

Utilisation des observations polarimétriques radar pour évaluer la représentation des nuages dans Méso-NH sur un cas d'orage violent

Cloé David
CNRM/GMME/ PRECIP

Résumé

Les supercellules sont un type d'orage violent de longue durée de vie présentant un risque important pour la sécurité des personnes et des biens. La qualité de leur prévision est en partie déterminée par la performance des schémas microphysiques en charge de la représentation des nuages dans les modèles. L'objet de cette étude est d'évaluer différents schémas du modèle de recherche Meso-NH, en comparant leur capacité à reproduire les signatures typiques de supercellules observables avec les radars polarimétriques. La supercellule toulousaine du 19/06/2019, choisie parmi une dizaine de situations pour la qualité des signatures radars observées et de la prévision opérationnelle du modèle AROME, a été simulée avec les schémas ICE3 et LIMA, dans leurs versions avec et sans grêle pronostique. Le schéma le plus sophistiqué (LIMA avec prévision de la grêle) est le plus performant et permet d'expliquer l'origine dynamique et microphysique des signatures radar observées.

Introduction

Les orages font partie des phénomènes météorologiques les plus destructeurs : foudre, grêle, rafales, crues éclair, glissements de terrain... Bien que la prévision numérique du temps (PNT) soit en continuelle progression, l'anticipation des orages de quelques heures à quelques jours reste encore difficile. En représentant mieux les nuages dans les modèles on pourrait encore améliorer la prévision des orages. Dans les modèles de PNT on utilise un schéma microphysique pour représenter les processus au sein des nuages. Le modèle opérationnel AROME utilise le schéma ICE3, et dans un contexte de recherche, le schéma LIMA (Liquid Ice Multiple Aerosols). Les observations issues des radars polarimétriques permettent d'observer les propriétés dynamiques et microphysiques de l'atmosphère à une résolution subkilométrique, ce qui s'avère très utile pour étudier la représentation des orages dans les modèles (Augros, 2016 ; Augros et al., 2016). Des études ont mis en évidence des signatures caractéristiques fournies par les observations, qui sont fortement liées aux propriétés des hydrométéores. Ainsi, on peut s'appuyer sur ces observations pour évaluer et améliorer les schémas microphysiques. Des travaux récents utilisant Meso-NH (un modèle de recherche non hydrostatique développé au Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) avec le Laboratoire d'Aérodynamique de l'Université de Toulouse (LAERO) et son simulateur radar polarimétrique, ont montré la capacité du modèle à reproduire certaines signatures polarimétriques typiques avec ICE3 et LIMA sur un cas idéalisé de supercellule. Il est ici proposé d'approfondir ce travail pour un cas réel de supercellule en utilisant des observations polarimétriques radar et en comparant les signatures simulées avec celles observées. Les signatures ont une origine dynamique et/ou microphysique, que l'on a pu retrouver dans les simulations. On s'est questionné sur l'impact du choix du schéma microphysique dans la reproductibilité des signatures.

Ce projet de fin d'étude s'inscrit dans une démarche d'amélioration de la prévision des orages et constitue un travail préliminaire pour l'assimilation des observations polarimétriques dans la future version du modèle AROME.

Qu'est-ce que la polarimétrie radar ?

Les radars météorologiques conventionnels émettent une seule onde électromagnétique polarisée horizontalement, alors qu'un radar dit polarimétrique a la particularité d'émettre simultanément deux ondes, l'une polarisée horizontalement et l'autre verticalement. Cette double polarisation permet de calculer de nouvelles variables directement reliées aux caractéristiques des hydrométéores

Prenons l'exemple de la réflectivité différentielle Z_{DR} . C'est la différence entre la réflectivité de l'onde polarisée horizontalement Z_H et de celle polarisée verticalement Z_V . Grâce à ce calcul simple, mais impossible à faire avec un radar conventionnel, on peut estimer la forme (aplatissement) des hydrométéores dans le volume observé par le radar. Pour des grosses gouttes de pluie aplaties, Z_{DR} sera positif et d'autant plus fort que les gouttes seront aplaties, alors que pour des cibles plutôt sphériques il sera quasi nul (figure 1).

