







Ecole Doctorale Sciences et Technologie

UNIVERSITE LIBANAISE ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES ET DE TECHNOLOGIE

Rapport de stage Master 2 Recherche

Pour l'obtention du diplôme du Master 2 Recherche En **Laser et Matière**

Présenté par

Rita NOHRA

Observations des cirrus à l'aide des mesures Lidar effectuées à la station de Lille (France)

Soutenu le 5 juillet 2012

Pr. Antonio Khoury Pr. Fadia Taher Dr. Roy Asmar Responsable du stage Rapporteur Examinateur

Travail effectué au laboratoire d'Optique Atmosphérique (LOA) sous la direction de :

Pr. Fréderic PAROL

Pr. Philippe DUBUISSON

Résumé

Les cirrus constituent un groupe particulier de nuages. Étant situés en haute altitude, ils sont majoritairement composés de cristaux de glace de formes et de dimensions très variées. L'impact des cirrus sur le bilan énergétique terrestre est mal quantifié car ils influent sur le bilan radiatif suivant deux effets antagonistes. Depuis 2006, le LOA a commencé à développer la base d'un réseau composé de micro-LIDAR élastique émettant à 532nm développé par la société CIMEL(Paris). Seules les mesures relatives aux aérosols sont utilisées au LOA. L'objectif de cette étude est de développer un outil de traitement permettant de détecter les cirrus à partir des données Lidar. Les résultats préliminaires obtenus nous ont permis de faire une statistique de la présence des cirrus au dessus de Lille en 2011. Pour les saisons d'hiver et de printemps nous trouvons que l'occurrence des cirrus, la température des cirrus et la moyenne des altitudes du sommet des premières couches de cirrus ont des valeurs plus basses que celles obtenues pour les saisons d'été et d'automne.

Abstract

Cirrus clouds are a special group of clouds. They are located at high altitude, and they are mainly composed of ice crystals of sizes and shapes varying widely. The impact of cirrus clouds on Earth's energy balance is not well quantified because they affect the radiation balance following two opposite effects. Since 2006, the LOA began to develop the basis of a network of micro-elastic Lidar emitting at 532nm developed by CIMEL (Paris). Presently only measurements of aerosols are analyzed at LOA. The objective of this study is to develop a treatment tool that currently allows detecting cirrus clouds from Lidar data. Preliminary results allow us to make a statistic of the presence of cirrus clouds over Lille in 2011. For winter and spring we find that the occurrence of cirrus, cirrus temperature and the average altitude of the top of the lowest layers of cirrus clouds have smaller values than those obtained for summer and autumn.

Remerciements

Je tiens à remercier dans un premier temps et à témoigner toute ma reconnaissance dans ce stage au Pr Philippe DUBUSSON, mon maitre de stage qui a supervisé mon stage au jour le jour, et au Pr Fréderic PAROL, directeur de laboratoire.

Je tiens à remercier également toute l'équipe du Laboratoire d'Optique Atmosphérique(LOA) de m'avoir accueillie durant ces trois mois, tout particulièrement Romain de FILIPPI, Augustin MORTIER, Fabrice DUCOS, Fany PEERS.

De plus j'adresse mes remerciements au Pr Antonio Khoury, responsable du Master physique à l'Université Libanaise-Faculté des Sciences II, Pr Dominique Dérozier, qui m'a donné la chance de réaliser mon stage de M2 à Lille 1, Pr Fadia Taher de m'avoir proposé ce sujet de stage.

J'aimerais également remercier ma famille pour le soutien et la patience qu'elle ma témoignée, et tous mes amis de m'avoir soutenue et encouragée durant ces trois mois et avec eux j'ai passé d'excellents moments.

Table des matières

Chapitre.I-Introduction	2
Chapitre.II-Classification et impact radiatif des nuages	3
II.1-Classification des nuages	3
II.2-Forçage radiatif	5
II.3-Cirrus	9
II.3.a-Généralités sur les cirrus	9
II.3.b-Formation des cirrus	9
II.3.c-Propriétés microphysiques des cirrus	10
II.3.d-Propriétés macrophysiques des cirrus	12
II.3.e-Influence des cirrus sur le bilan radiatif	13
Chapitre.III-Instruments et mesures	13
III.1-Lidar	13
III.2-Principe de la mesure par Lidar	15
III.3-Aspects techniques du Lidar du LOA	17
III.4-Sky Imager	20
Chapitre.IV-Détection des cirrus	21
IV.1-Méthode de seuil de détection	21
IV.2-Données météorologiques : Logiciel Wgrib	25
Chapitre.V-Résultats préliminaires et discussion	27
Chapitre.VI-Conclusion et perspectives	31
Bibliographie	

I-Introduction

Un des phénomènes atmosphériques les plus évidents pour tout observateur du climat est la présence, ou l'absence, de nuages. Ils couvrent en moyenne 70% de la surface du globe, et ont par conséquent une énorme influence sur le bilan radiatif terrestre, et donc sur le climat. Néanmoins, de nombreuses caractéristiques essentielles des nuages restent mal connues : couverture spatiale et temporelle, propriétés optiques et physiques, évolution dynamique...

Les cirrus constituent un groupe particulier de nuages. Étant situés en haute altitude, ils sont majoritairement composés de cristaux de glace de formes et de dimensions très variées. L'impact des cirrus sur le bilan énergétique terrestre est mal quantifié car ils influent sur le bilan radiatif suivant deux effets antagonistes. D'une part, ils réfléchissent en partie vers l'espace le rayonnement solaire incident et d'autre part, ils participent à l'effet de serre car ils piègent le rayonnement infrarouge émis par les couches basses de l'atmosphère en le réémettant vers le sol et l'espace. En effet, de part leur répartition spatio-temporelle importante (ils recouvrent en permanence environ 30% du globe terrestre), les cirrus font partie des nuages qui ont l'impact climatique le plus important.

Diverses techniques destinées à l'observation des propriétés des cirrus ont donc été mises au points, utilisant les mesures de nombreux instruments soit de télédétection passive, par l'usage de radiomètres à différentes longueurs d'onde, soit de télédétection active, en utilisant des lidars (domaine visible et infrarouge) et des radars (domaine millimétrique). Le LOA possède une station d'observation atmosphérique équipée d'un lidar à 532 nm (laser pour le sondage vertical) et divers instruments de détection passive. Cependant seules les mesures Lidar relatives aux aérosols sont utilisées au LOA.

L'objectif de mon stage était donc de réaliser une première analyse des données Lidar pour l'étude des cirrus au dessus de Lille. La première partie de ce rapport présente des généralités sur la climatologie des nuages et leur classification, plus particulièrement pour les cirrus et les contrails. Dans une seconde partie, les instruments disponibles au LOA sont présentés, en particulier le Lidar. La troisième partie présente la méthodologie utilisée en détection des cirrus. Finalement dans la dernière partie de mon rapport, une statistique sur l'année 2011 de la présence des cirrus est présentée à partir de résultats préliminaires obtenus par un programme informatique en scilab traitant les données Lidar.

