

Année Universitaire 2024 – 2025
Unité de Recherche : LSCE
Équipe(s) : N/A&
Encadrant(s) : R. Sire



GÉOPHYSIQUE OU AUTRE

Rapport de stage L2

Raffaëllé Sire

6 juin 2025

Résumé

Ce stage de recherche de Licence 2 constitue une étape importante dans le cursus de l'Institut Villebon – Georges Charpak, car il offre une première immersion concrète dans le monde de la recherche scientifique et permet aux étudiants d'affiner leur projet d'études. Ce rapport présente le stage que j'ai réalisé au Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE) pendant un mois. Les travaux ont principalement porté sur le traitement de données atmosphériques issues de fichiers NetCDF, la programmation en Python, la compréhension des processus physiques liés à la formation des nuages, ainsi que l'analyse de différentes variables environnementales.

Cette expérience m'a permis de découvrir concrètement le travail de recherche en sciences du climat, d'approfondir mes compétences en analyse de données, et de confirmer mon intérêt pour les thématiques environnementales et les outils scientifiques mobilisés dans ce domaine.

Abstract

This second-year undergraduate research internship represents a key milestone in the academic program at the Institut Villebon – Georges Charpak, offering a first immersion into the world of scientific research and helping students refine their academic and professional goals. This report presents the internship I carried out at the Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE) over the course of one month. The work focused on processing atmospheric data from NetCDF files, programming in Python, understanding the physical principles of cloud formation, and analyzing various environmental characteristics.

This experience allowed me to gain hands-on insight into climate science research, strengthen my skills in atmospheric data analysis, and confirm my strong interest in environmental science and the scientific tools used in this field.

Remerciements

Généralement, vous serez le seul signataire du rapport — et, donc, le seul responsable —. Votre directeur de stage n'apparaîtra que dans cette section “*Remerciements*”. Si votre rapport contient des résultats scientifiques, veillez à faire justice, et à faire apparaître ici les apports respectifs de votre directeur de stage et de vous-même.

Un style typique pour cette section est le suivant :

Remerciements. Ce stage de master a été effectué dans le Laboratoire de Géopantouflisme de l’Institut de Physique du Globe de Paris, sous la direction de Napoléon Bonaparte, que je voudrais remercier pour la qualité du café qu’il sait faire. Émile Zola m’a aidé avec le logiciel \LaTeX de préparation de documents. Le logiciel de dessin utilisé appartient à l’Université de Cochabamba. Cette recherche a été menée à bien grâce à une bourse du Ministère des Anciens Ministres, et le microscope aquatique utilisé a été financé par le Centre National de la Recherche Parapsychologique.

Sommaire

1	Introduction	5
2	Matériels et methodes	6
2.1	ATR42	6
2.2	RALI, radar/lidar	7
2.3	Autre instrument in-situ importants	9
2.4	Logiciels et données utilisé pour la suite	10
3	Résultat et discussion	10
4	Conclusion	10
	Références	11
	Annexes	12

Table des figures

1	Description détailler de la position des instruments et image de l'avion.	6
2	Exemple d'application de l'algorithme de fusion radar-lidar selon [Delanoë and Hogan, 2010] : en haut, masque radar ; au centre, masque lidar ; en bas, classification finale des phases nuageuses.	9

Liste des tableaux

1	Caractéristiques principales de l'instrument RASTA	7
2	Caractéristiques principales de l'instrument LNG	7
3	Caractéristiques des instruments de mesure in situ	9

1 Introduction

Les orages sont des phénomènes météorologiques extrêmes dont l'intensité et la fréquence suscitent de plus en plus d'attention, notamment dans le contexte du changement climatique [Knutson and al. \[2020\]](#). Comprendre les mécanismes qui gouvernent leur formation et leur évolution constitue un enjeu majeur pour la prévision météorologique et la réduction des risques naturels [Emanuel \[2005\]](#).

Au cœur de ces processus se trouve la convection atmosphérique, en particulier les courants convectifs profonds qui assurent le transport vertical de chaleur, d'humidité et d'énergie [Houze \[2004\]](#). Ces phénomènes, très localisés et dynamiques, sont encore mal représentés dans les modèles actuels en raison de leur échelle fine et de leur complexité [Arakawa \[2004\]](#). Alors que la résolution horizontale des modèles météorologiques s'est considérablement améliorée, la représentation verticale reste un défi, nécessitant des observations à haute résolution spatiale et temporelle.

