

Vers une assimilation des observations radar polarimétriques dans le modèle à échelle convective AROME

Guillaume THOMAS

Jean-François Mahfouf, Thibaut Montmerle



- 1 Contexte
 - Le modèle AROME-France
 - Les variables polarimétriques
- 2 Étude du potentiel des données polarimétriques pour l'assimilation
 - Étude de cas
 - Statistiques d'innovation
 - Jacobiens et sensibilité des variables DPOL
- 3 Conclusion

Le modèle AROME-France

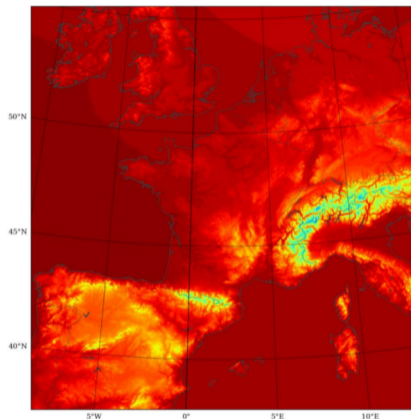


Figure – Pression de surface sur le domaine AROME-France

- Résolution horizontale : 1.3km
- 90 niveaux verticaux
- Physique non-hydrostatique et représentation explicite de la convection profonde
- Conditions aux limites : modèle global ARPEGE
- Assimilation de données : 3D-Var incrémental
- Parmi les variables pronostiques : q_v , q_r , q_s , q_i , q_g (non analysées)

Les variables polarimétriques

- Réflectivité horizontale Z_{HH} (verticale Z_{VV})
 - Dépendance à la section efficace des hydrométéores
- Réflectivité différentielle $Z_{DR} = 10\log\left(\frac{Z_{HH}}{Z_{VV}}\right)$
 - Dépendance au rapport d'axe des hydrométéores
- Coefficient de corrélation $\rho_{HV} = \text{Corr}(S_{HH}, S_{VV})$
 - Dépendance à l'homogénéité du milieu observé (forme, phase, taille et orientation des hydrométéores)
- Phase différentielle spécifique K_{DP} : différence de phase entre H et V
 - Dépendance à la quantité de matière traversée par les ondes polarisées horizontalement et verticalement

Les variables polarimétriques

- Réflectivité horizontale Z_{HH} (verticale Z_{VV})
 - Dépendance à la section efficace des hydrométéores
 - Assimilé opérationnellement dans AROME-France (1D-Bayésien (RH) → 3D-Var)
- Réflectivité différentielle $Z_{DR} = 10\log\left(\frac{Z_{HH}}{Z_{VV}}\right)$
 - Dépendance au rapport d'axe des hydrométéores
- Coefficient de corrélation $\rho_{HV} = \text{Corr}(S_{HH}, S_{VV})$
 - Dépendance à l'homogénéité du milieu observé (forme, phase, taille et orientation des hydrométéores)
- Phase différentielle spécifique K_{DP} : différence de phase entre H et V
 - Dépendance à la quantité de matière traversée par les ondes polarisées horizontalement et verticalement

Les variables polarimétriques

- Réflectivité horizontale Z_{HH} (verticale Z_{VV})
 - Dépendance à la section efficace des hydrométéores
 - Assimilé opérationnellement dans AROME-France (1D-Bayésien (RH) → 3D-Var)
- Réflectivité différentielle $Z_{DR} = 10\log\left(\frac{Z_{HH}}{Z_{VV}}\right)$
 - Dépendance au rapport d'axe des hydrométéores

Pas d'initialisation des contenus en hydrométéore

- Dépendance à l'homogénéité du milieu observé (forme, phase, taille et orientation des hydrométéores)
- Phase différentielle spécifique K_{DP} : différence de phase entre H et V
 - Dépendance à la quantité de matière traversée par les ondes polarisées horizontalement et verticalement

Les étapes vers une assimilation des variables DPOL

Expérimenter l'initialisation des contenus en hydrométéores d'AROME-France grâce à l'assimilation variationnelle de données radar polarimétriques

– La fonction coût :

$$J(x) = \frac{1}{2}(x - x_b)^T \mathbf{B}^{-1}(x - x_b) + \frac{1}{2}(y - \mathcal{H}(x))^T \mathbf{R}^{-1}(y - \mathcal{H}(x))$$

Modèle

x = vecteur d'état

x_b = ébauche du modèle

\mathbf{B} = matrice de covariance des erreurs d'ébauche

Observations

y = observations

$\mathcal{H}(x)$ = opérateur d'observation non linéaire

\mathbf{R} = matrice de covariance des erreurs d'observation

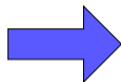
Les étapes vers une assimilation des variables DPOL

Expérimenter l'initialisation des contenus en hydrométéores d'AROME-France grâce à l'assimilation variationnelle de données radar polarimétriques

- Simulation des variables polarimétriques :
 - Nécessite un opérateur d'observation
 - Capacité de l'opérateur d'observation à simuler les variables observées
- Assimilation directe des variables polarimétriques dans un cadre 1D-Var
 - Nécessite une version linéarisée de l'opérateur d'observation
 - Étude des sensibilités des variables polarimétriques simulées aux contenus en hydrométéores

L'opérateur d'observation

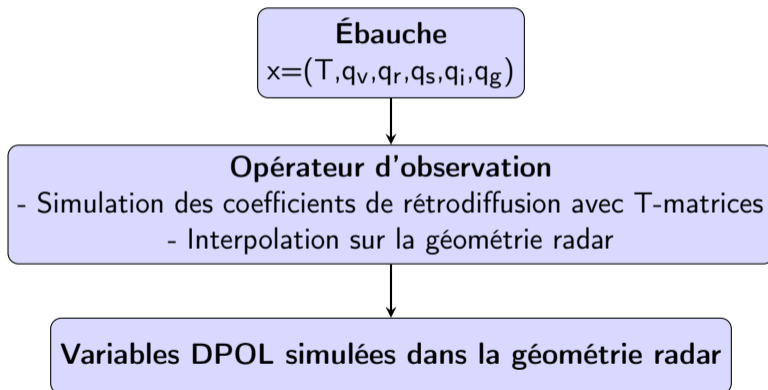
- Littérature : Jung *et al.* (2008,a), Ryzhkov *et al.* (2011), Augros *et al.* (2015), Kawabata *et al.* (2018)



