

Radartutorial

Chapitre 2A : Radar météorologique

(Éditeur: Christian Wolff et Pierre Vaillant, Version 19 septembre 2011)

Sommaire

Objectifs.....	1
Histoire.....	2
DESCRIPTION	3
OPERATION.....	3
ÉQUATION RADAR POUR CIBLES VOLUMIQUES	4
REFLECTIVITE.....	5
TYPES DE METEO.....	6
RÉFLECTIVITÉ ET PRÉCIPITATIONS	6
VITESSE RADIALE DOPPLER	9
SIGNATURES RADAR	10
TYPES DE RADARS METEOROLOGIQUES.....	11
RADARS MÉTÉOROLOGIQUES DE SURFACE.....	11
RADAR METEOROLOGIQUE BISTATIQUE.....	13
RADAR METEOROLOGIQUE AEROPORTE.....	14
AFFICHAGES D'UN RADAR METEOROLOGIQUE.....	15
PPI.....	15
CAPPI.....	15
COUPE VERTICALE.....	16
COMPOSITES RADAR.....	16
ARTEFACTS.....	17
LA BANDE BRILLANTE	17
ATTENUATION DANS LA PLUIE	17
COMPARAISON ENTRE RADARS	19
ÉCHOS PARASITES.....	19
TECHNIQUES ANTI-ARTEFACTS.....	21
RADAR A DOUBLE FREQUENCE.....	21
RADAR A DOUBLE POLARISATION	22

Objectifs

Les modules suivants ne sont pas conçus comme un cours d'interprétation pour les météorologistes mais plutôt une introduction générale orientée particulièrement vers les techniciens qui s'occupent de tels radars et qui doivent connaître les appareils qu'ils maintiennent, en particulier ceux associés aux radars de surveillance aérienne. À la base, ces radars opèrent comme un radar primaire mais le traitement des signaux est fait avec une mathématique différente. Plusieurs ajustements des notions de bases sont donc à faire: Un radar météorologique ne fait pas que *localiser* les précipitations, il doit aussi estimer leur intensité, leur *déplacement général* et les *mouvements de l'air à l'intérieur des nuages*.

Histoire

Durant la Seconde guerre mondiale, les opérateurs radar remarquèrent de la contamination qui s'avéra être des échos provenant des précipitations (pluie, neige, etc.). Juste après la guerre, les scientifiques militaires, qui avaient déjà commencé leur recherche sur les phénomènes rapportés, ont continué leur travail tant dans la vie militaire que civile. Aux États-Unis, David Atlas fut l'un des pionniers de la météorologie radar pour le groupe de l'armée de l'air et plus tard avec le Massachusetts Institute of Technology. Il a participé au développement des premiers radars météorologiques opérationnels.

Au Canada, J. Stewart Marshall et R.H. Douglas formèrent un groupe de recherche à l'Université McGill de Montréal dont la vocation est toujours l'interprétation des données venant de ces radars. Marshall et Walter Palmer sont reconnus pour avoir travaillé sur la distribution du diamètre des gouttes dans les précipitations ce qui a mené à la relation entre la réflectivité (Z), le retour d'intensité de la précipitation, et le taux de précipitation (R) au sol communément appelé relation $Z-R$. De nombreux autres scientifiques à travers le monde continuent leur travail.

Depuis les années 1950, les différents services de météorologie à travers le monde ont construit des radars météorologiques. D'abord ces radars furent pour usage local dans les grands centres et des aéroports, utilisant des antennes provenant de surplus militaires. Ils étaient opérés en temps réel par les météorologistes qui devaient suivre les échos sur des écrans cathodiques. En 1957, le National Weather Service des États-Unis introduit le WSR-57, leur premier radar conçu exclusivement pour la détection des précipitations. Dans les années 1970, les différents radars commencèrent à être organisés en réseaux avec un début de standardisation: radars civils, radars pour l'aéronautique, etc.

À partir de la fin des années 1980 et durant les années 1990, la vitesse radiale Doppler fut introduite dans le traitement des données et donne lieu à un renouvellement des radars existants. Ainsi le WSR-88D remplace tous les anciens radars dans le réseau américain. À la fin des années 2000, c'est l'introduction des données à double polarisation qui révolutionne ce domaine. Ce type de radar n'est donc plus confiné à l'usage des bureaux météorologique nationaux mais ses données se retrouvent de plus en plus présentes dans la vie courante. Leurs images sont entre autres présentées à la télévision pour décrire le temps et les différentes informations qu'ils produisent sont utilisées par l'aviation pour éviter les situations atmosphériques dangereuses.



Figure 1 : Antenne parabolique du radar météorologique METEOR 360

Description

Un radar météorologique fonctionne sur le même principe qu'un radar primaire de surveillance aérienne mais possède des caractéristiques adaptées à ce rôle : vitesse de rotation de 3 à 6 tours minutes, angles d'élévation multiples, longueur d'onde adaptées à la taille des hydrométéores. Il souffre également des mêmes limitations: problèmes d'échos de sol, de réfraction anormale à travers l'atmosphère, de cibles biologiques comme les oiseaux et les insectes, de blocages, etc.

La différence fondamentale entre les deux est dans le traitement des données. Alors qu'un radar primaire ne doit qu'identifier la présence et la position d'une cible (présente oui/non), le radar météorologique sonde un volume de l'atmosphère qui est rempli d'une multitude de hydrométéores (pluie, neige, grêle, etc.). Il doit non seulement permettre de reconnaître la position de ces précipitations mais à partir du signal de retour, il doit estimer leur intensité, la vitesse à laquelle elles se déplacent et leurs mouvements à l'intérieur des nuages.

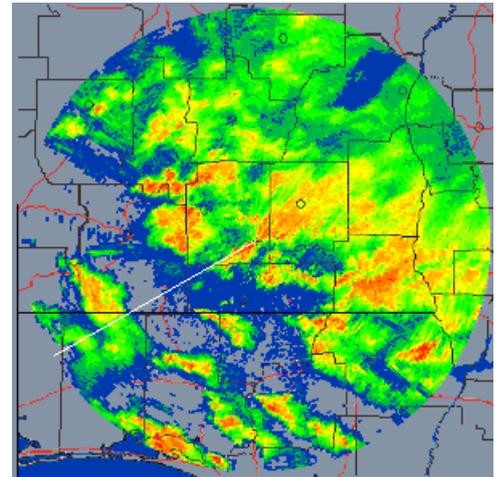


Figure 2 : Image montrant la position et l'intensité des précipitations

Opération

Les radars météorologiques utilisent les bandes X (3 cm), C (5 cm) et S (10 cm) qui lui permettent d'avoir un retour proportionnel à l'intensité de la précipitation selon la diffusion de Rayleigh. Cependant, un radar primaire de surveillance de bande L peut avoir un module de traitement des échos météorologiques et certains radars météorologiques de recherche utilisent les bandes K (1 cm) pour la détection des gouttelettes de nuage et de brouillard.

