

# Aramis, le réseau français de radars pour la surveillance des précipitations

Jacques Parent du Châtelet

Météo-France - Direction des systèmes d'observation  
7, rue Teisserenc-de-Bort - BP 202 - 78195 Trappes  
jacques.parent-du-chatelet@meteo.fr

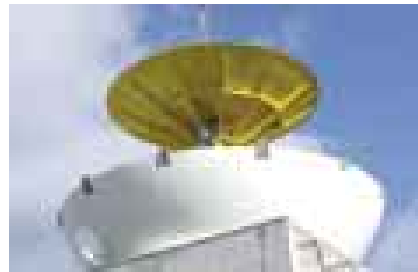


Figure 1 - Installation de l'aérien et du radôme du radar de Collobrières (Photo Météo-France, P. Taburet)

## Un réseau installé en deux phases

En métropole, Météo-France entretient actuellement un réseau de dix-huit radars météorologiques pour l'observation des précipitations, et des projets sont en cours pour en installer six autres. Cet article décrit ce réseau, appelé Aramis, les produits qu'il fournit, les problèmes de mesure associés ainsi que les évolutions envisagées.

Les radars météorologiques utilisent des ondes centimétriques sensibles aux gouttes d'eau dans trois bandes de fréquence réservées à l'usage météorologique : la bande S (de longueur d'onde  $\lambda = 10$  cm), la bande C ( $\lambda = 5$  cm) et la bande X ( $\lambda = 2$  cm). Les dimensions des aériens sont proportionnelles à la longueur d'onde. On a donc intérêt, pour des raisons évidentes de coût, à utiliser les longueurs d'onde les plus courtes ; mais celles-ci sont plus atténuées par la traversée de la pluie, ce qui limite la portée du radar. La bande X est donc en général réservée à l'observation locale ou aux études, la bande C est couramment utilisée pour l'observation en région tempérée et la bande S est préférée dans les régions où l'on risque des pluies très intenses (tropiques, zones soumises aux cyclones ou aux tornades). Comme les réseaux européens, le réseau canadien est

essentiellement constitué de radars en bande C, tandis que le réseau des États-Unis, plus particulièrement destiné à la prévention contre les tornades et les cyclones, est constitué de radars en bande S. Quant à lui, le réseau français est mixte : des radars en bande C au nord et des radars en bande S dans les régions de l'arc méditerranéen ou bien outre-mer.

Comme d'autres réseaux de radars (voir par exemple Serafin et al., 2000 ou Schreiber, 2001), le réseau Aramis s'est construit en deux phases : jusqu'en 1995, mise en place d'un réseau de détection des précipitations (Dalle et Béringer, 1994) ; puis, compte tenu de l'évolution des besoins et des progrès de la technologie, construction, encore en cours, d'un réseau de mesure de type hydrologique (figure 1).

## Avant 1995, le réseau de détection des précipitations

La démarche consistant à organiser les radars de Météo-France en un réseau cohérent, appelé Aramis (acronyme signifiant Application radar à la météorologie infra-synoptique), qui couvre l'ensemble du territoire métropolitain, remonte au milieu des années

## Résumé

Le réseau français de radars météorologiques est en plein développement. On décrit dans cet article sa situation actuelle et les évolutions prévues à court et moyen terme. Les produits fournis, ainsi que les principaux traitements appliqués aux signaux, sont brièvement présentés.

## Abstract

**Aramis, the French weather radar network**

The French weather radar network is now in a fully growth. The present network is described here as well as the developments planned for the near future. The operational products and the main signal processing schemes are presented.

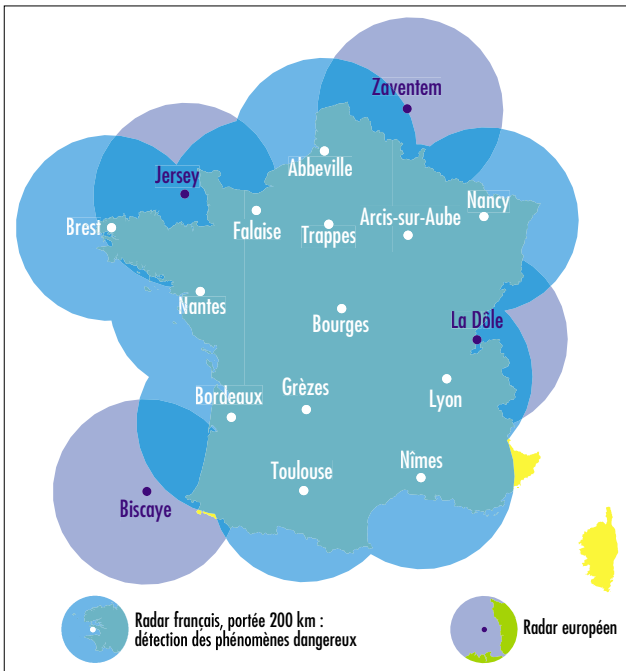


Figure 2 - Le réseau Aramis de radars météorologiques en 1995. En supposant que chaque radar assure la mesure à l'intérieur d'un cercle de 200 km de rayon, le territoire métropolitain était entièrement recouvert (à part l'extrême Sud-Est et la Corse), par les treize radars du réseau français et trois radars étrangers.

1980. Jusqu'en 1995, la couverture a progressivement été portée à treize radars, en même temps qu'ont été construits les premiers systèmes permettant d'assurer la concentration et la diffusion de leurs données. La figure 2 illustre la configuration de ce premier réseau. La portée théorique y est représentée par des cercles de rayon 200 km, centrés sur les positions des radars.

L'objectif était alors de permettre une signalisation à cadence rapide des phé-

nomènes précipitants pour les prévisionnistes. Le mode d'exploitation était bien adapté à cet objectif : fonctionnement panoramique des radars, avec un angle d'élévation inférieur au degré pour observer au plus près du sol ; vitesse de rotation lente de 5° par seconde, à la fois pour garantir une bonne qualité de mesure et pour ménager les parties mécaniques du radar ; enfin, production d'une image plane de réflectivité autour de chaque radar avec une cadence de 5 minutes. Ce

réseau était constitué de radars d'origines diverses. Les plus anciens sont les quatre radars Mélodi en bande S, fournis par la société Omera (aujourd'hui disparue) pour Nîmes, Brest, Bordeaux et Grèzes ; viennent ensuite les sept radars Rodin en bande C, construits par Thomson, pour Trappes, Abbeville, Nantes, Bourges, Nancy, Lyon et Toulouse ; les derniers équipés sont les deux radars en bande C, fournis par le constructeur allemand Gematronik, pour Falaise et Arcis-sur-Aube.

### Image composite et applications de la détection des précipitations

La cohérence était assurée par une interface commune, le système Castor construit par Météo-France et ayant pour fonction de commander le radar, de surveiller son état, de traiter les données et de transmettre les images en un point central.