Méthode des T-matrices

- T-matrices : permet de simuler la diffusion par des particules non-sphériques (Waterman (1965)).
- Simulation des coefficients de rétrodiffusion nécessite :
 - Fréquence
 - Caractérisation des hydrométéores (rapport d'aspect, distribution, constante diélectrique, plage de diamètres et de températures)

L'opérateur d'observation



Filtrage des observations

Pour éliminer les échos non-météorologiques et le bruit des images radar brutes, 4 filtres sont appliqués :

- Filtrage par type d'écho (Al-Sakka *et al.*, 2013) :
 - Distinction entre échos non-météorologiques et échos météorologiques
 - Détection du type d'hydrométéore majoritaire parmi les échos météorologiques
- Suppression des échos non-météorologiques résiduels ($\rho_{HV} < 0.85$)
- Suppression des mesures présentant de faibles valeurs de SNR :
 - Variables polarimétriques sensibles au bruit (Gourley *et al.*, 2006)
 - Suppression des variables polarimétriques associées avec un valeur de SNR $< 15\text{dB}$
- Utilisation d'un filtre médian pour diminuer le bruit

Filtrage des observations

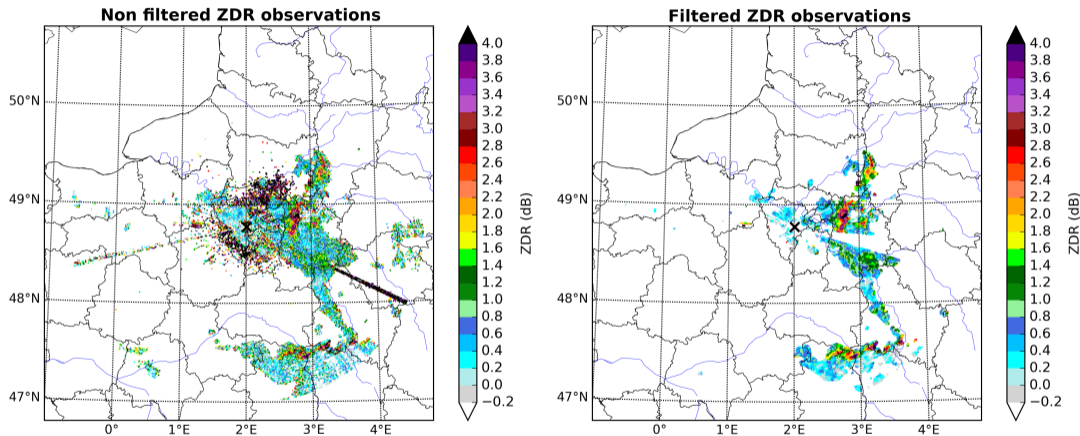


Figure – (Gauche) Z_{DR} observé non filtré ; (droite) Z_{DR} observé filtré pour un cas convectif le 06 Juin 2018 (radar de Trappes, angle d'élévation : 0.4°)

Simulation du cas méditerranéen du 10 Octobre 2018

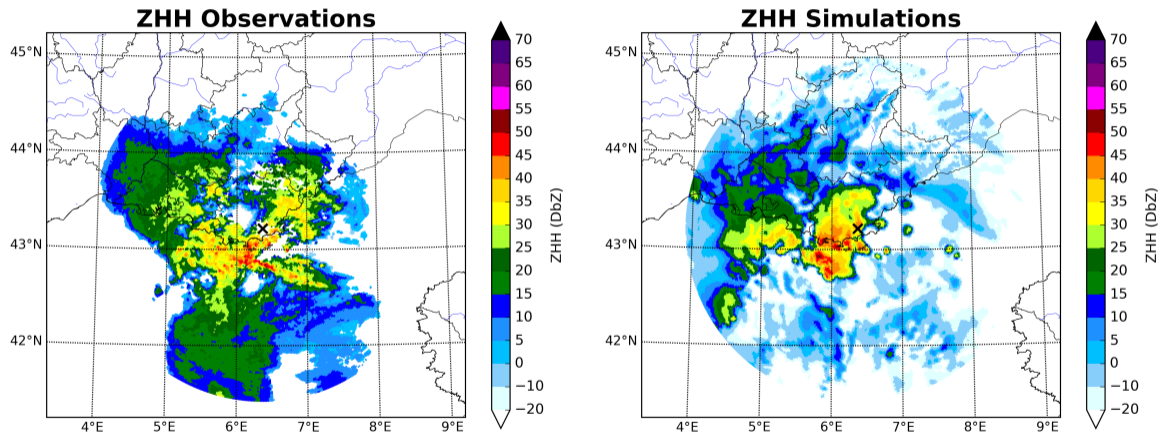


Figure – **(Gauche)** Réflectivité horizontale observée et **(droite)** simulée avec le radar de Collobrières (angle d'élévation : 2.2°)

Simulation du cas méditerranéen du 10 Octobre 2018

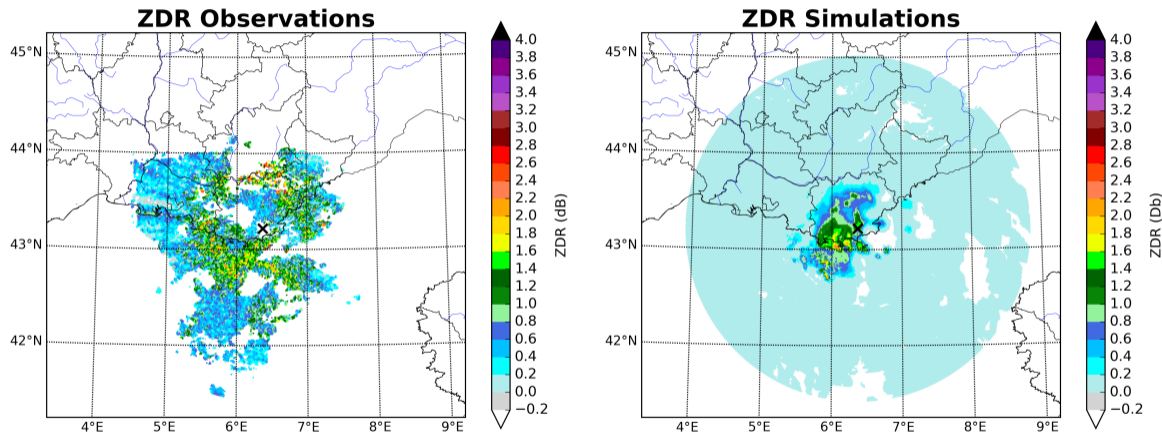


Figure – (Gauche) Réflectivité différentielle observée et (droite) simulée avec le radar de Collobrières (angle d'élévation : 2.2°)