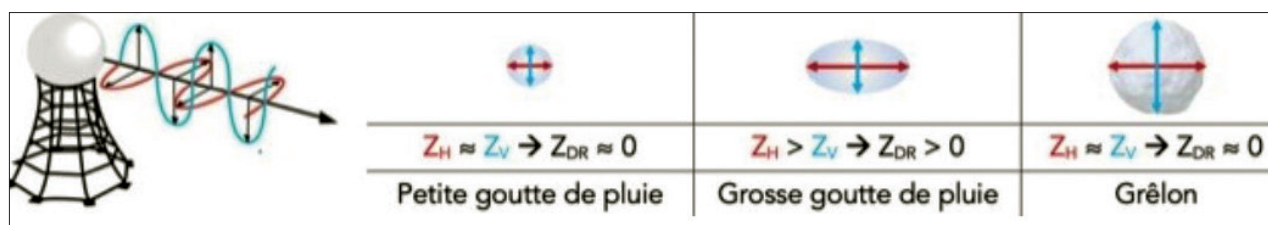


Figure 1. Valeurs de réflectivité différentielle selon le type d'hydrométéores.

Un grêlon sphérique sec donnera un signal en Z_{DR} proche de zéro, mais de la grêle fondante donnera des valeurs de Z_{DR} un peu plus élevées car :

- la constante diélectrique de l'eau est plus grande quand celle-ci est à l'état liquide ;
- la pellicule d'eau fondante modifiera légèrement la forme du grêlon qui sera de facto moins sphérique.

D'autres variables polarimétriques, comme la phase différentielle spécifique K_{DP} (taux de changement de phase de l'onde de retour avec la distance) signe la présence d'un contenu important en eau liquide. Les valeurs, exprimées en degré/km, peuvent être très fortes dans le cœur convectif des orages en présence de grêle fondante. Quant au coefficient de corrélation ρ_{HV} , (rapport d'intensité entre les signaux horizontaux et verticaux de tirs successifs), il mesure l'homogénéité des hydrométéores contenus dans le volume du faisceau radar. Sans unité, ρ_{HV} vaudra 1 si le milieu sondé ne contient qu'un seul type d'hydrométéores mais diminue si le milieu est hétérogène (mélange pluie/grêle ou grosses gouttes aplaties/petites gouttes sphériques).

→ Grâce aux radars polarimétriques, on peut repérer des signatures typiques dans les supercellules.

Supercellule et signatures polarimétriques

Une supercellule est un orage de longue durée de vie (jusqu'à plusieurs heures) dont la colonne ascendante est en rotation cyclonique (mésocyclone) ou anticyclonique (mésocyclone). Le diamètre d'un mésocyclone est de l'ordre de 2 à 10 km, pour une extension verticale de 3 à 10 km environ. Une supercellule se forme dans un environnement fortement cisailé, humide et chaud en basses couches, et conditionnellement instable. Avec un radar conventionnel on repère une supercellule par sa forme typique en crochet dans les réflectivités, représentées en gris dans la figure 2 (mais également par son dipôle de vitesse Doppler associé au mésocyclone). Un radar polarimétrique offre une nouvelle vision de la supercellule en mettant en évidence des zones bien précises qu'on appelle des signatures polarimétriques.

Low levels (≤ 1 km AGL)

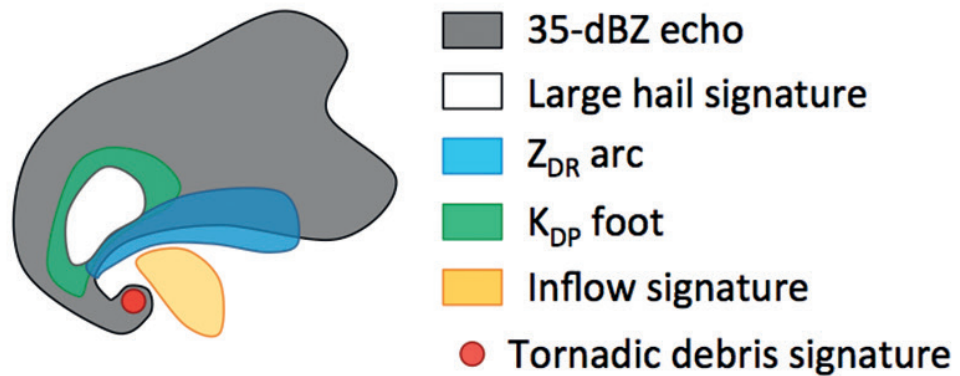


Figure 2. Signatures polarimétriques dans une supercellule (adapté de Kumjian et Ryzhkov, 2008).