II-Classification et impact radiatif des nuages.

II- 1-Classification des nuages.

Les nuages peuvent être classifiés par des paramètres mesurables expérimentalement. En effet deux paramètres sont particulièrement significatifs : l'altitude et la composition. La température et la pression de l'atmosphère varient en fonction de l'altitude, cette variation est présentée sur la figure (II.1). Il est ainsi courant de parler de nuage bas (nuage de basse altitude), de nuage moyen et de nuage haut (nuage de haute altitude), et enfin les nuages à fort développement vertical. L'altitude des nuages bas varie faiblement, la latitude important peu, alors que l'altitude des nuages hauts varie énormément; ils suivent l'évolution de la tropopause⁽¹⁾, qui elle-même varie en fonction de l'intensité de la convection (figure II.2). En notant que c'est l'altitude de la base du nuage qui est prise en compte pour les classer, certains nuages, très développés verticalement, peuvent déborder dans l'étage supérieur.



Figure II.1 : Variation de la pression et de la température atmosphériques (trait rouge), avec *l'altitude.*

⁽¹⁾ tropopause : limite supérieure de la troposphère et limite inférieure de la stratosphère, elle varie avec la latitude, avec une valeur moyenne de 7 à 8 km dans les régions polaires, 11 à 12 dans les régions tempérées, de 17 à 18 km à l'équateur.



Figure II.2 : Variation de l'altitude de la tropopause en fonction de la latitude.

Un nuage peut être composé de gouttelettes d'eau (phase liquide), de cristaux de glace (phase glace) ou d'un mélange des deux (phase mixte). La quantité d'eau liquide dans les nuages d'eau devient rapidement négligeable pour des températures inférieures à -20°C, alors que la quantité de glace dans les nuages mixtes sature à 100% pour des températures inférieures à -20°C. Cependant, la température doit être inférieure à -40 °C pour assurer l'absence de phase liquide. Les nuages sont donc classés en dix genres (figure II.3), en combinant leur aspect et l'altitude de leur base. Cependant, des gouttelettes d'eau surfondues ont été détectées au sommet de cumulonimbus, pour des températures descendant jusque -37°C (Heymsfield et Miloshevich, 1993). Ces mesures restent tout de même relativement rares et font figure d'exception. Ainsi, on distingue les nuages stratiformes, c'est-à-dire en couche, cumuliformes (nuages isolés) et les inclassables, ceux qui ne sont ni l'un ni l'autre, ou bien les deux. On distingue donc :

-Les nuages de l'étage inférieur : Ce sont des nuages de basses altitudes (jusqu'à 2 000 mètres) qui incluent les stratus. Lorsque ces derniers rencontrent la terre, on les appelle brouillard. À l'étage inferieur se trouvent le stratus (St), le stratocumulus (Sc.), le cumulus (Cu) et le cumulonimbus (Cb) (qui est considéré comme un nuage à forte extension verticale);

-Les nuages de l'étage moyen se développent entre 2000 et 5000 mètres et sont classés en utilisant le préfixe alto-. Ils sont formés de gouttelettes d'eau. À l'étage moyen, se trouvent l'altocumulus (Ac), l'altostratus (As) et le nimbostratus (Ns).

-Les nuages de l'étage supérieur se forment au dessus de 5 000 mètres dans la région froide de la troposphère. Ils sont classés en utilisant le préfixe cirro- ou cirrus. À cette altitude, l'eau gèle quasiment toujours et ces nuages sont donc composés de cristaux de glace. À l'étage

supérieur se trouvent le cirrus (Ci), le cirrostratus (Cs) et le cirrocumulus (Cc), en ajoutant aussi les trainées d'avion (contrails).

-Et enfin les nuages verticaux, Cumulonimbus(Cb) qui s'étendent de 1km à 15 km. Ces nuages peuvent avoir de forts courants verticaux et s'élèvent bien au-dessus de leur base. Ils se forment à différentes altitudes.



Figure II.3 : Types des nuages en fonction de l'altitude.

II-2-Forçage radiatif

Le forçage radiatif mesure l'impact de certains facteurs affectant le climat sur l'équilibre énergétique du système couplé Terre/atmosphère. Le terme « radiatif » est utilisé du fait que ces facteurs modifient l'équilibre entre le rayonnement solaire entrant et l'émission de rayonnement infrarouge sortant de l'atmosphère. Cet équilibre radiatif contrôle la température à la surface de la planète. Le forçage radiatif est exprimé en « watts par mètre carré » (W/m^2)

Un forçage radiatif causé par un ou plusieurs facteurs est dit positif lorsqu'il entraîne un accroissement de l'énergie du système Terre/atmosphère et donc le réchauffement du système. Dans le cas inverse, un forçage radiatif est dit négatif lorsque l'énergie va en diminuant, ce qui entraîne le refroidissement du système. Les climatologues sont confrontés au problème ardu d'identifier tous les facteurs qui affectent le climat, ainsi que les mécanismes de forçage, de quantifier le forçage radiatif pour chaque facteur et d'évaluer la somme des forçages radiatifs pour un groupe de facteurs.

La composante anthropogénique du forçage radiatif est la modification du bilan radiatif qui est due à l'action de l'homme. La figure (II.4) présente les composantes anthropogéniques du forçage radiatif, (IPCC, 2007).

Sur la figure (II.4) la moyenne globale du forçage radiatif (RF) est estimée selon les émissions de 2005 pour le dioxyde de carbone anthropogénique (CO_2), le méthane (CH_4), l'oxyde nitreux (N_2O) et d'autres facteurs et mécanismes importants, avec une échelle spatiale de l'influence du forçage ainsi qu'un indice de confiance dans les niveaux affichés (level of scientific understanding, LOSU). Le forçage anthropogénique net et son étendue sont aussi illustrés. D'autres facteurs de forçage sont absents à cause de la faible confiance des scientifiques dans l'estimation de leurs valeurs. Les aérosols volcaniques contribuent à un forçage naturel additionnel, mais ne sont pas inclus ici à cause de leur caractère épisodique. A noter que l'estimation présentée pour les traînées de condensation (Linear contrails) n'inclut pas les effets possibles de l'aviation sur la couverture nuageuse. Remarquons d'après cette figure une différence importante sur les incertitudes des composantes ; alors qu'on trouve une grande incertitude pour l'effet des aérosols sur l'albédo des nuages, avec un effet négatif sur le bilan énergétique, celle de l'impact des gaz à effet de serre est plus faible avec un effet positif sur le bilan énergétique.