Simulation du cas méditerranéen du 10 Octobre 2018

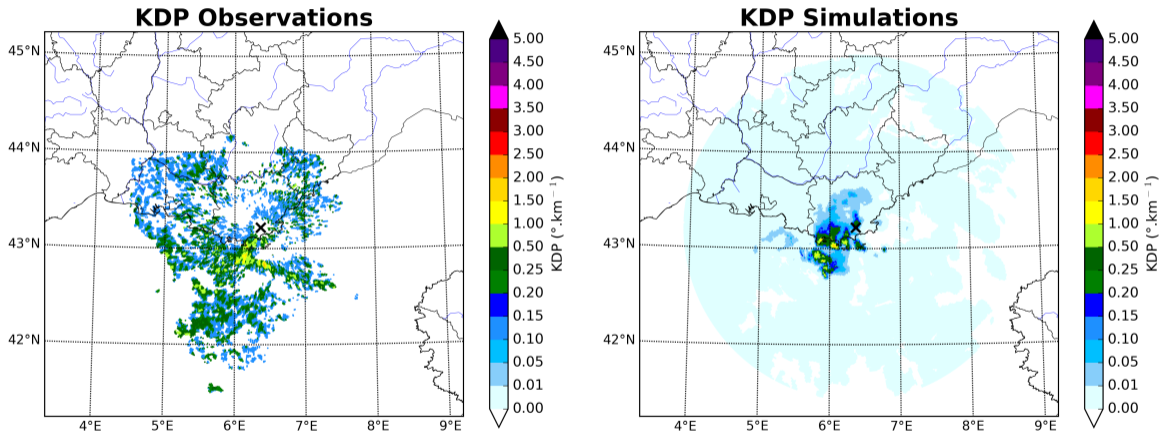


Figure – **(Gauche)** Phase différentielle spécifique observée et **(droite)** simulée avec le radar de Collobrières (angle d'élévation : 2.2°)

Simulation du cas méditerranéen du 10 Octobre 2018

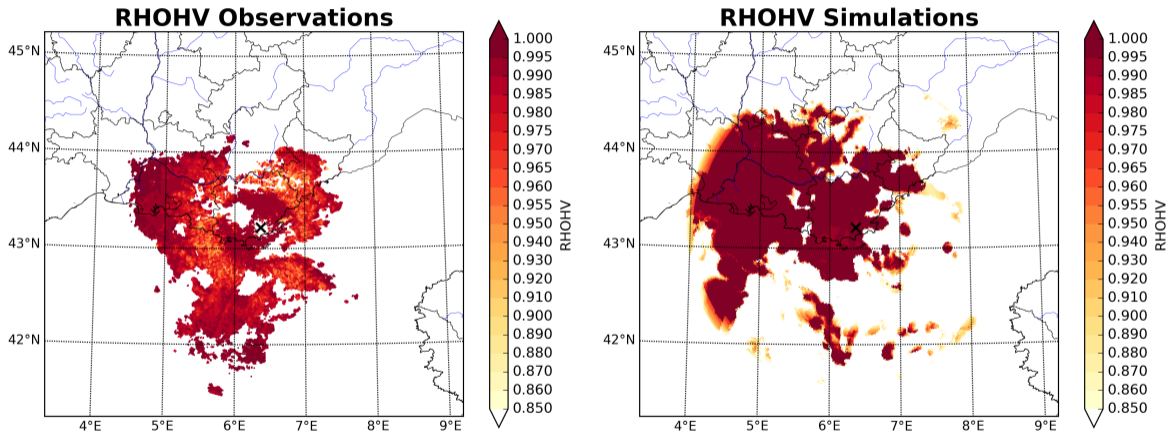


Figure – (Gauche) Coefficient de corrélation observé et (droite) simulé avec le radar de Collobrières (angle d'élévation : 2.2°)

Simulation des variables polarimétriques : premier bilan

- L'opérateur d'observation semble être capable de représenter les plages de valeurs de Z_{HH} observées.
- La simulation des autres variables semble réaliste dans la pluie mais plus compliquée pour les hydrométéores glacés.

Des résultats similaires ont été trouvés par Jung *et al.* (2008,a) ainsi que par Augros *et al.* (2015)

Étude des innovations

Rappel de la fonction coût

$$J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_b)^T \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_b) + \frac{1}{2}(\mathbf{y} - \mathcal{H}(\mathbf{x}))^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y} - \mathcal{H}(\mathbf{x}))$$

Informations sur les innovations

- Innovations = Observations - Équivalents modèle
- Utilisation de 12 cas météorologiques :
 - 8 cas convectifs
 - 4 cas stratiformes

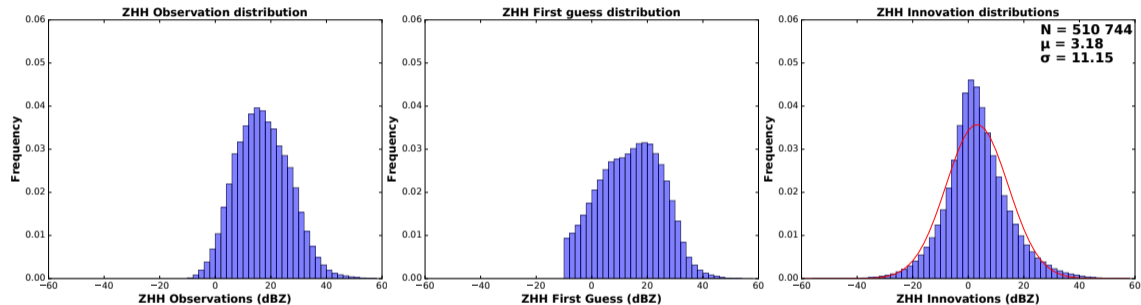
Innovations de la réflectivité horizontale Z_{HH} 

Figure – **Gauche** : distribution des Z_{HH} observées ; **milieu** : distribution des Z_{HH} simulées ; **droite** : innovations de Z_{HH} .

