

ECOS-Sud

Comité : Evaluation - Orientation de la Coopération Scientifique
(Argentine - Chili - Uruguay)

Programme de coopération ECOS-Chili : **Rapport de fin d'action**

(doit être adressé à ECOS-Sud exclusivement sous forme électronique
à la fin du mois de février qui suit la fin de l'action ; les tirés à part
des publications seront envoyés séparément par courrier ordinaire)

A. DESCRIPTIF DE L'ACTION :

1. Identification :

Code de l'action : C03U04.....

Titre : Impact des aérosols naturels et anthropiques sur les champs de stratocumulus au large du Chili.....

2. Établissement principal¹ :

en France : CNRS Centre National de la Recherche Scientifique

Laboratoire² (ou équipe) : Laboratoire d'Optique Atmosphérique (UMR 8518) puis Laboratoire de Météorologie
Dynamique (UMR 8539).....

Nom du Directeur : Didier Tanré (au LOA), Hervé Le Treut (au LMD)

au Chili :

Laboratoire (ou équipe) : Centro de Modelamiento Matematico (UMI CNRS 2807), Université du Chili.....

3. Responsables du projet :

en France

Nom et prénom : LE TREUT Hervé..... Grade : DR CNRS 1^{ère} classe

Adresse administrative : LMD-ENS Université Paris 6, Case courrier 99, 75252 Paris cedex 05

Téléphone : 01 44 32 22 29..... Télécopie : 01 43 36 83 92..... Courrier électronique : letreut@lmd.ens.fr

au Chili

Nom et prénom : GALLARDO KLENNER Laura..... Grade : Professeur adjointe.....

Adresse administrative : CMM Universidad de Chile, Casilla 1703, Santiago, Chile

Téléphone : 56 2 978 48 82..... Télécopie : 56 2 688 97 05..... Courrier électronique : lgallard@dim.uchile.cl

¹ Auquel appartient le responsable scientifique du projet.

² Indiquer le statut de l'Unité : URA, UPR, U. INSERM, U. INRA, Equipe d'Accueil MESR, etc.

ECOS-Sud

Comité : Evaluation - Orientation de la Coopération Scientifique
(Argentine - Chili - Uruguay)

4. Liste des chercheurs participant au projet (en indiquant le grade et la structure de rattachement) :

en France :

Chercheurs principaux

Olivier BOUCHER (DR2 CNRS, LOA) jusqu'à mi-projet (départ en mars 2005 au MetOffice au Royaume-Uni)

Isabelle CHIAPELLO (CR1 CNRS, LOA,) et Jean-François LEON (CR2 CNRS, LOA) à partir de la seconde moitié du projet, en remplacement de Marie DOUTRIAUX-BOUCHER (Maître de conférences, LOA/USTL) et Bruno SPORTISSE (ingénieur CERERE Ecole Nationale des Ponts et Chaussée)

Chercheurs associés :

Nicolas HUNEEUS (Thèse CNES – Région Nord-Pas-de-Calais), LOA

Hervé LE TREUT (DR1 CNRS), LMD

au Chili :

Laura GALLARDO KLENNER (Professeur adjointe), CMM-Université du Chili

José RUTLLANT (Professeur associé), Université du Chili, département de Géophysique

.....

ECOS-Sud

Comité : Evaluation - Orientation de la Coopération Scientifique
(Argentine - Chili - Uruguay)

B. PRODUCTION DE L'ACTION :

1. Publications : seules seront prises en compte celles portant mention du programme ECOS.

Fournir dans les pages suivantes, pour chacune des rubriques suivantes, la liste de références précises indiquant les noms des auteurs, les titres, les noms des revues ou éditeurs, l'année et le cas échéant, la pagination ou le nombre de pages.

