légèrement l'ozone et le CO. L'ozone est une espèce secondaire et est produit par les réactions avec les oxydes d'azote, COV ou encore le

monoxyde de carbone. Ces dernières espèces sont émises et reproduites par les cadastres d'émissions placés dans le modèle. Cette partie recherche est présentée dans le paragraphe suivant :

I.7.3 Influence des cadastres d'émission sur la prévision d'O3 et de CO dans MOCAGE

Dans cette partie nous présentons donc les résultats d'une étude que nous avons effectuée dans le cadre de l'expérience TRAQA pour la journée du 6 juillet afin d'évaluer l'effet de différents cadastres d'émission sur les espèces chimiques O3 et CO. Le modèle MOCAGE a été utilisé dans deux expériences différentes, chacune de ces simulations utilise des fichiers d'émission différents de l'autre : la première simulation utilise le cadastre d'émission IPCC (Version 4), et la deuxième simulation utilise le cadastre TNO-MACC. La comparaison a été effectuée dans un domaine imbriqué au domaine global de MOCAGE. Ce domaine inclut évidemment le bassin Méditerranéen, l'Europe et une partie des océans qui la bordent ainsi que les déserts de l'Afrique du Nord. Ainsi, les influences de pollution anthropique des différents pays Européens, de poussières désertiques sont donc prises en compte dans les différentes simulations. Nous présentons quelques résultats issus de ces deux simulations et pour lesquelles les données réalisées pendant la campagne TRAQA ont été utilisées comme données indépendantes afin de comparer avec les sorties du modèle MOCAGE.

La **Figure I.54** illustre la sensibilité du modèle MOCAGE aux deux cadastres d'émission (IPCC et TNO-MACC) pour CO et O3 à la surface. La grande différence entre les deux cadastres se manifeste clairement sur l'Europe et le bassin méditerranéen où les valeurs de CO et d'O3 sont généralement plus faibles avec le cadastre MACC. Ce qui tend à montrer que la surestimation des concentrations d'O3 et de CO pourrait venir du choix des cadastres d'émissions (la couleur bleue domine sur le champ de différence relative entre les simulations issues des cadastres de MACC et de IPCC).

D'autre part, la validation des deux cadastres a été réalisée en utilisant des données mesurées au niveau de la surface (**Figure I.55**) ainsi que des données observées durant la campagne avec les données des Ballons Pressurisés de Couche Limite. La **Figure I.55** montre que l'impact du cadastre est très important sur l'ozone au niveau de la surface terrestre car la variation diurne dépend fortement du cadastre. Les résultats issus de la comparaison entre les résultats du modèle et les mesures des ballons (**Figure I.56**) au dessus de la mer montrent aussi une différence, mais cependant relativement plus faible. Les effets des cadastres sont plus visibles sur terre que sur mer, mais ne sont pas négligeables et une première conclusion porterait à faire le choix du cadastre TNO-MACC pour l'étude des observations de la campagne TRAQA.

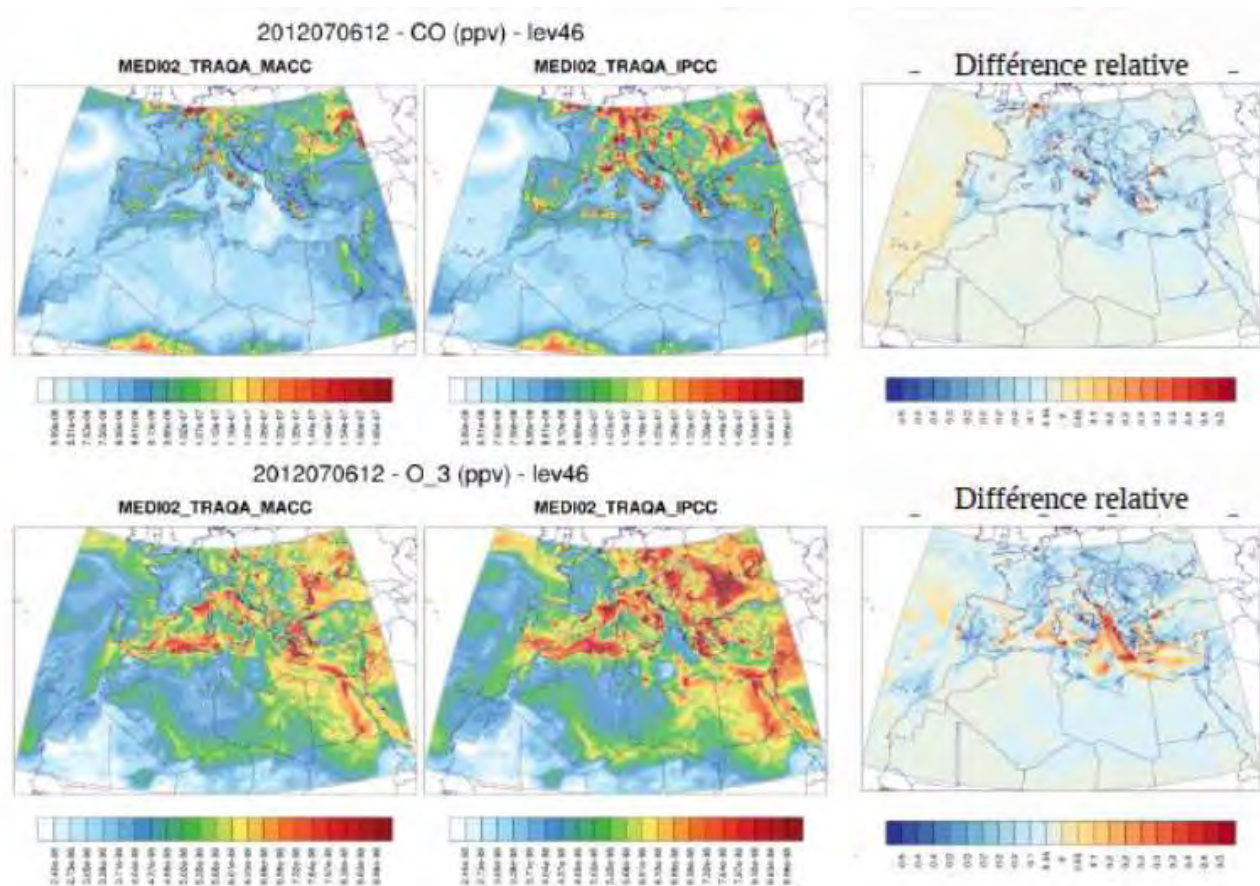


Figure I.54: Champs simulés avec MOCAGE pour le 06/07/2012 à 12h00 concernant le monoxyde de carbone (CO) (haut) et l'ozone (O₃) (bas) en utilisant deux cadastres d'émission différents : MACC (à gauche) et IPCC (au milieu). La différence relative (MACC-IPCC)/IPCC entre les deux champs est illustrée à droite.

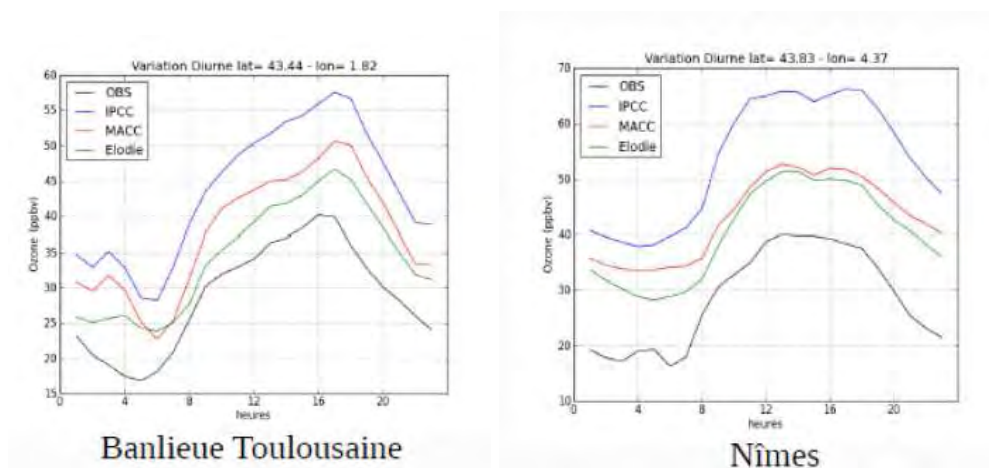


Figure I.55 : Variation diurne du champ d'ozone à la surface, sur deux stations, issue des observations (trait noir), de MOCAGE-MACC (trait rouge), MOCAGE-IPCC (trait bleu).

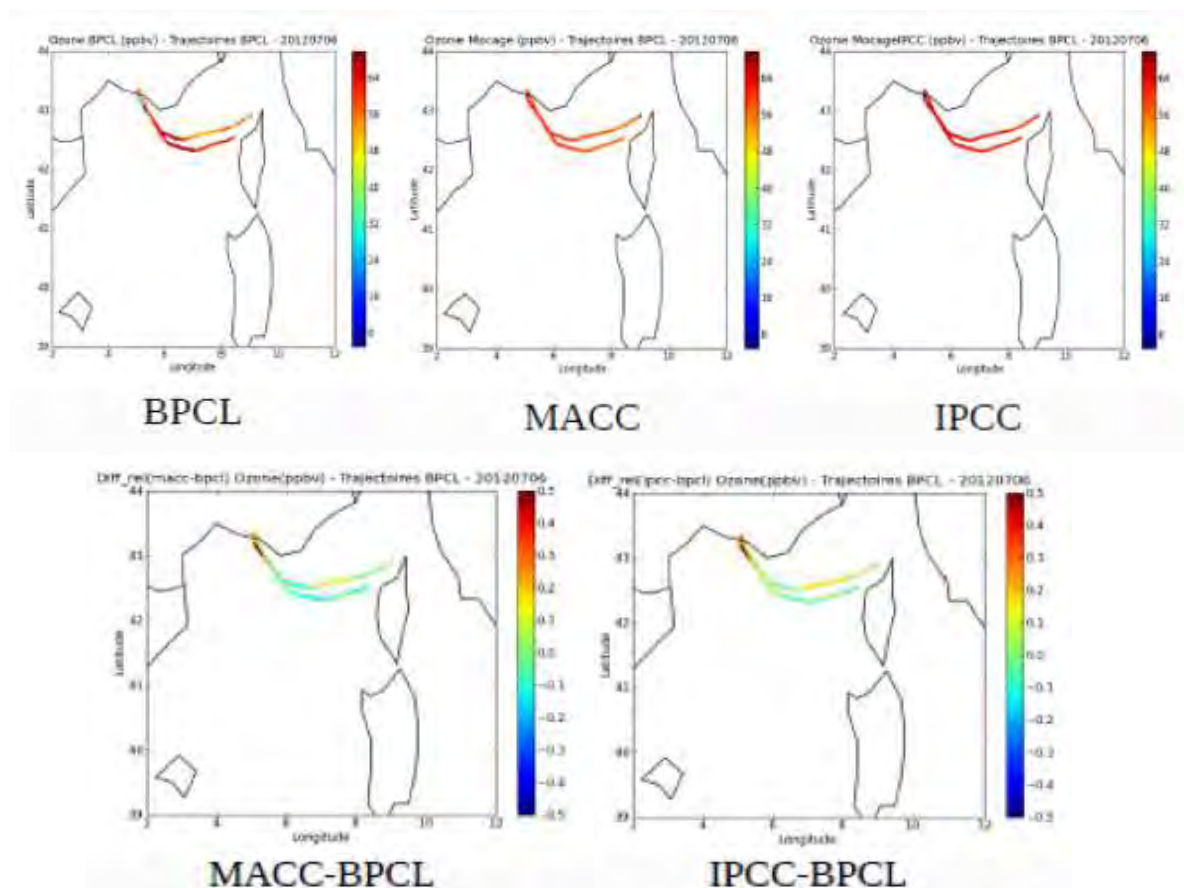


Figure I.56 : Champs d'O₃ mesurés par les ballons BPCL comparé au champ fourni par MOCAGE sur la même trajectoire des ballons en utilisant le cadastre MACC et celui de l'IPCC (Haut). Les figures du bas représentent les différences absolues entre le champ d'ozone issu des deux cadastres et les valeurs d'O₃ mesurées par les ballons.

I.8 POI-6 : Cas du 7 Juillet 2012 : Mesure de flux de composés biogéniques

I.8.1 Situation météorologique

Pour la mesure des flux biogéniques, il faut une journée chaude. La journée du 7 Juillet est propice à réaliser l'expérience avec des températures à la surface relativement fortes qui avoisinent les 29°C vers 9:00 TU (**Figure I.57**). La **Figure I.57** présente aussi la distribution du champ d'ozone. Il semble y avoir peu de pollution anthropique forte sur une zone de forêt très au nord de Martigues que l'on veut analyser (voir plan de vol sur la **Figure I.57**). Un flux de sud faible est à noter, mais sur la zone d'expérience le vent est plus faible à 500 m d'altitude. La **partie III** traite avec plus de détails les résultats obtenus à partir de la mesure de flux de composés biogéniques réalisés par avion sur la végétation Méditerranéenne.

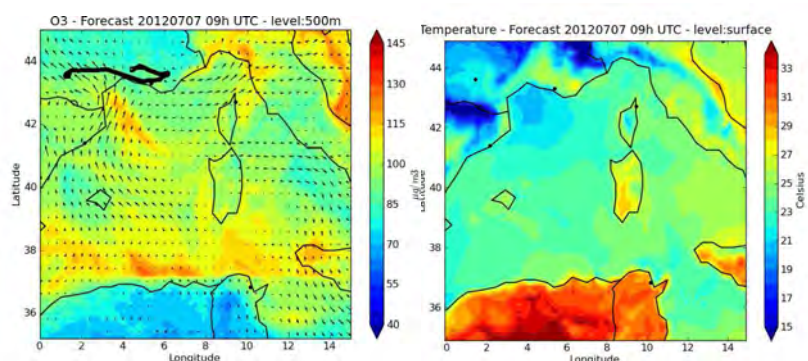


Figure 1.57 : Concentration d'ozone calculée par MOCAGE et vent horizontal superposé relatif à l'altitude de 500 m provenant d'ARPEGE (gauche). Température [C] à la surface provenant d'ARPEGE (droite). Échéance de 09:00 TU pour le 7 Juillet 2012.

1.8.2 Résultats

Les données de composés de flux biogéniques nécessitent un traitement particulier et sont exposés dans la **partie III** de ce document. Nous proposons ici de présenter les mesures d'ozone et de monoxyde de carbone obtenues, comme pour les autres POIs, bien que l'intérêt en soit moindre. Les **Figures 1.58 et 1.59** présentent les mesures d'ozone et de CO collectées au cours de ce vol et les différentes ondulations sur l'ozone montrent simplement la signatures des cercles effectués par l'avion pour mesurer les flux biogéniques.

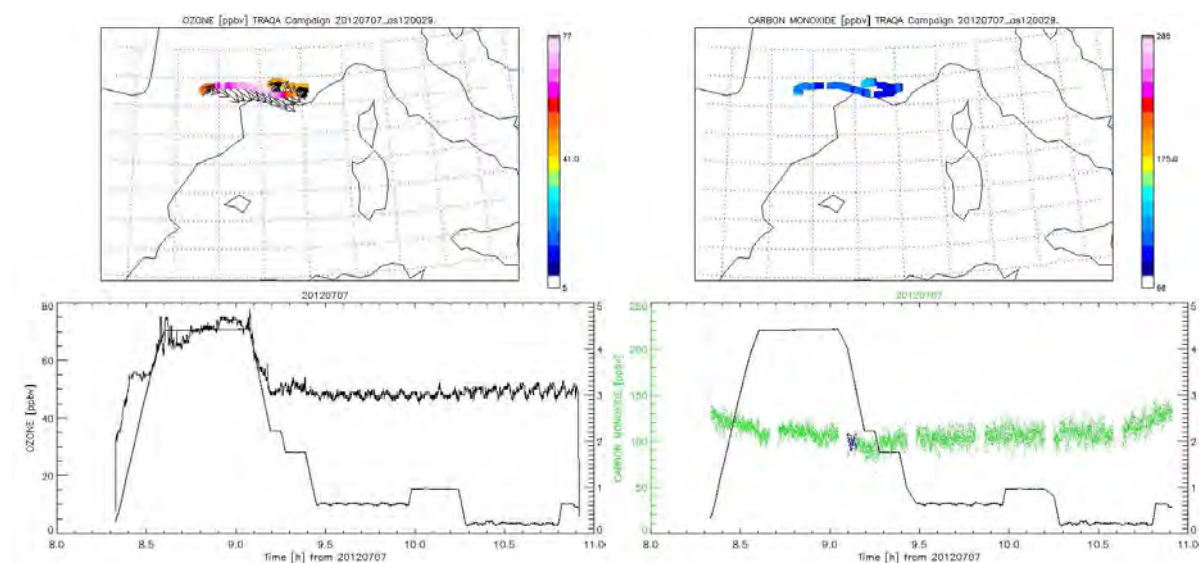


Figure 1.58: En haut à gauche : Mesure de la concentration en ozone [ppbv] (les flèches représentant le vent horizontal mesuré par l'avion). En bas à gauche : Concentration d'ozone en ppbv (fluctuations) avec l'altitude de l'avion (axe droit compris entre 0 et 5 km d'altitude). En haut à droite: Mesure de la concentration de monoxyde de carbone [ppbv] mesuré par l'avion. En bas à droite : Concentration de monoxyde de carbone le long de la trajectoire avion en ppbv (fluctuations en couleur; Les zones bleues correspondent approximativement à des zones maritimes tandis que celles qui sont vertes correspondent aux mesures sur les terres) avec l'altitude correspondante de l'avion (trait plein noir). Ces données correspondent au cas du vol compris entre 08:30 TU et 11:00 TU (cas du 7 Juillet, vol 29).

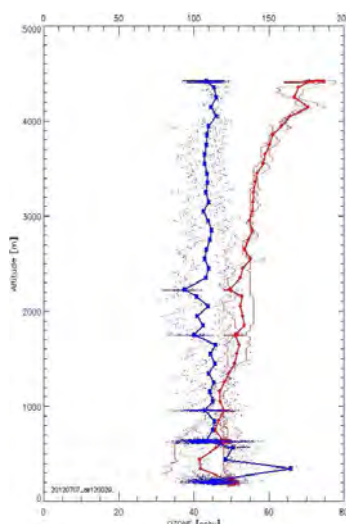


Figure 1.59: Profils d'ozone (axe du bas et couleur rouge) et de monoxyde de carbone (axe du haut et couleur bleue) en ppbv suivant l'altitude en m. En trait plein : moyennes obtenues sur les données dans des boîtes qui représentent 100 m d'altitude. En trait pointillé : ensemble des données mesuré par l'avion. Journées du 7 Juillet 2012 (vol 29).

I.9 POI-7 : Cas des 10 et 11 Juillet 2012 : Mesure de la pollution sur la côte occidentale

I.9.1 Situation météorologique

Cette POI a pour but d'échantillonner une grande partie du pourtour Méditerranéen pour documenter les principales zones de pollution au plus près de la surface. Les journées du 10 et 11 Juillet 2012 sont relativement chaudes avec des valeurs de température de surface qui atteignent les 30°C sur le pourtour Méditerranéen. Le flux de sud-ouest est relativement faible mais va permettre probablement d'exporter vers les côtes françaises de la pollution provenant d'Espagne. Il y est prévu aussi une distribution en pollution relativement uniforme (sur l'ozone) sur tout le bassin méditerranéen (**Figures 1.60 et 1.61**). Deux vols avions sont réalisés, l'un explorant les côtes ouest le 10 Juillet et l'autre explorant les côtes est le 11 Juillet.

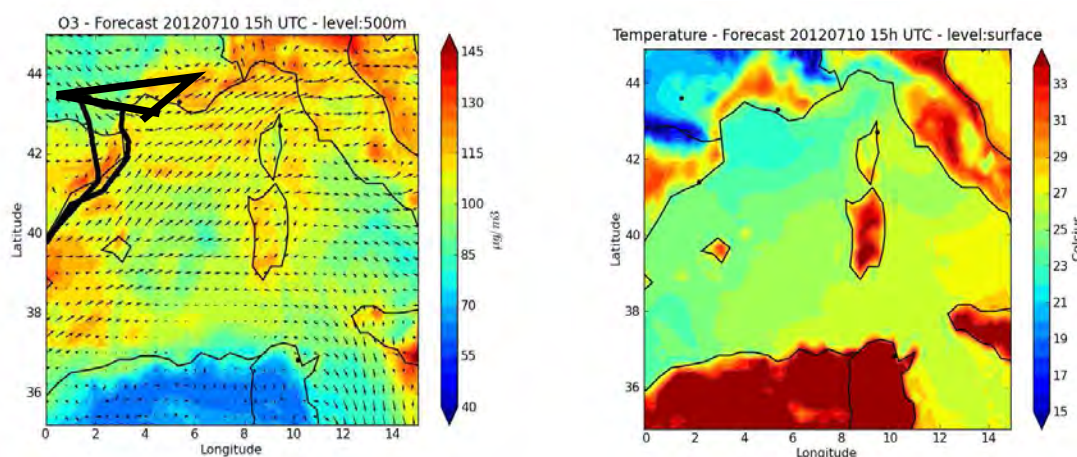


Figure 1.60 : Concentration d'ozone calculée par MOCAGE et vent horizontal superposé provenant d'ARPEGE (gauche). Température à la surface provenant d'ARPEGE (droite). Échéance de 15:00 TU pour le 10 Juillet 2012.

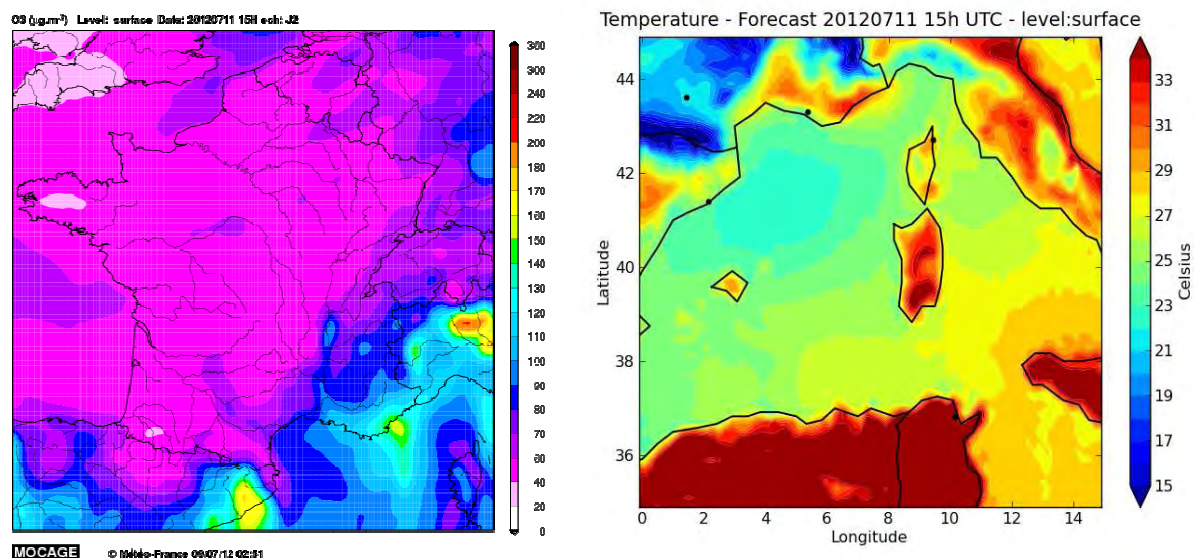


Figure 1.61 : Concentration d'ozone à la surface et à l'échelle de la France calculée par MOCAGE (gauche). Les concentrations d'ozone sont plus fortes sur la Méditerranée. Température à la surface [°C] sur le bassin Méditerranéen produite par ARPEGE (droite). Échéance de 15:00 TU pour le 11 Juillet 2012.

I.9.2 Résultats

En examinant en première approximation les mesures aéroportées d'ozone et de CO pour les deux journées du 10 et 11 Juillet, il apparaît deux maxima intéressants à bas niveau sur chacune des journées. Le 10 Juillet, entre l'Espagne et la France un pic d'ozone ressort clairement (**Figure 1.62**) et doit être étudié plus particulièrement avec l'ensemble des mesures. Le 11 Juillet, un maximum d'ozone comme de CO apparaît au large de Marseille (**Figure 1.63**) indiquant sans doute la pollution exportée de cette ville vers la mer Méditerranée. Ces données vont permettre de valider les modèles sur cette zone et de voir si les émissions dans les modèles se comportent correctement. Les profils verticaux obtenus à partir des observations aéroportées (**Figure 1.64**) présentent quelques maxima d'ozone pendant la journée du 10 juillet lors de la montée (pic relatif à 2000 m d'altitude) et pendant la descente de l'avion sur la mer (pic vers 1000 m d'altitude). Pour la journée du 11 Juillet, les valeurs plus fortes se situent surtout aux basses altitudes.