Le logiciel Sycomore a été développé pour concentrer ces données à Toulouse et produire toutes les quinze minutes une image mosaïque (ou image composite), de résolution 1,5 km x 1,5 km, constituée à partir de tous les radars et diffusée aux utilisateurs par satellite. Cette image s'est petit à petit enrichie, grâce à la coopération européenne dans le cadre du programme Opera<sup>(1)</sup> d'Eumetnet, par la prise en compte des images des radars des pays voisins (auxquels sont communiquées bien sûr les images d'Aramis).

Dans l'exemple de la figure 3, l'image individuelle du radar de Bollène montre une large bande pluvieuse orientée nord-sud. Au même instant, l'image composite révèle que cette bande pluvieuse fait partie d'un système météorologique plus important qui intéresse tout le pays. Des fonctions d'animation permettent aussi aux prévisionnistes d'anticiper par continuité l'arrivée de la pluie avec quelques dizaines de minutes d'avance.

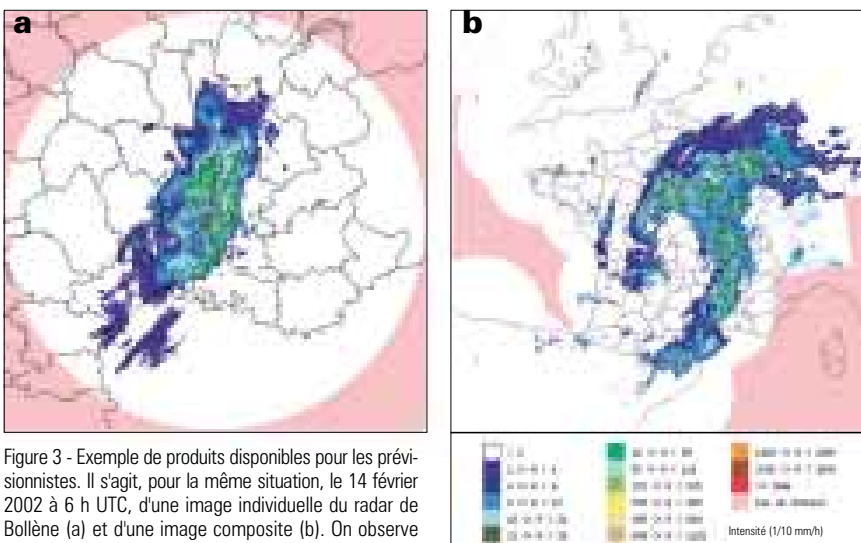


Figure 3 - Exemple de produits disponibles pour les prévisionnistes. Il s'agit, pour la même situation, le 14 février 2002 à 6 h UTC, d'une image individuelle du radar de Bollène (a) et d'une image composite (b). On observe une vaste zone pluvieuse sous la forme d'un enroulement allant des Pyrénées-Orientales au Bassin parisien et de la Lorraine au Poitou. Ces pluies semblent localement modérées, notamment dans le couloir rhodanien, sur la Lorraine et au sud de l'Île-de-France. On observe aussi une étroite bande de pluies apparemment faibles des Pays de la Loire à l'estuaire de la Gironde et des averses éparses sur le Cotentin, le nord de la Bretagne, les Landes et Midi-Pyrénées. Dans cette situation, l'image composite apporte des informations sur la Méditerranée (radars de Nîmes et d'Opoul) et sur le nord de la vallée du Rhône (radar de Lyon), où les intensités de précipitations sont bien plus marquées que sur les mesures du seul radar de Bollène

Aspoc est une autre application de la détection des précipitations qui a pour but d'améliorer la gestion du trafic aérien par la reconnaissance et la prévision immédiate des cellules convectives (encadré page suivante). Grâce à une visualisation des images radar, réduites à une information sur la présence de pluies intenses, le contrôleur aérien peut ainsi mieux comprendre les réactions d'évitement des cellules convectives par les pilotes.

### Maintenance et fiabilité

En matière de radar, les réseaux de surveillance opérationnelle les plus critiques, comme ceux du contrôle de trafic de la navigation aérienne,

(1) Opera : groupe de coordination, dans le cadre d'Eumetnet, pour le développement des échanges de produits des radars en Europe.

## Aspoc, une aide à la gestion de l'espace aérien

Utilisant les données des radars du réseau Aramis et les données de foudre issues du réseau Météorage, le logiciel Aspoc signale les zones orageuses d'une façon adaptée aux besoins du contrôle du trafic aérien (figures 4 et 5). Cet outil permet aux centres de contrôle aérien d'anticiper les déviations des trajectoires des avions occasionnées par la présence de zones orageuses et d'améliorer ainsi la gestion de l'espace aérien. Les contrôleurs disposent avec cet outil d'une information proche de celle obtenue par les pilotes sur le radar de bord.

Aspoc s'appuie sur les données radar avec une résolution spatiale d'un kilomètre et une résolution temporelle de cinq minutes et sur des données de foudre au pas de temps d'une minute. Une image prévue, appelée image Signora (Signalisation des orages), est fabriquée en extrapolant chacun des éléments de l'image observée à l'aide de vecteurs de déplacement déterminés en comparaison avec les images précédentes. Ainsi, toutes les cinq minutes, Aspoc propose aux centres de contrôle d'approche et aux centres de

contrôle en route français une image synthétique, à une résolution spatiale d'un kilomètre, des « obstacles » météorologiques et de leurs trajectoires prévues jusqu'à une échéance de trente minutes. La version destinée aux centres de contrôle en route s'appuie sur l'ensemble des radars de Météo-France. Un code couleur permet de différencier l'intensité des précipitations. Il est complété par un pointage de l'activité électrique. Cette imagerie est présentée dans un environnement proche de celui du poste du contrôleur aérien. Aspoc offre des fonctions de visualisation incluant défilement, zoom, animation sur les trente dernières minutes, calcul de trajectoire des cellules orageuses par pas de cinq minutes et jusqu'à trente minutes, seuillage, loupe, point surveillé, impression et choix du fond de carte (zone géographique, repères visuels tels que ville, pistes d'atterrissage ou tours de contrôle, routes aériennes).

Aspoc est utilisé dans les centres de contrôle d'approche de Roissy, Orly et Bordeaux ainsi que dans les centres de contrôle en route d'Athis-Mons et de Bordeaux. D'autres installations sont prévues, comme au centre de contrôle en route de Reims et au centre de contrôle d'approche de Bâle-Mulhouse.



Figure 4 - Interface Aspoc et image Signora du centre de contrôle en route d'Athis-Mons, le 7 mai 2001 à 7 h 30 UTC. Le fond de carte comporte les routes aériennes gérées par le centre d'Athis-Mons.