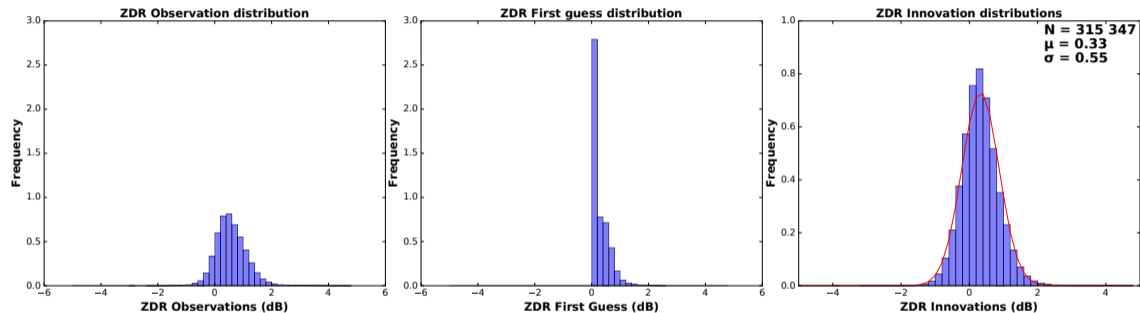
Innovations de la réflectivité différentielle Z_{DR} 

Figure – Gauche : distribution des Z_{DR} observées ; milieu : distribution des Z_{DR} simulées ; droite : innovations de Z_{DR} .

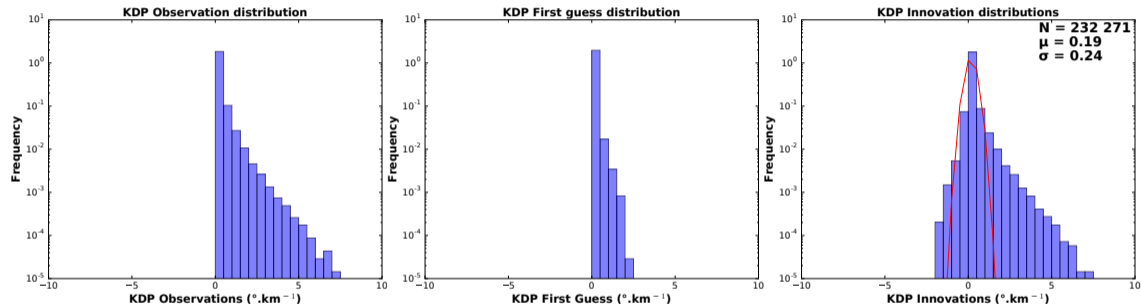
Innovations de la phase différentielle spécifique K_{DP} 

Figure – **Gauche** : distribution des K_{DP} observées; **milieu** : distribution des K_{DP} simulées; **droite** : innovations de K_{DP} .

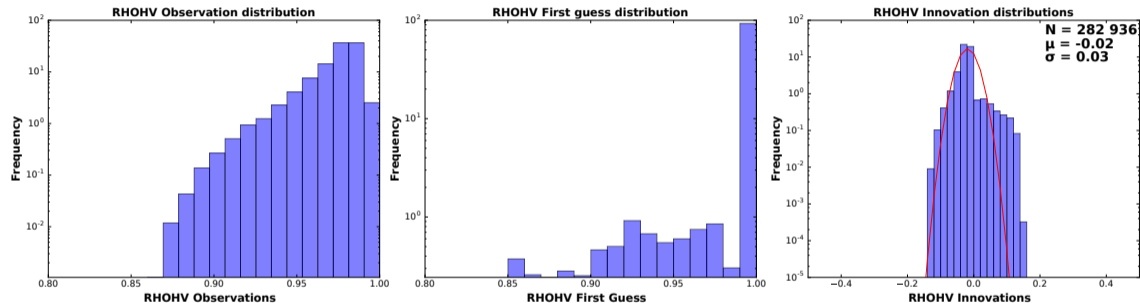
Innovations du coefficient de corrélation ρ_{HV} 

Figure – **Gauche** : distribution des ρ_{HV} observés ; **milieu** : distribution des ρ_{HV} simulés ; **droite** : innovations de ρ_{HV} .

Étude des jacobiens

Gradient de la fonction coût

$$\nabla J(x) = B^{-1}(x - x_b) + H^T R^{-1}(y - \mathcal{H}(x)) = 0$$

Obtention de la version linéarisée de l'opérateur d'observation ($\mathcal{H} \rightarrow \mathbf{H}$) :

- Opérateur d'observation DPOL difficile à linéariser :
 - Nombreuses non-linéarités
 - Présence de seuils
- Détermination de la version linéarisée avec le calcul des Jacobiens

Étude des jacobiens

Détermination des Jacobiens

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial \mathcal{H}_1}{\partial q_1} & \cdots & \frac{\partial \mathcal{H}_1}{\partial q_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \mathcal{H}_1}{\partial q_k} & \cdots & \frac{\partial \mathcal{H}_1}{\partial q_k} \end{pmatrix}$$

Calcul des différences finies

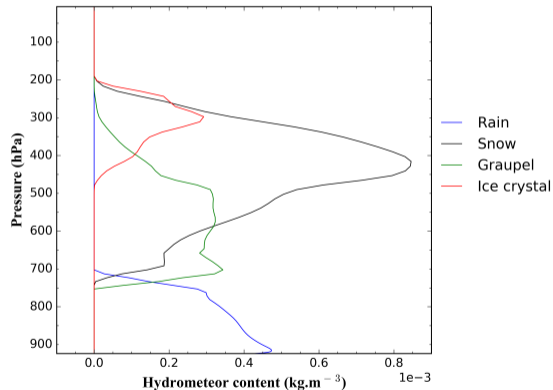
$$\frac{\partial \mathcal{H}_1}{\partial q_1} = \frac{\mathcal{H}_1(q_1 + \partial q_1) - \mathcal{H}_1(q_1)}{\partial q_1}$$

\mathcal{H} : Opérateur d'observation non-linéaire
 q : Vecteur de contrôle

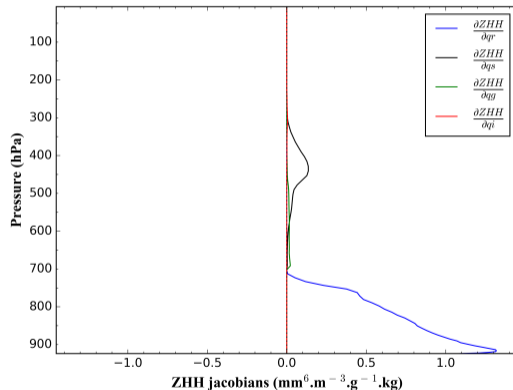
k : Niveaux modèle
 l : Élévations radar

