

MÉTHODE DE TRAITEMENT D'ANOMALIE SUR LA PHASE DIFFÉRENTIELLE ϕ_{DP} .

Modeste Huberson Ahiba KACOU*, **Abé Delfin OCHOU**,
Augustin Kadjo KOFFI et **Eric-Pascal ZAHIRI**

*Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de Mécanique des Fluides
(LAPA-MF), UFR SSMT, Université Félix Houphouët-Boigny,
22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire*

* Correspondance, e-mail : modeste_kacou@yahoo.fr

RÉSUMÉ

La grande innovation apportée par l'introduction de la polarimétrie à travers la phase différentielle (ϕ_{DP}) dans la mesure radar en hydrométéorologie peut être remise en cause lorsque cette phase présente une anomalie sur une partie de son profil. En nous appuyant sur la méthode "ZPHI", nous avons proposé une reconstitution partielle du profil de ϕ_{DP} sur le tronçon affecté. Cette étude a été suscitée par les observations faites lors de la campagne de mesure radar pendant l'été 2012 au Burkina Faso lors de la validation du satellite Megha-Tropiques. Le champ de ϕ_{DP} reconstituée apparaît cohérent. La comparaison du nuage (K_{DP} , Z_H) avec la théorie a permis d'évaluer le processus de reconstitution. Le coefficient de corrélation de Spearman, qui est passé de 0.27 à 0.96 respectivement avant et après la reconstitution de la phase différentielle, démontre que le champ reconstitué peut être pleinement exploité.

Mots-clés : *variables polarimétriques, reconstitution de ϕ_{DP} , radar météorologique bande X, méthode "ZPHI".*

ABSTRACT

Method of treating anomaly on the differential phase ϕ_{DP}

The great innovation brought by introduction of polarimetry in the hydrometeorological radar measurement through total differential phase ϕ_{DP} can be called into question when this phase presents an anomaly on a part of its range profile. Using the "ZPHI" method, we proposed a partial reconstitution of the ϕ_{DP} profile on the affected section. This study was

prompted by observations made in summer 2012 radar measurement campaign in Burkina Faso during the validation of the Megha-Tropiques satellite. The reconstructed ϕ_{DP} field appears coherent. Assessment of reconstitution process was made through analysis of scatter plot (K_{DP} , Z_H) with theory. The Spearman coefficient of correlation, which increased from 0.27 to 0.96 respectively before and after the reconstitution of the total differential phase, demonstrates that the reconstituted field can be fully exploited.

Keywords : *polarimetric variables, ϕ_{DP} reconstitution, weather X-band radar, "ZPHI" method.*

I - INTRODUCTION

Le radar météorologique constitue l'un des meilleurs instruments d'échantillonnage des précipitations aussi bien spatialement que temporellement. Avec sa fine résolution spatiale, il permet un meilleur rendu de la variabilité spatiale de la pluie plus que tout autre instrument de télédétection et sa haute résolution temporelle et sa portée utile de l'ordre de 200 km lui confèrent la capacité de suivre l'évolution des précipitations, le rendant presque incontournable pour l'élaboration de systèmes d'alerte précoce. La deuxième guerre mondiale a marqué l'intérêt du radar pour l'observation du temps avec les radars conventionnels à polarisation unique qui donnent accès à une seule variable la réflectivité radar Z (en dBZ) [1]. Plus tard, les radars à double polarisation qui fournissent une diversité d'informations sur la taille et la distribution des gouttes de pluie comparativement aux radars conventionnels [2] ont permis d'affiner les estimations. En effet, au lieu d'une seule variable, l'on a désormais accès à la réflectivité horizontale (Z_H , dBZ), la réflectivité verticale (Z_V , dBZ), la réflectivité différentielle ($Z_{DR}=Z_H-Z_V$, dB), le coefficient de corrélation co-polaire (ρ_{HV} , sans unité), la phase différentielle (ϕ_{DP} , deg) et sa dérivée le saut de phase différentielle spécifique (K_{DP} , deg/km) pour ne citer que ceux-là [3, 4]. Toutes ces variables permettent de mieux caractériser les précipitations. L'intérêt des radars polarimétriques n'a cessé de grandir depuis les travaux de [5]. Cela a été démontré par les nombreux études parues plus tard [1, 6 - 14]. En effet, l'introduction de la polarimétrie a permis entre autre d'améliorer l'estimation de l'intensité de la pluie, la restitution de la distribution granulométrique des gouttes de pluie et la classification des types d'hydrométéores [12, 13, 15, 16]. Il s'ensuit donc également une amélioration des sorties des modèles de prévision hydrométéorologiques, des produits satellites (etc.). Tandis que ρ_{HV} aide à discriminer les échos météorologiques des échos non-météorologiques, l'innovation majeure apportée par la

