



# Application de la télédétection spatiale pour la surveillance de la pollution de l'atmosphère en aérosols

présenté par Meloë Kacenenbogen  
dans le cadre du D.E.A de Méthodes Physiques en Télédétection,  
Université Pierre et Marie Curie (Paris VI)



Travail réalisé sous la responsabilité de  
Jean François Léon, Isabelle Chiapello et Didier Tanré.  
Laboratoire d'Optique Atmosphérique, UMR CNRS 8518, Université des Sciences et  
Technologies de Lille, Villeneuve d'Ascq  
Du 01/ 03/ 2004 au 30/ 06/ 2004

## **RESUME**

L'objectif de cette étude était d'évaluer la pertinence des informations apportées par l'instrument MODIS embarqué sur les satellites TERRA et AQUA dans le cadre de la surveillance de la pollution de l'atmosphère en aérosols. Nous avons utilisé 3 types de mesures différentes (épaisseurs optiques en aérosol (AOT) AERONET et MODIS, concentrations massiques (PM)). Nous avons comparé les mesures de PM et d'AOT AERONET avant d'étudier l'apport des mesures satellitaires AQUA par rapport à TERRA et de comparer les mesures d'AOT AERONET à celles de MODIS. L'étude porte sur deux épisodes de pollution particulaires survenus en février et août 2003.

A Lille, nous avons observé une évolution annuelle des concentrations en PM<sub>2.5</sub> et PM<sub>10</sub> bi-modale formée principalement de 2 pics de pollution en hiver et en été durant l'année 2003 ainsi qu'un pic maximal de concentration en PM<sub>10</sub> et PM<sub>2.5</sub> plus fort en hiver qu'en été et des valeurs d'AOT plus élevées en été (0.86 en août et 0.42 en février). En étendant l'étude à la France, l'épisode de pollution hivernal semble être dû à un transport de grande échelle consistant en un flux Sud-Nord. Au dessus de Lille et au cours des 2 épisodes de pollution, on peut affirmer que 70% à 80% en masse des particules de diamètre aérodynamique inférieur à 10 µm ont également un diamètre aérodynamique inférieur à 2.5 µm et que les aérosols ont globalement la même taille à l'intérieur de la colonne atmosphérique.

Lorsque l'étude porte sur l'intégralité de l'année 2003 à Lille, les mesures d'AOT AERONET sont relativement peu corrélées aux mesures de concentration massique en PM 2.5 (R égal à 0.53). Au cours des 2 épisodes, bien que ces 2 types de données soient généralement faiblement corrélées en hiver lorsque tous les sites de comparaison sont réunis (R = 0.51), l'épisode d'été montre une meilleure et relativement bonne corrélation (R = 0.75). En examinant les sites individuellement, on montre que le rapport entre les données de PM 2.5 et d'AOT AERONET varie en fonction des sites en hiver, à la différence d'un rapport assez similaire en été. De plus, nous avons remarqué que lors de l'épisode hivernal, supposé recouvrir une plus large échelle spatiale, comparer les données de sites plus éloignés semble aider à s'affranchir d'éventuels pics de pollution locaux.

Grâce à la visualisation de cartes d'épaisseur optique en aérosols et de coefficient d'Angström MODIS, il est possible de localiser et quantifier les panaches d'aérosols de pollution ainsi que de caractériser la taille des particules au dessus d'une partie de l'Europe. Il semblerait qu'en moyenne mensuelle, l'apport du 2nd capteur MODIS sur AQUA ne soit pas significatif à nos hautes latitudes mais réside surtout dans un apport supplémentaire de points de mesures à l'échelle de la journée. Nous observons une assez bonne corrélation entre les données d'AOT AERONET et MODIS (R supérieur à 0.77 pour TERRA, proche de 0.70 pour AQUA) lorsque tous les sites sont réunis au cours des 2 épisodes ainsi que des pentes similaires et très proches de celles présentées par *Chu et al. [2003]*. Il semblerait qu'une variation diurne des données AERONET entre le matin et l'après midi ne soit pas décelée par MODIS pour le pic de pollution du 21 février 2003. Cette observation pourrait provenir d'un pic de pollution au caractère très local ou d'une sensibilité moindre à l'absorption de la part du radiomètre MODIS.

## *Sommaire*

<b>1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>4</b>
1.1	Contexte scientifique.....	4
1.2	Caractéristiques générales des particules.....	4
1.3	Les moyens d'observations.....	5
1.4	Objectif et méthodes .....	5
<b>2</b>	<b>Présentation des données .....</b>	<b>5</b>
2.1	Banque de données sur la qualité de l'air (BDQA/ ADEME) .....	6
2.2	Mesures du réseau AERONET (AErosol RObotic NETwork) .....	6
2.3	Présentation des données satellitaires MODIS.....	8
<b>3</b>	<b>Analyse et interprétation des mesures sol.....</b>	<b>8</b>
3.1	Evolution annuelle des contenus en particules et choix des épisodes de pollution .....	8
3.1.1	Episode « hivernal ».....	12
3.1.2	Episode « estival » .....	13
3.2	Etude de corrélation entre PM2.5 et PM10 sur Lille pour les deux épisodes de pollution particulaires.....	15
3.3	Etude de corrélation entre PM2.5 et AOT AERONET .....	16
3.3.1	Episode de pollution particulaire « hivernal » .....	17
3.3.2	Episode de pollution particulaire « estival » .....	19
<b>4</b>	<b>Analyse et interprétation à partir des observations satellitaires .....</b>	<b>21</b>
4.1	Analyse des cartes d'épaisseurs optiques en aérosols MODIS durant les 2 épisodes de pollution particulières.....	21
4.2	Comparaison des observations d'aérosols fournies par MODIS/ AQUA et TERRA.....	23
4.3	Etude de corrélation entre les mesures d'AOT AERONET et les restitutions d'AOT MODIS. 25	
<b>5</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>28</b>
<b>6</b>	<b>Références .....</b>	<b>30</b>
<b>7</b>	<b>Remerciements .....</b>	<b>31</b>
<b>8</b>	<b>ANNEXE .....</b>	<b>31</b>

**Page de garde :** Composition colorée à partir des canaux de MODIS sur AQUA le 31/ 03/ 2003 montrant un transport d'aérosols sur l' Atlantique Nord (crédit : J. Descloîtres, MODIS rapid response team.

# 1 Introduction

## 1.1 Contexte scientifique

Les aérosols atmosphériques sont de fines particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère (à l'exception des gouttelettes nuageuses). Ces particules ont deux modes de formation. Elles peuvent provenir de sources primaires, c'est à dire émises directement dans l'atmosphère sous forme particulaire (cendres volcaniques, embruns marins, poussières désertiques, poussières industrielles) ou de sources secondaires par transformation de la phase gazeuse en phase particulaire (sulfates, composés organiques, etc...). Les aérosols influencent le climat de manière significative en modifiant l'équilibre radiatif de la planète. Ils agissent de deux manières distinctes, en absorbant et en diffusant le rayonnement solaire, dont une partie de l'énergie est rétro diffusée vers l'espace ainsi que distribuée dans la colonne atmosphérique (effet direct), mais aussi en modifiant les propriétés optiques des nuages suite à un changement de leurs propriétés microphysiques (effet indirect) [IPCC, 2001]. Les aérosols ont également un rôle majeur dans notre perception de la qualité de l'air (réduction de la visibilité) et sur la santé humaine. En effet, le rôle des particules en suspension a été démontré dans certaines atteintes fonctionnelles respiratoires, le déclenchement de crises d'asthme et la hausse du nombre de décès pour cause cardio-vasculaire ou respiratoire, notamment chez les sujets sensibles (enfants, bronchitiques chroniques, asthmatiques,...). Certains hydrocarbures portés par les particules d'origine automobile, sont classés comme probablement cancérigènes chez l'homme. D'après un récent rapport de l'Agence Française de Sécurité Sanitaire et Environnementale, la pollution liée aux particules fines en ville aurait causé entre 6500 et 9500 décès en 2002 [AFSSE, 2004]. Le sujet de cette étude est rattaché à l'observation du contenu en aérosol pour la caractérisation de la pollution atmosphérique.

## 1.2 Caractéristiques générales des particules

La toxicité des particules en suspension est essentiellement due aux particules de diamètre inférieur à 10  $\mu\text{m}$  (« PM » pour « Particulate Matter »), les plus grosses étant arrêtées puis éliminées au niveau du nez et des voies respiratoires supérieures. Les aérosols de sources primaires sont généralement (exception des suies) supérieurs au micromètre alors que ceux de source secondaire sont de taille submicronique. La Figure (i) ci-dessous décrit la distribution en taille des aérosols. La taille des particules s'étale sur une large gamme de rayons (Figure (i)). Elle est caractérisée par principalement 3 modes (mode fin pour des particules de l'ordre du centième de micromètre, le mode d'accumulation avec quelques dixièmes de micromètres et le mode grossier avec un diamètre supérieur au micromètre). D'après la Figure (i) ci-dessous, les particules dites de concentration PM 2.5 comprennent le mode fin et une partie significative du mode grossier alors que celles de concentration PM 10 comprennent la plupart des particules suspendues.

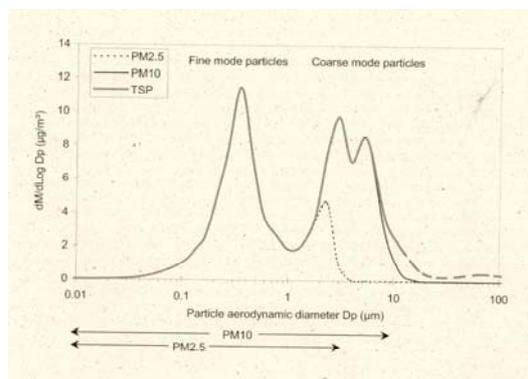


Figure (i) : Distribution en taille des aérosols ; TSP pour « Total Suspended Particles » et « PMx » signifie la concentration massique en particules de diamètre aérodynamique inférieur à  $x\mu\text{m}$ , d'après Joint Research Center [2003]

La nature chimique de la particule et la longueur d'onde du rayonnement incident déterminent l'indice complexe de réfraction de la particule (la partie imaginaire de cet indice conditionne l'absorption par les particules alors que la partie réelle, leur propriétés diélectriques). L'humidification de l'aérosol entraîne une diminution de l'indice de réfraction [Hänel, 1968]. Les caractéristiques optiques des particules sont déterminées par leur indice de réfraction, leur taille, ainsi que leur morphologie. Par la suite, nous nous intéresserons aux concentrations massiques (PM 2.5 et PM10) ainsi qu'aux propriétés optiques des particules dans l'air ambiant.

### 1.3 Les moyens d'observations

Outre les observations *in situ* (échantillonnage local effectué soit au niveau du sol, soit en altitude par moyen aéroporté) visant à l'obtention des paramètres chimiques, microphysiques et optiques, la télédétection permet la mesure à distance des propriétés optiques des aérosols en différents endroits de la colonne atmosphérique (sondage actif, on impose la source de rayonnement) et de manière intégrée sur la colonne atmosphérique (sondage passif, la source de rayonnement est solaire). Dans cette étude, nous utiliserons 3 sources d'observation différentes : les mesures photométriques depuis le sol, les mesures de concentration massique effectuées dans le cadre des réseaux de surveillance de la qualité de l'air, et les mesures satellites. Les photomètres appartiennent aux réseaux d'observation mondial AERONET (Aerosol Robotic Network) [Holben et al., 1998]. Les mesures de concentration massiques proviennent de la BDQA géré par l'ADEME (Agence de développement et de la maîtrise de l'énergie). En terme de télédétection, grâce à une prise de conscience de la communauté scientifique internationale de l'impact des aérosols sur le climat, relayée par les agences spatiales (CNES, NASA, NASDA), une nouvelle génération de capteurs ayant des capacités dédiées à l'observation des aérosols a été lancée (POLDER, SeaWifs, MODIS, MISR). Nous utilisons dans cette étude les données d'épaisseur optique en aérosols fournies par le radiomètre MODIS (« Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer », télédétection passive) embarqué sur les satellites américains d'observation à orbite héliosynchrone TERRA et AQUA.

### 1.4 Objectif et méthodes

L'objectif de cette étude est d'évaluer la pertinence des informations apportées par l'instrument MODIS embarqué sur les satellites TERRA et AQUA dans le cadre de la surveillance de la pollution de l'atmosphère en aérosols.

Dans le cadre de ce stage, nous nous intéresserons au territoire national et en particulier à la région de Lille. Deux types d'épisodes de pollution particulières seront étudiés au long de l'année 2003 où nous avons l'opportunité de détenir à la fois des données recueillies au sol (réseau de photomètres AERONET et Banque De La Qualité de l'Air) et des données satellitaires provenant de 2 capteurs MODIS à bord des 2 plate-formes AQUA et TERRA ainsi que des données provenant du capteur POLDER. Cependant l'analyse de ce dernier capteur ne sera pas présentée dans ce rapport.

L'ensemble des données utilisées sont présentées dans le paragraphe suivant. Dans un premier temps, nous avons étudié la corrélation entre les valeurs d'épaisseur optique en aérosols et la concentration massique en PM 2.5 pour les 2 épisodes de pollution choisis. Dans un deuxième temps, en examinant uniquement les données satellitaires MODIS, nous avons élaboré des cartes mensuelles et journalières d'épaisseur optique en aérosols. Au final, après avoir évalué l'apport des données du deuxième capteur MODIS correspondant à la plate-forme AQUA aux données du premier capteur embarqué sur la plate-forme TERRA, nous avons comparé les mesures d'épaisseur optique mesurées depuis le sol avec celles restituées par MODIS.

## 2 Présentation des données

Dans cette partie, nous présentons les données au sol fournies par la banque de données sur la qualité de l'air (ADEME) et le réseau mondial de photomètres AERONET ainsi que les données satellitaires recueillies par le capteur MODIS embarqué sur les plate-formes TERRA et AQUA.

## 2.1 Banque de données sur la qualité de l'air (BDQA/ ADEME)

D'après les standards de l'Union Européenne dans le domaine de la santé et des concentrations massiques en aérosols (concernant seulement les concentrations en PM 10), la limite journalière de PM 10 est de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ; cette limite ne doit pas être dépassée plus de 35 fois par an. Le seuil critique concernant la concentration annuelle en PM 10 est de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  [Joint Research Center, 2003]. La concentration massique en PM 2.5 n'intervient pas dans l'évaluation de la qualité de l'air (indice ATMO). Cependant aux Etats Unis, pour ce qui est des concentrations en PM 2.5, l'« Environnement protection Agency » (EPA, agence américaine) évalue la qualité de l'air chaque jour en calculant le rapport entre la moyenne journalière de concentration massique et le « National Ambient Air Quality Standard » (NAAQS). Ce rapport est appelé AQI (pour « Air quality index ») et est compris entre 0 pour une atmosphère presque transparente et 500 pour une atmosphère turbide. (Tableau 1). Comme le montre le tableau 1, on suppose qu'il n'y a pas d'épisode de pollution pour des moyennes journalières en PM 2.5 inférieures à  $40.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Le seuil critique annuel concernant la concentration en PM 2.5 est d'environ  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  [Wang and Sundar., 2003]

AQI	0-50	51-10	101-150	151-200	201-300	301-400	401-500
PM 2.5 (24 h)	0-15.4	15.5-40.4	40.5-65.4	65.5-150.4	150.2-250.4	250.5-350.4	350.5-500.4
AQC	Bon	Modéré	CR*	CR	CHR	Dangereux	Dangereux

**Tableau 1 :** AQI et moyenne journalière de PM 2.5 correspondante ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) et « Air Quality Index » (AQC) ; CR\* : Conditions à risques pour certains groupes de personnes (les enfants et les personnes âgées) ; CR : Conditions à risques pour toutes personnes ; CHR : Conditions à hauts risques.