Ce diagramme familier s'applique aussi dans le cas d'un radar météorologique à impulsions. L'énergie émise (par exemple 850 kW) est *rétrodiffusée* vers l'antenne radar, réfléchi en partie, par les précipitations. Ce retour est très faible, beaucoup plus faible que pour un aéronef, et demande un récepteur très sensible. La nuée de gouttes change également de forme et occupe un très grand volume dans l'espace sondé par le radar, au contraire des aéronefs. Finalement, leur vitesse est beaucoup moins grande que les objets volants créés par l'homme.

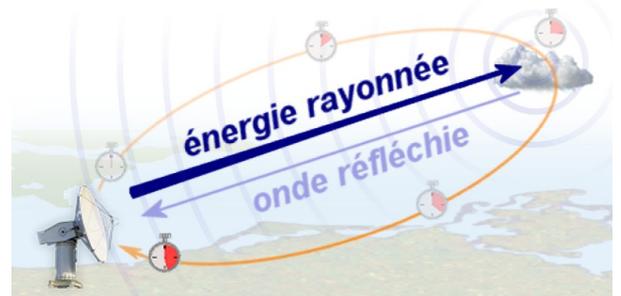


Figure 3 : Principe du radar météorologique

Ainsi pour un *radar de surveillance aérienne*, l'intérêt est de détecter des cibles ponctuelles relativement intenses et à déplacement rapide qui peuvent être noyées dans la précipitation. Pour un radar météorologique, il s'agit au contraire de reconnaître un signal faible mais étendu auquel des échos de retour provenant d'avions est nuisible. Ce qui est donc du bruit pour l'un est la donnée «essentielle» pour l'autre.

Pour le radar météorologique, la rétrodiffusion comporte une complication supplémentaire. Elle est la somme des réflexions combinées de toutes les gouttes dans la cellule de résolution, de dernier étant de l'ordre du kilomètre cube. La somme peut être additive ou constructive, selon la position des gouttes dans le volume, et variera entre deux impulsions revenant du même volume sondé. Cette réflectivité, est donc obtenue grâce à une moyenne des retours d'un même volume sondé. L'interprétation des données en taux ou en type de précipitations nécessite donc quelques hypothèses:

1. La largeur du faisceau est faible et l'impulsion courte afin d'avoir la plus petite cellule de résolution possible;
2. Le retour d'énergie provenant des lobes secondaires est négligeable;

3. Le volume sondé est complètement rempli d'hydrométéores de même type pour ne pas moyenner le signal sur des cibles différentes;
4. Le taux de précipitation est le même dans tout le volume;
5. Le changement d'indice de réfraction de l'air avec l'altitude est «normal» et les atténuations sont faibles.

Les radars météorologiques modernes utilisent des techniques sophistiquées pour transformer le signal brut et en tirer la donnée météorologique. Ils utilisent diverses informations contenues dans le signal de retour: réflectivité, vitesse Doppler et signal à double polarimétrie. D'un autre côté, une technique rapide pour les radars primaires de surveillance aérienne afin de reconnaître les cibles météorologiques est de comparer les signaux provenant de différentes longueurs d'onde d'émission (une technique différente dans ce contexte de celle du radar à diversité de fréquence).

Certains de ces radars ont été spécialement conçus pour la navigation aérienne: meilleure résolution spatiale, sondages plus fréquents, algorithmes informatiques spécialement adaptés. C'est le cas des radars météorologiques d'aéroports TDWR.

Équation radar pour cibles volumiques

L'équation qui permet de calculer la puissance retournée à un radar météorologique par les hydrométéores est une variation de l'équation du radar d'un radar primaire :

$$P_e = \frac{P_s \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 \cdot R^4} \quad \text{Où } \begin{array}{l} P_e = \text{Puissance retournée au radar} \\ P_s = \text{Puissance émise} \\ G = \text{Gain de l'antenne} \\ \sigma = \text{surface équivalente radar} \\ \lambda = \text{Longueur d'onde du radar} \\ R = \text{distance des cibles} \end{array} \quad (1)$$

Surface équivalente volumique

La différence tient au fait que le faisceau frappe une multitude de gouttes dans chaque cellule de résolution, ce qui modifie l'expression de σ . La grosseur des gouttes rencontrées dans la pluie est beaucoup plus petite que la longueur d'onde du radar et par conséquent l'équation de Rayleigh pour la rétrodiffusion d'une goutte devient :

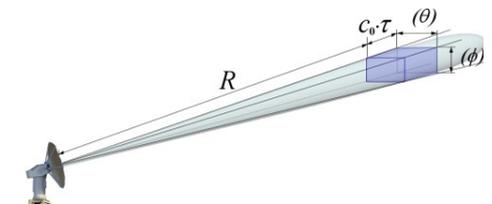


Figure 4 : La cellule de résolution

$$\sigma_i = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 D_i^6 \quad \text{et} \quad |K|^2 = \left| \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right|^2 \quad \text{Où } \begin{array}{l} D = \text{est le diamètre des gouttes et} \\ \epsilon = \text{est la permittivité ou constante diélectrique} \end{array} \quad (2)$$

Pour un radar de bande L à X, $|K|^2 = 0.93$ pour l'eau et $|K|^2 = 0.2$ pour la glace.

En faisant la somme de toutes les gouttes dans 1 m^3 , nous obtenons η , la réflectivité radar par unité de volume :

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 \cdot Z; \quad Z = \sum_{i=1}^n D_i^6 \quad \text{Où } Z \text{ est la réflectivité totale radar} \quad (3)$$

Effets de D et K

En substituant la réflectivité d'une nuée de gouttes à σ d'une cible unique, nous avons introduit deux paramètres qui peuvent faire varier grandement le retour au radar:

- Le diamètre D des gouttes de pluie est bien différent de celui de la bruine ou des flocons de neige. Même à l'intérieur de la pluie, les gouttes n'ont pas toutes la même grosseur. Comme, D est à la 6^{ème} puissance, une seule grosse goutte a plus d'effet sur la réflectivité qu'une multitude de petite: une goutte de 5 mm a la même réflectivité que 5⁶ gouttes de 1 mm.
- K étant différent pour l'eau et la glace, l'intensité du signal de la pluie sera plus grande que celle des cristaux de glace pour un même diamètre. Cependant, les flocons de neige, qui sont formés de cristaux, sont en général plus gros que les gouttes de pluie.