polarimétrie à la mesure radar réside dans l'exploitation de la variable de propagation ϕ_{DP} et de sa dérivée le saut de phase différentielle spécifique K_{DP} . En effet, ϕ_{DP} , qui est la différence de phase entre les ondes polarisées horizontalement et verticalement, et K_{DP} ne sont pas affectés par l'atténuation du signal radar causée par l'absorption et/ou la dispersion de l'énergie électromagnétique par les gouttes de pluie, notamment avec acuité pour les courtes longueurs d'onde d'émission. ϕ_{DP} apparaît ainsi très utile pour la correction d'atténuation de Z_H , Z_V et Z_{DR} qui en sont très affectés [15, 17 - 20]. Ce qui va permettre leur exploitation dans différents algorithmes et ainsi réduire considérablement les incertitudes associées [2] aux estimations quantitatives des caractéristiques des pluies (intensité, cumul et distribution des gouttes de pluie (DSD)). De plus, ϕ_{DP} et K_{DP} ne dépendent pas de la calibration du radar, sont peu sensibles à la variabilité de la DSD, à la présence de la grêle et à l'occultation partielle du faisceau radar [21, 22]. Enfin, plusieurs études ont montré que l'utilisation du saut de phase différentielle spécifique K_{DP} améliore les estimations des précipitations [15, 23 - 25] et joue un rôle important dans les algorithmes de classification des hydrométéores [16].

Tout ceci démontre la place incontournable qu'occupe la phase différentielle ϕ_{DP} dans l'exploitation efficiente du radar polarimétrique en hydrométéorologie. Au cours de la campagne de mesure radar météorologique qui a eu lieu au Burkina Faso dans le cadre du programme franco-indien Megha-Tropiques [26], une défaillance électronique a engendré une anomalie sur la phase différentielle sur les 20 premiers kilomètres, la rendant ainsi inexploitable sans un traitement préalable adapté. Compte tenu de l'importance de cette variable, nous avons développé une méthode pour reconstituer la phase différentielle ϕ_{DP} dans la région des 20 premiers kilomètres où apparaît cette anomalie afin de pouvoir exploiter les mesures radar des jours affectés avant la résolution de cette défaillance. Cette étude rejoint bien celle de [27] qui présente l'importance de la maintenance et de la surveillance afin de maintenir un fonctionnement optimal des radars et un taux élevé de disponibilité de la donnée radar.

II - MATÉRIEL ET MÉTHODES

II-1. Matériel

Cette étude a pu se faire dans le cadre des campagnes de validation de la mission spatiale franco-indienne Megha-Tropiques [26], dédiée à l'étude du cycle de l'eau dans les tropiques. Ces campagnes se sont déroulées au Burkina Faso et ont concerné l'échantillonnage à l'aide d'un radar polarimétrique

(à double polarisation H et V) bande X, Xport de l'IRD [15], de tous les systèmes convectifs qui arrosaient la ville de Ouagadougou et ses environs dans un rayon de 140 km autour de la position du radar comme le montre la **Figure 1** en été 2012 et 2013 mais le présent travail ne concerne que certaines données de 2012. Le radar fournit des mesures qui renseignent sur la taille, la forme, la concentration ainsi que la nature et le comportement des hydrométéores contenus dans le pixel radar (volume atmosphérique élémentaire). Ces informations sont contenues dans les variables polarimétriques. Etant donné que la réflectivité horizontale n'a pas été affectée, nous allons exploiter cette variable comme information de base pour reconstituer le profil de la phase différentielle sur les 20 premiers kilomètres. Pour cette étude, les observables radars polarimétriques qui nous intéressent sont donc celles qui vont nous être directement utiles à la mise en œuvre de notre méthodologie. Il s'agit : de la réflectivité horizontale (Z_H , en dBZ) mesurée, de la phase différentielle (ϕ_{DP} , deg), du saut de phase différentielle spécifique (K_{DP} , deg/km) dérivé de ϕ_{DP} , du coefficient de corrélation radar (ρ_{HV} , sans unité). Pour cette dernière variable, les valeurs sont généralement comprises entre 0 et 1 ou entre 0 et 100% comme c'est le cas dans notre étude.

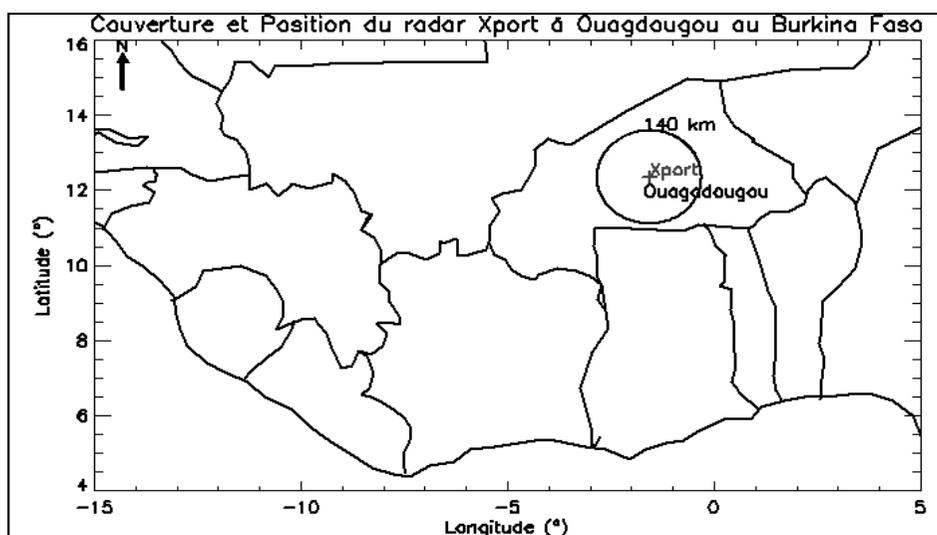


Figure 1 : Zone d'étude. Le signe + indique la position du radar Xport et le cercle sa zone de couverture