Dans ce contexte, la mission *EarthCARE* (*Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer*), développée par l'ESA et la JAXA et lancée en 2024, a pour objectif d'améliorer notre compréhension des interactions entre nuages, aérosols et rayonnement, éléments clés du bilan énergétique de la Terre [Boucher and al. \[2013\]](#). Pour cela, EarthCARE embarque quatre instruments complémentaires :

- ATLID, un lidar ultraviolet (355 nm) pour détecter les couches fines de nuages et d'aérosols ;
- CPR, un radar Doppler nuage à 94 GHz, mesurant la structure verticale des nuages et les vitesses des particules ;
- MSI, une caméra multispectrale à haute résolution spatiale ;
- BBR, un radiomètre pour estimer les flux radiatifs au sommet de l'atmosphère [Illingworth and al. \[2015\]](#).

Afin de préparer l'exploitation de ces données et de valider les algorithmes associés, plusieurs campagnes aéroportées ont été menées. Parmi elles, la mission *MAESTRO* (*Mesoscale convective systems Analysis through airborne Synergistic observations and model integRatiOn*), réalisée en 2024 au large de l'Afrique de l'Ouest, autour de l'archipel du Cap-Vert, vise à reproduire en vol les capacités d'observation d'EarthCARE grâce à des instruments embarqués sur l'avion de recherche SAFIRE ATR-42 [Delanoë and al. \[2013\]](#).

MAESTRO s'appuie en particulier sur le système RALI, une combinaison radar-lidar comparable à celle du satellite EarthCARE. Ce système permet d'observer avec finesse la structure verticale des nuages, des précipitations et des aérosols [Chazette and al. \[2016\]](#), [Mioche and al. \[2015\]](#). Les données collectées contribuent à une meilleure compréhension de la convection, tout en alimentant la campagne de calibration/validation (Val/Cal) du satellite.

En parallèle, le programme AOS (*Atmosphere Observing System*) est un projet scientifique majeur à l'échelle internationale, coordonné par la NASA (États-Unis) en collaboration avec la JAXA (Japon), le CNES (France), la CSA (Canada), l'ASI (Italie) et le DLR (Allemagne). Ce programme ambitieux fédère un large réseau de laboratoires et d'institutions scientifiques à travers le monde. Il repose sur une constellation de quatre satellites répartis sur deux orbites (une polaire et une inclinée), conçus pour observer de manière synergique l'atmosphère terrestre dans sa globalité : aérosols, nuages, convection, précipitations, orages, etc. AOS vient ainsi compléter les objectifs de la mission EarthCARE en apportant une perspective complémentaire, essentielle à l'amélioration des modèles météorologiques et climatiques.

L'équipe SATINV (*SATellite INVersion*) du Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE) est activement engagée dans la préparation scientifique de la mission *C²OMODO*. Elle développe notamment des méthodes d'inversion permettant de déduire des paramètres atmosphériques à partir d'observations satellitaires. Mon stage s'inscrit dans cette dynamique, en lien direct avec les objectifs de *C²OMODO* et EarthCARE, en exploitant les données de la campagne MAESTRO, qui simulent les futures observations spatiales.

Les travaux qui m'ont été confiés portaient plus spécifiquement sur l'analyse de fichiers NetCDF issus du

système radar-lidar RALI, contenant des observations prétraitées. Grâce à un environnement JupyterLab et aux données mises à disposition par Julien Delanoë, j'ai pu explorer ces fichiers complexes, en comprendre l'organisation, et développer des analyses statistiques visant à extraire des informations complémentaires, non directement visibles dans les produits initiaux. Ce travail m'a permis de me familiariser avec le traitement de données scientifiques riches et techniques, constituant un défi aussi formateur qu'exigeant.

Dans la suite de ce rapport, je présenterai les différentes analyses réalisées au cours de ce mois de stage, ainsi que les principaux résultats obtenus.

Dans un premier temps, une analyse globale des données issues de l'ensemble des vols de la campagne MAESTRO sera proposée, afin d'en extraire des tendances statistiques générales, de comparer les vols entre eux, et d'identifier d'éventuelles régularités.

Dans un second temps, l'étude se concentrera sur quelques cas spécifiques, sélectionnés pour leurs caractéristiques remarquables, comme un vol marqué par une forte activité précipitante ou un autre présentant une importante charge en aérosols. Ces cas d'étude permettront d'illustrer plus concrètement la diversité des situations rencontrées.

