



**HAL**  
open science

## Développements radar au LATMOS pour l'études des propriétés microphysiques des nuages et des précipitations

Nicolas Viltard, Christophe Le Gac, Audrey Martini, Yvon Lemaître, Nicolas Pauwels, Julien Delanoë, Guillaume Lesage

► **To cite this version:**

Nicolas Viltard, Christophe Le Gac, Audrey Martini, Yvon Lemaître, Nicolas Pauwels, et al.. Développements radar au LATMOS pour l'études des propriétés microphysiques des nuages et des précipitations. ENVIREM 2019, Jul 2019, Palaiseau, France. hal-02389653

**HAL Id: hal-02389653**

**<https://hal.science/hal-02389653>**

Submitted on 2 Dec 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Développements radar au LATMOS pour l'études des propriétés microphysiques des nuages et des précipitations.

Nicolas Viltard  
LATMOS-IPSL  
CNRS  
Guyancourt, France  
[nicolas.viltard@latmos.ipsl.fr](mailto:nicolas.viltard@latmos.ipsl.fr)

Audrey Martini  
LATMOS-IPSL  
UVSQ  
Guyancourt, France  
[audrey.martini@latmos.ipsl.fr](mailto:audrey.martini@latmos.ipsl.fr)

Julien Delanoë  
LATMOS-IPSL  
UVSQ  
Guyancourt, France  
[julien.delanoë@latmos.ipsl.fr](mailto:julien.delanoë@latmos.ipsl.fr)

Christophe Le Gac  
LATMOS-IPSL  
CNRS  
Guyancourt, France  
[christophe.legac@latmos.ipsl.fr](mailto:christophe.legac@latmos.ipsl.fr)

Yvon Lemaître  
LATMOS-IPSL  
CNRS  
Guyancourt, France  
[yvon.lemaitre@latmos.ipsl.fr](mailto:yvon.lemaitre@latmos.ipsl.fr)

Guillaume Lesage  
LATMOS-IPSL  
UVSQ  
Guyancourt, France  
[guillaume.lesage@latmos.ipsl.fr](mailto:guillaume.lesage@latmos.ipsl.fr)

Nicolas Pauwels  
LATMOS-IPSL  
UVSQ  
Guyancourt, France  
[nicolas.pauwels@latmos.ipsl.fr](mailto:nicolas.pauwels@latmos.ipsl.fr)

**Abstract**—Ce document donne une brève introduction des activités de recherche sur la microphysique des nuages et des précipitations effectuées au LATMOS. Si de très nombreuses études ont été menées par le passé sur les propriétés des distributions dimensionnelles de tailles de gouttes, des questions restent ouvertes sur les caractéristiques des particules glacées dans les différents types de nuages et l'impact que ceux-ci peuvent avoir sur le bilan hydrique et de bilan radiatif. Au LATMOS, nous concevons, développons, déployons et exploitons des radars en bande X et W afin de d'améliorer notre connaissance des liens entre dynamique et microphysique dans les systèmes précipitants.

**Keywords**—radar, bande X, bande W, microphysique glacée, nuages, précipitations

## I. INTRODUCTION

Le Laboratoire ATmosphère, Milieux et Observations Spatiales (LATMOS) résulte de la fusion en 2009 du Service d'Aéronomie (SA) et du Centre d'Études des Environnements Terrestres et Planétaires (CETP). Si le SA a apporté une expertise de premier plan dans le domaine des lidars, le CETP était lui plutôt spécialisé dans les radars. Pendant près de 25 ans, le CETP a développé, déployé et exploité le système RONSARD de radar en bande C pour l'étude de la dynamique atmosphérique en régions tempérées et tropicales. Le système a participé à de nombreuses campagnes de terrain mais a dû être abandonné en 2009 car trop cher et demandant une mise à jour trop importante. Le laboratoire avait également contribué, en coopération avec la Direction Technique (DT) de l'Institut Nationale des Sciences de l'Univers, au développement de systèmes d'antennes en bande X à guides d'ondes pour les avions P3 de la NOAA et l'Electra du NCAR, tous équipés de radars météorologiques.