1a. Nombre d'articles parus, sous presse ou acceptés pour publication dans des revues à comité de lecture international (envoyer un tiré-à-part de chaque) : 1 dont co-signées : 1

Huneus, N., L. Gallardo, and J.A. Rutllant, Offshore transport episodes of anthropogenic sulphur in northern Chile: Potential impact on the stratocumulus cloud deck, *Geophysical Research Letters*, 33, L19819, doi: 10.1029/2006GL026921, 2006.

1b. Nombre d'articles parus, sous presse ou acceptés pour publication dans des revues à comité de lecture national (envoyer un tiré-à-part de chaque) : _____ dont co-signées : _____

1c. Nombre d'articles parus, sous presse ou acceptés pour publication dans d'autres revues (envoyer un tiré-à-part de chaque) : 1

Oyanadel, A., D. Painemal, J.F. León, I. Chiapello, and L. Gallardo, Aerosol loading over Santiago de Chile (33°.3'S 70°.5'W, 500 m.a.s.l): a comparison between satellite and in situ measurements, *Proceedings of the 8th ICSHMO (International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography)*, pp. 149-155, Foz do Iguaçu, Brazil, April 2006.

1d. Nombre de chapitres d'ouvrages collectifs (envoyer une photocopie de la page de couverture et du sommaire) : _____

1e. Nombre de livres (envoyer une photocopie de la page de couverture) : _____

1f. Nombre de productions audiovisuelles (fournir le détail dans la suite) : _____

1g. Autres productions (fournir le détail dans la suite) : _____

ECOS-Sud

Comité : Evaluation - Orientation de la Coopération Scientifique
(Argentine - Chili - Uruguay)

2. Communications à des colloques :

Fournir dans la suite, pour chacune des rubriques suivantes, la liste de références précises (noms des auteurs, titres) et envoyer la photocopie du résumé figurant aux actes.

2a. Nombre de communications orales ou affichées présentées à des colloques internationaux : 3

Gallardo, L., O. Boucher, and N. Huneus, Potential impacts of sulfur aerosols off the coast of Central and Northern Chile: A preliminary assessment, 7th "International Global Atmospheric Chemistry" Scientific Conference, Crete, 18-25 September 2002.

Huneus, N., L. Gallardo K, and José A. Rutllant, Offshore transport episodes of anthropogenic sulphur in northern Chile: Potential impact on the stratocumulus cloud deck, , 14th conference on interaction of the sea and atmosphere, AMS, Atlanta (USA), January 2006.

Oyanadel, A., D. Painemal, J.F. León, I. Chiapello, and L. Gallardo, Aerosol loading over Santiago de Chile (33°.3'S 70°.5'W, 500 m.a.s.l): a comparison between satellite and in situ measurements, 8th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, Foz do Iguaçu, Brazil, April 2006.

2b. Nombre de communications orales ou affichées présentées à des colloques nationaux : 1

Huneus, N., L. Gallardo, J. Rutllant, and O. Boucher, Dispersion of sulphur aerosols off the coast of Northern Chile: An exploratory study, Simposio de Cambio Global: hacia una vision sistematica, Puntas Arenas, Chili, 23-25 janvier 2003.

3. Mémoires :

Fournir dans la suite, pour chacune des rubriques suivantes, la liste de références précises (noms des auteurs, titres, Université de soutenance, nombre de pages) et envoyer une photocopie de la page de couverture.

3a. Nombre de thèses de doctorat soutenues par des chiliens en France : ~~1~~ dont cotutelles : 0

Le projet ECOS a indirectement donné lieu à une thèse de doctorat soutenue par un chilien en France sur un sujet connexe au projet ECOS entre le LOA/LMD et le CMM/Université de Santiago.