Dans le cadre de la surveillance de la pollution en aérosols, les agences de qualité de l'air (regroupées au sein de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, ADEME) mesurent, entre autres polluants, la concentration massique des particules de diamètre aérodynamique inférieur à  $10 \mu\text{m}$  (« PM 10 » pour « Particulate matter ») et  $2.5 \mu\text{m}$  (« PM 2.5 »). Ces données sont fournies par le site Internet de la BDQA (Banque de Données Qualité de l'Air) : [www.atmonet.org](http://www.atmonet.org) où il est possible de visualiser et télécharger les données recueillies par différents sites de mesures en France (regroupés par région) pour différents polluants (Ozone,  $\text{NO}_2$ , PM10, etc...) durant une certaine période de temps. Les données sont disponibles sous forme de moyennes annuelles, mensuelles, journalières ou horaires. Il est aussi possible de consulter les statistiques réglementaires d'un certain polluant sur une période donnée (généralement une année) et une région particulière. Les données de concentration massique en aérosol (PM 10 ou PM 2.5) sont recueillies en pompant un volume d'air au sein d'un filtre poly carbonate d'une certaine porosité et pesé sur une microbalance de précision. La précision sur ce type de mesure est de quelques  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

## 2.2 Mesures du réseau AERONET (AERosol RObotic NETwork)

Des données d'épaisseur optique en aérosols («AOT» pour «Aerosol Optical Thickness» sans unités) sont fournies par le site Internet [www.aeronet.gsfc.nasa.gov](http://www.aeronet.gsfc.nasa.gov) du réseau mondial de photomètres « Aerosol Robotic Network » (AERONET) [Holben et al., 1998] où il est possible de visualiser et de télécharger les mesures effectuées par des photomètres CIMEL pour une certaine période, longueur d'onde (1020 nm, 870 nm, 670 nm ou 440 nm) et localisation ainsi que sous une certaine forme (moyennes mensuelles, journalières ou instantannées). Cette mesure d'épaisseur optique en aérosols représente l'extinction du rayonnement solaire (visible) par les aérosols, intégrée sur toute la hauteur de la colonne d'air (visée directe du soleil). Pour donner un ordre de grandeur, la moyenne de l'épaisseur optique à 865 nm au dessus des océans pour un niveau faible de concentration en aérosols est de 0.1 d'après les données du satellite POLDER [Bellouin, 2003]. De plus, un évènement de pollution urbaine ou industrielle aura généralement une épaisseur optique en aérosols de 0.3 à 0.5 et des évènements très intenses, comme une épaisse couche de poussières désertiques, peuvent dépasser 1.5 en épaisseur optique.

L'épaisseur optique des aérosols  $\tau$  dépend de la longueur d'onde  $\lambda$ . La dépendance spectrale de

l'extinction (ou de l'épaisseur optique) est intéressante car elle renseigne sur la taille des particules diffusantes. Par analogie avec la théorie de la diffusion Rayleigh, on introduit le coefficient d'Angström  $\alpha$  défini par :

$$\tau(\lambda) = \beta\lambda^{-\alpha}$$

où  $\beta$  est un coefficient de turbidité. Le coefficient  $\alpha$  s'évalue aisément à partir de la mesure de l'épaisseur optique à 2 longueurs d'onde de la manière suivante :

$$\frac{\tau(\lambda_2)}{\tau(\lambda_1)} = \left( \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^{-\alpha}$$

où  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  sont deux longueurs d'onde différentes mais suffisamment proches pour que l'approximation soit valable. Plus la dépendance spectrale est forte (variation importante de  $\tau$  en fonction de  $\lambda$ ), plus le coefficient d'Angström est grand et plus les particules sont de faible taille (inférieures au  $\mu\text{m}$ ). Les aérosols présentent généralement des coefficients d'Angström compris entre 0 (particules supérieures au  $\mu\text{m}$  de type sels marins ou aérosols désertiques) et 1.5 (particules submicroniques). D'après une étude des variabilités d'absorption des différents types d'aérosols sur le globe [Dubovik *et al.*, 2000], il a été montré que le coefficient d'angström pouvait être nul (dans le cas de particules désertiques et océaniques au dessus du golfe persique entre 1998 et 2000) ou même négatif (au dessus des Iles du Cap Vert entre 1993 et 2000). Nous utiliserons ce paramètre pour caractériser les événements de pollution.

Grâce au site Internet du réseau mondial de photomètres AERONET, il est également possible d'obtenir le nombre de mesures par jours (N) utilisé pour le calcul des moyennes journalières pour chaque longueur d'onde ainsi que les rétrotrajectoires de masse d'air associées à un jour et un lieu donnés. Il existe différents niveaux de traitement de données disponibles : niveau 1 (données brutes d'épaisseur optique), niveau 1.5 (le masque nuage est automatiquement appliqué alors que l'étalonnage final n'est pas forcément effectué) et niveau 2 (le masque nuage est appliqué ainsi que l'étalonnage final et les données sont inspectées manuellement). Lors de notre étude, nous avons utilisé autant que possible les données de niveau 2. Cependant, il nous a parfois fallu nous contenter de données de niveau 1.5 (par exemple, à Lille durant l'année 2003, les seules données disponibles étaient de niveau 1.5). La précision sur l'AOT mesurée est estimée à 0.01.

Notre étude portera tout particulièrement sur les données d'AOT AERONET à 440 nm propices à l'observation des particules les plus fines et donc adaptées à une comparaison avec les mesures de concentration en particules de diamètre aérodynamique inférieur à 2.5  $\mu\text{m}$ . Le réseau AERONET existe depuis le milieu des années 1990 mais le nombre de photomètres installés dans le monde a considérablement augmenté au cours des dernières années. Actuellement, le nombre approximatif total de sites photométriques permanents est égal à 200 dans le monde plus ou moins 50 sites saisonniers (un exemple de site saisonnier est en Amazonie où les photomètres ne sont pas installés au cours de la saison des pluies). Le réseau est géré à la fois aux Etats Unis par la NASA (GSFC) et par le Laboratoire d'Optique Atmosphérique à Lille, qui assurent l'étalonnage, l'installation sur site et la maintenance des appareils. La version automatique de l'instrument est dotée d'un panneau solaire et de batteries rechargeables, ce qui lui confère une autonomie complète. Il est équipé d'un robot deux axes permettant des mouvements dans les plans zénithaux et azimutaux, il peut donc viser tout point de la voûte céleste avec une précision de 0.05°. Le champ de vue de l'instrument est de 1.2°, il possède deux détecteurs, un pour les visées solaires (calcul de l'épaisseur optique des aérosols entre autres) et un pour les mesures de luminance ( $\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ ) de ciel (mesures d'almucantars et dans le plan principal utiles au calcul de la fonction de phase, de l'albédo de diffusion simple et de la distribution en taille des aérosols).

Ces mesures de concentration massique (PM 2.5 ou PM 10) ou d'épaisseur optiques au sol (AOT

AERONET) sont nécessairement limitées dans l'espace et ne permettent pas de renseigner de façon globale sur des épisodes de pollution recouvrant de larges zones géographiques. Seules les observations satellitaires permettent l'étude de transports de nuages de fumée provenant de feux de biomasse en Amérique centrale vers les Etats Unis ou le transport de nuages d'aérosols désertiques provenant du Sahara vers l'Espagne et/ ou le sud de la France [Wang and Sundar, 2003].

### 2.3 Présentation des données satellitaires MODIS

MODIS (ou « Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer ») est un radiomètre embarqué sur les plate-formes américaines TERRA et AQUA. Lancée en décembre 1999, la plate-forme TERRA survole l'équateur du nord au sud le matin (10h30 au dessus de l'équateur, orbite descendante) alors que la plate-forme AQUA, lancée en avril 2002, survole l'équateur du sud au nord dans l'après midi (13h30 au dessus de l'équateur, orbite ascendante). L'instrument MODIS à bord du satellite AQUA (appartenant à l'AQUA-TRAIN, train de satellites) fournit des données depuis juin 2002. Avec une trace de 2330 km de large au sol, chacune de ces 2 plate-formes permet d'observer la totalité de la surface terrestre en un ou deux jours (environ 14 orbites par jour, c'est à dire 2 passages par jours à nos hautes latitudes pour chaque satellite) et de se procurer des données sur 36 bandes spectrales (allant du visible à l'infra rouge thermique). MODIS possède donc une haute résolution spectrale, une couverture globale presque journalière et une haute résolution spatiale (500 m à 470 nm et 2.13  $\mu\text{m}$ , 250m à 0.66  $\mu\text{m}$  et 0.86  $\mu\text{m}$  et 1 km à 3.8  $\mu\text{m}$ ). Les données sont distribuées sous forme de fichiers correspondant à 5 minutes d'enregistrement.

Dans cette étude, on s'intéresse aux propriétés optiques des aérosols proches des zones sources de pollution urbaine et industrielle donc au dessus des continents. La réflectance apparente d'un site homogène, quantité mesurée par le satellite, dépend de la géométrie d'observation, des propriétés optiques des aérosols et de la réflectance bidirectionnelle du sol. Les bandes spectrales étroites sont situées de manière à minimiser l'absorption par les gaz atmosphériques et sont corrigées à partir d'un modèle d'atmosphère. Afin de restituer la contribution de l'aérosol au signal satellite, il faut tout d'abord avoir une estimation de la contribution de la surface. L'algorithme à la base de la télédétection des aérosols troposphériques au dessus de surfaces terrestres [Kaufman and Tanré, 1998 et Chu et al., 2003] utilise les propriétés de faible opacité de la plupart des aérosols dans le moyen infrarouge (2.13 et 3.8  $\mu\text{m}$ ) et la présence de nombreuses surfaces sombres (ex : la végétation) pour les canaux à 0.47  $\mu\text{m}$  (bleu) et à 0.66  $\mu\text{m}$  (rouge). Voici les quelques étapes simplifiées de l'algorithme à la base de MODIS :

- Détermination de la localisation des pixels sombres (grâce aux canaux dans le moyen infrarouge),
- Estimation de la réflectance de surface de ces mêmes pixels sombres (grâce aux canaux dans le bleu et le rouge),
- Détermination du type d'aérosol,
- Sélection du modèle dynamique d'aérosols approprié qui nous fournira, entre autres paramètres, l'albédo de diffusion simple et la fonction de phase,
- Inversion de la réflectance apparente mesurée par le satellite à fin d'estimer l'épaisseur optique.

L'inversion n'est possible qu'en ciel totalement clair (absence de nuages).

## 3 Analyse et interprétation des mesures sol

Dans cette partie, nous avons examiné l'évolution temporelle des contenus en particules afin de choisir des épisodes de pollution en aérosols. Au cours de ces épisodes de pollution, après avoir étudié la corrélation entre les données de PM 2.5 et de PM 10 sur Lille, nous avons mené une étude de comparaison entre les mesures d'épaisseur optique AERONET et les données de PM 2.5.

### 3.1 Evolution annuelle des contenus en particules et choix des épisodes de pollution

Les Figures 1, 2 et 3 ci-dessous montrent respectivement l'évolution temporelle des moyennes mensuelles des mesures au sol de PM 2.5, PM10 (recueillies sur le site urbain de Faidherbe à Lille) et de l'épaisseur optique en aérosols à 440 nm (provenant du photomètre sur le toit du Laboratoire d'Optique Atmosphérique à Villeneuve d'Ascq situé à environ 10 km de Lille-centre) au cours des

années 2002, 2003 et 2004 dans l'agglomération Lilloise.



**Figure 1 :** Moyennes mensuelles de PM<sub>2.5</sub> au cours des années 2002, 2003 et 2004 à Lille (site n°11024)



**Figure 2 :** Moyennes mensuelles de PM<sub>10</sub> au cours des années 2002, 2003 et 2004 à Lille (site n°11024).



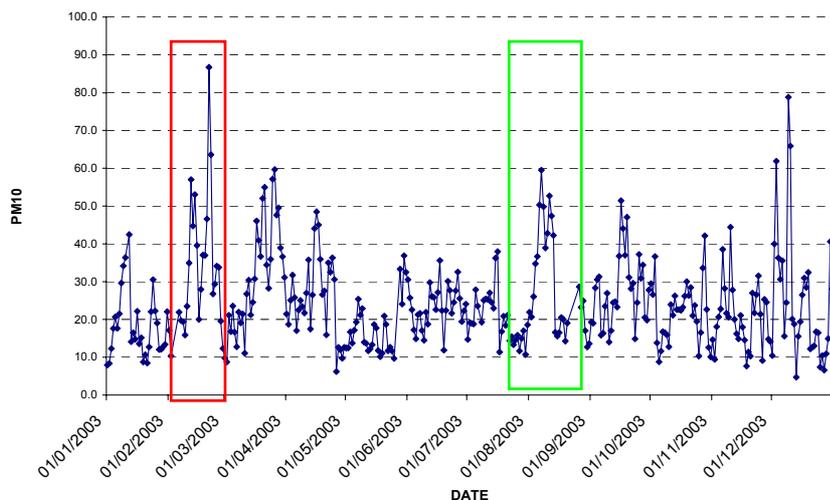
**Figure 3 :** Moyennes mensuelles de AOT à 440nm au cours des années 2002, 2003 et 2004 à Lille (niveau 1.5)

D'après les Figures 1 et 2 (courbes noires), on observe de fortes concentrations de PM<sub>2.5</sub> et de PM<sub>10</sub> (atteignant respectivement des pics de 22,6 µg/m<sup>3</sup> et 32,6 µg/m<sup>3</sup> en février/ mars) au cours de l'année 2003 sur Lille. De même, d'après la Figure 3 (courbe noire), malgré l'absence de mesures au cours de certains mois, il semblerait que l'année 2003 montre de fortes valeurs d'épaisseurs optiques en aérosols par rapport à l'année 2002. Il est important de mentionner que les mesures d'AOT se font uniquement en ciel clair (absence de nuages) ; ce qui n'est pas le cas pour celles de PM 2.5. De plus, d'après le bulletin d'Airparif [n°22, Mars 2004], sur la région d'île de France, « l'année 2003 a vu une légère remontée des niveaux moyens de particules fines alors que de 1998 à 2002, ceux ci ont été très stables ». L'étude qui suit se concentrera par conséquent sur différents épisodes de pollution mesurés au cours de l'année 2003.