2 Matériels et méthodes

2.1 ATR42

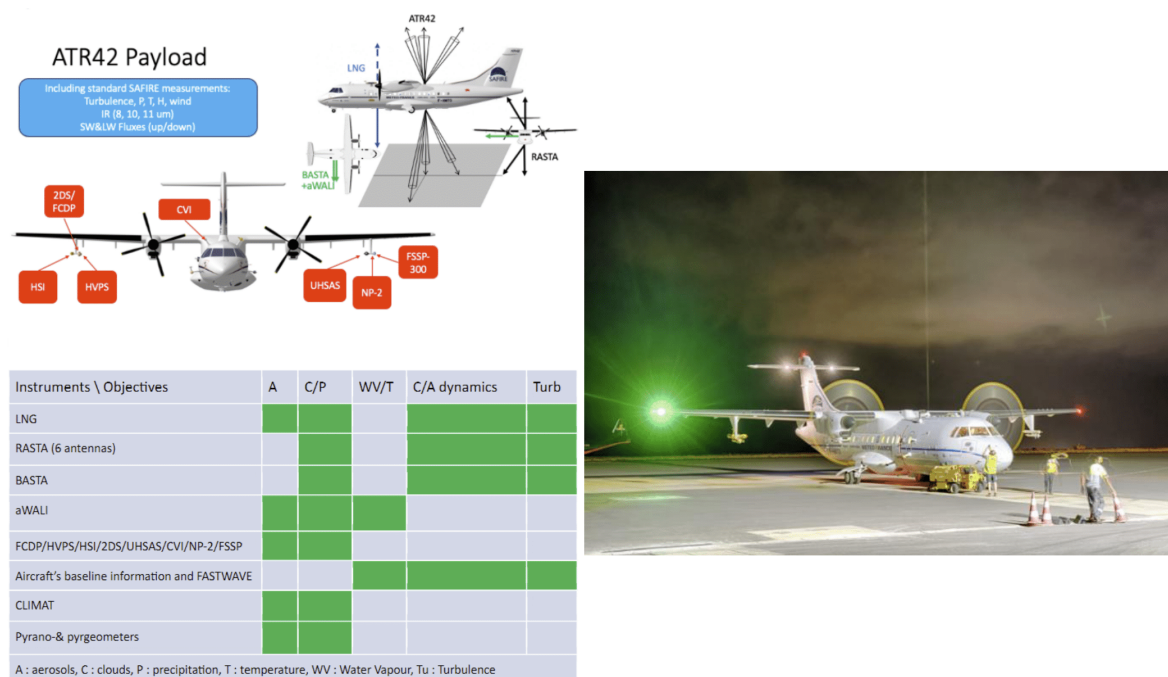


FIGURE 1 – Description détaillée de la position des instruments et image de l'avion.

L'ATR 42 est un avion bimoteur à turbopropulseurs, initialement conçu pour le transport régional de passagers et modifié pour des applications scientifiques par le service SAFIRE (Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement). Dans sa version instrumentée, il constitue une véritable plateforme volante de recherche atmosphérique, capable d'embarquer une grande variété de capteurs de télédétection et d'instruments de mesure *in situ*.

Sa configuration permet des vols à moyenne altitude (jusqu'à 8–9 km), avec une vitesse de croisière stable (environ 500 km/h), ce qui le rend particulièrement adapté à l'étude des systèmes convectifs, des nuages,

des précipitations et des couches d'aérosols. Sa maniabilité et son autonomie permettent de cibler des structures nuageuses complexes sur plusieurs centaines de kilomètres avec une grande précision.

L'ATR 42 a été équipé pour reproduire en vol certaines capacités d'observation des satellites d'observation atmosphérique, en embarquant des instruments de télédétection active (radar, lidar), des radiomètres passifs, ainsi que des capteurs microphysiques dédiés à l'analyse fine de l'atmosphère.

2.2 RALI, radar/lidar

2.2.1 RASTA

Caractéristique	Description
Type d'instrument	Radar Doppler actif millimétrique
Fréquence	Environ 94-95 GHz (bande W)
Résolution verticale	Environ 30 à 60 mètres
Résolution horizontale	Adaptée au scanning en vol
Portée verticale	Plusieurs kilomètres, du sol à haute altitude
Modes de mesure	Réflectivité radar et vitesse Doppler
Fonctionnalités	Mesure des mouvements verticaux des particules
Application principale	Analyse de la structure et de la dynamique des nuages

TABLE 1 – Caractéristiques principales de l'instrument RASTA

RASTA émet des ondes électromagnétiques millimétriques vers les nuages et capte le signal réfléchi par les particules hydrométéorologiques telles que gouttes d'eau et cristaux de glace. L'intensité du signal réfléchi, appelée réflectivité radar, permet d'estimer la densité et la distribution des particules. La mesure de l'effet Doppler sur la fréquence du signal réfléchi renseigne sur la vitesse relative des particules, révélant les mouvements verticaux au sein du système convectif (courants ascendants et descendants).