3b. Nombre de thèses de doctorat soutenues par des chiliens au Chili : _____ dont cotutelles : _____

3c. Nombre de thèses de doctorat soutenues par des français : _____ dont cotutelles : _____

3d. Nombre de mémoires de DEA soutenus par des chiliens : _____

3e. Nombre de mémoires de DEA soutenus par des français : _____

3f. Autres types de mémoires (fournir également les informations complémentaires dans la suite) : _____

ECOS-Sud

*Comité : Evaluation - Orientation de la Coopération Scientifique
(Argentine - Chili - Uruguay)*

4. Autres productions : participation à des cursus de post-graduation (indiquer les références des cursus), brevets déposés, conférences, etc. :

SEMINAIRES AU CHILI

1. Isabelle Chiapello, au Département de Géophysique, Université du Chili, octobre 2005
«Understanding the long-term variability of African dust as recorded in surface concentrations and TOMS observations.»
2. Jean-François Léon, au CMM, Université du Chili, octobre 2005
"Aerosol remote sensing from PARASOL and the A-Train."
3. Jean-François Léon, au CMM, Université du Chili, novembre 2006
«Aerosol remote sensing from Space and Application to Air Quality».

SEMINAIRES EN FRANCE

1. Laura Gallardo Klenner, au LOA, mai 2004
"Impacts of natural and anthropogenic aerosols on the stratocumulus deck off Chile."
2. José Rutland, au LOA, février 2007
« Présentation du projet VOCALS. »

Exposé scientifique (cf. les indications fournies dans la lettre d'accompagnement ; ajouter autant de pages que nécessaire) :

1. EXPOSE DES TRAVAUX DE RECHERCHE

1.1. Impact des aérosols naturels et anthropiques sur les stratocumulus au large du Chili (contributions de O. Boucher, L. Gallardo, N. Huneus, J. Rutllant)

Cette étude, qui a été réalisée principalement pendant les 18 premiers mois du projet, avait pour objectif d'estimer le forçage radiatif des aérosols soufrés anthropiques au large du Chili, ainsi que leurs interactions avec les nuages (stratocumulus au large de la côte chilienne). Dans cette région du monde, les aérosols soufrés ont diverses sources : émissions anthropiques des usines d'extraction des métaux (en particulier le cuivre) et émissions naturelles de DMS océanique et de SO₂ volcanique.

Des simulations globales étaient disponibles mais des simulations complémentaires ont été réalisées au LOA et au CMM. L'étudiant en thèse Nicolas Huneus (LOA) a réalisé une simulation avec le modèle de circulation générale LMDZ en incluant un zoom sur la région d'intérêt au Chili. Cette simulation a nécessité la préparation des conditions aux limites (météorologie ECMWF pour le nudging, climatologie d'oxydants, émissions des différents types d'aérosols). Le modèle a été intégré sur la période juin-juillet-août 2000 après une période de spin-up.

De plus des simulations réalisées à un modèle de chimie-transport 3-D ont été comparées aux observations du satellite MODIS (MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer) de rayon effectif de gouttelles nuageuses, et de concentrations en gouttelles. Ces premières comparaisons ont mis en évidence une perturbation potentielle du champ de stratocumulus liée à la présence d'aérosols soufrés anthropiques et ont donné lieu à une publication dans la revue « Geophysical Research Letters » [Huneus *et al.*, 2006] et à plusieurs présentations dans des colloques nationaux et internationaux.

Visites des chercheurs chiliens : Laura Gallardo en mai 2004 (au Laboratoire d'Optique Atmosphérique et à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées), et José Rutllant en juillet 2004 (au Laboratoire de Météorologie Dynamique et au Laboratoire d'Optique Atmosphérique).