Figure 5 - Image Signora superposée avec la trajectoire d'un avion, le 2 août 1998 à 14 h 50 UTC. Les cercles sont tracés de 10 km en 10 km autour du centre de contrôle. La trajectoire suivie par l'aéronef (trait pointillé blanc) indique clairement que celui-ci évite la zone orageuse.

atteignent des taux de fonctionnement de presque 100 % grâce à un doublement systématique des systèmes de mesure. Ce type de solution, très coûteuse, n'est pour le moment pas envisageable pour les réseaux de radars météorologiques et la panne d'un radar se manifeste en général par un « trou » dans l'observation. L'organisation de la maintenance est donc d'autant plus importante. À Météo-France, cette organisation est construite autour d'une équipe centrale, installée à Trappes et constituée de trois groupes spécialisés dans les domaines de la mécanique, de l'électronique et du calcul. Ces groupes, qui effectuent les installations et les opérations lourdes de maintenance préventive, sont aussi chargés de définir les spécifications techniques pour les achats des nouveaux radars. Ils sont en contact permanent avec des équipes locales plus généralistes (également chargées de la maintenance des autres réseaux d'observation) qui peuvent intervenir rapidement en cas de dysfonctionnement et traiter les pannes, en général avec le soutien de l'équipe centrale. Cette organisation est complétée par un suivi de la qualité du service en aval, lors de revues mensuelles d'exploitation.

La politique de maintenance préventive systématique (une visite de l'équipe locale par semaine et une remise à niveau par l'équipe centrale tous les deux ans environ) et la recherche de solutions techniques aux principaux dysfonctionnements constatés (problèmes liés aux foudroiements, vieillissement des composants, etc.) ont permis d'atteindre des taux de fonctionnement remarquables (entre 95 et 99 %) pour les images fournies aux utilisateurs (tableau 1).

Tableau 1 - Exemple de suivi du réseau Aramis de septembre 2001 à août 2002 (pourcentage d'images diffusées à l'utilisateur au cours du mois). Les principaux dysfonctionnements (septembre et novembre 2001) sont dus à des problèmes de transmission des données de certains radars vers les utilisateurs.

2001	septembre	96 %
	octobre	99 %
	novembre	95 %
	décembre	99 %
2002	janvier	98 %
	février	97 %
	mars	98 %
	avril	97 %
	mai	97 %
	juin	97 %
	juillet	97 %
	août	97 %

Jean-Marie Carrière

Météo-France, Direction de la production

## Les extensions du réseau pour l'annonce des crues

Avec une résolution spatiale de l'ordre du kilomètre carré et une résolution temporelle de quelques minutes, le radar météorologique paraît être un très bon candidat pour fournir des données d'entrée aux modèles hydrologiques de pluie-débit qui permettent d'anticiper l'arrivée des crues. Pour donner au réseau Aramis la fiabilité et la fidélité de la mesure nécessaires à cet usage, un gros effort de remise à niveau technique a été effectué : mise en place de radômes protecteurs, climatisation des locaux, définition de procédures d'étalonnage, etc. Après quelques tentatives d'exploitation dans des situations d'événements hydrologiques violents, il est apparu que le relief, par ses effets de masque indésirables, amputait singulièrement la portée des radars dans certaines régions. Le réseau Aramis a donc été densifié. Dans un premier temps, en collaboration avec le ministère de l'Environnement, cinq nouveaux radars ont été installés dans le cadre du programme « Arc méditerranéen » à Sembadel, Bollène, Opoul, Collobrières et Aléria (les deux derniers sont en cours de qualification). Le but était essentiellement d'améliorer l'observation dans des régions qui présentent la double caractéristique d'un relief vigoureux et d'une occurrence fréquente d'événements hydrologiques graves (comme les catastrophes de Nîmes en 1988 et de Vaison-la-Romaine en 1992.)

On a ainsi pu commencer à utiliser le réseau Aramis pour les besoins de l'hydrologie en fournissant des **lames d'eau**<sup>(2)</sup>, instantanées ou cumulées, sur des zones prédéfinies comme des bassins versants. Mais une autre difficulté est apparue pour mesurer la pluie dans les régions les plus éloignées des radars : en raison de la rotondité de la Terre et du profil vertical de l'indice de réfraction, la hauteur à laquelle la mesure est effectuée croît avec la distance au radar (entre 3 et 6 km d'altitude à 150 km de distance, figure 7). À des altitudes aussi élevées, les caractéristiques de l'événement précipitant détecté par le radar peuvent être très éloignées de celles qui seraient obtenues par une observation au niveau du sol. Cet effet oblige à réduire la portée du radar pour les applications hydrologiques : on a ainsi l'habitude d'utiliser une **portée hydrologique** limitée à 80 ou 100 km alors que la portée pour la détection météorologique est plus grande, jusqu'à 300 km pour les phénomènes convectifs très étendus en altitude.

## Les lames d'eau Hydram

En 1995, Météo-France a lancé le projet Hydram, avec l'objectif de développer l'utilisation quantitative des données des radars. La figure 6 illustre l'intérêt d'une image de lames d'eau radar obtenue le 10 juin 2000 avec le radar de Lyon.

La carte de cumul de lames d'eau radar est obtenue à partir des images de lames d'eau radar qui sont diffusées en temps réel aux prévisionnistes français depuis mai 1997. Elle fournit des estimations des quantités de précipitations reçues au sol pour les 15 ou 30 dernières minutes (15 minutes pour le radar de Lyon). La version actuelle des algorithmes de production des images de lames d'eau (Chèze et al., 1998) comporte les traitements suivants :

- prise en compte d'un facteur correctif obtenu par comparaison des cumuls mensuels déduits des données radar avec les cumuls pluviométriques mesurés par le réseau sol ;
- correction d'advection destinée à compenser les effets du déplacement des cellules de précipitation pendant le cycle d'acquisition des images de base (5 minutes).

Ces images de lames d'eau sont également destinées à des applications hydrologiques, en particulier pour l'annonce des crues. La Direction régionale de l'Environnement Midi-Pyrénées a testé une production expérimentale d'images de lames d'eau radar prenant en compte une correction supplémentaire (effets liés au profil vertical de réflectivité) ; la nouvelle convention signée entre Météo-France et la Direction de l'Eau prévoit la généralisation progressive de la mise à disposition de ces images de lames d'eau aux Services d'annonce des crues.

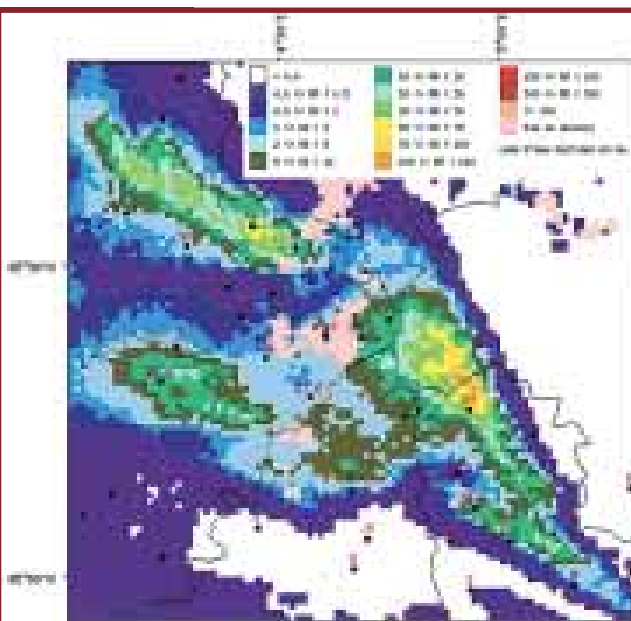


Figure 6 - Cumul de lames d'eau radar le 10 juin 2000 de 16 h à 17 h (radar de Lyon). Les valeurs pointées sont celles de l'ensemble des mesures pluviométriques disponibles, y compris celles des postes climatologiques qui ne transmettent pas leurs informations en temps réel. La superposition des informations du radar et du réseau pluviométrique met en évidence leur cohérence. Mais l'imagerie radar permet d'identifier clairement l'étendue des noyaux de fortes précipitations, avec des valeurs maximales de cumuls dépassant 100 mm, ce que ne permettait pas le réseau pluviométrique ; en particulier, le réseau disponible en temps réel ne détectait qu'un maximum de 10,6 mm.