Prenons l'exemple de l'arc de Z_{DR} , en bleu sur la figure 2, qui se rencontre en basses couches. Le maximum de réflectivité différentielle est colocalisé avec le plus fort gradient de réflectivité, pour des valeurs variant de 0 à 6 dB. Cette signature s'explique par le vent relatif à l'orage et par l'augmentation des vitesses verticales dans cette zone (courant ascendant principal) qui, combinée à un cisaillement rotationnel, propulse les plus petites gouttes vers l'intérieur de la supercellule. Ainsi, il ne reste dans cette zone plus que des grosses gouttes aplaties résultant en un signal en Z_{DR} fort.

La colonne de Z_{DR} fait partie des premières signatures polarimétriques identifiées dans les supercellules. Généralement larges de 4 à 8 km et caractéristiques (dites « proxies ») des ascendances, elles ont une extension verticale dépassant l'iso-0°C, indiquant une perturbation positive de température due au courant ascendant (updraft, en anglais). On les associe à la croissance des grosses gouttes de pluie et des grêlons au-dessus de l'iso-0°C.

→ Pour simuler des signatures polarimétriques il faut disposer d'un opérateur d'observation qui s'appuie sur les variables issues du schéma microphysique du modèle.

Schéma microphysique et opérateur d'observation

Les schémas ICE3, ICE4 et LIMA disponibles dans Meso-NH sont des schémas globaux (dits « bulk schemes », en anglais) qui distinguent plusieurs types d'hydrométéores : gouttelettes, pluie, petits cristaux, neige, graupel, et en option, la grêle. Un schéma bulk prévoit des grandeurs intégrées sur la distribution en taille des hydrométéores. On caractérise aussi les schémas bulk en fonction du nombre de variables pronostiques (encore appelées "moments") associées à chaque type d'hydrométéore. ICE3 et ICE4 sont des schémas à 1 moment car ils ne prévoient que les rapports de mélange. LIMA quant à lui est un schéma à 2 moments qui prévoit, en plus du rapport de mélange, la concentration (en nombre de particules par unité de volume) pour les 3 hydrométéores que sont l'eau nuageuse, la pluie et les petits cristaux de glace. Ce degré de liberté supplémentaire dans LIMA permet de mieux représenter la variabilité en taille des hydrométéores. Pour simuler les variables polarimétriques à partir des paramètres microphysiques, on a utilisé un opérateur d'observation radar qui est capable de modéliser des hydrométéores aplatés. Les signatures polarimétriques simulées seront donc très dépendantes du schéma utilisé et de ses caractéristiques (un ou deux moments, avec ou sans grêle).

→ L'opérateur d'observation, ou « simulateur radar », fait le lien entre les variables modèles et les variables polarimétriques simulées.

Méthodologie

On a reproduit les signatures polarimétriques d'un cas réel d'orage violent en utilisant différents schémas microphysiques et en appliquant un simulateur radar sur les variables du modèle Meso-NH. On a d'abord recherché des cas de supercellules grâce aux observations participatives (observations traitées en temps réel et contrôlées par Météo-France, mais effectuées en dehors de son réseau professionnel) et aux réflectivités radar prenant la forme caractéristique en crochet. Après avoir identifié les situations les plus riches en signa-

tures polarimétriques via l'interface SERVAL (Système d'Elaboration de produits Radar et de VisuALisation, développé par Météo-France), on a cherché quelle prévision AROME prévoyait le mieux les supercellules afin d'initialiser Meso-NH. On s'est aidé des «réflectivités maximales» AROME et on a calculé l'hélicité intégrée sur l'ascendance (intégration sur la verticale du produit du tourbillon par la vitesse verticale, dite « updraft helicity », en anglais), marqueur des mésocyclones dans les modèles. La prévision issue du réseau de 12:00 UTC pour le 19/06/2019 s'est avérée être la plus convaincante, et on a ainsi retenu la supercellule du 19/06/2019 qui a duré de 18:30 UTC à 23:55 UTC ; on a donc lancé 4 simulations Meso-NH à partir de la prévision AROME avec des schémas microphysiques différents et on a utilisé un opérateur d'observation pour traduire les variables du modèle en variables radar simulées. Ainsi, on a pu comparer les signatures polarimétriques observées à celles simulées.