A PARTIR DE 2005 , LE PLAN DE TRAVAIL DU PROJET INITIAL A DU ETRE MODIFIE EN RAISON DU DEPART DU RESPONSABLE FRANÇAIS DU PROJET, OLIVIER BOUCHER , AU MET OFFICE AU ROYAUME-UNI . OLIVIER BOUCHER A ETE REMPLACE PAR HERVE LE TREUT (LMD), QUI A PRIS LA RESPONSABILITE DU PROJET. LES PARTICIPANTS FRANÇAIS AU PROJET ONT EGALEMENT CHANGES : ISABELLE CHIAPELLO ET JEAN-FRANCOIS LEON ONT REMPLACE MARIE DOUTRAUX-BOUCHER , ET BRUNO SPORTISSE. LE PROJET A ALORS ETE REORIENTE SUR L'ANALYSE DES OBSERVATIONS SATELLITAIRES POUR LA CARACTERISATION DES AEROSOLS AU CHILI. LES PRINCIPAUX TRAVAUX DE RECHERCHE MENES DANS LA SECONDE MOITIE DU PROJET SONT EXPOSES CI-APRES.

1.2. Utilisation du satellite GOES pour la détection des poussières du désert de l'Atacama (contributions de J.F. Léon, D. Painemal)

Cette étude a été initiée durant les visites de Jean-François Léon et Isabelle Chiapello au Chili en octobre 2005 et réalisée en grande partie durant le séjour d'un mois de l'étudiant chilien David Painemal au LOA en novembre-décembre 2005.

L'objectif principal de ce travail était de tester la faisabilité de l'utilisation des mesures de l'infrarouge thermique du satellite geostationnaire GOES pour la détection des poussières minérales sur le désert de l'Atacama (au nord du Chili). Cette approche a en effet été développée au LOA pour détecter les poussières minérales au-dessus de l'Afrique du nord à partir des données METEOSAT [Legrand *et al.*, 2001]. De la même façon un produit IDDI (Infrared Difference Dust Index) a été calculé à partir des mesures de GOES d'août 2001 à juin 2002. Cette méthode repose sur la détection du contraste thermique induit par la présence de larges particules minérales au-dessus d'une surface plus chaude que la couche d'aérosols. Nous obtenons ainsi une détection de la présence de poussières, mais pas une évaluation précise de leur quantité. La courte étude menée dans le cadre de ce projet montre qu'en raison des quantités faibles de poussières et de leur répartition géographique très localisée, ainsi que des forts gradients thermiques liés à la présence du relief et des nuages côtiers, la méthode précédemment décrite n'offre pas de résultats permettant de conclure positivement et de développer davantage cette approche.

1.3. Analyse des observations satellitaires de MODIS sur l'agglomération de Santiago (contributions de I. Chiapello, L. Gallardo, J.F. Léon, A. Oyanadel, D. Painemal)

Deux étudiants chiliens ont contribué à cette étude, Alejandra Oyanadel et David Painemal. L'objectif principal de ce travail était d'évaluer la possibilité d'utiliser les observations satellitaires de MODIS pour la détection de la charge en aérosols au-dessus de l'agglomération de Santiago du Chili. Santiago est en effet une ville de plus de 6 millions d'habitants, qui est fréquemment exposée à des panaches élevés de pollution particulaire. Pour cette étude nous nous sommes appuyés sur les mesures de concentration en particules (PM10 et PM2.5) disponibles au sol, et qui permettent une estimation directe de la qualité de l'air pour la population. Nous avons d'abord comparé ces mesures de PM à celles d'épaisseur optique en aérosol (EOA) mesurées par un photomètre solaire situé au sol à Santiago entre août 2001 et octobre 2002. Ces comparaisons ont montré des corrélations dans l'ensemble assez faibles entre mesures optiques d'EOA et PM2.5 ($R \leq 0.47$), notamment en comparaison à ce qui a été observé sur d'autres villes, comme en Europe à Milan par *Chu et al.* [2003] (R de l'ordre de 0.8). Une explication possible est la présence de panaches d'aérosols en altitude provenant de sources extérieures à l'agglomération (usine d'extraction de cuivre située au sud de Santiago). De plus l'analyse des observations de MODIS a montré des différences marquées avec les mesures d'EOA au sol, en particulier pour le cycle saisonnier des contenus en aérosols et également une corrélation faible ($R < 0.3$). Plusieurs explications sont possibles, la présence fréquente de cirrus au-dessus de Santiago qui pourrait contaminer les observations de MODIS, ou une mauvaise caractérisation de la surface et/ou du profil vertical de l'aérosol dans l'algorithme MODIS. Dans tous les cas il semble que l'utilisation de l'EOA comme proxy pour les études de qualité de l'air en particules à Santiago ne soit pas appropriée. Cette étude a donné lieu à une publication dans un proceeding de la conférence ICSHMO [*Oyanadel et al.*, 2006].

