



HAL
open science

Observation opérationnelle du vent 3D dans les nuages à partir des radars du réseau Aramis

Olivier Bousquet, Tabary [pierre], Parent-Du-Chatelet [jacques]

► To cite this version:

Olivier Bousquet, Tabary [pierre], Parent-Du-Chatelet [jacques]. Observation opérationnelle du vent 3D dans les nuages à partir des radars du réseau Aramis. *La Météorologie*, 2008, 61, pp.PP. 41-51. meteo-00354952

HAL Id: meteo-00354952

<https://meteofrance.hal.science/meteo-00354952>

Submitted on 10 Jun 2021

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.

Observation opérationnelle du vent 3D dans les nuages à partir des radars du réseau Aramis

Résumé

La mise à niveau récente du réseau radar opérationnel français Aramis a autorisé le déploiement d'une nouvelle technique de traitement Doppler, permettant de collecter simultanément des mesures de vitesse radiale et de réflectivité jusqu'à 250 km des radars. La disponibilité de ces mesures Doppler à longue portée a ouvert la voie à la mise en place d'une chaîne temps réel de reconstruction du champ de vent 3D, qui est actuellement testée en région parisienne. L'analyse des champs de vent reconstitués dans ce cadre opérationnel montre qu'il est possible d'obtenir, comme jamais auparavant, des informations fiables et potentiellement très utiles sur la structure et les caractéristiques de l'écoulement au sein des systèmes précipitants et cela, quel que soit le régime considéré. De nombreuses applications, allant de la prévision immédiate à la vérification des modèles numériques de prévision du temps, sont concernées par ces avancées.

Abstract

Operational wind retrieval using data of the French weather radar network, Aramis

The recent upgrading of Aramis, the French radar network, has allowed the deployment of a new Doppler technique able to collect radial velocity together with reflexivity measurements up to 250 km from the radars. The availability of these long-range Doppler data opens the way to the implementation of a real-time operational set-up to retrieve 3D wind fields which is now being tested in the greater Paris area. The analysis of the wind fields retrieved within this operational set-up shows that reliable and potentially very useful information on the flow structure within precipitation systems are, as never before, obtained, and this, whatever type this system may have. Many applications, ranging from nowcasting to checking the numerical weather prediction model verification, are concerned with these progress.

Olivier Bousquet⁽¹⁾, Pierre Tabary⁽²⁾ et Jacques Parent-du-Châtelet⁽²⁾

(1) Météo-France, CNRM/Game
42, avenue Gaspard-Coriolis - 31057 Toulouse Cedex
olivier.bousquet@meteo.fr

(2) Météo-France, DSO - Centre de météorologie radar, Trappes

Conçu initialement à des fins militaires, le radar s'est rapidement imposé comme un outil indispensable à la météorologie moderne. Ce meilleur ami du météorologue, comme aime à le rappeler Hitschfeld (1986), voit sa fonction météorologique apparaître au début de la seconde guerre mondiale, après que les alliés chargés de la détection des cibles ennemies se furent plaints de la gêne occasionnée par la présence de nuages dans leurs interprétations. Le premier article scientifique dans le domaine de la physique des nuages avec le mot radar dans le titre (*Radar and Weather*) est d'ailleurs à mettre à l'actif d'un militaire de l'US Navy, le commandant Maynard (Maynard, 1945). D'après Hitschfeld, la première observation connue d'un système précipitant par radar remonte cependant au 20 février 1941, date à laquelle un orage de grêle a été suivi sur une distance d'une dizaine de kilomètres au sud de l'Angleterre. La météorologie radar, qui allait bouleverser nos connaissances dans le domaine de la physique des nuages, était née.

Les radars Doppler

L'unicité et l'intérêt des radars météorologiques découlent de leur capacité à fournir une description spatio-temporelle détaillée des systèmes pluvio-orageux de petite et de moyenne échelle, qui ne peut être obtenue à partir des moyens d'observation conventionnels.

Si la microphysique des nuages fut la première discipline à véritablement tirer parti des capacités nouvelles offertes par les radars météorologiques, l'introduction de capacités Doppler, au début des années 1960, va également ouvrir de nouveaux horizons dans le domaine de la dynamique de l'atmosphère et être à l'origine des premières études approfondies sur la structure dynamique des systèmes convectifs (Browning et Wexler, 1968). De par leur capacité à fournir une description explicite du champ de vent dans les zones pluvieuses, les radars Doppler vont rapidement devenir une composante essentielle de toute campagne de mesures dédiée à l'étude des systèmes précipitants. L'avancée technologique aidant, ils seront par la suite miniaturisés, puis progressivement embarqués à bord de plate-formes mobiles. Aux débuts des années 1980, les progrès sont tels qu'il est désormais possible de les embarquer à bord d'avions sans que leur fonctionnement en soit affecté. Ces radars Doppler aéroportés permettront l'observation des systèmes pluvio-orageux se développant en régions océanique ou montagneuse, ce qui était jusqu'alors difficilement envisageable à partir de radars fixes. Les radars seront ensuite installés sur des bateaux, des camions et depuis peu sur des satellites, repoussant ainsi considérablement les limites de leur champ d'investigation.

Outre son utilisation à des fins de recherche, la capacité Doppler est de nos jours également très répandue dans les réseaux opérationnels. En « dopplerisant » les

158 radars de leur réseau (Nexrad) au début des années 1990, les États-Unis seront le premier pays à implémenter la capacité Doppler dans un réseau opérationnel, suivis par le Canada et la plupart des pays européens à la fin des années 1990. En France, la technologie Doppler sera tout d'abord testée à Trappes en 2002 avant d'être progressivement étendue à l'ensemble du réseau, dans le cadre du projet de mise à niveau Panthère [Programme Aramis nouvelle technologies en hydrométéorologie extension et renouvellement], (Parent-du-Châtelet et al., 2003). La « dopplerisation » du réseau français s'est faite sous la pression des modélisateurs, avec en point de mire la mise en œuvre opérationnelle du

nouveau modèle de prévision à courte échéance Arome, capable d'assimiler les vitesses radiales (Bouttier, 2007).

De nos jours, les applications opérationnelles des radars Doppler restent encore relativement peu nombreuses et sont essentiellement limitées au filtrage des échos fixes (Tabary et al., 2002) ou à l'élaboration de profils verticaux du vent au moyen de méthodes de type VAD [Velocity Azimuth Display], parfois assimilés dans les analyses opérationnelles (encadré ci-dessous). Outre-Atlantique, les images de vitesse radiale sont également utilisées pour le suivi et la prévision à très courte

échéance des situations météorologiques à risque, mais leur exploitation par les prévisionnistes, qui nécessite la mise en œuvre d'importants programmes de formation et d'information, reste cependant très limitée. Cette situation contraste fortement avec l'exploitation de la mesure Doppler en mode recherche qui permet notamment d'accéder, depuis plus de vingt ans, à l'écoulement tridimensionnel au sein des systèmes précipitants en combinant les mesures de vitesse dans la zone de recouvrement de plusieurs radars (Wakimoto et Srivastava, 2003). De fait,

L'analyse VAD

L'analyse dite VAD [Velocity Azimuth Display], (Browning et Wexler, 1968) consiste à supposer que le flux est uniforme⁽¹⁾ par tranche d'altitude dans un voisinage autour du radar (typiquement un disque de 30 km de rayon). Dans ces conditions, la vitesse radiale à une distance donnée varie suivant une sinusoïde avec l'azimut, sinusoïde dont l'amplitude et la phase donnent pratiquement directement la vitesse et la direction du vent. On peut ainsi construire un profil de vent avec une résolution verticale de 200 mètres et une fréquence de 15 minutes. L'hypothèse d'uniformité du flux est le plus souvent vérifiée à part dans le cas de systèmes convectifs présentant de forts cisaillements. Dans ces situations toutefois, la variation de la vitesse radiale avec l'azimut diffère notablement d'une sinusoïde et on peut facilement exploiter cette absence de consensus pour invalider l'estimation des deux composantes du vent. La figure 2 présente une série temporelle de profils VAD issus du radar de Trappes le 18 octobre 2004 de 12 h 00 à 23 h 45 TU⁽²⁾. Cette figure est intéressante car elle illustre les deux types de situations dans lesquelles on peut avoir des mesures de vent : de 12 h 00 à 16 h 00, il ne pleut pas sur le radar, mais les profils sont tout de même restitués dans la couche limite grâce au signal d'air clair (c'est-à-dire signal renvoyé par des traceurs tels que insectes, poussières ou hétérogénéités de l'indice de réfraction). La pluie arrive vers 18 h 00 sur le radar et les profils sont alors restitués sur toute l'épaisseur du système précipitant, ce jour-là relativement faible (sommet des nuages à 3 km). La capacité de détection en air clair est potentiellement très intéressante car elle augmente considérablement le taux de disponibilité des mesures de vent, en particulier les profils VAD. Tabary et al., (2006) ont estimé à 80 % le taux de disponibilité de profils de vent en très basses couches lors des mois d'été. Cela ouvre des perspectives intéressantes pour le suivi météorologique des situations, l'assimilation dans les modèles de prévision et la surveillance de la qualité de l'air, où les modèles utilisés ont un besoin crucial d'informations précises sur la structure de la couche limite. À noter que les oiseaux sont aussi d'excellentes cibles pour les radars météorologiques hors période de pluie, mais ils présentent l'inconvénient d'avoir leur propre déplacement, ce qui peut biaiser considérablement les mesures Doppler. C'est pour cette raison que certains pays (pays scandinaves notamment) inhibent la production de profils VAD en période de migration.