II-2. Présentation du problème

Théoriquement, la phase différentielle le long d'une radiale peut être assimilée à une fonction monotone qui croît avec la distance au radar. La défaillance électronique qui a affecté une partie de la campagne de mesure radar causait en fait un déphasage important entre les polarisations horizontale et verticale. Les investigations menées ont permis d'établir le constat suivant : l'apparition de cette anomalie est circonscrite à l'intérieur des 20 premiers kilomètres et est caractérisée par une augmentation rapide de la phase différentielle jusqu'à plus de 150° suivie immédiatement d'une chute brutale. Après les 20 premiers kilomètres, ϕ_{DP} retrouve une évolution normale. La **Figure 2** illustre cette anomalie pour le 21 Août 2012 à 13h36 et la **Figure 3**, quant à elle, présente un profil de différentes variables polarimétriques issu de la radiale située à l'azimut 322° du champ de la **Figure 2**.

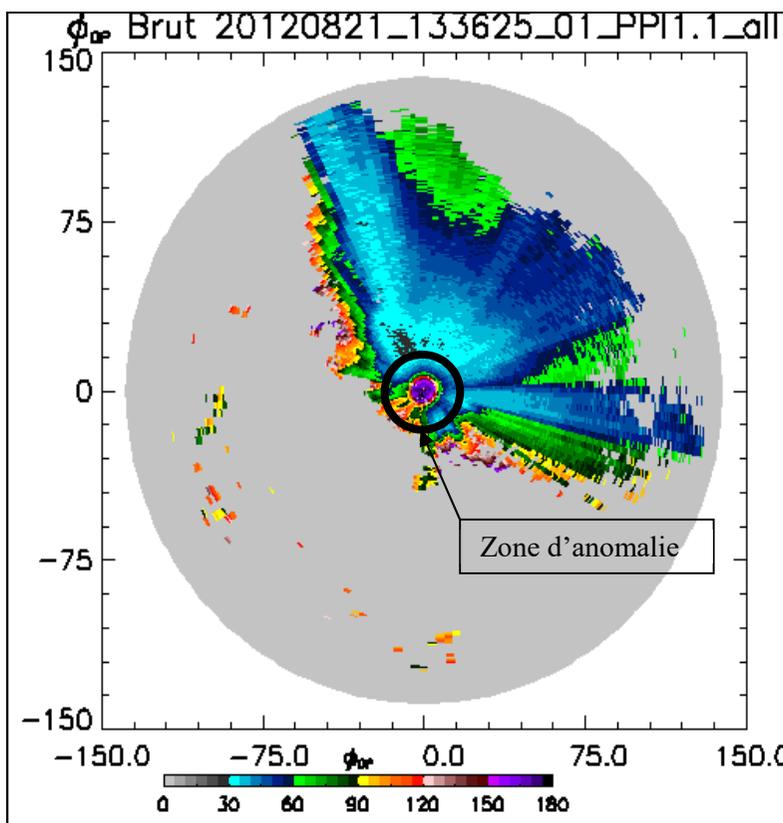


Figure 2 : Exemple d'un champ de la phase différentielle affectée. Les axes représentent la distance au radar en km. Le cercle noir indique la zone d'anomalie

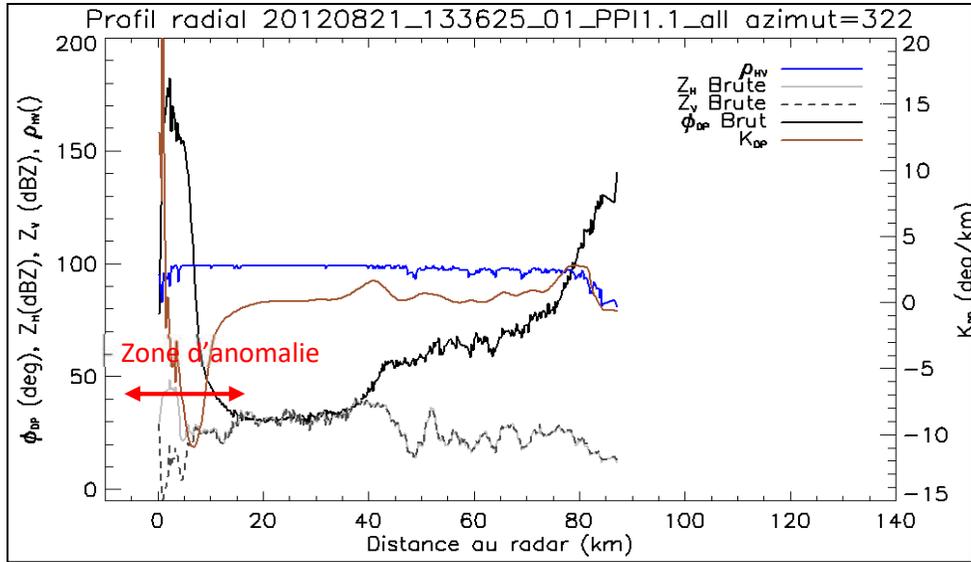


Figure 3 : Exemple de profils de ϕ_{DP} brute, Z_H brute, Z_V brute et ρ_{HV} en présence d'anomalie correspondant à la radiale d'azimut 322° du champ de la Figure 2