1.4. Analyse des aérosols dans la région d'Arica au nord du Chili (contributions de I. Chiapello, L. Gallardo, J.F. Léon, C. Mora, J. Rutllant)

Cette étude a été initiée pendant les visites d'Isabelle Chiapello et Jean-François Léon au Chili en novembre 2005 et c'est principalement l'étudiante chilienne Cindy Mora qui a réalisé le travail au Chili et pendant son séjour d'1 mois au LOA en janvier-février 2006. Son objectif est d'interpréter les mesures d'épaisseur optique en aérosol (EOA) du photomètre solaire du réseau AERONET situé à Arica au nord du Chili. En effet ce photomètre qui a fonctionné pendant plusieurs années (1998 à 2004) met en évidence des pics d'aérosols très élevés ($EOA > 0.7$ à 440 nm), particulièrement durant l'été austral (décembre-mars). Il s'agit donc de tenter d'identifier les sources d'aérosols à l'origine de ces pics en s'appuyant sur les mesures optiques des propriétés des aérosols fournies par le photomètre, et en s'aidant des données météorologiques et des observations satellitaires disponibles. Les simulations du modèle MATCH viendront également aider à l'interprétation de ces mesures.

Les sources d'aérosols possibles dans cette région du Chili sont nombreuses et leurs proportions respectives sont encore très mal connues. Les aérosols soufrés peuvent avoir à la fois une origine naturelle (dégazage des volcans de la cordillère des Andes) et une origine anthropique (émissions de SO_2 issues des usines d'extraction de cuivre à proximité). L'influence des poussières minérales du désert de l'Atacama, bien qu'à priori faible (voir section 1.2.) ne peut pas être totalement écartée compte-tenu de la proximité géographique du site de mesures. Le site d'Arica est par ailleurs situé sur la côte Pacifique du Chili et peut donc subir l'influence d'aérosols marins. Enfin, les feux de forêt se produisant chaque année au Brésil en octobre-novembre émettent de grandes quantités d'aérosols carbonés qui pourraient également influencer les mesures d'EOA d'Arica.

L'analyse des propriétés optiques des aérosols en période de pic fournies par le photomètre d'Arica sur la période 1999-2000 a montré la prédominance d'aérosols non-absorbants, ce qui suggère l'influence dominante d'aérosols soufrés et éventuellement de sels marins. L'examen des données météorologiques associées aux pics d'aérosols mesurés à Arica ne met pas en évidence d'augmentation de la vitesse du vent, ce qui suggère une influence limitée des sels marins sur ces pics. Ceci est confirmé par les distributions en taille des particules restituées par les mesures optiques, qui montrent la prédominance de fines particules. L'influence des sels de mers et/ou des poussières de l'Atacama (aérosols grossiers), n'explique donc par

ECOS-Sud

Comité : Evaluation - Orientation de la Coopération Scientifique
(Argentine - Chili - Uruguay)

les pics d'aérosols mais peut malgré tout contribuer à un niveau de fond de la charge en particules. De plus il est à noter que les pics d'aérosols sont toujours associés à une augmentation du contenu en eau précipitable.