Figure 2 - Résultats de la comparaison entre les profils VAD issus du radar de Trappes et les analyses Arpège-Aladin à 12 h 00 TU pour le mois d'août 2007. À gauche : profils verticaux des biais et écarts types sur la vitesse. À droite : profils verticaux des biais et écarts types sur la direction.

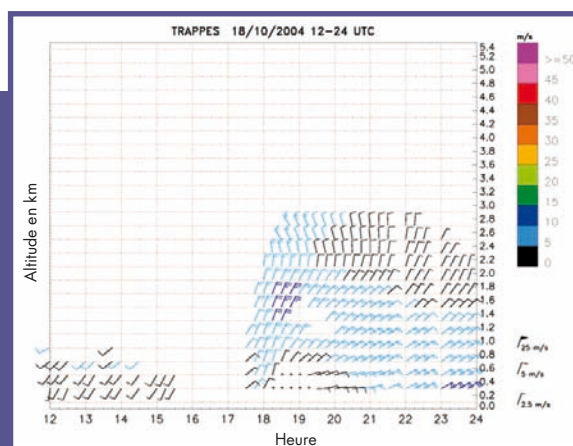
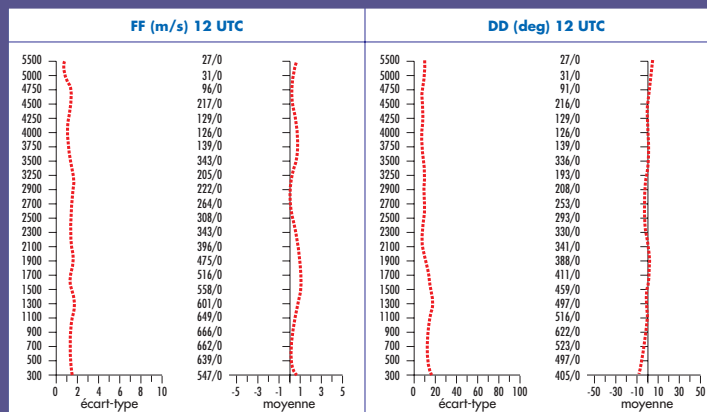


Figure 1 - Série temporelle de profils VAD issus du radar de Trappes. Les profils sont restitués de façon indépendante les uns des autres à la fréquence de 15 minutes et avec une résolution verticale de 200 mètres.

Comme cela est couramment fait dans le monde, les profils de vent VAD élaborés opérationnellement à partir des radars Doppler sont contrôlés à l'aide des modèles numériques opérationnels (Arpège et Aladin en France). On calcule ainsi des statistiques mensuelles d'écart par rapport aux analyses du modèle. Il s'agit d'une étape préliminaire indispensable avant l'assimilation dans les modèles. À titre d'exemple, la figure 2 montre les résultats obtenus pour le mois d'août 2007 par le radar de Trappes. On y voit les biais et écarts types de la vitesse (gauche) et la direction (droite) du vent entre les profils VAD et les analyses à 12 h 00 TU du modèle de 0 à 5 000 mètres. Les résultats obtenus (biais nuls et écarts types sur la vitesse et la direction de l'ordre de 1 m.s⁻¹ et 10 degrés) ont été jugés suffisamment bons pour qu'à partir du mois suivant, les profils VAD de Trappes soient pris en compte dans les analyses opérationnelles.

(1) En fait, l'hypothèse de variation linéaire des composantes du vent suffit.
 (2) Toutes les heures sont données en temps universel (TU).

et même si les nouvelles applications liées à l'assimilation de la vitesse radiale dans les modèles de prévision numériques sont prometteuses, force est de constater que la capacité Doppler des radars opérationnels reste largement sous-exploitée.

L'exploitation limitée du mode Doppler résulte principalement de la relation inversement proportionnelle qui existe entre la portée maximale du radar et la vitesse maximale (appelée vitesse non ambiguë ou **vitesse de Nyquist**) pouvant être mesurée par celui-ci en mode Doppler. On a donné à ce problème le nom de « **dilemme Doppler** » (encadré ci-contre).

Une des conséquences immédiates de ce dilemme est de limiter la portée des radars lorsqu'ils fonctionnent en mode Doppler, afin de réduire les phénomènes dits de **repliement** des vitesses situées en dehors de l'intervalle de non-ambiguïté (encadré ci-contre). Les radars Doppler opérationnels étant généralement distants de plusieurs centaines de kilomètres, cette limitation en portée a pour effet de réduire les zones de recouvrement au sein desquelles il est possible de reconstruire le vecteur vent complet dans les systèmes précipitants. Ces restitutions n'ont pour cette raison jamais pu être réalisées dans un cadre purement opérationnel, mais seulement lors de campagnes expérimentales telles que MAP [Mesoscale Alpine Programme], (Bougeault et al., 2001) pendant laquelle des radars de recherche ont été couplés à un radar opérationnel (Chong et al., 2000).

Suite à l'avènement de nouvelles techniques de traitement Doppler dites à fréquences de répétition multiples (Multiple PRF en anglais), récemment testées avec succès dans les systèmes radar opérationnels, il est désormais possible de vaincre ce fameux dilemme et de collecter des données à longue portée tout en ayant une vitesse de

Nyquist élevée. La première conséquence du déploiement opérationnel de ce type de schéma est l'amélioration sensible de la qualité des mesures de vitesse radiale à travers la quasi-disparition des phénomènes de repliement (Tabary et al., 2002), ce qui est évidemment crucial dans l'optique d'assimiler ces données dans les modèles de prévision. Ces développements ouvrent également de nouvelles perspectives dans le domaine de l'exploitation opérationnelle de la mesure Doppler à travers la possibilité, pour la première fois, de restituer l'écoulement 3D au sein des systèmes précipitants en temps réel.

En France, un nouveau schéma d'émission combinant trois fréquences d'échantillonnage distinctes (Tabary et al., 2006) a été récemment déployé sur l'ensemble du réseau radar opérationnel Aramis [Application radar à la météorologie infrasyntoptique], (figure 4). La particularité de ce schéma est qu'il autorise des mesures d'une portée de 250 km couplées à une vitesse non ambiguë de 60 m.s⁻¹ qui est théoriquement suffisante pour échantillonner tous les phénomènes atmosphériques se développant en France sans avoir à se soucier d'éventuels problèmes de repliement. La disponibilité de ces

Le dilemme Doppler

L'un des points les plus sensibles de toute analyse à partir de données radar Doppler est lié au problème de repliement spectral (ou vitesses ambiguës) inhérent au caractère discret de la mesure. Ainsi, lorsque la vitesse radiale mesurée par le radar est supérieure ou inférieure à une certaine valeur seuil, appelée vitesse de Nyquist, la vitesse mesurée n'est plus la vitesse réelle mais celle après un repliement dans le domaine spectral après ajout d'un multiple de $2V_{Nyquist}$. Si l'on considère un radar émettant des ondes électromagnétiques de longueur d'onde λ à la fréquence F (fréquence de répétition des impulsions ou PRF en anglais), l'intervalle dit de Nyquist (Sauvageot, 1992), qui détermine les valeurs maximales et minimales de la vitesse radiale, $V_{Nyquist}$ mesuré par le radar est défini par :

$$V_{Nyquist} = \pm \frac{\lambda F}{4}$$

La série temporelle est échantillonnée à la cadence du radar ; on a sous-échantillonnage, et donc repliement, à partir du moment où la phase du signal reçu tourne de plus que 2π entre deux impulsions radar. Pour obtenir une meilleure détermination de la vitesse des cibles, il est donc nécessaire d'envoyer des impulsions très rapprochées (F très grand). Malheureusement, la portée maximale en réflectivité R_{max} est également liée à la fréquence de répétition des impulsions par la relation :

$$R_{max} = \frac{c}{2F}, \text{ où } c \text{ représente la vitesse de la lumière.}$$

Il est donc nécessaire d'espacer les impulsions pour être sûr de la position des échos revenant de loin sans ambiguïté et il existe, de ce fait, une relation inversement proportionnelle entre la valeur de la vitesse maximale pouvant être mesurée par le radar et la portée maximale :

$$V_{Max} = \pm \frac{\lambda c}{8R_{max}}$$

Pour des radars qui observent jusqu'à 300 km de distance, on ne peut ainsi observer correctement que des vitesses radiales entre -7,5 et +7,5 m/s (figure 3).

Ce problème, qui porte le nom de dilemme Doppler (figure 4), nécessite donc de faire un compromis, qui, en général, tend à limiter la portée utile des radars Doppler à une centaine de kilomètres.

Il existe néanmoins depuis peu des techniques qui permettent d'étendre la vitesse maximale et de vaincre ce fameux dilemme. Ces méthodes, dites à fréquences de répétitions multiples, ont été proposées pour la première fois par Zrnich et Mahapatra (1985). Elles consistent à équiper le radar de plusieurs fréquences d'échantillonnage et à recombinaison les mesures de vitesses individuelles obtenues à ces différentes fréquences afin de remonter, par calcul, à la vitesse vraie sans pour autant diminuer la portée maximale. Les radars du réseau opérationnel Aramis utilisent cette technique depuis maintenant deux ans et permettent ainsi l'obtention de mesures de vitesse radiale et de réflectivité jusqu'à 250 km tout en ayant une vitesse non ambiguë de l'ordre de $\pm 60 \text{ m.s}^{-1}$ (Tabary et al., 2006).