Figure II.4 : Composantes anthropogéniques du forçage radiatif (IPCC Fourth Assessment Report, Climate Change 2007)

En effet, l'albédo est le rapport de l'énergie solaire réfléchie par une surface sur l'énergie solaire incidente. Plus l'albédo est élevé, plus la surface réfléchit l'énergie, plus il est bas et plus elle l'absorbe. Par exemple l'activité humaine a un effet sur l'utilisation des terres, leur albédo est ainsi modifié. L'effet des aérosols sur l'albédo des nuages est présenté dans la figure II.5.Cette figure montre les différents mécanismes radiatifs associés aux effets des aérosols sur les nuages qui ont été identifiés comme étant significatifs. Les petits points noirs représentent les particules; les gros cercles représentent des gouttes dans les nuages. Les lignes droites représentent les rayons du soleil incidents et réfléchis. Les cercles blancs pleins indiquent la concentration du nombre de gouttes. Or depuis plus d'un siècle les activités humaines produisent des poussières et petites particules dues aux industries, voitures, combustion...En conséquence les nuages non pollués contiennent des gouttes d'eau plus grosses puisque les seuls noyaux de condensation existants proviennent des aérosols naturels, alors que les nuages pollués contiennent un plus grand nombre de petites gouttes d'eau puisque la poussière naturelle et la poussière anthropogénique (particules plus petites) sont disponibles comme noyaux de condensation.



Figure II.5 : Différents mécanismes radiatifs associés aux effets des aérosols sur les nuages, les lignes grises pointillées représentent les précipitations et LWC fait référence au contenu en eau liquide.

Ce mécanisme est celui qui est le plus compliqué à comprendre pour les forçages radiatifs. La physique des nuages est donc un phénomène complexe.

L'augmentation du trafic aérien depuis plus de 50 ans, modifie probablement le bilan radiatif de la terre. On remarque sur la figure II.4, l'existence de l'effet des Traînées de condensation sur le bilan radiatif. Bien que cet effet soit faible à l'échelle continentale, il peut être plus important à l'échelle locale. Les traînées de condensation (figure II.6) sont des traînées de vapeur créées par les moteurs d'avion dans l'atmosphère. Après le passage des avions, les traînées peuvent se transformer en nuage artificiel, selon les conditions thermodynamiques à haute altitude. Cette influence humaine sur la formation nuageuse pourrait avoir des conséquences importantes sur le climat.



Figure II.6 : Exemple de trainees de condensation.

De façon générale, les nuages jouent deux rôles opposés sur les flux d'énergie (figure II.7). Ils réfléchissent les rayons du soleil (forçage négatif) et ils empêchent par absorption le rayonnement infrarouge de quitter la Terre pour aller dans l'espace (forçage positif puisqu'ils gardent la chaleur dans l'atmosphère). C'est d'ailleurs pour cette dernière raison que les nuits les plus chaudes sont celles avec des nuages. Dans le cas des traînées de condensation, l'effet d'absorption des rayons infrarouges est plus important que celui de réflexion de rayonnement solaire. C'est pourquoi elles ont une contribution positive.



Figure II.7 : Impact de l'effet de serre et de l'effet parasol des nuages sur le bilan énergétique de la terre.

Parmi les dix genres des nuages nous nous sommes intéressées à un type spécifique, les cirrus du fait de leur impact climatique important, leurs effets radiatifs difficiles à évaluer, et leur couverture spatiale étendue.

II-3-Cirrus

a-Généralités sur les cirrus.

Les cirrus⁽²⁾ sont des nuages dont l'altitude élevée dépend de la latitude et de la saison (haute troposphère entre 6000 et 15000 mètres), de température basse, et composés en majorité de cristaux de glace. Ils se présentent sous la forme de filaments blancs fibreux, d'aspect fin et délicat. Il existe des sous-classes de cirrus : cirrus floccus (semblables à des petits flocons nuageux), cirrus uncinus (au sommet compact, la chute des cristaux de glace les plus volumineux lui donnant la forme d'une virgule), cirrus spissatus (relativement épais optiquement, stratiforme), cirrus fibratus (optiquement très fins, fragmentés et aux formes presque rectilignes).Leur couverture nuageuse moyenne varie entre 20 et 50%, suivant la saison et la position géographique (Downling et Radke, 1990). Leur étendue horizontale peut largement dépasser leur étendue verticale, ainsi il n'est pas rare qu'un cirrus d'une épaisseur de l'ordre du kilomètre s'étale sur un continent entier quasiment sans interruption. Pour finir, rappelons l'existence d'un type de cirrus particulier, produit par l'activité humaine : les contrails (voir paragraphe II.2).

b-Formation des cirrus.

L'apparition de cirrus résulte de la présence d'une certaine quantité de vapeur d'eau dans les couches supérieures de l'atmosphère. En effet, si cette quantité devient suffisamment importante, il y a sursaturation de l'air par rapport à l'eau ou à la glace, ce qui mène alors respectivement à la formation de gouttes d'eau ou de cristaux de glace. La présence de cirrus peut être spontanée, mais aussi révéler l'approche d'une perturbation (figure II.8) ; Dans ce dernier cas, une masse d'air chaude et humide se soulève lentement au dessus d'une autre masse d'air plus froide, constituant ainsi un front chaud.

⁽²⁾ en latin, "cirrus" signifie "boucle de cheveux".

Lorsque ce soulèvement l'amène au niveau supérieur de la troposphère, la vapeur d'eau qu'elle contient se condense en cristaux de glace, soit dès 0 °C, en présence de noyaux de condensation (comme les aérosols), soit par cristallisation homogène (surfusion) jusque -40° C.

Les cirrus annoncent donc la plupart du temps un changement de temps. En effet, ils sont souvent annonciateurs d'un front chaud, masse d'air chaud se soulevant lentement au contact d'une masse d'air plus froid.



Figure II.8 : Coupe verticale d'un front chaud.

Il y aura donc un net changement de temps dans les 36 heures qui suivent, avec l'arrivée de précipitations et une intensification du vent. Cependant, les cirrus peuvent aussi très bien n'avoir aucun signe annonciateur par exemple lorsqu'ils naissent d'une trainée d'avion. En effet, les trainées d'avion peuvent parfois se transformer en cirrus. Des cirrus peuvent également être générés à partir d'autres nuages, comme par exemple la région supérieure de cumulonimbus (qui sont des nuages de très grande extension verticale).

c-Propriétés microphysiques des cirrus.

Les propriétés microphysiques des nuages désignent l'ensemble des grandeurs physiques caractérisant les propriétés dimensionnelles, morphologiques et physico-chimiques des particules composant ces nuages : gouttes d'eau, cristaux de glace... Ces propriétés ont une incidence directe sur le comportement radiatif et sur l'évolution temporelle des nuages. Ainsi une connaissance approfondie de ces propriétés est nécessaire pour assurer une bonne représentation des effets des nuages dans les modèles de climat. Les particules présentes dans un nuage déterminent les quantités d'énergie transmises et réfléchies, ainsi que la stabilité du nuage et son évolution dynamique future. Les cirrus, comme on l'a précédemment dit, sont des nuages de la haute troposphère (pression < 440 hPa) composés principalement de cristaux

de glace. Leurs caractéristiques morphologiques et dimensionnelles présentent une grande dispersion. La modélisation des propriétés des cristaux de glace doit prendre en compte les paramètres microphysiques du nuage, qui sont les suivants :