Effet sur l'équation radar

L'équation du radar peut être réécrite en tenant compte du fait que σ est remplacé par η multiplié par le volume sondé. Quand la pluie remplit le faisceau, le volume sondé est :

$$V = \frac{\pi \cdot \theta \cdot \phi \cdot R^2 \cdot c_0 \cdot \tau}{8} \quad (4)$$

D est le diamètre des gouttes et
 ϵ est la permittivité ou constante diélectrique

Le volume est lui-même proportionnel à la distance au radar selon la définition de la cellule de résolution du radar dans le dessin de la figure 5. On peut remplacer les valeurs de σ et du volume pour obtenir:

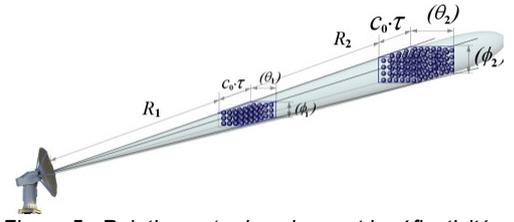


Figure 5 : Relation entre le volume et la réflectivité

$$P_e = \frac{P_s \cdot G^2 \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot R^4} \cdot \sigma$$

$$P_e = \frac{P_s G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \cdot V \cdot \sum_{i=1}^{n/vol} D_i^6$$

$$P_e = \frac{P_s G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \cdot \frac{\pi \theta \phi R^2 c_0 \tau}{8} \cdot \frac{\pi^5 |K|^2 D_i^6}{\lambda^4} \quad (5)$$

Le volume de la cellule de résolution augmente comme le carré de la distance. Une telle cellule est remplie de gouttes qui rétrodiffusent de l'énergie vers le radar. Contrairement à un avion qui renvoie un signal ponctuel, l'énergie de toutes les gouttes dans le volume s'additionne. En simplifiant les termes de la nouvelle équation (5), on obtient que:

$$P_e = k P_s \cdot \left(\frac{\epsilon}{\lambda^4 \cdot R^2} \right) \sum N D^6 \quad \text{Où} \quad \begin{aligned} P_e &= \text{Puissance retournée au radar} \\ P_s &= \text{Puissance émise} \\ k &= \text{constante du radar} \\ \lambda &= \text{Longueur d'onde du radar} \\ \epsilon &= \text{est la permittivité ou constante diélectrique} \\ N &= \text{Nombre de gouttes avec diamètre } D \\ D &= \text{le diamètre des gouttes} \end{aligned} \quad (6)$$

La variation du signal de retour avec la distance ne varie plus en $1/R^4$ mais en $1/R^2$.

Réflectivité

La réflectivité (Z) est la puissance retournée à un radar météorologique quand le faisceau rencontre des hydrométéores (pluie, neige, etc.). Il est défini par la surface équivalente radar σ par mètre cube pour de petites sphères ayant une permittivité, ou constante diélectrique, non nulle. Cette valeur varie comme la 6e puissance du diamètre d'une sphère de diamètre D . Comme chaque goutte ou flocons a un diamètre différent, la réflectivité est donc la somme de la réflectivité individuelle de toutes les gouttes ou flocons, ce qui donne:

$$Z = \int_0^{D_{max}} N_0 e^{-\Lambda D} D^6 dD \quad (7)$$

La variation de diamètre et la constante diélectrique entre les différents types de précipitations (pluie, neige, bruine, grêle, etc.) est très grande et la réflectivité équivalente est donc exprimée en dBZ (10 fois le logarithme du rapport ou décibel Z).

Types de météo

Les systèmes météorologiques peuvent donner différents types de précipitations. Selon la stabilité de l'air et la disponibilité d'humidité, elles seront plus ou moins intenses et auront des caractéristiques différentes au radar. De plus, les précipitations se déplaçant par rapport au sol et à l'intérieur des nuages peuvent donner des indications sur les vents en altitude. Voici donc les informations que l'on peut tirer, ou non, des données radar et qui seront utiles aux météorologistes ainsi qu'aux utilisateurs comme les pilotes et les contrôleurs aériens:

- Direction et vitesse des vents sont détectables avec l'effet Doppler-Fizeau, s'il y a des précipitations;
- Pluie (faible, modéré ou forte);
- Bruine à bas niveau et près du radar, le brouillard ne peut être détecté car ses gouttes sont trop petites;
- Neige (faible, modéré ou forte);
- Glace sous forme de grêle, de grésil et de neige en grain;
- Température et humidité ne sont pas détectables par un radar météorologique à balayage horizontal. Cependant un sondage radio-acoustique fait avec un profileur de vent peut donner la température virtuelle;
- Les nuages sans précipitations ne sont détectables à moins d'utiliser une longueur d'onde très courte. Cependant, dès qu'il y en a, la structure en trois dimensions de celle-ci peut donner des indications sur le type de nuages.

Le radar météorologique donne des informations brutes que l'utilisateur doit interpréter selon la situation et son expérience. Il existe un ensemble de règles pour reconnaître les signatures particulières à chaque type de précipitations. Celles-ci sont basées sur l'étude de cas similaires et l'utilisateur doit se familiariser avec ces signatures. Une connaissance de la prévision météorologique pour le secteur d'intérêt lui permettra aussi d'anticiper les indices à chercher.

Parmi ces signatures, celles reliés à des conditions dangereuses sont très importantes. En particulier, celles qui sont reliés à la rotation dans les précipitations ou à des cœurs intenses dans les orages, précurseurs de phénomènes comme les tornades, la grêle et les micro-rafales. Pour des systèmes de grandes envergures, comme les cyclones tropicaux ou les tempêtes de neige, les données radars sont également inestimables.

Réflectivité et précipitations

Le radar est devenu un élément essentiel de la mesure des précipitations et de la détection du temps violent. La formation de nuages et de leurs précipitations sont dus au transfert de chaleur et de mouvement dans l'atmosphère par différents processus. Dans les systèmes de grande échelle, comme les tempêtes de neige, c'est un mouvement mécanique qui soulève l'air. Dans un orage, c'est la différence de température entre l'environnement et une parcelle d'air plus chaude qui produit le même effet. Dans les deux cas, l'air soulevé se refroidit à cause du changement de pression et quand l'humidité contenue dans l'air atteint le point de saturation, il y a formation des nuages et relâchement de chaleur latente.

Le mouvement de l'air varie continuellement dans les nuages, selon les conditions ambiantes. Dans le cas d'un orage, ces mouvements sont rapides et comportent une phase de croissance, suivie de la maturité du cumulonimbus puis de sa dissipation. Dans le cas de précipitations continues, les mouvements sont plus lents et le plus souvent on retrouve de la neige en altitude et de la pluie au sol. Il est donc important de suivre l'évolution de la structure des précipitations, pas seulement leur déplacement.

Le radar est un instrument de télédétection qui permet de couvrir une région entière et supplémente les données recueillies par les stations météorologiques de surface. Selon les besoins, la fréquence

de sondage peut varier. Ainsi, pour estimer la quantité de pluie tombée durant une période donnée, un sondage au 15 minutes peut être suffisant, mais pour suivre un orage violent, une fréquence de 5 minutes est nécessaire.