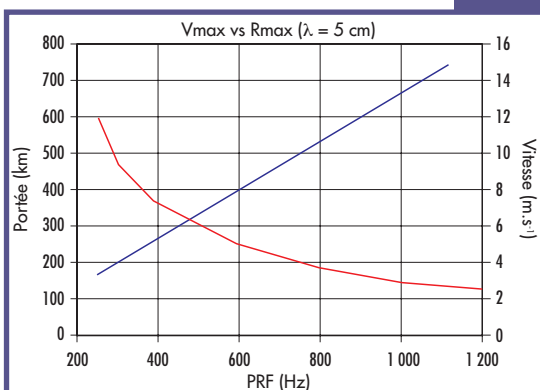


Figure 3 - Illustration du dilemme Doppler. Portée maximale (courbe rouge) et vitesse non ambiguë (courbe bleue) en fonction de la fréquence d'émission des impulsions (PRF). Une PRF de 300 Hz (resp. 1000 Hz) conduit ainsi à une portée maximale de 500 km et une vitesse non ambiguë de $\pm 4 \text{ m.s}^{-1}$ (resp. $\pm 13 \text{ m.s}^{-1}$). À titre de comparaison, le schéma d'émission triple-PRF déployé dans Aramis autorise une portée maximale de 256 km et une vitesse non ambiguë de $\pm 60 \text{ m.s}^{-1}$ pour une PRF moyenne de 300 Hz.

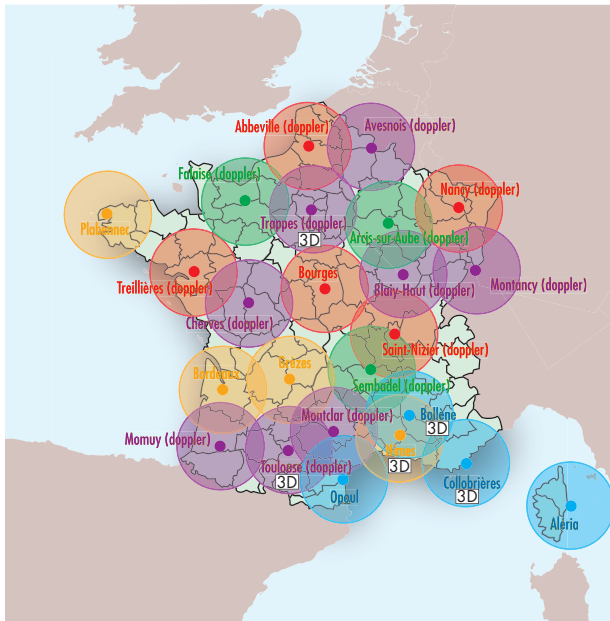


Figure 4 - Les vingt-quatre radars du réseau Aramis en juillet 2007. Chaque radar est représenté par un cercle indiquant une portée de 100 km, la couleur identifiant le fabricant. Le réseau comporte seize radars Doppler en bande C (vert, rouge, violet) et huit radars en bande S (jaune et bleu). Il est à noter que le radar Bollène est à cette date le seul radar Doppler en bande S. Le label 3D indique les radars (6) ayant un mode d'exploitation volumique. On estime que la « dopplerisation » des sept radars en bande S conventionnels restants sera achevée mi-2008. Les radars de Momuy, Montclar et Nîmes devraient également être équipés de la double polarimétrie à l'horizon 2009. Voir Sauvageot (2000) pour plus de détails sur les radars polarimétriques.

mesures a ouvert la voie à la mise en place d'une chaîne temps réel de reconstruction multi-Doppler du champ de vent 3D en région parisienne. Les applications potentielles de ce nouveau produit sont multiples et couvrent de nombreux domaines allant de la recherche en sciences de l'atmosphère à la validation des modèles de prévision du temps, en passant par la prévision immédiate et la sécurisation de la navigation aérienne. Vis-à-vis des méthodes d'analyse traditionnelles, qui reposent essentiellement sur l'analyse d'images de type PPI [Plan Position Indicator], cette application fournit une vision synthétique de l'écoulement qui permet de repérer beaucoup plus facilement les zones d'ascendance, de convergence ou de cisaillement associées aux systèmes pluvio-orageux

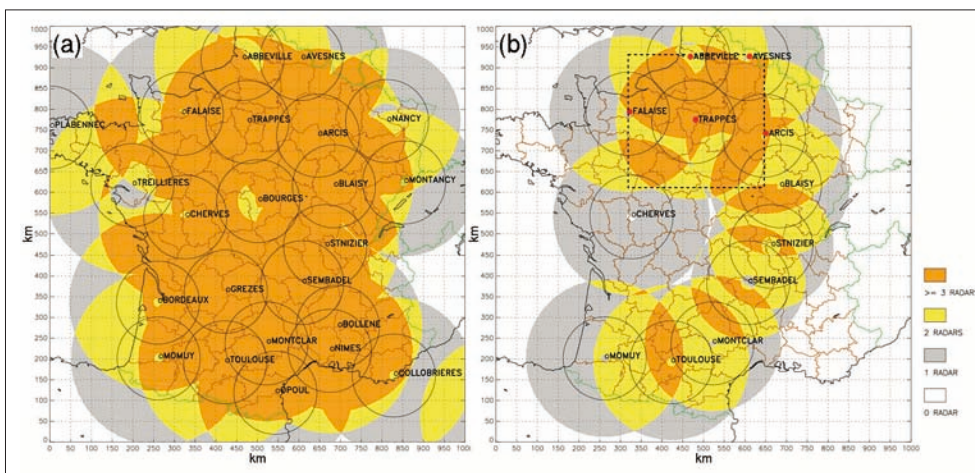
observés (encadré page suivante). L'objectif de cet article est de présenter brièvement les différentes approches qui ont été mises en œuvre afin de produire et valider ces champs de vents produits dans un cadre opérationnel. Les applications potentielles de ce produit sont également examinées au moyen de restitutions effectuées au sein de systèmes précipitants échantillonnés durant la première moitié de l'année 2007. Les résultats présentés dans cet article, bien qu'obtenus sur un domaine limité, préfigurent la future mosaïque radar 3D de Météo-France à l'horizon 2009, qui permettra aux prévisionnistes de visualiser simultanément la structure tridimensionnelle des précipitations et de l'écoulement sur tout le territoire français. La réalisation du prototype présenté dans cet article a été effectuée dans le cadre du programme européen Flysafe qui vise, pour sa composante atmosphérique, à améliorer la sécurité aérienne au voisinage des grands aéroports.

Dispositif expérimental

Le réseau radar Aramis

Le réseau radar opérationnel français Aramis (figure 4) a été conçu au milieu des années 1990, dans le but de fournir aux prévisionnistes le moyen de signaler et de suivre les phénomènes précipitants. Initialement composé de treize radars (Parent-du-Châtelet, 2003), Aramis a fait l'objet, à partir de 2002, d'une mise à niveau importante dans le cadre du projet Panthère, visant à améliorer la couverture et à introduire la capacité Doppler et la double polarisation au sein du réseau. Dans le cadre de Panthère, la couverture a été progressivement portée à vingt-quatre radars (dont à ce jour trois radars polarimétriques et dix-sept radars Doppler), un nouveau calculateur radar – Castor 2 – a été développé (Parent-du-Châtelet et al., 2003), et le schéma d'émission à trois fréquences entrelacées proposé par Tabary et al. (2006) a été déployé sur l'ensemble du réseau. Si la phase d'expansion du réseau touche maintenant à

Figure 5 - Zone de recouvrement des radars Doppler du réseau Aramis à 2 000 m d'altitude. (a) Couverture attendue après « dopplerisation » complète du réseau (mi-2008) et (b) couverture effective en janvier 2007. Les zones de recouvrement radar varient avec l'altitude et dépendent du mode d'exploitation des différents radars. Les couleurs jaune et orange indiquent respectivement les régions couvertes en mode dual- et poly-Doppler où il est possible d'effectuer les restitutions 3D. Le domaine expérimental et les cinq radars utilisés dans le cadre de cette étude (points rouges) sont indiqués en (b). La couverture montrée en (a) ne tient pas compte d'éventuels effets de masquage liés, entre autres, au relief, et est de ce fait probablement optimiste.



sa fin, de nombreuses améliorations doivent encore être apportées dans les années à venir à travers l'installation de kits polarimétriques sur six radars supplémentaires, et la « dopplerisation » des sept radars conventionnels restants. Lorsque la « dopplerisation » du réseau sera achevée, la possibilité d'obtenir des mesures de la vitesse radiale jusqu'à une distance de 250 km de chaque radar permettra de couvrir une grande partie de la France en mode poly-Doppler (figure 5a). Il sera alors théoriquement possible d'accéder à la structure tridimensionnelle du vent à la résolution de quelques kilomètres dans toutes les régions précipitantes du territoire.