Depuis l'abandon de la bande C, les équipes se sont recentrées sur 2 filières : l'une en bande W pour l'étude des

propriétés des nuages de glace et l'autre en bande X pour l'étude des propriétés microphysiques des précipitations glacées.

## II. LES SPECIFICITE DE LA RADAR METEOROLOGIE

En radar météorologie, que ce soit pour le suivi des nuages ou de la pluie, les cibles sont plus ou moins distribuées uniformément dans le volume du faisceau. Cela conduit à la version simplifiée et adaptée de l'équation radar couramment utilisée :

$$P_r = \underbrace{[P_t \tau G^2 \lambda^2 \theta^2]}_{(a)} \underbrace{\left[ \frac{c}{512\pi^2} \right]}_{(b)} \underbrace{\frac{\eta}{R^2}}_{(c)} \quad (1)$$

où la puissance reçue  $P_r$  est égale au produit de 3 termes :

(a) qui ne dépend que du radar, avec  $P_t$  la puissance transmise,  $\tau$  la durée de l'impulsion,  $G$  le gain d'antenne,  $\lambda$  la longueur d'onde,  $\theta$  l'ouverture du faisceau ;

(b) une série de constantes dont  $c$ , la vitesse de la lumière ;

(c) un terme qui dépend des propriétés du milieu (et de la longueur d'onde)  $\eta$  la réflectivité et  $R$  la distance entre le volume considéré et le radar.

Rayleigh a montré que pour une goutte sphérique de diamètre  $D$  et un radar de longueur d'onde  $\lambda$ , la section efficace de rétro-diffusion  $\sigma_b(D)$  est donnée par :

$$\sigma_b(D) = \frac{\pi^5 |K_w|^2}{\lambda^4} D^6 \quad (2)$$

où  $|K_w|^2$  est un réel, fonction de l'indice de réfraction de l'eau. Ainsi, on peut définir le facteur de réflectivité ( $Z_{Ray}$ ) en régime de Rayleigh comme :

$$Z_{Ray} = \int_0^{\infty} N(D)D^6 dD \quad (3)$$

où  $N(D)$  est la Distribution Dimensionnelle de taille de Goutte (DSD) c'est-à-dire le nombre de gouttes par unité de volume dont le diamètre est compris entre  $D$  et  $D+dD$ .

En météorologie, les radars sont principalement en bande S, C et X avec quelques instruments en bande Ka et depuis une dizaine d'années des radars « nuage » en bande W. Pour les deux premiers la diffusion sur les gouttes et les cristaux s'effectue toujours en régime de Rayleigh. Pour la bande X, c'est presque toujours vrai aussi sauf pour les très grosses gouttes. Par contre pour les fréquences au-dessus, les régimes de type de diffusion de Mie vont dominer ce qui conduit à la définition générale du facteur de réflectivité équivalente suivante :

$$Z_e = \frac{\lambda^4}{\pi^5 |K_w^2|} \int_0^{\infty} N(D)\sigma_b(D)dD \quad (4)$$

ce qui conduit à la version généralisée de (1) :

$$P_r = C_{rad} \frac{1}{\lambda^2 R^2} Z_e \quad (5)$$

où  $C_{rad}$  est communément appelée constante radar.

L'équation (5) nous montre qu'en régime de Rayleigh un radar en bande X ( $\lambda \sim 3$ . cm) a un  $P_r$  100 fois plus petit qu'un radar en bande W ( $\lambda \sim 3$ . mm), toutes choses égales par ailleurs. D'autre part, on peut voir à cause de (6) que le facteur de réflectivité (noté ci-après réflectivité)  $Z_e$  ou  $Z_{Ray}$  est une fonction fortement dépendante de la distribution dimensionnelle de gouttes (DSD) ou de particules (PSD) et en particulier de la présence de grosses gouttes/particules.

L'un des enjeux principaux de la radar météorologie, lorsque l'on veut restituer de façon quantitative les variables d'intérêt (pluie au sol, contenu en eau/glace, vitesses de chute, composantes du vent etc..) va donc être de bien savoir caractériser les propriétés de la DSD/PSD.