Dans ces deux applications, l'intérêt du radar météorologique conventionnel est de mesurer le taux de précipitations. Celle-ci est mesurée par la réflectivité (Z) qui va varier grandement entre la bruine et les pluies torrentielles ou la grêle. Pour compliquer les choses, des échos non météorologiques peuvent se mêler aux précipitations. Les avions, les oiseaux, les échos de sol et autres artefacts sont généralement reconnaissables pour un utilisateur expérimenté, car ils ont des caractéristiques particulières, mais contaminent les données. C'est pourquoi on utilise une échelle logarithmique pour Z qui peut débuter autour de 0 dBZ et aller à plus de 80 dBZ.

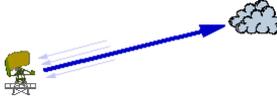
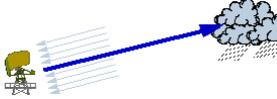
Cas A	La réflectivité retournée par un nuage qui ne contient pas de précipitations est généralement nulle. Seul les radars ayant une très courte longueur d'onde, bande L, peuvent obtenir un très faible retour.	
Cas B	De la pluie ou bruine faible donnera des échos faibles.	
Cas C	Dans le cas de pluie forte, parfois avec de la grêle, les retours seront très importants.	

Tableau 1 : Comparaison graphique de l'intensité des échos radar selon la précipitation.

Réflectivité versus type de précipitations ou de cibles non météorologiques

Tous les objets dans l'atmosphère vont retourner une partie du faisceau radar. Certains sont très réfléchissants alors que d'autres le sont beaucoup moins. Dans le tableau 1, nous avons une comparaison des réflectivités (Z) notées par un radar météorologique selon le type de précipitations ou d'artefacts. Le tableau ne comporte pas d'unités car il est juste pour montrer la relation entre les différents retours d'un radar météorologique. Il est important de se rappeler que la longueur d'onde utilisée par un radar d'un autre type peut être absorbée par les précipitations fortes et que la progression dans ce tableau ne reflète pas ce qui est noté par ce type de radar.

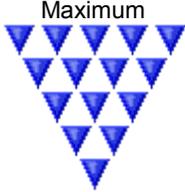
Réflectivité	Précipitations/Artefacts
<div style="text-align: center;">  <p>Maximum</p> <p>Minimum</p> </div>	Échos de sol Aéronefs Grêle et/ou pluie forte Pluie Neige fondante Neige Bruine

Tableau 2: Comparaison de la réflectivité entre les divers types de précipitations

Il est facile d'expliquer cette progression avec l'équation radar modifiée pour le radar météorologique et la définition de la réflectivité, soit: $Z = |K|^2 \sum N(D) D^6$ où D est le diamètre des cibles, $N(D)$ le nombre de cibles de diamètre D et K est la constante diélectrique de la cible.

Le diamètre des gouttelettes de bruine est beaucoup plus petit que celui de la pluie ou de la grêle. La constante diélectrique, qui détermine la propension à réfléchir de la cible, est beaucoup plus petite pour la neige que pour la pluie mais le diamètre des flocons est plus grand que celle des gouttes. Finalement, le sol et les aéronefs sont très réfléchissants et ont de grandes dimensions.

Relation Z versus taux de précipitations

Pour les précipitations, la relation entre Z et D n'est valide que dans les limites de la loi sur la diffusion de Rayleigh. Z (mm^6/m^3) est proportionnel au taux de précipitations R (mm / h) que si D est au moins 10 fois plus petit que la longueur d'onde utilisée par le radar. Dans ce cas, on trouve que:

$$Z = aR^b$$

Les facteurs a et b vont varier selon le type de nuages qui produit les précipitations et le type de précipitations elles même. Cette relation dépend de la distribution de gouttes de pluie ou de flocons de neige. Pour reconnaître le type de précipitations, les observations de surface dans la région environnantes ont toujours été essentielles et certaines signatures dans les réflectivités. Plus récemment, l'utilisation de la double polarisation du faisceau radar est employée pour obtenir l'information plus directement.

a) Distribution de gouttes

Dès la fin des années 1940, des recherches ont trouvé diverses distributions qui ont amené diverses valeurs de a et b. La figure 6 montre deux distributions dans les latitudes moyennes. La première est obtenue avec des précipitations stratiformes (pluie étendue) et la seconde avec des orages/averses. Nous pouvons voir que le nombre de gouttes avec un diamètre D va être différent dans les deux cas.

Dans le tableau 2, on peut voir aussi la variation du pourcentage de gouttes d'un certain diamètre par mètre cube d'air lors de pluie ayant différentes intensités. Ces distributions peuvent varier avec la température et vont certainement varier avec le type de précipitations (bruine, pluie, neige).

b) Relations courantes

Il est théoriquement possible avec un appareil appelé disdromètre de trouver la distribution exacte de diamètre des gouttes lors d'événement particulier, Mais en général on utilise des valeurs moyennes que l'on ajustera grâce aux mesures de précipitations des stations météorologiques environnant le radar. Dans le tableau 3 on retrouve les valeurs de a et b classiques:

En général dans les latitudes moyennes la relation $Z = 200 \cdot R^{1,6}$ est utilisée dans la pluie et $Z = 2000 \cdot R^2$ dans la neige. Il s'agit de la relation de Marshal-Palmer.

Diamètre (cm)	Taux de précipitations (mm/h)			
	0,25	1,25	2,5	12,5
	% du contenu			
0,05	28,0	10,9	7,3	2,6
0,10	50,1	37,1	27,3	11,5
0,15	18,2	31,3	32,8	24,5
0,20	3,0	13,5	19,0	25,4
0,25	0,7	4,9	7,9	17,3
0,30	-	1,5	3,3	10,1
0,35	-	0,6	1,1	4,3

Tableau 3 : Nombre de gouttes par mètre cube versus leur diamètre (D)

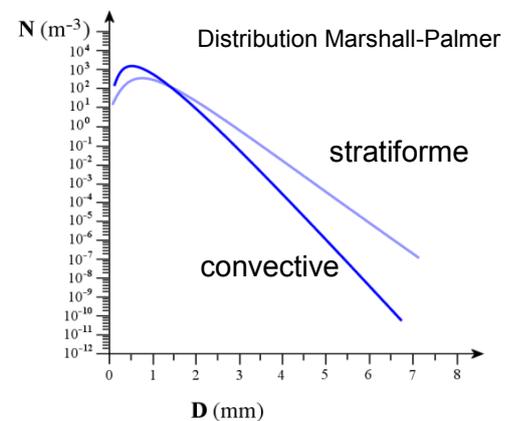


Figure 6 : Distribution de Marshall-Palmer pour différents type de précipitations