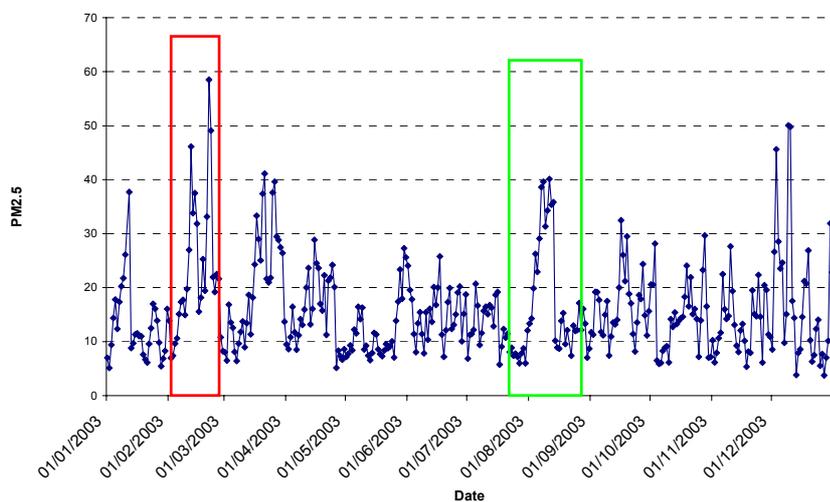
D'après les Figures 1, 2 et 3, le cycle saisonnier des charges en aérosols à Lille présente une évolution bi-modale formée de 2 pics de pollution en hiver et en été. Ceci est observé dans une moindre mesure au cours de l'année 2002 pour les concentrations en PM 2.5 et en PM 10. Que ce soit au cours de l'année 2002 ou 2003, nous observons un pic maximal de concentration en PM 10 et PM 2.5 plus fort en hiver qu'en été. En relation avec cette dernière observation, il est écrit dans le journal « A European Aerosol Phenomenology » [ joint research centre, european commission ] qu'au niveau des sites pollués, les concentrations en PM 2.5 et PM 10 sont nettement supérieures en hiver. Ceci serait partiellement dû à la météorologie : la dispersion des polluants est moindre en hiver lorsque la couche limite est plus basse. De plus, certaines mesures ont montré que la condensation des composés semi-volatiles (comme le nitrate ou composants organiques) est favorisée par de basses températures.

Les Figures 4, 5 et 6 ci-dessous décrivent respectivement l'évolution des moyennes journalières des concentrations en PM 2.5, PM 10 et l'évolution des épaisseurs optiques en aérosols AERONET (à 440 nm) durant l'année 2003 à Lille. Les carrés rouges des Figures 4, 5 et 6 correspondent au pic hivernal (maximum de PM 2.5 et PM 10 en février 2003) alors que les carrés verts correspondent au pic estival (maximum de PM 2.5, PM10 et AOT en août 2003). On observe également un second maximum local en mars au niveau des concentrations au sol et en ce qui concerne les épaisseurs optiques photométriques. (voir également la composition colorée en page de garde).

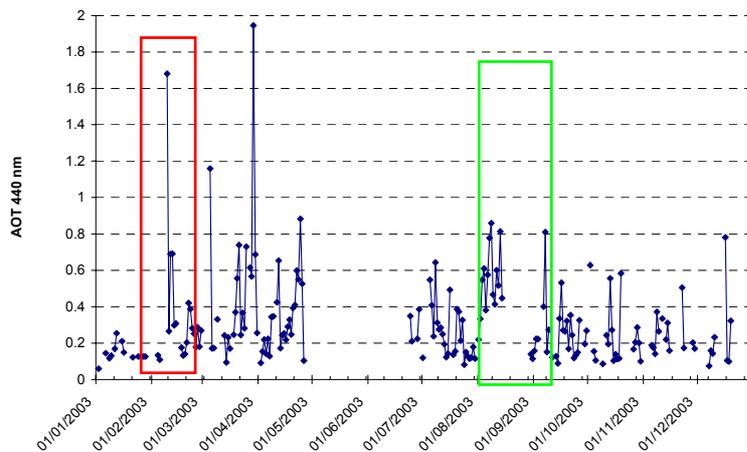
Dans cette étude, nous avons choisi deux épisodes de pollution en aérosols, l'un correspondant à la période hivernale, l'autre à la période estivale.



**Figure 4 :** Moyennes journalières de PM10 au cours de l'année 2003 à Lille (site Faidherbe, site n°11024)



**Figure 5 :** Moyennes journalières de PM2.5 au cours de l'année 2003 à Lille (site Faidherbe, site n°11024)



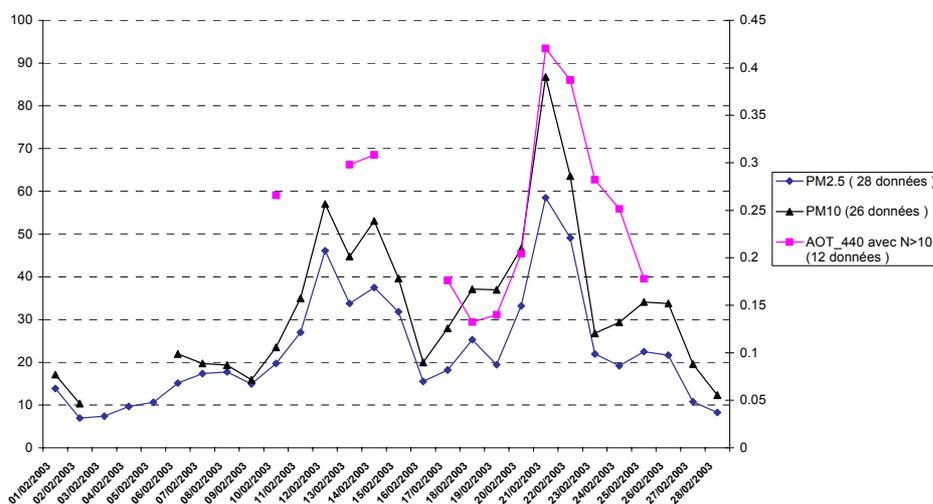
**Figure 6:** Moyennes journalières d' AOT à 440 nm (données de niveau 1.5) au cours de l'année 2003 Villeneuve d'Ascq (Pas de tri sur les mesures).

Il est à noter que le carré rouge de la Figure 6, correspondant à l'évolution journalière des AOT AERONET, ne présente pas un maximum en février au cours de l'année 2003 contrairement à l'évolution des PM 2.5 et PM 10 (Figures 4 et 5 respectivement). D'après la Figure 6, la valeur maximale d'AOT au cours de l'année 2003 correspond au 29/ 03/ 03 (égale à 1.95), mais cette valeur correspond à une seule mesure dans la journée (le nombre maximal de mesures au cours du mois de mars 2003 est égal à 55 pour le 23/03/03) et est donc relativement peu fiable.

### 3.1.1 Episode « hivernal »

Un épisode « hivernal » est généralement caractérisé par peu de vent et de fortes inversions de température le matin c'est à dire des températures au sol plus fraîches qu'en altitude, créant un couvercle d'air plus chaud sous lequel s'accumulent les polluants au lieu d'être dispersés dans l'atmosphère.

L'un des objectifs de cette étude est d'utiliser l'observation satellitaire pour la détection des événements de pollution. Ce type d'observation ne fonctionne qu'en ciel parfaitement clair. A chaque valeur moyenne journalière d'AOT correspond un nombre de mesures instantanées du photomètre N. En partant de l'hypothèse arbitraire que les moyennes journalières d'AOT ont de faibles chances d'être faussées lorsque la moyenne est calculée sur au moins 10 mesures (le nombre maximal de mesures prises par jour est égal à 44 en février 2003 sur Lille), on obtient la Figure 7 (décrivant l'évolution des moyennes journalières des concentrations en PM 2.5, PM 10 et des AOT AERONET (à 440 nm) au cours du mois de Février à Lille) où les moyennes journalières d'AOT faites à partir d'un nombre inférieur à 10 mesures sont écartées. La Figure 7 ci-dessous a donc été construite en supprimant les données d'AOT correspondants aux jours suivants : 04/02 (N=9), 05/02 (N=1), 09/02 (N=1), 11/02 (N=5), 12/02 (N=5), 26/02 (N=2), 27/02 (N=7) et 28/02 (N=3),



**Figure 7 :** Moyennes journalières de PM2.5 (bleu), PM10 (noir) et d'AOT (rose) à Lille en février 2003 avec N (nombre de mesures) > 10 pour les AOT.

Deux pics sont observés sur la Figure 7 au cours du mois de février 2003. Les valeurs de PM2.5 (courbe bleue), PM10 (courbe noire) et d'AOT (courbe rose) sont assez bien corrélées et maximales lors du second pic (respectivement 58,5 µg/m³, 86,8 µg/m³ et 0.42 le 21/02/03). D'après l'« Environmental Protection Agency » (Tableau 1), la valeur du pic de PM 2.5 (58,5 µg/m³) correspond à des conditions à risques pour certaines catégories de personnes (les enfants et les personnes âgées) et d'après les standards de l'Union Européenne, la limite journalière de 50µg/m3 est largement dépassée pour la concentration en PM 10 (86,8 µg/m3)

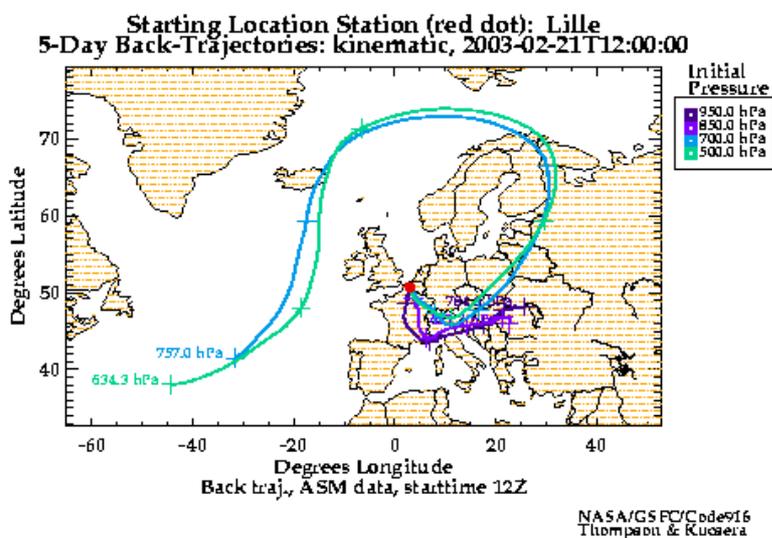
En examinant les moyennes journalières des coefficients d'Angström (calculés à partir des AOT à 440

nm et 870 nm) à Lille en février (tableau 2 ci-dessous), on observe que les jours éliminés dans cette étude correspondent aux plus faibles valeurs d'Angström (à l'exception du 28/02/03). Nous savons que plus la dépendance spectrale est faible, plus le coefficient d'Angström est faible et plus la particule est de taille importante. Il pourrait donc s'agir d'une contamination nuageuse (Cirrus, pour des données de niveau 1.5, non détectés par le masquage automatique des nuages). En découvrant que les jours écartés dans cette étude correspondent à un coefficient d'Angström plus faible, le choix (arbitraire) de ne garder que les valeurs de moyennes journalières d'AOT faites à partir d'un nombre de mesures supérieur à 10 semble cohérent.

DATE	9/2	11/2	26/2	5/2	4/2	12/2	27/2	13/2	24/2	22/2	28/2	19/2	10/2	25/2	23/2	14/2	20/2	21/2	18/2	17/2
Angstrom	0.154	0.543	0.595	0.631	1.105	1.161	1.303	1.43	1.43	1.47	1.481	1.518	1.543	1.562	1.61	1.612	1.612	1.653	1.734	1.909

**Tableau 2 :** Coefficients d'Angström triés par ordre croissant entre 440 nm et 870 nm en fonction de la date du 04/02/03 au 28/02/03 à Villeneuve d'Ascq (calculés à partir des moyennes journalières d'AOT).

La Figure 8 ci-dessous présente les différentes rétrotrajectoires de masses d'air (calculées sur 5 jours) atteignant 4 niveaux de pressions différents (950, 850, 700 et 500 hPa. correspondant respectivement à des altitudes égales à 0.5, 1.5, 3 et 5 km) à Lille le 21/02/03 à 12h00 (ces produits, disponibles sur le site AERONET de la NASA, sont générés 2 fois par jour : 00h et 12h). Les trajectoires cinétiques de masses d'air sont calculées à partir des données de la « Global Modeling and Assimilation Office » (GMAO) de la NASA.



**Figure 8 :** Rétrotrajectoires de masses d'air atteignant Lille le 21/02/03 à 12h00 ; les niveaux de pression d'arrivée sont égaux à 950 hPa (bleu), 850 hPa (violet), 700 hPa (bleu clair) et 500 hPa (vert), correspondant respectivement à des altitudes de 0.5, 1.5, 3 et 5 km

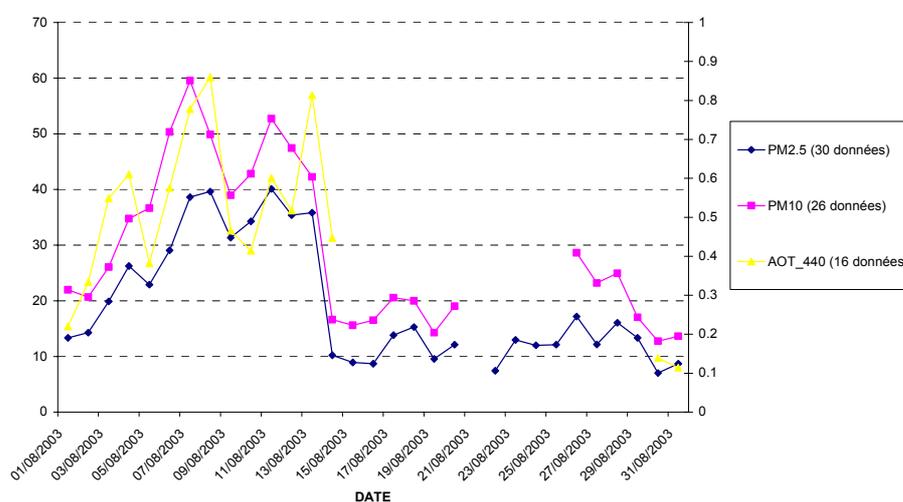
D'après la Figure 8, il semblerait que cet épisode de pollution particulaire hivernal (février 2003) soit dû à un transport de grande échelle en provenance du sud-est de l'Europe (nord de l'Italie) et transporté sur la France par un flux Sud-Nord.