Le profil de ϕ_{DP} (courbe en noir) illustre bien l'anomalie décrite plus haut. C'est le circuit de la polarisation verticale qui avait été affecté de telle sorte que sur le profil de Z_V , on constate un écart important avec celui de Z_H jusqu'à environ 10 km avant de reprendre son allure normale. En réalité, Z_V et Z_H devraient être très proches. Les valeurs du coefficient de corrélation radar ($\rho_{HV} > 80$) sur le domaine affecté indiquent que nous nous situons dans une zone de précipitation. Cette anomalie introduit d'importantes valeurs négatives (jusqu'à -11 deg/km) et positives (jusqu'à 20 deg/km) de K_{DP} (courbe marron) dans la zone d'anomalie. La réflectivité Z_H n'ayant pas été affectée, nous allons bâtir notre méthodologie de reconstitution de ϕ_{DP} sur cette variable.

II-3. Technique de reconstitution proposée

La solution qui est proposée dans cette étude est basée sur la méthode "ZPHI" de [18] qui est un algorithme "profileur de pluie". Cette méthode "profileur" consiste à exploiter "l'auto-cohérence" ou "self-consistency" entre les variables radar le long de la radiale. A partir du profil de réflectivité radar mesurée ($Z_{Hm}(r)$) et de la variation de la phase différentielle de r_0 à r_L ($\Delta\phi_{DP}$), "ZPHI" estime l'atténuation spécifique A_H à chaque porte ou pixel radar le long de la radiale entre r_0 et r_L . Par la suite, du profil d'atténuation spécifique obtenu, l'on peut aisément reconstituer le profil de la phase différentielle. La

phase différentielle mesurée étant une variable bruitée, un filtre moyen y est appliqué pour générer une phase différentielle filtrée (sans bruit) : $\phi_{DP}^{filtrée}$, et une première estimation du saut de phase différentielle spécifique (K_{DP}) en est ensuite dérivée. En nous appuyant sur la relation entre l'atténuation spécifique (A_H) et le saut de phase différentielle spécifique (K_{DP}) initialement mise en évidence par [17], un premier profil de l'atténuation spécifique est déduit suivant la relation :

$$A_H[r] = \alpha_h * K_{DP}[r] \tag{1}$$

Dans cette **Équation**, α_h est le coefficient de correction. Sa valeur a été déterminée expérimentalement et vaut 0.31 pour notre zone d'étude. En faisant la même hypothèse que [28] et reprise par [18] qui stipule que l'atténuation spécifique suit une loi puissance de la réflectivité intrinsèque (ou non atténuée) (*cf. Équation 2*), l'on estime, par inversion, un profil de réflectivité corrigée.

$$A_H[r] = \gamma(Z_H[r])^\beta \tag{2}$$

Par la suite, en faisant la différence $Z_H - Z_{Hm}$ entre la réflectivité horizontale corrigée et la réflectivité mesurée, on arrive à l'estimation de l'atténuation totale le long de la radiale ($PIA[r]$). Après cette étape, on procède maintenant au repérage de la (première) porte r_L à partir de laquelle l'évolution de la phase différentielle (ϕ_{DP}) redevient normale et satisfaisant à la condition décrite à **l'Équation 3**. On recherche prioritairement r_L entre 21 km et 25 km, sinon on revient rechercher r_L dans les portes avant 21 km.

$$\{PIA[r_L] > 0 \text{ et } K_{DP}[r_L] > 0.05 \text{ }^\circ/\text{km} \} \tag{3}$$

Lorsque la porte r_L a été correctement identifiée, l'étape suivante va consister à déterminer le profil de l'atténuation spécifique entre le début de la radiale r_0 et r_L à l'aide de l'expression de $A_H(r)$ telle qu'exprimée dans "ZPHI" (*cf. Équation 4*).

$$A_H[r] = \frac{(Z_{Hm}[r])^\beta * (10^{0.1 * \beta * PIA[r_L] - 1})}{I(r_0, r_L) + I(r, r_L) * (10^{0.1 * \beta * PIA[r_L] - 1})} \tag{4}$$

avec, $PIA[r_L] = \alpha_h * \Delta\phi_{DP}[r_L]$, $I[r_0, r_L] = 0.46 * \beta * \int_{r_0}^{r_L} (Z_{Hm}[s])^\beta ds$, et $I[r_0, r_L] = 0.46 * \beta * \int_{r_0}^{r_L} (Z_{Hm}[s])^\beta ds$

Enfin, une fois le profil de l'atténuation spécifique entre le début de la radiale r_0 et r_L obtenu, par intégration le long de la section à reconstituer de A_H , nous obtenons le profil de la phase différentielle selon la **Formule**

$$\phi_{DP}^{reconstruit}[r] = 2 \int_{r_0}^r \frac{A_H[s]}{\alpha_h} ds \quad (5)$$

Le diagramme de principe est présenté à la **Figure 4** ci-dessous.