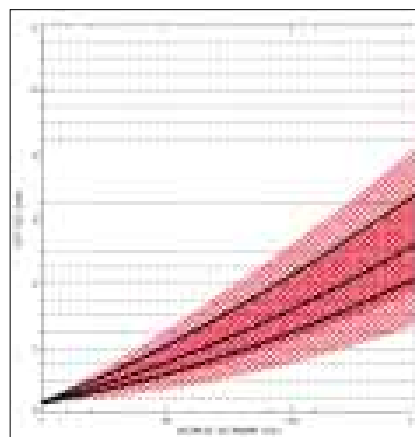


figure 7 - Altitude de l'observation en fonction de la distance au radar pour trois valeurs de l'angle d'élévation : 0,8°, 1,2° et 1,8°. Les parties hachurées correspondent à la largeur du faisceau à mi-puissance.

Jean-Luc Chèze

Météo-France, Direction des systèmes d'observation

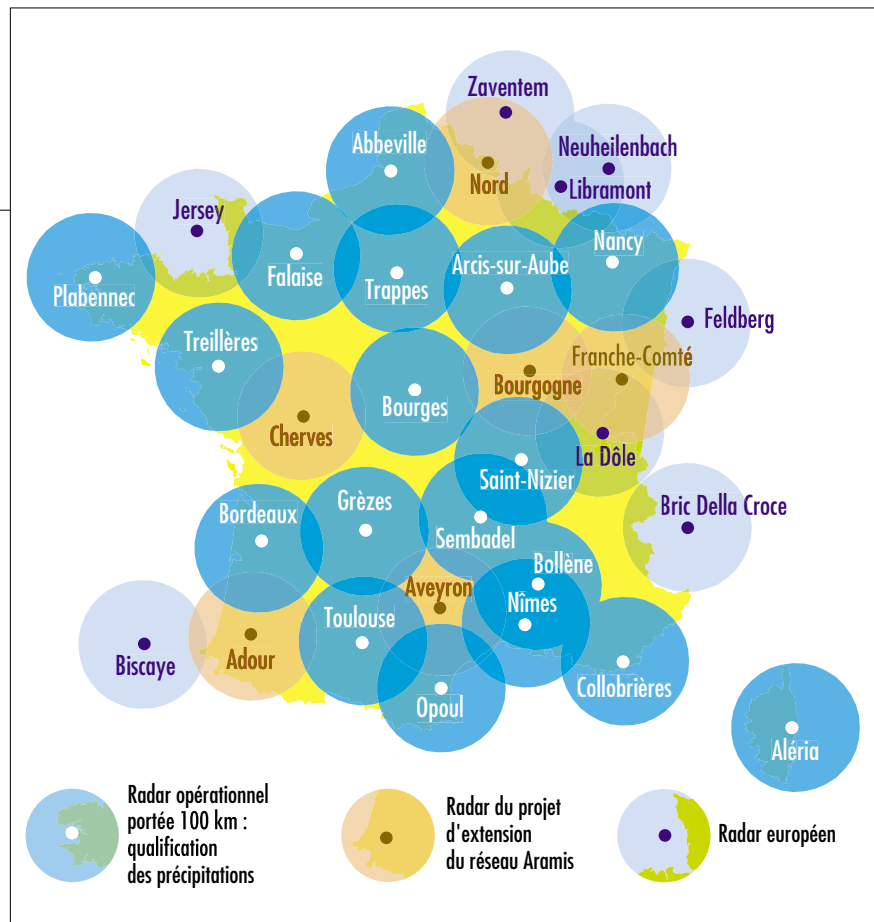
(2) La lame d'eau est une carte qui contient pour chaque pixel la hauteur de pluie accumulée pendant un intervalle de temps donné. Cette quantité est calculée à partir de la réflectivité en utilisant une relation, dite relation Z-R, qui peut varier avec le type de pluie, l'altitude de la mesure, etc.

En partenariat avec le ministère de l'Écologie et du Développement durable, le projet Panthère a défini un nouvel objectif de réseau plus dense, par l'ajout de cinq à six nouveaux radars destinés à couvrir des bassins versants mal desservis : Poitou, Aveyron, Nord, Bourgogne, Franche-Comté et bassin de l'Adour. Dans la carte du réseau prévu pour 2006, complété par les radars européens voisins, chaque radar est entouré d'un cercle de

Figure 8 - Le réseau Aramis prévu pour 2006, en supposant que chaque radar répond aux besoins de l'hydrologie dans un cercle de 100 km de rayon. Le territoire métropolitain sera couvert par l'ensemble constitué de 24 radars du réseau français et de 8 radars des pays voisins. Malgré cette densité importante, quelques régions seront encore imparfaitement surveillées, comme les Alpes, la Bretagne et la Sarthe.

rayon 100 km (figure 8). La comparaison avec la figure 2 montre le chemin parcouru depuis 1995. Malgré la densification du réseau, la réduction de la portée des radars fait apparaître de nouveaux « trous » (en particulier dans les Alpes et en Bretagne). Mais le réseau assure une bonne couverture des régions dont l'importance hydrologique est cruciale.

Le premier des nouveaux radars sera livré début 2004, le deuxième huit mois plus tard et les suivants avec une cadence d'un tous les quatre mois. Avec une résolution de 1 km, cet ensemble fournira une mosaïque toutes les cinq minutes pour les usages météorologiques et une lame d'eau toutes les quinze minutes.



## Les problèmes liés à la mesure

### Échos fixes, masques partiels

Malgré tout le soin pris pour choisir les emplacements des radars, il existe toujours dans l'environnement plus ou moins proche des structures naturelles ou artificielles qui gênent la mesure, en renvoyant des échos dits échos fixes ou échos de sol et en occultant plus ou moins partiellement le faisceau, ce qui se traduit par une diminution, voire une disparition complète des échos en arrière de l'obstacle. Les solutions sont variées : pour les échos de sol, on peut filtrer le signal (filtre Doppler ou statistique) ; on peut aussi reconstituer la mesure par une mesure à un angle d'élévation plus élevé ou par une interpolation entre les cellules voisines. Pour les masques, on peut appliquer un coefficient correcteur ou, là encore, remplacer la mesure par une donnée reconstituée. Les solutions opérationnelles sont souvent mixtes, c'est ainsi que, pour le réseau Aramis, on utilise à la fois le filtre statistique (Sugier et al., 2002 et encadré page suivante) et la

reconstitution à partir d'un ou deux angles d'élévation plus élevée. D'autres méthodes ont été mises au point pour traiter les échos fixes résiduels, en les remplaçant par un signal interpolé par une technique d'advection, et pour diminuer l'influence des masques en appliquant un coefficient correcteur. Mais elles ne peuvent pas encore être mises en service opérationnel, car on ne dispose pour le moment d'aucun moyen pour informer l'utilisateur du traitement appliqué à un pixel donné.