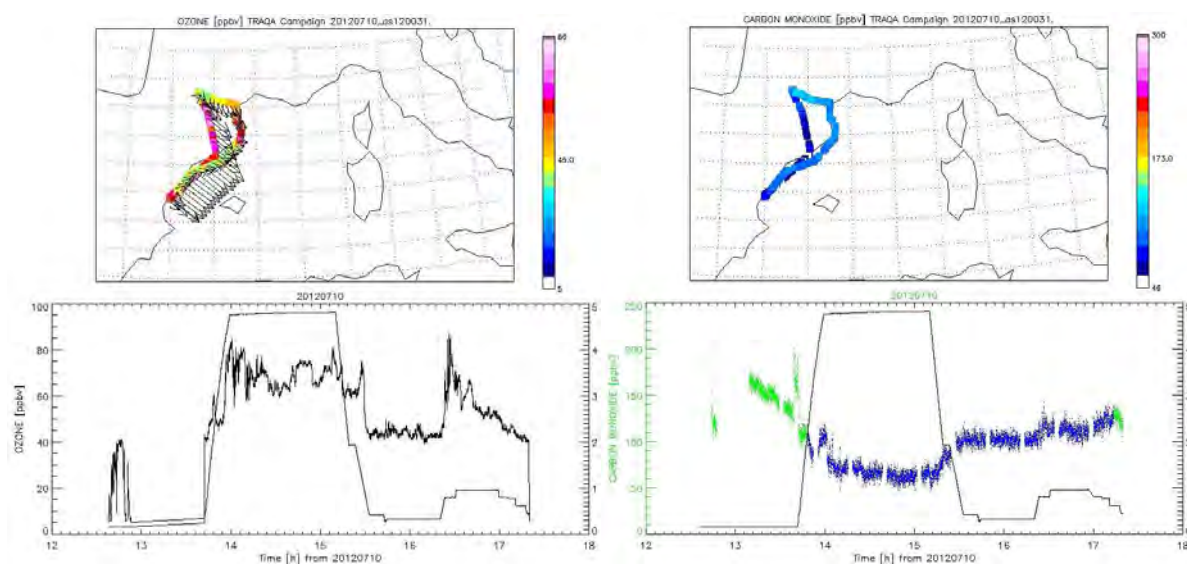


Figure I.62 : Même légende que celle de la **Figure I.58** mais pour un vol compris entre 12:30 TU et 17:30 TU (cas du 10 Juillet, vol 31).

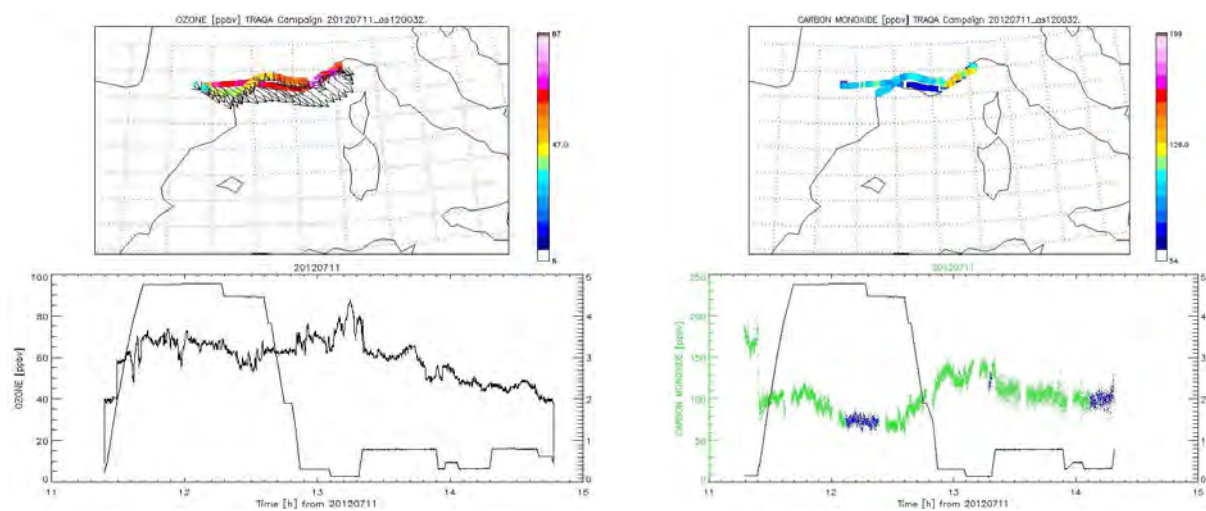


Figure I.63 : Même légende que celle de la **Figure I.58** mais pour un vol compris entre 11:30 TU et 14:30 TU (cas du 11 Juillet, vol 32).

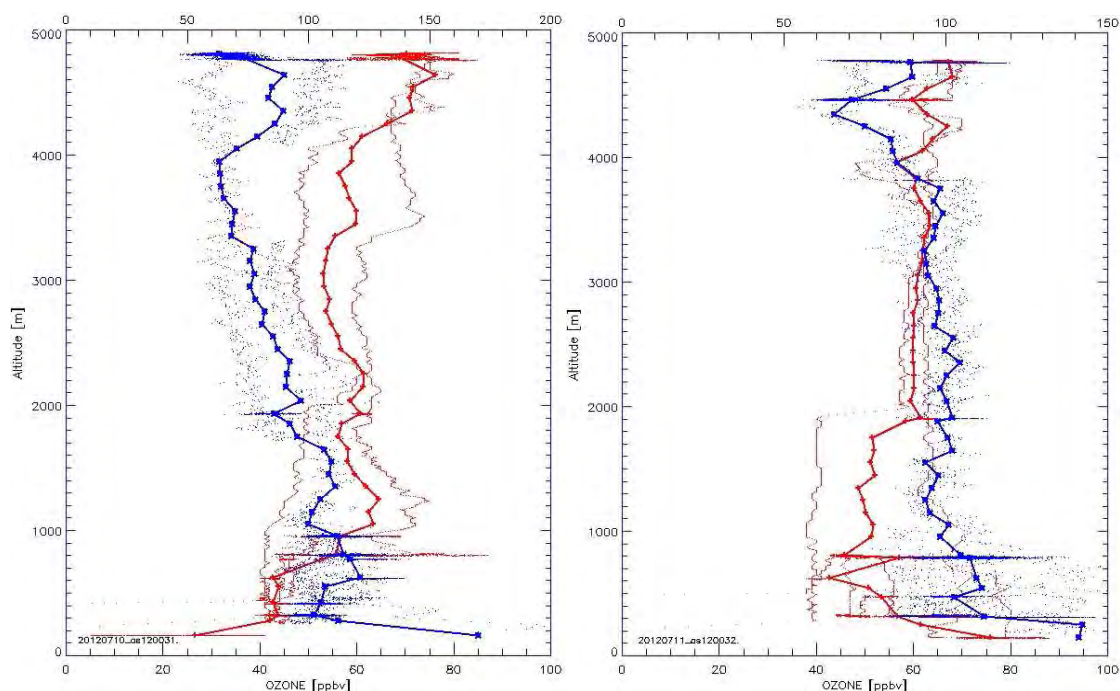


Figure 1.64 : Même légende que celle de la **Figure 1.59** mais pour le 10 et le 11 Juillet 2012 respectivement (vol 31 et 32)

En résumé, cette POI permet d'avoir un jeu de données de référence concernant les zones polluées sur le bassin Méditerranéen. Ces données pourront être confrontées aux résultats des modèles afin de permettre une validation de ceux-ci dans cette région.

II-Mesure des aérosols pendant la campagne TRAQA

II-1. Introduction

La grande variabilité des conditions météorologiques rencontrées pendant la campagne TRAQA n'a pas permis l'accumulation de composés gazeux primaires comme le monoxyde de carbone, ou l'observation de pics de polluants secondaires comme l'ozone. En revanche, la multiplicité des sources de pollution échantillonnées a conduit à mesurer une grande variété de particules, naturelles et anthropiques. L'analyse de ces mesures s'est orientée dans deux grandes directions, en ligne avec les objectifs scientifiques du projet. Il s'agit d'une part de caractériser les propriétés optiques des particules en vue d'évaluer leur impact radiatif à l'échelle du bassin méditerranéen. D'autre part, la modélisation des cas d'études les plus intéressants permet de valider des modèles de chimie transport, et d'élucider les mécanismes de transport de la pollution atmosphériques depuis ses régions sources vers le bassin méditerranéen.

II-2. Caractérisation et impact radiatif des aérosols

Après avoir discuté l'origine des aérosols observés lors de la campagne TRAQA, puis déterminé leur composition chimique et leurs propriétés optiques, l'objectif est d'estimer leur impact radiatif.

II-2.1.Transport à grande distance et contexte régional

Le modèle FLEXTRA a été utilisé en mode rétro-trajectoire pour identifier l'origine des masses d'air associées à chacune des observations avion entre le 22/6 et 13/7. Les positions des masses d'air sont indiquées sur les **Figures II.1 et II.2** pour des pas de temps de 6 h. L'intérêt de ce type de représentation est d'avoir une vision globale des principales sources qui contrôlent les distributions d'aérosols observées par l'ATR-42. La première partie de la campagne a permis d'échantillonner l'aérosol de pollution de la vallée du Rhône et de la plaine du Pô (26/6, 27/7), ensuite un épisode exceptionnel de transport de poussières désertiques (29/6) et la fin de la campagne est caractérisée par l'influence du panache de Barcelone vu avec différentes échelles de temps.

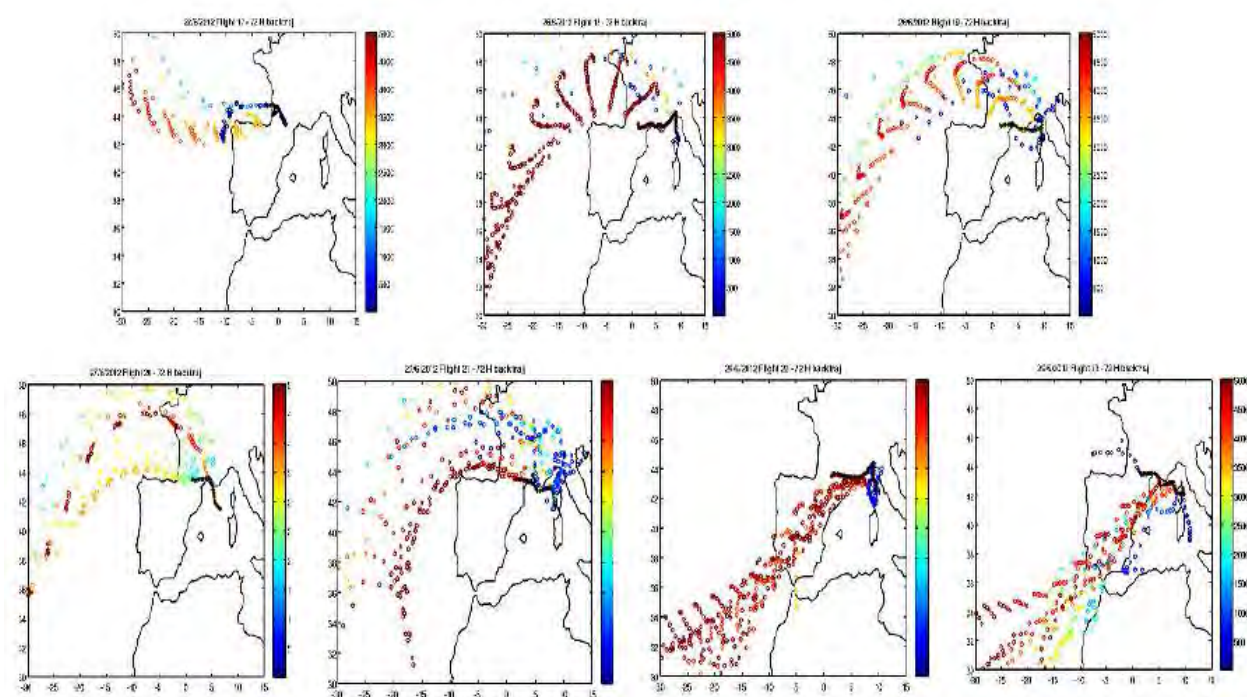


Figure II.1: Positions toutes les 6 heures des masses d'air arrivant le long des vols TRAQA du 03/7 au 13/7. Le code couleur correspond aux altitudes des masses d'air

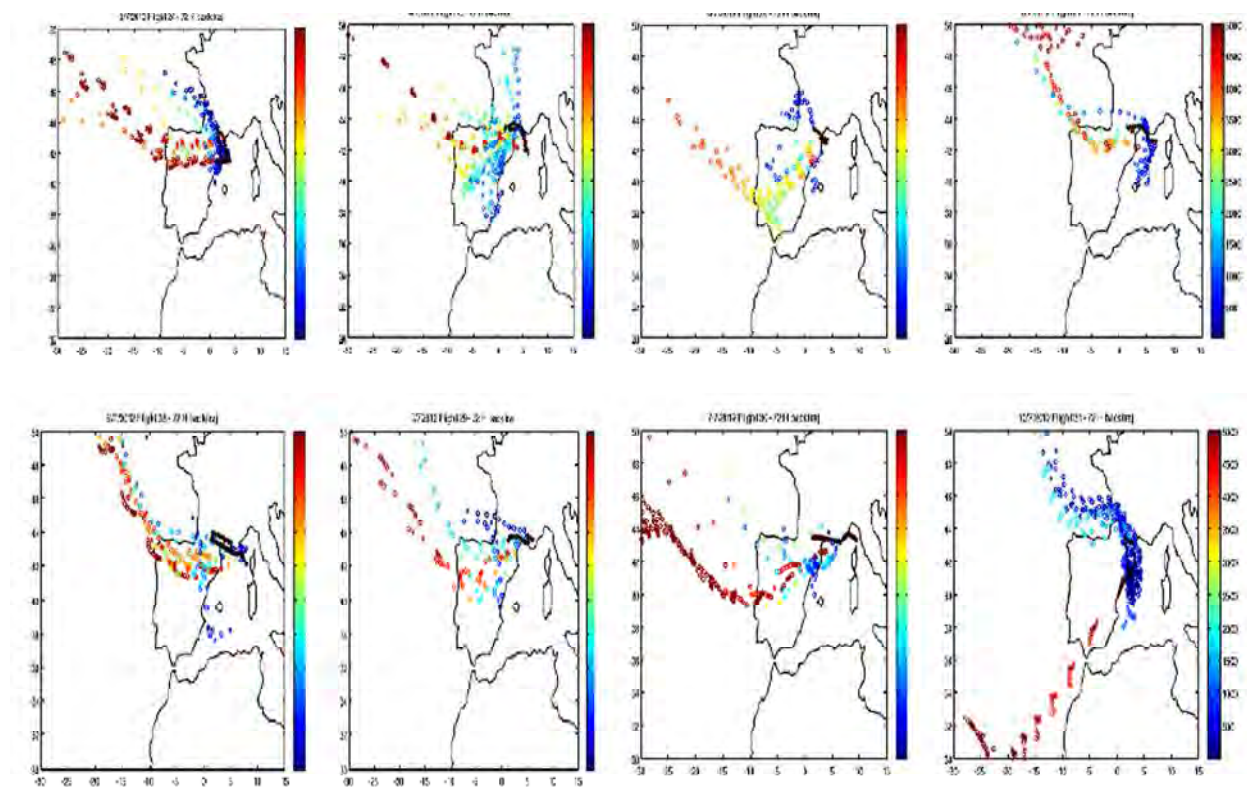


Figure II.2: Positions toutes les 6 heures des masses d'air arrivant le long des vols TRAQA du 03/7 au 13/7. Le code couleur correspond aux altitudes des masses d'air.

Ces trajectoires ont aussi été exploitées pour relier les observations avion aux mesures lidar de la mission CALIOP, et pour établir des connexions lagrangiennes entre ces deux jeux d'observations. Un exemple de connexion lagrangienne entre la coupe lidar du 29 Juin (épisode de poussières) et 6 traces CALIOP est fourni sur la **Figure II.3** et montre que les rapports de diffusion lidar observés par l'avion entre 2 et 4 km sont comparables à ceux vus par le lidar CALIOP 2 jours plus tôt sur l'Espagne.

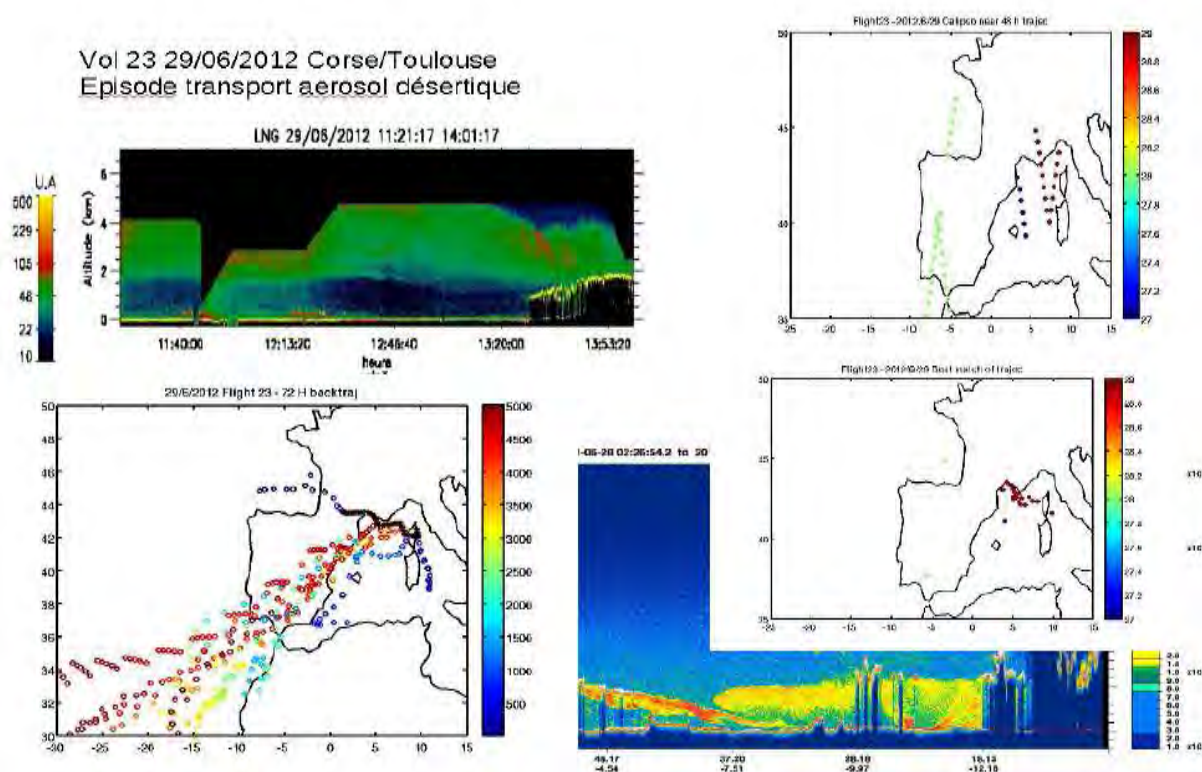


Figure II.3 : Connexion Lagrangienne entre une coupe lidar (en haut à gauche) et les traces CALIPSO (à droite) pour les trajectoires données en bas à gauche. Le coefficient de rétrodiffusion à 532 nm pour la trace CALIOP sur l'Espagne montre bien le transport de poussière désertique responsable des concentrations d'aérosols mesurées par l'avion entre 2 et 4 km.

Une analyse climatologique des observations CALIOP a aussi été conduite pendant un mois du 17/6 au 18/7 pour établir la distribution moyenne des couches d'aérosols. L'ensemble des traces et le domaine considéré est donné sur la **Figure II.4**. Un nouvel algorithme a été développé pour déterminer la distribution des aérosols à partir des niveaux 1 de CALIOP. Pour cela un masque nuage spécifique a été développé qui utilise les produits couches nuageuses de niveaux L2, les observations du radiomètre IR, et des critères spécifiques pour éviter un classement en nuage des cendres volcaniques ou bien des panache de feux de forêt. Les mesures de la campagne TRAQA seront très utiles pour valider cet algorithme. Un exemple de distribution climatologique des types d'aérosols rencontrés est donné sur la **Figure II.4** en utilisant les informations des couches d'aérosol du niveau L2 opérationnel. C'est ce type de climatologie que l'on souhaite améliorer avec les informations issues de notre méthode d'analyse des couches d'aérosols. On remarque la forte proportion de couches de poussières observées pendant l'été 2012. Il est aussi intéressant de retrouver les apports de « polluted dust » soit en altitude (transport à longue distance) soit en dessous de 3 km (apport des émissions régionales au bassin méditerranéen).

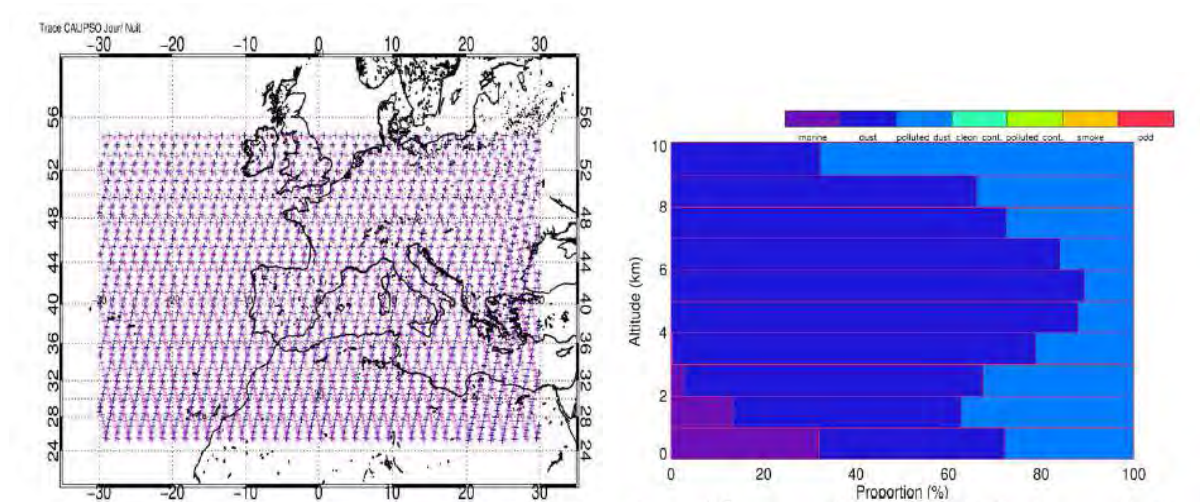


Figure II.4 Positions des profils verticaux CALIPSO disponibles avec 80 km de résolution sur le domaine étudié du 17/6 au 17/7 (à gauche) et distribution relative des principales couches d'aérosol en fonction de l'altitude (à droite).

II-2.2. Composition chimique

La composition chimique (voir **Tableau II.1**) des aérosols a été mesurée par prélèvement sur filtre et analysée à l'issue de la campagne. Les prélèvements sont effectués à partir du système aéroporté multi-instrumenté AVIRAD embarqué sur l'ATR-42, doté d'une veine de prélèvement capable d'aspirer des aérosols jusqu'à environ 12 μm en diamètre. Deux lignes de prélèvement sont utilisées pour collecter des filtres globaux ; une des lignes de prélèvement est utilisée pour étudier la composition par classe de taille en utilisant un impacteur 4-étages. Les filtres globaux sont une membrane en polycarbonate Nuclepore® (37 mm de diamètre, 0.4 μm de porosité), utilisée pour étudier la composition de la fraction non-carbonée de l'aérosol, et un filtre en fibre de quartz (Whatman) utilisé pour étudier la fraction carbonée de l'aérosol. Les impacteurs ont été utilisés avec des membranes Nuclepore® (37 mm de diamètre, 0.4 μm de porosité). Au total, nous disposons de 46 prélèvements sur filtres Nuclepore, 44 prélèvements sur filtres en quartz et 22 prélèvements sur impacteurs. Les prélèvements ont été effectués quand l'avion volait à altitude constante au sein des couches d'aérosols. Afin de bien caractériser ces couches, le temps de prélèvement était limité à environ 20 minutes. A la vitesse moyenne de vol de l'ATR-42 (93 m s⁻¹), chaque prélèvement représente environ 110 km en résolution horizontale.

Les filtres en Nuclepore® ont été analysés au LISA par plusieurs techniques: la fluorescence des rayons X à dispersion de longueur d'onde (WD-XRF) pour quantifier les concentrations élémentaires de traceurs de sources et la chromatographie ionique (IC) pour quantifier la fraction soluble. Les filtres en quartz ont été analysés toujours au LISA par technique thermo-optique (analyseur sunset) afin de quantifier les fractions organiques et élémentaires du carbone particulaire. Les impacteurs seront analysés par microscopie électronique pour étudier l'état de mélanges des concentrations en aérosols.

Les résultats d'analyse montrent une grande variabilité des concentrations selon les zones géographiques et l'altitude des couches explorées. Il est donc difficile de donner une vue unifiée de ces analyses, d'autant plus que leur interprétation n'est pas terminée. Cependant, on peut d'ores et

déjà noter que les concentrations en sulfate varient entre 1 et 3.8 $\mu\text{g m}^{-3}$ selon la zone de prélèvement. L'excellente corrélation ($R^2 = 0.82$) entre les masses de NH_4^+ et celles SO_4^{2-} indique que

les sulfates se trouvent de façon prédominante sous forme de sulfate d'ammonium. Pour certains échantillons, on peut également mettre en évidence l'influence d'émissions liées au trafic des bateaux à travers l'enrichissement en Vanadium (V). S'il est clair donc que les vols de la campagne TRAQA ont été effectués dans un milieu pollué, des différences plus subtiles liées aux caractéristiques locales des panaches explorés doivent encore être peaufinées. Ce travail sera étoffé par les observations effectuées à l'été 2013 pendant les SOP1 et SOP2 de ChArMEx-2013.