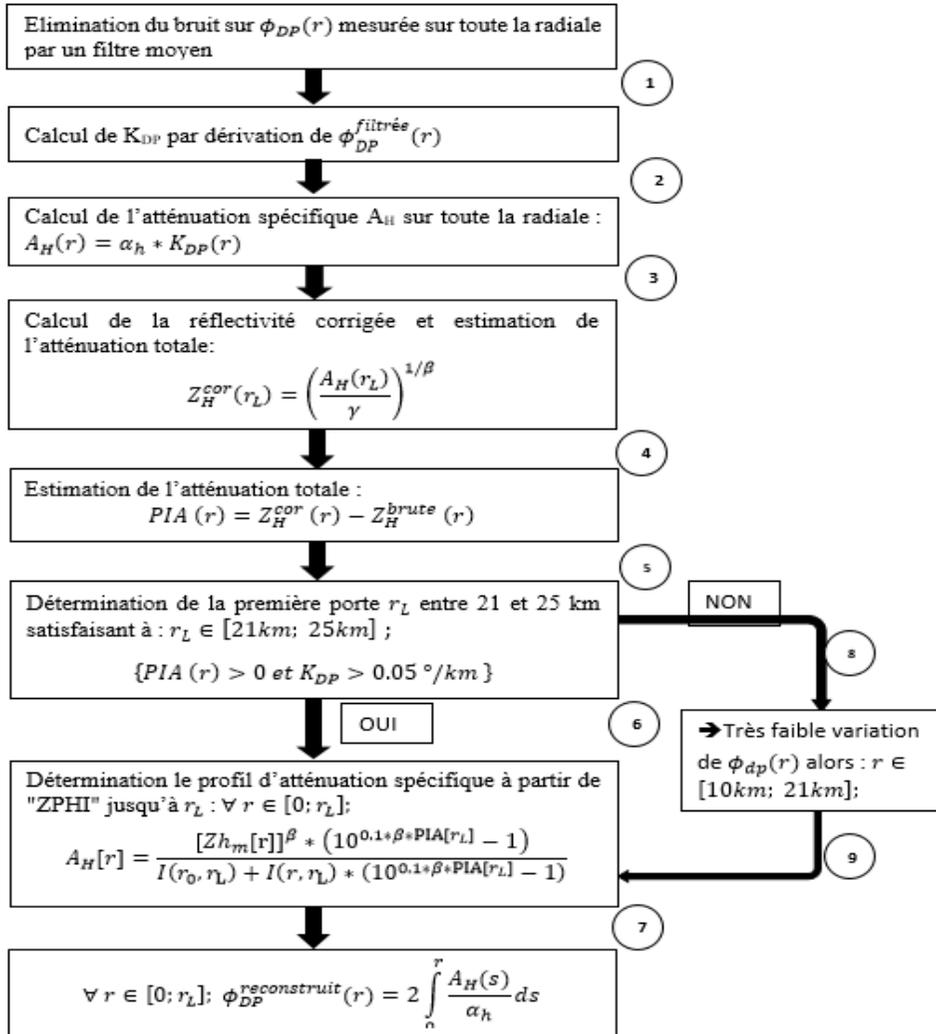


Figure 4 : Diagramme de principe de la technique de reconstruction de ϕ_{DP}

II-4. Évaluation de la reconstitution de ϕ_{DP}

Pour évaluer la reconstitution de la phase différentielle, nous nous sommes basés sur une comparaison par "auto-cohérence" comme dans [12, 29]. En effet, le saut de phase différentielle spécifique et la réflectivité horizontale intrinsèque (corrigée de l'atténuation) sont liés par une relation qui peut être modélisée par une loi puissance du type :

$$K_{DP} = a(10^{0.1*Z_H})^\beta \tag{6}$$

Ainsi, le nuage de points (K_{DP} , Z_H) doit suivre l'allure de la courbe définie par l'Équation 6 qui peut être obtenue par régression linéaire des variables radar simulées à partir de mesure de distribution granulométrique des gouttes de pluies. Pour plus d'informations sur la simulation des variables radars, le lecteur pourra se référer aux travaux de [30]. La réflectivité corrigée est obtenue à travers la Relation (7) et le saut de phase différentielle spécifique est dérivé de la phase différentielle reconstituée par rapport à la distance.

$$Z_H[r] = Z_{H_m}[r] + \alpha_H * \phi_{DP}[r] \tag{7}$$

III - RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les coefficients a , γ , β ont été prédéterminés par simulation et valent respectivement $9.6.10^{-4}$, $3.0.10^{-3}$ et 0.71 . α_h a été obtenu directement à partir des données radar pour notre zone d'étude et vaut 0.31 . Les Figure 5 et Figure 6 montrent le résultat de l'application de la technique de reconstitution de la phase différentielle avec prise en compte de l'offset électronique pour le nouveau profil de ϕ_{DP} . Sur la Figure 5, la phase reconstituée apparaît déjà lissée et l'on peut s'apercevoir de la bonne cohérence de l'évolution de la phase après reconstitution. Cette cohérence est perceptible sur le champ ϕ_{DP} filtré présenté à la Figure 6 (droite) qui apparaît sans l'anomalie au centre.