Jacobiens de la réflectivité horizontale Z_{HH}

Hydrometeor profiles

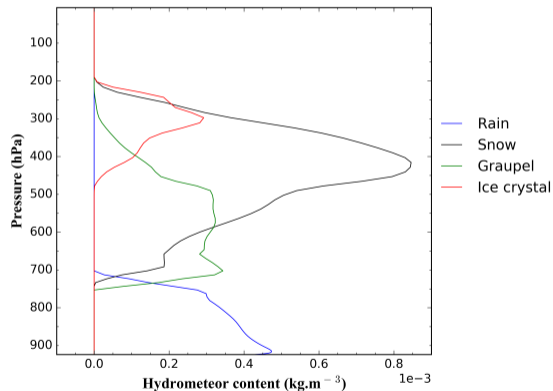


ZHH jacobians

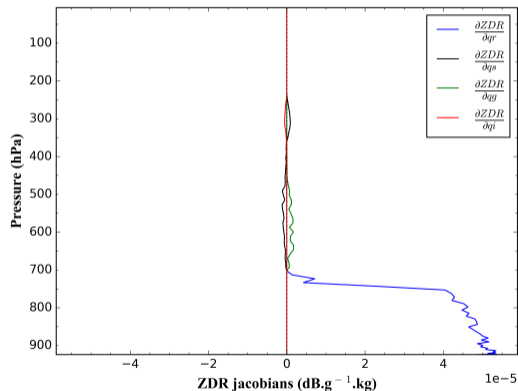


Jacobiens de la réflectivité différentielle Z_{DR}

Hydrometeor profiles



ZDR jacobians



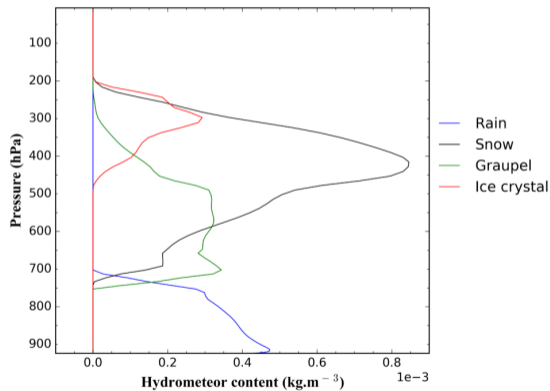
Jacobiens de K_{DP} et ρ_{HV}

Très faible sensibilité de ces deux variables aux contenus en hydrométéores :

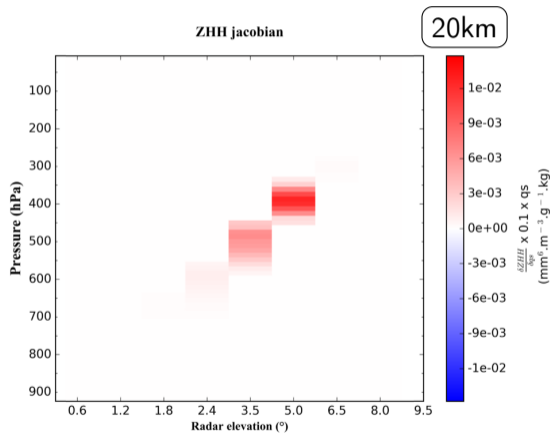
- Phase différentielle spécifique K_{DP} : sensibilités aux contenus en hydrométéores $<$ sensibilités du Z_{DR} aux contenus en hydrométéores
- Coefficient de corrélation ρ_{HV} : sensibilités aux contenus en hydrométéores comprise entre 10^{-7} et $10^{-11} \text{g}^{-1} \cdot \text{kg}$

Jacobiens de la réflectivité horizontale Z_{HH} dans la géométrie radar

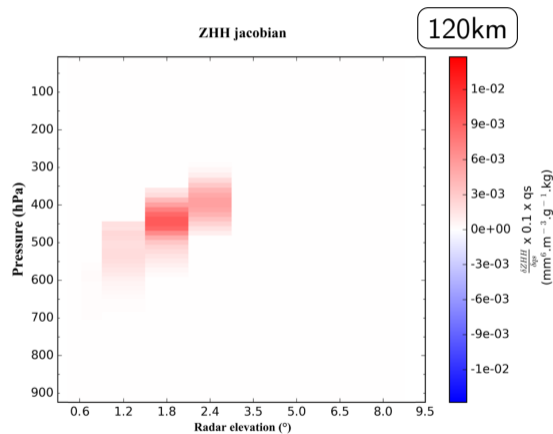
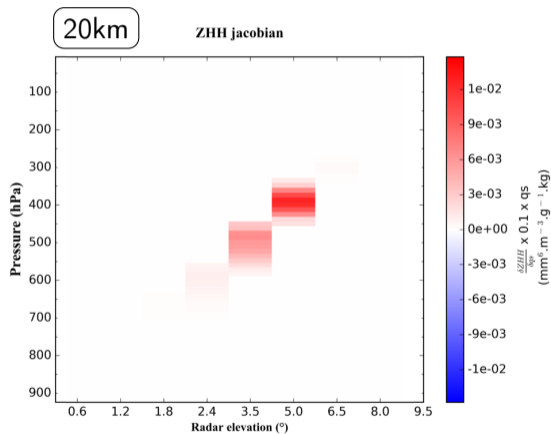
Hydrometeor profiles



ZHH jacobian



Jacobiens et effets de la distance au radar



Conclusion

- Simulation des variables polarimétriques :
 - Plage de valeurs de Z_{HH} simulée semblable à celle de Z_{HH} observée
 - Simulations de Z_{DR} et K_{DP} semblables à celles observées dans les régions de fortes pluies
 - Simulations de ρ_{HV} complexes
- Sensibilité des variables polarimétriques aux contenus en hydrométéores :
 - Sensibilité plus forte des variables polarimétriques aux contenus en pluie (plus forte constante diélectrique)
 - Sensibilité des variables polarimétriques pour un contenu donné :
 $Z_{HH} > Z_{DR} > K_{DP} > \rho_{HV}$

Conclusion

- Simulation des variables polarimétriques :
 - Plage de valeurs de Z_{HH} simulée semblable à celle de Z_{HH} observée
 - Simulations de Z_{DR} et K_{DP} semblables à celles observées dans les régions de fortes pluies
 - Simulations de ρ_{HV} complexes
- Sensibilité des variables polarimétriques aux contenus en hydrométéores :
 - Sensibilité plus forte des variables polarimétriques aux contenus en pluie (plus forte constante diélectrique)
 - Sensibilité des variables polarimétriques pour un contenu donné :
 $Z_{HH} > Z_{DR} > K_{DP} > \rho_{HV}$
- **Complexité des simulations et faibles sensibilités en présence d'hydrométéores glacés :**
 - **Utilisation d'un schéma microphysique à un moment**
 - **Représentation trop simple de la forme des hydrométéores**

Perspectives

- Tester l'assimilation de variables DPOL dans un cadre 1D-EnVar
- Améliorer la spécification des erreurs d'observation
- Faire des tests d'assimilation de variables DPOL dans un cadre 3D-EnVar

Merci pour votre attention !