### 3.1.2 Episode « estival »

Un épisode « estival », est généralement caractérisé par un ensoleillement et un vent faible qui constituent des conditions propices à la transformation photo-chimique des oxydes d'azotes ( $NO_x$ ) et de composés organiques volatils (COV) sous l'action des rayons ultraviolets; ces conditions facilitent la formation de polluants photochimiques (ozone, aérosols secondaires).

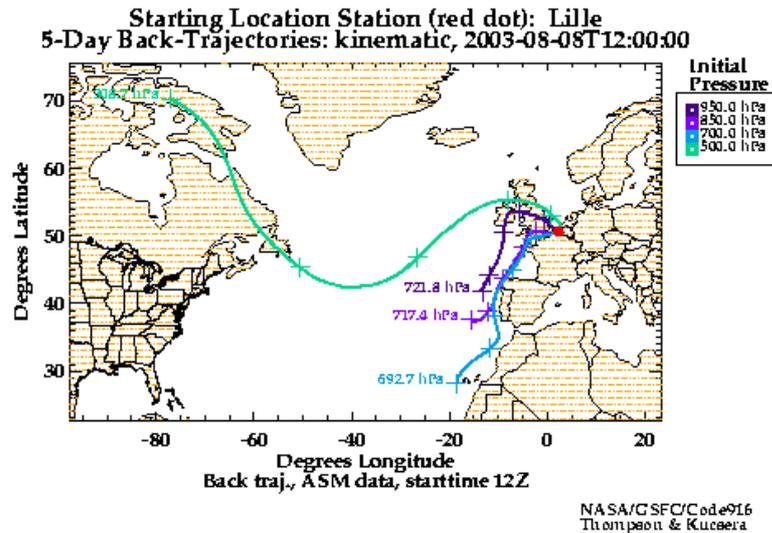
La Figure 9 ci-dessous décrit l'évolution temporelle des moyennes journalières de PM 2.5 (courbe bleue), PM10 (courbe rose) et d'AOT (courbe jaune) à Lille en août 2003. On y observe un pic de 39.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  le 08/08/03 pour la concentration en PM2.5, ainsi qu'un pic de 59.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  le 07/08/03 pour les PM10 et un maximum de 0.86 pour l'épaisseur optique en aérosols AERONET le 08/08/03. D'après le Tableau 1 de l' EPA américaine, la valeur du pic de PM2.5 (39.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) correspond à des conditions modérées au niveau de la pollution en aérosols alors que d'après les standards de l'Union Européenne, la limite journalière de 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  est dépassée pour la concentration en PM10 (59.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

En ce qui concerne les concentrations en aérosols (PM2.5 et PM10), l'intensité de cet épisode particulière « estival » est donc globalement plus faible que celle de l'épisode « hivernal », en accord avec différentes observations similaires au niveau européen. [ *Joint Research Centre, 2003*]. Par contre, l'épisode estival est caractérisé par des valeurs d'AOT maximales plus élevées que celui de février (0.86 en août et 0.42 en février). En relation avec cette observation, d'après *Wang et al. [2003]*, il a été montré que pour la même quantité de PM 2.5 sec, l' AOT est supérieure en été dû à un effet hygroscopique plus grand (c'est à dire une plus grande absorption et les aérosols retiennent plus facilement l'humidité).



**Figure 9** : Moyennes journalières de PM2.5 (bleu), PM10 (rose) et d'AOT (jaune) à Lille en août 2003.

La Figure 10 ci-dessous, comme la Figure 8 pour février, présente les différentes rétrotrajectoires de masses d'air (calculées sur 5 jours) atteignant 4 niveaux de pressions différents à Lille le 08/ 08/ 03 à 12h00.

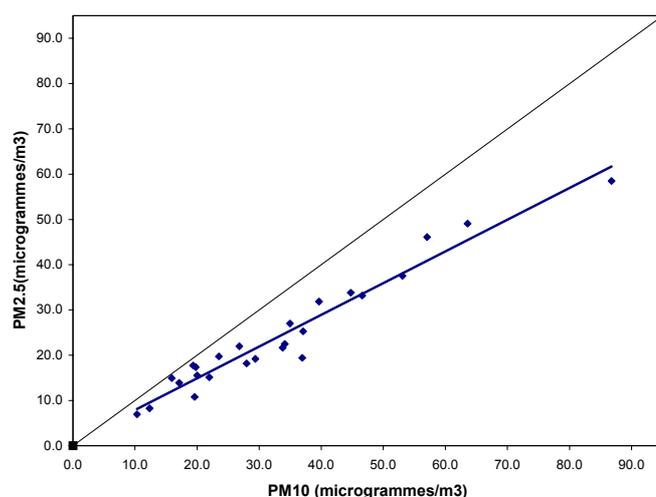


**Figure 10 :** *Rétrotrajectoires de masses d'air atteignant Lille le 08/ 08/ 03 à 12h00 ; les niveaux de pression d'arrivée sont égaux à 950 hPa (bleu), 850 hPa (violet), 700 hPa (bleu clair) et 500 hPa (vert), correspondant respectivement à des altitudes de 0.5, 1.5, 3 et 5 km*

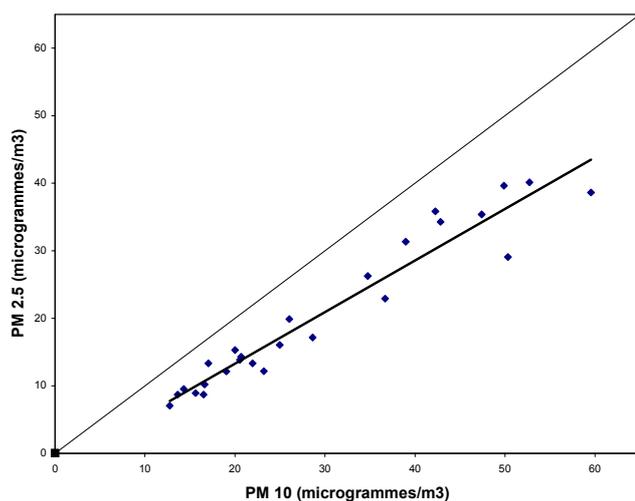
D'après la Figure 10, l'épisode de pollution particulaire estival semble être d'un tout autre type que celui de l'épisode hivernal : on ne devine, à priori, aucun transport à l'échelle continentale. En examinant les rétrotrajectoires atteignant Lille à 5 et 0.5 km d'altitude le 08/08/03 (Figure 10), le transport des masses d'air semble provenir d'Angleterre.

### 3.2 Etude de corrélation entre PM2.5 et PM10 sur Lille pour les deux épisodes de pollution particulaires

Contrairement aux PM2.5, les concentrations en PM10 peuvent être fortement influencées par des sources locales de particules grossières, telles que les poussières des routes par exemple. Dans le cas d'événement de pollution, nous avons recherché la relation entre ces deux paramètres. L'étude de corrélation entre les concentrations en PM 2.5 et PM 10 a été menée sur Lille pour les 2 épisodes de pollution choisis précédemment (voir les Figures 11 et 12 ci-dessous). Pour chaque Figure, on donne l'équation de la droite de régression, le coefficient de corrélation (R) ainsi que le nombre de données (N). La précision communiquée par la BDQA sur les mesures de PM est de quelques  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .



**Figure 11** : Corrélation entre données PM 2.5 et PM10 du 01/02/03 au 28/02/03 à Lille (site Faidherbe, moyennes journalières). La régression linéaire obtenue est :  $PM2.5 = 0.70 \times PM10 + 0.90$ ,  $R = 0.97$ ,  $N=25$ .



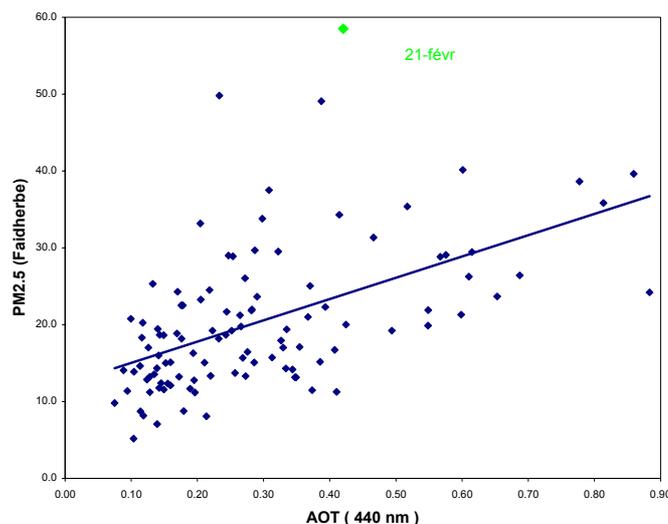
**Figure 12** : Corrélation entre données PM 2.5 et PM10 du 01/08/03 au 31/08/03 à Lille (site Faidherbe, moyennes journalières). La régression linéaire obtenue est :  $PM2.5 = 0.76 \times PM10 - 2.00$ ,  $R = 0.97$ ,  $N=26$ .

Que ce soit pour le mois de février ou le mois d'août, le coefficient de corrélation (supérieur à 0.9) est très satisfaisant. On peut en déduire que 70% à 80% en masse des particules de diamètre aérodynamique inférieur à 10 µm ont également un diamètre aérodynamique inférieur à 2.5 µm. Le fait que le rapport entre les quantités de PM 2.5 et PM 10 soit proche pour les deux événements de pollution intense (pente proche) semble indiquer un type de pollution particulaire assez identique lors des 2 événements. Ceci est confirmé par l'examen des moyennes mensuelles des coefficients d'Angström (renseignant sur la taille des particules) du 01/02/03 au 28/02/03 et du 01/08/03 au 31/08/03 (respectivement égales à 1.30 et 1.34). Il semblerait donc que les aérosols soient globalement de la même taille à l'intérieur de la colonne atmosphérique au dessus de Lille au cours des 2 épisodes de pollution particulaire.

### 3.3 Etude de corrélation entre PM2.5 et AOT AERONET

En écartant les moyennes journalières d'AOT AERONET faites à partir d'un nombre inférieur à 10

mesures, la Figure 13 ci-dessous montre la corrélation obtenue entre les mesures de PM2.5 et d'AOT AERONET à Lille au cours de l'année 2003.



**Figure 13** : Corrélation entre PM 2.5 et AOT (à 440nm) à Lille en 2003 en éliminant les moyennes journalières faites à partir d'un nombre inférieur à 10 mesures. La régression linéaire obtenue est :  $PM\ 2.5 = 27.71 \times AOT_{sol} + 12.24$ ,  $R = 0.53$ ,  $N=107$ .

D'après la Figure 13, certains points sont très éloignés de la droite de régression comme, par exemple, le 21 février (en vert sur la Figure 13). Il semblerait, par conséquent, que les particules de diamètre inférieur à 2.5 µm ne soient pas complètement représentatives du contenu en aérosols de la colonne atmosphérique du photomètre AERONET le 21/02/03. Le coefficient de corrélation est significatif mais relativement peu élevé lorsque l'étude porte sur l'intégralité de l'année 2003. Par la suite nous restreignons notre étude aux 2 épisodes précédemment décrits (été et hiver 2003).

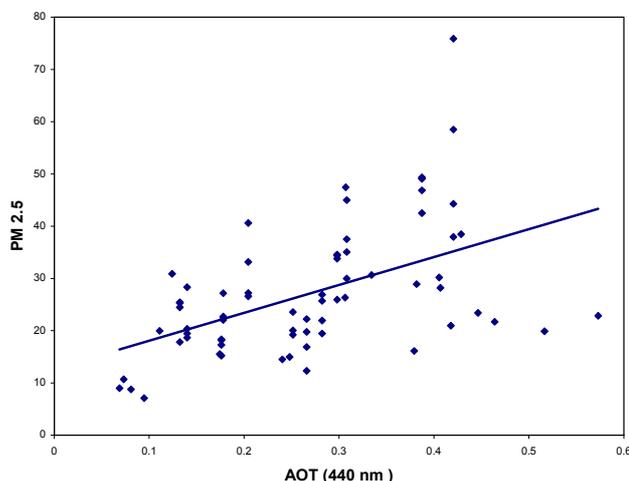
### 3.3.1 Episode de pollution particulaire « hivernal »

En se restreignant aux différents sites du réseau AERONET et de la BDQA dont les données sont disponibles en février 2003 et en privilégiant la proximité des sites à comparer, le Tableau 3 ci-dessous présente les différentes études de corrélation que nous avons décidé de mener.

n° de corrélation	Site BDQA	Site AERONET
1	Languedoc Roussillon, 43.0 N et 3.5 E (n°8016)	Avignon, 43.0 N et 4.0 E
2	Vitry Sur Seine, 48.0 N et 2.0 E (n° 4034)	Fontainebleau, 48.0 N et 2.0 E
3	Lille, 50.0 N et 3.1 E (n° 11024, 11025, 11029)	Lille, 50.0 N et 3.0 E
4	Picardie, 48.0 N et 3.1 E (n°18008)	Lille, 50.0 N et 3.0 E

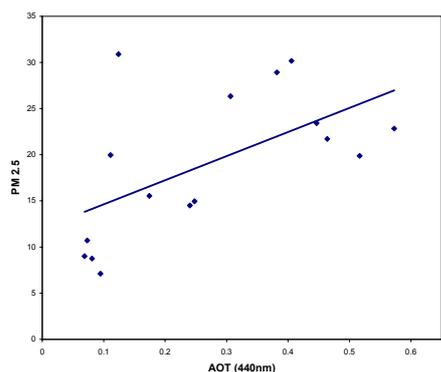
**Tableau 3** : Etudes de corrélations numérotées entre les données de PM 2.5 et d'AOT AERONET au cours du mois de Février. Nous avons privilégié la proximité géographique des sites pour mener cette étude de comparaison.

En regroupant toutes les études de corrélations (n° 1, 2, 3 et 4) du Tableau 5 et en ne sélectionnant que les moyennes journalières d'AOT AERONET faites à partir d'un nombre de mesures supérieur à 10, on obtient la Figure 14 ci-dessous.

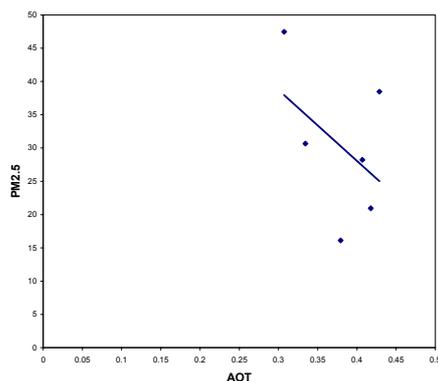


**Figure 14** : Corrélation entre PM 2.5 et AOT AERONET (Avignon / Languedoc Roussillon; Lille/ Picardie; Lille; Fontainebleau/ Vitry Sur Seine) en février 2003 en gardant toutes les valeurs d'AOT faites à partir de  $N > 10$  mesures. La régression linéaire obtenue est :  $PM\ 2.5 = 53.46 \times AOT_{sol} + 12.70$ ,  $R = 0.51$ ,  $N=70$ .