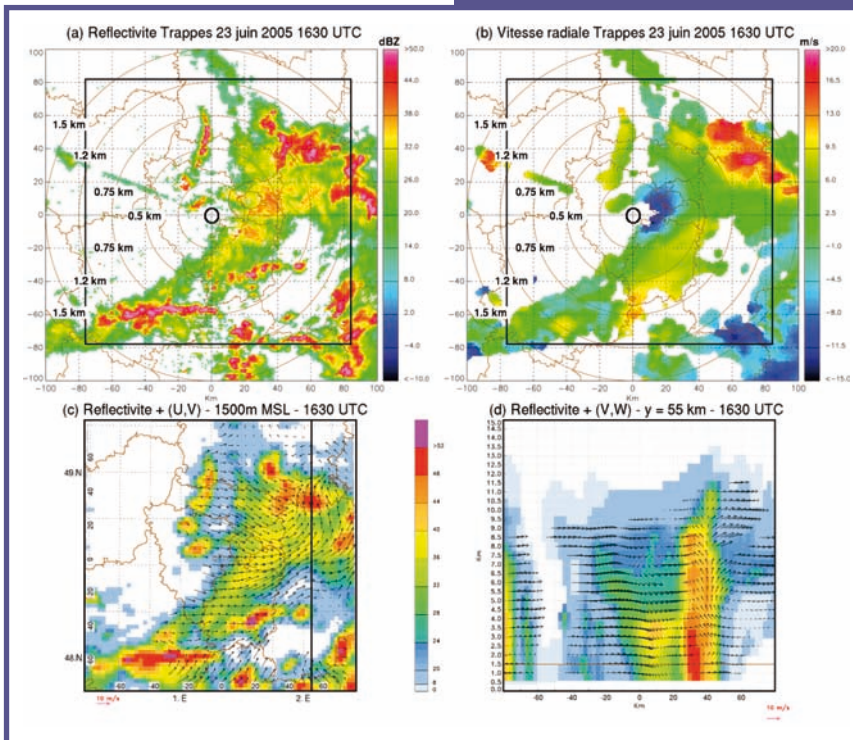


Figure 6 - Observations par radar Doppler obtenues le 23 juin 2005 à 16 h 00 TU lors d'orages particulièrement violents ayant provoqué d'importantes inondations dans les quartiers ouest de Paris. Le panneau du haut montre des images panoramiques de type PPI de (b) vitesse radiale et (a) réflectivité obtenues à une élévation de 0,4°, par le radar de Trappes, situé à une trentaine de kilomètres au sud-ouest de Paris. Pour faciliter le repérage, des cercles concentriques sont placés depuis le centre vers l'extérieur tous les 20 km. L'altitude correspondante, qui augmente à mesure que l'on s'éloigne du radar, est également indiquée. Sur l'image de vitesse radiale (a), les couleurs bleues correspondent à des vitesses négatives, c'est-à-dire à des cibles se dirigeant vers le radar, situé au centre. Sur le panneau du bas, on représente le champ de vent 3D obtenu au même instant après combinaison des données du radar de Trappes et des radars d'Abbeville et d'Arcis, situés respectivement à 180 km au nord et 180 km à l'est de Trappes. La figure 6c montre une coupe horizontale du vent (vecteurs) superposé au champ de réflectivité composite à une altitude de 2 km et sur un domaine de 160 x 160 km² centré sur le radar de Trappes. La figure 6d présente une coupe verticale de ces mêmes champs le long du méridien 2° E. Cette restitution est effectuée à partir des PPI correspondant aux angles d'élévation donnés dans le tableau 1.

Domaine expérimental

Dans le but de tester la faisabilité de ce projet, une zone test centrée sur la région parisienne a été définie à la fin de l'année 2006, afin d'évaluer la qualité des champs de vent ainsi obtenus et d'estimer plus précisément le coût de ce produit en termes de temps de calcul. Cette zone expérimentale est centrée sur le radar de Trappes et couvre un domaine de 320 km x 320 km sur l'horizontale (résolution de 2,5 km) et 12 km

sur la verticale (résolution de 500 m). Le choix de ce domaine a été effectué en fonction des zones de recouvrement radar alors effectives (figure 5b), mais également en coordination avec l'équipe de recherches en prévision immédiate de Météo-France qui a besoin, dans le cadre de son implication dans le programme européen Flysafe, de données de vent et de réflectivité à haute résolution spatio-temporelle au voisinage des aéroports parisiens. À l'heure actuelle, ce domaine est couvert par les radars

Apport des restitutions 3D

Le mode d'affichage le plus utilisé pour visualiser les données issues de radars précipitation est appelé PPI [Plan Position Indicator] en référence au mode de balayage du même nom, qui consiste à effectuer des rotations complètes de l'antenne à angle d'élévation constant, c'est-à-dire à angle de visée constant par rapport à l'horizon. Sur les représentations de ce type, le radar est situé au centre de l'image et les échos sont positionnés en fonction de l'azimut (qui définit la direction de visée du faisceau radar) et de la distance au radar. Du fait de la rotondité de la Terre et de l'effet de l'angle d'élévation, l'altitude réelle de la mesure augmente avec la distance au radar. Cela rend l'interprétation de ces images souvent délicate. Les images de réflectivité et de vitesse radiale présentées figure 6 illustrent particulièrement bien les difficultés d'interprétation inhérente à ce type de représentation. De fait, si l'image de réflectivité radar (figure 6a) permet de se faire rapidement une

idée précise de la structure et de l'intensité des précipitations – on note ici la présence de nombreuses cellules convectives très intenses sur la région Île-de-France –, l'interprétation de la circulation associée à partir de l'image de vitesse radiale (figure 6b) se révèle beaucoup moins triviale et nécessite de bonnes connaissances en météorologie radar.

Pour avoir une bonne représentation 3D du système précipitant, on l'observe successivement en effectuant des tours d'antenne à angles d'élévation différents. Si les données 3D ainsi obtenues peuvent être facilement assimilées dans les modèles numériques de prévision au moyen d'opérateurs d'assimilation spécifiques, elles restent en revanche très difficiles à interpréter pour un observateur. Un grand intérêt des analyses multi-Doppler est de fournir rapidement et simplement, à l'expert comme au non-spécialiste, une représentation globale de la structure 3D de l'écoulement dans les régions précipitantes (figure 6c). Ces restitutions permettent, de fait, d'accéder également à la structure verticale de l'écoulement. La coupe verticale au travers d'un des cumulonimbus échantillonnés (figure 6d) montre ainsi très clairement l'existence d'une forte convergence et de courants ascendants bien marqués à l'avant de la cellule. Ces courants vont par la suite s'étaler en altitude (phénomène dit de « détraînement ») et donner ainsi naissance à l'enclume du nuage. On détecte également la présence d'une « bande brillante » vers 3 kilomètres d'altitude résultant de la fonte des flocons de neige près de l'isotherme 0 °C. Cette bande brillante indique la formation d'une région de précipitation stratiforme à l'arrière de la cellule orageuse résultant de la dissipation d'anciennes cellules orageuses. De façon générale, la connaissance de la structure verticale de l'écoulement qui traduit, entre autres choses, le degré de maturité et de sévérité d'une cellule orageuse est totalement inaccessible à partir des images classiques de type PPI.

Doppler de Trappes, Abbeville, Arcis-sur-Aube (Troyes), Avesnes et Falaise (Caen). On note (figure 7) que les zones de recouvrement à l'intérieur de ce domaine sont hétérogènes. La couverture est ainsi relativement limitée dans les basses couches (altitudes inférieures à 1 500 m), mais bien plus significative à mi-niveau où de nombreuses zones de recouvrement à quatre et cinq radars sont disponibles. La stratégie d'échantillonnage de chaque radar est donnée dans le tableau 1.

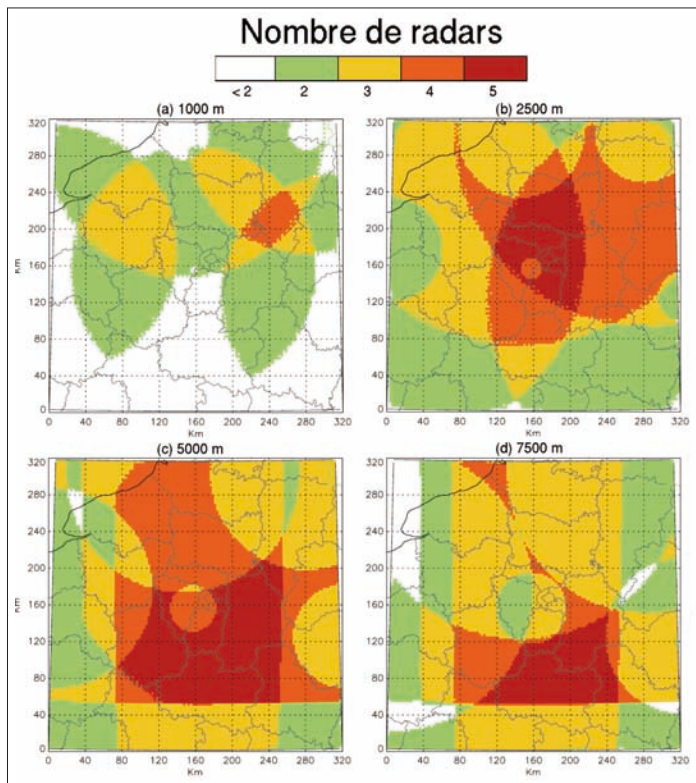


Figure 7 - Détail de la couverture dual- et poly-Doppler propre au domaine expérimental montré sur la figure 5b aux altitudes de (a) 1 000 m, (b) 2 500 m, (c) 5 000 m et (d) 7 500 m. L'adjonction dans la chaîne de traitement du radar de Bourges, situé à 180 km au sud de Trappes, va prochainement permettre d'augmenter significativement la couverture en basses couches.