### III. FILIERE BANDE W

#### A. RASTA

Les questions afférentes à l'impact radiatif des nuages sous la pression du changement climatique ont commencé à émerger dans les années 2000. Il était alors nécessaire de développer un système capable de fournir des profils verticaux de contenus et de rayons effectifs des particules afin de vérifier que les paramétrisations dans les modèles étaient correctes. C'est dans ce but qu'a été développé le radar pulsé multi-plateforme RASTA. A l'origine installé dans une camionnette et visant au zénith, le système était également démontable pour être installé dans un avion avec une visée nadir.

Au cours de nombreuses campagnes tant sol qu'aéroportées, il a permis de vérifier que les modèles pouvaient se tromper très lourdement dans la représentation des nuages et a ouvert la voie à un champ de recherche qui continue sur la caractérisation microphysique des nuages.

Aujourd'hui, RASTA subsiste uniquement en version aéroportée et peut être embarqué dans le Falcon 20 de l'unité SAFIRE. Il possède 6 antennes permettant de reconstituer les champs de réflectivité et vitesse sous et au-dessus de l'avion.

#### B. BASTA

Héritière de RASTA, la filière des BASTA a permis de développer une nouvelle expertise au LATMOS sur les radars à émission continue. En effet, le principe de ces systèmes est d'émettre une rampe de fréquence à très faible puissance avec une chaîne d'émission et une chaîne de réception distinctes (bi-statique).

La Figure 1 montre le passage d'un orage au-dessus du site du SIRT (Palaiseau) dans la nuit du 8 au 9 juin 2017. Entre 22h et 23h UTC on peut voir l'enclume avant, essentiellement composée de particules de glace nuageuse (vitesses de chute inférieures à quelques cm/s) au-dessus de 5 km d'altitude. Peu après 23h, on voit un trou de réflectivité correspondant au passage d'une cellule de précipitations intenses qui conduit à une atténuation quasi-complète du signal. De 23h15 à 2h50, on peut voir une alternance de cellules convectives et de régions stratiformes. Les premières sont reconnaissables aux réflectivités plus fortes et aux effets d'atténuation caractéristiques dans la partie supérieure du champ de réflectivité. Les secondes sont caractérisées par une structure de  $Z$  plus homogène en « couches » horizontales avec une zone de transition marquée entre les particules glacées et les gouttes d'eau à 3 km d'altitude. Après 3h du matin on retrouve la signature de l'enclume stratiforme composée pour l'essentiel de particules glacées faiblement précipitantes résultant de leur injection vers la partie supérieure de la troposphère par les tours convectives.

Comme évoqué précédemment, la longueur d'onde de BASTA, proche de 3 mm et la taille caractéristiques des cristaux visibles (quelques 10èmes à quelques mm) font que le radar fonctionne essentiellement en régime de Mie. Dans ce régime, la section efficace de rétrodiffusion ne suit plus une loi en  $D^6$  et certaines classes de gros diamètres vont même avoir des contributions relativement plus faibles que celle de particules plus petites. Cela conduit à des réflectivités équivalentes observées qui ne dépassent que rarement 23 à 25 dBZ.

La Figure 3 présente, selon le même principe que la Figure 1, la vitesse Doppler mesurée par BASTA. On peut voir la transition claire vers 3 km avec au-dessus les particules glacées dont les vitesses Doppler moyennes sont proches de -1 m/s et en-dessous, les précipitations liquides avec des vitesses proches de -4 m/s. Les régions rouges dans les zones de précipitations les plus intenses sont des vitesses repliées (la vitesse ambiguë dans cette configuration est de +/-4.93 m/s). De la même façon que pour la réflectivité, la vitesse Doppler sur les cibles distribuées dans le volume est la somme pondérée des vitesses individuelles. Les effets de Mie vont donc avoir tendance à diminuer la contribution des plus gros hydrométéores ce qui donne des vitesses généralement inférieures à celles mesurées par exemple en bande X.