Cette double mesure est cruciale pour étudier la dynamique interne des orages, y compris la formation de précipitations, la turbulence, et les flux convectifs.

2.2.2 LNG

Caractéristique	Description
Type d'instrument	Lidar atmosphérique actif multi-longueurs d'onde
Longueurs d'onde	355 nm (ultraviolet), 532 nm (visible vert)
Type d'émission	Impulsions laser
Résolution verticale	Environ 15 à 30 mètres
Résolution horizontale	Dépend de la vitesse de l'avion et du taux d'échantillonnage
Portée verticale	Plusieurs kilomètres, jusqu'à la tropopause
Modes de mesure	Retour diffusé par les aérosols, nuages, cristaux de glace, dépolarisation
Application principale	Analyse détaillée des profils verticaux d'aérosols et de nuages, caractérisation microphysique

TABLE 2 – Caractéristiques principales de l'instrument LNG

Le lidar LNG émet des impulsions laser à deux longueurs d'onde, 355 nm dans l'ultraviolet et 532 nm dans le visible, vers l'atmosphère. La lumière diffusée et dépolarisée par les particules atmosphériques (aérosols, gouttes liquides, cristaux de glace) est recueillie par un télescope. Cette double longueur d'onde permet de mieux caractériser la taille, la phase et la composition des particules en analysant la diffusion et la dépolarisation du signal reçu.

Ainsi, LNG fournit des profils verticaux détaillés sur la structure des nuages et des aérosols, ce qui est essentiel pour comprendre les processus microphysiques dans les systèmes convectifs.

2.2.3 Algorithme de fusion des masques radar et lidar (RALI)

L'algorithme de fusion radar-lidar utilisé dans l'analyse des données MAESTRO est basé sur une approche synergique combinant les signaux lidar et radar pour la détection et la classification des phases nuageuses. Cette méthodologie s'inspire directement des travaux de [Delanoë and Hogan, 2008] et de l'extension proposée par [Aubry et al., 2024].

Dans un premier temps, les signaux bruts lidar et radar sont prétraités et alignés temporellement et spatialement afin de constituer des grilles communes de pixels verticaux. Le lidar, opérant dans l'ultraviolet (355 nm) et le visible (532 nm), est particulièrement sensible aux petites particules, ce qui le rend idéal pour la détection des gouttelettes d'eau et des cristaux de glace de petite taille. Le radar, généralement centré autour de 95 GHz, détecte plus efficacement les grandes particules de glace grâce à sa sensibilité accrue à la masse et à la taille des hydrométéores.

Les masques lidar et radar sont ensuite générés séparément à partir des seuils de détection : le lidar repère les signaux de rétrodiffusion (β) supérieurs au bruit de fond, tandis que le radar détecte les signaux de réflectivité (Z) indiquant la présence de cristaux de glace ou de précipitations. Ces deux masques sont fusionnés en une seule carte binaire à quatre classes : ciel clair, détection lidar seule, détection radar seule, et détection simultanée des deux instruments.

Sur la base de cette carte fusionnée, une classification des phases nuageuses est effectuée : les pixels avec détection lidar seule sont attribués à la phase eau surfondue, ceux avec détection radar seule à la phase glace, et ceux avec détection conjointe à la phase mixte. Des règles d'érosion et de cohérence spatiale sont appliquées pour corriger les détections isolées et améliorer la robustesse de la classification [Aubry et al., 2024].

Ensuite, une méthode appelée **inversion** est utilisée pour estimer les caractéristiques des nuages, comme la quantité d'eau liquide (LWC), la quantité de glace (IWC), et la taille des particules. Cette méthode compare les observations radar et lidar avec un modèle théorique de nuage. Le modèle simule ce que le radar et le lidar devraient mesurer selon différentes quantités d'eau et de glace. L'algorithme ajuste ensuite ces quantités jusqu'à ce que la simulation corresponde au mieux aux mesures réelles.