Espèces chimiques	SO_4^{2-} , NO_3 , NH_4^+ , Cl^- , Na^+ , K^+ , Ca^+ , Mg^+ , carbone organique, carbone élémentaire
Eléments chimiques	Na, Mg, Al, Si, Ca, K, S, P, Ti, Mn, Fe, Pb, Cr, V

Tableau II.1 : Espèces chimiques et éléments chimiques mesurés par la veine AVIRAD

Finalement, le Vol 23 effectué le 29 Juin 2012 a permis de caractériser un épisode de transport de poussières sahariennes. Il s'agit d'un panache très âgé ayant pénétré la Méditerranée en provenance de l'Atlantique nord –tropical (cf image satellitaire ci-contre). La couche de poussière était transportée dans la troposphère libre au-dessus de 2 km d'altitude (cf. section suivante). La composition chimique de l'aérosol collecté dans cette couche montre bien des concentrations élevées des traceurs terrigènes ($\text{Al} > 0.3\text{m}^{-3}$) et suggère, par l'enrichissement en Ca, que le panache provient de sources marocaines ou mauritaniennes. Ces résultats sont en cours de validation par comparaison avec les cartes d'émission de poussières produites dans le cadre du projet.

II-2.3. Propriétés optiques

II-2.3.1 Analyse d'ensemble

Les propriétés optiques spectrales des aérosols dans le domaine solaire ont été mesurées par un néphélomètre (TSI Inc., model 3563 ; 5-sec résolution ; coefficient de diffusion et retrodiffusion, β_s et β_{bs} , à 450, 550, et 700 nm) et par un aethalomètre (Magee Sci. Model AE31, 2-min résolution ; coefficient d'absorption, β_a , à 370, 470, 520, 590, 660, 880, et 950 nm). Les deux instruments sont connectés au système de prélèvement AVIRAD, développé spécifiquement pour la mesure des aérosols par plateforme aéroportée. Un CPC (TSI Inc., model 3775; 5 sec resolution) pour la mesure de la concentration de particules de diamètre entre 4 nm et 3 μm est également connecté à AVIRAD. La **Figure II.5** (gauche) montre le coefficient de diffusion à 450, 550, et 700 nm en fonction de l'exposant d'Ångström (α) mesuré au cours des vols TRAQA. Cette distribution permet d'identifier la répartition des panaches d'aérosols observés en fonction du type des particules et de l'intensité des événements. La distribution de gauche indique qu'en terme d'intensité (ou concentration des particules) nous avons échantillonné autant de panache de particules dominés par une fraction de taille grossière ($\alpha < 0.5$ -1.0), comme les poussières désertiques, que de panaches majoritairement composés de particules fines ($\alpha > 1.0$ -1.5), comme c'est souvent le cas pour des aérosols anthropiques. Dans tous les cas, les valeurs du coefficient de diffusion varient entre 10 et 100 Mm^{-1} et la fréquence d'occurrence de l'exposant d'Ångström (**Figure II.5**, droite) indique que les observations de panaches de pollution représentent la majorité des cas observés, plus de 50% des mesures ayant une valeur de $\alpha > 1.0$.

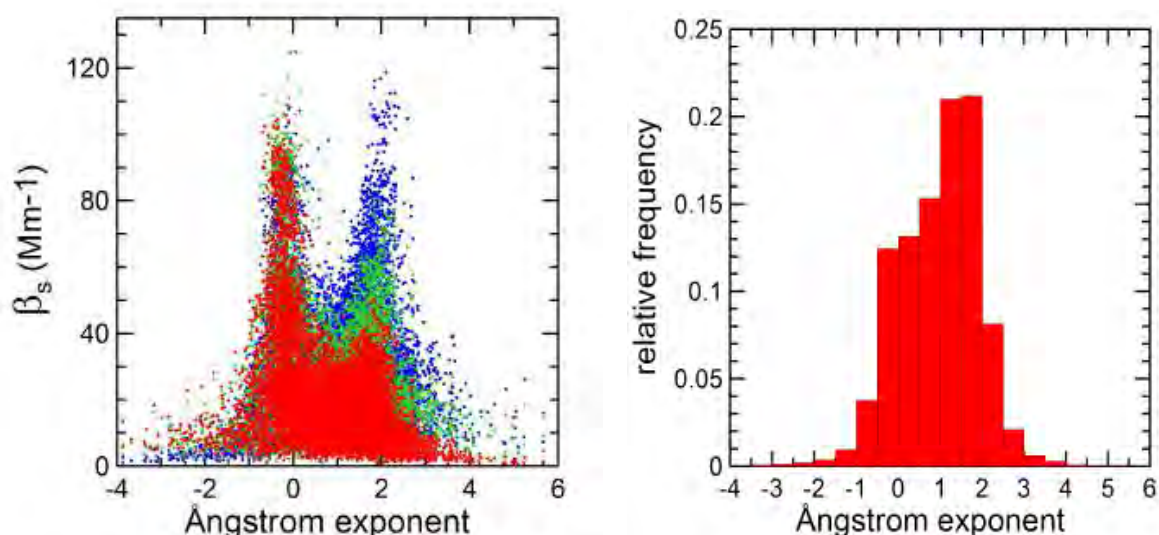


Figure II.5 : (à gauche) Coefficient de diffusion, β_s , à 450, 550, et 700 nm en fonction de l'exposant de Ångström et (à droite) fréquence d'occurrence de l'exposant d'Ångström obtenue en considérant les données pour tous les vols TRAQA (sondages et paliers).

Les séries temporelles des coefficients de diffusion et d'absorption, de la concentration des particules, et des rapports de mélange de CO et O₃ mesurés lors des différents paliers dans des couche d'aérosols, sont représentés sur la **Figure II.6**. A l'exception du 29 Juin, qui correspond à un événement de transport de poussières désertiques en Méditerranée, toutes les observations correspondent à des cas de pollution. Comme montré sur la **Figure II.6**, les panaches de pollution sont caractérisés par une concentration de particules relativement faible ($< 2 \cdot 10^4$ particules cm⁻³), associée à une concentration modeste de CO et O₃ (< 150 et 80 ppmv). Les différentes couches de pollution correspondent à des événements d'export depuis des zones d'émission continentales distinctes, *i.e.* la Vallée du Pô, la région de Fos-Berre et Marseille, et Barcelone. Une variabilité significative des propriétés optiques est observée pour des aérosols dans les différents cas. Cette variabilité doit être associée à la différence de propriétés physico-chimiques (composition, taille) pour des particules d'origines différentes, ainsi qu'aux divers processus de vieillissement subis par les différents panaches.

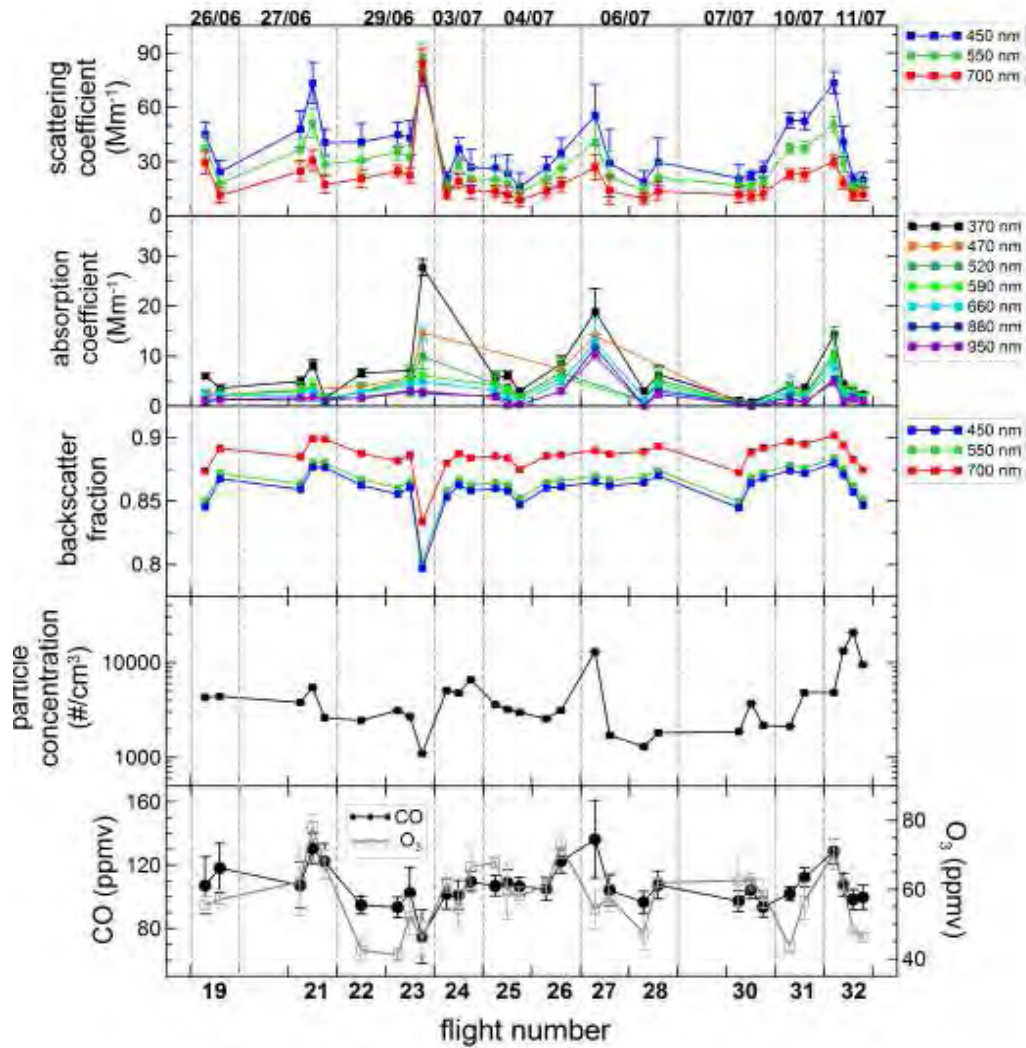


Figure II.6 : Moyenne et écart type des coefficients de diffusion et d'absorption, fraction rétro-diffusée, concentration des particules, et rapport de mélange de CO et O₃ mesurés sur les différents paliers pendant les vols de la campagne TRAQA. L'axe des x indique le numéro de vol (de 19 à 32 pour les vols V019 à V032). Chacun des points représente un palier différent.

La variabilité des propriétés optiques des aérosols est finalement bien appréhendée au travers de l'estimation de l'albédo de simple diffusion (SSA), *i.e.* du rapport entre le coefficient de diffusion et d'extinction (diffusion + absorption) des aérosols. L'albédo de simple diffusion mesure la capacité absorbante des particules (0 pour une particule totalement absorbante, 1 pour une particule entièrement diffusante). C'est un paramètre clé pour définir l'impact radiatif des aérosols. La **Figure II.7** montre l'albédo de simple diffusion calculé pour les différents événements de pollution et pour un cas de transport des poussières désertiques. L'albédo de simple diffusion varie de façon très significative à la fois en fonction de la longueur d'onde et pour les différents cas d'aérosols considérés (0.81-1.0 à 370 nm et 0.7-0.98 à 950 nm).

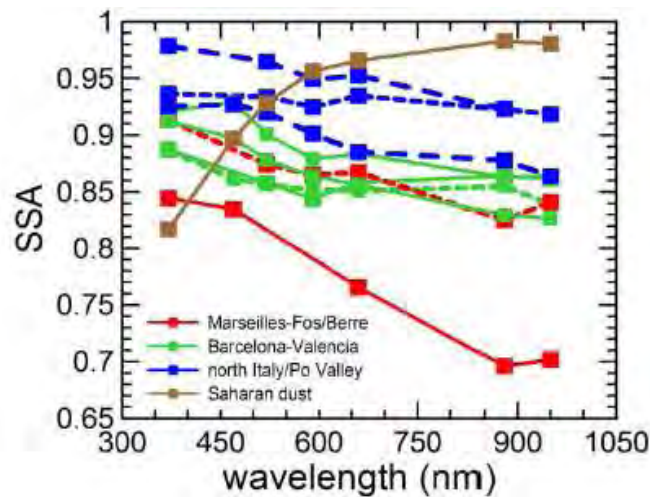


Figure II.7: Albédo de simple diffusion entre 370 et 950 nm obtenue à partir des mesures du néphélomètre et de l'aethalomètre pour des cas d'aérosols d'origine et type différents.

II-2.3.2 Synergies instrumentales et estimation du rapport lidar

On a aussi cherché à caractériser pour différentes longueurs d'ondes, l'indice de réfraction complexe des aérosols observés durant la campagne TRAQA. L'objectif étant d'une part d'approfondir la caractérisation des propriétés optiques des aérosols et surtout d'avoir un jeu de données le plus complet possible en entrée d'un code de transfert radiatif utilisé pour estimer l'impact radiatif des aérosols.

La méthode présentée ici utilise une synergie entre les mesures des instruments in-situ et les mesures lidar quasi co-localisées. Les résultats présentés dans ce rapport correspondent à 2 cas d'études d'aérosols observés au même endroit (au Nord-Ouest de la Corse) mais lors de journées différentes. Durant le vol 21, des aérosols de pollution urbaine de la Vallée du Pô ont été observés dans la couche limite atmosphérique ; durant le vol 23, des aérosols de poussières désertiques du Sahara ont été observés au dessus de la couche limite à 2 km d'altitude.

Les instruments in-situ donnent la distribution en taille des aérosols avec un PCASP, les coefficients de diffusion des aérosols (à 450, 550 et 750nm) avec un néphélomètre TSI et le coefficient d'absorption et albédo de diffusion simple des aérosols (à 520, 590, 660, 880, 950 nm) avec un aethalomètre Magee. Le lidar mesure le profil de rétrodiffusion atténué (« beta-atténué » : β_{att}) pour différentes longueurs d'onde, en particulier dans le vert à 532 nm.

La méthode utilisée pour obtenir l'indice de réfraction des aérosols pour la longueur d'onde du lidar (532 nm), est une méthode de fermeture optique, qui nécessite la connaissance du profil vertical du rapport lidar $P(z)$ et de l'albédo de diffusion simple (ω_0) des couches d'aérosols. L'albédo de diffusion simple est obtenu par interpolation des données in-situ dans la longueur d'onde du lidar. Le paramètre $P(z)$ est obtenu grâce à la méthode LI-Ex développée pour la campagne TRAQA.

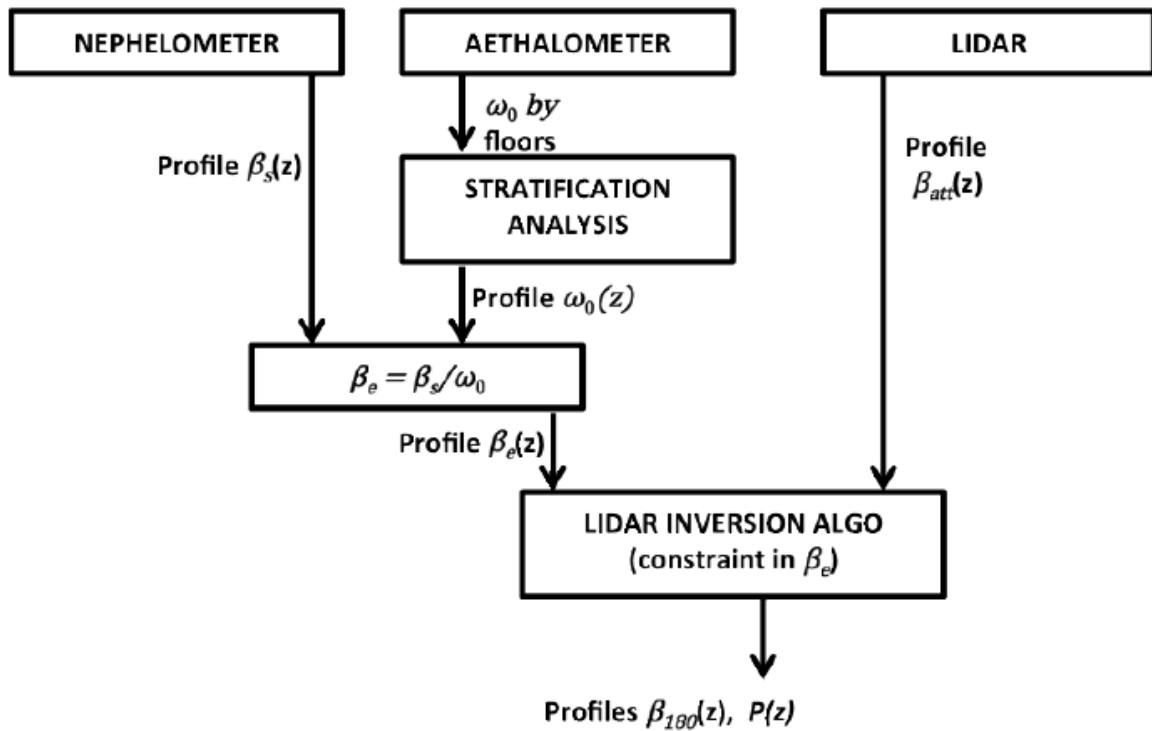


Figure II.8 : Schéma explicatif de la méthode LIExl permettant d’obtenir le profil vertical du rapport lidar ($P(z)$ en sr) grâce à la mesure lidar du « beta-atténué » (β_{att} en $m^{-1}sr^{-1}$) et aux mesures in-situ du coefficient d’extinction (β_e en m^{-1}).

La méthode LI-Ex consiste à calculer le profil vertical du rapport lidar $P(z)$ en contraignant l’algorithme d’inversion lidar (de Klett) avec le coefficient d’extinction ($\beta_e(z)$ en m^{-1}) des aérosols (**Figure II.8**). Le coefficient d’extinction s’obtient de la mesure du coefficient de diffusion (β_s en m^{-1}) par le néphélomètre et de la mesure de l’albédo de diffusion simple des aérosols (ω_0 , sans unité). L’algorithme de Klett sous contrainte a donc comme entrée le profil vertical de $\beta_e(z)$, et le profil vertical de $\beta_{att}(z)$ (i.e. la mesure lidar) et en sortie, le profil vertical du rapport lidar $P(z)$.

Pour les deux vols étudiés, on trouve un rapport lidar de 34.2 sr pour l’aérosol de pollution urbaine et 43 sr pour l’aérosol désertique. Afin de vérifier la justesse des valeurs obtenues pour le rapport lidar, on utilise l’algorithme de Klett standard en utilisant en entrée la mesure lidar $\beta_{att}(z)$ et le rapport lidar obtenu par LIExl homogène dans les différentes couches d’aérosols, et ayant comme sortie le coefficient d’extinction des aérosols $\beta_e(z)$. La **Figure II.9** compare le $\beta_e(z)$ ainsi obtenu avec le lidar au $\beta_e(z)$ obtenu à partir des mesures in-situ, pour les cas des vols 21 et 23.

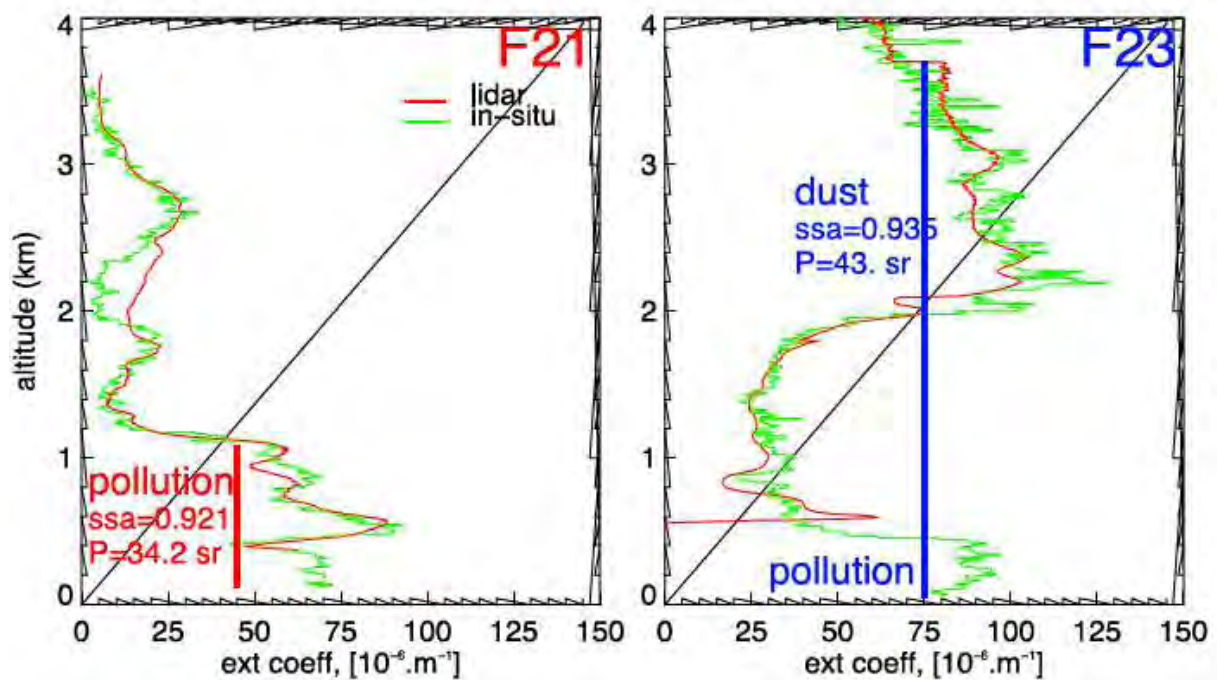


Figure II.9 : Comparaison du coefficient d'extinction (en rouge, m^{-1}) des aérosols obtenus avec le lidar et le rapport lidar P obtenu avec la méthode LIExI au coefficient d'extinction (en rouge, m^{-1}) des aérosols obtenus avec les mesures in-situ, interpolés à la longueur d'onde du lidar (532 nm). A gauche le vol 21 (F21) et à droite le vol 23 (F23).

II-2.3.3 Fermeture optique pour l'estimation des valeurs de l'indice de réfraction complexe.

Connaissant le rapport lidar $P(z)$ et l'albédo de diffusion simple (ω_0), on peut grâce à une méthode de fermeture optique proche de celle utilisée par *Raut et Chazette (2008)*, extraire les valeurs de l'indice de réfraction complexe des aérosols. L'algorithme de fermeture optique repose sur un code de Mie (voir **Figure II.10**). Le code de Mie permet de calculer, pour un mélange de particules sphériques, l'albédo de diffusion simple (ω_0) et la fonction de phase, donc le rapport lidar (P en sr) en fonction de la distribution en taille des aérosols et de leur indice de réfraction (parties réelle $Re(n)$ et imaginaire $Im(n)$).

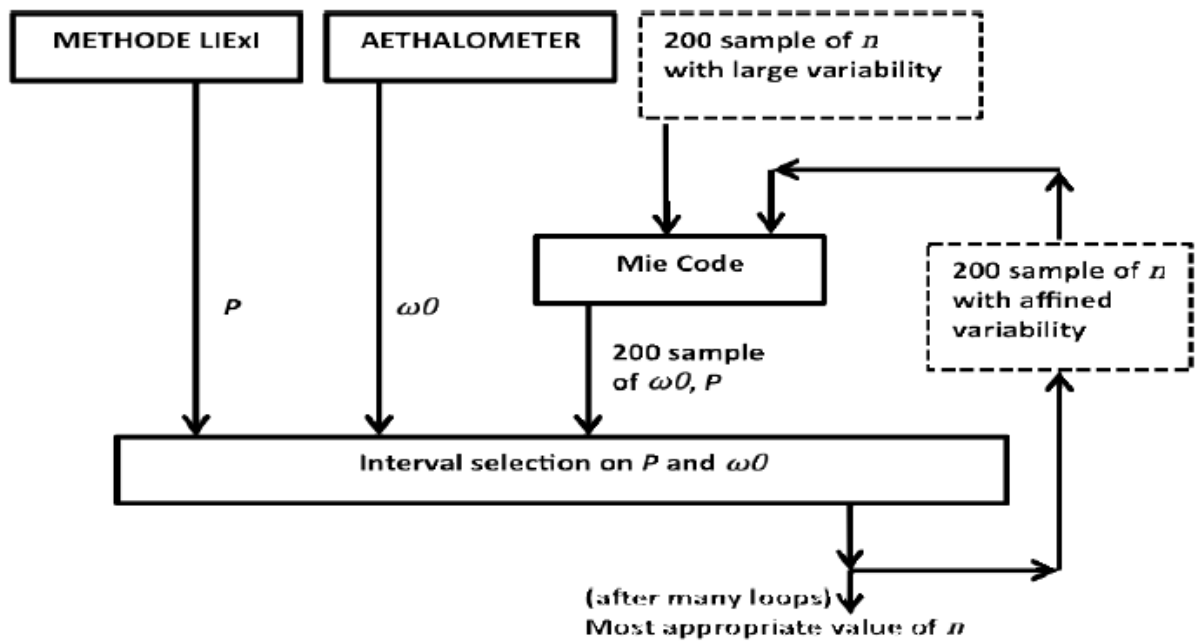


Figure II.10 : Schéma explicatif de la méthode de fermeture optique pour l'obtention de l'indice de réfraction des aérosols grâce à une dichotomie à 2 dimensions sur l'albédo de diffusion simple des aérosols (ω_0) et le rapport lidar P .

Dans cette méthode de fermeture optique, on prend un large panel - 200 couples ($\text{Re}(n)$, $\text{Im}(n)$) – et la distribution en taille des aérosols fournie par l'instrument PCASP. On calcule grâce à un code de Mie l'albédo de diffusion simple et les fonctions de phases. On obtient donc un ensemble de 200 couples (ω_0 , P). On peut comparer les valeurs de ces 200 couples à la valeur de ω_0 mesurée avec les instruments in-situ et à la valeur du rapport lidar P obtenue avec LIEXI. Par « dichotomie à deux dimensions » on peut affiner étape par étape les valeurs de nouveaux jeux de 200 couples ($\text{Re}(n)$, $\text{Im}(n)$), jusqu'à obtenir la valeur de l'indice de réfraction ($\text{Re}(n)$, $\text{Im}(n)$) avec certitude.