- La température de l'atmosphère au niveau de la couche nuageuse étudiée. Ce paramètre a une incidence directe sur la croissance des particules de glace, bien qu'il soit difficile à quantifier.
- 2. La dimension des particules de glace. Les distributions en taille des cristaux de glace peuvent s'étendre sur plusieurs ordres de grandeur. Ainsi, les particules peuvent être très petites aux premiers stades de leur croissance (moins d'1µm). Des particules de taille relativement importante peuvent être atteintes (plus de 1200 µm (Krupp, 1991)). La distribution en taille du cirrus dépend des circonstances de formation du nuage.
- 3. La forme des particules. Il existe une infinité de variétés de formes de cristaux, allant du très simple au très complexe. Des formes de base, couramment rencontrées, ont été identifiées, à savoir ; les colonnes (ou aiguilles) et plaquettes, les rosettes, les bullets, les dendrites … La figure II.9 donne une idée de la multitude des formes et des tailles que peuvent prendre ces particules.
- 4. L'orientation des particules. Les premières tentatives de modélisation des cristaux de glace supposaient qu'ils ne prenaient pas d'orientation particulière. Des études récentes sur la fréquence d'occurrence des différentes formes de cristaux composant les cirrus ont montré que les formes prédominantes sont les formes irrégulières (Korolev et Hallett, 2000).



Figure II.9 : Echantillons de forme de cristaux de glace en fonction de la température collectés durant la compagne de mesures in-situ de la mission FIRE II. (Heymsfield et Iaquinta, 2000).

d- Propriétés macro physiques des cirrus

Les propriétés macrophysiques des nuages sont un ensemble de propriétés regroupant des variables telles que l'altitude du nuage, son épaisseur, ses dimensions spatiales et temporelles, ou encore son épaisseur optique .Les nuages sont effectivement le principal modulateur des flux radiatifs à la surface et au sommet de l'atmosphère. Leur impact sur le bilan radiatif terrestre est pris en considération par l'intermédiaire de grandeurs macrophysiques telles leur fréquence d'occurrence, leur altitude et leur épaisseur optique. La figure (II.10) présente des exemples de cartes à l'échelle globale produite au LOA à partir du capteur spatial POLDER⁽³⁾. Des travaux récents basés sur les données de l'instrumentation spatiale [Stubenrauch et al. 2006] montrent que la couverture nuageuse des cirrus du globe est autour de 30%. Le maximum se trouve dans les tropiques (autour de 50%). Dans cette région, les nuages hauts sont également les plus froids et les plus fins. La couverture des nuages hauts est légèrement plus faible dans les moyennes latitudes sud (25%) par rapport aux moyennes latitudes nord (32%), tandis que les nuages hauts sont plus épais dans le sud que dans nord.



Figure II.10 : *Exemples de cartes à l'échelle globale présentant l'albédo et la phase des nuages à partir du capteur spatial POLDER.*

⁽³⁾POLDER : radiomètre imageur grand champ, permettant de mesurer les caractéristiques du rayonnement solaire, réfléchi lors de la traversée de l'atmosphère puis au contact du sol, apporte un nouvel outil de compréhension des mécanismes climatiques, afin de préciser les prévisions météorologiques.

e-Influence des cirrus sur le bilan radiatif.

La contribution des cirrus à ce bilan est encore mal connue, car les cirrus participent au bilan radiatif terrestre suivant deux effets antagonistes, (voire figure II.7).

Les cirrus réfléchissent la lumière du soleil (effet albédo). L'énergie ainsi détournée ne pénètre pas la troposphère terrestre, il s'agit donc d'une contribution négative au bilan énergétique. La troposphère se refroidit ou, plus précisément, ne se réchauffe pas.

Les cirrus absorbent puis réémettent le rayonnement infrarouge terrestre (effet de serre). Ainsi une certaine quantité d'énergie reste donc prisonnière de la troposphère terrestre. Il s'agit par conséquent d'une contribution positive au bilan énergétique (la troposphère ne se refroidit pas).

Entre ces deux contributions, la sélection de l'effet dominant dépend, d'une part, des propriétés microphysiques du nuage (taille, forme et orientation des cristaux le composant) et, d'autre part, de son contenu en glace et de son épaisseur optique suivant la longueur d'onde.

III-Instruments et mesures.

Cette troisième partie de mon rapport présente les instruments existants en LOA utilisés pour la détection des cirrus. Le concept du Lidar et le principe de la mesure par Lidar et ses caractéristiques techniques seront présentés. Nous noterons également l'existence d'un autre type d'instrument dans le laboratoire, un Sky Imager.

III-1-lidar.

Le lidar (Light Detection And Ranging) est un instrument de télédétection active⁽⁴⁾ développé dans les années 60, figure (III.1). D'un principe équivalent à celui du radar, il est parfois appelé "Laser Radar". Il est constitué d'une source laser et d'un télescope alignés. La source laser émet une impulsion électromagnétique polarisée de forte puissance et de courte durée dans l'atmosphère. L'interaction de cette onde avec les particules qu'elle rencontre sur son trajet, par des processus d'absorption et de diffusion, conduit au retour d'une fraction d'énergie lumineuse vers l'instrument (processus de rétrodiffusion). Cette énergie lumineuse est reçue par le télescope du lidar, puis les photons sont convertis en signaux électriques qui sont envoyés vers un enregistreur numérique pour des traitements ultérieurs.

⁽⁴⁾ instrument de détection active : produit sa propre énergie pour illuminer la cible, il dégage un rayonnement électromagnétique qui est dirigé vers la cible, le rayonnement réfléchi par la cible est alors perçu et mesuré par le capteur. Tandis que l'instrument de détection passif mesure l'énergie disponible naturellement.

En analysant les propriétés du rayonnement diffusé, il est possible de déduire, dans une certaine mesure, diverses propriétés du milieu diffusant. Le lidar émettant une série d'impulsions laser à une fréquence déterminée (par exemple 20 Hz), les séries temporelles de signaux lidar sont échantillonnées suivant la ligne de visée, et enregistrées sur support informatique pour des analyses ultérieures.



Figure III.1 : Lidar, un instrument de télédétection active.

Le grand avantage du lidar sur d'autres types d'instruments optiques comme les radiomètres, est qu'il donne accès à une information sur la variabilité verticale de l'atmosphère. Il existe plusieurs types de lidar, classés en général suivant les processus atmosphériques impliqués dans la mesure : lidar rétrodiffusion, lidar vent, lidar ozone, lidar température.

Nous nous intéresserons exclusivement au cas du lidar à rétrodiffusion présentée sur la figure (III.2). Il permet l'étude des processus de diffusions élastiques dans l'atmosphère, accompagné d'une détection directe de la puissance rétrodiffusée. L'atmosphère peut ainsi être sondée pour restituer les propriétés des aérosols ou des nuages. Certains lidars à rétrodiffusion offrent en plus la possibilité de mesurer certaines propriétés de polarisation du faisceau rétrodiffusé.