Le concept BASTA permet ainsi de développer des instruments de coût raisonnable et très compacts pouvant observer en continu les nuages jusqu'à 18 km d'altitude. Ainsi ils peuvent être aisément installés partout, y compris en zones urbaines denses. Une version aéroportée est également en cours de développement.

### IV. FILIERE BANDE X

#### A. CURIE

Des études sur les propriétés de la turbulence de couche limite sont menées depuis de nombreuses années au

LATMOS. Si les développements instrumentaux pour les mesures in-situ existaient depuis longtemps, dans le milieu des années 2000 le besoin pour un système de profilage de la couche limite en air-clair a vu le jour et a donné lieu au développement du radar CURIE. Celui-ci est un radar Doppler à impulsions, compact et de faible puissance. Une première version a été testée puis entre 2014 et 2017, il a été entièrement refondu pour donner naissance à une nouvelle version partageant le hardware avec ROXI présenté ci-dessous.

CURIE permet de mesurer les caractéristiques de la turbulence dans les quelques premières centaines de mètres au-dessus du radar avec une résolution spatiale élevée (25 m). Ces mesures permettent ensuite de calculer les termes de dissipation et de transport liés à la turbulence de basse couche et d'étudier les précurseurs de la convection. Il est aujourd'hui très utilisé également pour la mesure des diffusions de polluant atmosphériques dans le cadre du projet QUALAIR au centre de Paris.

### B. ROXI

L'un des inconvénients principaux de la bande W est d'être très atténuée dans la pluie. Or une partie des questions que l'on se pose sur la microphysique nuageuse se pose également pour les précipitations glacées. En reprenant la base du radar CURIE, le radar ROXI a donc été développé. Radar compact de puissance modérée, il permet toutefois de restituer un profil vertical de réflectivité et de vitesse Doppler jusqu'à plus de 10 km d'altitude y compris dans les cellules convectives les plus intenses.

Sur la Figure 2 on peut voir la réflectivité obtenue pour le même cas que la Figure 1 mais vu par le ROXI. On retrouve les principales caractéristiques décrites précédemment avec quelques différences notables. Le ROXI est aveugle aux particules nuageuses glacées essentiellement à cause de l'effet du facteur  $1/\lambda^2$  de l'équation (6) (en sus, les caractéristiques des deux radars sont ici évidemment différentes). Par contre, il est beaucoup moins affecté par les effets d'atténuation que le BASTA et l'on peut voir que le passage des cellules convectives ne s'accompagne pas d'une baisse significative de la hauteur maximale de réflectivité. Au contraire, dans ces tours composées d'ascendances, des particules plus grosses et plus denses sont soulevées à des altitudes plus grandes.

Vers 3 km d'altitude et dans les parties stratiformes, on peut observer une zone d'environ 4 à 500 m d'épaisseur dans laquelle la réflectivité est renforcée. C'est un artefact de mesure qui correspond à la zone de fonte (0°C) où les particules glacées commencent à être enrobées d'une pellicule d'eau et sont « vues » comme des très grosses gouttes. En étudiant les caractéristiques de cette « Bande Brillante » (BB), on peut en déduire des informations sur les caractéristiques des particules glacées : généralement plus la BB est épaisse, plus les particules qui l'alimentent sont denses.

De la même façon que pour le BASTA, la Figure 4 présente la vitesse Doppler mesurée par le ROXI. Là encore, les vitesses observées au-dessus de l'isotherme 0°C sont proches de -1m/s alors qu'en-dessous elles sont le plus souvent inférieures à -5 m/s (la vitesse ambiguë du ROXI se situe à +/- 11.72 m/s dans cette configuration). Les « taches » rouges dans les cellules convectives de 23h10 et 00h35 au-dessus de l'isotherme 0°C sont certainement des courants ascendants qui marquent la partie la plus active des cellules. La zone de fortes vitesses négatives dans la partie glacée observées vers 00h25, juste après la zone d'ascendance

pourrait être due à la présence de grêle générée dans le cœur de la convection.