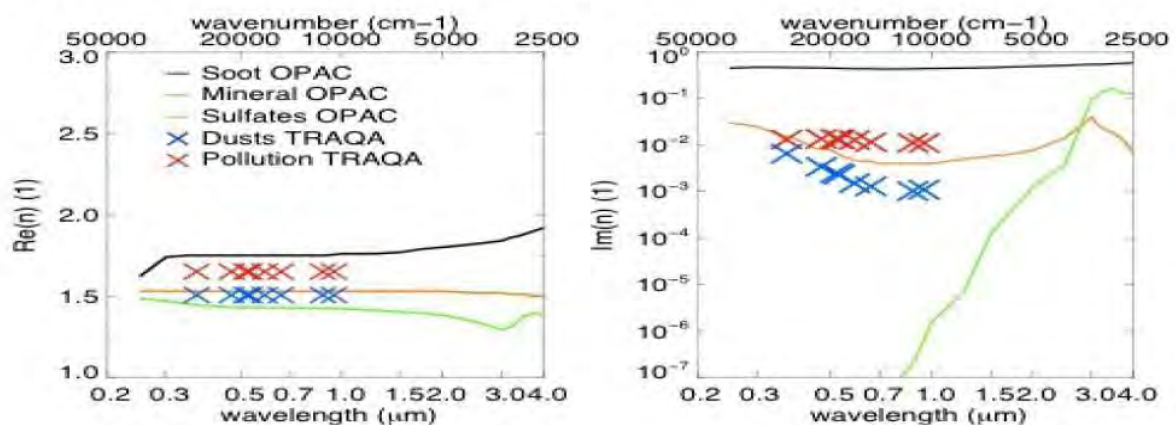


Figure II.11: Résultats de la fermeture optique : indices de réfractons (n - gauche : partie réelle, droite : partie imaginaire) pour l'aérosol de poussières désertiques du vol 23 (bleu) et l'aérosol de pollution urbaines du vol 21 (rouge), comparés aux valeurs des catégories standards de la base de donnée OPAC.

Les valeurs de $\text{Re}(n)$ et $\text{Im}(n)$ pour toutes les longueurs d'ondes des instruments in-situ et pour la longueur d'onde du lidar sont représentées en **Figure II.11** (bleu pour les poussières désertiques du

vol 23, rouge pour les pollutions urbaines du vol 21). Elles sont comparées aux valeurs des catégories standard de la base de donnée OPAC (Optical Properties of Aerosols and Clouds, *Hess et al. 1998*).

II-2.4 Impact radiatif

L'impact radiatif des aérosols a ensuite été évalué pour le cas des vols 21 (pollution urbaine de la vallée du Pô) et 23 (poussières désertiques du Sahara) discutés précédemment, en s'appuyant sur les valeurs trouvées lors de la fermeture optique. Une étude sur l'impact radiatif à l'échelle régionale des aérosols observés durant TRAQA est en cours.

La méthode utilisée pour estimer l'impact radiatif des aérosols est de calculer les flux radiatifs (longues ondes [4000 – 20000 nm] et courtes ondes [200 – 4000 nm], en W.m^{-2}) à différentes altitudes de l'atmosphère grâce à un code de transfert radiatif. De ces flux, on peut extraire le bilan énergétique par couche d'atmosphère (profil vertical du forçage radiatif ou Heating Rates – HR en K.day^{-1}) et le bilan radiatif de tout l'atmosphère (forçage radiatif instantané des aérosols à la surface, au sommet de l'atmosphère et de tout l'atmosphère - Instant aerosol radiative forcing: F en W.m^{-2}).

Le code de transfert radiatif utilisé est le code MOMO (*Matrix Operator Model- Fell and Fischer 2001, Doppler et al. 2013-14*) de la Freie Universität Berlin. C'est un code qui utilise la méthode des opérateurs matriciels et de Adding-Doubling pour simuler la diffusion simple et multiple. Le calcul des larges bandes spectrales nécessaires à ce type d'étude est facilité par l'utilisation d'une méthode de « k-distribution without correlation approximation » (*Doppler et al. 2014, Bennartz and Fischer 2000*), qui permet de réduire le temps de calcul sans gâcher la précision des calculs spectroscopiques à haute résolution.

On doit informer en entrée de MOMO les propriétés microscopiques des aérosols, à savoir l'indice de réfraction pour le plus de longueurs d'onde possibles ($\text{Re}(n)$, $\text{Im}(n)$) et la distribution en taille des particules. Le niveau d'exactitude des calculs de MOMO dépend de la qualité et de la résolution spectrale avec laquelle on documente les paramètres d'entrées, en particulier les valeurs de l'indice de réfraction des aérosols ($\text{Re}(n)$, $\text{Im}(n)$), ce qui justifie l'effort réalisé et présenté précédemment avec la méthode de fermeture optique.

Les résultats obtenus avec MOMO pour le profil vertical des taux de chauffage des aérosols et des forçages radiatifs instantanés (sommet de l'atmosphère : TOA, Surface de la mer : Surf, bilan de tout l'atmosphère : Atmo) sont illustrés sur la **Figure II.12**. Les calculs ont été faits pour un angle zénithal solaire de 30° (valeur à midi en été à cette latitude). Sur le graphe de gauche on observe le cas des aérosols de pollution urbaine de la vallée du Pô se trouvant dans la couche limite atmosphérique, sur le graphe de droite, les aérosols de poussières désertiques du Sahara dans une couche atmosphérique à environ 2 km d'altitude.

On constate que seul l'aérosol désertique a un impact en grande longueurs d'ondes (infrarouge thermique : LW = [4000 – 20000 nm]), dû à une taille de particule plus élevée que celle de l'aérosol de pollution urbaine. Les valeurs obtenues montrent une efficacité radiative (forçage divisé par l'épaisseur optique) similaire aux valeurs obtenues pour des aérosols de même type lors d'études précédentes (*Di Biagio et al. 2009, 2010, Di Sarra et al. 2010*).

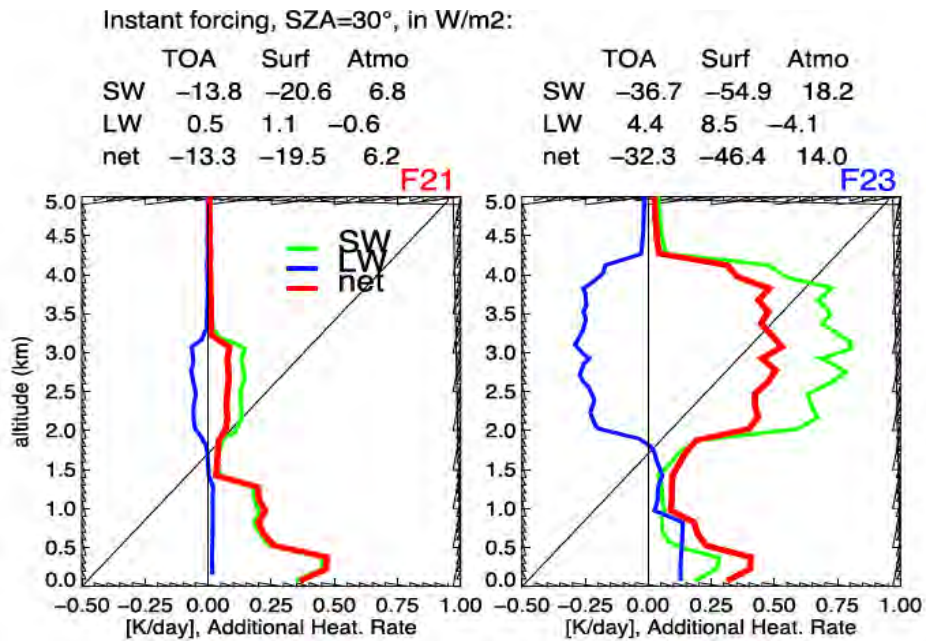


Figure II.12 : Taux de chauffage additionnels dus aux aérosols (courtes ondes [200 - 4000 nm] : SW, longues ondes [4000 – 20000 nm] : LW et complet [200 – 20000 nm] : net), et les forçages radiatif instantanés des aérosols pour le sommet de l’atmosphère (TOA), la surface de la mer (Surf) et tout l’atmosphère (Atmo) pour les vols 21 (gauche) et 23 (droite).

II.3 Mesures des aérosols par sondage (LOAC sous ballon)

La campagne TRAQA a été l’occasion de tester le nouveau compteur optique de particules LOAC (Light Optical Particle Counter) développé avec le soutien de l’ANR/Ecotech (Projet LOAC, févr. 2010-août 2013, PI J.B. Renard, LPC2E) pour des mesures sous ballon. L’instrument développé en partenariat avec l’entreprise Environnement S.A. et le CNES pour son intégration sous ballon léger dilatable, a donc été testé pendant la phase ballon TRAQA en version radio-sondage (**Figure II.13**). Le principe de mesure de LOAC consiste en une mesure in situ de diffusion à deux angles différents des photons émis par une diode laser. L’un des angles proches de la diffusion avant où la granulométrie contrôle la diffusion est étalonné pour restituer la distribution en taille des particules sur une vingtaine de canaux entre quelques dixièmes à plusieurs dizaines de microns de diamètre. L’autre angle de mesure, plus latéral, est sensible à la nature des particules et le rapport de comptage entre les deux canaux de l’instrument fournit une information sur le type d’aérosols dominant dans différentes classes de taille, avec en particulier une bonne capacité à distinguer le carbone-suie, les poussières minérales, et les particules aqueuses. La **Figure II.13** illustre l’instrument et sa nacelle prête au lancement.

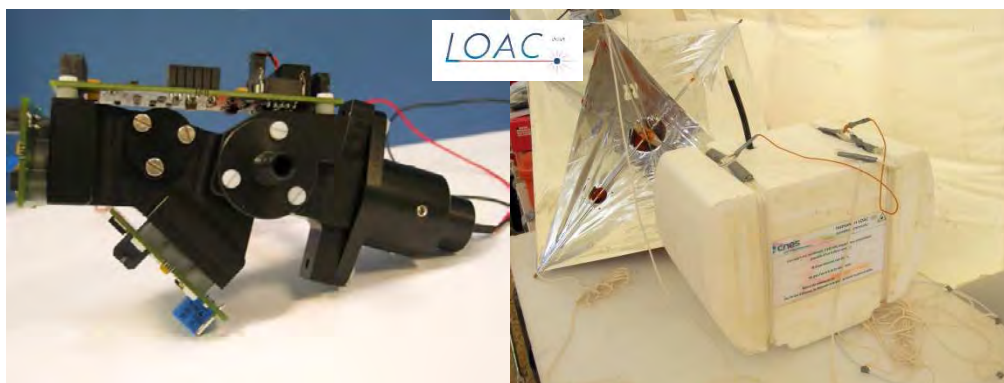


Figure II.13: Cellule de mesure du LOAC (à gauche ; photo ENVIRONNEMENT S.A.) avec la source lumineuse à droite, l'orifice d'écoulement de l'air perpendiculairement au faisceau au centre, et les deux modules de détection à gauche ; radiosonde LOAC dans son emballage (à droite ; photo francois.dulac@cea.fr) prêt au lancement avec un réflecteur aluminisé également présent dans la ligne suspendue sous le ballon.

Trois radiosondages embarquant un granulomètre LOAC ont pu être effectués sur alerte à partir de la base provisoire de lancement de ballons du CNES installée sur la côte méditerranéenne au sud de Martigues (voir **Figure II.14**, **II.15** et **II.16**). Deux sondages ont été effectués le 29 Juin à 08 :06 et 12 :25 TU (au plus près des passages de l'ATR-42 compte tenu des autorisations de lâcher des ballons données par l'aviation civile) lors d'un épisode de transport de poussières sahariennes, et le troisième le 6 juillet à 12 :00 TU lors d'un épisode de mistral avec de faibles quantités d'aérosols (à l'aide d'un LOAC récupéré d'un lancement du 29 juin).

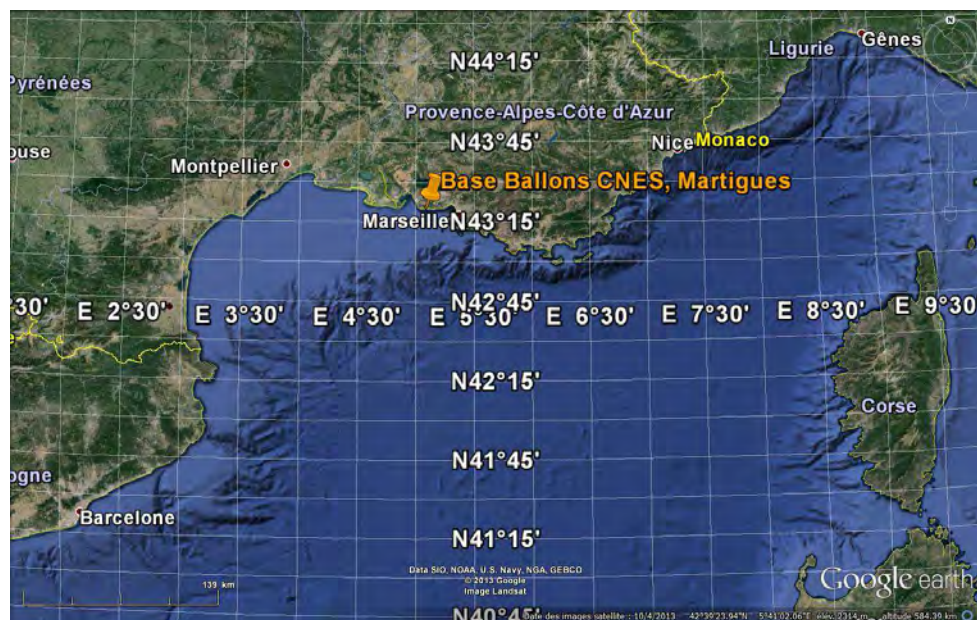


Figure II.14: Localisation de la base de lancement de ballons sur la côte à Martigues (43°19'57"N, 5°5'14.00"E) à quelques km au sud du complexe industriel de Fos-Berre et à une vingtaine de km à l'ouest de Marseille.



Figure II.15: Base de lancement de Ballons CNES déployée au sud de Martigues près de Sausset-les-Pins pendant la campagne TRAQA (photo francois.dulac@cea.fr).

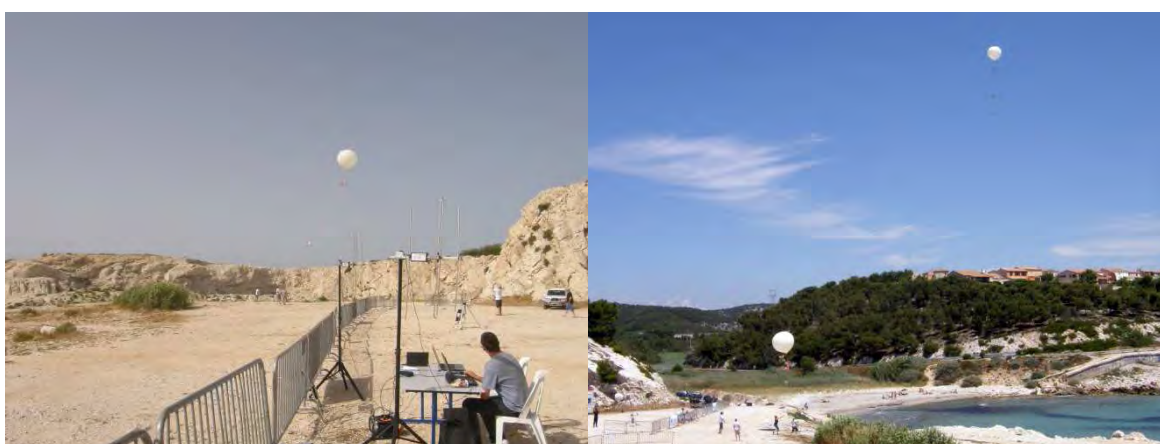


Figure II.16 : Lancement du premier ballon-sonde LOAC du 29 juin 2012 avec la station de réception au premier plan (à gauche) et du lancement d'1 radiosondage LOAC et d'un radiosondage O3 le 6 juillet 2012 à 12h TU (à droite) (photo francois.dulac@cea.fr)

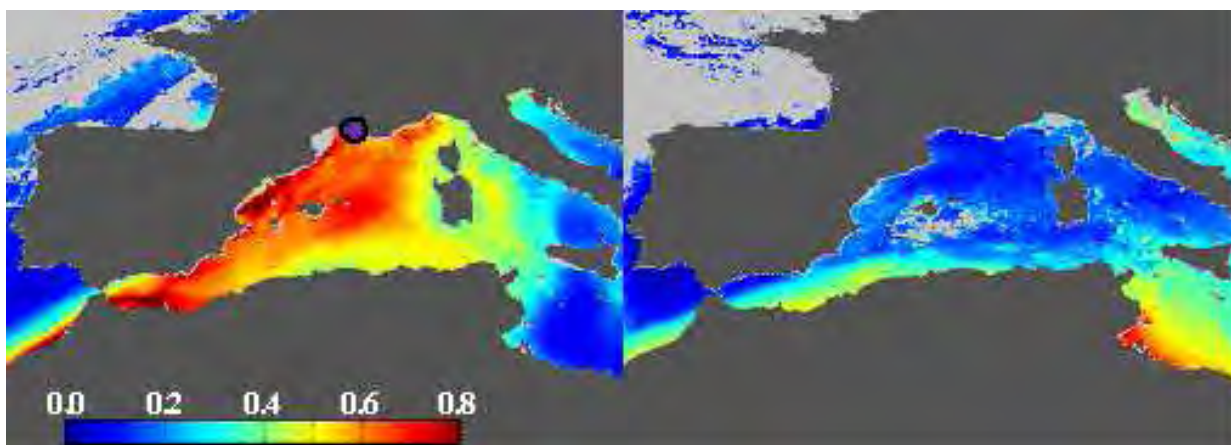


Figure II.17 : Produit d'épaisseur optique en aérosols à 550 nm déduit de MSG/SEVIRI par ICARE, en moyenne journalière le 29 juin 2012 (à gauche) et le 6 juillet (à droite). La position des radiosondages est indiquée par le point violet sur la figure de gauche. Dans le cas des poussières sahariennes, une épaisseur optique de 0.8 correspond à une concentration intégrée verticalement d'environ 1 g. m^{-2} .

Le 29 juin, les résultats (**Figure II.18**) montrent la présence d'une couche turbide en altitude, s'étendant entre environ 1,5 et 5 km d'altitude, avec une diminution des concentrations dans cette couche entre les deux sondages (environ 8 h et 12h30 TU). L'indice de nature des particules montre des particules très hydratées au niveau du sol ce qui peut être dû à la présence d'embruns puisque les lâchers avaient lieu en bord de mer, une évolution progressive vers des particules fines plutôt carbonées dans la couche limite, et des particules de type poussières minérales entre 1,7 et 5 km d'altitude.

Les mesures indiquent la présence de très grosses particules minérales éoliennes, jusqu'à plus de 30 μm de diamètre, dans la couche saharienne en altitude, qui vont constituer une fraction importante de la masse transportée, et donc re-déposée sur les surfaces marines et continentales. On voit que cette fraction n'est pas observée en surface. Elle est impossible à quantifier à partir des prélèvements sur filtre en avion du fait du diamètre de coupure de quelques microns des systèmes de prélèvement embarqués, et elle se retrouve de façon à peu près homogène sur toute l'épaisseur ($> 3 \text{ km}$) de la couche saharienne bien que la sédimentation gravitationnelle ($\sim 3600 \text{ m/j}$ pour une poussière de 20 μm) aurait dû les redistribuer vers le bas de façon significative après plusieurs jours de transport. Ces très grosses particules ne sont généralement pas prise en compte par les modèles du fait que la paramétrisation des flux d'émissions est la plupart du temps validée sur la fraction inférieure à 20 μm , et elle pose un problème de modélisation puisqu'il faut reproduire des mécanismes s'opposant à leur sédimentation pour les transporter à grande distance.

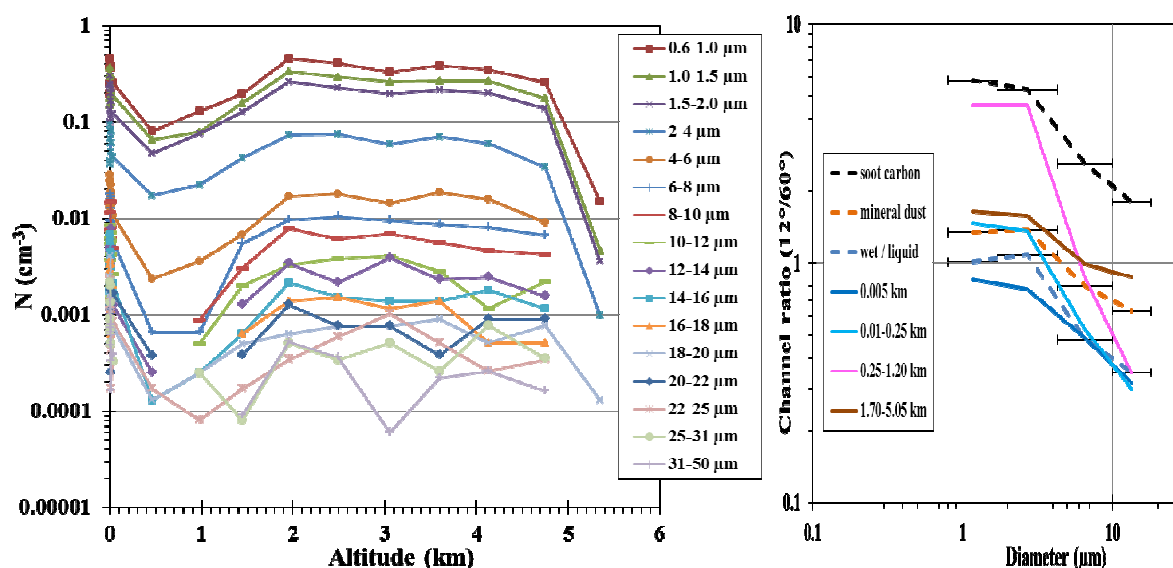


Figure II.18: Concentration en particules dans les différentes classes de taille en fonction de l'altitude (à gauche) et leur spéciation dans 4 couches depuis le sol jusqu'à 5 km (à droite) pour le radiosondage du 29 juin à 8 h TU. Les courbes en pointillés indiquent les indicatrices types obtenues en laboratoire pour différentes nature de particules.

Les résultats prometteurs obtenus lors de cette campagne ont permis de convaincre Environnement SA de développer une version du LOAC pour radiosondage en partenariat avec MétéoModem qui commercialise désormais une version de sa radiosonde couplée avec un LOAC et une quinzaine ont été lancées pendant la grande campagne ChArMEx 2013 (financement CNES et ADEME-MISTRALS). Ce développement permet de disposer d'un instrument pour effectuer des mesures sur alerte en cas d'épisode de forte turbidité en altitude (explosion volcanique par ex.) ainsi que pour des mesures de suivi temporel de fond.

II.4 Modélisation des cas d'études

II.4.1. Poussières sahariennes

Le 29 Juin 2012 est un cas remarquable de transport de poussières désertiques sur la mer Méditerranée et l'Europe. La **Figure II.19** montre l'épaisseur optique (valeur représentant la quantité d'aérosols intégrée sur une colonne atmosphérique) mesurée par l'instrument SEVIRI à bord du satellite MSG. On observe un panache d'aérosols s'étendant des côtes marocaines à l'Allemagne, en passant par l'Espagne, la France, le golfe du Lion et une partie de l'Italie. Ce panache a pu être mesuré pendant la campagne TRAQA par les vols 22 et 23 de l'ATR42, par des ballons lancés depuis Sausset-les-Pins, et par des mesures au sol (lidars, photomètres).