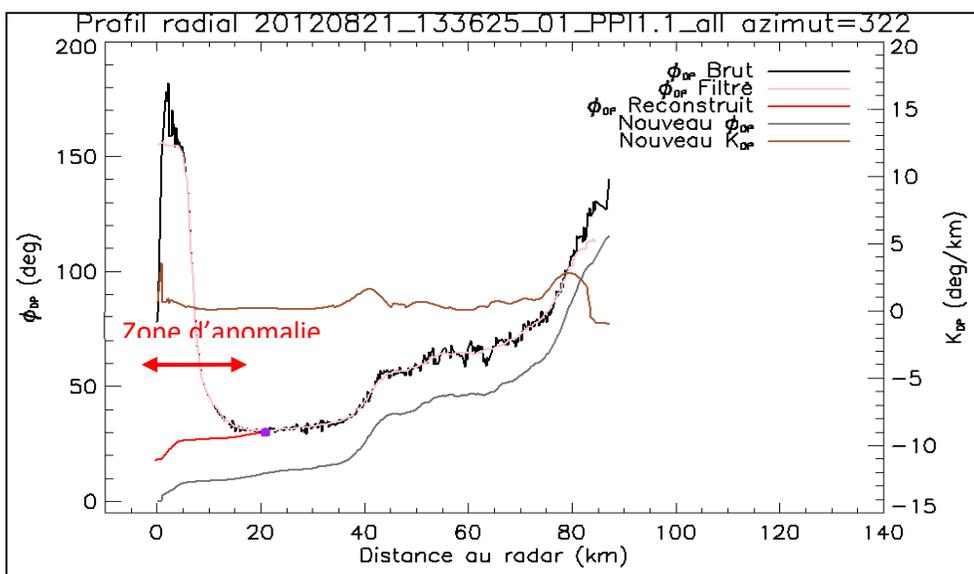


Figure 5 : Exemple de reconstitution d'un profil de ϕ_{DP} . (r_L = rond violet)

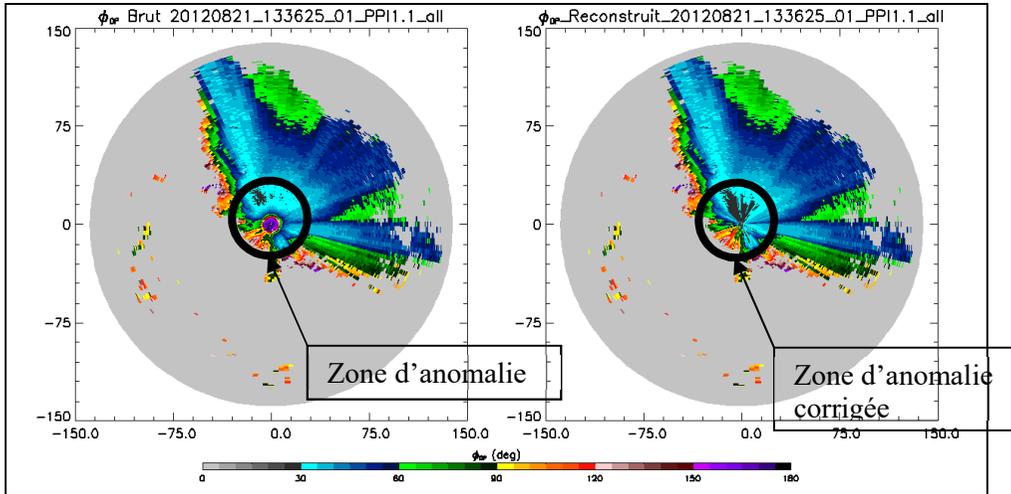


Figure 6 : Champ de ϕ_{DP} reconstitué. Champ de ϕ_{DP} mesurée (gauche) et champ de ϕ_{DP} pour $\rho_{HV} > 80$ avec zone reconstituée (droite)

L'analyse de la cohérence entre la réflectivité horizontale et le saut de phase différentielle spécifique est présentée à la **Figure 7**. Seuls les pixels radar situés entre 0 et r_L sur toutes les 360 radiales ont été considérés pour cette évaluation. Sur cette figure, on observe qu'avant le traitement de la donnée radar, le nuage K_{DP-Z_H} (points noirs) présente une dispersion importante avec des valeurs négatives comme soulignées plus haut. Le nuage ne présente pas véritablement d'allure comparative à la théorie comme le démontre le faible coefficient de corrélation de Spearman ($\rho_s = 0.27$ et généralement compris entre 0.09 et 0.48). Ce qui dénote de l'absence de relation (non linéaire) entre ces deux variables avant correction de l'anomalie. Lorsque la phase différentielle est reconstituée, cela améliore considérablement le nuage K_{DP-Z_H} (points gris) qui, cette fois, suit l'allure théorique indiquée par la courbe bleue et le fort coefficient de corrélation de Spearman vaut $\rho_s = 0.96$ (et généralement compris entre 0.75 et 0.99) et qui est significatif (P-value = 0.0). Ce résultat démontre la validité du critère mis en place pour la détermination de la porte r_L ainsi qu'une cohérence physique entre les deux variables et du processus de reconstitution. Cette comparaison a été également utilisé par [31] pour évaluer l'amélioration de leur nouvelle estimation de K_{DP} . L'auto-cohérence rend également compte de la justesse de la correction d'atténuation au niveau de la réflectivité comme l'ont indiqué [32] et repris dans [29, 33].