Pluie stratiforme	$Z = 200 \cdot R^{1,6}$
Pluie orographique	$Z = 31 \cdot R^{1,71}$
Nuages convectifs	$Z = 286 \cdot R^{1,37}$
Neige	$Z = 2000 \cdot R^2$

Tableau 4 : Relation Z-R pour diverses situations. Z est en dBZ = 10 log Z retour de la précipitation / Z (1 mm⁶/m³)

c) Échelle R versus intensités des précipitations

Les valeurs obtenues par la relation Z-R permettent déterminer l'intensité de la pluie (selon le FAA américain):

- Légère, moins de 2 mm/h (pluie) et moins de 1 cm/h (neige)
- Modérée, de 2 à 7 mm/h
- Forte, plus de 7 mm/h
- Très forte, plus de 16 mm/h
- Intense, plus de 32 mm/h
- Extrême, plus de 64 mm/h

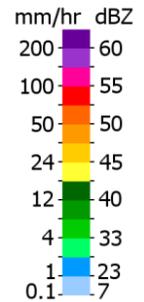


Figure 7 : Légende de couleur sur un radar météorologique avec dBZ et mm/h pour de la pluie

Divers

Certains radars de très courte longueur d'onde, comme ceux de bande K et Ku, peuvent détecter des retours de gouttes de nuages ou de brouillard, de l'ordre du micron. Ces gouttes sont trop petites pour la longueur d'onde utilisées par les radars météorologiques conventionnels, soit les bandes X, C ou S.

La turbulence en air clair est détectable par la diffusion de Bragg. En effet, l'air a un indice de réfraction qui varie dans l'espace et une onde radar va être réfléchiée par les zones où le changement est important, Cela permet de détecter des artefacts comme les fronts de rafales qui sortent des orages, les brises de mer ou la turbulence. Les radars à très courte longueur d'onde sont préférables (bande K et Ku) pour cette détection mais un sondage lent sur 360 degré autour du radar avec les bandes S, C ou X permet également de les voir, s'il n'y a pas de précipitations.

Vitesse radiale Doppler

Les radars météorologiques modernes mesurent la vitesse de déplacement des précipitations en utilisant l'effet Doppler-Fizeau. Ce dernier est le décalage de fréquence d'une onde acoustique ou électromagnétique entre la mesure à l'émission et la mesure à la réception lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie au cours du temps. On peut de manière alternative noter la différence de phase entre deux impulsions successives émises et retournées par les cibles.

Le décalage ne donne cependant que le déplacement par rapport au radar, soit la composante radiale de la vitesse. Les valeurs les plus grandes sont lorsque le radar «regarde» dans la même direction que le mouvement et les plus petites se trouvent dans les directions tangentielles à celui-ci. La valeur de la composante radiale Doppler est positive quand la cible s'approche du radar et négative quand elle s'en éloigne.

Les précipitations ne sont pas des cibles ponctuelles mais plutôt volumiques ce qui veut dire que la vitesse notée est celle moyenne dans le volume sondé. De plus, les précipitations couvrent de grandes superficies qui permettent de voir la composante radiale de plusieurs directions. Si les précipitations couvrent une bonne partie de l'écran cela permet d'estimer les vraies directions et intensités du déplacement des gouttes ou flocons. Comme ils ont une très faible masse, ils se déplacent plus ou moins à la vitesse du vent. On peut ainsi estimer que la vitesse et la direction des vents autour du radar par l'analyse de l'image des données Doppler.



Figure 8 : Affichage Doppler

L'image figure 24 montre un dégradé de couleur proportionnel à la composante radiale de la vitesse de déplacement des gouttes de précipitations dans un cas réel simple. Le radar est placé au centre et par convention, le bleu/vert est utilisé pour les vitesses qui s'approchent, alors que le rouge pour celles qui s'éloignent. La ligne grise de gauche à droite montre la ligne de vitesses radiales nulles.

Cet exemple est très simple, dans une situation réelle, le vent peut varier d'un endroit à l'autre et l'image demandera un examen plus détaillé. Cependant, en se rappelant que l'on a la composante radiale en tout point, un utilisateur peut obtenir beaucoup d'information météorologique.

Les précipitations sont généralement nécessaires pour obtenir des informations à grande échelle. Cependant en air clair près du sol, le déplacement des insectes peut être perçu par le radar et donner le déplacement des brises de mer et des fronts de rafales sortant des orages.

Signatures radar

Les différents systèmes météorologiques ont une signature particulière sur un radar météorologique. Celles-ci sont fort différentes entre les systèmes de large échelle, comme les tempêtes de neige, et ceux de très faible étendue comme les orages. Finalement, les tempêtes tropicales ont leurs propres caractéristiques qui sont moyennes entre les deux premiers cas.

Systèmes à large échelle, dite synoptique

Dans la figure 9, les précipitations couvrent presque tout l'écran. Il s'agit de la réflectivité associée à une tempête de neige passant sur la côte Est des États-Unis. Les intensités varient peu mais des bandes plus claires dénotent des précipitations plus intenses.

Une coupe montrerait une augmentation graduelle de la réflectivité entre le sommet des nuages et le sol.

Précipitations convectives

Dans le cas d'averses ou d'orages, les précipitations sont soit isolées, soit forment des lignes organisées. La réflectivité varie beaucoup de kilomètre en kilomètre horizontalement sur l'affichage radar et une coupe montre la même chose.

Dans la figure 10, on retrouve à gauche les échos de réflectivité associés avec un orage violent. Il est facile de noter la variation importante du taux de précipitations et la forme en crochet de la partie inférieure (en jaune) de la ligne des échos. Ce crochet est un indice important d'orages associés avec une tornade.

La partie de droite montre les vitesses radiales Doppler. On peut voir un doublet vert-rouge. Le radar étant complètement à droite de l'image, ce doublet est associé avec la partie radiale d'une rotation dans le nuage. Cette rotation de plusieurs kilomètres de diamètres n'est pas la rotation d'une tornade (diamètre de 10 m à 1 km) mais un indice important.

La figure 11 est une coupe à travers un orage violent. On peut voir que contrairement à une coupe dans des précipitations stratiformes, on a de très fortes variations de réflectivité horizontalement et verticalement.