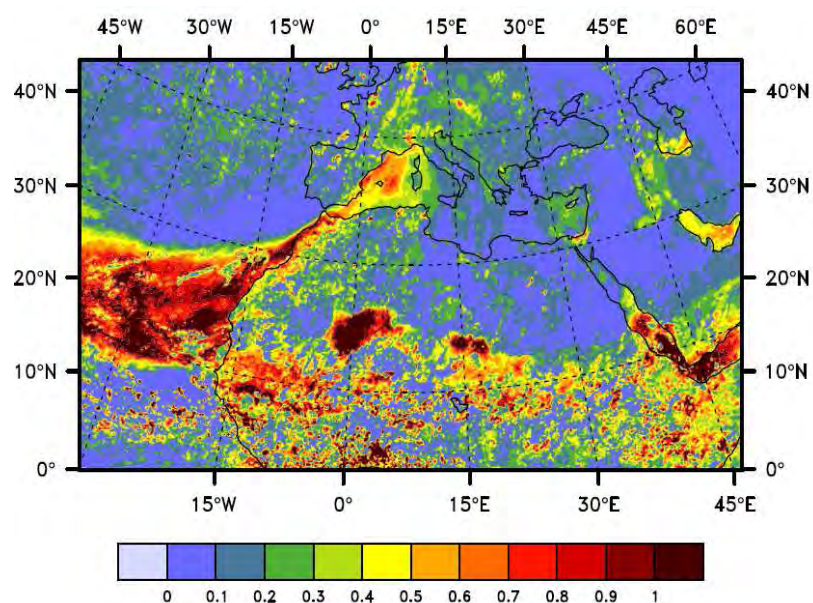


Figure II.19 : Épaisseur optique mesurée par SEVIRI Le 29/06/2012 (produit AERUS-GEO, Carrer et al., 2010)

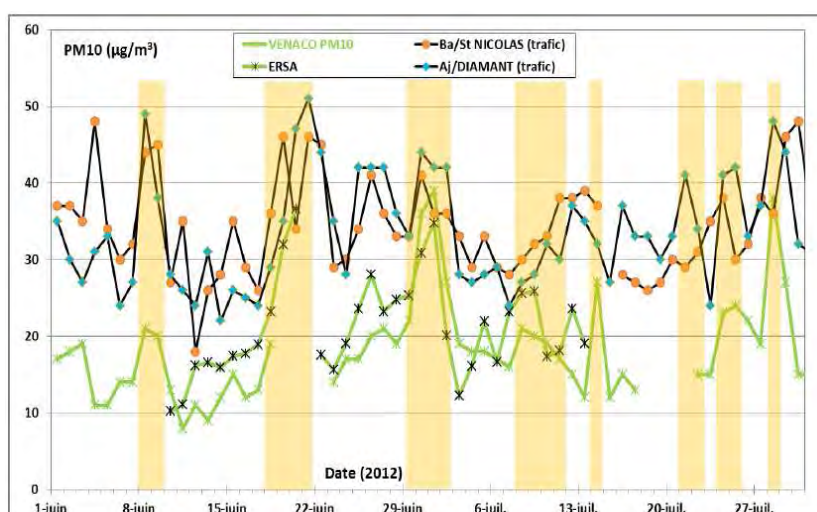


Figure II.20: Concentration quotidienne moyenne en PM10 aux stations de surface d'Ersa (ChArMEx), Venaco, Bastia et Ajaccio (Qualitair Corse) pendant l'été 2012. La présence de poussières désertiques (MSG/SEVIRI) est indiquée en jaune (Dulac et al., 7th Int. Dust Workshop, Frascati, 2013)

De plus, les observations en Corse ont montré que l'été 2012 a été une saison particulièrement riche en épisodes de transport de poussières désertiques. La **Figure II.20** montre que ces événements détectés par satellite au-dessus de la Corse ont eu un impact significatif sur les teneurs en PM₁₀ à la surface relevées à la fois à la station de fond ChArMEx à Erba au Cap Corse (dans le cadre de la Convention ADEME-CEA n°1162c0004) mais également aux stations urbaines de Bastia de Qualitair Corse, y compris dans la station représentative du trafic routier. La plupart des pics approchant la valeur limite journalière en PM₁₀ sont associés au passage d'un panache saharien. Du fait de cette fréquence inhabituelle d'événements et de l'occurrence fin juin d'un épisode particulièrement intense, il a été décidé de mettre à profit la grande quantité d'observations obtenues pendant la campagne TRAQA pour organiser un exercice d'inter-comparaison de modèles régionaux de transport de poussières sahariennes, portant à la fois sur l'ensemble de l'été 2012 et sur cet épisode du 29 juin 2012.

Modèle (forçage)	Institution	Résolution spatiale	Schéma d'émission
ALADIN-Dust (ARPEGE)	CNRM-GAME	24 km x 24 km x 70 niveaux	MB95
CHIMERE-Dust (WRF)	LISA, LMD et INERIS	0.25° x 0.25° x 15 niveaux	MB95, AG01
MESO-NH (ARPEGE)	Laboratoire d'Aérodologie	15 km x 15 km x 48 niveaux	Z03, AG01
MOCAGE (ARPEGE)	CNRM-GAME	0.5° x 0.5° x 47 niveaux	MB95
NMMB/BSC-Dust (NMMB)	BSC-Barcelone Super Computer	0.25° x 0.25° x 40 niveaux	MB95
BSC-DREAM8b v2 (ETA)	BSC-Barcelone Super Computer	0.33° x 0.33° x 24 niveaux	S93
RegCM-Dust (ERA-INTERIM)	Laboratoire d'Aérodologie	25 km x 25 km x 23 niveaux	MB95
ALADIN-CCM (ERA-INTERIM)	CNRM-GAME	50 km x 50 km x 31 niveaux	MB95
COSMO-MUSCAT (COSMO)	Leipzig Institute for Tropospheric Research	14 km x 14 km x 41 niveaux	MB95

Tableau II.2 : Liste des modèles participant à l'exercice d'inter-comparaison des poussières désertiques pendant la campagne TRAQA

Le **Tableau II.2** présente la liste des modèles, leur résolution ainsi que le type d'émission utilisé, participant à cet exercice, faisant intervenir à la fois des modèles de chimie-transport et des modèles couplés chimie-climat. Certains d'entre eux partageant le même forçage météo ou le même schéma d'émission. Le but est d'évaluer la capacité de ces modèles à reproduire non seulement l'épaisseur optique des aérosols désertiques, mais aussi leur émission, leur transport, leur concentration et leur dépôt. Ainsi, ALADIN-DUST est le modèle de prévision opérationnel de Météo-France auquel a été ajouté un schéma de poussières désertiques (3 modes selon des distributions lognormales) incluant émission, transport, dépôt et effet radiatif direct (Mokhtari et al., 2012). Le modèle Chimere-Dust est un modèle de chimie-transport comprenant un schéma de poussières désertiques (12 bins) (Menut et al., 2013). MESO-NH est un modèle non hydrostatique incluant un schéma de poussières désertiques (3 modes selon des distributions lognormales) (Chaboureaud et al., 2011). MOCAGE a été

décrit dans le paragraphe 1.3.5.1. Le modèle NMMB/BSC-Dust est un modèle de transport incluant un schéma de poussières désertiques (8 bins) (Perez et al., 2011). BSC-DREAM8b est un modèle de transport incluant un schéma de poussières désertiques (8 bins) (Basart et al., 2012). RegCM-Dust est un modèle régional de climat incluant un schéma de poussières désertiques (4 bins) avec leurs effets radiatifs (Giorgi et al., 2012). ALADIN-CCM est le modèle régional de climat incluant un schéma de poussières désertiques (3 bins) avec leurs effets radiatifs (Nabat et al., 2014). Enfin COSMO-MUSCAT est un modèle régional de climat incluant un schéma de poussières désertiques (5 bins) avec leurs effets radiatifs (Heinold et al., 2011).

Le **Tableau II.3** décrit les statistiques obtenues sur les épaisseurs optiques entre les différents modèles et les observations faites par les photomètres du réseau AERONET sur quatre villes méditerranéennes pendant la campagne TRAQA (en particulier pendant l'épisode de poussières désertiques): Barcelone, Palma de Majorque, Lampedusa et Avignon. En général, les coefficients de corrélation sont supérieurs à 0.6 pour atteindre 0.88 pour la majorité des modèles, sauf pour RegCM-Dust qui est en fait un modèle de climat et donc pas adapté à ce type de comparaison sur des périodes si courtes. De même, le biais (MB) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE) sont relativement faibles. Ces résultats montrent de façon générale le très bon comportement des différents modèles utilisés pour cette campagne.

MODELES	Barcelone			Palma de Mallorca			Lampedusa			Avignon		
	r	RMSE	MB	r	RMSE	MB	r	RMSE	MB	r	RMSE	MB
ALADIN-Dust	0,76	0,15	-0,02	0,83	0,16	-0,08	0,76	0,13	-0,03	0,83	0,09	-0,01
BSC-DREAM8b v2	0,60	0,18	-0,01	0,83	0,16	-0,08	0,78	0,13	-0,03	0,82	0,09	-0,01
CHIMERE	0,85	0,13	-0,04	0,77	0,18	-0,11	0,63	0,18	-0,11	0,87	0,09	-0,04
MESO-NH	0,81	0,13	-0,03	0,86	0,13	-0,06	0,78	0,12	-0,03	0,83	0,09	-0,03
MOCAGE	0,70	0,18	-0,05	0,69	0,20	-0,12	0,76	0,16	-0,09	0,72	0,11	-0,03
NMMB_BSC-Dust	0,84	0,16	-0,07	0,79	0,19	-0,12	0,85	0,15	-0,10	0,83	0,11	-0,05
RegCM-Dust	0,17	0,26	0,05	0,44	0,21	-0,00	0,38	0,20	-0,01	0,48	0,14	0,02
MEDIAN	0,82	0,15	-0,05	0,88	0,17	-0,11	0,87	0,14	-0,08	0,88	0,10	-0,04

Tableau II.3 : Correlations, écart type et biais entre les épaisseurs optiques des différents modèles et les mesures obtenues pendant la campagne TRAQA par les photomètres AERONET (Basart et al., 2014, AMA, Toulouse)

De plus, la **Figure II.21** présente la moyenne sur l'été 2012 de l'épaisseur optique simulée par les différents modèles ainsi que les observations satellite MISR. Bien que chacun des modèles montre un maximum sur le Sahara, on constate des différences importantes dans l'intensité et l'étendue spatiale des poussières désertiques. Il est à noter que les valeurs non nulles de MISR sur l'Europe sont probablement dues à la présence d'autres types d'aérosols, non présents dans ces simulations.

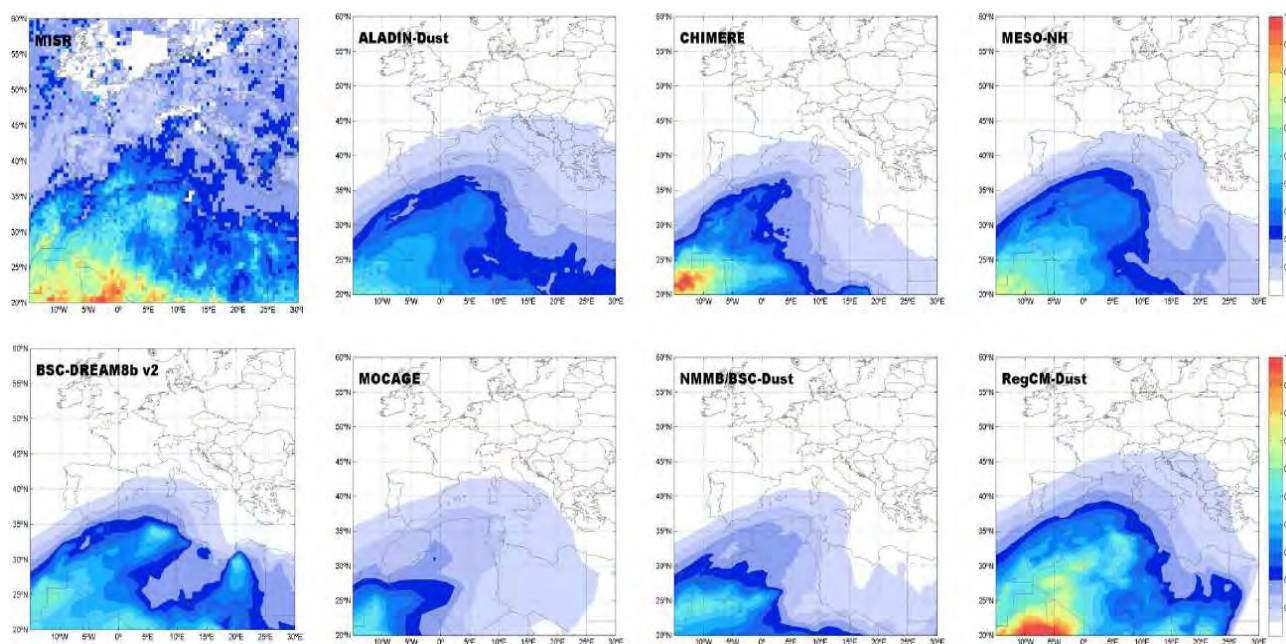


Figure II.21: Épaisseur optique moyenne de l'été 2012 (juin-juillet-août) simulée par différents modèles et mesure par le radiomètre MISR (Basart et al., Ateliers de modélisation de l'atmosphère, 22 janvier 2014, Toulouse)

Les moyennes quotidiennes d'épaisseur optique peuvent également être comparées aux observations des stations du réseau AERONET, comme à Majorque (**Figure II.22**). Les valeurs du coefficient d'Angström (AE) inférieures à 0.75 permettent d'identifier les jours marqués par des passages d'aérosols désertiques. Même si à nouveau une dispersion importante peut être notée, la plupart des modèles parviennent à reproduire les pics associés d'épaisseur optique (comme celui de la campagne TRAQA fin juin). La corrélation médiane des modèles avec les observations à Majorque est ainsi élevée (0.88), l'écart quadratique moyen (0.17) et le biais moyen (-0.11) relativement faibles. Ce biais pourrait d'ailleurs être attribué à l'absence des autres types d'aérosols (sulfates, sels marins, ...) dans ces simulations.

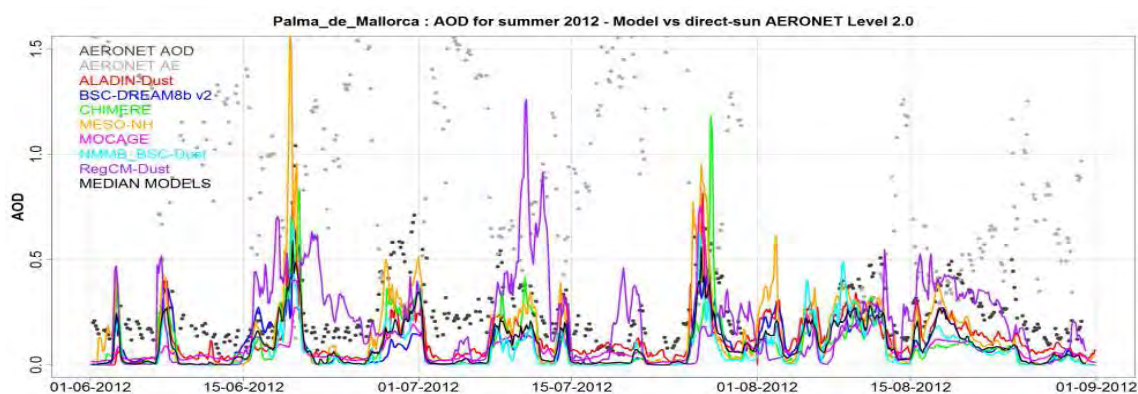


Figure II.22 : Série quotidienne de l'épaisseur optique (juin-juillet-août 2012) à Palma de Majorque simulée par différents modèles (courbes colorées) et mesurée par le photomètre AERONET (points gris foncés). Le coefficient d'Angström (AE) est indiqué par des points gris clairs. (Basart et al., Ateliers de modélisation de l'atmosphère, 22 janvier 2014, Toulouse)

En ce qui concerne l'épisode de fin juin 2012 mesuré pendant la campagne TRAQA, la **Figure II.23** présente l'épaisseur optique de différents modèles ainsi que celle du radiomètre SEVIRI. Comme précédemment, on constate que la plupart des modèles arrivent à simuler un panache réaliste d'aérosols en terme de distribution spatiale, s'étendant des côtes marocaines à l'Allemagne, mais avec de grandes différences d'intensité, et une sous-estimation générale des fortes valeurs.

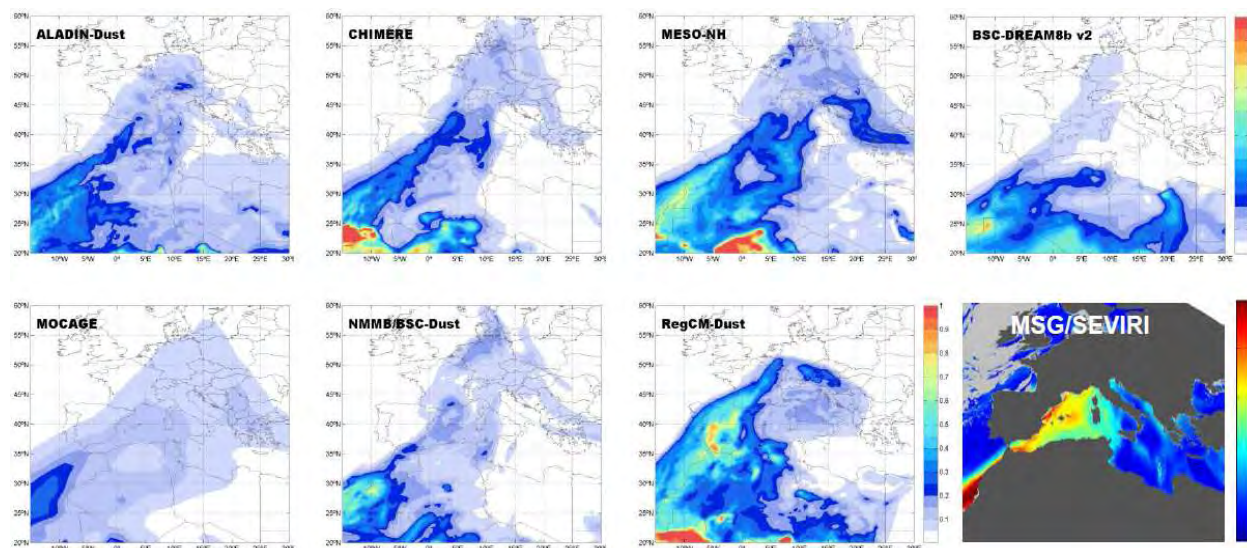


Figure II.23 : Épaisseur optique du 29 juin 2012 simulée par différents modèles et mesurée par MSG/SEVIRI. (Basart et al., Ateliers de modélisation de l'atmosphère, 22 janvier 2014, Toulouse)

Des premières comparaisons (**Figure II.24**) aux mesures lidar (Barcelone, communication M. Sicard) et aéroportées (ATR42, PCASP, communication C. Di Biagio) ont également pu être réalisées avec quelques modèles en termes de distribution verticale et granulométrie. La figure de gauche montre le profil vertical du coefficient d'extinction mesuré et simulé à Barcelone le 27 juin 2012 (arrivée du panache de poussières sahariennes). On peut noter que plusieurs modèles réussissent à simuler correctement l'altitude de ce panache (entre 2 et 5 km), mais en sous-estimant l'intensité du pic. La figure de droite montre le profil de concentration en poussières désertiques pour deux simulations et les mesures du vol 22 de la campagne pour chacun des trois modes granulométriques (fin : 0.01 à 1 mm, accumulation : 1 à 2.5 mm et grossier : 2.5 à 20 mm). On observe un maximum de la concentration observée au-dessus de 2000m, plus important dans le mode grossier. Les deux modèles respectent cette prédominance du mode grossier, et le maximum au-dessus de 2000m. Cependant, on retrouve une sous-estimation générale des concentrations à tous les niveaux verticaux.

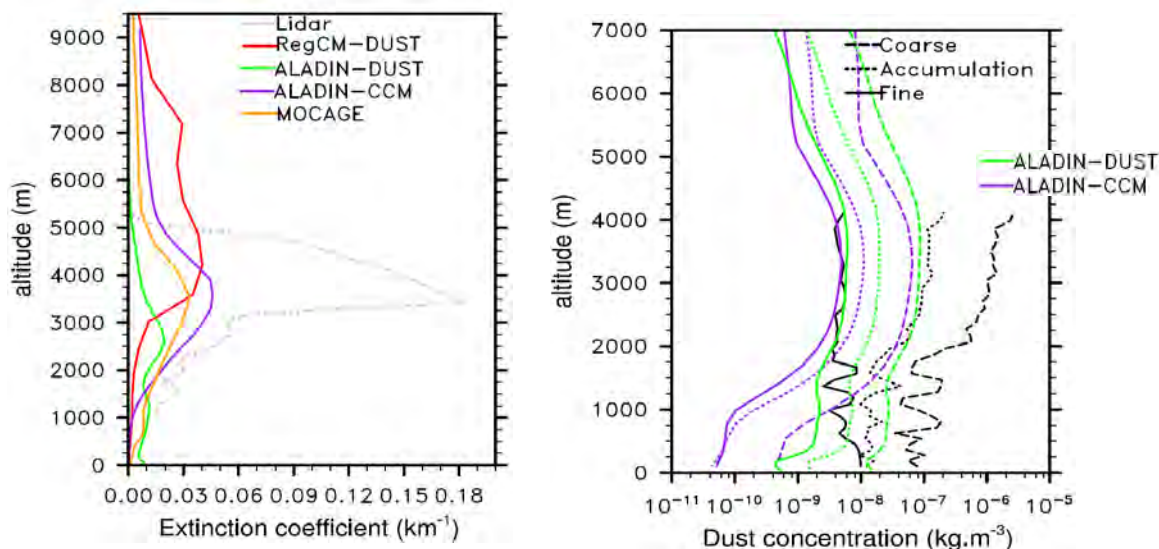


Figure II.24: Profils verticaux du coefficient d'extinction à Barcelone (gauche, 27/06/2012) et de la Concentration en poussières désertiques (droite, 29/06/2012) simulés par différents modèles (courbes colorées) et observés (en gris à gauche par le lidar de Barcelone, en noir à droite par le PCASP de l'ATR42). (Nabat et al., Ateliers de modélisation de l'atmosphère, 21 janvier 2014, Toulouse)

En conclusion, les premiers résultats de cette inter-comparaison de modèles régionaux ont permis de montrer que la plupart d'entre eux sont capables de reproduire la variabilité spatio-temporelle quotidienne des aérosols désertiques sur le bassin méditerranéen, et des événements particuliers de remontées de ces poussières comme le cas de fin juin 2012 mesuré par la campagne TRAQA. Cependant, de grandes différences ont été constatées entre ces modèles, notamment en terme d'intensité des pics d'aérosols, et de leur étendue spatiale. Le cas de fin juin 2012 est aussi bien reproduit par les modèles malgré une sous-estimation des épaisseurs optiques. En terme de distribution verticale et granulométrique, les premiers modèles comparés montrent également des résultats corrects.

De plus, une étude sur la distribution verticale des aérosols pendant l'épisode de poussières désertiques (Nabat et al., 2014) observés par les LIDAR pendant TRAQA et calculés par le modèle du CNRM a été effectuée. Les coefficients d'extinction à Barcelone à 532 nm et à San Giuliano à 355 nm ont été comparés. Les aérosols atteignent l'Espagne le 27 Juin, sont transportés en troposphère moyenne entre 2000 et 5000 m d'altitude avec un maximum d'extinction (0.18 km^{-1}) à 3500 m. Les profils verticaux calculés par le modèle du CNRM sont similaires aux mesures en dépit d'une sous estimation de l'intensité du panache de poussières et une légère surestimation dans les hautes couches.

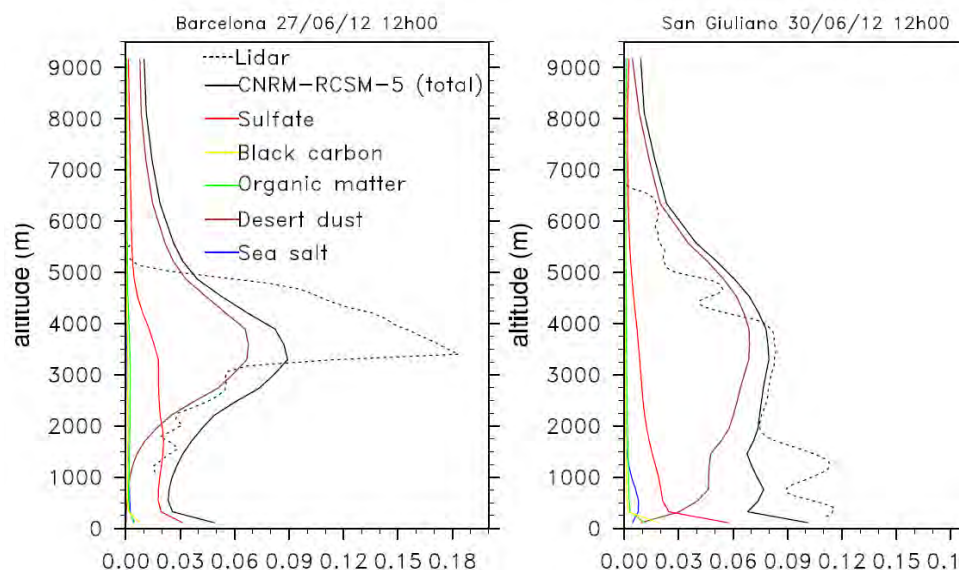


Figure II.25 : Coefficient d’extinction des aérosols [km^{-1}] simulés par le modèle du CNRM (trait noir plein) et observés par le LIDAR à Barcelone (trait pointillé noir) le 27 Juin à 12 UT (gauche) et à San Giuliano (Corse) le 30 Juin 2012 à 12 UT. Les différentes couleurs représentent la contribution de chaque type d’aérosol au coefficient d’extinction (Nabat et al., 2014).

Dans la suite, une évaluation complète de tous les modèles en termes de distribution verticale et granulométrique, et des dépôts, sera effectuée. Toutes les mesures de la campagne (ballons, vols ATR42, ...) pourront ainsi être exploitées. On espère ainsi pouvoir déterminer les raisons qui conduisent à la sous-estimation de certains pics de poussières sahariennes et à cette dispersion entre les différents modèles, dans le but par la suite de pouvoir améliorer ces simulations.

II.3.2. Modélisation de la chimie et du transport à haute résolution de la pollution anthropique

On s’intéresse ici à l’export de la pollution depuis la région de Barcelone vers la Méditerranée. Il s’agit en particulier de bien caractériser les stratifications thermodynamiques, chimiques et particulières observées en confrontant les données (aéroportées, sol et satellite) entre elles, et en les croisant avec des calculs de trajectoire à haute résolution (modèle FLEXTRA). Dans un second temps, les observations seront confrontées aux simulations numériques de ce cas d’étude réalisées avec le modèle couplé de chimie-transport à méso-échelle WRF-Chem.

A Barcelone, les mesures du photomètre solaire d’AERONET (Aerosol Robotic Network) sont disponibles pendant toute la période de la campagne TRAQA. Des mesures du lidar multi-longueur d’onde de l’Université Polytechnique de Catalogne (UPC) ont été effectuées sous alerte, notamment (mais pas seulement) entre le 24 et le 30 juin (IOP de poussières sahariennes) et entre le 2 et le 4 juillet (IOP Barcelone) (**Figure II.26**). Entre le 9 (06 UT) et le 12 (06 UT) juillet, à l’initiative du réseau EARLINET (European Aerosol Research Lidar Network), un exercice consistant à mesurer en continu pendant 72 heures (3 jours) a été mené par 13 stations lidar autour de la Méditerranée. Le système MPL (Micro Pulse Lidar) de Barcelone n’a pas fonctionné pendant la campagne à cause de problèmes techniques.