ROXI permet d'étudier les propriétés des plus gros cristaux de glace dans la partie supérieure des nuages. Peu affecté par les phénomènes de diffusion de Mie, il permet de travailler en complément avec le système BASTA pour couvrir des gammes de diamètres et de taux précipitants plus élevés. La Figure 5 illustre les différences entre ROXI et BASTA pour des pluies modérées stratiformes (pour minimiser les effets d'atténuations) observées dans la nuit du 21 au 22 décembre 2016. L'échelle de couleur représente la densité des points dans un intervalle de réflectivité donné. On peut voir l'accord quasi-parfait entre les deux radars pour des réflectivités entre -8 et 8 dBZ. En dessous de -8 dBZ, le ROXI est moins sensible que le BASTA et on observe une montée progressive du bruit qui décorrèle les mesures. A l'opposé, au-dessus de 8 dBZ, le BASTA commence à être affecté par les effets de Mie et sa réflectivité tend à être inférieure à celle du ROXI. Les cercles colorés marquent la réflectivité théorique pour une DSD hypothétique (Gamma) pour les deux radars.

La Figure 6 montre un exemple de spectre de vitesses Doppler calculé par FFT à partir des séries temporelles de I et Q du ROXI. Il s'agit ici d'un spectre moyenné sur ~30 s dans la partie stratiforme d'un front observé le 21 décembre 2016 au-dessus de Palaiseau (SIRTA). Ces spectres d'amplitude sont normalisés à 1 pour plus de lisibilité. Les spectres sont assimilés de façon statistique à la densité de probabilité des vitesses observées dans une porte radar qui correspondent elles-mêmes à la distribution de vitesses de chute combinée à la vitesse verticale de l'air. Ils donnent donc une indication sur les propriétés de la distribution dimensionnelle des gouttes ou des particules présentes dans le volume échantillonné. La zone de transition marquée vers 2 km d'altitude correspond au passage entre eau (en-dessous) et glace (au-dessus). On remarquera que les spectres dans la partie glacée ont une largeur beaucoup plus faible que ceux dans la partie liquide. Ceci est dû purement au fait que les gouttes, plus denses, ont une loi vitesse-diamètre avec un exposant plus élevé en général que celui des particules glacées.

## V. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Nous avons montré ici, essentiellement pour deux des filières radar développées au LATMOS, les spécificités liées à l'observation de cibles distribuées que sont les cristaux de glace et les gouttes de pluie. Nous avons montré comment ces radars Doppler à visée zénithale en bande X et W apportent des informations complémentaires pour l'observation des systèmes précipitants et la caractérisation des propriétés microphysiques des nuages et des précipitations. Nous avons également montré le potentiel de complémentarité entre les deux fréquences.

Le radar BASTA, en bande W, est un système bistatique à émission continue alors que le ROXI/CURIE (bande X) est un système pulsé monostatique. L'ambition des équipes du LATMOS est de développer pour ces deux systèmes des versions à émission continue monostatiques pour gagner en coût et en encombrement, sans perdre significativement en sensibilité. Ces systèmes compacts et peu gourmands en énergie pourraient être utilisés non seulement sur des instruments au sol mais aussi pour des configurations aéroportées sur avions ou sur ballons stratosphériques.

En parallèle, le LATMOS explore et cherche à développer des collaborations sur tous types d'innovations techniques qui

pourraient améliorer les possibilités de mesure des radars météorologiques.