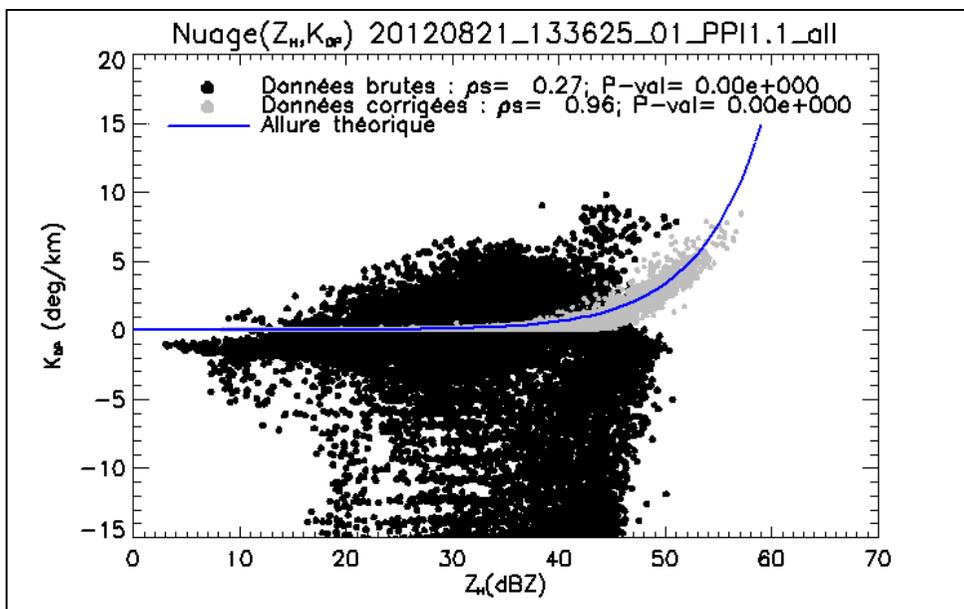


Figure 7 : Nuage de points K_{DP} - Z_H avant (points noir) et après (points gris) reconstitution de ϕ_{DP} et correction d'atténuation sur la réflectivité. La courbe théorique est en bleu

IV - CONCLUSION

Le processus de reconstitution de la phase différentielle, lorsque celle-ci présente une anomalie, a été décrit. La méthode a été appliquée à des données réelles issues d'une campagne de mesure au Burkina Faso en 2012. L'analyse de l'auto-cohérence après reconstitution et l'exploitation de la phase différentielle reconstituée aussi bien pour la correction d'atténuation de la réflectivité que pour la dérivation du saut de phase différentielle spécifique a montré la validité physique de la reconstitution. En effet, le nuage de points entre K_{DP} - Z_H suit bien le modèle théorique avec un coefficient de corrélation de Spearman de 0.96 qui est significatif. Ainsi, il est possible de reconstituer la phase différentielle lorsque cette dernière présente des anomalies sur une partie de son profil à partir du profil de réflectivité mesurée et de la phase différentielle corrompue. Le saut de phase différentielle spécifique qui est une variable importante peut alors être exploité à d'autres fins, vue l'importance qu'il revêt en hydrométéorologie.

REMERCIEMENTS

Les auteurs de cette publication remercient l'équipe française de la validation sol de Megha-Tropiques, particulièrement la responsable Marielle GOSSET et Frédéric CAZENAVE pour les données radar utilisées dans cette étude.