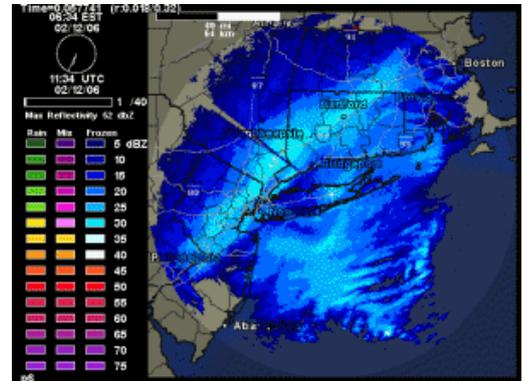


Figure 9 : Tempête de neige sur New York (source NOAA)

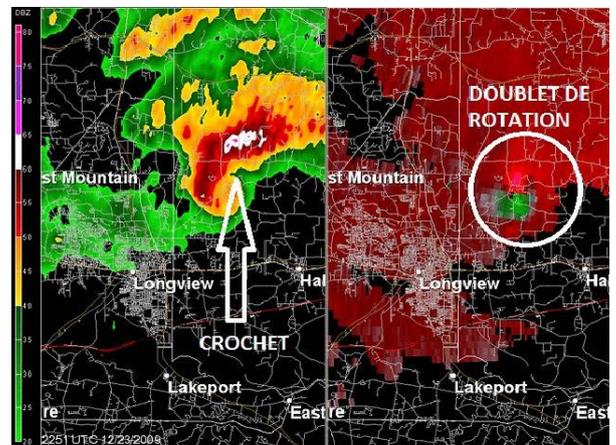


Figure 10 : À gauche, réflectivité dans un orage tornadique et à droite, rotation dans ce même orage (source NOAA)

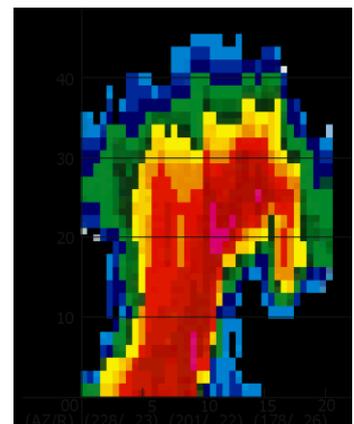


Figure 11 : Coupe verticale dans un orage supercellulaire source NOAA

Du côté droit, on peut voir de fortes intensités (rouge) en altitude et rien en dessous. Il s'agit d'une signature caractéristique d'un fort courant ascendant dans l'orage. En effet la condensation se produit à plus haute altitude dans ce courant car la température y est plus chaude que l'environnement.

Il existe beaucoup d'autres signatures dans les réflectivités et les vitesses Doppler qui permettent à un météorologue ou un opérateur radar de repérer les zones dangereuses dans les précipitations convectives.

Cyclones tropicaux

Les cyclones tropicaux comportent à la fois des caractéristiques convectives et de systèmes à grande échelle. La réflectivité varie grandement le long de leur bras en spirales puisqu'ils sont formés d'orages. Cependant, un cyclone s'étend sur plusieurs centaines de kilomètres de rayon ce qui va souvent remplir l'écran radar.

Dans la figure 4, prise depuis un avion de reconnaissance, on peut voir clairement le centre de la tempête qui forme un œil sans précipitations. Ce dernier est entouré de spirales de pluie forte (rouge).



Figure 12 : Image de l'Ouragan Lenny de 1999 (source NOAA)

Types de radars météorologiques

Radars météorologiques de surface

La plupart des pays ont développé des réseaux de radars météorologiques de surface pour surveiller le temps. Parmi les plus connus, on compte NEXRAD aux États-Unis et ARAMIS ([Application radar à la météorologie infra-synoptique](#)) en France. En 1995, le programme «COST 75» de la Commission européenne a fait l'inventaire de tous les radars en Europe et produit cette carte. Depuis ce temps, plusieurs radars se sont ajoutés et d'autres ont été modernisés.

Il existe également des radars météorologiques utilisés par des usagers spéciaux. En particulier, certaines universités ont des radars de recherche et certaines stations de télévision américaines ont leur propre radar. Dans l'inventaire européen et dans les autres réseaux à travers le monde, il y a trois types de radars:

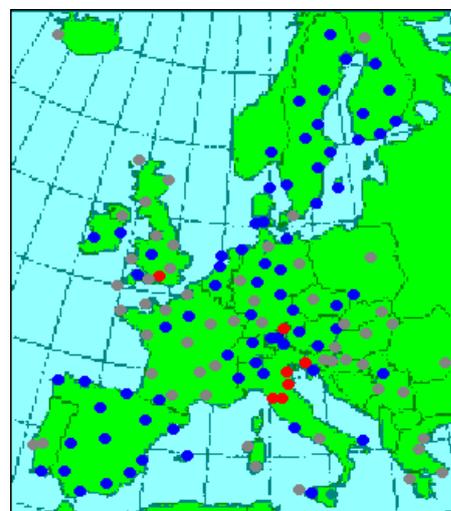


Figure 13 : Carte montrant les radars météorologiques en Europe :

- Radar conventionnel
- Radar Doppler
- Radar à double polarisation

- **Radar conventionnel (non Doppler)**

Il s'agit d'un radar qui ne sonde que pour la réflectivité. Jusqu'à la fin des années 1980, c'étaient des seuls radars disponibles opérationnellement. Leurs données ont été essentielles pour suivre les précipitations et développer une compréhension la structure de celles-ci, autant dans les dépressions de large échelle, dite synoptique, que pour les orages violents.

L'élimination des divers artéfacts non liés aux précipitations est cependant difficile avec ces radars. En effet, les algorithmes pour le faire, comme le traitement statistique ou par carte des échos parasites, sont moins efficaces. Il reste encore un bon nombre de ces radars en usage mais ils ne sont plus produits.

- **Radar météorologique Doppler**

Les radars plus récents comportent un module de traitement du déplacement des cibles sondées par l'effet Doppler-Fizeau, dont les principes sont également utilisés par les radars primaires de surveillance aérienne. Ces radars obtiennent donc deux informations des précipitations: leur réflectivité et leur vitesse radiale. Ceci permet de mieux connaître les

mouvements dans les précipitations, comme les rotations annonciatrices de tornades, et d'éliminer les échos parasites. En effet, ces derniers ont une vitesse caractéristique, généralement nulle.

- **Radar à double polarisation et Doppler**

Les radars conventionnels et Doppler sondent l'atmosphère avec un faisceau polarisé horizontalement. Les radars à double polarisation utilisent un faisceau qui est alternativement polarisé verticalement puis horizontalement. En plus de donner la réflectivité et la vitesse radiale des précipitations, ils peuvent extraire la forme des hydrométéores ainsi que différentes autres informations à partir des corrélations entre les deux signaux de retour. Les programmes de modernisation des radars météorologiques des années 2000 prévoient en général incorporer cette fonctionnalité pour reconnaître directement le type de précipitations et éliminer les artefacts de façon plus efficace.

Les trois types de radars (conventionnels, Doppler et à double polarisation) peuvent opérer dans les bandes d'émission C, S ou X. La bande utilisée dépend de différents facteurs dont le coût, le type prépondérant de précipitations dans une région et la demande d'informations spécifiques.