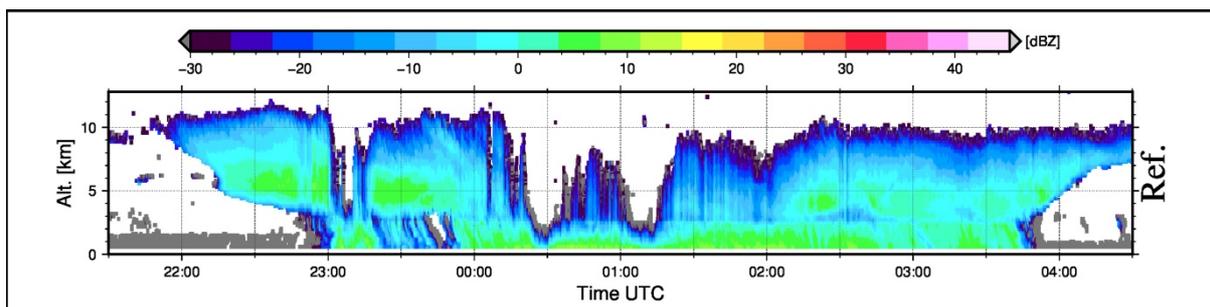


Figure 1 : Coupe hauteur-temps de la réflectivité observée par le radar BASTA pour l'évènement convectif du 8-9 juin 2017. Le radar était installé au SIRTA à Palaiseau.

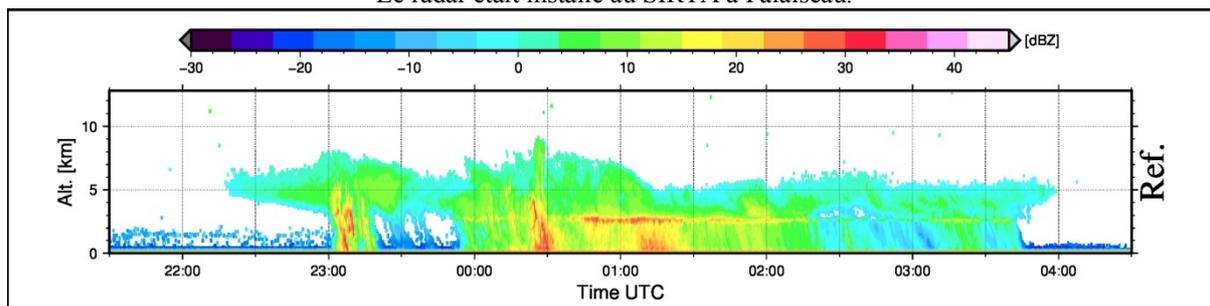


Figure 2 : Coupe hauteur-temps de la réflectivité observée par le radar ROXI pour le même évènement et au même endroit que la Figure 1.

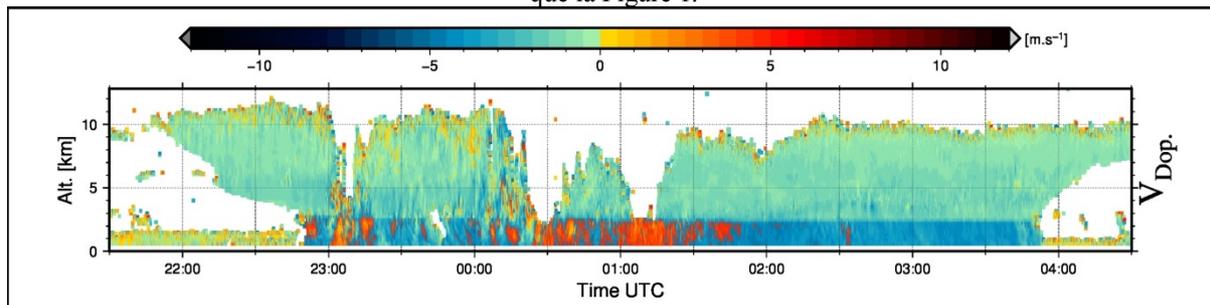


Figure 3 : Coupe hauteur-temps de vitesse Doppler observée par le radar BASTA pour le même évènement et au même endroit que la Figure 1.