La POI de Barcelone a été couverte par des cycles diurnes de mesures lidar à Barcelone et les vols de l’ATR42 le 3 juillet (13-17 UT) et le 4 juillet (06-11 UT et 15-18 UT). L’AOT à 532 nm au-dessus de Barcelone ne dépasse pas 0.18 durant la POI. Un régime de recirculation s’établit très clairement les 3 et 4 juillet (voir **Figure II.26**). Le 4 juillet les couches de recirculation atteignent environ 5

km d'altitude; des nuages bas (< 1 km) sont présents tout au long de la journée. L'ATR a effectué une caractérisation locale de ces couches le 3 juillet en les suivant depuis Barcelone et pendant une partie de leur transport au-dessus de la Méditerranée, et un suivi lagrangien le lendemain de ces mêmes couches plus au nord de Barcelone.

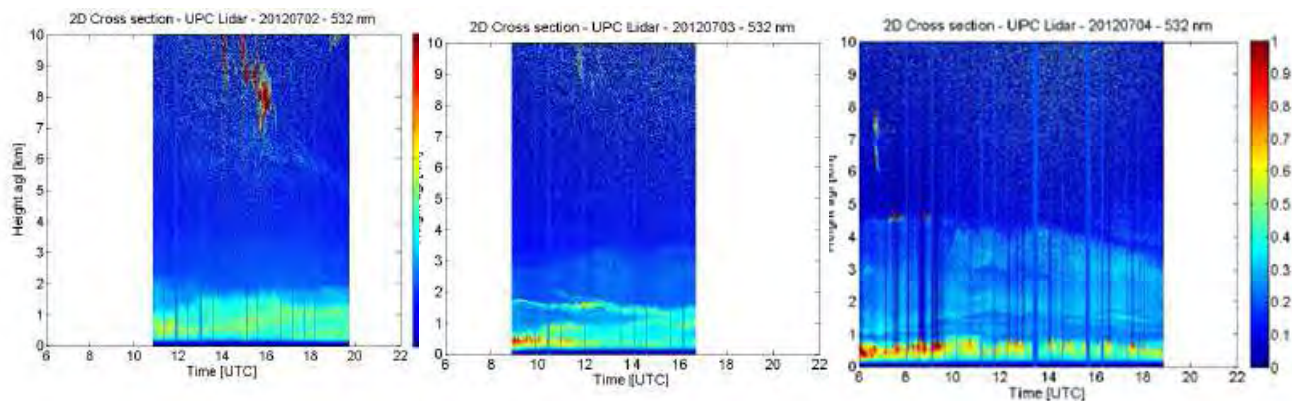


Figure II.26: Séries temporelles du signal lidar (unité arbitraire) à 532 nm pour les 2 (gauche), 3 (centre) et 4 (droite) juillet 2012.

Les premières analyses réalisées à partir des observations recueillies au cours de la POI ont ainsi montré que les panaches de polluants pouvaient être sujets à des conditions météorologiques particulières conduisant à un feuillement en couches fines au voisinage des côtes espagnoles. Ces phénomènes de petite échelle ne peuvent être étudiés que par un modèle méso-échelle fonctionnant à haute résolution spatiale ($dx < 10$ km). On s'attachera notamment à étudier la distribution verticale des couches d'aérosols à partir d'un simulateur lidar pour WRF-Chem développé au LATMOS, mais également à décrire quantitativement le transport des polluants au-dessus de la Méditerranée et le mélange entre les panaches issus de plusieurs sources : anthropiques, feux de biomasse, poussières désertiques. Il s'agit en particulier de i) valider les mécanismes de transport de la pollution ii) d'estimer le bilan du transport des espèces polluées depuis la couche limite vers la troposphère libre à l'échelle régionale iii) d'analyser le vieillissement et le mélange des masses d'air polluées dans la troposphère sur la base de connexions lagrangiennes entre les observations.

Plus spécifiquement, les simulations à méso-échelle réalisées avec le modèle WRF-Chem (**Figure II.27**) prennent en compte la chimie et les aérosols. Les schémas utilisés sont CBMZ pour la chimie en phase gazeuse et MOSAIC pour les aérosols. Ce dernier permet une représentation sectionnelle de des différentes composantes de l'aérosol en 8 classes de taille, ainsi qu'une prise en compte des interactions avec le rayonnement et la microphysique des nuages. Les émissions anthropiques sont basées sur l'inventaire HTAP-v2 à 0.1° de résolution. Les émissions de feux sont issues de l'inventaire journalier FINN-v1 (Wiedinmyer et al., 2011) et couplées dans WRF-Chem à un modèle de pyroconvection (Freitas et al., 2007) pour prendre en compte leur hauteur d'injection. Les conditions initiales et aux limites sont apportées par le modèle global MOZART4 pour la chimie et FNL-NCEP pour la météorologie. Un guidage météorologique (nudging) est effectué toutes les 6 h sauf dans la couche limite.

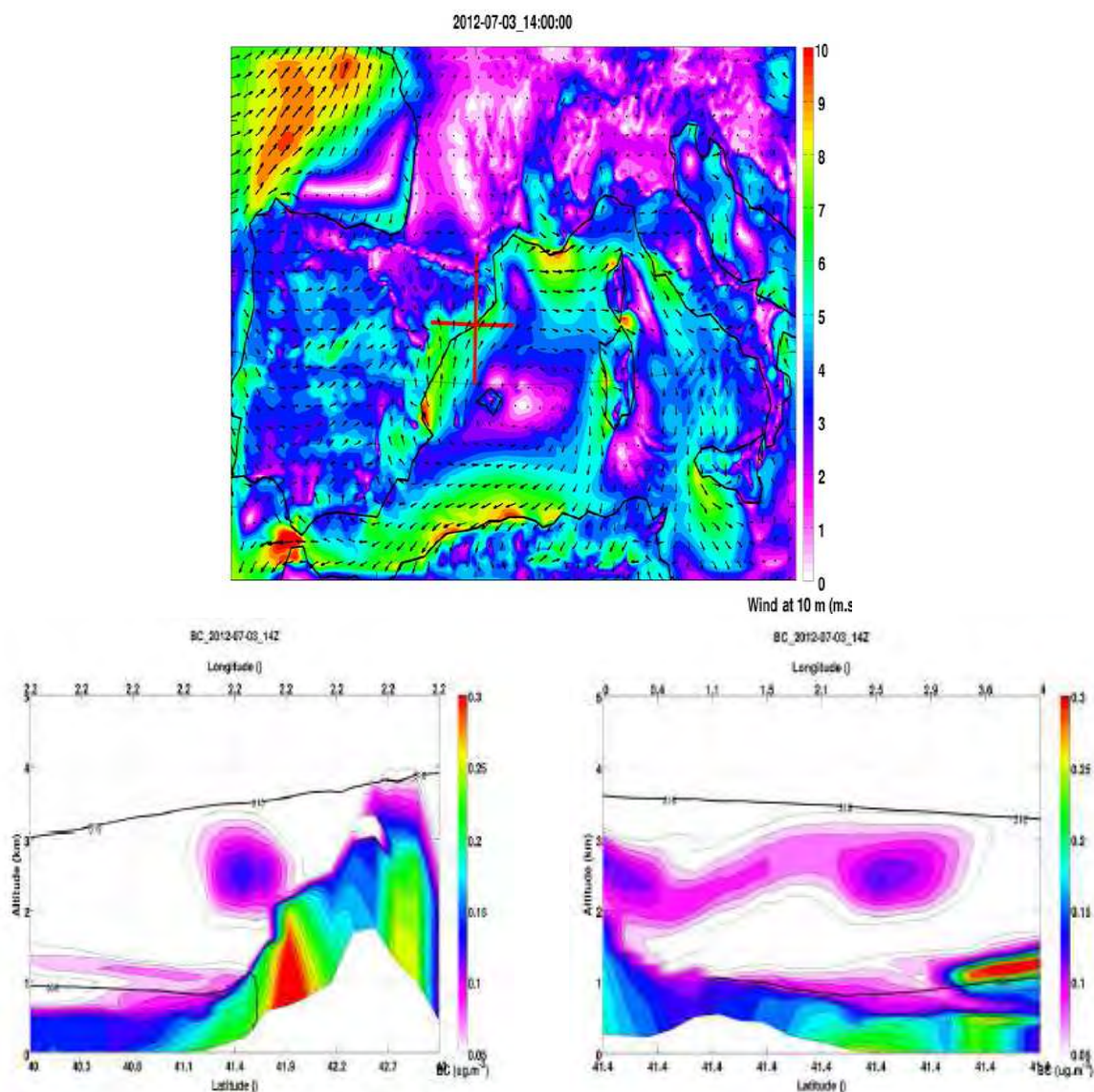


Figure II.27 : Résultats préliminaires des sorties du modèle WRF-Chem à 10 km de résolution le 3 juillet 2012 à 14 UTC : (a, en haut) module du vent à 10 m ; (b, bas à droite) coupe zonale effectuée à la latitude de Barcelone (41.4°) et représentant la concentration en carbone suie ; (c, bas à gauche) coupe méridienne effectuée à la longitude de Barcelone (2.2°) et représentant la concentration en carbone suie. Les traces des coupes sont représentées en rouge en (a).

Les premiers résultats préliminaires des simulations à 10 km montrent (**Figure II.27**) bien le flux de Sud le long des côtes espagnoles advectant les polluants émis depuis Barcelone vers le Nord-Est au-dessus de la Méditerranée où ils ont été échantillonnés par l'avion de recherche. Les coupes zonales et méridiennes confirment la structure complexe des couches d'aérosols exportées depuis la région de Barcelone et transportées en de nombreuses couches verticales superposées. Des simulations du modèle américain régional WRF-Chem à plus haute résolution (2 km) seront effectuées pour étudier les phénomènes de recirculation observés et associés à des processus de fine échelle au-dessus de Barcelone.

III- Mesures des flux biogéniques en zone Méditerranéenne

III.1 Qualification de l'instrument MEDEE au cours de la campagne TRAQA

La campagne TRAQA a été mise à profit pour qualifier la version aéroportée de l'instrument MEDEE. Il s'agit d'un prototype développé (au Laboratoire d'Aérodynamique grâce à la contribution du Groupe d'Instrumentation Scientifique de l'Observatoire Midi Pyrénées) dans le but d'améliorer la mesure des émissions d'espèces en trace. Son utilisation actuelle concerne les émissions de composés organiques volatils (COV) par les végétations méditerranéennes, donc des COV biogéniques (COVB). Ces espèces participant à la formation de l'ozone et de l'aérosol organique secondaire (AOS), la mesure et la paramétrisation de leurs émissions se situent par conséquent clairement dans la thématique du programme. Le prototype MEDEE, qui sera brièvement décrit ci-après, a été dans une première étape qualifié pour les mesures à la surface. La campagne TRAQA a ensuite constitué l'opportunité de le valider dans sa version aéroportée, en utilisant d'une part les séquences de vol dédiées aux objectifs « centraux » de TRAQA, et d'autre part en réalisant quelques phases de vol spécifiques au volet « biogénique ».

III.2 La méthode DEC et le principe de fonctionnement de MEDEE

MEDEE signifie « Mesure par Échantillonnage Disjoint des Échanges d'Espèces en trace ». Ce développement a été engagé sur le constat qu'il était très difficile, et parfois impossible, de mesurer directement les échanges entre la surface et l'atmosphère de nombreux composés pertinents pour la chimie atmosphérique. En effet, la méthode de référence permettant de quantifier ces échanges, dite méthode de corrélations turbulentes (ou eddy-correlation, EC), nécessite de disposer d'un analyseur rapide (c.à.d. avec un temps de réponse de l'ordre de 0.1 s) de l'espèce dont on veut mesurer le flux. Comme il n'existe que très peu d'analyseurs à ce niveau de performance, on a recours à des techniques alternatives, dont aucune n'est pleinement satisfaisante. Ainsi, les méthodes de chambres, par exemple, permettent d'estimer des émissions, soit des sols, soit des feuillages, mais restent très locales et intrusives. On a alors choisi de s'appuyer sur une technique dite de « Disjunct Eddy-Correlation » (DEC), qui est une variante de l'EC autorisant l'utilisation d'analyseurs moins rapides, puisqu'on peut ainsi relâcher la contrainte sur leur temps de réponse d'un facteur 10 à 100. L'intérêt est que les flux ainsi estimés possèdent la même représentativité que les flux EC, c'est-à-dire qu'ils intègrent des dimensions horizontales de l'ordre de centaines de mètres pour des mesures à la surface, et de kilomètres pour des mesures aéroportées. On obtient ainsi des estimations de quantités réellement disponibles pour la chimie atmosphérique. A la différence des techniques de chambres, dans le cas de couverts développés, du type forêt arborée ou arbustive, cette méthodologie a de fait intégré les processus chimiques susceptibles de se produire entre le sol ou la feuille et le sommet de la canopée.

L'idée de la DEC est de réaliser une *capture rapide* d'échantillons d'air, qui sont stockés dans un réservoir intermédiaire, et sont analysés ensuite en ligne pendant le temps nécessaire à l'analyseur. Le résultat de cette analyse est corrélé à la vitesse verticale turbulente mesurée ou calculée au moment de la capture w . Le flux est alors, comme dans la méthode EC, estimé par la covariance $\overline{w'c'}$. Cette estimation est bien sûr basée sur beaucoup moins de valeurs que dans le cas de l'EC (typiquement une centaine au lieu de 10^4), mais des études statistiques basées sur les propriétés de la turbulence ont montré que la dégradation de la précision restait très acceptable (de l'ordre de 10%). Une des originalités techniques de MEDEE consiste en la régulation en pression du volume du réservoir intermédiaire pendant la phase d'analyse, au moyen d'un piston piloté par un vérin

intelligent. L'automate gère le cycle de capture, analyse et vidange ; l'ensemble (réservoir/piston/vérin) est doublé pour assurer une alimentation continue de l'analyseur selon un séquençement programmé. Une représentation de l'appareil est donnée sur la **Figure III.1**.

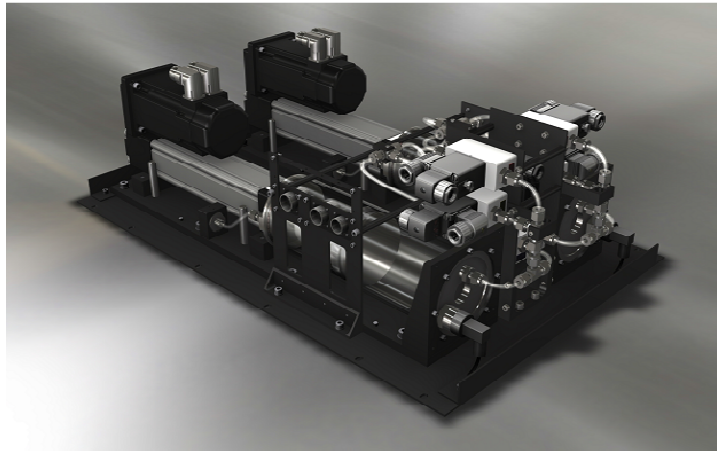


Figure III.1: Représentation des deux blocs identiques de MEDEE : à l'avant au-dessus se trouvent les blocs d'électrovannes (de capture, analyse et vidange), et en dessous les réservoirs cylindriques (1 litre de contenance). Vers l'arrière on trouve les vérins (en gris clair) contrôlant la position des pistons et au-dessus les moteurs de commande.

III.3 Validation de MEDEE au sol

Une fois construit, l'instrument a été qualifié de la façon suivante : il s'agit d'estimer le flux d'un composé à la fois en utilisant MEDEE et la DEC, et en utilisant la technique de référence (EC). Cette méthode ne peut donc s'appliquer qu'à des espèces pour lesquelles on dispose d'un analyseur rapide permettant la mise en œuvre de l'EC. Notre choix s'est porté sur les concentrations de CO₂ et H₂O, pour lesquelles des analyseurs rapides sont disponibles dans le commerce. Nous avons donc installé simultanément :

- ❖ un analyseur rapide de type « open-path » Licor 7500 (CO₂ et H₂O)
- ❖ MEDEE couplé à un analyseur de type « closed-path » Licor 6262 (CO₂ et H₂O)

La vitesse turbulente w , commune à ces deux systèmes, était mesurée par un anémomètre sonique Campbell CSAT. Celui-ci, ainsi que le Li7500, faisaient partie de l'équipement du site de Lamasquère opéré par le CESBIO. Les comparaisons des flux de CO₂ et H₂O par les deux techniques, utilisant des analyseurs distincts, ont été bonnes, malgré les flux faibles dus à la maturité de la végétation au moment de la campagne (Baghi et al., 2012 ; Baghi, 2013).

III.4 Intégration de MEDEE en avion

MEDEE a été conçu dès le début du projet pour pouvoir être intégré dans l'ATR 42 de l'unité SAFIRE. L'aménagement s'est effectué dans une baie certifiée, comme on peut le voir sur la **Figure III.2**. Cette baie accueille, outre le bloc MEDEE représenté sur la **Figure III.1**, le boîtier de distribution des alimentations électriques, un boîtier « micro-contrôleur » assurant le cadencement des séquences, le système d'acquisition et enregistrement des mesures, un analyseur « closed-path » Licor 6262 (CO₂ et H₂O) et une pompe à vide.

Le calcul des flux par la méthode DEC nécessite une estimation de la vitesse verticale turbulente. Sur l'ATR-42, ce paramètre est restitué, par combinaison des mesures inertielles et aérodynamiques, au niveau du nez de l'avion. Il est donc important d'installer MEDEE le plus en avant possible dans la cabine, de façon à minimiser les corrections liées à la distance géométrique entre la mesure de vitesse et la mesure de concentration.



Figure III.2 : Installation de la baie MEDEE dans la cabine de l'ATR-42. La baie de l'analyseur de COV (PTR-MS) est implantée juste à côté.

III.5 Validation de MEDEE en avion

Pour la qualification de la version aéroportée de MEDEE, le même principe que pour la validation au sol a été mis en œuvre dans TRAQA. L'analyseur rapide de type Licor 7500 a été installé sur le fuselage de l'avion, à proximité de la prise d'air utilisée par MEDEE pour les captures d'échantillons (voir **Figure III.3**). Par ailleurs, le couplage de MEDEE avec un PTR-MS (analyseur de COV) a été configuré pour des tests ; les 2 baies ont donc été installées côte à côte dans l'avion de façon à minimiser les volumes morts et les temps de transferts des échantillons à analyser, comme on peut le visualiser sur la **Figure III.2**.

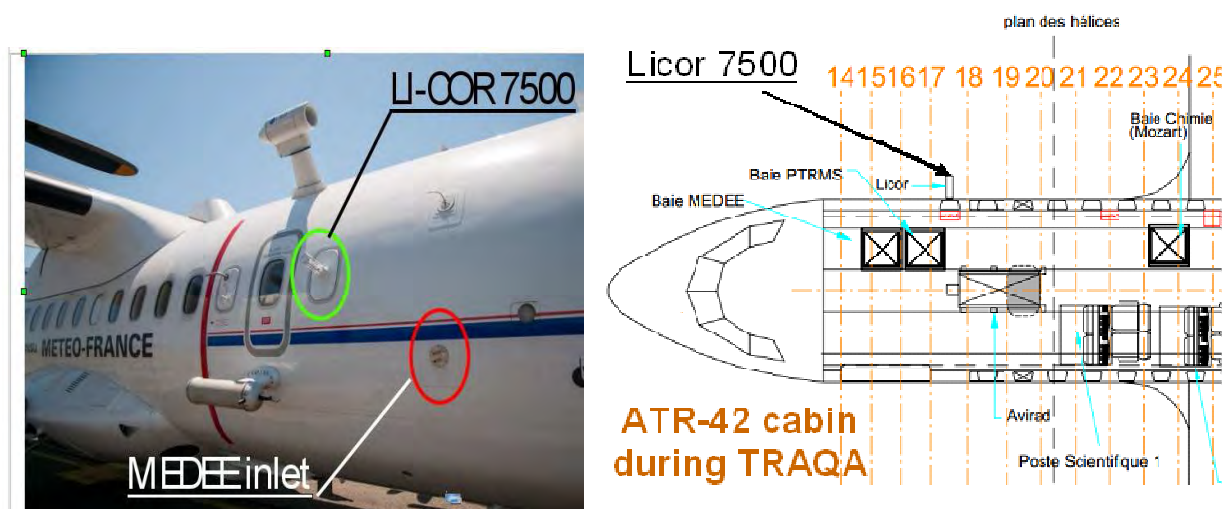


Figure III.3 : Position des prises d'air de MEDEE et de l'analyseur rapide Licor 7500 sur le fuselage de l'ATR 42 (à gauche); aménagement de la cabine dans la partie avant de l'avion, indiquant les emplacements des baies MEDEE et analyseur PTR-MS (à droite).

La validation a été effectuée sur flux de vapeur d'eau, car le signal de CO₂ s'est révélé trop bruité.

III.5.1 Procédures de vol utilisées

Plusieurs séquences de vol ont été mises à profit pour calculer les flux par EC et DEC. En général, des paliers stabilisés en cap et altitude, d'une durée de 10 à 20 mn (50 à 100 km) sont nécessaires pour estimer les flux turbulents dans la couche limite atmosphérique. Cette durée (distance) a été déterminée pour obtenir un bon échantillonnage (au sens statistique) des structures turbulentes. Ces paliers doivent de plus présenter une homogénéité spatiale pour assurer une représentativité des quantités calculées. De telles séquences ont été réalisées tout au long de la campagne sur la mer, dans le cadre des missions de documentation de la pollution. Elles ont donc été incluses dans la qualification.

Nous avons également souhaité inclure des survols continentaux, dans la mesure où la vocation de l'instrument MEDEE est de déterminer les flux d'espèces biogéniques. TRAQA a donc servi de premier banc d'essai pour cet objectif, à partir du couplage entre MEDEE et l'analyseur PTR-MS. Le problème des surfaces continentales sur le pourtour méditerranéen est leur morcellement, à la fois en terme d'occupation des sols et des reliefs. Il s'est révélé impossible d'identifier des axes rectilignes offrant la longueur et l'homogénéité requise. Deux alternatives ont donc été mises en œuvre :

- ❖ des séquences de vols sur la forêt des Landes, réalisées au cours du vol préliminaire de la campagne. Cet écosystème présente en effet les dimensions requises (voir **Figure III.4**). Il est un émetteur de COVB de types mono terpènes.
- ❖ des séquences de vol ayant la durée requise, mais réalisées suivant une figure fermée (cercle ou hippodrome) de façon à demeurer dans un périmètre réduit à l'intérieur duquel la couverture végétale est homogène. Cet échantillonnage, plus surfacique que linéaire, nécessitait une validation pour la mesure des flux turbulents, à la fois pour la mesure de la vitesse verticale (l'avion n'étant pas en assiette de croisière) et pour le calcul statistique de la covariance (question d'échantillonnage des structures turbulentes). C'est pourquoi, comme
- ❖ on peut le voir sur la **Figure III.4**, les deux figures (rectiligne et circulaire) ont été réalisées sur la même zone (forêt) à des fins de comparaison. Par la suite, une journée a été dédiée à ce type d'exploration sur des végétations méditerranéennes, avec des explorations au-dessus d'une forêt de chênes (*quercus pubescens*, émetteur d'isoprène) dans le Var, et une zone de cultures au sud d'Avignon (voir **Figure III.5**).

III.5.2 Traitement des données

- ❖ Les flux EC sont calculés par la covariance entre la vitesse verticale, w , restituée au niveau du nez de l'avion, et la fluctuation de rapport de mélange mesurée par le Licor 7500. Le décalage des signaux correspondant au temps de transit de l'écoulement entre ces deux endroits a été corrigé.
- ❖ Le flux DEC est calculé par la covariance entre les valeurs de w au moment des captures de MEDEE et les analyses des échantillons capturés par le Licor 6262. Le temps de transit de l'écoulement est là aussi pris en compte. Les systèmes d'acquisition de l'avion et de MEDEE étant distincts, la synchronisation est assurée grâce à un signal commun enregistré par les deux systèmes.

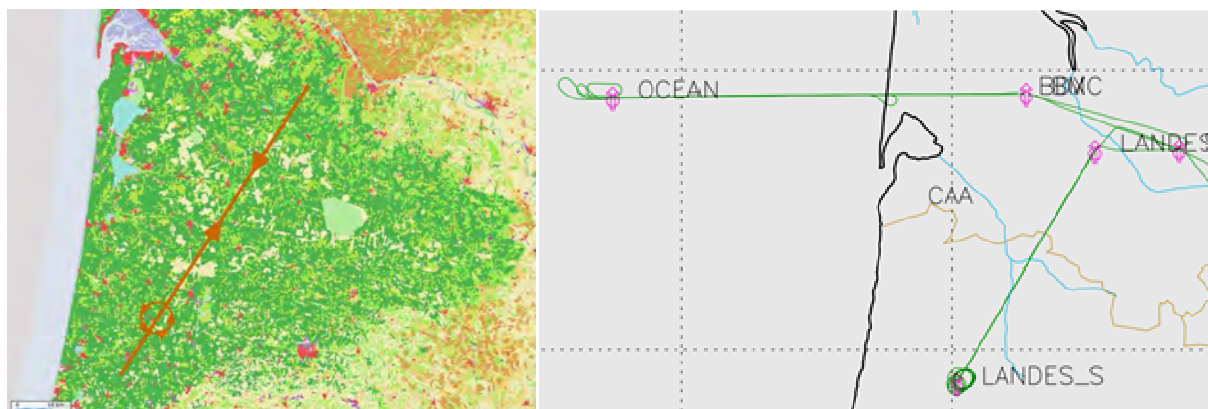


Figure III.4 : Position des séquences de vol dédiées à la validation de MEDEE sur la forêt des Landes (à gauche). Le fond de carte représente l'occupation des sols (Corine landcover). Trajectoire du vol 17 du 22 juin 2012 (à droite) dans lequel ont été incluses ces séquences.