Zoom sur les simulations

Toutes les simulations ont été réalisées avec une maille de 1 km, sur un domaine de 400x400 km centré sur le Sud-Ouest. Les prévisions, lancées avec le modèle AROME du 19/06/2019 à 12:00 UTC, s'étendent sur 11 heures au total, de 15:00 UTC à 02:00 UTC le lendemain ; seul le schéma microphysique utilisé diffère. On nomme par la suite les simulations en fonction du schéma utilisé : ICE3, ICE4, LIMA_SG pour LIMA sans la grêle et LIMA_AG pour LIMA avec la grêle.

Résultats

Le radar météorologique fournit deux types d'images : la coupe PPI (Plan Position Indicator, ou image panoramique pour un angle d'élévation donné) et la coupe RHI (Range Height Indicator, ou coupe verticale pour un azimut donné).

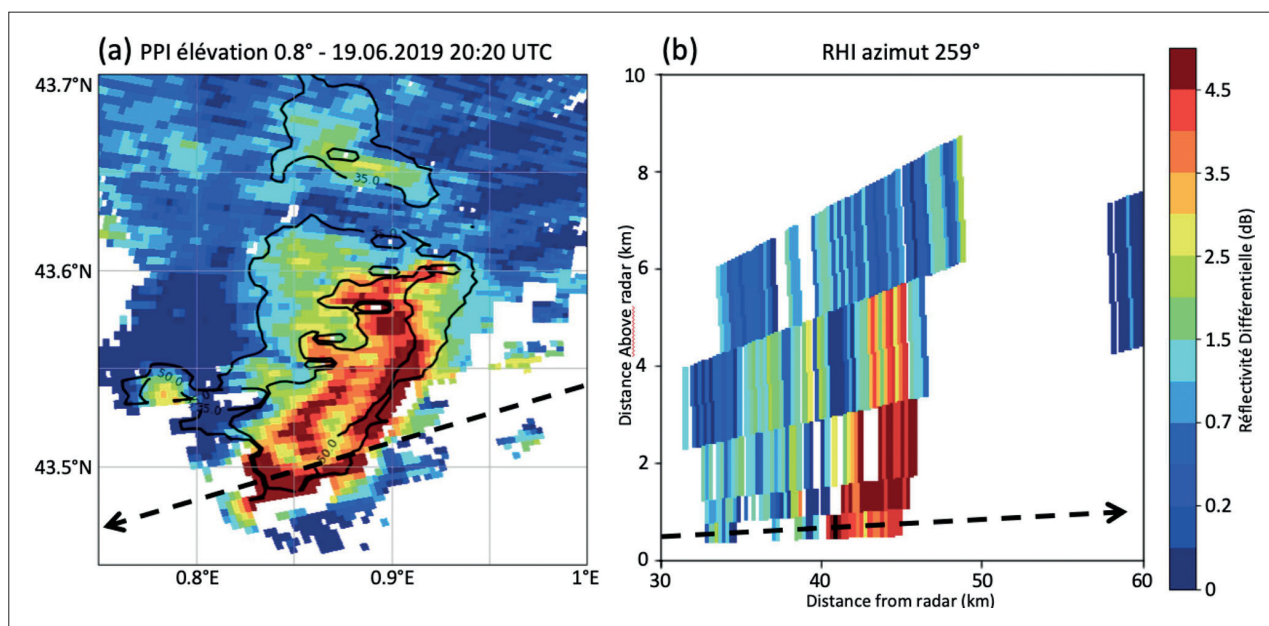


Figure 3. Coupes radar du 19/06/2019 à 20:20 UTC ; (a) PPI pour l'élévation de 0.8 degré ; (b) RHI pour l'azimut 259 degrés. Flèche noire pointillée : projection du RHI sur le PPI et inversement. Contours noirs : valeurs de Z_H 35 dBZ et 50 dBZ.