### L'atténuation par la pluie

L'acuité de ce problème dépend de la longueur d'onde : marginal en bande S, le phénomène est sensible en bande C et très important en bande X. La signalisation est assez simple car l'atténuation est liée à l'intégrale du signal le long de la radiale, mais la correction est plus aléatoire en raison d'effets pervers qui sont dus, par exemple, aux erreurs, même faibles, d'étalonnage du radar. On préfère donc employer des méthodes fondées sur la mesure d'une quantité intégrée comme l'énergie reçue d'un écho de sol situé en arrière de la cellule pluvieuse (Serrar et al., 2000). Une méthode plus récente, qui consiste

à utiliser la rotation de la différence de phase entre deux signaux de polarisations orthogonales (Testud et al., 1999), semble très prometteuse.

### Les effets du profil vertical de réflectivité

La réflectivité radar peut varier considérablement suivant l'altitude d'observation du système précipitant : elle peut être nulle au-dessus du nuage (ou même en dessous pour les précipitations en altitude sans signature au sol) ; elle peut être au contraire considérablement renforcée dans la zone de fusion où les cristaux, entourés d'une pellicule d'eau liquide, sont confondus par le radar avec de très grosses gouttes (phénomène appelé bande brillante). L'observation en diversité de polarisation paraît être la solution d'avenir à ce type de problème, mais les techniques utilisées de façon opérationnelle sont pour le moment toutes fondées sur l'observation volumique à partir de plusieurs angles d'élévation (entre 5 et 20), ce qui permet de constituer un profil vertical de réflectivité (PVR). La précipitation au sol se déduit alors de la mesure en altitude, par une extrapolation

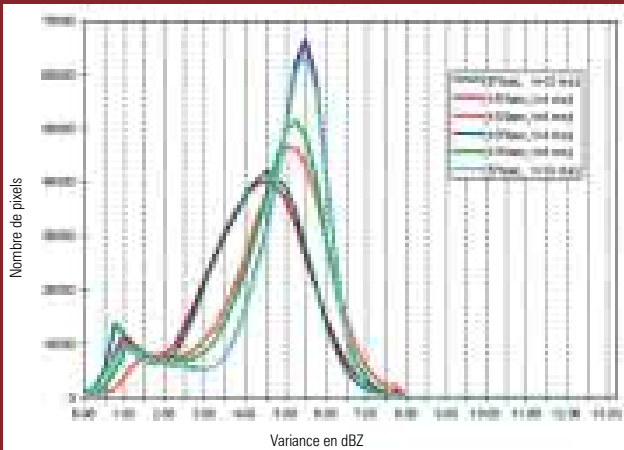


Figure 9 - Distributions de la variance du signal pour différentes vitesses de rotation de l'aérien et pour différents décalages temporels. Pour éviter que les courbes ne soient polluées par des signaux correspondant à du bruit, on a retiré de l'analyse les pixels dont l'énergie est inférieure à un seuil de 16 dBZ.

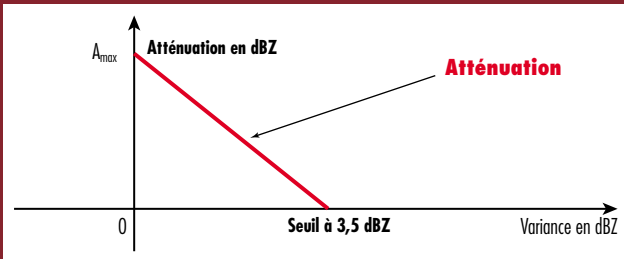
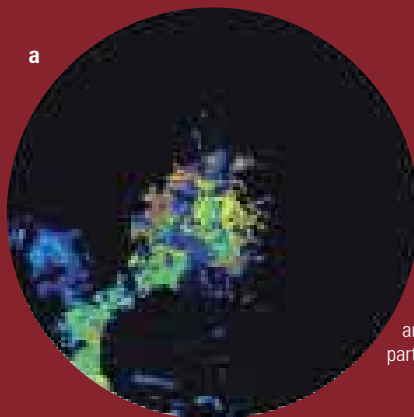


Figure 10 - Algorithme utilisé par le réseau Aramis pour l'atténuation des échos fixes : aucune atténuation pour une variance supérieure à 3,5 dBZ (signal considéré comme de la pluie pure) ; en dessous de 3,5 dBZ, atténuation variant linéairement jusqu'à  $A_{max}$  pour une variance (hypothétique) de 0 dBZ.

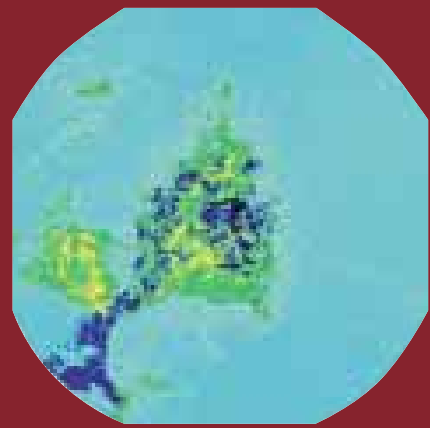
Figure 11 - Exemple de situation dans laquelle des échos de pluie, de sol, de ciel clair et de propagation anormale sont mélangés (radar de Bollène, 3 juin 2002, 0 h 45, distance de 0 à 256 km.)



(a) L'image de réflectivité fait apparaître, en jaune et en rouge, des échos puissants dans la partie centrale (échos fixes habituels, échos de propagation anormale) ainsi que dans la partie sud-ouest.



(c) L'application du filtrage donne une image exploitable pour la prévision météorologique, malgré la présence d'échos fixes très puissants sur les données d'origine.



(b) L'image de la variance de la réflectivité permet de distinguer les échos de pluie (en jaune et en vert) de ceux qui sont dus à la propagation anormale (en bleu foncé).

## Le traitement des échos fixes dans le réseau Aramis

Les échos de sol, qui ne proviennent pas de la pluie mais d'obstacles fixes de petite dimension (arbres, immeubles, etc.) ou de plus grande étendue (reliefs), sont gênants car on peut les confondre avec des échos de pluie. Une abondante littérature scientifique existe sur cette question ; elle propose des méthodes de détection ou de filtrage fondées sur le signal Doppler, l'élévation de l'altitude d'observation ou l'utilisation de cartes d'échos fixes obtenues par temps sec. Pour les radars ne possédant pas la capacité Doppler, comme c'est le cas pour le réseau métropolitain français, on obtient d'assez bons résultats en utilisant la variance de l'amplitude du signal reçu combinée à l'utilisation d'un petit nombre d'angles d'élévation du radar.