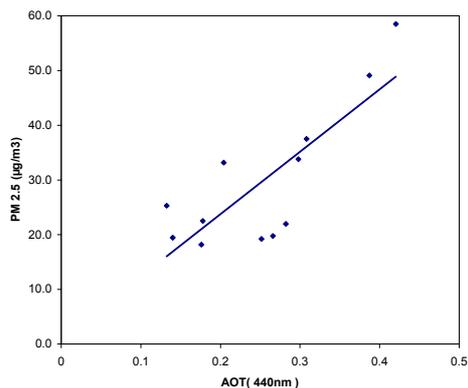
D'après la Figure 14, puisque le coefficient de corrélation correspondant à tous les sites réunis (égal à 0.507) reste peu satisfaisant, nous avons décidé d'étudier les corrélations correspondants à chaque site séparément. Les Figures 15a, 15b, 15c et 15d ci-dessous présentent les différentes études de corrélation (n°1, 2, 3 et 4 respectivement) entre les données de PM 2.5 et AOT AERONET (à 440 nm).



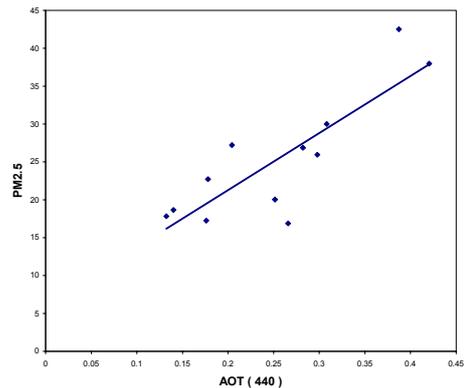
**Figure 15a** : Corrélation (n°1) entre AOT AERONET (Avignon) et PM 2.5 (Languedoc Roussillon), fev. 03. La régression linéaire obtenue est :  $PM\ 2.5 = 26.10 \times AOT_{sol} + 12.01$ ,  $R = 0.58$ ,  $N=16$



**Figure 15b** : Corrélation (n°2) entre AOT AERONET (Fontainebleau) et PM 2.5 (Vitry Sur Seine), fev. 03. La régression linéaire obtenue est :  $PM\ 2.5 = -106.49 \times AOT_{sol} + 70.67$ ,  $R = 0.45$ ,  $N=6$



**Figure 15c** : Corrélation (n°3) entre AOT AERONET (Lille) et PM 2.5 (Lille), fev. 03. La régression linéaire obtenue est :  $PM\ 2.5 = 114.08 \times AOT_{sol} + 0.92$ ,  $R = 0.81$ ,  $N=12$ .



**Figure 15d** : Corrélation (n°4) entre AOT AERONET (Lille) et PM 2.5 (Picardie), fev. 03. La régression linéaire obtenue est :  $PM\ 2.5 = 75.33 \times AOT_{sol} + 6.22$ ,  $R = 0.84$ ,  $N=12$ .

Comme le montrent les Figures 15c et 15d, en ce qui concerne les corrélations à Lille d'une part et entre la Picardie et Lille d'autre part (coefficients de corrélation respectifs 0.81 et 0.83), on observe un bon accord entre l'évolution des données PM2.5 et AOT AERONET. Remarquons que les données de PM 2.5 et d'AOT AERONET sont aussi bien corrélées dans le cas de sites plus éloignés (comme Lille et la région Picardie) que dans le cas de sites nettement plus proches (comme Faidherbe et Lille). Cette observation semble soutenir le scénario d'un transport d'aérosols de grande échelle (au moins d'échelle régionale) en février 2003. En effet, comparer les données de sites plus éloignés semble aider à s'affranchir d'éventuels pics de pollution locaux (ici, la ville de Lille) pour ne travailler que sur des événements de pollution recouvrant des échelles spatiales plus larges. A contrario, l'étude de corrélation entre la région Languedoc Roussillon et Avignon (Figure 15a) montre un coefficient de corrélation assez peu élevé (égal à 0.58) dans ces régions indiquant une plus forte dispersion entre les données de PM 2.5 et d'AOT AERONET.

En examinant l'étude de comparaison en région Parisienne (Figure 15b), on observe un coefficient de corrélation égal à 0.45 et la droite de régression comporte une pente négative. Cette anti-corrélation semble aberrante et ne pourrait s'expliquer que par un transport d'aérosols à haute altitude non détecté par les PM mesurés au sol (comme les poussières sahariennes par exemple). Il serait intéressant, par la suite, de vérifier la cause de ce désaccord sur la région d'Ile de France, connue pour son caractère très pollué du à une concentration urbaine très élevée (trafic routier en particulier).

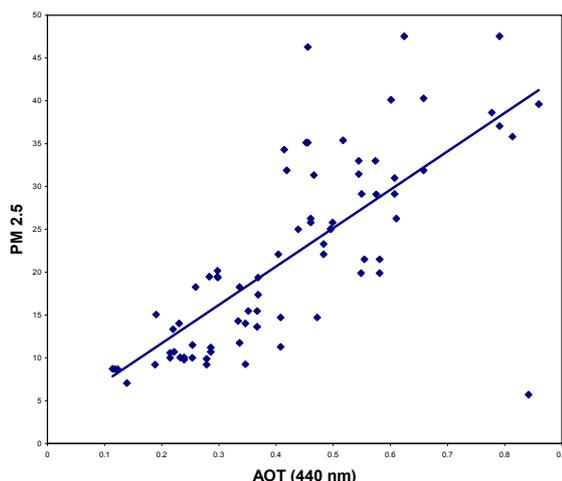
En conclusion, lorsque tous les sites comparés sont réunis (Figure 14), le caractère faiblement corrélé des données de PM 2.5 et d'AOT AERONET (coefficient de 0.51) semble provenir de l'anti-corrélation en région Parisienne ainsi que de la faible corrélation sur le sud de la France. Abstraction faite de ces 2 sites, on obtient une bonne corrélation entre ces 2 types de mesures dans le cas de la période hivernale. Cependant, les pentes des droites de régression obtenues sont très différentes, ce qui montre une variation du rapport entre les données de PM 2.5 et d'AOT AERONET suivant les différents sites au cours de l'épisode hivernal.

### 3.3.2 Episode de pollution particulière « estival »

De même que pour l'épisode « hivernal », les sites à la fois proches géographiquement les uns des autres et dont les données sont disponibles au cours du mois d'août nous ont permis de mener différentes études de corrélation (Tableau 4). En regroupant toutes les corrélations du Tableau 4 et en ne sélectionnant que les données d'AOT AERONET faites à partir d'un nombre de mesures supérieur à 10, on obtient la Figure 16 ci-dessous au cours du mois d'août 2003.

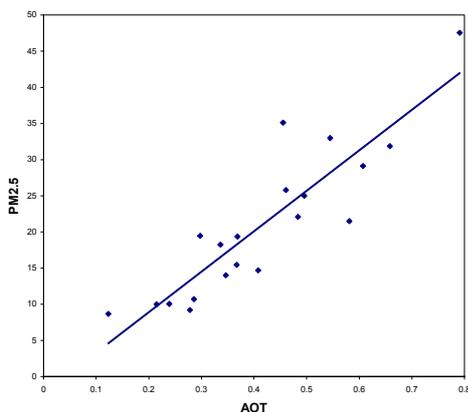
n° de corrélation	Site BDQA	Site AERONET
5a	Il de France, 48.55 N et 2.17 E (n°4002, Gennevilliers)	Palaiseau, 48 N et 2 E
5b	Il de France, 48.55 N et 2.17 E (n°4002, Gennevilliers)	Fontainebleau, 48 N et 2 E
6	Nord Pas de Calais, 50 N et 3.14 E (n°11024)	Lille, 50 N et 3 E
7	Haute Normandie, 49.2 N et 1 E (n°25043)	Palaiseau, 48 N et 2 E

**Tableau 4** : Etudes de corrélations numérotées entre les données de PM 2.5 et d'AOT AERONET au cours du mois d'août 2003. Nous avons privilégié la proximité géographique des sites.

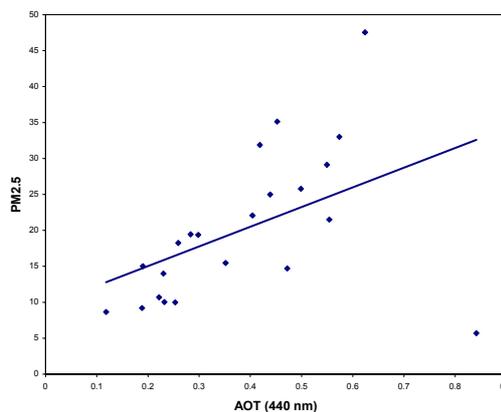


**Figure 16** : Corrélation entre PM2.5 et AOT AERONET (Ile de France; Lille; Palaiseau/ Haute Normandie) en août 2003 en sélectionnant toutes les valeurs d'AOT faites à partir d'un nombre de mesures > 10. La régression linéaire obtenue est :  $PM\ 2.5 = 44.80 \times AOT_{sol} + 2.74$ ,  $R = 0.75$ ,  $N=77$ .

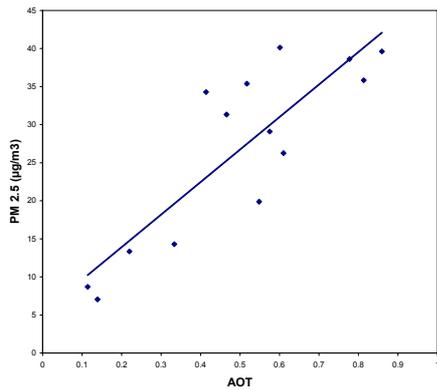
D'après la Figure 16, on remarque un meilleur accord entre les données PM2.5 et AOT AERONET en août comparé au mois de février (coefficient de corrélation de 0.51 en février, 0.75 en août) lorsque tous les sites sont réunis. Comme pour l'épisode hivernal, nous avons décidé d'étudier chaque corrélation individuellement (voir les Figures 17a, 17b, 17c et 17d ci-dessous).



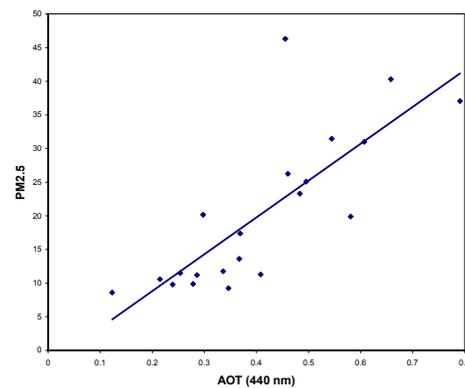
**Figure 17a** : Corrélation (n°5a) entre AOT AERONET (Gennevilliers) et PM 2.5 (Palaiseau ), août 03. La régression linéaire obtenue est :  $PM\ 2.5 = 55.93 \times AOT_{sol} - 2.28$ ,  $R = 0.89$ ,  $N=20$ .



**Figure 17b** : Corrélation (n°5b) entre AOT AERONET (Gennevilliers) et PM 2.5 (Fontainebleau ), août 03. La régression linéaire obtenue est :  $PM\ 2.5 = 27.38 \times AOT_{sol} + 9.55$ ,  $R = 0.46$ ,  $N=22$ .



**Figure 17c :** Corrélation (n°6) entre AOT AERONET (Lille) et PM 2.5 (Lille ), août 03. La régression linéaire obtenue est :  $PM\ 2.5 = 42.75 \times AOT_{sol} + 5.35$ ,  $R = 0.86$ ,  $N=14$ .



**Figure 17d :** Corrélation (n°7) entre AOT AERONET (Haute Normandie) et PM 2.5 (Palaiseau ), août 03. La régression linéaire obtenue est :  $PM\ 2.5 = 54.70 \times AOT_{sol} - 2.12$ ,  $R = 0.79$ ,  $N=21$ .

Comme le montrent les Figures 17a, 17c et 17d, en ce qui concerne les corrélations entre Gennevilliers et Palaiseau, à Lille et entre la Haute Normandie et Palaiseau (de coefficients de corrélation respectifs 0.89, 0.86 et 0.79), on observe un assez bon accord entre l'évolution des données de PM2.5 et d'AOT AERONET. Au contraire, la corrélation n° 5b (Figure 17b) montre un coefficient de corrélation égal à 0.47. Il est important de noter que les données de PM 2.5 et d'AOT AERONET au cours de l'épisode de pollution estival sont d'avantage corrélées entre les sites de Gennevilliers (département 92) et Palaiseau (département 91) par rapport à Gennevilliers et Fontainebleau (77). A l'inverse de ce qui a été remarqué au cours de l'épisode hivernal, des sites de mesures plus proches entraînent donc une meilleure corrélation. Cette observation semble appuyer le fait que l'épisode estival de pollution, à la différence de l'épisode hivernal, présenterait une homogénéité spatiale moindre.

En conclusion, la corrélation obtenue à partir des mesures de tous les sites coïncidents reste relativement satisfaisante contrairement à l'hiver. Ceci semble indiquer une meilleure représentativité des PM2.5 en terme de contenu en aérosols intégré verticalement. Comme dans le cas de l'épisode hivernal, les mesures de PM et d'AOT semblent ne pas être en bon accord dans le cas de la région Parisienne caractérisée par une forte densité urbaine et automobile. De plus, on note que lorsque la corrélation est satisfaisante, la relation entre AOT et PM2.5 est la même (pente proche de 50) quelque soit le site d'observation. Ce qui n'était pas le cas en ce qui concerne l'épisode hivernal.