Le principe de ce lidar est la diffusion de la lumière du faisceau Laser qui se propage dans l'atmosphère. Les particules présentes sur le trajet du faisceau vont absorber et diffuser dans toutes les directions de l'espace. L'analyse de la lumière rétrodiffusée dans le télescope donne des informations sur les particules présentes à une altitude donnée; l'intensité du signal rétrodiffusé croit avec la quantité de matière rencontrée.



Figure III.2 : Schéma du principe de télédétection par lidar à rétrodiffusion élastique

III-2-Principe de la mesure par Lidar.

Aujourd'hui, des systèmes LIDAR compacts, robustes, plus simples et automatiques sont de plus en plus exploités par des laboratoires de recherche. Depuis 2006, le LOA a commencé à développer la base d'un réseau composé de micro-LIDAR élastique émettant à 532nm développé par la société CIMEL(Paris).

Fort de son savoir-faire en instrumentation, en développement d'outils de traitement et de visualisation des données acquis dans le cadre du «Service d'Observation PHOTONS / AERONET», le LOA maintient deux stations LIDAR en fonctionnement 24 h sur 24, 7 jours sur 7 à Lille et à M'Bour (Dakar, Sénégal).Les données de ces LIDAR sont envoyées sur le serveur informatique du LOA et la puissance lumineuse rétrodiffusée par les couches atmosphériques de jour comme de nuit est calculée en temps réel. Les variations journalières de l'épaisseur optique des aérosols ainsi que le coefficient d'Angström (à relier à la dimension des particules) sont également présentées sous forme graphique. Toutes ces informations sont visibles par tous sur le site internet du laboratoire⁽⁵⁾.

⁽⁵⁾ site du laboratoire LOA : www-loa.univ-lille1.fr

Un code d'inversion automatique pour le traitement des données LIDAR (transformation des mesures brutes (niveau 1) en paramètres optiques caractérisant les particules aérosols (niveau 1.5) a été développée et fonctionne pour les sites de Lille et de M'BOUR (version 1). La version 2, en préparation, comprend des améliorations de la qualité des données du niveau 1 (mise à jour de corrections instrumentales, filtrage du bruit) et du niveau de traitement 1.5, l'estimation de la hauteur de la couche limite et la détection des nuages de haute altitude entre autres. La figure (III.3) présente un exemple de profil lidar de 11 décembre 2011.Cette figure présente le signal rétrodiffusé en fonction du temps et de l'altitude. Ce signal varie du bleu foncé au rouge foncé, le rouge foncé présentant une valeur de puissance rétrodiffusée plus grande. Sur ce profil on peut remarquer par exemple la présence d'une couche nuageuse entre 10 et 15 h à une altitude située autour de 5000m.



Figure III.3 : Exemple d'un profil Lidar à Lille le 11 décembre 2011.

Une des limitations des lidars installés au sol est le masque des couches nuageuses hautes par les couches nuageuses basses à cause d'une trop forte rétrodiffusion dans les basses couches de l'atmosphère. Cette limite ce manifeste sur la figure de profil Lidar par une atténuation du faisceau laser au dessus de couches nuageuses basses. Par exemple, sur le profil présenté par la figure III.4, on remarque l'atténuation du faisceau laser entre 0 et 5h en observant la couleur bleu foncée au dessus de la couche de nuage située à basse altitude.

Si l'atténuation du faisceau laser est trop importante, le faisceau laser ne parvient pas à pénétrer l'intégralité du nuage et le signal finit par se confondre avec le bruit de mesure. Dans ces conditions, il est alors impossible de procéder à l'inversion du signal lidar. Cependant, pour les cas ou l'atmosphère est exempte de nuage de basse couche, l'intérêt du lidar est la sensibilité de cet instrument de télédétection active aux nuages optiquement fins de haute altitude.



Figure III.4 : Profil Lidar à Lille le 2 septembre 2011.

III-3-Aspects techniques du lidar du LOA.

Les caractéristiques générales du lidar au LOA sont présentées dans ce tableau III.1.

Emetteur	Qswitch actif Nd YAG laser
Longueur d'onde	532 nm
Puissance laser	38 mW
Energie en sortie laser	14 µJ
Répétition du pulse	4.7 KHz
Largeur du pulse laser	<15 ns
Largeur du pulse laser imposé Ti	100 ns
Nombre d'intégration des tirs	4096
Ouverture télescope	200 mm
Divergence du faisceau	55 μrad
Résolution verticale (CTi/2)	15 m
Altitude maximal de visée	30 km
Bande passante filtre réception	0.2 nm
détecteur	Photodiode avalanche
Mode de détection	Compteur de photons
Temps d'acquisition (2048 portes*100 ns*4096	>0.8s
Masse	30 Kg
Taille télescope Electronique	220*1000 mm Rack 6U
Puissance électrique	230 V (+-20%) 50 Hz (+-10%) 300 W
Transfert PC	USB

Tableau III.1 : Caractéristiques générales du Lidar du LOA.

Le lidar utilise un laser Nd : YAG double qui émet une longueur d'onde de 532 nm. L'avantage de cette longueur d'onde est qu'elle est dans le visible (un des critères de sécurité pour les yeux) et qu'elle est bien adaptée à la télédétection des aérosols. Le laser est capable d'émettre des pulses d'une durée de 15 ns avec une fréquence de répétition de 4,7 KHz. Mais pour des raisons de générations de fréquence, le lidar émet des pulses de 100 ns (durée d'un tir lidar). Ceci nous donne une résolution verticale de 100ns*C (célérité de la lumière) /2=15m.

Pour gagner en rapport signal sur bruit, une intégration sur 4096 tirs est réalisée. Ceci nous donne donc au final un tir moyenné tous les **4096*2048*100ns= 0.84s**

Le récepteur est un télescope de diamètre 200 mm. La lentille du télescope focalise sur une fibre multi modes taillée à un certain angle. La fibre de 10 m est connectée au rack lidar, le signal retour est séparé (grâce à l'angle de la fibre), puis filtré par un filtre de longueur d'onde 532 nm de 0,2 nm de bande, puis un acousto-optique et ensuite un photomultiplicateur fonctionnant en mode comptage de photons,(figure III.5).



Figure III.5: Schéma synoptique du Lidar

La détection se fait pendant 2048 portes de 100 ns, ce qui nous donne en théorie une altitude détectable maximale de 2048*15 m = **30720 m**. Cependant à partir d'une certaine altitude, il n'y a plus que du bruit. D'après nos mesures, on peut estimer l'altitude détectable maximale à 20km, (figure III.6).



Figure III.6 : Exemple d'un signal Lidar, montrant la grande valeur du bruit au dessus de 20 km.

La puissance rétrodiffusée à l'altitude z_n est donnée par l'équation :

$$P(z_n) = K.P_0. \ \Omega s(z_n).\beta(z_n).t(z_n), \qquad (III. 1)$$

avec K une constante instrumentale, P₀ la puissance initiale du faisceau laser (W), Ω s (sr) l'angle solide à l'altitude $z_n = A / (z_n)^2$ (avec A l'aire du télescope), β le coefficient de rétrodiffusion atmosphérique et t la transmission de l'atmosphère (aller et retour), (A. Mortier, 2010).