Pour représenter les différentes particules dans le modèle, on utilise des descriptions simples : par exemple, on suppose que les particules de glace ont certaines formes et tailles typiques, et que les gouttes d'eau ont une distribution de tailles assez régulière. Ces hypothèses permettent de calculer comment les particules réfléchissent ou diffusent les signaux radar et lidar.

Cette méthode permet d'obtenir des profils détaillés des propriétés des nuages avec une bonne précision [Aubry et al., 2024].

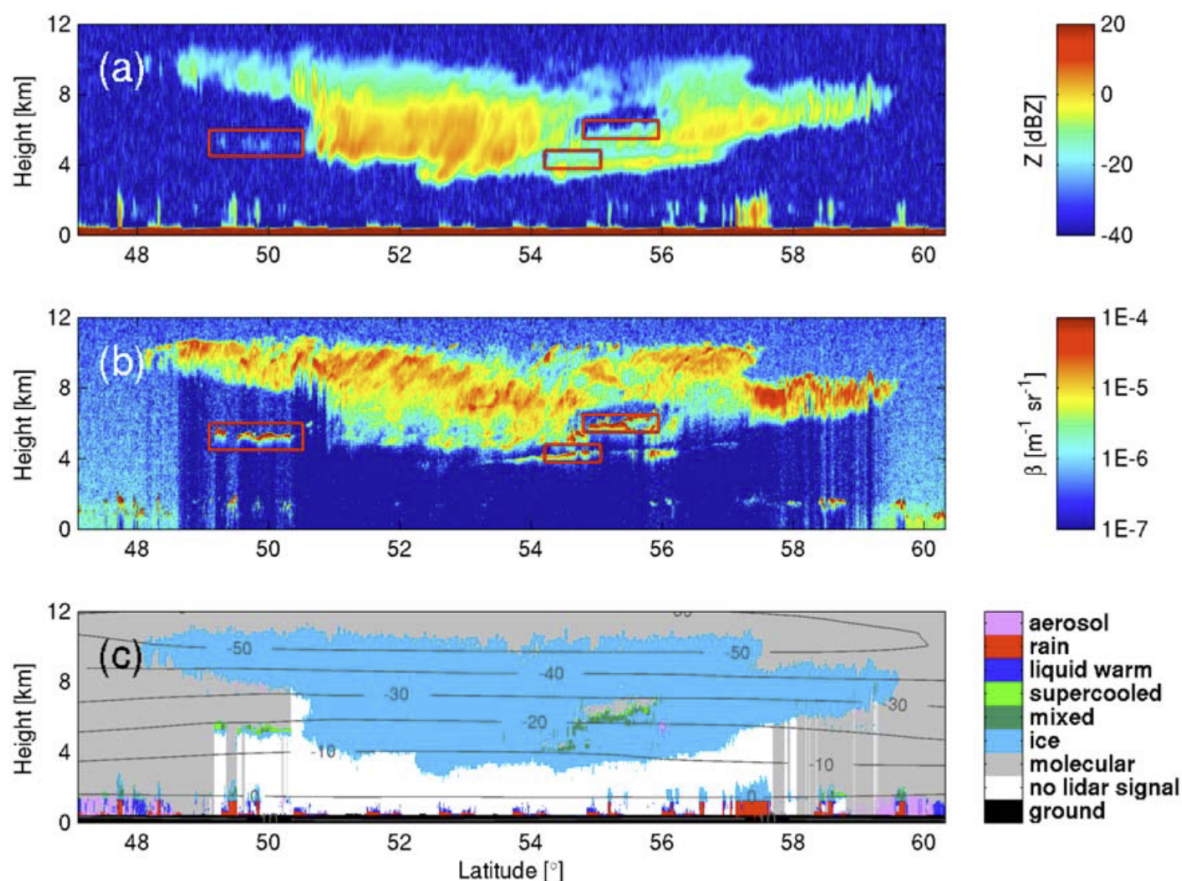


FIGURE 2 – Exemple d’application de l’algorithme de fusion radar-lidar selon [Delanoë and Hogan, 2010] : en haut, masque radar ; au centre, masque lidar ; en bas, classification finale des phases nuageuses.

Ici, nous présentons un exemple d’application de l’algorithme développé par Delanoë et al. En haut, on observe le masque radar, au centre le masque lidar, et en bas le résultat du traitement algorithmique qui permet d’isoler les différentes classes de nuages. Cette méthode combinée améliore significativement la discrimination des types de nuages en exploitant les complémentarités entre les données radar et lidar.