Radars météorologiques de courte portée

Les radars météorologiques de courte portée sont utilisés par des utilisateurs ou pour des usages particuliers. Des radars à balayage horizontal sont ainsi utilisés par les services de contrôle aérien pour suivre le temps autour d'un aéroport. Un exemple de ceux-ci est le radar [AMS Gematronik](#) qui a une portée utile de 80 milles nautiques. Il est utilisé pour les approches des pistes et peut augmenter la couverture du réseau de radars d'un pays.



Figure 14 : Radar météorologique de bande C

Un nouveau concept de radar à courte portée est expérimenté aux États-Unis par le consortium universitaire [CASA](#). Il consiste à disposer à tous les 40 km de petits radars de bandes X pour prendre des données de très grande résolution à bas niveau. Ils sont fortement atténués dans la pluie forte mais ont des zones de couvertures redondantes. Les données du réseau permettront de voir sous l'angle le plus bas des radars NEXRAD de longue portée

L'avantage des radars de courte portée est également la possibilité de varier le taux de rotation de l'antenne, généralement entre 3 et 6 tours par minutes. Si le radar sonde plusieurs angles durant cette période, cela permet de varier la fréquence des données en trois dimensions obtenues. En cas de précipitations importantes, une augmentation de ce taux permet de mieux voir l'évolution du temps.

Les radars pointant verticalement, dont les [profileurs de vent](#), sont également des radars à courte portée. Ils permettent de sonder avec très grande précision, de l'ordre de 100 mètres, les précipitations passant à leur verticale, et ce, jusqu'à 15 kilomètres d'altitude. Ces radars permettent de voir des détails trop petits pour les radars à balayage horizontal ainsi que la vitesse de chute des précipitations qui permet d'en estimer le type. En variant l'orientation par rapport à la verticale, ils peuvent aussi obtenir le vent horizontal.

Radar météorologique à longue portée

Les radars météorologiques de longue portée sont des radars à balayage, similaires à ceux de courte portée, qui sont utilisés par les services météorologiques nationaux. Ils sont le plus souvent organisés en réseau pour couvrir le territoire national ou les zones peuplées. Les données de tous les radars d'un réseau peuvent ainsi être assemblées en une mosaïque qui montre les précipitations sur l'ensemble du territoire.



Figure 15 : Le radar météorologique Meteor 1500 d'Adelaïde (Australie) sans son radôme protecteur.

Leur localisation dépend donc plus d'une stratégie de couverture optimale qu'une colocalisation avec une installation particulière comme un aéroport. En général, la couverture de chaque radar déborde peu sur celle d'un autre, pour éviter les données redondantes. Cependant, dans le cas où la longueur d'onde utilisée peut être atténuée dans les fortes précipitations (cas des radars de bande C au Canada ou en Europe du Nord), les voisins de grille d'un réseau partageront souvent une partie de leur couverture pour remédier au problème.

Ces radars peuvent avoir une portée maximale dépassant les 500 km, mais en général leur portée utile est limitée à moins de 300 km. En effet, la résolution diminue avec la distance, et même le faisceau d'angle de site le plus bas s'élève ensuite rapidement au-dessus des précipitations. Par exemple, les WSR-88D du réseau NEXRAD effectuent un sondage jusqu'à 480 km avec l'angle le plus bas, mais limitent la portée maximale non ambiguë à 250 km pour les autres.

L'antenne des radars de longue portée tourne à une vitesse allant jusqu'à 6 tours par minute et effectue des balayages sur plusieurs angles d'élévation afin d'obtenir une vue en trois dimensions de la région de couverture. Par contre, ils peuvent aussi tourner très lentement (ex. celui de Bordeaux en France tourne à 0,8 tours par minute) pour prendre des données à très grande résolution. Selon la stratégie de sondage choisie, les données seront disponibles entre 5 et 15 minutes après le début du sondage. Récemment, le National Weather Service américain expérimente l'utilisation de radars à antennes réseau à commande de phase qui permettraient d'effectuer les mêmes sondages en une minute ou moins avec très grande précision.

Canal météo dans un radar de surveillance aérienne

Les radars dédiés à la surveillance des précipitations coûtent chers et sont donc financés par les services nationaux de météorologie. Plusieurs fabricants de radars primaires pour aéroports, comme l'ASR-E de EADS, offrent comme alternative un module électronique de traitement des échos météorologiques. Cependant, comme le rôle principal de ces radars est le contrôle du trafic aérien, la vitesse de rotation est plus rapide et les angles sondés peuvent être différents de ceux d'un radar météorologique. Il est donc généralement considéré que leurs données sur les précipitations sont de moindre qualité.

Radars météorologique bistatique

Un des problèmes en météorologie radar est de connaître avec précision les mouvements dans les nuages. Un seul radar ne permet de connaître que la vitesse radiale des précipitations et de ne calculer que les divergences. Il est possible de voir des indices de rotation mais non d'en calculer l'intensité avec précision.

L'utilisation d'un radar bistatique permet à peu de frais d'obtenir la composante tangentielle du vent horizontal car le récepteur secondaire reçoit l'information d'un angle différent. Il s'agit d'une façon beaucoup moins coûteuse que de construire un second radar météorologique.

Une fois les deux composantes du vent horizontal connues, ainsi que la répartition des précipitations dans le nuage, il est possible de calculer les mouvements à trois dimensions dans le nuage, incluant les rotations. Cela est particulièrement intéressant dans l'étude des orages. Ces informations peuvent être intégrées dans les modèles numériques de prévision du temps à fine échelle.

Les antennes secondaires ont un assez large angle de réception azimutal (30 à 60 degrés) et vertical (2 à 10 degrés). Il faut donc une excellente synchronisation entre le radar primaire et les antennes secondaires afin de déterminer la position des échos retournés. Cela limite également la zone de couverture à un emplacement bien défini, comme au-dessus d'un aéroport. La recherche semble être au point mort depuis le milieu des années 2000 à cause de certains problèmes liés à la résolution de ce type de radar.



Figure 16 : Radar monostatique avec deux récepteurs bistatiques.

Radar météorologique aéroporté

Dès les premières années de la Seconde Guerre mondiale, le développement des magnétrons de puissance a permis de monter des radars à bord d'avions. Avec l'application des radars à la détection des précipitations, des radars météorologiques aéroportés ont rapidement vu le jour après le conflit. Ceux-ci sont maintenant un instrument largement répandu dans l'aviation commerciale et dans la plupart des avions d'affaire.

On les retrouve le plus souvent dans le nez de l'appareil, derrière un cône protecteur fait de matériau qui n'absorbe pas les micro-ondes comme le fibre de verre. Ils donnent une image des conditions atmosphériques vers lesquelles l'appareil se dirige et permettent ainsi au pilote d'esquiver les zones dangereuses comme les orages. Leur portée maximale habituelle est de 180 milles nautiques mais ils peuvent être limités sur demande à des portées plus courtes, de 30 à 80 milles nautiques, pour avoir plus de détails.