Le coefficient de rétrodiffusion peut se décomposer en la somme de coefficient moléculaire d'une part et de coefficient particulaires d'autre part.

On explicite également le terme de transmission (à l'aller et au retour de l'impulsion Laser). Il est d'usage de corriger le signal de l'altitude. On a ainsi l'équation générale du Lidar:

$$X(z_n) = P(z_n) \cdot (z_n)^2 = A'(\beta_p(z_n) + \beta_{mol}(z_n) \cdot exp(-2\int_{z(min)}^{z(n)} (\sigma(part) + \sigma(mol)) dz), \quad (III.2)$$

avec σ le coefficient d'extinction (m⁻¹), A' = K.P0 (W.m2), et $z_{(min)}$ l'altitude minimale d'inversion .Le profil moléculaire est présenté sur la figure III.7(en noir). Les inconnues sont donc σ part (z) et $\beta p(z)$. L'inversion des données est un problème mathématiquement mal conditionné puisqu' une seule équation réunit ici deux inconnues. Pour cela nous n'utilisons pas cette équation dans la suite de nos études. Nous présentons d'autres équations plus simples pour la méthode utilisée au chapitre IV.1.



Figure III.7 : Profil Lidar extrait des observations du 26 janvier 2000 à l'Observation de la Réunion (OPAR), en fonction de l'altitude (km). Le profil lidar Rayleigh/Mie à 532 nm est bleu, le profil lidar moléculaire théorique en noir et le lissage polynomiale d'ordre quatre en rouge (thèse, B.CADET, 2004).

III-4-Sky Imager.

Un autre instrument peut être utilisé pour observer les nuages depuis le site du LOA. C'est le Sky Imager CMS.

C'est un capteur automatique qui enregistre en temps réel l'image complète de ciel, qui nous permettra de suivre l'historique des masses d'air passant au-dessus de la station. L'acquisition se fait toutes les n minutes (n=1,3 ou 5) de 6h a 19h TU. On peut trouver les images du ciel sur un calendrier qui se trouve sur le site de LOA.

On peut aussi télécharger une vidéo de toutes les images du jour. Ces images peuvent nous aider à effectuer une prédiction de la nature des nuages observés. La figure III.7 présente un exemple d'une image obtenue par le Sky Imager au LOA le 10 décembre 2011.Cette figure montre la présence de cirrus et un contrail à 11h42 min.



Figure III.7 : Image obtenue par le Sky Imager en LOA, du 10 décembre 2011 à 11h42min.

Ces instruments décrits précédemment vont nous fournir les données nécessaires pour la détection des cirrus au dessus de Lille.

En effet plusieurs méthodes sont couramment utilisées pour détecter et déterminer les contours des cirrus à partir des signaux Lidar (thèse, Bertrand Cadet, 2004):

1-une méthode utilisant la dérivée par rapport à l'altitude du signal Lidar

2-une approche quantitative basée sur l'hypothèse du ciel clair

3- plusieurs méthodes utilisant des seuils

Pour cette étude, nous avons choisi la méthode utilisant un seuil de détection, décrite en détail par B.Cadet (2004) et B.Ovigneur (2005).Cette méthode est la plus simple et nous a permis de faire une première étude des cirrus pendant ce stage.

IV-Détection des cirrus

IV-1-Méthode de seuil de détection

La méthode que nous avons choisie permet un traitement automatique des données et elle est basée sur un seuil de détection calculé en fonction du rapport de diffusion.

Le rapport de diffusion est défini par l'équation IV-1 :

$$R(z)=\beta_t(z)/\beta_m(z), \qquad (IV-1)$$

avec $\beta_t(z)$ et $\beta_m(z)$ les coefficients de rétrodiffusion total et rétrodiffusion moléculaire. Le coefficient de rétrodiffusion totale est la somme du coefficient de rétrodiffusion moléculaire et du coefficient de rétrodiffusion particulaire.

Un rapport R(z) égal à 1, donne une rétrodiffusion purement moléculaire c'est-à-dire une absence de nuage et d'aérosol ; un rapport R(z) supérieur à 1, correspond à la présence de nuages ou d'aérosols.

À partir de la puissance mesurée par le lidar on peut déterminer le coefficient de rétrodiffusion apparent par l'équation IV-2 :

$$\beta(z) = \frac{p(z).z^2 * 2}{P0.c.t.A}$$
, (IV-2)

avec t la durée de l'impulsion lumineuse émise par le laser de puissance P_0 , P(z) la puissance de signal rétrodiffusé et r la distance de signal lumineux partiellement rétrodiffusé et A la surface du télescope du récepteur lidar qui capte le rayonnement rétrodiffusé.

Le seuil de détection noté s, est défini par l'équation (IV-3), (thèse B. CADET, 2004):

$$S = \langle R(15 \le Z \le 20) \rangle + 3 * ecart_type[R(15 \le Z \le 20)]$$
. (IV-3)

Le seuil de détection est alors défini comme la moyenne de rapport de diffusion entre 15 et 20 Km, auquel on ajoute trois écarts type de la variation du rapport de diffusion dans ce même intervalle.

Suite aux tests effectués sur un intervalle de référence entre 23 et 25 km (B.CADET, 2004), l'analyse des mesures du Lidar au LOA a montré un bruit important dans cet intervalle. Un intervalle de référence entre 15 et 20 km a donc été choisi puisque cette zone est sans aérosol ni nuage en l'absence d'éruption volcanique majeure et le bruit est plus réduit dans cet intervalle. Cette hypothèse peut être appliquée car l'altitude de la tropopause au dessus de Lille ne dépasse pas 15 km (démontré au Chapitre IV.2), les cirrus étant situés au dessous de cette altitude. On additionne au moyenne de rapport de diffusion entre 15 et 20 km un terme qui va prendre en compte la variabilité du rapport de diffusion dans l'intervalle 15-20km ;la variabilité du rapport de diffusion est fonction du rapport signal sur bruit ;un faible rapport signal sur bruit (forte variabilité du signal lidar)donnera un seuil de détection plus élevé et donc une surestimation de la base et une sous-estimation du sommet du cirrus; au contraire, un fort rapport signal sur bruit donnera un seuil plus faible et donc une base et un sommet de cirrus mieux déterminés. La figure (IV-1) montre la courbe de rapport de diffusion (en rouge) calculé à partir de profil Lidar correspondant au 11 décembre 2011 au temps 00, et la droite

de seuil (en noir) calculé à partir l'équation (IV-3). On trouve une valeur de seuil pour ce profil égale à 2.451.

Apres avoir détecté le nuage par seuillage, il convient de déterminer les limites du nuage. En effet, les extrémités des nuages sont connues par l'intersection de la droite de seuil avec le rapport de diffusion ; les altitudes de la base et du sommet du cirrus correspondant aux altitudes ou le rapport de diffusion est immédiatement inférieur à seuil. On remarque sur la figure IV-1, l'existence des pics au dessus de 15 km, causés par le bruit inhérent au signal.