Notre objectif lors de cette étude était également d'utiliser les observations du satellite OMI (Ozone Monitoring Instrument) sur AURA pour estimer les émissions de SO₂ des volcans du Chili et donc les différencier de l'influence anthropique des émissions des usines d'extractions de cuivre. Cette partie de l'étude n'a pas pu se faire à cause du retard de plusieurs mois de la distribution des produits SO₂ d'OMI par l'équipe américaine de la NASA (données toujours non disponibles en mars 2007). Toutefois, dès que ces produits seront disponibles, nous espérons pouvoir les utiliser pour estimer les parts anthropique et naturelle des aérosols soufrés présents dans la région du nord du Chili.

Nous avons par ailleurs examiné directement les produits aérosols issus du satellite MODIS sur la région du nord du Chili. Les premières analyses des images journalières et mensuelles d'EOA restituées par MODIS sont préliminaires et non suffisantes pour apporter des conclusions définitives sur l'origine des pics d'aérosols soufrés mesurés à Arica. Toutefois MODIS restitue bien des panaches d'aérosols sur la région d'Arica pendant l'été austral (voir exemple Figure 1 du mois de décembre 2000) et permet d'apporter des premiers éléments de réponse en terme d'origine des aérosols mesurés. Sur l'exemple de décembre 2000 présenté figure 1, MODIS montre ainsi un panache d'aérosols assez intense dans la région du sud du Pérou, ce qui laisse à penser que les pics observés à Arica à cette période proviennent très probablement des émissions de soufre de l'usine d'extraction de cuivre d'Ilo (située au sud du Pérou à 17°S, 71°W). MODIS montre également un panache d'aérosols moins intense au-dessus de la cordillère des Andes (qui pourrait donc être associés à du dégazage des volcans), et un autre au sud de l'usine d'extraction de cuivre de Chuquicamata (22.3°S, 68.9°W). On ne peut donc pas complètement exclure une contribution d'aérosols soufrés d'origine volcanique sur les pics mesurés à Arica.

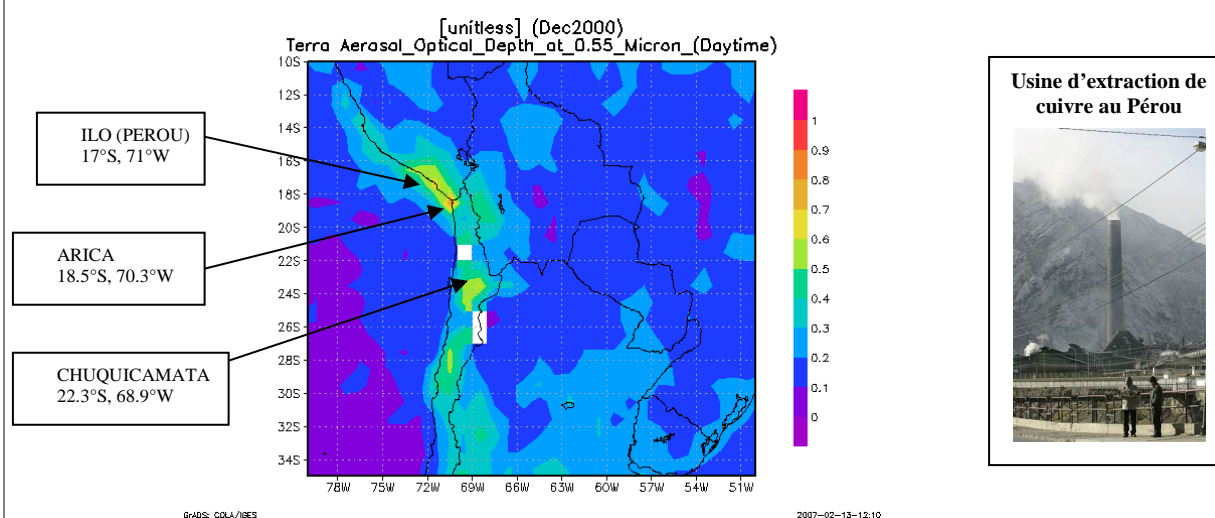


Figure 1. MODIS/Terra Epaisseur Optique en Aérosol à 0.55µm pour décembre 2000. Sont indiqués: le site de mesures photométriques AERONET d'Arica, ainsi que les usines d'extractions de cuivre d'Ilo et Chuquicamata.