On a observé un arc de Z_{DR} le 19/06/2019 à 20:20 UTC sur le radar de Toulouse pour l'angle d'élévation de 0.8 degré. Dans la coupe PPI, sur la figure 3a on remarque que le maximum de Z_{DR} (4.5 dB voire plus, en rouge foncé) correspond à l'endroit où le gradient de réflectivité Z_H est le plus fort (isolignes noires très resserrées), ce qui est cohérent avec le modèle conceptuel. C'est l'une des signatures les plus visibles dans les observations avec des valeurs dépassant les 5 dB. On présente ci-dessous les coupes horizontales à 1 km d'altitude simulées par le modèle combiné à l'opérateur d'observation.

Dans les simulations LIMA_SG (figure 4c) et LIMA_AG (figure 4d) l'arc est bien représenté le long du plus fort gradient de réflectivité (contours de Z_H resserrés) et avec des intensités similaires à l'observation, supérieures à 5 dB. ICE3 (figure 4a) et ICE4 (figure 4b) ont des intensités bien plus faibles, autour de 3 dB, qui coïncident et sont contenues dans le contour de réflectivité 50 dBZ.

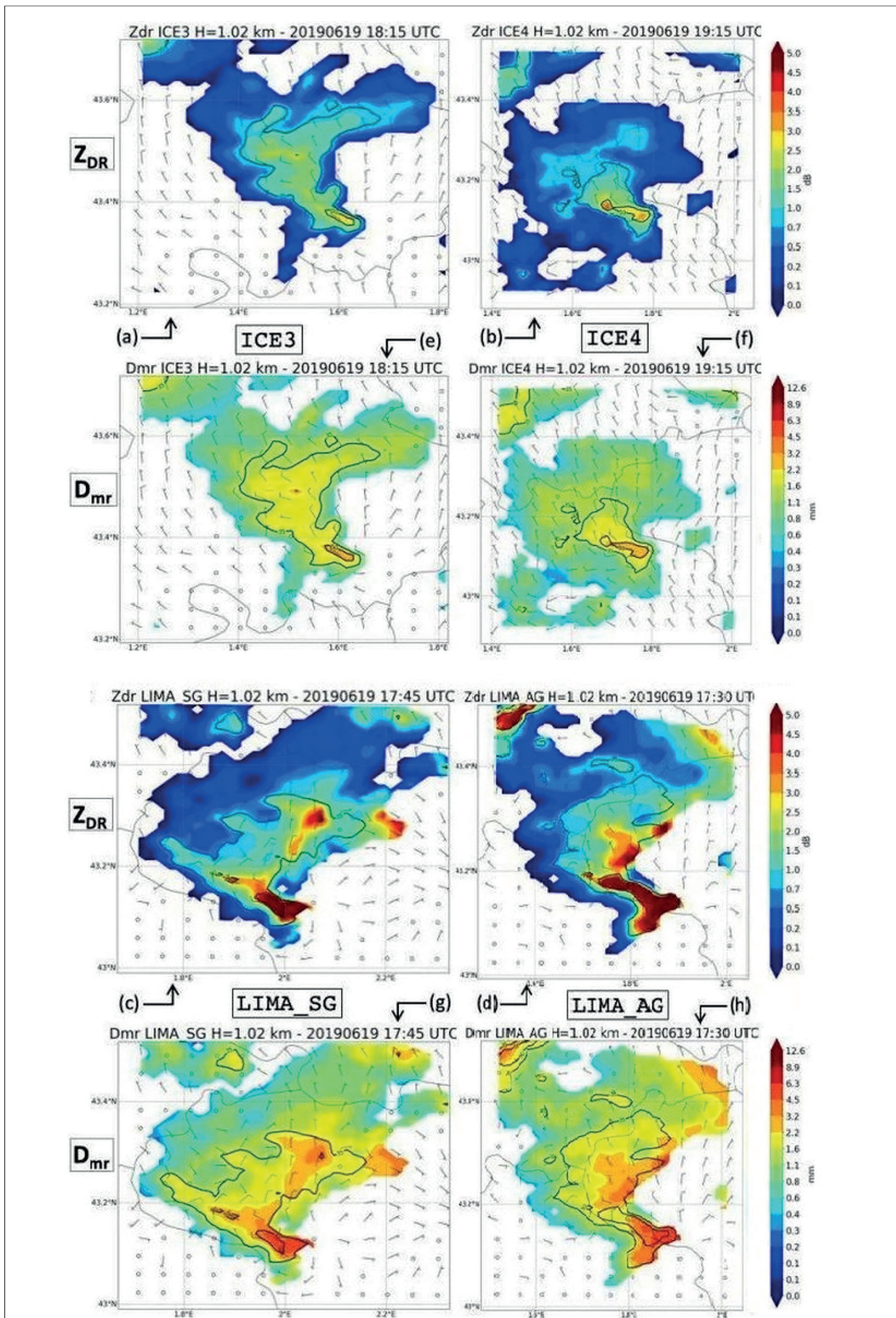


Figure 4. Réflectivité différentielle pour la simulation (a) ICE3 ; (b) ICE4 ; (c) LIMA_SG ; (d) LIMA_AG, et diamètre moyen des gouttes correspondant pour (e) ICE3 ; (f) ICE4 ; (g) LIMA_SG ; (h) LIMA_AG. Contours noirs : $Z_{dr} = 35$ dBZ et 50 dBZ. Echelle pour la réflectivité différentielle : de 0 à 5 dB. Echelle pour le diamètre moyen des gouttes : 0 à 12.6 mm.