Figure IV.1 : Logarithme du rapport de diffusion pour le profil lidar correspondant au 11 décembre 2011

Remarquons à l'altitude située autour de 10000 m la présence de plusieurs pics dans la courbe correspondant au rapport de diffusion (courbe en rouge), donc il est plus difficile de détecter correctement le profil vertical de cirrus ce qui conduit à une mauvaise estimation du nombre de couches de cirrus. Alors, il est intéressant de baisser le seuil de détection des nuages ; Nous avons donc modifié le facteur multipliant le terme de variabilité du rapport de diffusion dans l'équation (IV-3) et choisi 2 au lieu de 3 alors :

$$S = < R(15 \le Z \le 20) > +2 * ecart_type[R(15 \le Z \le 20))$$
(IV-4)

Pour le même profil Lidar choisi avant, le 11 décembre 2011 au temps 00 la valeur de seuil sera égale à 2.001.La courbe présentant le rapport de diffusion et le seuil est présentée sur la figure (IV.2).Dans ce cas la valeur de seuil est plus petite, alors à une altitude située autour de

10000m, on estime la présence d'une seule couche de cirrus épais, au lieu de plusieurs couches plus fines.

Après ces deux tests sur la valeur de seuil, on trouve que pour la valeur de seuil plus petite la marche de détection est meilleure mais nécessite des études complémentaires. Pour cette raison dans la suite du rapport, on continue le traitement de méthode de détection avec l'équation (IV-3). Dans la suite de notre étude nous nous sommes intéressés à extraire les jours qui contiennent des cirrus avec l'estimation de sommet du premier cirrus et du dernier cirrus sans préciser le nombre de couches des cirrus présents à la même heure.



Figure IV-2 : Logarithme de rapport de diffusion (en rouge), et le seuil(en noir) égal à 2.001

La détection du cirrus sur un profil lidar est donc basée sur les critères suivants :

1-le rapport de diffusion doit être supérieur au seuil S.

2-l'altitude du sommet du cirrus doit être supérieure à l'altitude correspond au niveau -38°c (voir II.1 et thèse B.Cadet, 2004).

Le critère (1) permet de détecter les nuages, et le critère (2) est lié à la température du nuage. Si la température du nuage est inferieur à -38°C, le nuage détecté est considéré comme un cirrus. En effet, à cette température il n'existe plus d'eau sous forme liquide. Ce deuxième critère permet d'éliminer en grande partie la détection des nuages d'eau et des nuages mixtes. Pour étudier l'altitude et la température des cirrus au dessus de Lille nous utilisons les données obtenues météorologiques fournier sur le site NCAR (National Center for Atmopshere Research).

IV-2- Données météorologiques: Logiciel Wgrib

Plusieurs sites Internet proposent le téléchargement de cartes de prévision météorologiques encodées au format de fichier grib. Wgrib (National Weather Service Climate prediction Center) est un programme portable pour lire les fichiers grib qui ont été crées par le projet du NCEP /NCAR. En effet Wgrib est un programme pour manipuler, inventorier et décoder des fichiers GRIB. Les fichiers météorologiques GRIB sont des fichiers de données numériques informatisés.

Ce site Wgrib⁽⁶⁾ permet le téléchargement de fichiers GRIB pour n'importe quelle zone sélectionnée directement sur un planisphère. Les fichiers présentent des données numériques sur les :

-ICED(Ice Divergence /s),

- PRES(pressure pa),
- TCDC(Total Cloud Cover),

- TMP(Temperature k),

- -SPFH(specific Humidity kg/kg),
- VGRD(V-component of Wind m/s),

-U GRD(U-compenent of wind m/s),

-VVEL(pressure vertical velocity pa/s).

Nous nous sommes intéressées aux données météorologiques qui correspondent aux coordonnées géographiques les plus proches de celles de Lille. En utilisant un algorithme en fortran90, on extrait les valeurs des températures en fonction de l'altitude au dessus de Lille, en prenant les coordonnées géographiques les plus proches de Lille disponible dans le logiciel wgrib (51 °Nord ,3° Est).

Wgrib nous donne un profil vertical de température de l'air chaque 6 heures, c'est-à-dire pour chaque jour nous avons des profils verticaux des températures de l'air au temps 00, 06,12 et 18h TU (Temps Universel).

⁽⁶⁾ Site Wgrib: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/wesley/wgrib.html

Afin de vérifier l'hypothèse du paragraphe IV.1, nous avons tracé l'altitude moyenne de la tropopause en fonction du temps à partir des données météorologiques pour l'année 2011. On peut déterminer l'altitude à laquelle se situe la tropopause pour chaque mois. On rappelle que la tropopause est l'altitude où la température cesse de diminuer avec l'augmentation de l'altitude. La figure IV.3 présente la variation mensuelle de la tropopause à partir des valeurs journalières à 12 h uniquement. On peut remarquer sur cette figure que la variation de la tropopause au dessus de Lille en 2011 est entre 11km et 14 km. On remarque d'après cette figure une augmentation de l'altitude de la tropopause entre le mois de septembre et novembre. Cette augmentation est due à un automne particulièrement chaud en 2011. D'après Météo France la température en automne 2011 à Lille est plus grande d'environ 2 °C par rapport à la température moyenne normale à cette période.



Figure IV.3 : Variation de l'altitude de la tropopause à Lille en fonction du mois de l'année 2011.

Après avoir extrait la variation de l'altitude de la tropopause, Wgrib permet donc d'extraire la température de la tropopause au dessus de Lille en 2011, cette température est présentée sur la figure (IV.4)



Figure IV.4 : Variation de la température de la tropopause en fonction du mois de l'année 2011.

V-résultats préliminaires et discussions

La méthode de détection décrite précédemment a été programmée en scilab et appliqué à un an de données (2011).Une statistique a été réalisée pour l'année 2011 au dessus de Lille concernant la température des cirrus, les nombres de jours contenant des cirrus et l'altitude du sommet du premier et dernier cirrus en fonction des mois de l'année 2011. La figure V.1 présente un histogramme du nombre de jours de chaque mois pour lesquels des cirrus sont détectés au dessus de Lille. On remarque d'après cette figure la variation de présence des cirrus suivant les saisons. En automne 2011 on trouve un nombre plus grand de jours contenant des cirrus, tandis que pour l'hiver on trouve un nombre de jours plus petits contenant des cirrus, en notant que cette statistique est faite sans prendre en considération la présence des nuages bas, c'est-à-dire que les cirrus ne peuvent pas être détectés lorsqu'un nuage bas est présent. La figure V.2 présente le nombre de jours des données Lidar exploitables. On remarque sur cette figure que le nombre de jours exploitables est plus petit en hiver et au printemps à cause du mauvais fonctionnement du Lidar lorsque la température extérieure est trop froide. Notons que ce problème est résolu maintenant en mettant le Lidar dans une boite thermostatée qui règle sa température par rapport à la température extérieur.