Traitement et analyse des données

Les données collectées par les cinq radars couvrant la région parisienne sont centralisées et analysées automatiquement en temps réel tous les quarts d'heure. Ces données consistent en des images de type PPI de réflectivité et de vitesse radiale projetées sur une grille cartésienne de 1 km² de résolution. Dans un premier temps, l'information sur la variance de l'énergie du signal radar reçu est utilisée pour éliminer les échos fixes et autres artefacts des champs de réflectivité et de vitesse radiale. Ces dernières sont ensuite filtrées et synchronisées par rapport à la fin du quart d'heure considéré afin d'atténuer les erreurs résultant de la non-simultanéité de la mesure (voir Bousquet et al., 2007, pour de plus amples détails sur la chaîne de traitement). Une fois les données prétraitées, on applique la méthode d'analyse variationnelle Muscat [Multiple-Doppler Synthesis and Continuity Adjustment Technique] afin de reconstituer le champ de vent tridimensionnel sur tout le domaine expérimental (encadré ci-contre). En moyenne, le décodage, l'interpolation et l'analyse des données dans ce domaine (375 000 points)

| Radar / # Tour | Trappes | Arcis | Falaise | Abbeville | Avesnes |
|----------------|---------|-------|--------------|--------------|--------------|
| 1 | 90 | 4,0 | 1,6 | 0,4 | 1,6 |
| 2 | 7,5 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,0 |
| 3 | 0,8 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| 4 | 1,5 | - | - | - | - |
| 5 | 4,5 | - | - | - | - |
| 6 | 0,4 | - | - | - | - |
| 7 | 9,5 | 3,0 | | | |
| 8 | 6,5 | 1,1 | | | |
| 9 | 0,8 | 0,4 | Cycle répété | Cycle répété | Cycle répété |
| 10 | 1,5 | - | | | |
| 11 | 3,6 | - | | | |
| 12 | 0,4 | - | | | |
| 13 | 8,5 | 2,0 | | | |
| 14 | 5,5 | 1,1 | | | |
| 15 | 0,8 | 0,4 | Cycle répété | Cycle répété | Cycle répété |
| 16 | 1,5 | - | | | |
| 17 | 2,5 | - | | | |
| 18 | 0,4 | - | | | |

Tableau 1 - Stratégie d'échantillonnage des radars Doppler du réseau Aramis couvrant la région parisienne en janvier 2007. Tours d'antenne (PPI) et angles d'élévation correspondants. Les tours d'antenne utilisés dans l'analyse 3D sont indiqués en gras.

Restitution du champ de vent 3D

La restitution du champ de vent 3D en chaque point d'un domaine d'analyse donné nécessite la connaissance d'au moins trois équations indépendantes reliant les composantes u , v et w de la vitesse de l'air en tout point. La première relation étant fournie par l'équation de continuité (prise sous sa forme anélastique), deux radars Doppler sont donc théoriquement suffisants pour reconstruire un champ de vent complet dans la zone d'échantillonnage commune aux deux instruments (on parle alors de restitutions « dual-Doppler »). Il est bien évidemment possible de travailler également avec un plus grand nombre de radars, ce qui permet d'améliorer la qualité des vents obtenus et d'augmenter la taille du domaine de restitution. On parle alors de restitutions « multiple- ou poly-Doppler ». De façon générale, il existe à ce jour un grand nombre de méthodes d'analyse permettant de restituer le vent 3D à partir de mesures par radar Doppler. Les plus couramment utilisées sont les méthodes dites « cartésiennes » qui, comme leur nom l'indique, reposent sur l'utilisation d'un repère cartésien dont les dimensions et les résolutions horizontale et verticale sont spécifiées par l'utilisateur. L'approche cartésienne, initialement proposée par Heymsfield (1978), est relativement simple dans sa mise en œuvre et peu coûteuse en temps de calcul, ce qui explique qu'une grande majorité des expérimentateurs y aient recours. La méthode Muscat utilisée dans le cadre de ce travail est une version élaborée des méthodes cartésiennes classiques (itératives) autorisant la restitution simultanée des trois composantes du vent (u, v, w) au sein des systèmes précipitants en mode dual- ou poly-Doppler. Cette méthode variationnelle a été initialement proposée par Bousquet et Chong (1998) dans le but de pallier les principaux défauts des techniques d'analyse itératives utilisées dans le traitement des données issues de radars Doppler aéroportés. Elle a ensuite été adaptée aux radars « sol » dans le cadre de la phase terrain de la campagne expérimentale MAP pendant laquelle elle a été utilisée dans un contexte semi-opérationnel pour guider, en temps réel, les avions de recherche vers les principales zones d'intérêt (Chong et al., 2000).

De façon générale, Muscat repose sur la minimisation (au sens des moindres carrés), plan horizontal par plan horizontal, d'une fonctionnelle s'exprimant sous la forme de trois termes définis comme les contraintes d'ajustement aux données, d'ajustement à l'équation de continuité et de régularité. Son exécution nécessite la définition préalable d'une grille tridimensionnelle permettant l'interpolation des données et la discrétisation des différents champs et intégrales pris en compte dans l'analyse. Ce processus d'interpolation étant réalisé indépendamment de la reconstruction du champ de vent, celui-ci peut être adapté à différents types de mesures et permet de traiter simultanément les données de tout type de radars Doppler (fixes ou mobiles). Suite aux modifications apportées par Chong et Cosma (2000), cette approche permet également de travailler indifféremment en plaine ou en région montagneuse, ce qui en fait un algorithme polyvalent et bien adapté à une utilisation opérationnelle. D'autres modifications ont également été apportées récemment, afin de pouvoir appliquer ce formalisme dans un cadre opérationnel, caractérisé par des distances (interradar) de l'ordre de 200 km (Bousquet et al., 2008a).

nécessitent entre 90 et 120 secondes de calcul sur un serveur Linux biprocesseur cadencé à 1,8 GHz, ce qui est tout à fait compatible avec un fonctionnement opérationnel en temps réel.

Exemples de restitutions

Passage frontal sur la moitié nord de la France

Les 13 et 14 février 2007, un système frontal associé à des pluies particulièrement persistantes a traversé la moitié nord de la France et a été échantillonné en temps réel pendant plus de vingt-quatre heures par l'ensemble des cinq radars Doppler du réseau couvrant le domaine expérimental. La figure 8 présente les champs de vent et de réflectivité à une altitude de 2 km déduits des analyses polyradar à différents instants de la journée du 14 février. Lors des douze premières heures d'observation, le système était globalement caractérisé par des précipitations faibles à modérées se développant dans un flux de sud-ouest relativement uniforme. Vers 12 h 00 TU, on observe cependant une rotation très marquée du vent au-dessus de la mer du Nord, qui coïncide avec l'arrivée du front dans le domaine expérimental. On peut également observer une forte discontinuité dans la zone frontale à travers la présence d'un flux de nord-ouest relativement faible à l'arrière (de 5 à 10 m.s⁻¹) et d'un flux de sud-ouest plus marqué (~25 m.s⁻¹) à l'avant. Ces observations sont relativement cohérentes avec les analyses de surface. Quelques heures plus tard, le front a nettement progressé vers l'est, comme le montre la présence d'un flux de nord-ouest sur plus de la moitié du domaine. Vers 16 h 00 TU, il a atteint la limite est du domaine d'analyse et le flux de nord-ouest est désormais bien établi sur l'ensemble de la moitié nord de la France. Bien que de nombreux systèmes frontaux aient déjà été échantillonnés et étudiés au moyen de radars de recherche dans le cadre de diverses campagnes expérimentales (Fronts97, Fastex), c'est la première fois que de tel-

les observations sont réalisées à partir d'une infrastructure purement opérationnelle. La reconstitution en temps réel et entièrement automatisée du champ de vent dans ce système – mais plus généralement au sein de tous les systèmes précipitants passés sur la moitié nord de la France depuis le début de l'année 2007 – ouvre bien évidemment des perspectives très alléchantes en matière de prévision à courte échéance. On pourra citer la possibilité d'estimer en tout point de l'espace la vitesse et la direction du vent en fonction de l'altitude ou, plus ponctuellement, de placer en temps réel, et à une fréquence de répétition élevée, la position des fronts sur un vaste domaine. Au regard des méthodes d'observation classiques de type radiosondage ou VAD, qui ne peuvent fournir que des profils verticaux en un point, et même si ces champs de vent restent pour l'instant limités aux zones pluvieuses, il s'agit d'une avancée significative dans le domaine de la prévision.

Si les champs de vent reconstitués dans le cadre du réseau Aramis semblent cohérents d'un point de vue qualitatif, une évaluation quantitative reste néanmoins nécessaire dans le but de valider ce nouvel outil. Cette étape est néanmoins très compliquée du fait qu'il n'existe pas, à ce jour, de moyens d'observation capables de fournir ces informations à la résolution spatio-temporelle des radars Doppler. La figure 9 illustre une tentative

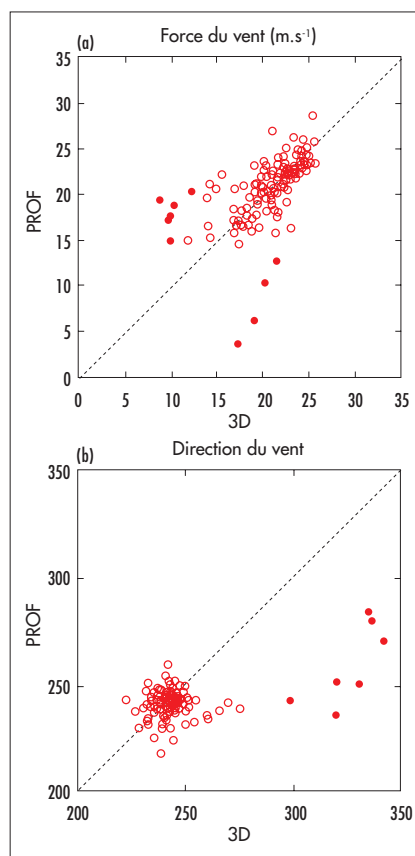


Figure 9 - Étude comparative de la vitesse (a) et de la direction (b) du vent obtenues par analyse poly-Doppler 3D (abscisse) et profilier VHF (ordonnée) à La Ferté-Vidame entre 00 h TU et 15 h TU, le 14 février 2007. Toutes les données comprises entre 1 000 m (niveau des premières observations par profilier) et 3 500 m (sommet des nuages) sont tracées. Les données collectées entre 12 h TU et 15 h TU sont représentées par des cercles pleins.