L'arc de Z_{DR} étant dû à un tri par taille, on trace le diamètre moyen des gouttes, D_{mr} , au même niveau que les réflectivités différentielles (1 km d'altitude). Pour les schémas à 1 moment ICE3 et ICE4 (figure 4e et figure 4f), les plus grosses gouttes coïncident avec le contour de réflectivité 50 dBZ. En revanche pour LIMA, dans sa version avec (figure 4h) ou sans la grêle (figure 4g), les plus grosses gouttes sont en partie observées hors de ce cœur de fortes réflectivités et concordent avec les fortes valeurs de réflectivité différentielle.

→ La modélisation du tri par taille qui s'opère dans cette zone est donc rendue possible grâce à un schéma microphysique à 2 moments tel que LIMA.

On a également observé une colonne de Z_{DR} dont les valeurs supérieures à 4 dB s'étendent du sol jusqu'à 6 km d'altitude (figure 3b). LIMA_SG (figure 5a) et LIMA_AG (figure 5b) simulent des valeurs de Z_{DR} supérieures à 4 dB dès le sol, comme dans l'observation. Les deux simulations ont donné des contenus importants en grapel au-dessus de l'iso-0°C (figure 5c,d) mais seule la simulation avec la grêle, qui est présente sur la quasi intégralité de la colonne (figure 6a), reproduit une hauteur de colonne satisfaisante (> 8 km). Si les valeurs de Z_{DR} sont assez élevées au-dessus de l'iso-0°C, c'est que les grêlons ne sont pas tout à fait sphériques. En dessous de l'iso-0°C, la fraction en eau liquide de la grêle augmente au fur et à mesure qu'on se rapproche du sol (figure 6b). La constante diélectrique étant plus élevée pour de l'eau liquide et le grêlon se recouvrant d'une pellicule d'eau en fondant, on peut attribuer les très fortes valeurs de Z_{DR} à de la grêle fondante (en plus de la pluie). La même différence est retrouvée entre ICE3 et ICE4 (non illustré).

→ Ainsi la prise en compte de la grêle améliore la représentation de la colonne de Z_{DR} .