RÉFÉRENCES

- [1] - P. TABARY, B. FRADON, A.-A. BOUMAHMOUD, *La Météorologie*, 8 (2013) 59
- [2] - H. SAUVAGEOT, *La Météorologie*, 8 (2000) 25
- [3] - M. KUMJIAN, *J. Oper. Meteorol.*, 1 (2013) 226 - 242
- [4] - D. A. MAHMOOD, AL-MUSTANSIRIYAH, *J. Sci.*, 28 (2017) 1 - 6
- [5] - T. A. SELIGA, V. N. BRINGI, *J. Appl. Meteorol.*, 15 (1976) 69 - 76
- [6] - M. N. ANAGNOSTOU, J. KALOGIROS, E. N. ANAGNOSTOU, M. TAROLLI, A. PAPADOPOULOS, M. BORGA, *J. Hydrol.*, 394 (2010) 4 - 16
- [7] - E. N. ANAGNOSTOU, M. N. ANAGNOSTOU, W. F. KRAJEWSKI, A. KRUGER, B. J. MIRIOVSKY, *J. Hydrometeorol.*, 5 (2004) 110 - 128
- [8] - M. N. ANAGNOSTOU, E. N. ANAGNOSTOU, G. VULPIANI, M. MONTOPOLI, F. S. MARZANO, J. VIVEKANANDAN, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 46 (2008) 3067 - 3075
- [9] - M. N. ANAGNOSTOU, J. KALOGIROS, F. S. MARZANO, E. N. ANAGNOSTOU, M. MONTOPOLI, E. PICCIOTI, *J. Hydrometeorol.*, 14 (2013) 560 - 576
- [10] - S. Y. MATROSOV, *J. Atmospheric Ocean. Technol.*, 27 (2010) 122 - 134
- [11] - S. Y. MATROSOV, K. A. CLARK, B. E. MARTNER, A. TOKAY, *J. Appl. Meteor.*, 41 (2002) 941 - 952
- [12] - G. WEN, H. CHEN, G. ZHANG, *J. Sun, Remote Sens.*, 10 (2018) 1179
- [13] - M. THURAI, K. V. MISHRA, V. N. BRINGI, W. F. KRAJEWSKI, *J. Hydrometeorol.*, 18 (2017) 1081 - 1100
- [14] - E. J. THOMPSON, S. A. RUTLEDGE, B. DOLAN, M. THURAI, V. CHANDRASEKAR, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 57 (2018) 755 - 775
- [15] - A. K. KOFFI, M. GOSSET, E.-P. ZAHIRI, A. D. OCHOU, M. KACOU, F. CAZENAVE, P. ASSAMOI, *Atmospheric Res.*, 143 (2014) 438 - 461
- [16] - F. CAZENAVE, M. GOSSET, M. KACOU, M. ALCOBA, E. FONTAINE, C. DUROURE, B. DOLAN, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 55 (2016) 231 - 249
- [17] - V. N. BRINGI, V. CHANDRASEKAR, N. BALAKRISHNAN, D. S. ZRNIC, *J. Atmospheric Ocean. Technol.*, 7 (1990) 829 - 840
- [18] - J. TESTUD, E. LE BOUAR, E. OBLIGIS, M. ALI-MEHENNI, *J. Atmospheric Ocean. Technol.*, 17 (2000) 332 - 356
- [19] - L.D. CAREY, S.A. RUTLEDGE, D.A. AHJEVYCH, T. D. KEENAN, *J. Appl. Meteorol.*, 39 (2000) 1405 - 1433
- [20] - Y.-A. OH, D. LEE, S.-H. JUNG, K.-Y. NAM, G. LEE, *Adv. Meteorol.*, 2016 (2016) 1 - 20

- [21] - S. E. GIANGRANDE, R. MCGRAW, L. LEI, *J. Atmospheric Ocean. Technol.*, 30 (2013) 1716 - 1729
- [22] - Z. SHI, H. CHEN, V. CHANDRASEKAR, J. HE, *Atmosphere*, 9 (2017) 4
- [23] - A. RYZHKOV, D. ZRNIC, *J. Appl. Meteorol.*, 35 (1996) 2080 - 2090
- [24] - S. Y. MATROSOV, D. E. KINGSMILL, B. E. MARTNER, F. M. RALPH, *J. Hydrometeorol.*, 6 (2005) 248 - 262
- [25] - S. Y. MATROSOV, R. CIFELLI, P. C. KENNEDY, S. W. NESBITT, S. A. RUTLEDGE, V. N. BRINGI, B. E. MARTNER, *J. Atmospheric Ocean. Technol.*, 23 (2006) 952 - 963
- [26] - R. ROÇA, H. BROGNIEZ, P. CHAMBON, O. CHOMETTE, S. CLOCHÉ, M. E. GOSSET, J.-F. MAHFOUF, P. RABERANTO, N. VILTARD, *Front. Earth Sci.*, 3 (2015)
- [27] - E. SALTIKOFF, M. KURRI, H. LEIJNSE, S. BARBOSA, K. STIANSEN, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 98 (2017) 1833 - 1840
- [28] - M. MARZOUG, P. AMAYENC, *J. Atmospheric Ocean. Technol.*, 11 (1994) 1480 - 1506
- [29] - S. LIM, V. CHANDRASEKAR, P. LEE, A. P. JAYASUMANA, *J. Atmospheric Ocean. Technol.*, 28 (2011) 197 - 209
- [30] - M. GOSSET, E.-P. ZAHIRI, S. MOUMOUNI, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 136 (2010) 243 - 256
- [31] - Y. WANG, V. CHANDRASEKAR, *J. Atmospheric Ocean. Technol.*, 26 (2009) 2565 - 2578
- [32] - V. N. BRINGI, V. CHANDRASEKAR, *Polarimetric Doppler Weather Radar : Principles and Applications*, Cambridge University Press, (2001)
- [33] - V. N. BRINGI, M. THURAI, K. NAKAGAWA, G. J. HUANG, T. KOBAYASHI, A. ADACHI, H. HANADO, S. SEKIZAWA, *J. Meteorol. Soc. Jpn. Ser II*, 84 (2006) 705 - 724