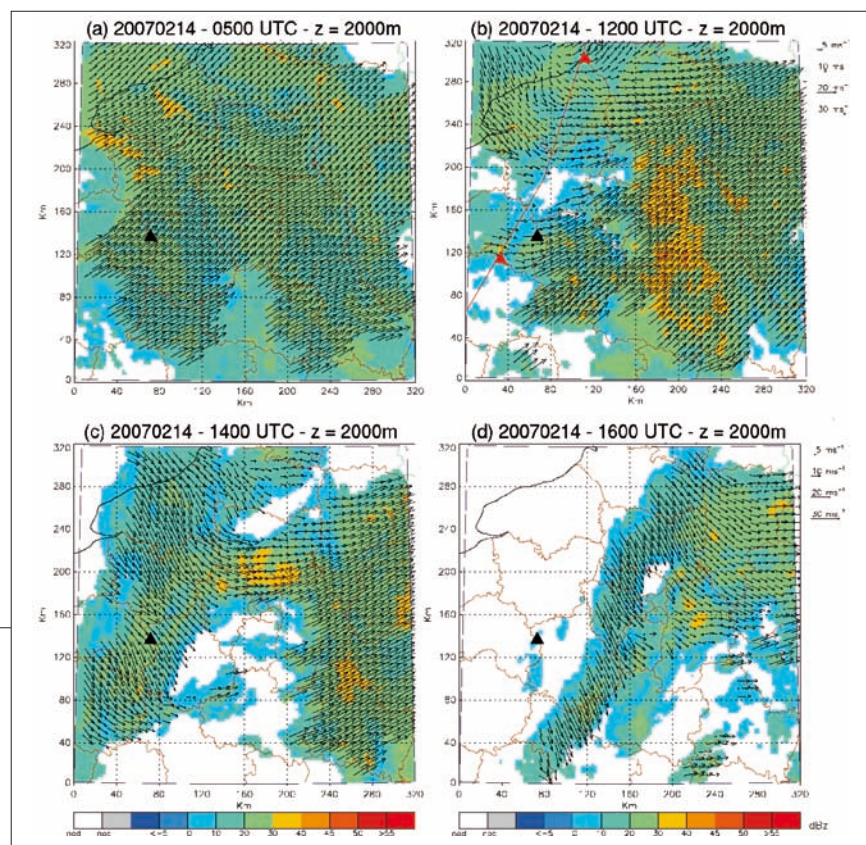


Figure 8 - Champs de vent horizontal (vecteurs) et champs de réflectivité à 2 km d'altitude obtenus à partir des radars de Trappes, Falaise, Arcis, Abbeville et Avesnes le 14 février 2007, à (a) 05 h TU, (b) 12 h TU, (c) 14 h TU et (d) 16 h TU. Le triangle noir indique la position approximative du profilier de vent VHF opérationnel de La Ferté-Vidame. La position du front déduite des analyses de surface à 12 h TU est également indiquée en (b).

de validation reposant sur une comparaison avec les données du radar profileur de vent VHF de La Ferté-Vidame en Eure-et-Loir. De façon générale, l'accord entre les deux jeux de données est globalement satisfaisant, même si l'on peut noter des écarts non négligeables entre 12 h 00 et 15 h 00 TU, période qui correspond approximativement au passage du front au-dessus du profileur. Ces différences sont liées à la différence de représentativité temporelle des jeux de données. Les données du profileur sont ainsi moyennées sur une heure, alors que les champs radar s'apparentent plus à un instantané. De fait, lorsque les variations du vent sont trop importantes – ce qui est le cas lors du passage d'un front –, la faible résolution temporelle du profileur ne permet pas d'effectuer une comparaison objective avec les champs 3D déduits des analyses poly-Doppler. Si l'on élimine de la comparaison les données correspondant à cette période, on obtient alors une différence moyenne de $0,87 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (vitesse du vent) et 3° (direction du vent) avec un écart quadratique moyen de $2,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ et 10° , ce qui est remarquable. Le fait de moyennner les données issues des analyses poly-Doppler sur une heure permet également de gommer les différences liées à la représentativité temporelle des deux jeux de données.

La ligne de grain du 25 mai 2007

Le 25 mai 2007 en fin d'après midi, des orages extrêmement violents organisés en un système de type « ligne de grains » s'abattent sur la région parisienne, provoquant la fermeture des aéroports Orly et Charles-de-Gaulle pendant plusieurs heures. À Paris, la température chute de 10°C en quelques minutes et des rafales de vent de plus de 100 km/h balayent la capitale. Le cycle de vie et l'évolution de ce système précipitant sont représentés sur la figure 10 à travers quelques instantanés dérivés des analyses « temps réel ». On y aperçoit très bien un ensemble de cellules orageuses organisées en ligne se développant dans un flux de sud-ouest bien marqué. Le système initialement de type « quasi linéaire » va progressivement se transformer en un système de type ligne de grains avant de se courber et perdre en intensité. La particularité de ce système est qu'il appartient à un type de phénomènes météorologiques particulièrement violents caractérisés par une courbure en forme d'arc dans la région convective. Ces systèmes nuageux, appelés « bow-shaped » ou « bow echo » en anglais, sont connus pour

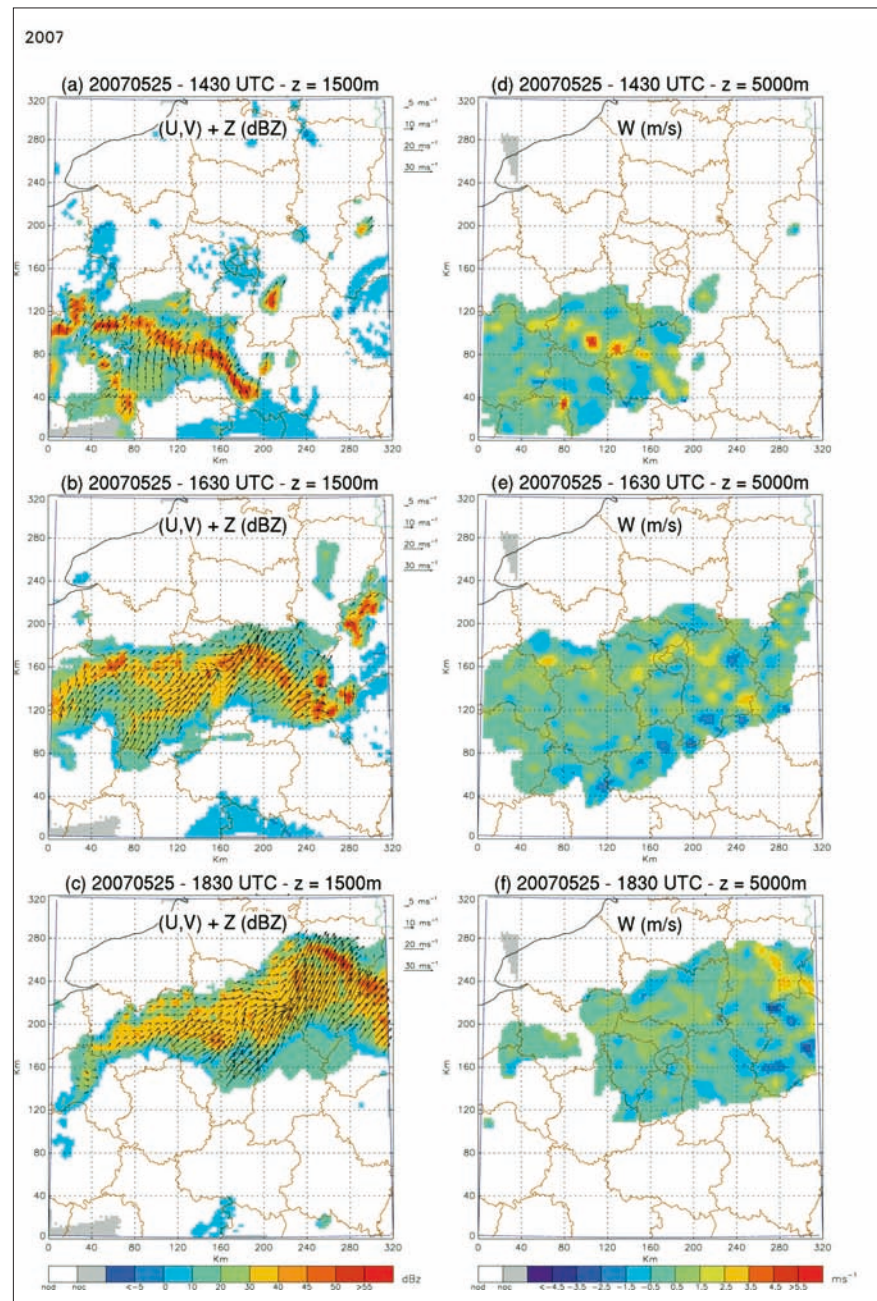


Figure 10 - Restitutions poly-Doppler 3D obtenues à partir des radars de Trappes, Falaise, Arcis, Abbeville et Avesnes le 25 mai 2007 à 14 h 30 TU, 16 h 30 TU et 18 h 30 TU. Panneau de gauche : champs de vent horizontal (vecteurs) et champs de réflectivité à 1,5 km d'altitude. Panneau de droite : champs de vitesse verticale à une altitude de 5 km (altitude du maximum de vitesse verticale). On notera plus particulièrement le très bon accord entre les échos de réflectivité maximales, à l'avant de la ligne, et les maxima de vitesse verticale.

provoquer d'énormes dégâts et être à l'origine de puissantes tornades. Ils sont, pour cette raison, soumis à une attention particulière et ont fait l'objet d'une importante campagne expérimentale durant l'été 2003 dans la région centrale des États-Unis (Missouri, Iowa, Illinois), la campagne BameX [Bow-echo and Mesoscale Convective Vortex Experiment], (Davis et al., 2004). De façon générale, les caractéristiques du vent restitué sont en bon accord avec les modèles conceptuels et les observations passées portant sur ce type de phénomènes. On observe, par exemple, un

maximum du flux à 1 500 m au niveau de la région courbée qui est typique de l'écoulement associé à ce type de système. On peut également noter l'excellente cohérence du champ de vitesses verticales, qui révèle que les régions d'ascendance les plus fortes sont localisées à l'avant de la ligne, là où sont précisément observés les maxima de réflectivité. Ces mouvements ascendants sont maximisés à 14 h 30 ($5\text{--}6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), lorsque la ligne de grain entre dans sa phase mature. Ceux-ci vont ensuite progressivement diminuer, mais restent néanmoins significatifs.