Figure V.1 : *Histogramme représentant le nombre de jours contenant des cirrus au dessus de Lille pour l'année 2011.*



Figure V.2 : Histogramme représentant le nombre des jours des données Lidar exploitables pour l'année 2011.

La figure V.3 présente la moyenne de l'altitude du sommet du premier cirrus extrait par le programme pour les cirrus multicouches. On remarque d'après cette figure que l'altitude moyenne du sommet du premier cirrus est plus basse en hiver et printemps, tandis qu'elle est plus élevée en été et automne 2011.



Figure V.3 : *Histogramme représentant l'altitude moyenne du sommet du premier cirrus au dessus de Lille pour l'année 2011.*

La figure V.4 présente la moyenne des altitudes des sommets des derniers cirrus, ce qui montre que le sommet du dernier cirrus presque invariant en fonction des saisons. Ce qui est semblable à la faible variance du niveau de la tropopause au dessus de Lille durant 2011.



Figure V.4 : Histogramme représentant la moyenne des sommets du dernier cirrus au dessus de Lille pour l'année 2011.

Enfin la figure V.5 présente la moyenne des températures des cirrus pour chaque mois de l'année 2011.On trouve que la température de cirrus est plus basse en hiver et au printemps, puis elle augmente en été et en automne, à l'exception du mois de février pour lequel on

trouve que la température est plus élevée. Mais cette valeur est très incertaine du fait qu'il n'y a pas beaucoup de données pour ce mois (2 jours contenant des cirrus).



Figure V.5 : Histogramme représentant la moyenne de température des couches de cirrus les plus basses au dessus de Lille pour l'année 2011.

Un premier résultat montre que pour un automne particulièrement chaud en 2011, on trouve une augmentation de l'altitude de tropopause, et un nombre de jours plus grand contenant des cirrus par rapport aux autres saisons. C'est en été (juin), qu'on trouve les altitudes des sommets des premières couches de cirrus sont les plus élevées. Elles sont plus basses en hiver (décembre).

VI-Conclusion et perspectives

Les cirrus occupent une place privilégiée dans l'étude du climat. En effet ils jouent un rôle déterminant sur le contrôle de l'atmosphère et le climat. Leur localisation dans la haute troposphère rend leur étude particulièrement difficile.

Dans ce rapport, les propriétés principales des cirrus ont été présentées. Les caractéristiques spécifiques de ces nuages (altitude, température, formation et composition), et leur importance dans le contexte des études climatiques (une composition de la réflexion de la lumière solaire et d'effet de serre) ont été décrites.

L'instrument de télédétection Lidar offre de nombreux avantages pour l'observation des cirrus. Nous avons montré dans cette étude que l'installation du Lidar au LOA permet l'observation et la détection locale des cirrus. En effet l'analyse des mesures Lidar pour l'année 2011 a donné les résultats suivants :pour les saisons d'hiver et de printemps la présence de cirrus, la température des cirrus et la moyenne des altitudes du sommet du premier cirrus ont des valeurs plus basses par rapport aux valeurs obtenues pour les saisons d'été et d'automne, tandis que la valeur moyenne du sommet des derniers cirrus est presque invariante en fonction des saisons, ce qui est cohérent avec la stabilité du niveau de la tropopause durant 2011.

De nombreuses perspectives sont envisageables afin d'améliorer la détection des cirrus à la station de Lille, Par exemple une amélioration de la valeur de seuil choisi pour la méthode de détection (paragraphe IV-1). Cette nouvelle valeur devrait permettre d'améliorer l'estimation du nombre de couches de cirrus. Une statistique effectuée pour une année différente pourrait également permettre d'analyser plus en profondeur les résultats préliminaires obtenus pour l'année 2011.

Bibliographie

Thèses

-Bertrand CADET, « Étude des cirrus dans la zone tropicale sud de l'Océan Indien à partir des données Lidar de la Réunion : analyse comparative des méthodes de restitution et étude de la variabilité des méthodes de restitution et étude de la variabilité saisonnière et diurne », Laboratoire de physique de l'atmosphère, Université De La Réunion, 2004.

-Bertrand OVIGNEUR, «Description des propriétés macrophysiques et microphysiques des nuages par télédétection active et passive –Application à la campagne aéroportée FRENCH /DIRAC », Laboratoire d'Optique Atmosphérique, Ecole doctorale Sciences de la Matière, du Rayonnement et de l'Environnement, l'Université Sciences et Technologies de Lille ,2005.

-Fadoua EDDOUNIA, « La microphysique des cirrus à l'échelle du globe : corrélation avec les propriétés atmosphériques pour une meilleure représentation dans les modèles de climat », Ecole polytechnique, 2004.

-Vincent NOEL, « Étude des propriétés optiques et radiatives des cirrus par télédétection active apport des observations polarisées», Université Paris 7,2002.

-Jean-Charles DUPONT' « Impact des nuages de haute altitude sur le bilan radiatif à la surface de la terre : quantification expérimentale et analyse», Laboratoire de Météorologie Dynamique, 2008.

Rapport de master

- Augustin MORTIER, « Caractérisation de la pollution particulaire atmosphérique Lilloise à l'aide des systèmes Lidar et photométrique», Laboratoire d'Optique Atmosphérique, 2010.

Publications

-Dowling, D. D. et Radke, L. F, A summary of the physical properties of cirrus clouds. J.of Appl. Met. 29: 970-978, 1990.

Heymsfield, A. J. et L. M. Miloshevich: Homogeneous ice nucleation and supercooled liquid water in orographic wave clouds. *J. of Atmos. Sci.*, **50** : 2335–2353, 1993.
-Korolev, A. V. et G. A. I. J. Hallett, Ice particle habits in stratiform clouds. Quart. J. R.

Meteorol. Soc. 126: 2873-2902, 2000.

- Krupp, C., Holographic measurements of ice crystals in cirrus clouds during the International Cloud Experiment, 1991.

-Stubenrauch, C. J., A. Chedin, G. Radel, N. A. Scott and S. Serrar, Cloud Properties and Their Seasonal and Diurnal Variability from TOVS Path-B, *Journal of Climate*, *19*, 5531-5553, 2006.

-IPCC Fourth Assessment Report, Climate Change 2007.

Cours de Master

-Éléments de cours et applications du Lidar, par P.Goloub, cours de Master 2, Université de Lille 1.

-Lidar diffusion élastique & diffusion inélastique Raman, par P.Flanent, Institut Pierre Simon Laplace.

-cours météo et transfert radiatif, par P.Dubuisson, cours de Master 2, Université de Lille 1.

Sites Internet

-Page Lidar LOA : http://www-loa.univ-lille1.fr/Instruments/lidar/

-Données Wgrib: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/wesley/wgrib.html

-http://www.futura-sciences.com/fr/doc/t/climatologie/d/pourquoi-tant-dincertitudes-sur-les previsions-climatiques_638/c3/221/p4/

- http://ori.univ-lille1.fr/notice.html?id=univ-lille1-ori-25727&printable=true

- http://www.chemtrails-france.com/comparaisons/conditions_altitude/index.htm