Schéma de l'inversion bayésienne

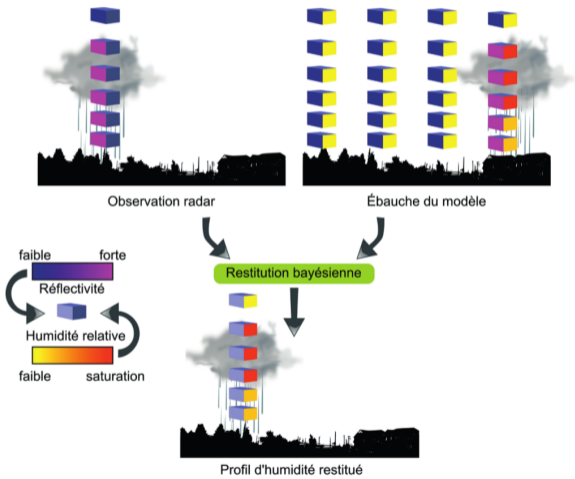


Figure – Source : Mahfouf *et al* (2013)

Contenues en hydrométéores (10/10/2018)

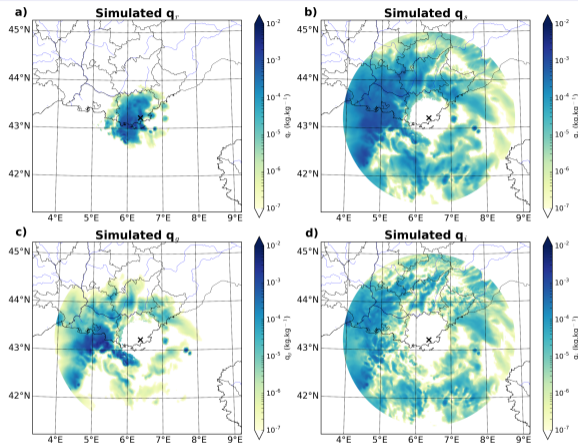
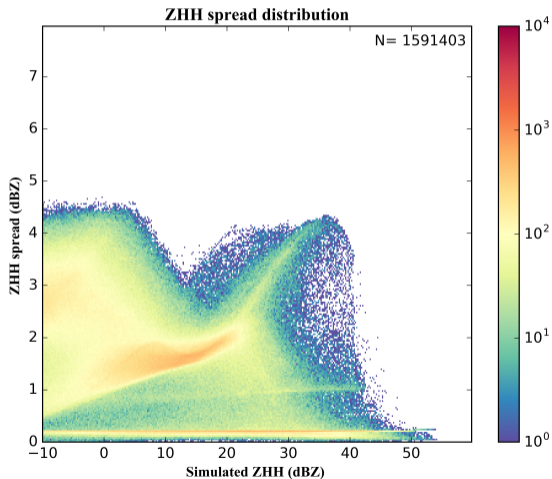


Figure – Rapports de mélange simulés par AROME-France, interpolés sur le faisceau du Collobrières, pour un angle d'élévation de 2.2° (a : Contenu en pluie ; b : contenu en neige, c : contenu en graupel, d : contenu en glace)

Étude de l'impact de modifications de paramètres décrivant les hydrométéores sur la simulation des variables polarimétriques :

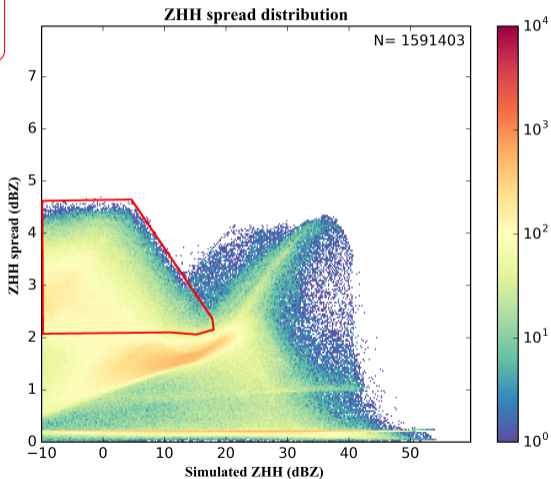
- Paramètres perturbés :
 - Rapport d'aspect (perturbations : $\pm 20\%$)
 - Oscillation (perturbations : Ryzhkov *et al.* (2011))
 - Constante diélectrique (perturbations : $\pm 5\%$)
- 20 cas météorologiques :
 - 14 avec un radar en bande C
 - 6 avec un radar en bande S
- Pour chaque cas météorologique, calcul d'un écart-type pour les valeurs obtenues avec les paramètres perturbés, par profil et par angle d'élévation.

Caractérisation de l'erreur de simulation de Z_{HH} en bande S



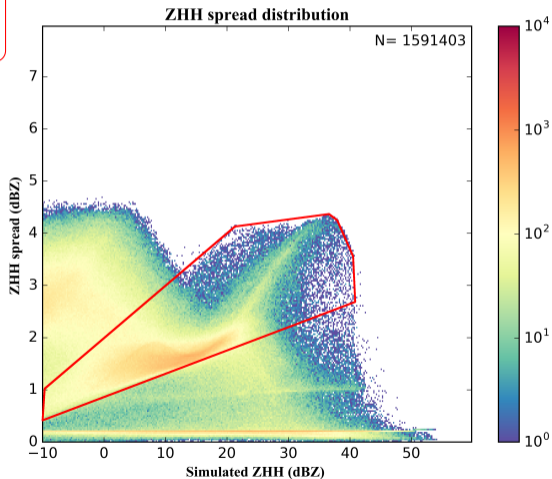
Caractérisation de l'erreur de simulation de Z_{HH} en bande S