Le temps de cohérence du signal de pluie est de l'ordre de 10 ms, beaucoup plus court que celui du signal de sol. Cette différence est illustrée par les distributions de la figure 9 : le paramètre représenté est la variance des énergies reçues, à distance fixe, entre deux impulsions radar successives. Les distributions sont bimodales : un pic de variance fort pour la pluie (signal très fluctuant) et un pic de variance plus faible pour les échos de sol (signal stable). Les positions moyennes de ces pics varient avec la vitesse de rotation de l'aérien et avec le décalage temporel utilisé pour calculer les écarts.

Une fois ces paramètres fixés, on peut construire un algorithme (figure 10) en fixant l'ordonnée à l'origine ou la pente de la droite d'atténuation. Malgré son caractère un peu arbitraire, cet algorithme est particulièrement utile pour diminuer les effets néfastes de la propagation anormale (exemple en figure 11). Il s'agit d'échos de sol inhabituels qui se produisent lorsque les profils de température et d'humidité atmosphériques sont tels que le faisceau électromagnétique du radar est suffisamment incurvé vers le bas pour rencontrer le sol. Ils peuvent conduire à des erreurs de mesure sur la pluie très importantes et à la génération de fausses alertes. Leur détection (et éventuellement leur suppression) est donc un enjeu important de la surveillance hydrologique automatique. Cependant, malgré son évidente efficacité, ce filtre souffre de quelques limitations lorsque les signaux d'échos fixes fluctuent ou bien lorsque la vitesse de rotation de l'aérien est plus grande. Des travaux sont en cours pour résoudre ces problèmes.

sur la base du PVR estimé. Une méthode de ce type, très simplifiée puisqu'elle n'utilise que deux angles d'élévation, est en place sur le radar de Toulouse et donne satisfaction.

## La relation Z-R

En dehors du problème lié à la zone de fusion, évoqué ci-dessus, la relation entre la réflectivité radar et la quantité de pluie dépend essentiellement du diamètre moyen des gouttes (voir par exemple Uijlenhoet, 2001). Ce problème peut être traité en adaptant la loi Z-R (Z est la réflectivité radar et R la quantité de pluie au sol) au type d'événement pluvieux, soit par des méthodes de type statistique, soit même à travers un recalage en direct sur des données pluviométriques. Compte tenu de la variabilité spatiale de la pluie, cette dernière méthode nécessite des réseaux denses de pluviomètres. Une autre approche, qui, là encore, utilise la diversité de polarisation, est fondée sur l'estimation directe du diamètre des gouttes (Testud et al., 1999).

## Les solutions adoptées pour Aramis

En résumé, la mesure de la pluie par télédétection radar est une technique très puissante, mais elle souffre de difficultés (échos de sol, masques, PVR, relation Z-R, etc.) pour lesquelles de nombreuses solutions ont été proposées par le monde de la recherche. Pour un service opérationnel, l'exercice qui consiste à trouver les solutions adaptées aux besoins n'est pas facile car, bien évidemment, chaque correction a son effet pervers dans certains cas. Jusqu'à présent, on a choisi un mode de fonctionnement assez simple pour le réseau Aramis, avec une cadence de cinq minutes :

- une vitesse de rotation des aériens lente, fixée à 5° par seconde, pour assurer une bonne qualité à la mesure et éviter de fatiguer la mécanique du radar ;
- un filtrage des échos fixes par un filtre statistique ;
- une exploration volumique très restreinte (un à trois angles d'élévation), essentiellement pour passer au-dessus des échos fixes résiduels dans les zones proches ;
- une relation Z-R unique, valable pour tous les radars et pour toutes les saisons ;

- une comparaison systématique, sur une base mensuelle, des mesures radar aux mesures des pluviomètres, pour identifier d'éventuels problèmes de comportement des radars.

## Les évolutions technologiques prévues ou envisagées

Compte tenu des besoins de l'hydrologie, des avancées de la recherche et des possibilités de la technique, des modifications des modes de fonctionnement actuels peuvent apporter une meilleure quantification de la pluie mesurée. C'est pour cela que le projet Panthère, en plus de ses objectifs de densification du réseau, comporte un volet d'évolutions technologiques consistant à préparer les modifications qui devront être mises en place à l'arrivée des nouveaux radars, c'est-à-dire à partir de mi-2004. Préparées avec l'appui de plusieurs laboratoires de recherche à travers le comité scientifique du projet, ces évolutions pourront être implantées dans le nouveau calculateur radar de Météo-France qui a été conçu pour cela (Parent et al., 2001).

## Un codage de la qualité pour chaque pixel de l'image radar

Comme on l'a vu, la mise en place opérationnelle de corrections telles que l'advection dans les zones d'échos fixes résiduels ou la correction des masques est difficile, car certains utilisateurs préfèrent disposer d'une donnée non optimale, mais dont on sait exactement comment elle a été obtenue, plutôt que d'une donnée corrigée sans que l'on sache exactement comment. Pour contourner ce problème, Météo-France travaille à la mise au point d'un codage de la qualité : chaque image radar sera fournie avec une image d'accompagnement dans laquelle figurera, pour chaque pixel, une information sur la manière dont ce pixel a été obtenu. On attend de cette action une meilleure fluidité dans la transition des progrès vers les applications opérationnelles. Météo-France, qui n'est évidemment pas le seul service météorologique à rencontrer ce

type de problématique, est mandaté par le groupe européen Opera pour faire avancer ce travail.

## Le mode Doppler

La technique Doppler, très répandue, y compris dans les réseaux opérationnels, consiste à mesurer la vitesse radiale de la cible à partir de la dérivée temporelle de la phase du signal reçu. L'application opérationnelle la plus évidente est le rejet ou le filtrage des échos fixes, qui sont reconnaissables car immobiles, donc de signal Doppler nul. De plus, de nombreux radars fournissent des profils verticaux du vent dans les zones pluvieuses, obtenus par des techniques de VAD (Vertical Azimuth Display, voir par exemple Tabary et al., 2001). L'utilisation la plus pertinente du Doppler se fera probablement dans un futur proche à travers l'assimilation de la vitesse radiale par des modèles numériques à très petite échelle (Bielli et Roux, 1999).