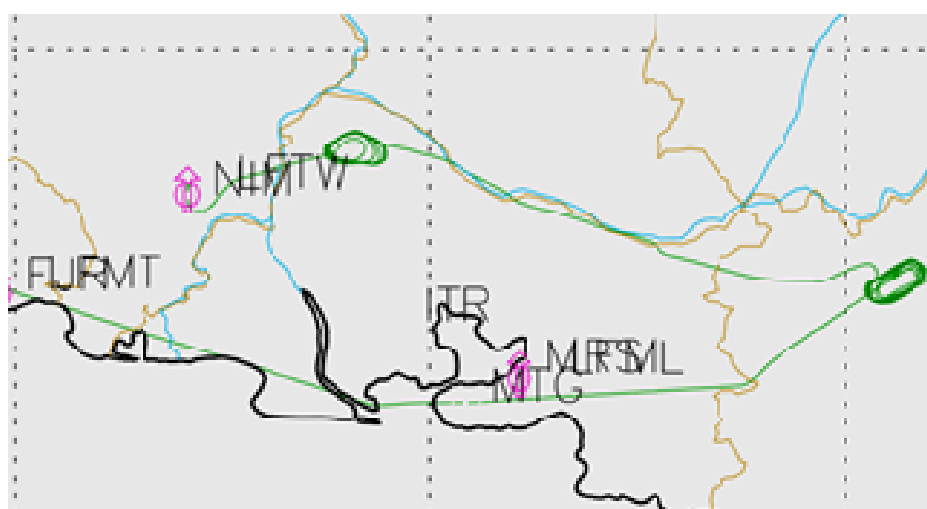


Figure III.5 : Trajectoire (en vert) du vol 29 du 7 juillet 2012 dans l'arrière-pays méditerranéen, avec les explorations de la zone de cultures au sud d'Avignon, et de la forêt (*quercus pubescens*) au sud du Verdon.

La **Figure III.6** présente une illustration des variations d'humidité mesurées par le Licor 7500 et par le Licor 6262 à travers MEDEE. Il faut remarquer la bonne cohérence des variations lentes, et l'allure du signal du 6262 « en créneau » dont la largeur correspond à la durée des analyses.

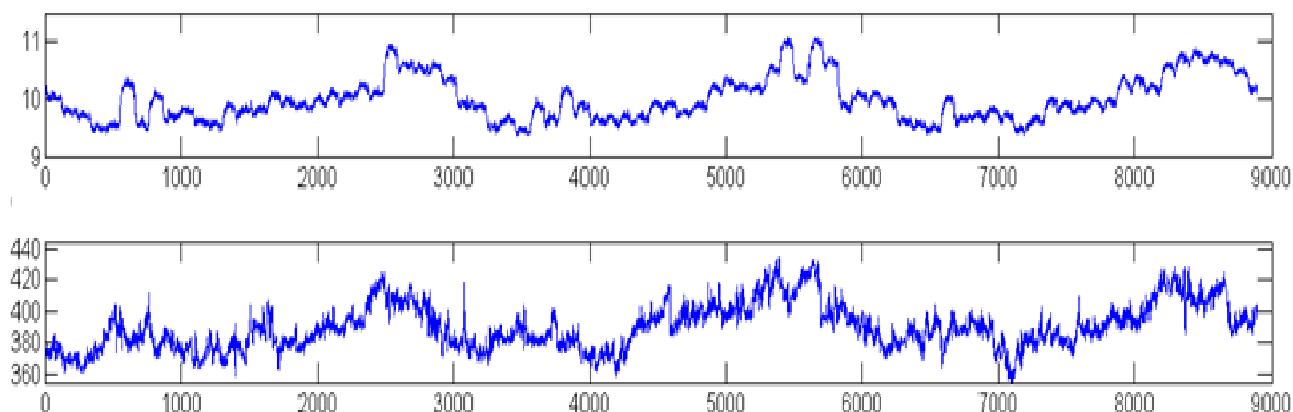


Figure III.6 : Exemple de signaux d'humidité mesurés sur un échantillon de 15 mn par le Licor 7500 « in situ » (en mmol/m^3 , en bas), et le Licor 6262 (en mmol/mol , en haut) branché sur MEDEE.

III.5.3 Résultats : qualification de MEDEE

Les procédures de vols circulaires se sont révélées exploitables pour le calcul des flux, à deux exceptions près pour lesquelles les propriétés statistiques des milieux explorés n'ont pas permis de valider les calculs. Une conséquence est qu'une précaution nécessaire à l'application de la méthode DEC pour le calcul des flux consiste à effectuer une simulation de cette méthode sur des paramètres pour lesquels des séries complètes à cadence rapide sont disponibles (par exemple, les fluctuations de vitesse verticale et de température). Les échantillons problématiques sont ainsi diagnostiqués. La qualification, qui porte sur le flux de chaleur latente (transfert de vapeur d'eau converti en unités d'énergie), rassemble au final à la fois des séquences rectilignes sur la mer et sur les Landes, et des séquences circulaires (ou assimilées) sur les Landes, les cultures et la forêt. La synthèse est représentée sur la **Figure III.7**, où l'on peut constater l'excellente corrélation obtenue entre les deux techniques.

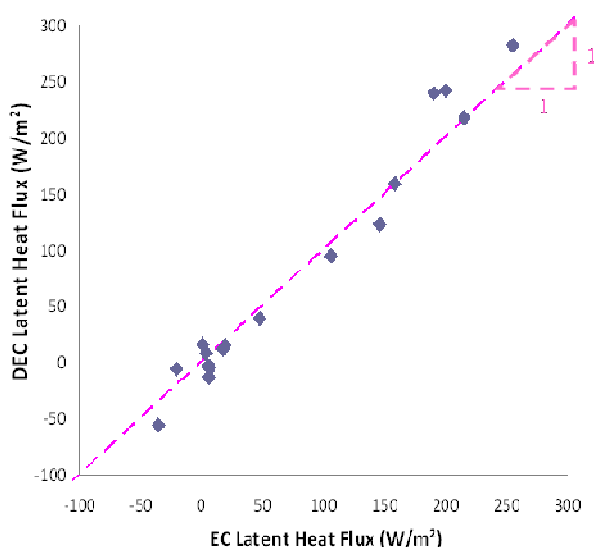


Figure III.7 : Comparaison entre les flux d'humidité (convertis en flux de chaleur latente), calculés par EC avec le Licor 7500 (abscisse), et calculés par DEC avec MEDEE et le Licor 6262.

III.5.4 Estimation des flux de Composés Organiques Volatils Biogéniques

Le système MEDEE pendant la campagne TRAQA pouvait être couplé soit au Licor 6262 pour l'estimation des flux d'humidité, soit au PTR-MS pour l'estimation des flux de COV. Pour ce dernier couplage, plusieurs difficultés sont apparues dans cette première tentative : d'une part, la sensibilité et/ou le rapport signal à bruit de l'analyseur se sont révélés être à la limite de l'exploitabilité, compte tenu des niveaux de fluctuation de concentrations rencontrés. D'autre part, la synchronisation des enregistrements par les deux systèmes a dû être réalisée a posteriori, en se basant sur des fonctions d'inter-corrélation. Malgré ces difficultés, quelques ordres de grandeur ont pu être obtenus sur des systèmes émetteurs de terpènes, en particulier la forêt des Landes. Lors des séquences du vol 17 (22 juin), des flux d'isoprène et de monoterpènes ont été estimés respectivement à 0.066 et $0.13 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Dans une étude, *Luchetta et al.(2000)* ont estimé les émissions annuelles dans cette zone respectivement à 0.022 et $0.065 \mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ pour l'isoprène et les monoterpènes. On constate que l'on retrouve un rapport de flux voisin d'une espèce à l'autre, et des valeurs ponctuellement 2 à 3 fois plus élevées que la moyenne annuelle, ce qui est cohérent avec la période de la mesure.

III.6 Conclusion et perspectives

Le système MEDEE a donc pu être validé dans sa version aéroportée pendant la campagne TRAQA. Le principe retenu a été le même que pour la version sol, à savoir la confrontation du flux estimé par DEC avec MEDEE avec le flux de la même espèce estimé par EC. L'espèce retenue est la vapeur d'eau pour laquelle un analyseur rapide était disponible sur l'avion. Les très bons résultats de cette comparaison permettent d'envisager l'utilisation de l'instrument pour la mesure aéroportée des flux de COVB. Une première tentative a été faite pendant la campagne à partir du couplage de MEDEE et du PTR-MS. L'exploitation a été limitée d'une part à cause du faible nombre de séquences disponibles et d'autre part de la limite de sensibilité de l'analyseur pour appréhender de façon satisfaisante les fluctuations de concentration. Rappelons que l'on fait fonctionner le PTR-MS à une cadence relativement élevée ($\sim$ seconde), ce qui est pénalisant par rapport à une cadence standard où les spectres sont accumulés sur des périodes plus longues, améliorant ainsi la sensibilité des mesures. Malgré tout, des ordres de grandeur satisfaisants des émissions d'isoprène et de monoterpènes ont pu être obtenus sur la forêt des Landes.

Par la suite, il est prévu de refaire des campagnes d'observation à partir de 2014 sur les végétations typiques de la région méditerranéenne (*quercus pubescens*, *quercus ilex*, ...), au sol et en avion, de façon à constituer un jeu de données permettant d'améliorer la paramétrisation des émissions de COVB. Dans les études conduites au LA, cette dernière est basée sur un réseau de neurones qui prend en considération quelques paramètres pertinents qui pilotent les émissions.

IV Conclusion générale

Dans cette campagne expérimentale nous avons réalisé sept POIs totalisant environ une soixantaine d'heures avion (ATR-42) sur 15 jours d'expérience. Cinq vols de ballons pressurisés de couche limite (BPCLs) ont pu être réalisés dont trois avaient des sondes ozone, et deux vols tests de LOAC sous ballon sonde ont également été effectués. Autour de cette campagne, plusieurs laboratoires se sont regroupés pour permettre ces résultats (LA, CNRM-GAME, LATMOS, SAFIRE, LISA, LSCE et LPC2E pour les LOAC). Cette expérience a pu avoir lieu grâce aux financements du programme PRIMEQUAL, du CNES/CSTB, du programme MISTRALS et des différents laboratoires impliqués. C'est un véritable succès si on tient compte de la qualité des données mesurées ainsi que de la qualité des journées documentées. Quatre POIs (POI-1, POI-2, POI-4 et POI-5) servent à des études phénoménologiques concernant la chimie gazeuse (vieillesse, origine des masses d'air, chimie pendant le transport de

pollution, épisode de photochimie, etc.), une à l'étude des poussières désertiques et aérosols en général (POI-3), une au test du nouvel instrument MEDEE de mesures aéroportées des flux biogéniques (POI-6), une plus dédiée à la validation des modèles (POI-7). D'autre part cette expérience TRAQA qui était la première du programme ChArMEx a permis le déclenchement des autres campagnes qui ont eu lieu pendant l'été 2013. L'expérience acquise au cours de la campagne TRAQA a été reconnue comme très profitable pour la bonne conduite des suivantes, avec la mise en place et la qualification du super-site de surface au cap Corse et le test de plusieurs moyens instrumentaux aéroportés novateurs: la mesure des flux biogéniques par avion, la mesure de l'ozone à partir de sondes classiques embarquées sur des Ballons Pressurisés de Couche Limite, la mesure des aérosols par sondage ballons (LOAC). Fort du succès obtenu, tous ces moyens ont été intensivement utilisés durant les campagnes de l'été 2013.

Un premier résultat des mesures observées sur les cas de mistral montre d'une part que la pollution exportée sur la Méditerranée est relativement faible pendant les cas étudiés (pour les concentrations d'ozone) et d'autre part que le modèle de chimie-transport impliqué dans la campagne (MOCAGE) surestime légèrement l'ozone et le monoxyde de carbone. Ceci que ce soit en comparaison avec les mesures aéroportées comme avec les mesures des Ballons Pressurisés de Couche Limite. Une étude de sensibilité sur les émissions est actuellement en cours et la validation de deux cadastres a été réalisée en utilisant des données mesurées à la surface ainsi que les données observées durant la campagne TRAQA telles que les données ozone des Ballons Pressurisés de Couche Limite. L'impact du cadastre est très important sur l'ozone au niveau de la surface terrestre car la variation diurne dépend fortement du cadastre. Les résultats issus de la comparaison entre les résultats du modèle et les mesures des ballons BPCL au dessus de la mer montrent aussi une différence, mais cependant relativement plus faible. Les effets des cadastres sont plus visibles sur terre que sur mer, mais ne sont pas négligeables et une première conclusion porterait à faire le choix du cadastre TNO-MACC pour l'étude des observations de la campagne TRAQA.

Concernant les aérosols, nous avons entrepris de faire une inter-comparaison de modèles régionaux avec pour référence les observations de l'expérience TRAQA. Cette inter-comparaison a permis de montrer que la plupart des modèles sont capables de reproduire la variabilité spatio-temporelle quotidienne des aérosols désertiques sur le bassin méditerranéen, ainsi que des événements particuliers de remontées de ces poussières comme le cas de fin juin 2012 mesuré pendant la campagne TRAQA. Cependant, de grandes différences ont été constatées entre les modèles, notamment en termes d'intensité et d'étendue des panaches d'aérosols. Le cas de fin juin 2012 est bien reproduit par les modèles malgré une sous-estimation des épaisseurs optiques. En termes de distribution verticale et granulométrique, les premières comparaisons de modèles montrent également des résultats satisfaisants. Un résultat intéressant est que la moyenne des modèles fournit de meilleures comparaisons globales aux mesures que n'importe lequel des modèles pris individuellement.

Pour la mesure des flux biogéniques, l'exploitation a été limitée d'une part à cause du faible nombre de séquences disponibles et d'autre part de la limite de sensibilité de l'analyseur pour appréhender de façon satisfaisante les fluctuations de concentrations de COV biogéniques. Cependant, la nouveauté était de faire fonctionner le PTR-MS à une cadence relativement élevée (de l'ordre de la seconde), ce qui était pénalisant par rapport à une cadence standard où les spectres sont accumulés sur des périodes plus longues, améliorant ainsi la sensibilité des mesures. Malgré tout, des ordres de grandeur satisfaisants des émissions d'isoprène et de monoterpènes ont pu être obtenus notamment en vol test sur la forêt des Landes. Il est proposé de refaire des campagnes d'observation à partir de 2014 sur les végétations typiques de la région méditerranéenne (*quercus pubescens*,

quercus ilex, ...), au sol et en avion, de façon à constituer un jeu de données permettant d'améliorer la paramétrisation des émissions de Composés Organiques Volatils Biogéniques.

Enfin, nous avons réalisé pour TRAQA un site Web de campagne (<http://choc.sedoo.fr>; groupe SEDOO/ETHER de l'Observatoire Midi Pyrénées) qui a permis dans un premier temps d'avoir des produits graphiques en temps réel spécifiquement dédiés pour la campagne TRAQA (prévisions MOCAGE, MACC, etc., et produits spatiaux temps réel MSG/SEVIRI, AERONET, etc.). Dans un second temps l'ensemble des observations effectuées lors de la campagne TRAQA a été répertorié sur la base de données MISTRALS/ChArMEx gérée par ce même site, et les données sont accessibles à la communauté scientifique (<http://mistrals.sedoo.fr/ChArMEx/TRAQA/>).

IV Bibliographie

- Baghi, R., P. Durand, C. Jambert, C. Jarnot, C. Delon, D. Serça, N. Striebig, M. Ferlicoq and P. Keravec, 2012, A new disjunct eddy-covariance system for BVOC flux measurements – validation on CO₂ and H₂O fluxes. *Atmos. Meas. Tech.*, **5**, 3119-3132, doi:10.5194/amt-5-3119-2012.
- Barnaba, F. and Gobbi, G. P.: Aerosol seasonal variability over the Mediterranean region and relative impact of maritime, continental and Saharan dust particles over the basin from MODIS data in the year 2001, *Atmospheric, Chemistry and Physics*, **4**, 2367–2391, 2004
- Basart, S., C. Perez, S. Nickovic, E. Cuevas, and J. M. Baldasano. (2012) Development and evaluation of the bsc-dream8b dust regional model over northern africa, the mediterranean and the middle east. *Tellus B*, **64** :18539, 2012. doi : 10.3402/tellusb.v64i0.18539.
- Bénech, B., A. Ezcurra, M. Lothon, F. Saïd, B. Campistron, F. Lohou and P. Durand, 2008, Constant Volume Balloons Measurements in the Urban Marseille and Fos-Berre Industrial Ozone Plumes during ESCOMPTE Experiment. *Atmos. Environ.*, **42**, 5589-5601. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.03.011.
- Bennartz R, Fischer J. A modified k-distribution approach applied to narrow band water vapour and oxygen absorption estimates in the near infrared. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer* 2000;66:539–53
- Bousserez, N., J.-L. Attié, V.-H. Peuch, M. Michou, G. Pfister, D. Edwards, M. Avery, G. Sachse, E. Browell and E. Ferrare, 2007 : Evaluation of MOCAGE chemistry and transport model during the ICARTT/ITOP experiment, *J. Geophys. Res.*, **112** (D120S42), doi:10.1029/2006JD007595.
- Carrer, D., J.-L. Roujean, O. Hautecoeur, and T. Elias (2010), Daily estimates of aerosol optical thickness over land surface based on a directional and temporal analysis of SEVIRI MSG visible observations, *J. Geophys. Res.*, **115**, D10208, doi:[10.1029/2009JD012272](https://doi.org/10.1029/2009JD012272).
- Chaboureaud J-P, E. Richard, J.-P. Pinty, C. Flamant, P. Di Girolamo, C. Kiemle, A. Behrendt, H. Chepfer, M. Chiriaco, and V. Wulfmeyer. (2011) Long-range transport of saharan dust and its radiative impact on precipitation forecast : a case study during the convective and orographically-induced precipitation study (cops). *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **137** :236–251 doi : 10.1002/qj.719.
- Clerbaux, C., Edwards, DP; Deeter, M, et al.(2008): Carbon monoxide pollution from cities and urban areas observed by the Terra/MOPITT mission. *Geophys. Res. let.*, **35**, (3), L03817
- Cooper O. R., et al. (2007), Evidence for a recurring eastern North America upper tropospheric ozone maximum during summer, *J. Geophys. Res.*, **112**, D23304, doi:10.1029/2007JD008710.
- Crutzen, P.J., L.E. Heidt, J.P. Krasnec et al., (1979): Biomass burning as a source of atmospheric gases CO, H₂, N₂O, NO, CH₃CL and COS, *Nature*, **282**, 5736, 253-256
- Di Biagio C, di Sarra A, Meloni D, Monteleone F, Piacentino S, and Sferlazzo D. Measurements of Mediterranean aerosol radiative forcing and influence of the single scattering albedo. *J Geoph Res* 2009;114(D6).
- Di Biagio C, di Sarra A, and Meloni D (2010) . Large atmospheric shortwave radiative forcing by Mediterranean aerosols derived from simultaneous ground-based and spaceborne observations and dependence on the aerosol type and single scattering albedo. *Journal of Geophysical Res* 2010;115(D10).
- Doppler L, Fischer J, Carbajal-Henken C, Pelon J, Ravetta F. (2013) Extension of radiative transfer code MOMO, Matrix-Operator Model to the thermal infrared. Clear air validation by comparison to RTTOV and application to CALIPSO-IIR. Submitted in 2013 submitted to *J of Quant Rad Transfer*.

- Doppler L, Preusker R, Bennartz R, Fischer J. (2014) k-bin and k-IR: k-distribution methods without correlation approximation for non-fixed instrument response function and extension to the thermal infrared. Applications to satellite remote sensing. *J of Quant Rad Transfer* 2014;133:382-395
- Di Sarra A, Di Biagio C, Meloni D, Monteleone F, Pace G, Pugnaghi S, Sferlazzo D. (2011) Shortwave and longwave radiative effects of the intense Saharan dust event of 25–26 March 2010 at Lampedusa (Mediterranean Sea). *J Geoph Res* 2011;116(D23).
- Decadal Survey: Earth science and applications from space. National imperatives for the next decade and beyond, 2007, The National Academic Press, Washington, D.C. (www.nap.edu)
- Delon C., D. Serça, C. Boissard, R. Dupont, A. Dutot, P. Laville, P. De Rosnay, and R. Delmas (2007). Soil NO emissions modelling using Artificial Neural Network, *Tellus B*, 59B, 502-513.
- Ding A.J., Wang T., Thouret V., Cammas J.-P., and Nédélec P. (2008). Tropospheric ozone climatology over Beijing: analysis of aircraft data from the MOZAIC program, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 1-13, 2008.
- Dufour, A., M. Amodei, G. Ancellet and V.-H. Peuch (2004), Observed and modelled "chemical weather" during ESCOMPTE, *Atmos. Res.*, 74 (1-4), 161-189.
- Duncan, B.N., and I. Bey (2004), A modeling study of the export pathways of pollution from Europe: Seasonal and interannual variations (1987-1997), *J. Geophys. Res.*, 109, D08301, doi:10.1029/2003JD004079.
- Duncan, B.N., J.J. West, Y. Yoshida, A.M. Fiore, and J.R. Ziemke (2008). The influence of European pollution on ozone in the Near East and northern Africa, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 2267-2283.
- El Amraoui, L. J. -L. Attié, N. Semane, M. Claeys, V.-H. Peuch, J. Warner, P. Ricaud, J.-P. Cammas, A. Piacentini, D. Cariolle, S. Massart, and H. Bencherif (2010). Midlatitudes Stratosphere - Troposphere Exchange as diagnosed by MOPITT CO and MLS O₃ assimilated fields, *Atmos. Chem. Phys.* 10(5) 2175-2194
- Flaud, J.-M., Orphal, J., Bergametti, G., Deniel, C., von Clarmann, Th., Friedl-Vallon, F., Steck, T., Fischer, H., Bovensmann, H., Burrows, J.P., Carlotti, M., Ridel, M., and Palchetti, L. (2004). The Geostationary Fourier Imaging Spectrometer (GeoFIS) as part of the Geostationary Tropospheric Pollution Explorer (GeoTROPE) mission: objectives and capabilities, *Adv. Space Res.*, doi:10.1016/j.asr.2003.07.072.
- Fell F, and Fischer J. (2001) Numerical simulation of the light field in the atmosphere-ocean system using the matrix-operator method, *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 69:351–88.
- Giorgi, F., E. Coppola, F. Solmon, L. Mariotti, M. B. Sylla, X. Bi, N. Elguindi, G. T. Diro, V. Nair, G. Giuliani, S. Cozzini, I. Guettler, T. A. O'Brien, A. B. Tawfik, A. Shalaby, A. S. Zakey, A. L. Steiner, F. Stordal, L. C. Sloan, and C. Brankovic. (2012) Regcm4 : model description and preliminary tests over multiple convection domains. *Climate Research*, 52 :7–29 doi : 10.3354/cr01018.
- Gkikas, A., Houssos, E., Hatzianastassiou, N., Papadimas, C., and Bartzokas, A.: (2012) Synoptic conditions favouring the occurrence of aerosol episodes over the broader Mediterranean basin, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 138, 932–949, doi: 10.1002/qj.978
- Gkikas, A., Hatzianastassiou, N., Mihalopoulos, N., Katsoulis, V., Kazadzis, S., Pey, J., Querol, X., and Torres, O.: (2013) The regime of intense desert dust episodes in the Mediterranean based on contemporary satellite observations and ground measurements, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 12135–12154, doi:10. 5194/acp-13-12135.
- Guerova G., I. Bey, J.L. Attié, R. V. Martin, J. Cui and M. Sprenger, (2006) Impact of transatlantic transport episodes on summertime ozone in Europe, *Atmos. Chem. Phys.* 6, 2057-2072

- Guieu, C., Dulac, F., Desboeufs, K., Wagener, T., Pulido-Villena, E., Grisoni, J.-M., Louis, F., Ridame, C., Blain, S., Brunet, C., Nguyen, E. B., Tran, S., Labiadh, M., and Dominici, J.-M.: Large clean mesocosms and simulated dust deposition: a new methodology to investigate responses of marine oligotrophic ecosystems to atmospheric inputs, *Biogeosciences*, 7, 2765–2784, doi:10.5194/bg-7-2765-2010, 2010.
- Heinold, B., I. Tegen, K. Schepanski, M. Tesche, M. Esselborn, V. Freudenthaler, S. Gross, K. Kandler, P. Knippertz, D. Müller, A. Schladitz, C. Toledano, B. Weinzierl, A. Ansmann, D. Althausen, T. Müller, A. Petzold, and A. Wiedensohler. Regional modelling of saharan dust and biomass-burning smoke. *Tellus B*, 63 :781–799, 2011. doi : 10.1111/j.1600-0889.2011.00570.x.
- Hess M, Koepke P, and Schult I. (1998) Optical Properties of Aerosols and Clouds: The Software Package OPAC. *Bull. Am. Met. Soc.* 79(5), 831-44.
- Hollingsworth, A., R.J. Engelen, C. Textor, A. Benedetti, O. Boucher, F. Chevallier, A. Dethof, H. Elbern, H. Eskes, J. Flemming, C. Granier, J. J. Morcrette, P. Rayner, V.-H. Peuch, L. Rouil, M. Schultz and A. Simmons, (2008) The Global Earth-system Monitoring using Satellite and in-situ data (GEMS) Project: Towards a monitoring and forecasting system for atmospheric composition, *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 89 Issue: 8 pp: 1147
- Hough, A., (1988) The calculation of photolysis rates for use in global tropospheric modeling studies, Tech. rep., Energy Res. Estab., Her Majesty's Stn. Off., London.
- IGACO (2004): Integrated Global Atmospheric Chemistry Observations: For the monitoring of our environment from space and from Earth. ESA SP-1282, report GAW 159
- Kalabokas, P. D., A. Volz-Thomas, J. Brioude, V. Thouret, J.-P. Cammas, and C. C. Repapis (2007) Vertical ozone measurements in the troposphere over the Eastern Mediterranean and comparison with Central Europe *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 3783-3790.
- Kallos, G., M. Astitha, P. Katsafados, and C. Spyrou (2007) Long-Range Transport of Anthropogenically and Naturally Produced Particulate Matter in the Mediterranean and North Atlantic: Current State of Knowledge, *J. Appl. Meteor. Clim.*, 46, 1230-1251.
- Kar J., D.B.A Jones, J.R. Drummond, J.-L. Attié, J. Liu, J. Zou, F. Nichitiu, M. D. Seymour, D. P. Edwards, M. N. Deeter, J. C Gille and A. Richter (2008): Measurement of low altitude CO over the India subcontinent by MOPITT. *J. Geophys. Res.*, 113, 16307-16307.
- Keating, et al., (2007) Task Force on Hemispheric Transport of Air Pollution, interim report 2007, www.htap.org/activities/2007Interim_Report.htm
- Lafore J.-P., Stein J., Asencio N., Bougeault P., Ducrocq V., Duron J., Fischer C., Hereil P., Mascart P., Pinty J.-P., Redelsperger J.-L., Richard E., and Vila-Guerau de Arellano J (1998)., The Meso-NH Atmospheric simulation system, I. Adiabatic formulation and control simulations, *Ann. Geophys.*, 16, 90-109
- Lelieveld, et al., (2002) Global Air Pollution Crossroads over the Mediterranean, *Science* Vol. 298. no. 5594, pp. 794–799.
- Luchetta L., Simon V., and Torres L. (2000) Émission des principaux Composés Organiques Volatils biogéniques en France. *Pollution Atmosphérique*, 42, 387-409.
- Massart, S., D. Cariolle, and V.-H. Peuch, Towards an improvement of the atmospheric 600 ozone distribution and variability by assimilation of satellite data (2005), *C. R. Geosciences*, 601 337-15, 1305–1310, doi:10.1016/j.crte.2005.08.001.