2.3 Autre instrument in-situ importants

TABLE 3 – Caractéristiques des instruments de mesure in situ

Instrument	Grandeurs mesurées	Plage de taille / précision
CAS (Cloud Aerosol Spectrometer)	Distribution des tailles des particules (aérosols, gouttelettes)	0,5 – 50 μm
CIP (Cloud Imaging Probe)	Images des particules, morphologie des cristaux de glace et gouttes	15 – 960 μm
CDP (Cloud Droplet Probe)	Concentration et taille des petites gouttelettes liquides	2 – 50 μm
PVM (Particle Volume Monitor)	Volume d’eau liquide dans les nuages	Mesure volumique directe
HAWK	Teneur en vapeur d’eau atmosphérique	Grande sensibilité hygrométrique
CN (Compteur de Noyaux de Condensation)	Concentration des noyaux de condensation (particules)	Particules microscopiques

Plusieurs instruments in situ embarqués lors de la mission MAESTRO permettent d’obtenir des mesures précises des propriétés microphysiques des nuages et de l’atmosphère, en complément des instruments télédéteçtés.

Le CAS mesure la distribution des tailles des particules, incluant les aérosols et les gouttelettes liquides, sur une plage allant d’environ 0,5 à 50 micromètres. Le CIP capture des images haute résolution des particules de taille plus importante, ce qui permet d’analyser la morphologie des cristaux de glace et des gouttes d’eau. La sonde CDP détecte et quantifie les petites gouttelettes liquides dans les nuages.

Le PVM fournit une estimation précise du volume d'eau liquide contenu dans les nuages, un paramètre clé pour la quantification de la teneur en eau. L'instrument HAWK mesure la teneur en vapeur d'eau atmosphérique avec une grande sensibilité, essentielle pour caractériser les conditions hygrométriques. Enfin, le compteur CN quantifie la concentration des particules microscopiques qui favorisent la formation des gouttelettes, ce qui est crucial pour comprendre les processus de nucléation.

En combinant ces mesures in situ avec les observations fournies par les instruments télédétectés LNG et RASTA, il est possible d'obtenir une description complète des propriétés microphysiques et dynamiques des systèmes nuageux observés.

2.4 Logiciels et données utilisé pour la suite

3 Résultat et discussion

4 Conclusion

Références

- A. Arakawa. The cumulus parameterization problem : Past, present, and future. *Journal of Climate*, 17 : 2493–2525, 2004.
- C. Aubry, J. Delanoë, S. Groß, F. Ewald, F. Tridon, O. Jourdan, and G. Mioche. Lidar–radar synergistic method to retrieve ice, supercooled water and mixed-phase cloud properties (varpy-mix). *Atmospheric Measurement Techniques*, 17(12) :3863–3881, 2024. doi:[10.5194/amt-17-3863-2024](https://doi.org/10.5194/amt-17-3863-2024).
- O. Boucher and al. Clouds and aerosols. *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC*, pages 571–657, 2013.
- P. Chazette and al. Observations of aerosol vertical distribution using airborne lidar. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9 :3393–3411, 2016.
- J. Delanoë and al. The rali airborne radar-lidar system : description and first results. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6 :2177–2197, 2013.
- J. Delanoë and R. J. Hogan. A variational scheme for retrieving ice cloud properties from combined radar, lidar, and infrared radiometer. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 113(D7), 2008. doi:[10.1029/2007JD009000](https://doi.org/10.1029/2007JD009000).
- Julien Delanoë and Robin J. Hogan. Combined cloudsat–calipso–modis retrievals of the properties of ice clouds. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 115(D00H29), 2010. doi:[10.1029/2009JD012346](https://doi.org/10.1029/2009JD012346).
- K. Emanuel. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, 436 :686–688, 2005.
- R. A. Houze. Mesoscale convective systems. *Reviews of Geophysics*, 42 :RG4003, 2004.
- A. J. Illingworth and al. Earthcare : The esa–jaxa cloud aerosol and radiation explorer satellite mission. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96 :1311–1332, 2015.
- T. R. Knutson and al. Tropical cyclones and climate change. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1 : 1–20, 2020.
- G. Mioche and al. Synergistic use of lidar and radar measurements to study clouds. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8 :1431–1445, 2015.

Annexes

Annexe A : Titre de l'annexe A

Contenu de l'annexe A. . .

Annexe B : Titre de l'annexe B

Contenu de l'annexe B. . .