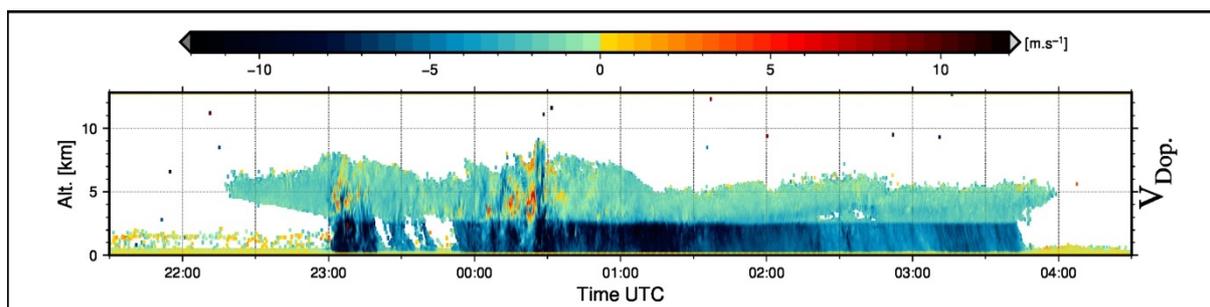


Figure 4 : Coupe hauteur-temps de la vitesse Doppler observée par le radar ROXI pour le même évènement et au même endroit que la Figure 1.

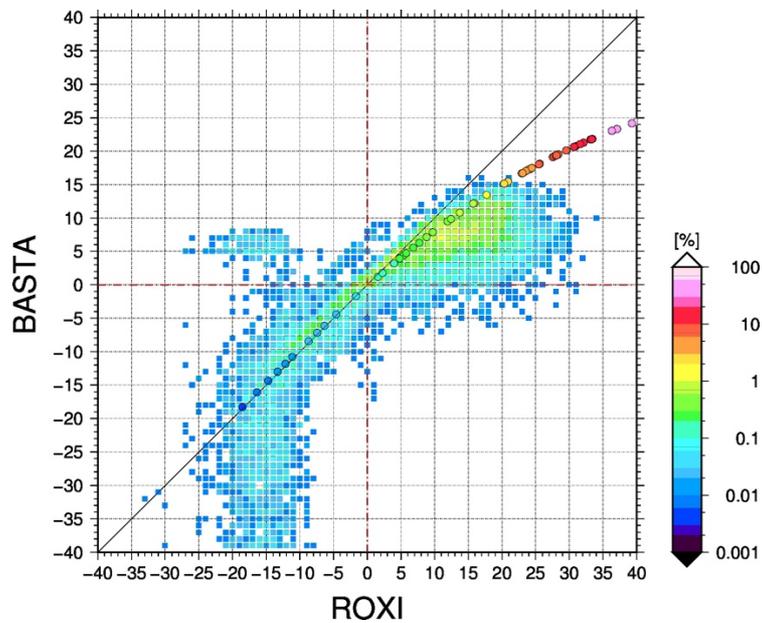


Figure 5 : Comparaison des réflectivités BASTA et ROXI sous forme d'histogramme 2D pour des précipitations stratiformes modérées observées les 21 et 22 décembre 2016. On a conservé ici les réflectivités comprises entre 500 et 2 km d'altitude. Les cercles colorés représentent la courbe théorique des valeurs respectives de réflectivités pour les deux radars selon une loi de distribution dimensionnelle de taille de goutte arbitraire mais réaliste.

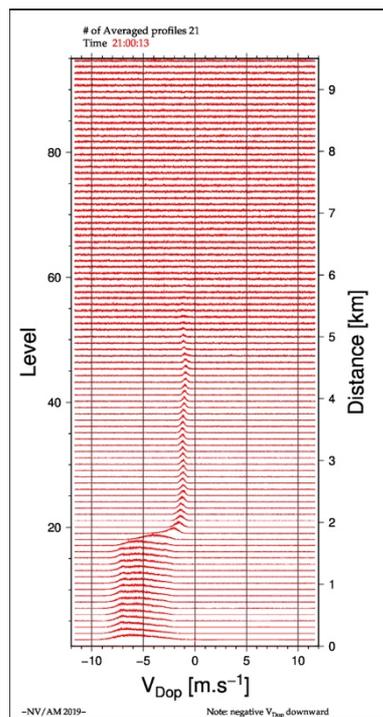


Figure 6 : Profil des spectres (normalisés) de vitesses Doppler calculés à partir des séries temporelles de I et Q du ROXI au passage de la partie stratiforme d'un front hivernal à Palaiseau (SIRTA).