- Mokhtari M., L. Gomes, P. Tulet, and T. Rezoug. (2012) Importance of the surface size distribution of erodible material : an improvement on the dust entrainment and deposition (dead) model. *Geoscientific Model Development*, 5 :581–598, 2012. doi : 10.5194/gmd-5-581.
- Moulin, C., Guillard, F., Dulac, F., and Lambert, C. E.(1997): Long-term daily monitoring of Saharan dust load over ocean using Meteosat ISCCP-B2 data 1. Methodology and preliminary results for 1983-1994 in the Mediterranean, *Journal of Geophysical Research*, 102, 16,947–16,958, 1997.
- Moulin, C., Lambert, C. E., Dayan, U., Masson, V., Ramonet, M., Bousquet, P., Legrand, M., Balkanski, Y. J., Guelle, W., Marticorena, B., Bergametti, G., and Dulac, F. (1998): Satellite climatology of African dust transport in the Mediterranean atmosphere, *Journal of Geophysical Research*, 103, 13,137–13,144, doi:10.1029/98JD00171, 1998.
- Nabat, P., Somot, S., Mallet, M., Chiapello, I., Morcrette, J. J., Solmon, F., Szopa, S., Dulac, F., Collins, W., Ghan, S., Horowitz, L. W., Lamarque, J. F., Lee, Y. H., Naik, V., Nagashima, T., Shindell, D., and Skeie, R. (2013): A 4-D climatology (1979–2009) of the monthly tropospheric aerosol optical depth distribution over the Mediterranean region from a comparative evaluation and blending of remote sensing and model products, *Atmospheric Measurement Techniques*, 6, 1287–1314, doi:10.5194/amt-6-1287-2013, 2013.
- Nabat, P., Somot, S., Mallet, M., Sevault, F., Chiacchio, M., and Wild, M. (2014): Direct and semi-direct aerosol radiative effect on the Mediterranean climate variability using a Regional Climate System Model, *Climate Dynamics*, in press, doi:10.1007/s00382-014-2205-6
- Noilhan, J., and J.-F. Mahfouf (1996): The ISBA land surface parametrization scheme, *Glob. Planet. Change*, 13, 145-159.
- Papadimas, C. D., Hatzianastassiou, N., Mihalopoulos, N., Querol, X., and Vardavas, I (2008) Spatial and temporal variability in aerosol properties over the Mediterranean basin based on 6-year (2000–2006) MODIS data, *Journal of Geophysical Research*, 113, D11205, doi:10.1029/2007JD009189.
- Pérez C., K. Haustein, Z. Janjic, O. Jorba, N. Huneeus, J. M. Baldasano, T. Black, S. Basart, S. Nickovic, R. L. Miller, J. P. Perlwitz, M. Schulz, and M. Thomson (2011). Atmospheric dust modeling from meso to global scales with the online nmmb/bsc-dust model – part 1 : Model description, annual simulations and evaluation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11 : 13001–13027, 2011. doi : 10.5194/acp-11-13001.
- Pfister G., G. Pétron, L.K. Emmons, J.C. Gille, D.P. Edwards, J.F. Lamarque, J.-L. Attié, C. Granier, and P.C. Novelli, (2004): Evaluation of CO simulations and the analysis of the CO budget for Europe, *J. Geophys. Res.*, 109 (D19)}, D19304 doi:10.1029/2004JD004691
- Raut J.-C., and P. Chazette (2008) Vertical profiles of urban aerosol complex refractive index in the frame of ESQUIF airborne measurements. *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 901-919.
- Real, E., et al., (2007) Processes influencing ozone levels in Alaskan forest fire plumes during long-range transport over the North Atlantic, *J. Geophys. Res.*, 112, D10S41, doi:10.1029/2006JD007576.
- Real, E., K. Law, H. Schlager, A. Roiger, H. Huntrieser, J. Methven, M. Cain, J. Holloway, J. A. Neuman, T. Ryerson, F. Flocke, J. de Gouw, E. Atlas, S. Donnelly, and D. Parrish (2008). Lagrangian analysis of low level anthropogenic plume processing across the North Atlantic. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 8, 7509-7554
- Ricaud, P., B. Barret, J.-L. Attié, E. Le Flochmoën, E. Motte, H. Teyssède, V.-H. Peuch, N. Livesey, A. Lambert, and J.-P. Pommereau (2007) Impact of land convection on troposphere-stratosphere exchange in the tropics, *Atmos. Chem. Phys.* 7, 5639-5657.

- Ricaud, P., J.-P. Pommereau, J.-L. Attié, E. Le Flochmoën, L. El Amraoui, H. Teyssède, V.-H. Peuch, W. Feng, and M. P. Chipperfield (2009a), Equatorial transport as diagnosed from nitrous oxide variability, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, Special Issue: "SCOUT-O3 Tropics", 9, 4899-4930.
- Ricaud, P., J.-L. Attié, H. Teyssède, L. El Amraoui, V.-H. Peuch, M. Matricardi, and P. Schluessel (2009b) Equatorial total column of nitrous oxide as measured by IASI on MetOp-A: Implications for transport processes, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, Special Issue: "The IASI instrument onboard the METOP satellite: first results", 9, 3243-3264.
- Richter, A; Burrows, JP; Nuss, H, et al.(2005) : Increase in tropospheric nitrogen dioxide over China observed from space, *Nature*, 437, 7055, pp 129-132.
- Rodgers, C.D., (2000):Inverse methods for atmospheric sounding: theory and practice, World Scientific Publishing Company, ISBN 978-9810227401, 200 pp.
- Sauvage B., R. V. Martin, A. van Donkelaar, J. R. Ziemke (2007), Quantification of the factors controlling tropical tropospheric ozone and the South Atlantic maximum, *J. Geophys. Res.*, 112, D11309, doi:10.1029/2006JD008008.
- Solmon, F., C. Sarrat, D. Serça, P. Tulet, and R. Rosset (2004), Isoprene and monoterpenes biogenic emissions in France: modeling and impact during a regional pollution episode, *Atmospheric Environment* 38, 3853–3865.
- Spyrou, C., Kallos, G., Mitsakou, C., Athanasiadis, P., Kalogeri, C., and Iacono, M.(2013): Modeling the radiative effects of desert dust on weather and regional climate, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 5489–5504, doi:10.5194/acp-13-5489-2013, 2013.
- Stohl, A., S. Eckhardt, C. Forster, P. James, and N. Spichtinger, On the pathways and timescales of intercontinental air pollution transport, *J. Geophys. Res.*, 107(D23), 4684, doi:10.1029/2001JD001396, 2002.
- Teyssède, H., M. Michou, H. L. Clark, B. Josse, F. Karcher, D. Olivié, V.-H. Peuch, D. Saint-Martin, D. Cariolle, J.-L. Attié, P. Nédélec, P. Ricaud, V. Thouret, R. J. Van der A and F. Chéroux, A new tropospheric and stratospheric Chemistry and Transport Model MOCAGE-Climat for multi-year studies: evaluation of the present-day climatology and sensitivity to surface processes, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 5815-5860, 2007.
- Thouret V., J-P. Cammas, B. Sauvage, G. Athier, R. Zbinden, P. Nédélec, P. Simon and F. Karcher (2006), Tropopause referenced ozone climatology and inter-annual variability (1994-2003) from the MOZAIC programme, *Atmos. Chem. Phys.*, 1033-1051.
- Tressol, M., C. Ordonez, R. Zbinden, J. Brioude, V. Thouret, C. Mari, P. Nédélec, J.-P. Cammas, H. Smit, H.-W. Patz, and A. Volz-Thomas (2008), Air pollution during the 2003 European heat wave as seen by MOZAIC airliners. *Atmos. Chem. Phys.* 8, 2133-2450, 2008.
- von Clarmann, T., Grabowski U., and Kiefer M, (2001) : On the role of non-random errors in inverse problems in radiative transfer and other applications, *J. Quant. Spectro. Radiat. Trans.*, vol. 71, 39-46.
- World Meteorological Organization (2006), Scientific assessment of ozone depletion: 2006, Rep. 50, Geneva, Switzerland, 2006.
- Zanis, P., Ntogras, C., Zakey, A., Pytharoulis, I., and Karacostas, T. (2012) Regional climate feedback of anthropogenic aerosols over Europe using RegCM3, *Climate research*, 52, 267–278, doi:10.3354/cr01070

Zhuang L.Z and Huebert BJ, (1996), Lagrangian analysis of the total ammonia budget during Atlantic Stratocumulus Transition Experiment Marine Aerosol and Gas Exchange. J. Geophys. Res. 101(D2) 4341-4350.

Annexe I

1-Actions de valorisation entreprises

Mise en place fin 2013 d'un numéro spécial concernant TRAQA et ChArMEx en général transverse aux deux revues en ligne de l'EGU Atmos. Meas. Techniques et Atmos. Chem. Physics. (Parmi les éditeurs associés: J.-L. Attié, F. Dulac)

http://www.atmospheric-measurement-techniques.net/submission/scheduled_special_issues.html

2- Conférences internationales, colloques, Rapports, thèses

Conférences internationales :

Attié, J.-L., F. Ravetta, P. Durand, L. El Amraoui, P. Ricaud, C. Delon, F. Gheusi, M. Mallet, J. C. Raut, G. Ancellet², R. Abida³, C. Di Biaggio⁴, F. Bernard³, F. Dulac⁵, P. Formenti⁴, C. Gaimoz⁴, N. Grand⁴, E. Hache^{1,3}, C. Jambert¹, C. Jarnot¹, E. Jaumouillé³, P. Nabat³, J. Parmentier³, J. Pelon², B. Piguet³, M. Sicard⁶, J.-B. Renard⁷, M. Jeannot⁷, L. Fleury⁸, H. Ferré⁸, A. Bourdon⁹, and N. Verdier¹⁰ Transport of Pollution and Air Quality experiment over the Mediterranean basin (TRAQA/ChArMEx campaign) EGU General Assembly 2014, Vienne (Autriche), 8-12 avril 2014

Baghi, R., P. Durand, C. Jambert, C. Delon, C. Jarnot, J.-M. Martin, E. Ceschia, P. Keravec and D. Serca, 2012, Comparison of conventional and disjunct eddy covariance fluxes for the validation of a new disjunct sampler design. AGU Fall Meeting, San Francisco, Dec. 3-7.

Basart S., F. Dulac, J.M. Baldasano, P. Nabat, M. Mallet, L. Roblou, F. Solmon, B. Laurent, J. Vincent, L. Menut, L. El Amraoui, B. Sic, J.-P. Chaboureaud, J.-F. Léon, B. Vogel, J.-B. Renard, F. Ravetta, J. Pelon, C. Di Biaggio, P. Formenti, I. Chiapello, J.-L. Roujean, X. Ceamanos, D. Carrer, M. Sicard, H. Delbarre, and J.-L. Attié (2013) Dust model intercomparison for summer 2012 in the western Mediterranean and comparison to the Pre-ChArMEX/TRAQA campaign observations. 7th Int. Workshop Sand/Duststorms and Associated Dustfall, Frascati, Italy, 2-4 Dec. 2013.

Di Biagio, C., S. Chevallier, Gaimoz, N. Grand, R. Loisil, J. Pelon, F. Ravetta, S. Schnitt, P. Zapf, and P. Formenti, Optical properties of anthropogenic pollution and Saharan dust aerosols over the North-Western Mediterranean basin: airborne observations during the TRAQA 2012 campaign, EGU General Assembly 2013, 7-12 April 2013, Wien, Austria.

Doerenbecher A., C. Basdevant, F. Bernard, P. Cocquerez, N. Verdier and P. Durand, 2013, Boundary layer pressurized balloons deployed in the Mediterranean. Proc. 21st ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research, Thun, Switzerland, 9-13 June, ESA book SP-721, pp. 99-106.

Dulac, F., P. Durand, N. Verdier, J.-B. Renard, M. Mallet, V. Thouret and J.-L. Attié, Developments and plans for new drifting balloon experiments in the Chemistry-Aerosol Mediterranean Experiment (ChArMEx) project. 38th COSPAR Scientific Assembly, Bremen, Germany, 18-25 July. 2010

Dulac F., J.B. Nicolas, J. Sciare, M. Mallet, J.-F. Léon, V. Pont, M. Sicard, J.B. Renard, P. Nabat, L. El Amraoui, E. Jaumouillé, G. Roberts, J.L. Attié, S. Somot, B. Laurent, R. Losno, J. Vincent, P. Formenti, G. Bergametti, L. Doppler, F. Ravetta, J. Pelon, I. Chiapello, H. Delbarre, W. Junkermann, F. Solmon, A. Alastuey, X. Querol, C. Muñoz, D. GarcíaVizcaíno, and S. Nava (2013) The summer 2012 Saharan dust season in the western Mediterranean with focus on the intense event of late June during the Pre-ChArMEx campaign. EGU General Assembly 2013, Vienne (Autriche), 8-12 avril 2013.

- Dulac F., L. Alados Arboledas, A. Alastuey, A. Amodeo, G. Ancellet, J. Arndt, J.-L. Attié, P. Augustin, S. Becagli, G. Bergametti, I. Binietoglou, M. Bocquet, F. Bordier, A. Bourdon, T. Bourrianne, J.A. Bravo-Aranda, D. Carrer, X. Ceamanos, P. Chazette, I. Chiapello, P. Coddeville, A. Comerón, G. D'Amico, B. D'Anna, H. Delbarre, C. Denjean, K. Desboeufs, J. Descloîtres, M. Diouri, C. Di Biagio, T. Di Iorio, G. Di Sarra, L. Doppler, P. Durand, L. El Amraoui, R. Ellul, H. Ferré, L. Fleury, P. Formenti, E. Freney, C. Gaimoz, E. Gerasopoulos, P. Goloub, J.L. Gómez-Amo, M.J. Granados-Muñoz, N. Grand, J. Gröbner, J.-L. Guerrero Rascado, C. Guieu, D. Hadjimitsis, E. Hamonou, H.C. Hansson, M. Iarlori, S. Ioannou, C. Jambert, E. Jaumouillé, M. Jeannot, W. Junkermann, C. Keleshis, P. Kokkalis, D. Lambert, B. Laurent, J.-F. Léon, C. Liousse, M. Lopez Bartolome, R. Losno, M. Mallet, R.-E. Mamouri, D. Meloni, L. Menut, N. Montoux, R. Morales Baquero, P. Nabat, F. Navas-Guzmán, D. Nicolae, J.B. Nicolas, G. Notton, W. Ohayon, C. Paoli, A. Papayannis, G. Pappalardo, J. Pelon, J. Pey, V. Pont, M. Pujadas, X. Querol, F. Ravetta, J.-B. Renard, V. Rizi, G. Roberts, J.-L. Roujean, K.N. Sartelet, S. Sauvage, J.-L. Savelli, J. Sciare, K. Sellegri, D.M. Sferlazzo, M. Sicard, A. Smyth, F. Solmon, D. Tanré, B. Torres, J. Totems, A. Tovar Sánchez, N. Verdier, D. Vignelles, J. Vincent, F. Wagner, Y. Wang, J. Wenger, and N. Yassaa (2013) Overview of the Project ChArMEx activities on Saharan Dust in the Mediterranean region. 7th Int. Workshop Sand/Duststorms and Associated Dustfall, Frascati, Italy, 2-4 Dec. 2013.
- Durand, P., J.-L. Attié, C. Basdevant, F. Dulac, C. Fesquet, M. Mallet, J.-B. Renard, V. Thouret and N. Verdier, 2013, Low-level drifting balloons during ChArMEx, The Second ChArMEx International Workshop, Barcelona, Spain, May 26-28
- Durand, P., J. L. Attié, C. Basdevant, F. Bernard, F. Dulac, F. Gheusi, F. Lohou, M. Lothon, M. Mallet, J. B. Renard, and N. Verdier, 2012, Boundary-layer drifting balloons for chemistry-dynamics studies in the Mediterranean region. Proc. 20th Symposium on Boundary Layer Turbulence, Boston, MA., 8-13 July (https://ams.confex.com/ams/20BLT18AirSea/webprogram/Manuscript/Paper209062/Extended_balloons_BLT12_def.pdf).
- Renard, J.-B., G. Berthet, F. Dulac, J. Sciare, J. Nicolas, M. Mallet, P. Durand, C. Thauray, S. Salles, J.-L. Mineau, T. Tonnelier and N. Verdier, 2012, LOAC (Light Optical Particle Counter): a new small balloon-borne aerosol counter/sizer with some particle characterization capabilities. European Aerosol Conference EAC-2012, Granada, Spain, 2-7 Sep..
- El Amraoui L., J.-L. Attié, E. Jaumouillé, F. Ravetta, G. Ancellet, P. Durand, F. Dulac, P. Ricaud, B. Sic, E. Hache, and N. Verdier, An overview of Modelling Activities during the TRAQA Pre-ChArMEx Campaign, European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria, 07 – 12 April 2013.
- Parmentier J. , L. El Amraoui, J.-L Attié, M. Plu, B. Josse, V. Marécal, Evaluation of different emission inventories on the O3 and CO evolution within the CTM MOCAGE, European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria, 27 April – 02 May 2014.
- Renard, J.-B. et al., LOAC (Light Optical Particle Counter), a new small aerosol counter with particle characterization capabilities for surface and airborne measurements, EGU, Vienne, 8-12 Avril 2013.
- Renard, J.-B. et al., LOAC (Light Optical Particle Counter) a new aerosols counter for the determination of their sizes and their main nature under meteorological balloons, CIMO-TECO-METEOREX, Bruxelles (Belgique), 17-18octobre 2012.
- Renard, J.-B. et al., LOAC (Light Optical Aerosol Counter): a new small balloon-borne aerosol counter/sizer with some particle characterization capabilities, European Aerosols Conference, Grenade (Espagne), 22-26 septembre 2012.

Ateliers et Colloques

- Basart S., P. Nabat, F. Dulac, M. Mallet, J.M. Baldasano, Laurent, L. Menut, L. El Amraoui, J.-P. Chaboureaud, J.-F. Léon, F. Solmon, B. Sic, and S. Bouffiès-Cloché (2014) ChArMEx dust model intercomparison over

summer 2012 : Preliminary results. Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère, Toulouse, France, 20-22 Jan. 2014.

Di Biagio, C., C. Gaimoz, N. Grand, R. Loisil, P. Zapf, S. Chevallier, F. Ravetta, and P. Formenti, Airborne observations of urban pollution and Saharan dust aerosols over the Mediterranean basin during the TRAQA campaign, 3rd ChArMEx International Workshop, Cargèse, France, 5-9 novembre 2012.

Dulac, F., Mesures quasi-lagrangiennes d'ozone et d'aérosols sous ballon traceur dans la basse troposphère, Atelier Expérimentation et Instrumentation, Paris, France, 28-30 mars 2013.

Durand, P., et al., 2012, Balloon operations in TRAQA. 3rd ChArMEx International Workshop, Cargèse, France, 5-9 novembre 2012.

Jaumouillé, E., J.-L. Attié, L. El Amraoui, and V. Marécal, A pollutant plume study in the western Mediterranean region during the Pre-ChArMEx//TRAQA campaign, 3rd ChArMEx International Workshop, Cargèse, France, 5-9 novembre 2012.

Nabat P., S. Somot, M. Mallet, M. Michou, F. Sevault, A. Culot, E. Bruhier et l'équipe ChArMEx : Interactions aérosols-rayonnement-atmosphère-océan sur la région méditerranéenne durant l'été 2012 (campagne TRAQA/ChArMEx), Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère, Toulouse, France, 20-22 janvier 2014.

Renard, J.-B. et al., Analyse des aérosols : Un exemple (réussi) de synergie Recherche et Industrie, colloque capteurs et instrumentations pour l'environnement et les géosciences, Orléans, 27-28 octobre 2011 (présentation invitée).

Renard, J.-B. et al., Projet LOAC. Colloque ANR Journées Technologies, Orléans, 8-10 novembre 2011.

Renard, J.-B. et al., Une brève histoire du LOAC, Atelier LOAC, Paris, 14 mai 2013.

Renard, J.-B. et al., LOAC (Light Optical Particle Counter), a new aerosols counter under meteorological balloons for the determination of the aerosol sizes and their main nature, CMO working group, WMO, Genève (Suisse), 5 mars 2013.

Rapports :

Attié, J.L. et al., 2012, TRANsport et Qualité de l'Air au dessus du bassin Méditerranéen (TRAQA). Rapport scientifique intermédiaire concernant le contrat ADEME, août 2012 (43 pp.).

Durand, P., J.L Attié, C. Basdevant, F. Bernard, F. Dulac, F. Gheusi, M. Mallet, J.B Renard et N. Verdier, 2012, Rapport TRAQA/pré- ChArMEx. Rapport de fin de contrat CNES, 22p.

Thèses dans lesquelles les mesures TRAQA ont ou vont être utilisées :

Baghi, R., 2013, Émissions biogéniques de composés organiques volatils en région méditerranéenne : développement instrumental, mesures et modélisation, Thèse de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, 211pp. (Directeurs de thèse : P. Durand et C. Delon)

Nabat, P. , Oct. 2014 : Interaction aérosol-rayonnement-nuages et variabilité climatique en Méditerranée : approche par la modélisation régionale couplée (Directeurs de thèse : Michel Déqué, Samuel Somot et Marc Mallet)

Nisart J., 2014-2017, Composition de la chimie et des aérosols de l'atmosphère sur le bassin Méditerranéen : Résultats des campagnes CharMex 2012-2014 (Thèse de l'Université Paul Sabatier de Toulouse) En préparation (directeurs de thèse : L. El Amraoui et J.-L. Attié)

3-Publications en cours

- Attié et al., The ChArMEx/Transport and Air Quality over the Mediterranean basin experimental campaign, 2014, en preparation pour Atmos. Chem. Phys.
- Basart, S., Dulac, F., Baldasano, J.M., Nabat, P., Leon, J.-F., Chaboureau, J.-P., Laurent, B., Menut, L., Mallet, M., El-Amraoui, L., et al. Dust regional model intercomparison: a study case in western Mediterranean for summer 2012, 2014, *en preparation pour Atmos. Chem. Phys.*
- Di Biagio C., L. Doppler, C. Gaimoz, N. Grand, R. Loisil, P. Zapf, S. Chevallier, K. Desboeufs, S., Triquet, G. Ancellet, J. Pelon, F. Ravetta, and P. Formenti Airborne observations of atmospheric aerosols over the north-western Mediterranean basin in summertime: vertical distribution and variability of physico-chemical and optical properties, 2014, en préparation pour Atmos. Chem. Phys.
- Gheusi, F., P. Durand, N. Verdier, P. Commun, A. Clenet, L. El Amraoui, E. Hache, E. Jaumouillé : Adaptations of ECC ozone sondes for long-duration flights with boundary-layer pressurized balloons., 2014, en préparation pour Atmos. Meas. Tech.
- Nabat, P. S. Somot, M. Mallet, M. Michou, F. Sevault, F. Driouech, D. Meloni, A. Di Sarra, C. Di Biagio, P. Formenti, M. Sicard, J.-F. Léon, and M.-N. Bouin (2014) Dust aerosol radiative effects during summer 2012 simulated with a coupled regional aerosol-atmosphere-ocean model over the Mediterranean. Atmos. Chem. and Phys., submitted