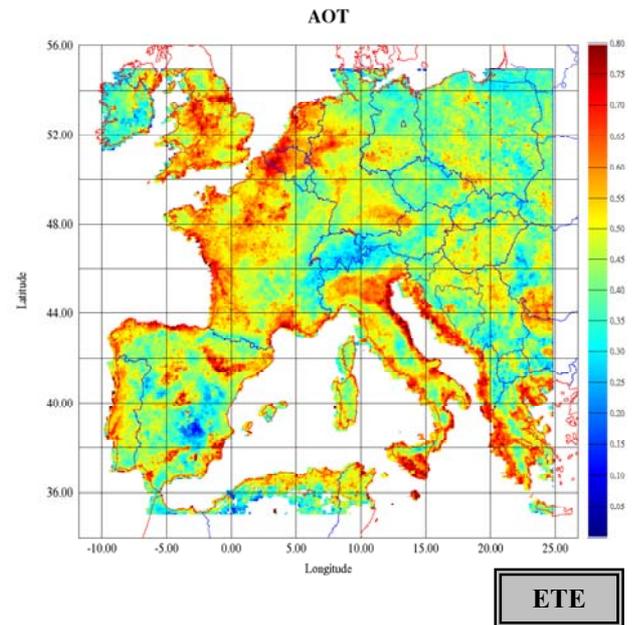
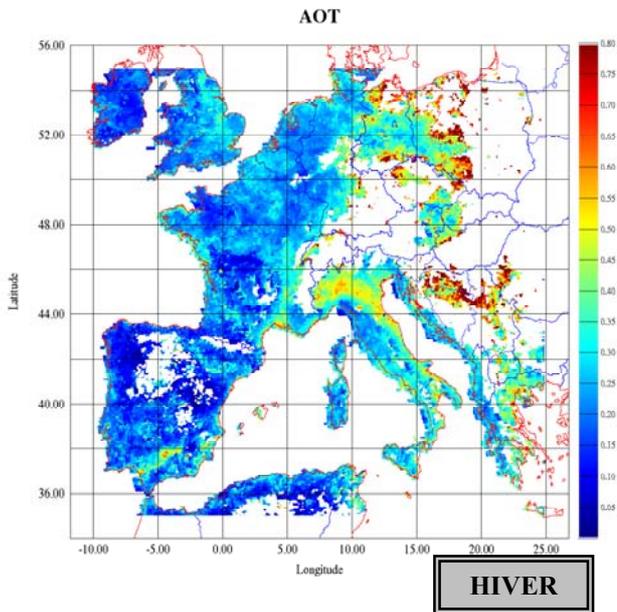
## 4 Analyse et interprétation à partir des observations satellitaires

La comparaison entre les mesures optiques intégrées sur la colonne d'atmosphère et des mesures de concentrations massiques au sol montre une relativement bonne corrélation. L'objectif est maintenant d'utiliser les observations spatiales pour donner un caractère plus régional à notre étude. Nous avons procédé en 2 étapes. Tout d'abord, nous présentons l'élaboration de cartes d'épaisseur optique en aérosols au cours de l'année 2003 et les informations qu'elles nous apportent. Puis, après avoir évalué l'apport des données MODIS provenant du deuxième capteur embarqué sur le satellite AQUA, nous avons comparé les données d'épaisseur optique AERONET mesurées depuis le sol aux observations restituées par le capteur MODIS.

### 4.1 Analyse des cartes d'épaisseurs optiques en aérosols MODIS durant les 2 épisodes de pollution particulaires.

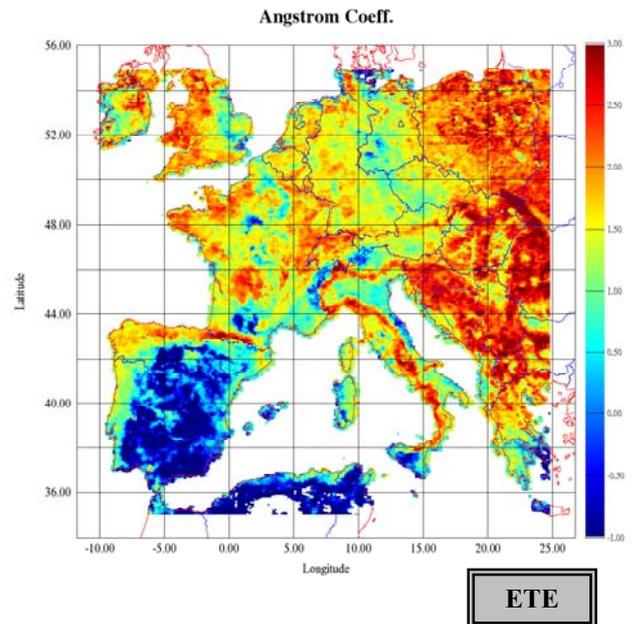
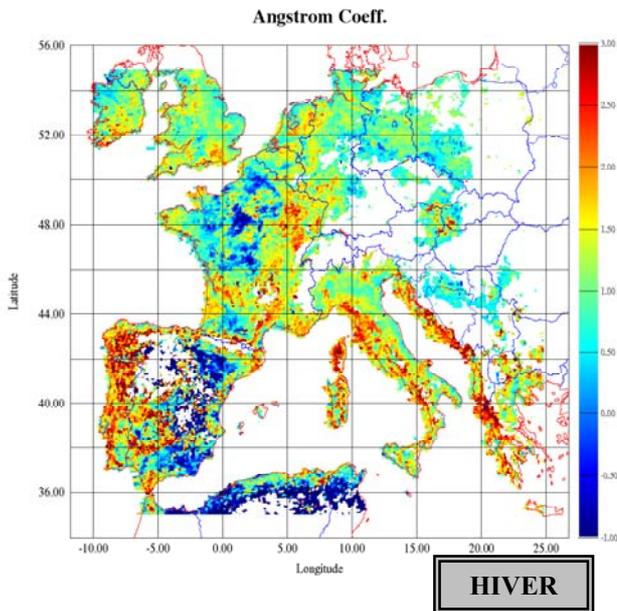
Grâce à la réalisation de 2 programmes informatiques utilisant successivement HDFLook et Mgraph (logiciels développés au sein du laboratoire LOA), nous avons pu élaborer des cartes journalières d'épaisseurs optiques en aérosols au dessus des continents à une longueur d'onde de 470 nm (latitude : [35 ; 55] et longitude : [-10 ; 25]). Les cartes de moyennes mensuelles d'épaisseur optique (construites à partir de données journalières de résolution spatiale 10 x 10 km, Figures 18a et 18b) permettent de présenter la variabilité mensuelle d'AOT observée par satellite sur une partie de l'Europe au cours des

2 épisodes de pollution en aérosols. Les cartes des Figures 18c et 18d présentent les valeurs des moyennes de coefficient d'Angström. En février, les données sont moyennées du 10/02, au 28/02 et en août du 5/08 au 28/08/2003.



**Figure 18a:** Epaisseurs optiques en aérosols restituées par MODIS (AQUA et TERRA) au dessus de l'Europe pour le mois de février 2003.

**Figure 18b:** Epaisseurs optiques restituées par MODIS (AQUA et TERRA) au dessus de l'Europe pour le mois d'août 2003.



**Figure 18c:** Coefficients d'Angström restituées par MODIS (AQUA et TERRA) au dessus de l'Europe pour le mois de février 2003.

**Figure 18d:** Coefficients d'Angström restituées par MODIS (AQUA et TERRA) au dessus de l'Europe pour le mois d'août 2003.

Le Tableau 5 ci-dessous présente quelques valeurs d'épaisseur optique et de coefficient d'Angström au dessus de plusieurs régions d'une partie de l'Europe. Ces valeurs ont été recueillies à partir des

cartes des Figures 18a, 18b, 18c et 18d grâce au logiciel MSPHINX (élaboré au LOA).

Zone géographique	AOT, février 2003	Angström, février 2003	AOT, août 2003	Angström, août 2003
Plaine du Pô	0.50	1.0	0.56	0.86
Sud Espagne	0.17	0.2	0.50	0.75
Pays Bas	0.30	0.95	0.53	1.60
Angleterre, côte Est	0.24	1.0	0.41	1.39

*Tableau 5: Moyennes d'épaisseurs optiques en aérosols et de coefficients d'Angström au cours des mois de février (10/02 au 28/02) et en août (5/08 au 28/08) restituées par MODIS sur différentes régions européennes.*

La carte de la Figure 18b, correspondant au mois d'août est beaucoup plus fournie en données d'épaisseur optique que celle de la Figure 18a. Mis à part le fait qu'il y ait beaucoup plus de nuages en hiver, ceci est principalement dû au fait que le calcul d'inversion du capteur MODIS ne s'effectue pas au dessus de surfaces très brillantes comme la neige.

En février, nous observons de fortes valeurs d'AOT sur l'Europe de l'Est. La proximité de zones non inversées en épaisseur optique, semble indiquer une contamination de ces fortes valeurs d'AOT par des nuages résiduels. Cependant, ces fortes valeurs d'AOT sont en accord avec notre précédente analyse, montrant une origine est-européenne de la pollution (et, entre autre, le nord de l'Italie).

Remarquons que la plaine du Pô (zone au nord de l'Italie) présente de fortes valeurs d'épaisseur optique que ce soit au cours de l'épisode estival ou hivernal (respectivement égales à 0.56 et 0.50). Les forts reliefs à l'entour et la zone géographique en forme de « cuvette » facilitent l'accumulation de particules polluantes au dessus de cette région très industrialisée du nord de l'Italie.

On remarque, de manière générale, de fortes valeurs d'AOT accompagnées de fortes valeurs de coefficient d'Angström (caractéristiques d'aérosols urbains ou industriels de faible taille de type suies ou aérosols secondaires) au dessus de zones très industrialisées comme Marseille, la Grèce, les zones portuaires du sud des Pays Bas (AOT égal à 0.3 en hiver, 0.53 en été et coefficient d'Angström égal à 0.95 en hiver et 1.6 en été) et de la Belgique ou la cote Est de l'Angleterre (AOT égal à 0.24 en hiver, 0.41 en été et coefficient d'Angström égal à 1 en hiver et 1.34 en été). Par contre, les valeurs d'AOT et de coefficient d'Angström au dessus du Sud de l'Espagne (AOT égal à 0.17 en hiver, 0.5 en été et coefficient d'Angström égal à 0.2 en hiver et 0.75 en été), zone comportant des usines de pétrochimie, sont nettement inférieures à celles de l'Europe du Nord. En août, on observe bien les fortes valeurs d'AOT sur le Nord de l'Europe (Pays-Bas, Royaume-Unis). Cette observation est en accord avec notre précédente interprétation, donnant une origine plutôt Nord-européenne de la pollution estivale (Angleterre).

D'après le Tableau 5, on observe une épaisseur optique en aérosols MODIS généralement plus faible en hiver qu'en été comme ce qui a été remarqué lors de l'étude des AOT AERONET au dessus de Lille (§ 3.1.2). Il est important de souligner que plus les valeurs d'épaisseur optique sont faibles, moins les valeurs de coefficient d'Angström sont fiables. C'est pourquoi, il semblerait que sur la Figure 18c, les fortes valeurs de coefficient d'Angström n'aient pas de réalité physique. D'après le Tableau 5, les valeurs de coefficients d'Angström sont plus faibles au Sud (Plaine du Pô et Sud de l'Espagne). Il est possible qu'il s'agisse, sur ces zones géographiques, de particules désertiques provenant de sources de poussières en Afrique du Nord.

#### **4.2 Comparaison des observations d'aérosols fournies par MODIS/ AQUA et TERRA**

L'objectif final de cette étude est d'examiner la cohérence entre les observations de MODIS et les mesures depuis le sol de la qualité de l'air. Avant d'effectuer cette étude globale, il est nécessaire de s'assurer de la qualité des observations spatiales pour notre application. Les mesures photométriques étant directes (pas d'hypothèse sur l'inversion), nous les utiliserons dans un premier temps pour la validation du capteur MODIS. Nous allons également utiliser les deux observations journalières

fournies par TERRA et AQUA.

Tout d'abord, nous avons étudié, de manière globale, l'apport des mesures des 2 plateformes en se basant sur les cartes présentées plus haut (Figures 18a, 18b, 18c et 18d). Cette étude a été menée grâce à l'élaboration d'un programme calculant, pixel par pixel, la différence entre les données d'épaisseurs optiques et de coefficients d'Angström provenant de TERRA et AQUA. Nous avons retenu les valeurs d'épaisseur optique en aérosols comprises entre 0 et 2 et des coefficients d'Angström compris entre -1 et 4 afin d'écarter toute mesure aberrante.

Les résultats de cette comparaison sont donnés dans le Tableau 6 ci-dessous. Il y figure le nombre de données (sous forme de pixels) fourni individuellement par le passage des 2 plateformes. La densité de probabilité des différences entre les valeurs de TERRA et AQUA semble être de forme gaussienne. La valeur moyenne des différences ainsi que l'écart type figurent dans le Tableau 6. Il est important de noter que tous les résultats du Tableau 6 correspondent à des moyennes faites du 10/ 02/ 03 au 28/02/03 et du 5/08 au 28/08.

	AOT, février 2003	Angström, février 2003	AOT, août 2003	Angström, août 2003
Nombre de pixels où coexistent des mesures fournies par TERRA et AQUA	106443	100788	162892	153254
Nombre de pixels où existent des mesures fournies par TERRA	14476	15289	4355	5753
Nombre de pixels où existent des mesures fournies par AQUA	8816	9518	6422	8833
Moyenne des différences entre les données AQUA et TERRA	-0.0023	-0.06	-0.04	-0.22
Ecart type des différences entre les données AQUA et TERRA	0.1	0.6	0.07	0.44

**Tableau 6** : Etude de comparaison entre l'apport des données MODIS TERRA et AQUA (moyennes faites de 10/02 au 28/ 02 et du 5/08 au 28/08) au cours des 2 épisodes particuliers.

En moyenne, les valeurs d'épaisseurs optiques et de coefficient d'Angström fournis par les deux plateformes sont très proches (moyenne des différences nulle et écart type très faible). Si on complète les observations du matin avec celles de l'après midi, on observe un apport de respectivement 7,3% et 3,8% de la plateforme AQUA sur les données d'AOT TERRA en février et en août. En ce qui concerne les coefficients d'Angström, l'apport des données AQUA est de 8.2% en hiver et 5.5% en été. On remarque cependant une moyenne plus faible en hiver qu'en été. En analysant les différences de données chaque jour, nous avons remarqué un apport des données AQUA pouvant aller jusqu'à 44% de pixels, spécialement en période hivernale lorsque le ciel est partiellement couvert de nuages. Il serait judicieux d'approfondir l'analyse des cartes journalières individuellement ( voir Figures A, B, C et D pour le 21/ 02/ 03 et le 08/ 08/ 03 présentées en annexe) de manière à pouvoir expliquer pourquoi, certains jours, l'inversion n'est pas faite d'une plateforme à l'autre. De même qu'en moyennes mensuelles, les observations journalières sont généralement très semblables entre AQUA et TERRA. Cette première analyse semble indiquer que l'apport des mesures AQUA à TERRA réside surtout dans un apport supplémentaire de points de mesures à l'échelle de la journée. Cette apport est pratiquement négligeable lorsque l'on considère les moyennes mensuelles.

Par la suite, nous avons séparé les données AQUA et TERRA lors de la comparaison avec les mesures photométriques.