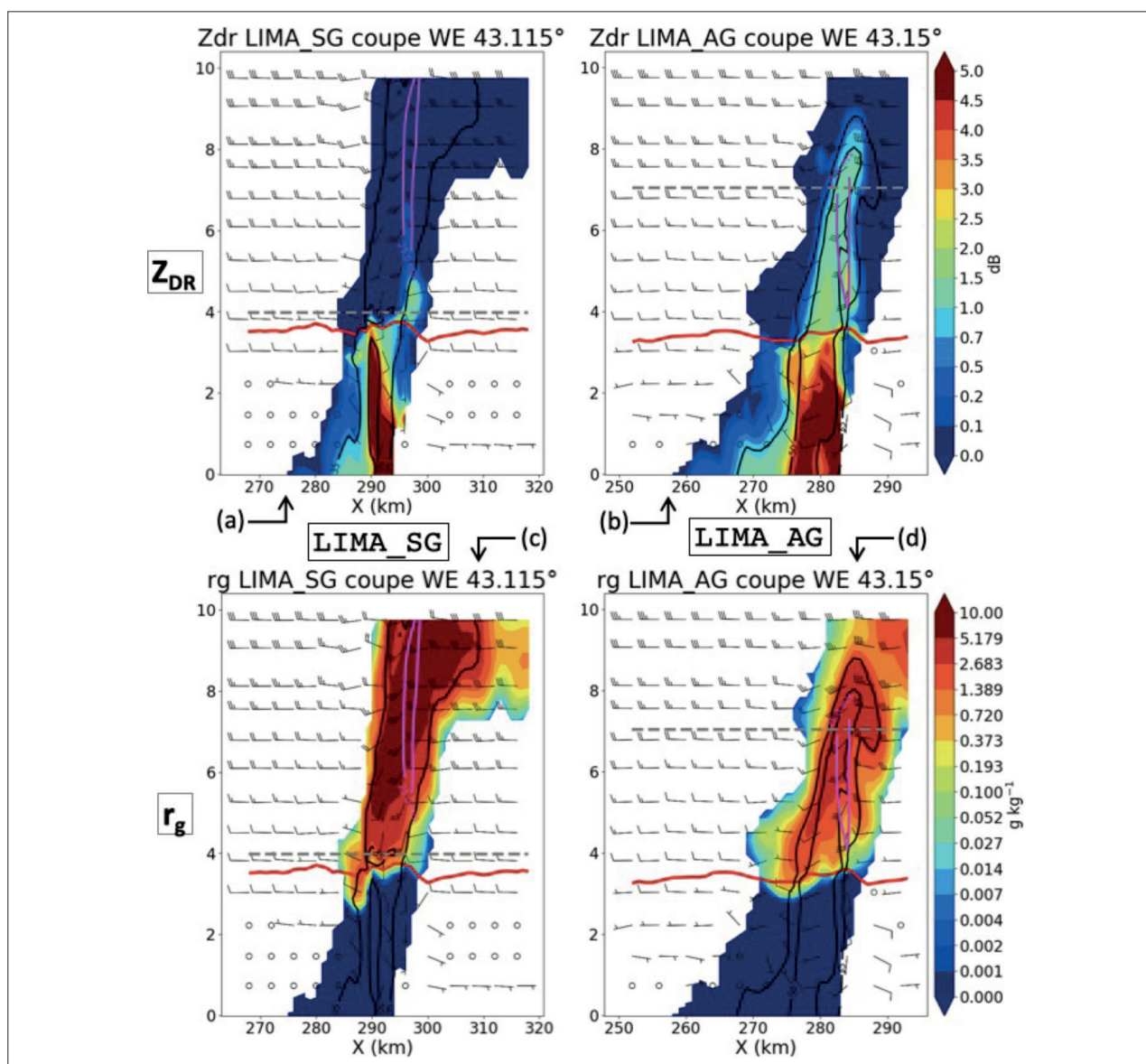


Figure 5. En haut, réflectivité différentielle pour (a) LIMA_SG (b) LIMA_AG ; en bas, rapport de mélange de grapel pour (c) LIMA_SG (d) LIMA_AG. Ligne rouge : iso-0°C. Contour magenta : vitesse verticale 25m/s. Contours noirs : $Z_H = 35$ dBZ et 50 dBZ.