Constante diélectrique
de la glace primaire



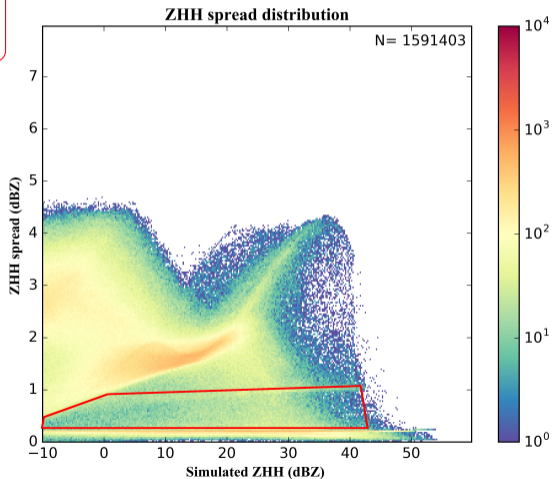
Caractérisation de l'erreur de simulation de Z_{HH} en bande S

Constante diélectrique
de la neige



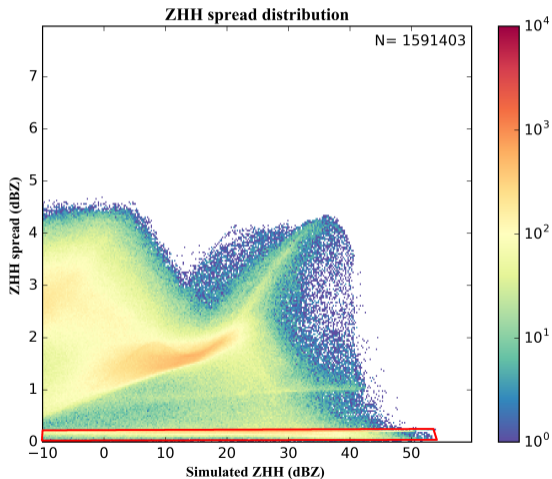
Caractérisation de l'erreur de simulation de Z_{HH} en bande S

Constante diélectrique
du graupel

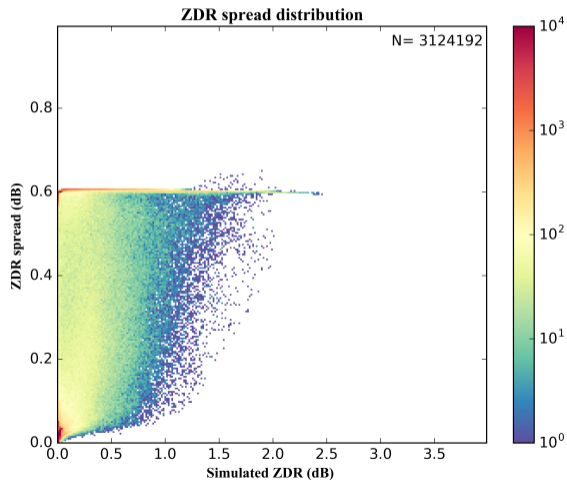


Caractérisation de l'erreur de simulation de Z_{HH} en bande S

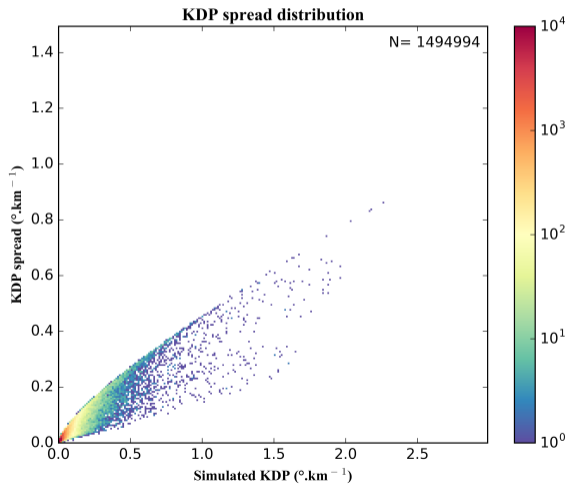
Rapport d'aspect des gouttes de pluie



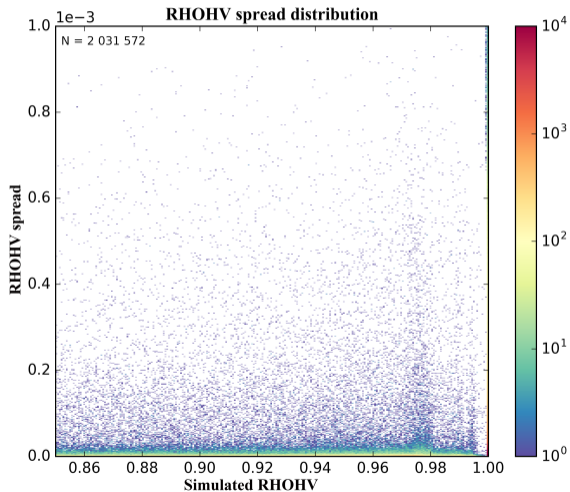
Caractérisation de l'erreur de simulation de Z_{DR} en bande S