En conclusion cette étude n'a pas pu être complètement finalisée, à la fois par manque de temps mais également du fait de la non disponibilité de certaines observations satellitaires. Nous espérons toutefois d'ici à la fin 2007 pouvoir faire progresser le travail, et rédiger un article avec nos collègues chiliens sur ce thème.

ECOS-Sud

*Comité : Evaluation - Orientation de la Coopération Scientifique
(Argentine - Chili - Uruguay)*

2. CONCLUSIONS, RETOMBÉES ET PERSPECTIVES

Pour faire le bilan de ce projet, on peut dire que le changement de participants et de thématiques de recherche à mi-parcours n'a pas facilité la finalisation de l'ensemble des travaux de recherche menés. En ce sens, l'objectif du projet n'est pas complètement atteint à ce jour, en particulier concernant la caractérisation des aérosols au nord du Chili (section 1.4), et l'évaluation des contributions des sources naturelle et anthropique aux pics d'aérosols particulièrement intenses observés dans cette région. Toutefois, ce projet ECOS a permis de mettre en place une vraie collaboration scientifique entre le LOA et l'équipe de Laura Gallardo au Chili. Nous espérons pouvoir finaliser l'étude des aérosols au nord du Chili et la publier d'ici à la fin de l'année 2007. De plus les visites d'étudiants chiliens au LOA (en 2005 et début 2007) ont été fructueuses et ont permis de contribuer à la formation de l'équipe chilienne aux différents moyens d'observations des aérosols, aussi bien par satellite que par des mesures au sol.

Pour la suite ce projet ECOS aura également initié des discussions entre les équipes nuages et aérosols du LOA et les chercheurs chiliens, sur la possibilité d'une collaboration future (2007-2008) dans le cadre du projet VOCALS-REx (Vamos Ocean-Cloud-Atmosphere-Land Study - Regional Experiment). Il s'agit d'une expérience de mesures internationale qui a pour objectif de mieux comprendre les processus du système climatique du Sud Est de l'océan Pacifique, en particulier les interactions entre les nuages et les aérosols. La période d'observations intensives est prévue en octobre 2008, et le LOA pourrait y participer en fournissant des mesures au sol et/ou aéroportées, et des observations satellitaires des nuages et des aérosols. En terme de retombées futures, la collaboration scientifique mise en place avec Laura Gallardo dans le cadre de ce projet ECOS, et l'étude menée sur Santiago du Chili (section 1.3), pourront être très utiles pour des projets européens en cours de montage sur l'étude des Mégacités en Europe. En effet Laura Gallardo participe de son côté à un projet « Megacities » sur l'Amérique du sud et grâce à cette collaboration, nous pourrions faire le lien avec les études futures en Europe.

Pour le moment la coopération appuyée par le programme ECOS ne débouche pas directement sur une action de type internationale (ni soutenue par l'Union Européenne).

3. PUBLICATIONS ET OUVRAGES ISSUS LA COOPERATION

3.1. COSIGNEES PAR LES DEUX EQUIPES ET REMERCIANT ECOS

Huneus, N., L. Gallardo, and J.A. Rutllant, Offshore transport episodes of anthropogenic sulphur in northern Chile: Potential impact on the stratocumulus cloud deck, *Geophysical Research Letters*, 33, L19819, doi: 10.1029/2006GL026921, 2006.

Oyanadel, A., D. Painemal, J.F. León, I. Chiappello, and L. Gallardo, Aerosol loading over Santiago de Chile (33°3'S 70°5'W, 500 m.a.s.l): a comparison between satellite and in situ measurements, *Proceedings of 8th ICSHMO (International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography)*, pp. 149-155, Foz do Iguaçu, Brazil, April 2006.