L'obtention d'information sur l'intensité de la vitesse verticale, qui est un excellent indicateur du degré de sévérité d'un système convectif, présente bien évidemment un intérêt non négligeable du point de vue de la prévision à très courte échéance. Un important travail de validation reste néanmoins nécessaire dans le but d'utiliser ce nouveau type de données en prévision. La validation à partir de données réelles est cependant délicate car il n'existe, comme vu précédemment, aucun moyen de mesure *in situ* fiable auquel comparer le vent restitué aux échelles spatio-temporelles considérées. Une alternative à ce problème consiste à simuler l'échantillonnage radar d'un champ de vent 3D connu (champ de vent analytique ou sortie d'un modèle numérique de prévision) et de comparer le champ restitué au champ de référence. Bien que cette approche ne permette pas de valider la mesure au sens strict, elle permet néanmoins d'estimer les incertitudes sur l'estimation des composantes du vent liées à la géométrie de l'échantillonnage et à la technique de restitution.

Simulations numériques

Les simulations numériques permettent de caractériser les erreurs sur les composantes du vent restituées et d'identifier d'éventuels biais dans la méthode de reconstitution du vent 3D. Elles permettent également d'étudier, à moindre coût, l'impact qu'aurait une modification du réseau (changement de mode d'exploitation, ajout d'un ou plusieurs radars) sur la qualité des champs de vent restitués. Dans cette partie, nous utilisons des données de réflectivité et de vent déduites d'une simulation numérique de l'orage du

23 juin 2005, réalisée au moyen du modèle de recherche Més0-NH (Lafore et al., 1998), pour simuler un échantillonnage radar ayant les mêmes caractéristiques qu'un échantillonnage réel. Les données simulées consistent en des PPI de réflectivité et de vitesse radiale en tout point similaires à des données réelles. Ces données simulées sont dans un premier temps bruitées afin de rendre l'échantillonnage plus réaliste, puis traitées exactement comme le seraient des données réelles (filtrage, interpolation). Il faut néanmoins signaler que ces simulations ne reproduisent pas toutes les erreurs. Les effets dus au filtrage par le faisceau, à la non-simultanéité des mesures ou encore à la présence de données de mauvaise qualité ne sont, par exemple, pas prises en compte pour des raisons de simplicité.

La figure 11 montre des coupes horizontales, à 2 500 m et 6 000 m d'altitude, du champ de vent de référence (Més0-NH) et du champ reconstruit au moyen des cinq radars Aramis couvrant la région parisienne. De façon générale, les composantes horizontales du vent *u* et *v* (vecteurs) sont parfaitement restituées par la méthode d'analyse et cela, quelle que soit l'altitude considérée. On note également que les zones d'ascendance et de subsidence sont globalement correctement restituées et que les maxima et minima sont

généralement bien positionnés. D'un point de vue quantitatif, le champ de vitesse verticale est cependant nettement sous-estimé par rapport au champ de référence. Cela s'explique, entre autres, par la stratégie d'échantillonnage des radars, qui ne permet pas d'échantillonner correctement la composante verticale de la vitesse de l'air, et par l'absence de couverture dans les basses couches (due à l'espacement entre les radars) où se situe généralement le maximum d'énergie. De nouvelles simulations permettent de quantifier plus précisément l'impact de ces deux facteurs sur la reconstruction du champ de vitesse verticale : dans un premier temps, on simule une stratégie d'échantillonnage volumique consistant à modifier virtuellement le mode d'exploitation des radars, en ajoutant des angles d'élévation supplémentaires (ce qui permet de mieux prendre en compte la composante verticale de la vitesse de l'air dans le calcul de la vitesse radiale). Dans un deuxième temps, on ajoute virtuellement un nouveau radar à quelques dizaines de kilomètres du radar de Trappes, ce qui permet de mieux échantillonner les basses couches. Les résultats de ces simulations sont montrés sur la figure 12. On constate ainsi que le passage à un mode d'échantillonnage volumique permet d'améliorer sensiblement la qualité du champ de vitesse verticale obtenu,

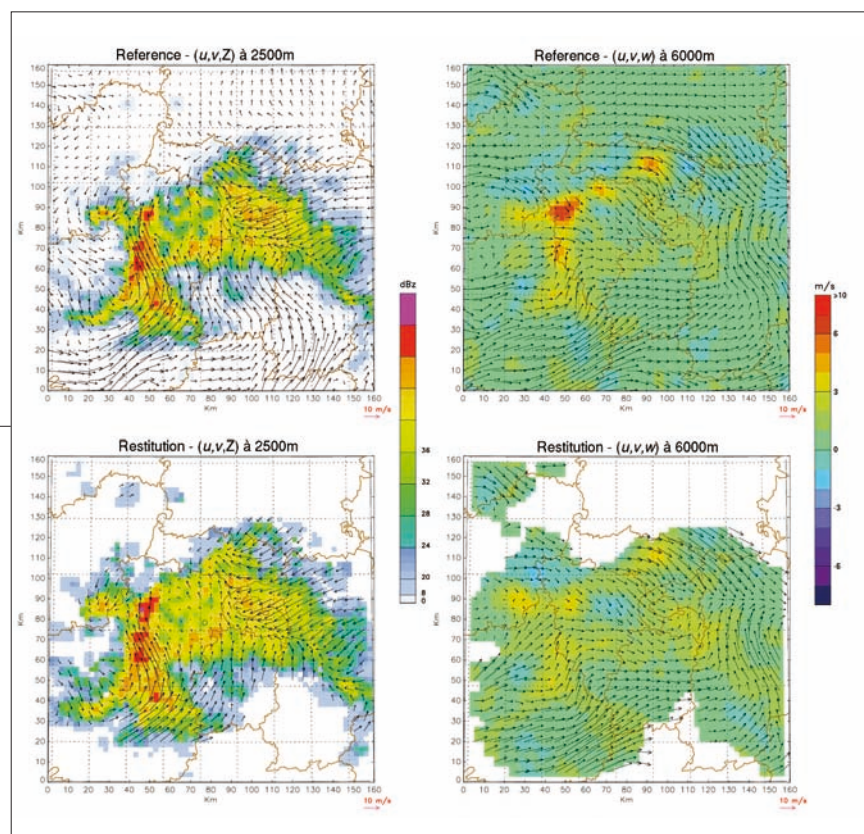


Figure 11 - Simulations radar visant à quantifier les erreurs liées à la géométrie de l'échantillonnage.

Panneau du haut : coupes horizontales de vent et réflectivité (resp. vent et vitesse verticale) à 2,5 km (resp. 6 km) déduites d'une simulation numérique du cas du 23 juin 2005 par le modèle Més0-NH (référence).

Le panneau du bas représente les mêmes quantités obtenues après application des algorithmes de traitement utilisés pour reconstituer le champ 3D (restitution).

Les données radar simulées utilisées pour cette restitution sont obtenues en effectuant un échantillonnage des champs de référence ayant les mêmes caractéristiques que l'échantillonnage réel. Le domaine d'étude est ici limité à 160 km x 160 km.

même si l'on note toujours une sous-estimation de w dans les régions convectives et une légère sur-estimation dans la partie stratiforme du système. L'ajout d'un radar supplémentaire permet, en revanche, de résoudre ce problème et d'obtenir un champ très proche du champ de référence. Ces résultats sur la restitution de la composante verticale doivent néanmoins être considérés avec beaucoup de prudence car d'autres facteurs plus techniques entrent également en ligne de compte dans son estimation (le lecteur est renvoyé à Bousquet et al., 2008a pour plus de détails sur l'estimation de w dans ce cadre expérimental). En ce qui concerne le vent horizontal, les résultats obtenus dans le cadre de ces simulations donnent une assez bonne idée de l'incertitude sur les composantes u et v . Une étude statistique réalisée à partir de ces données simulées montre que l'erreur moyenne sur les composantes horizontales du vent dans les basses couches ($< 1,5$ km) se situe aux alentours de 2 m.s^{-1} et l'erreur quadratique moyenne (EQM) aux alentours de 4 m.s^{-1} . L'erreur décroît ensuite avec l'altitude pour se stabiliser aux

alentours de $0,2 \text{ m.s}^{-1}$ entre 2,5 et 11 km d'altitude (EQM $< 1,5 \text{ m.s}^{-1}$). Le recours à un échantillonnage volumique n'a que peu d'influence sur la qualité des composantes horizontales du vent restitué, mais permet cependant d'améliorer sensiblement la couverture spatiale au-dessus de 10 km d'altitude. Si l'installation d'un radar supplémentaire en région parisienne n'est pas prévue à court terme, le passage à un mode d'exploitation volumique est cependant à l'étude et pourrait être bientôt déployé sur l'ensemble du réseau.