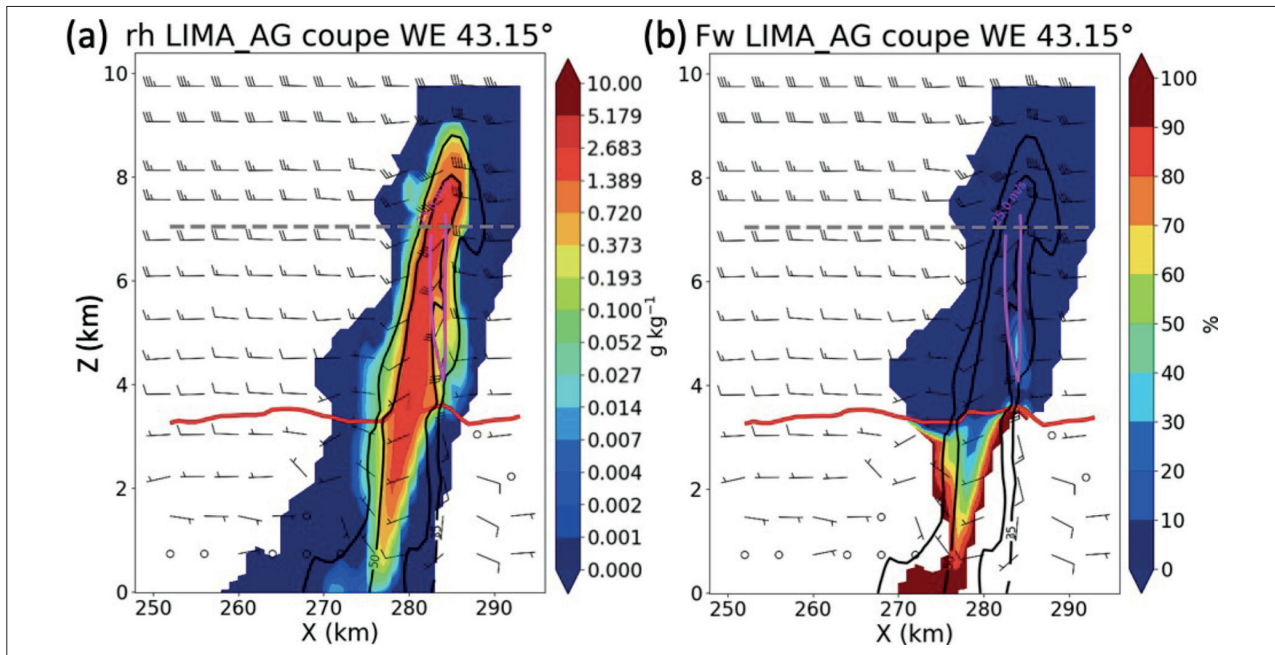


Figure 6. Pour LIMA_AG : (a) rapport de mélange de la grêle et (b) fraction en eau liquide de la grêle. Ligne rouge : iso-0°C ; Contour magenta : vitesse verticale 25m/s ; Contours noir : valeurs de Z_r à 35 dBZ et 50 dBZ.

Conclusions

L'objectif était d'évaluer plusieurs schémas microphysiques modélisant l'évolution des hydrométéores dans Meso-NH, en utilisant des observations radar polarimétriques d'une supercellule. En repérant dans les observations une supercellule riche en signatures polarimétriques et en initialisant Meso-NH avec la prévision AROME correspondante, on a lancé 4 simulations utilisant chacune un schéma microphysique différent ; celles-ci ont pu être comparées entre elles et confrontées aux observations.. En plus de réussir à expliquer l'origine dynamique et microphysique des signatures polarimétriques observées, on a montré que le schéma microphysique LIMA dans sa version avec la grêle a une vraie plus-value grâce à l'ajout d'un degré de liberté supplémentaire : la concentration en nombre d'hydrométéores par unité de volume. La prise en compte explicite de la grêle dans le schéma LIMA améliore la simulation de la supercellule et ses signatures polarimétriques, en représentant plus fidèlement la variabilité de la composition du nuage. L'étude a été menée sur un cas réel de supercellule mais il faudrait étudier un échantillon beaucoup plus important pour confirmer ces premières conclusions. Par ailleurs une très bonne représentation des observations radar et en particulier des signatures polarimétriques dans les orages est un prérequis indispensable à l'assimilation de ces observations dans les modèles de prévision. Ces travaux seront poursuivis dans le cadre de ma thèse dont l'objet sera de préparer l'initialisation des contenus et concentrations en hydrométéores dans le modèle AROME par l'assimilation des mesures radar polarimétriques.

Remerciements

Merci à Clotilde et Benoit pour leur disponibilité et la pédagogie dont ils ont su faire preuve. Merci aux collègues de l'équipe CNRM/GMME/PRECIP pour l'accueil et la bonne ambiance en salle café.

Bibliographie

- Augros, C., 2016. *Apport des données polarimétriques radar pour un modèle atmosphérique à échelle convective*. Ph.D. thesis, Université Paul Sabatier - Toulouse III.
- Kumjian, M. and A. Ryzhkov, 2008. Polarimetric signatures in supercell thunderstorms. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* **47**, 1940-1961.
- Augros, C., O. Caumont, V. Ducrocq, N. Gaussiat, and P. Tabary, 2016: Comparisons between S, C, and X band polarimetric radar observations and convective-scale simulations of HyMeX first special observing period. *Quart. J. Roy. Met. Soc.* **142**, 347-362.