Caractérisation de l'erreur de simulation de K_{DP} en bande S

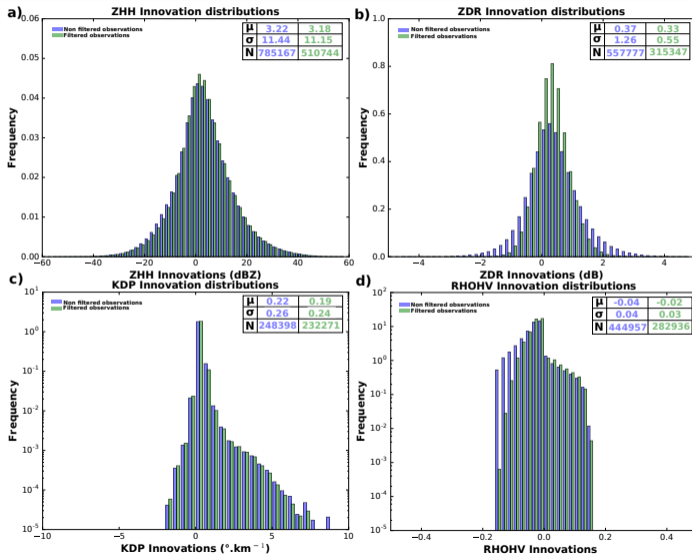


Caractérisation de l'erreur de simulation de ρ_{HV} en bande S

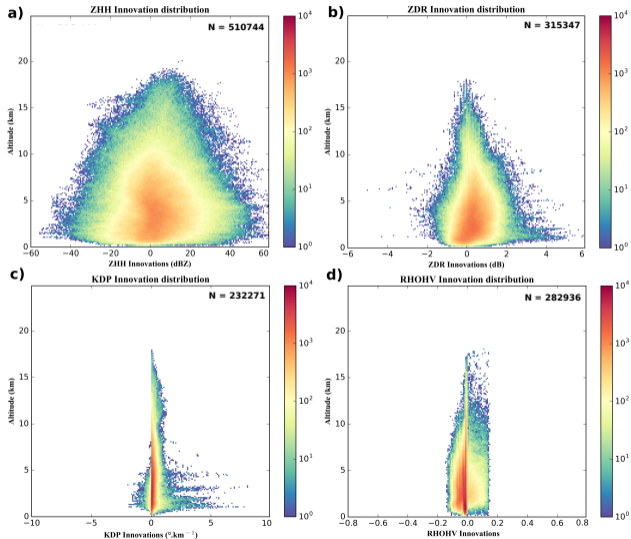


- Z_{HH} : incertitudes majoritairement dépendantes des constantes diélectriques associées aux différents types d'hydrométéores glacés.
- Z_{DR} : incertitudes provenant du rapport d'aspect des gouttes de pluie.
- K_{DP} : incertitudes provenant du rapport d'aspect des gouttes de pluie.
- ρ_{HV} : incertitudes négligeables.

Effets du filtrage des observations sur les innovations



Distributions des innovations selon l'altitude



Détermination des Jacobiens

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial \mathcal{H}_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial \mathcal{H}_1}{\partial x_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \mathcal{H}_1}{\partial x_k} & \cdots & \frac{\partial \mathcal{H}_1}{\partial x_k} \end{pmatrix}$$

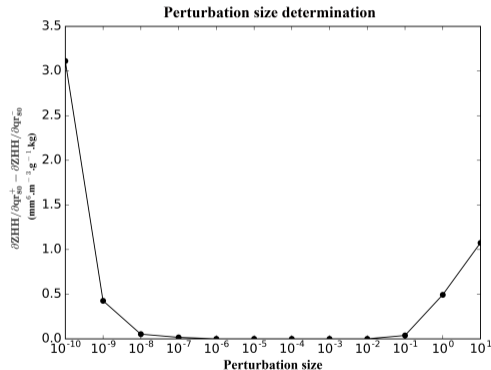
Calcul des différences finies

$$\frac{\partial \mathcal{H}_1}{\partial x_1} = \frac{\mathcal{H}_1(x_1 + \partial x_1) - \mathcal{H}_1(x_1)}{\partial x_1}$$

Importance du choix de la taille de la perturbation pour rester dans un régime linéaire

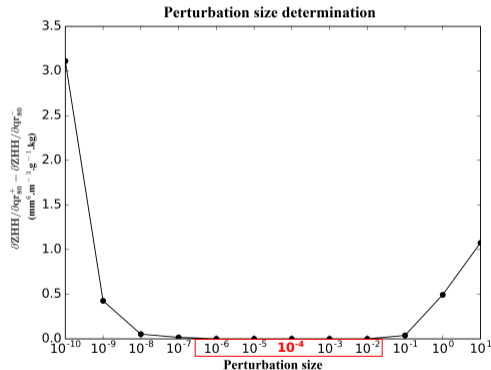
Choix de la taille de perturbation

- Duerinckx *et al.* (2015)
- $\left| \frac{\partial Z_{HH}}{\partial q_r^+} - \frac{\partial Z_{HH}}{\partial q_r^-} \right|$
- Linéarité respectée si cette différence est nulle



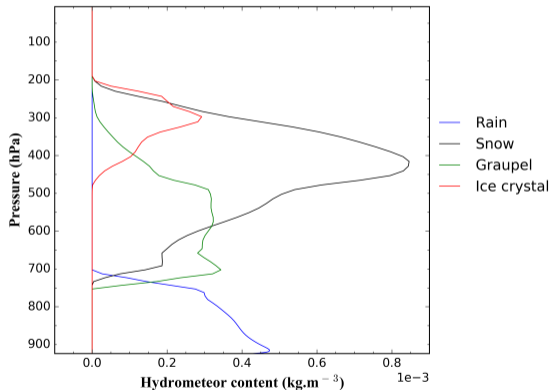
Choix de la taille de perturbation

- Duerinckx *et al.* (2015)
- $\left| \frac{\partial Z_{HH}}{\partial q_r^+} - \frac{\partial Z_{HH}}{\partial q_r^-} \right|$
- Linéarité respectée si cette différence est nulle

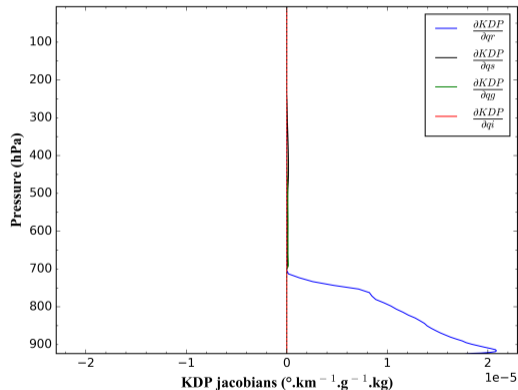


Jacobiens de la phase différentielle spécifique

Hydrometeor profiles

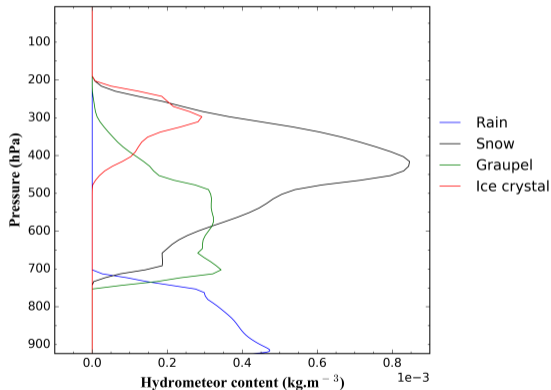


KDP jacobians



Jacobiens du coefficient de corrélation

Hydrometeor profiles



RHOHV jacobians