### 4.3 Etude de corrélation entre les mesures d'AOT AERONET et les restitutions d'AOT MODIS.

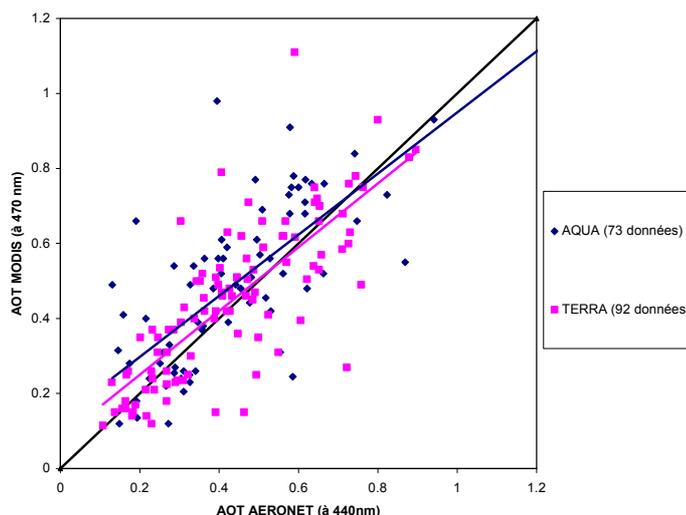
Nous avons mené une étude de corrélation entre les données d'épaisseur optique en aérosols AERONET et MODIS. Sur une journée, parmi les mesures horaires d'AOT AERONET à 440nm, nous avons sélectionné les valeurs contenues dans les intervalles horaires [ 10h ; 11h[ et [ 13h ; 14h[ . Les données ont ensuite été moyennées sur leur intervalles respectifs de sorte qu'il en résulte 2 données AERONET par jour. Alors que la moyenne correspondant à l'intervalle [ 10h ; 11h[ sert à l'étude de corrélation entre les données AERONET et les observations MODIS provenant de la plate-forme TERRA (satellite survolant l'équateur à 10 :30), celle correspondant à l'intervalle [ 13h ; 14h[ sert à l'étude de corrélation entre données AERONET et données MODIS provenant de la plate-forme AQUA (satellite survolant l'équateur à 13 :30). Grâce à l'élaboration d'un programme informatique utilisant le logiciel HDFLook, il est possible d'obtenir les données d'AOT MODIS pour une latitude et longitude donnée. Connaissant la localisation des sites AERONET, cette étude de corrélation est alors plus précise que la précédente (entre données PM 2.5 et AOT AERONET où nous ne pouvions pas contraindre facilement la proximité des sites à comparer).

En utilisant les sites de mesures dont les données sont disponibles, dans le cadre de cette étude de février et août 2003, nous avons mené les études de corrélations suivantes (Tableau 7) :

<b>Février 2003 (du 10/02/03 au 28/02/03) (groupe n°1)</b>	Lille, Fontainebleau, Avignon, Ville Franche (sans les données d'AQUA) et Palaiseau.
<b>Août 2003 (du 05/08/03 au 20/08/03) (groupe n°2)</b>	Lille, Fontainebleau, Avignon, Carpentras, Toulouse (sans les données d'AQUA), Toulon, Palaiseau et Dunkerque (sans les données de TERRA).

**Tableau 7 :** Sites de mesures AERONET pour lesquels sont menées les études de corrélation entre les données d'AOT AERONET et MODIS au cours des 2 épisodes de pollution de 2003.

La Figure 19 ci-dessous montre les corrélations obtenues entre les valeurs d'épaisseur optique en aérosols MODIS et AERONET pour tous les sites du groupe n°1 et n°2 réunis en hiver et tous les sites du groupe n° 2 réunis en été.



**Figure 19 :** Corrélation entre mesures d'AOT MODIS (plate-formes TERRA et AQUA traitées séparément) et AERONET du 10/02/03 au 28/02/03 et du 05/08/03 au 20/08/03 sur tous les sites du groupe n°1 et n°2 réunis. Les régressions linéaires obtenues sont :  
 $AOT_{TERRA} = 0.85 \times AOT_{sol} + 0.08$ ,  $R_{TERRA} = 0.77$ ,  $N_{TERRA} = 92$  et  $AOT_{AQUA} = 0.82 \times AOT_{sol} + 0.13$ ,  $R_{AQUA} = 0.70$ ,  $N_{AQUA} = 73$

D'après la Figure 19, nous observons une assez bonne corrélation entre les données d'AOT AERONET et MODIS provenant de la plateforme TERRA (coefficient de corrélation de 0.77) et de la plateforme AQUA (coefficient de corrélation de 0.70). Les pentes des droites de régression pour AQUA et TERRA sont très similaires. Les résultats sont très proches de ceux présentés par *Chu et al. [2003]* ( $AOT_{MODIS} = 0.84 AOT_{sol} + 0.07$  et  $R = 0.91$ ) qui ont mené une validation des AOT MODIS d'août 2000 à juillet 2002 pour différentes régions incluant l'Est des Etats-Unis, l'Europe, l'Asie, l'Amérique du Sud et l'Afrique du Sud. Cependant, il est à noter que le coefficient de corrélation observé est supérieur au nôtre.

En examinant les corrélations obtenues site par site et pour chacun des 2 épisodes de pollution, on obtient les résultats du Tableau 8 ci-dessous.

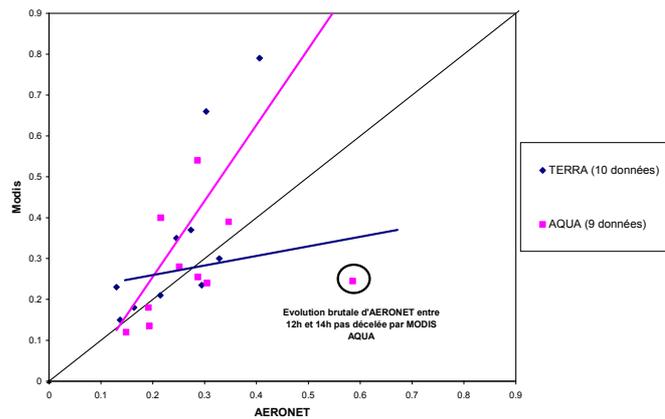
Localisation des sites	R pour l'épisode hivernal	R pour l'épisode estival
<b>Avignon</b>	TERRA : 0.9 ; N=6 AQUA : 0.86 ; N=4	TERRA : 0.88 ; N=12 AQUA : 0.91 ; N=11
<b>Lille</b>	TERRA : 0.78 ; N=10 AQUA : 0.22 ; N=9	TERRA : 0.89 ; N=8 AQUA : 0.85 ; N=7
<b>Villefranche</b>	TERRA : 0.58 ; N=10 AQUA : N/A	TERRA : N/A AQUA : N/A
<b>Fontainebleau</b>	TERRA : 0.276 et pente < 0 ; N=5 AQUA : 0.95 ; N=5	TERRA : 0.412 ; N=7 AQUA : 0.251 et pente < 0 ; N=7
<b>Palaiseau</b>	TERRA : 0.79 ; N=7 AQUA : 0.62 ; N=5	TERRA : 0.61 ; N=8 AQUA : 0.67 ; N=7
<b>Toulouse</b>	TERRA : N/A AQUA : N/A	TERRA : 0.71 ; N=8 AQUA : N/A ; N=1
<b>Dunkerque</b>	TERRA : N/A AQUA : N/A	TERRA : N/A AQUA : 0.93 ; N=6
<b>Carpentras</b>	TERRA : N/A AQUA : N/A	TERRA : 0.94 ; N=11 AQUA : 0.79 ; N=5
<b>Toulon</b>	TERRA : N/A AQUA : N/A	TERRA : 0.94 ; N=9 AQUA : 0.73 ; N=6

**Tableau 8** : Résultats des études de corrélation entre données d'épaisseurs optiques en aérosols AERONET et MODIS (plate-formes AQUA et TERRA) obtenus pour chaque site au cours des épisodes de pollution ; N/A veut dire pas de données disponibles ; N est le nombre de mesures.

Les valeurs en rouge du Tableau 8 correspondent à des corrélations supérieures à 0.6. D'après le Tableau 8, il semble qu'au dessus d'Avignon il y ait un bon accord entre l'évolution des données d'AOT AERONET et MODIS (coefficient de corrélation égal à 0.9 pour TERRA et supérieur à 0.8 pour AQUA en février et supérieur à 0.8 et 0.9 respectivement pour TERRA et AQUA en août). Remarquons qu'en ce qui concerne Fontainebleau et Palaiseau (Tableau 8), sites tous deux boisés, nous devrions obtenir une bonne corrélation due à un meilleur calcul d'épaisseur optique de la part de MODIS (la surface apparaît sombre et l'effet atmosphérique est maximisé) alors qu'il n'en est rien. D'après le Tableau 8, sur le site de Lille, les données d'épaisseur optique d'AERONET et celles de MODIS provenant de la plate-forme TERRA et AQUA semblent bien corrélées au cours de l'épisode particulière estival (coefficients de corrélation supérieur à 0.84 pour AQUA et 0.89 pour TERRA); la même chose est observée pour les données MODIS provenant de la plate-forme TERRA et les données AERONET au cours de l'épisode hivernal (coefficient de corrélation supérieur à 0.77). Par contre, en février, les données fournies par la plate-forme AQUA ne sont pas corrélées aux données AERONET (coefficient de corrélation égal à 0.22).

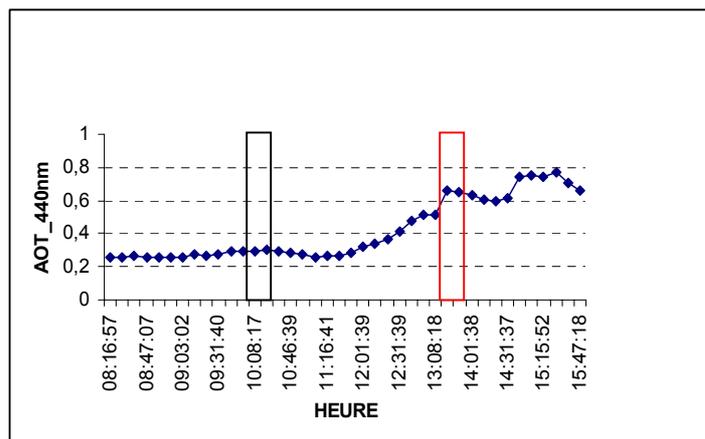
Si on analyse en détail cette situation (Figure 20 ci-dessous), on remarque une valeur AERONET correspondant au 21/ 02/ 03 (point encerclé) qui diffère beaucoup de celle de

## MODIS pour la plate-forme AQUA.



**Figure 20** : Corrélation entre AOT MODIS et AERONET sur Lille en février 2003. Les régressions linéaires obtenues sont :  $AOT_{TERRA} = 1.86 \times AOT_{sol} - 0.11$ ,  $R_{TERRA} = 0.78$ ,  $N_{TERRA}=10$  et  $AOT_{AQUA} = 0.23 \times AOT_{sol} + 0.21$ ,  $R_{AQUA} = 0.22$ ,  $N_{AQUA}=9$ .

Si on observe l'évolution horaire d'AOT AERONET le 21 février (Figure 21), cette journée est marquée par un fort gradient temporel de l'épaisseur optique en aérosol:



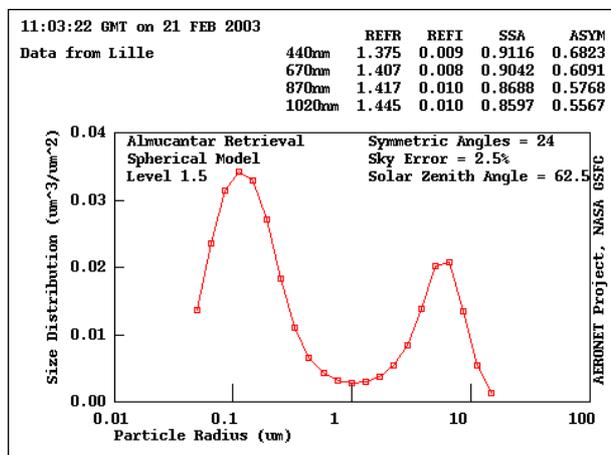
**Figure 21** : Mesures instantanées d'AOT AERONET le 21/02/03 à Lille (niveau 1,5) et AQUA passe sur Lille à 13h35 (carré rouge) alors que TERRA passe à 10h30 environ (carré noir).

D'après la Figure 21, on observe une évolution brutale et rapide d'AOT AERONET entre 12h et 14h qui n'est manifestement pas décelée par MODIS. Sur la période hivernale, le 21/02/03 présente le cycle diurne de l'épaisseur optique le plus marqué. Il semble que le caractère très local de ce pic d'AOT soit une des causes de la mauvaise corrélation entre les données MODIS et AERONET. En règle générale, d'après *Smirnov et al. [2001]*, les sites urbains ou industriels sont caractérisés par une variabilité d'AOT AERONET de 10% à 40% entre le matin et l'après midi.

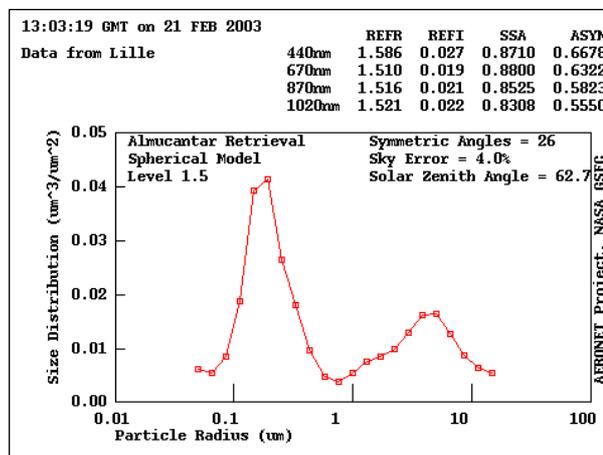
Nous avons également analysé la restitution de la distribution en taille des particules et de leurs propriétés optiques à partir des mesures de luminance diffuse du photomètre. L'algorithme d'inversion est celui de *Dubovik et al. [2000]* et les résultats de cette inversion sont disponibles pour l'ensemble des photomètres du réseau AERONET.

Les Figures 22a et 22b ci-dessous décrivent la distribution en taille des aérosols le 21 février 2003 au dessus de Lille respectivement à environ 11h00 et 13h00 (UTC). En haut à droite des Figures 22a et 22b figurent les valeurs d'albédo de diffusion simple (« SSA » pour Single Scattering Albédo) à

plusieurs longueurs d'onde. La part de la diffusion dans l'extinction est donnée par l'albédo de diffusion simple (pour un aérosol non absorbant, l'albédo de diffusion simple est égal à 1). Les propriétés d'absorption sont directement liées à la composition chimique de l'aérosol (et à la partie imaginaire de l'indice de réfraction). Plus l'aérosol est absorbant et plus l'albédo de diffusion simple est faible (proche de 0).



**Figure 22a** : Distribution en taille des particules au dessus de Lille le 21/ 02/ 03 à 11h03.



**Figure 22b** : Distribution en taille des particules au dessus de Lille le 21/ 02/ 03 à 13h03.

D'après les Figures 22a et 22b, la distribution en taille des aérosols à 11h00 et à 13h00 est similaire, de forme lognormale bimodale (en ce qui concerne le rayon physique des particules, un mode fin autour de 0.1µm et un mode grossier autour de 8µm). Cependant, on observe une augmentation de la contribution du mode fin de particules l'après midi. De plus, on observe un albédo de diffusion simple à 440 nm plus fort au cours de la matinée (égal à 0.91 à 11h03) qu'à 13h03 (égal à 0.87). On en déduit une plus forte absorption des aérosols à 13h00 qu'à 11h00. Ces observations montrent un changement des propriétés optiques des aérosols au cours de la journée. Il semble probable que le radiomètre, moins sensible aux particules absorbantes qu'aux particules diffusantes, n'ait pas pu déceler ce changement physico-chimique au niveau des aérosols.