À plus long terme

L'objectif à moyen terme (2009) est de généraliser cette analyse à l'ensemble du réseau, afin de produire une mosaïque radar opérationnelle de vent et réflectivité 3D, couvrant l'ensemble du territoire national. À noter que cette mosaïque 3D pourrait ultérieurement être étendue à l'ensemble de l'Europe, au travers de la prochaine mise en place, dans le cadre Eumetnet-Opera,

d'un datahub pour les radars européens. À cette mosaïque nationale viendront éventuellement s'ajouter des analyses régionales à échelle plus fine (de l'ordre du kilomètre) dans les régions où la densité du réseau est plus importante (principalement dans la région de Nîmes, voir figure 4), permettant ainsi aux prévisionnistes de mieux anticiper l'évolution à venir des événements pluvieux observés. Plus généralement, ces

données pourront être utilisées aussi bien pour des applications de type recherche (études de cas, études statistiques, campagnes expérimentales comme le projet Hymex) qu'opérationnelles (prévision immédiate, sécurisation de la navigation aérienne, modélisation numérique). À cet égard, une application particulièrement prometteuse est celle liée à la vérification des vents et structures dynamiques de moyenne échelle prévus par les nouveaux modèles de prévision à haute résolution, tel le modèle Arome de Météo-France (Bouttier, 2007). Une étude prospective fondée sur la comparaison des vents à échelle fine prévus par Arome et des vents radar sur les cas présentés ici est disponible dans l'article de Bousquet et al. (2008b).

Des études sont également en cours dans le but d'appliquer ce type de restitution aux zones non pluvieuses (on parle alors de restitutions en ciel clair, voir l'encadré sur le VAD) lorsque les conditions matérielles (densité du réseau localement suffisante) et naturelles (présence d'insectes ou d'aérosols) s'y prêtent. Cet aspect est particulièrement important dans le but de mieux décrire l'état pré-convectif de l'atmosphère et d'identifier précisément les cisaillements, lignes de convergence ou autres tourbillons, qui sont souvent d'excellents précurseurs de la convection atmosphérique. La disponibilité de restitutions 3D en air clair permettra de mieux caractériser la couche limite en milieu urbain et de quantifier les échanges entre les villes et l'atmosphère, qui constitue aujourd'hui un axe de recherche majeur en prévision numérique du temps. Ces données pourront également être exploitées ponctuellement en complément de moyens d'observations plus classiques de type radiosondages, profils VAD ou données de profileurs de vent pour le suivi et la prévision de la qualité de l'air.

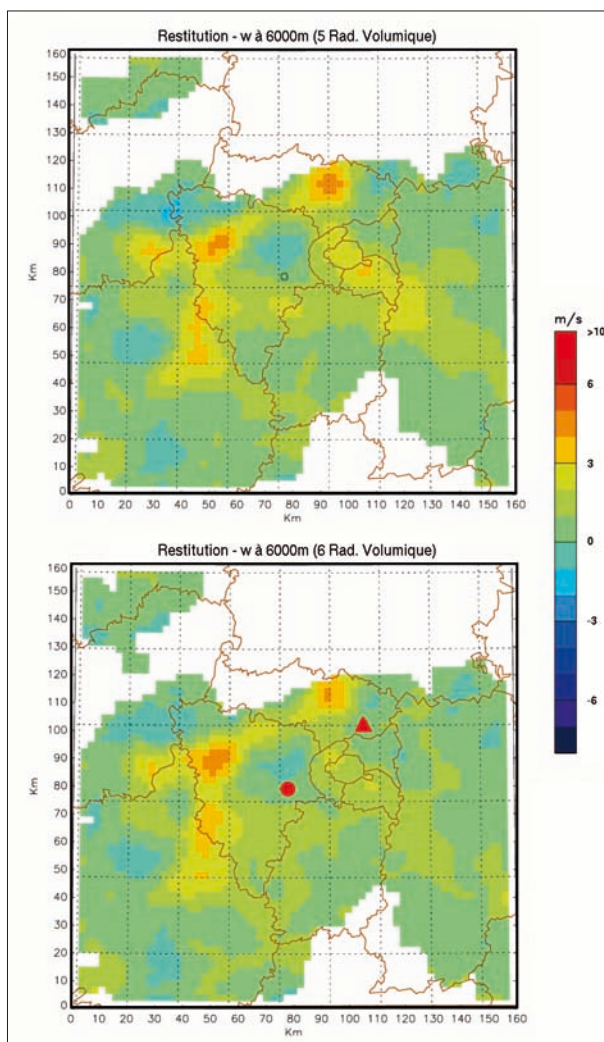


Figure 12 - Champ de vitesse verticale reconstruit à 6 km d'altitude, obtenu en simulant un échantillonnage volumique (haut), puis en ajoutant un radar virtuel (triangle rouge) situé près de l'aéroport Charles-de-Gaulle (bas). L'échantillonnage volumique se différencie de l'échantillonnage réel par l'adjonction de tours d'antenne (PPI) supplémentaires sur tous les radars, sauf Trappes, ce qui permet de mieux échantillonner la structure verticale de l'écoulement. Dans cette configuration, on suppose que les cinq radars fonctionnent tous selon le mode d'exploitation de Trappes (rond rouge), qui comporte onze angles d'élévation distincts (compris entre $0,4^\circ$ et 9°) par 15 minutes (tableau 1). Dans la réalité, ces radars n'effectuent qu'entre deux et cinq rotations distinctes par période de 15 minutes. Le champ de vitesse verticale correspondant à l'échantillonnage actuel est celui montré sur la figure 11. Lors de la simulation à six radars (bas), tous les radars fonctionnent selon le mode d'exploitation de Trappes.

Bibliographie

- **Bougeault P., E. Richard et F. Roux**, 2001 : L'expérience MAP sur les phénomènes de méso-échelle dans les Alpes. *La Météorologie*, 8^e série, 33, 16-33.
- **Bousquet O., P. Tabary et J. Parent-du-Châtelet**, 2008a : Operational multiple-Doppler wind syntheses inferred from long range Doppler velocity measurements. À paraître dans *J. Appl. Meteor. Clim.*
- **Bousquet O., T. Montmerle et P. Tabary**, 2008b : Using operationally synthesized multiple-Doppler winds for high resolution horizontal wind forecast verification. *Geophys. Res. Lett.*, DOI:10.1029/2008GL033975.
- **Bousquet O., P. Tabary et J. Parent-du-Châtelet**, 2007 : On the use of operationally synthesized multiple-Doppler wind fields. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L22813, DOI:10.1029/2007GL030464.
- **Bousquet O. et M. Chong**, 1998 : A multiple-Doppler synthesis and continuity adjustment technique (Muscat) to recover wind components from Doppler radar measurements. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 15, 343-359.
- **Bouttier F.**, 2007 : Arome, avenir de la prévision régionale. *La Météorologie*, 8^e série, 58, 12-20.
- **Browning K. A. et R. Wexler**, 1968 : The determination of kinematic properties of a wind field using Doppler radar. *J. Appl. Meteor.*, 7, 105-113.
- **Chong M. et al.**, 2000 : Real-Time Wind Synthesis from Doppler Radar Observations during the Mesoscale Alpine Programme. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 81, 2953-2962.
- **Chong M. et S. Cosma**, 2000 : A formulation of the continuity equation of Muscat for either flat or complex terrain. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 17, 1556-1565.
- **Davis C. et al.**, 2004 : The bow echo and MCV experiment: Observations and opportunities. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 85, 1075-1093.
- **Heymsfield G. M.**, 1978 : Kinematic and dynamic aspects of the Harrah tornadic storm analyzed from dual-Doppler data. *Mon. Wea. Rev.*, 106, 253-264.
- **Hitschfeld W. F.**, 1986 : The invention of radar meteorology. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 67, 33-37.
- **Lafore J.-P. et al.**, 1998 : The Meso-NH atmospheric simulation system. Part I: Adiabatic formulation and control simulations. *Ann. Geophys.*, 16, 90-109.
- **Maynard R. H.**, 1945 : Radar and weather. *J. Atmos. Sci.*, 2, 214-226.
- **Parent-du-Châtelet J., M. Guimera et P. Tabary**, 2003 : The Panthère Project of Meteo-France: Extension and upgrade of the French radar network. Preprints, 31st Int. Conf. on Radar Meteorology, Seattle, WA, Amer. Meteor. Soc., 802-804.
- **Parent-du-Châtelet J.**, 2003 : Le réseau français de radars pour la surveillance des précipitations. *La Météorologie*, 8^e série, 40, 44-52.
- **Sauvageot H.**, 1992 : *Radar meteorology*. Artech House, Eyrolles, Paris, 366 p.
- **Sauvageot H.**, 2000 : Le radar polarimétrique, une nouvelle approche pour l'observation des champs de précipitations. *La Météorologie*, 8^e série, 31, 25-41.
- **Tabary P., G. Scialom et A. Protat**, 2002 : Un radar météorologique Doppler : pour quoi faire ? *La Météorologie*, 8^e série, 38, 30-44.
- **Tabary P., F. Guibert, L. Perier et J. Parent-du-Châtelet**, 2006 : An operational triple-PRT scheme for the French radar network. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 23, 1645-1656.
- **Wakimoto M. R. et R. Srivastava**, 2003 : Radar and atmospheric science: A collection of essays in honor of David Atlas. *Meteorol. Monogr.*, 30, 52.
- **Zrnic D. S. et P. Mahapatra**, 1985 : Two methods of ambiguity resolution in pulsed Doppler weather radars. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 21, 470-483.