La mesure Doppler est en principe assez simple, mais elle souffre d'une ambiguïté due à ce que la rotation de phase élémentaire est mesurée par différence entre deux impulsions radar successives. Dès que la vitesse radiale est supérieure au seuil d'ambiguïté, la rotation de phase d'une impulsion à la suivante est supérieure à 360° et la vitesse radiale se trouve « repliée ». Le seuil de vitesse ambiguë est inversement proportionnel à la fréquence et à la cadence du radar. Pour le radar de Trappes (bande C avec une cadence de 330 Hz), la gamme de vitesse radiale non ambiguë est de  $\pm 10$  m/s (soit  $\pm 36$  km/h). C'est très faible et, pour étendre la gamme de mesure Doppler, les radars sont souvent mis dans un mode d'exploitation particulier qui consiste à augmenter la cadence, au prix d'une diminution de la portée en distance et de la puissance émise. Une autre solution consiste à alterner deux cadences légèrement séparées, ce qui permet de lever l'ambiguïté tout en conservant la même énergie émise et la même portée. Ce genre de technique, qui ne nécessite pas l'utilisation d'un mode d'exploitation spécifique pour le Doppler, est bien adapté à l'utilisation opérationnelle et c'est dans cette direction que Météo-France conduit des études. Les premiers résultats sont très encourageants et les premiers profils VAD obtenus sur le radar de Trappes paraissent corrects. Il reste à préciser les limites de la méthode (vitesse

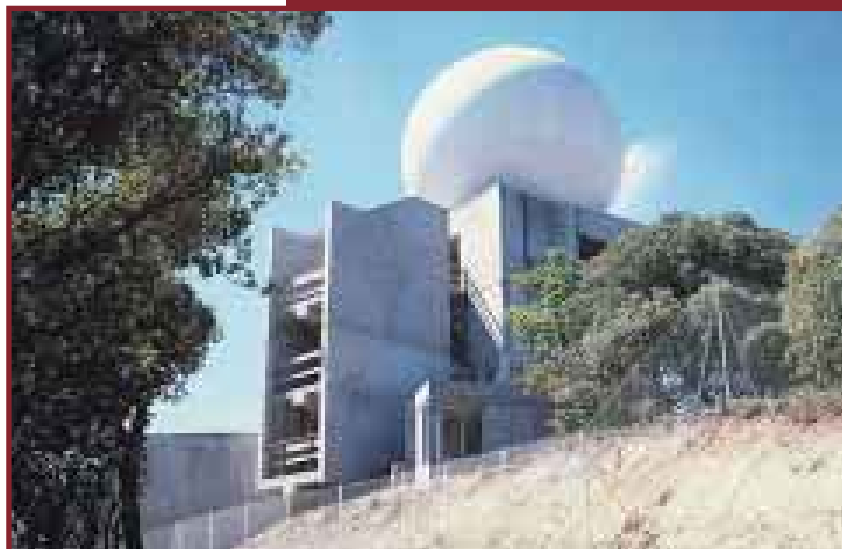
## L'exploration volumique

Depuis le 30 août 2002, le radar météorologique de Bollène (figure 12) fonctionne en mode d'exploration volumique. Cette expérimentation s'inscrit dans le double cadre du projet Panthère et de l'observatoire hydrométéorologique méditerranéen Cévennes-Vivarais (OHM-CV, <http://www.ohmcv.net/>). L'exploration volumique de l'atmosphère consiste à passer d'un balayage à trois élévations à un balayage à treize élévations indépendantes comprises entre 0,4° et 18° au-dessus de l'horizon.

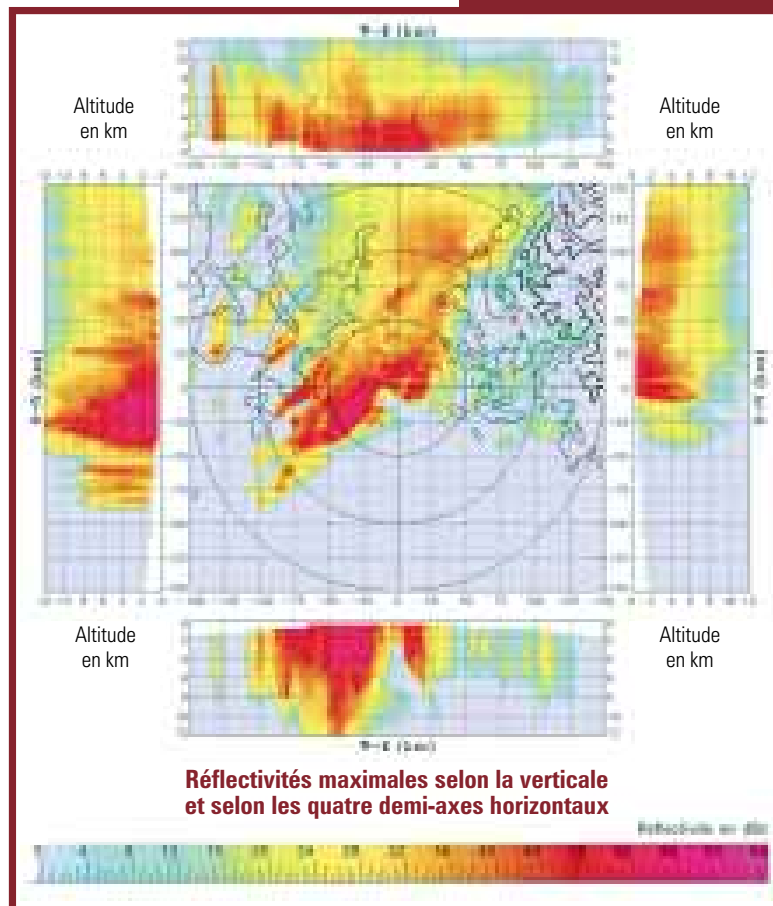
La connaissance de la structure verticale des précipitations a des applications dans trois domaines : l'hydrologie (correction des échos fixes, correction des masques et correction des effets de bande brillante), l'assimilation (description plus fine du champ tridimensionnel de précipitations dans l'atmosphère via des approches 3D-VAR ou nudging) et la prévision immédiate. À titre d'exemple, la figure 13, obtenue lors de l'épisode dramatique du Gard des 8 et 9 septembre 2002, montre différentes coupes horizontales et verticales.

L'expérimentation menée actuellement sur le radar de Bollène a ainsi été fortement soutenue par les équipes de recherche du CNRM (GMME/Micado) et du LTHE. Elle s'inscrit dans une stratégie d'évolution du réseau Aramis dans le but d'améliorer les produits hydrologiques tirés des données radar (lames d'eau) et, à plus long terme, la prévision à courte échéance des systèmes précipitants intenses dans le sud de la France, dont l'actualité récente nous a montré combien ils pouvaient se révéler dangereux pour la société.

Figure 12 - Le radar météorologique de Bollène dans le Vaucluse. (Photo Météo-France, F. Poulain d'Andecy)



À titre d'exemple, la figure 13, obtenue lors de l'épisode dramatique du Gard des 8 et 9 septembre 2002, montre différentes coupes horizontales et verticales.



L'expérimentation menée actuellement sur le radar de Bollène a ainsi été fortement soutenue par les équipes de recherche du CNRM (GMME/Micado) et du LTHE. Elle s'inscrit dans une stratégie d'évolution du réseau Aramis dans le but d'améliorer les produits hydrologiques tirés des données radar (lames d'eau) et, à plus long terme, la prévision à courte échéance des systèmes précipitants intenses dans le sud de la France, dont l'actualité récente nous a montré combien ils pouvaient se révéler dangereux pour la société.

**Pierre Tabary**

Météo-France,  
Direction des systèmes d'observation

Figure 13 - Champ tridimensionnel de réflectivité, dans une représentation dite du maximum le 9 septembre 2002 à 6 h UTC, obtenu avec le radar de Bollène.

La figure centrale représente la réflectivité maximale le long de la verticale.

La figure de droite (respectivement de gauche) représente le maximum pour chaque latitude et chaque altitude du demi-plan est (respectivement ouest) du domaine.