En conclusion, grâce à l'analyse du 21/02/03 sur Lille, il semblerait qu'une variation diurne des données AERONET entre le matin et l'après midi ne soit pas décelée par MODIS. Cette observation pourrait provenir d'un pic de pollution au caractère très local et/ou d'une sensibilité moindre à l'absorption de la part du radiomètre MODIS. Il sera nécessaire d'effectuer un calcul exact de l'impact du changement de ces propriétés sur la réflectance mesurée par le satellite.

## 5 Conclusion

L'objectif de cette étude est d'évaluer la pertinence des informations apportées par l'instrument MODIS embarqué sur les satellites TERRA et AQUA dans le cadre de la surveillance de la pollution de l'atmosphère en aérosols. Pour ce faire, nous avons utilisé 3 types de mesures différentes (mesures photométriques depuis le sol, mesures de concentration massique fournies par le réseau de surveillance de la qualité de l'air et des mesures satellites provenant de 2 plateformes). Dans un premier temps, nous avons étudié l'évolution temporelle des concentrations massiques en particules et des épaisseurs optiques en aérosol (AOT) à Lille sur quelques années afin de choisir 2 épisodes de pollution particuliers significatifs (février et août 2003). Par la suite, nous avons étudié la corrélation entre les valeurs d'épaisseur optique en aérosols et la concentration massique en PM 2.5 pour plusieurs sites de comparaison au cours des épisodes choisis. Dans un second temps, nous avons évalué l'apport des données du capteur MODIS/ AQUA par rapport à MODIS/ TERRA ainsi que mené une étude de corrélation entre les données d'AOT AERONET prises au sol et mesurées par MODIS au dessus de plusieurs sites afin de s'assurer de la qualité des observations pour notre application (les données AERONET sont fiables car il n'y a pas d'hypothèse sur l'inversion).

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude sont les suivants :

- 1) Au cours de l'examen de l'évolution annuelle des contenus en particules ( PM 2.5 et PM10) à Lille, nous avons observé une évolution bi-modale formée principalement de 2 pics de pollution, l'un en hiver et l'autre, en été durant l'année 2003 et, à moindre mesure, pour l'année 2002.
- 2) Nous avons choisi les mois de février et d'août 2003 comme épisodes de pollution particulaire. Que ce soit au cours de l'année 2002 ou 2003, nous observons un pic maximal de concentration en PM 10 et PM 2.5 plus fort en hiver qu'en été à Lille. De plus, à Lille, l'épisode estival est caractérisé par des valeurs d'AOT plus élevées que celui de février (0.86 en août et 0.42 en février). D'après Wang et al. [2003], cette observation serait due à un effet hygroscopique plus grand en été.
- 3) En étendant l'étude à la France, d'après les différentes rétro-trajectoires de masse d'air atteignant Lille le 21/02/03, il semblerait que l'épisode de pollution particulaire hivernal soit dû à un transport de grande échelle consistant en un flux Sud-Nord (origine probable du Nord de l'Italie) alors que l'épisode d'été, moins étendu, proviendrait de l'Angleterre.
- 4) Que ce soit au cours du mois de février ou du mois d'août à Lille, grâce à une bonne corrélation entre les données de PM 2.5 et de PM 10 et un rapport similaire au cours des 2 épisodes de pollution, on peut conclure que 70% à 80% en masse des particules de diamètre aérodynamique inférieur à 10  $\mu\text{m}$  ont également un diamètre aérodynamique inférieur à 2.5  $\mu\text{m}$ . De plus, en examinant les moyennes mensuelles des coefficients d'Angström, il semblerait que les aérosols soient globalement de la même taille à l'intérieur de la colonne atmosphérique au dessus de Lille au cours des 2 épisodes de pollution particulaire.
- 5) Lorsque l'étude se porte sur l'intégralité de l'année 2003 à Lille, l'évolution des mesures d'AOT AERONET est relativement peu représentative de l'évolution des concentrations massiques de PM 2.5 (coefficient de corrélation égal à 0.53). En restreignant notre étude à l'été et l'hiver 2003, bien que les données d'AOT AERONET et de PM 2.5 soient généralement faiblement corrélées en hiver lorsque tous les sites de comparaison sont réunis (coefficient de 0.51), l'épisode d'été montre une meilleure et relativement bonne corrélation (coefficient de 0.75). En examinant chaque site de comparaison individuellement, dans le cas de la période hivernale, abstraction faite de 2 sites de comparaison, on obtient une bonne corrélation entre ces 2 types de mesures. Cependant, on montre une variation du rapport entre les données de PM 2.5 et d'AOT AERONET suivant les différents sites au cours de l'épisode hivernal. En ce qui concerne l'épisode estival, on observe un rapport similaire entre les mesures d'AOT AERONET et PM2.5 ainsi qu'un bon accord entre l'évolution des données à l'exception d'un site de comparaison. Que ce soit au cours de l'épisode hivernal ou estival, ces 2 types de mesures au sol semblent ne pas être en bon accord dans le cas de la région parisienne caractérisée par une forte densité urbaine et automobile. Par contre, on observe une corrélation satisfaisante sur Lille au cours des 2 épisodes de pollution.
- 6) L'élaboration de cartes d'épaisseur optique en aérosols et de coefficient d'Angström à partir de données MODIS permet respectivement de localiser et quantifier les panaches d'aérosols de pollution ainsi que de caractériser la taille des particules. De fortes valeurs d'AOT accompagnées de fortes valeurs de coefficient d'Angström ont, entre autres, été observés au dessus de zones très industrialisées (Nord de l'Italie en particulier).
- 7) En moyenne, les cartes d'épaisseurs optiques et de coefficients d'Angström fournies par MODIS sur AQUA et sur TERRA sont très semblables. Cette première analyse semble indiquer que l'apport des mesures AQUA à TERRA réside surtout dans un apport supplémentaire de points de mesures à l'échelle de la journée.

- 8) Nous observons une assez bonne corrélation entre les données d'AOT AERONET et MODIS provenant de la plateforme TERRA (coefficient de corrélation de 0.77) et de la plateforme AQUA (coefficient de corrélation de 0.70) lorsque tous les sites sont réunis au cours des 2 épisodes. Les pentes des droites de régression pour AQUA et TERRA sont similaires et très proches de celles présentées par *Chu et al. [2003]*.
- 9) Grâce à une analyse des données le 21/02/03 sur Lille, il semblerait qu'une variation diurne des données AERONET entre le matin et l'après midi ne soit pas décelée par MODIS. Cette observation pourrait provenir d'un pic de pollution au caractère très local ou d'une sensibilité moindre à l'absorption de la part du radiomètre MODIS.

Il serait judicieux d'approfondir par la suite l'analyse des cartes journalières (voir les cartes d'épaisseurs optiques en aérosols MODIS/ TERRA et AQUA le 21/ 02/ 03 et le 08/ 08/ 03 présentées en annexe, Figures A, B, C et D) de manière à pouvoir expliquer le fait qu'il n'y ait pas d'inversion d'une plateforme à l'autre pour certains jours. De plus, il reste à fusionner les données d'épaisseur optiques avec celles de taille et les propriétés chimiques des aérosols avant de corrélérer globalement les mesures satellites avec les observations de la qualité de l'air (corrélation entre données MODIS et PM 2.5) au dessus du continent européen. Au final, il sera nécessaire d'effectuer un calcul exact de l'impact du changement des propriétés physico-chimiques sur la réflectance mesurée par le satellite et d'élaborer un modèle plus évolutif au niveau régional prenant en compte les propriétés d'absorption des aérosols. Afin de contraindre le modèle d'inversion, les données du capteur POLDER2 embarqué sur le satellite ADEOS2, grâce à ses mesures de luminances polarisées pourront nous être utiles.

## 6 Références

- Agence Française de Sécurité Sanitaire et Environnementale, Impact sanitaire de la pollution atmosphérique, 90 pages, 2004.
- Bellouin, N., Estimation de l'effet direct des aérosols à partir de la modélisation et de la télédétection passive, Thèse à l'USTL, 2003.
- Chiapello, I, « Les aérosols atmosphériques au-dessus de l'atlantique nord tropical : approche physico-chimique et météorologique. Evaluation de la contribution des différentes espèces à l'épaisseur optique en aérosols », Thèse à Paris VII, 1996
- Chu, D.A. et al., Global monitoring of air pollution over land from Earth Observing System-Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), *Journal of Geophys. Res.*, vol. 108, 2003
- Dubovik, O. et al., Variability of Absorption and Optical Properties of Key Aerosol types Observed in worldwide locations, *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 59, 2000.
- Hale, G.M., and M.R Querry, Optical constants of water in the 200nm to 200µm wavelength region, *Appl. Opt.*, 555-563, 1973.
- Hänel, G., The real part of the mean complex refractive index and the mean density of samples of atmospheric aerosol particles, *Tellus*, 20, 371-379, 1968.
- Holben, B. et al., AERONET-A Federated Instrument Network And Data Archive For Aerosol Characterization, Remote Sensing Environment, vol. 66, 1-16, 1998.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, contribution of working group I to the 3th assessment report of the IPCC, edited by J. Houshton et al., Cambridge University Press, NY, 2001.
- Joint Research Center, European commission, A European aerosol phenomenology, 2003
- Kaufman, Y. J. and Tanré, D. « Algorithm for remote sensing of tropospheric aerosol from MODIS », ATBD, 1998
- Smirnov, A. et al., diurnal variability of aerosol optical depth observed at AERONET (Aerosol Robotic network) sites, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 29, 2002
- Wang, J and Sundar, A. C., Intercomparaison between satellite-derived aerosol optical thickness and PM 2.5 mass : Implications for air quality studies, *Journal of Geophysical Research*, vol. 30, 2003.

## 7 Remerciements

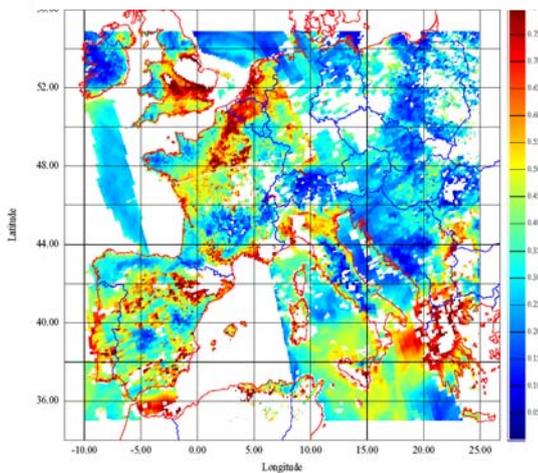
Mes plus vifs remerciements vont tout d'abord à Isabelle Chiapello, Jean François Léon et Didier Tanré qui m'ont donné la chance d'effectuer un stage au sein du Laboratoire d'Optique Atmosphérique.

Je remercie Louis Gonzales et Jérôme Reidi pour leur aide à l'utilisation d'HDFLook, Gérard Brogniez pour son aide dans mes révisions.

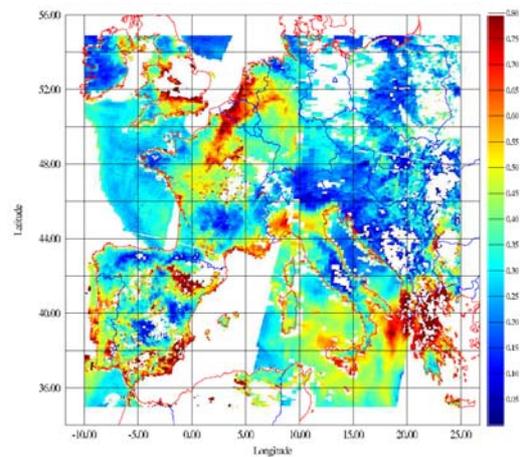
Je remercie Michaël Houët et Fabrice Ducos pour leur aide précieuse tout au long de mon travail.

Je n'oublierai pas mes camarades les thésards, Sophie, Nicolas, Gaëlle, Arnaud, Fabien et Bertrand ainsi que mes camarades de la salle d'armes dont l'amitié et le soutien m'ont été indispensable. Mes remerciements les plus chaleureux vont à la plus belle des petites sœurs, Edwige.

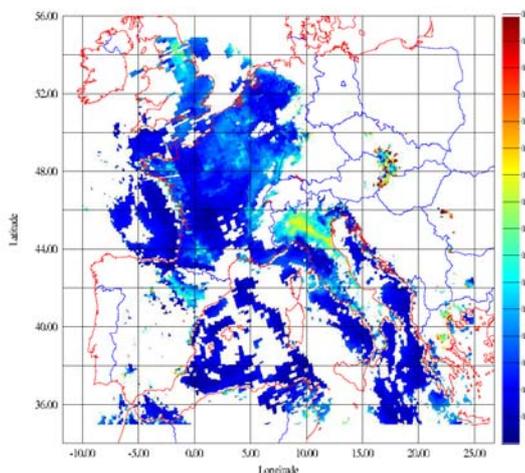
## 8 ANNEXE



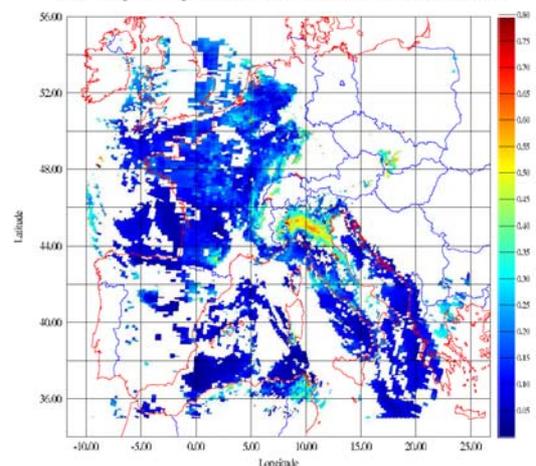
**Figure A** : Carte d'épaisseurs optiques en aérosol à 0.55  $\mu\text{m}$  restituées par MODIS/ AQUA le 08/ 08/ 03.



**Figure B** : Carte d'épaisseurs optiques en aérosol à 0.55  $\mu\text{m}$  restituées par MODIS/ TERRA le 08/ 08/ 03.



**Figure C** : Carte d'épaisseurs optiques en aérosol à 0.55  $\mu\text{m}$  restituées par MODIS/ AQUA le 21/ 02/ 03.



**Figure D** : Carte d'épaisseurs optiques en aérosol à 0.55  $\mu\text{m}$  restituées par MODIS/ TERRA le 21/ 02/ 03.