La figure du haut (respectivement bas) représente le maximum pour chaque longitude et chaque altitude du demi-plan supérieur (respectivement inférieur) du domaine.

Ce type de représentation a l'avantage d'être synthétique, mais présente l'inconvénient d'être parfois difficile à interpréter (deux cellules se superposent).

Sur cette situation météorologique explosive, les figures montrent bien le développement vertical des cellules et l'extension des cœurs convectifs.

maximale non ambiguë, rapport signal sur bruit admissible) pour passer à une utilisation en opérationnel.

## L'exploration volumique

L'exploration volumique est largement employée dans les réseaux d'observation radar. Elle consiste à recueillir successivement des données à plusieurs angles d'élévation (un tour par angle d'élévation), pour ensuite combiner ces données de façon à obtenir une image en volume du nuage pluvieux. Cette image peut être utilisée directement en prévision immédiate par l'information qu'elle apporte sur la structure des systèmes météorologiques, ou bien pour améliorer la qualité des produits hydrologiques à travers une meilleure prise en compte des échos de sol et des masques, ainsi que par la prise en compte du profil vertical de réflectivité.

En collaboration avec les hydrologues du Laboratoire d'étude des transferts en hydrologie et environnement (LTHE) de Grenoble, une première campagne expérimentale a été définie pour le radar opérationnel de Bollène. Des données particulièrement intéressantes ont déjà été recueillies (encadré page précédente) ; leur exploitation doit permettre de définir un protocole d'exploitation opérationnelle des cinq radars de l'arc méditerranéen, bien adapté aux conditions de relief de la région. Dans la suite des travaux du Centre national

de recherches météorologiques (CNRM), ces données seront également exploitées pour évaluer leur apport en prévision numérique à très petite échelle (Ducrocq et al., 2000).

## La diversité de polarisation

La technique, déjà largement répandue chez les chercheurs (Sauvageot, 2000), donne de bons résultats pour l'identification des hydrométéores, l'amélioration de la loi Z-R et l'estimation de l'atténuation par la pluie. Elle n'est cependant pas encore employée de façon systématique par les réseaux opérationnels d'observation. Pour progresser dans cette direction, une expérimentation de validation opérationnelle va être mise en place pour le premier des nouveaux radars Panthère, qui sera pour cela équipé de la double polarisation. On couplera deux calculateurs radar derrière le récepteur : le premier est destiné à fournir le produit opérationnel classique pour que le radar puisse pleinement remplir sa fonction opérationnelle ; un algorithme de traitement en double polarisation, très probablement l'algorithme ZPHI (Testud et al., 1999), sera implanté sur le second calculateur qui produira une lame d'eau corrigée des effets d'atténuation par la pluie et des effets de variation de la loi Z-R. Les deux produits seront comparés à une référence au sol constituée d'un ensemble de pluviomètres et de quelques disdromètres. Ce travail sera effectué en collaboration avec le Laboratoire central des

ponts et chaussées (LCPC) et le Centre d'étude des environnements terrestre et planétaires (CETP) du CNRS.

## Conclusion

Si tout se passe comme prévu, en 2006, les six nouveaux radars du réseau Aramis fonctionneront en mode Doppler, sans qu'il soit pour autant nécessaire de mettre en œuvre un mode d'exploitation spécifique, et ils seront également exploités en mode volumique. Leurs données, employées pour améliorer le rejet des échos fixes et corriger les effets de PVR, conduiront à une lame d'eau de meilleure qualité pour les applications hydrologiques. Chaque produit sera accompagné d'une description de sa qualité dont le but est de permettre à l'utilisateur de savoir quel degré de confiance il peut accorder à chacun des pixels de l'image. Ces évolutions seront autant que possible étendues aux radars déjà existants, en donnant la priorité aux radars plus récents de l'arc méditerranéen.

Dans le même temps, Météo-France aura évalué, à travers l'expérimentation de validation opérationnelle, les bénéfices que peut apporter la diversité de polarisation à la qualité d'estimation de la lame d'eau. Si les résultats sont positifs, il restera à estimer les investissements nécessaires pour généraliser cette technologie à l'ensemble des nouveaux radars du réseau.

## Bibliographie

- **Bielli S. et F. Roux**, 1999 : Initialization of a cloud-resolving model with airborne Doppler radar observations of an oceanic tropical convective system. *Mon. Wea. Rev.*, 127, 1038-1055.
- **Chèze J.-L., F. Helloco, F. Sevault, F. Mesnard, H. Sauvageot, J.-J. Vidal et P. Dupouyet**, 1998 : Flood forecasting from radar derived rainfall estimates in the central Pyrénées range. Cost 75 international seminar on advanced weather radar systems, Locarno, Suisse. EUR 18567 EN, 318-325.
- **Dalle S. et B. Béringuer**, 1994 : The Météo-France weather radar network. Cost75 international seminar on advanced weather radar systems, Bruxelles, Belgique. EUR 16013 EN.
- **Ducrocq V., J.-P. Lafore, J.-L. Redelsperger et F. Orain**, 2000 : Initialisation of a fine scale model for convective system prediction: A case study. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 126, 3041-3060.
- **Parent J., L. Perier, K. Do Khac et P. Roquain**, 2001 : Castor2, a new computer for the French radar network. Proceedings of the 30th International Conference on Radar Meteorology, Munich, Allemagne, 19-24 juillet 2001.
- **Sauvageot H.**, 2000 : Le radar polarimétrique, une nouvelle approche pour l'observation des champs de précipitations. *La Météorologie* 8<sup>e</sup> série, 31, 25-41.
- **Schreiber K. J.**, 2001 : A review of operational weather radar networking in Germany, products and applications. Proceedings of the 30th International Conference on Radar Meteorology, Munich, Allemagne, 19-24 juillet 2001.
- **Serafin R. J. et J. W. Wilson**, 2000 : Operational weather radar in the United States, progress and opportunity. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 81, 501-518.
- **Serran S., G. Delrieu, J.-D. Creutin et R. Uijlenhoet**, 2000 : Mountain reference technique, use of mountain returns to calibrate weather radars operating at attenuating wavelengths. *J. Geoph. Res.*, 105, D2, 2281-2290.
- **Sugier J., J. Parent, P. Roquain et A. Smith**, 2002 : Clutter and anrop suppression scheme for the Met Office and Météo-France weather radar. ERAD European Conf. on Weather Radar. Delft, Pays-Bas, 18-23 novembre 2002.
- **Tabary P., G. Scialom et A. Protat**, 2002 : Un radar météorologique Doppler : pour quoi faire ? *La Météorologie* 8<sup>e</sup> série, 38, 30-44.
- **Testud J., E. Le Bouar, E. Obligis et M. Ali-Mehenni**, 1999 : The rain profiling algorithm applied to polarimetric weather radar. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 17, 332-356.
- **Uijlenhoet R.**, 2001 : Raindrop size distribution and the Z-R relationship. Proceedings of the the Conference on Radar Hydrology for Real Time Forecasting. European Commission, Bruxelles, Belgique, ISBN 92-894-1640-8.