Figure 17 : Antenne parabolique à gauche et antenne réseau à commande de phase à semi-conducteurs Collins à droite

Certains avions sont également équipés de radars pointant vers l'arrière ou dans d'autres directions. Il s'agit en général d'avions de recherche ou de reconnaissance. Par exemple, les [avions chasseurs d'ouragans](#) du *National Weather Service* américain sont équipés de ce type de double radar pour étudier ces tempêtes en détails.

Deux types différents d'antennes peuvent être utilisées sur un avion: antenne parabolique ou à commande de phase. Les deux sont largement en usage mais le second type est devenu plus répandu car le balayage de l'horizon se fait électroniquement et requiert un assemblage mécanique moins compliqué pour l'orienter.

En effet, une antenne parabolique doit être déplacée de droite à gauche, balayant sur 120 à 180 degrés, à chaque balayage. Ceci est fait électroniquement sur une antenne réseau à commande de phase. La même chose peut être dite du balayage vertical. Il ne reste qu'à fournir un joint pour l'orientation par rapport à l'horizontal et la verticale pour les changements d'attitude de l'appareil (roulis et tangage).

La dimension de l'antenne est limitée sur un avion. La longueur d'onde utilisée est donc importante puisque la résolution des données est inversement proportionnelle à la longueur d'onde utilisée pour une même antenne. Les antennes à commande de phase sont souvent plus petites pour une même résolution, en particulier si elles utilisent la bande X (longueur d'onde de 3 cm), comme celles d'[Airbus](#), au lieu de la bande C (5 cm).

L'avionique du cockpit d'un avion moderne comprend un système de traitement des données du radar météorologique et un affichage des celles-ci. Cet affichage se retrouve souvent près du transpondeur ou d'autres instruments de navigation. Ces données sont en trois dimensions si l'antenne effectue des balayages sur plusieurs angles l'élévation. Le traitement de ces données permet au pilote de mieux visualiser la structure des précipitations.

Stabilisation (roulis et tangage)

Durant les manœuvres d'un aéronef, comme le décollage, le radar va pointer vers une zone qui peut ne pas être celle où se trouve le temps que rencontrera l'appareil.

Une stabilisation de la direction vers laquelle pointe le radar est donc essentielle. Ceci nécessite des corrections effectuées par un moteur, guidé par un gyroscope, qui oriente l'antenne dans la bonne direction. Cette manœuvre est plus facile dans le cas de roulis ou de tangages mineurs et peut être impossible lors de changements brusques.

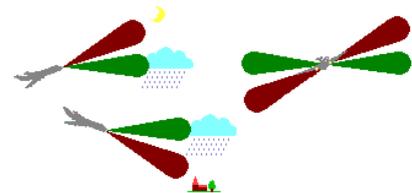


Figure 18 : Orientation du faisceau radar durant le roulis et le tangage

Sur le **plan vertical**, le décollage ou l'atterrissage vont engendrer une importante variation de la direction qui peut même dépasser l'ajustement pour l'attitude et causer des problèmes connus du radar météorologique. Le pilote peut sélectionner des corrections standards à partir de tables qui indiquent les taux spécifiques de montée/descente de l'avion utilisé. Dans les avions commerciaux le pilote automatique est souvent chargé de faire ces corrections, non seulement à ces deux moments critiques mais également en vol lors de turbulence.

Sur le plan horizontal, les manœuvres complexes de certaines phases du vol forcent le pilote à changer la direction de vol. Ainsi le contrôleur aérien lui donnera des instructions de hauteur de vol, de virage vers les pistes, etc. Ces changements peuvent outrepasser les corrections de l'orientation du radar.

Affichages d'un radar météorologique

PPI

Les données des radars météorologiques sont affichées de plusieurs façons. La plus commune est l'affichage PPI (Vue panoramique à angle constant). Il s'agit d'un affichage des données sur tous les azimuts disponibles sur un seul angle d'élévation. Le radar se trouve au centre de l'image et les données sont pointées selon leur position azimutale et radiale.



Figure 19 : Affichage d'un radar aéroporté

Avec un radar de surface, les données sont sur 360 degrés autour du radar mais dans un avion, les données sont généralement limitées à la vision vers l'avant. Il faut se rappeler que le faisceau s'élève avec la distance au radar et donc que ces données sont de plus en plus en altitude lorsqu'on s'éloigne du radar (voir figure 20).

CAPPI

Un Capi (Vue panoramique à altitude constant) est une coupe horizontale des données en trois dimensions de l'espace sondé par le radar. Sur la figure 20, on a un certain nombre d'angles d'élévation, allant de 0,5 à 15 degrés, qui ont été balayés jusqu'à un maximum de 45 kilomètres du radar. Le Capi de 4 000 pieds d'altitude utilisera donc les données les plus près de cette hauteur à une distance du radar. Cette coupe peut également être une moyenne des informations sur plusieurs angles qui ont des données près de cette hauteur (les boîtes grises).

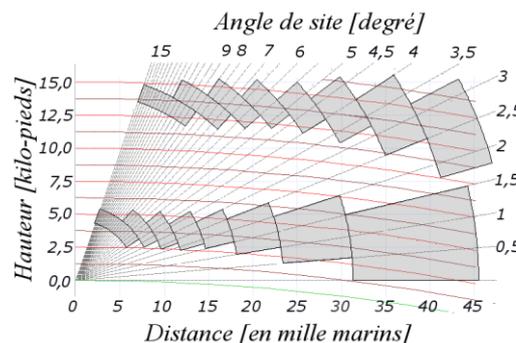


Figure 20 : Définition d'un CAPPI

On peut remarquer que les données proviennent de cellules de résolution de plus en plus grandes lorsqu'on s'éloigne du radar et donc une moyenne de plus en plus lissée. Selon la hauteur choisie, il peut également arriver qu'aucune donnée ne soit disponible à la hauteur choisie à cause de la propagation du faisceau. Le CAPPI devient alors le PPI de l'angle le plus au-delà de cette distance.

Le CAPPI n'est pas d'usage aussi universel que le PPI mais il est assez répandu, même sur les avions.

Coupe verticale

La figure 21 montre un CAPPI avec des coupes verticales des données sur les bordures supérieures et droites. Ces coupes sont effectuées le long des deux lignes traversant les précipitations sur le CAPPI. Elles permettent de voir la structure verticale des précipitations, celles-ci étant fort différentes entre des précipitations convectives (orages) et stratiformes (pluie continue).

Dans la marge supérieure, on peut voir la coupe seront la direction gauche-droite dans les précipitations au bas du CAPPI. On y remarque que les précipitations sont intenses (rouges) depuis le sol jusqu'à une altitude notée 10. Le tout est caractéristique d'un orage. Dans la marge de droite, on voit une coupe le long de la ligne haut-bas dans le CAPPI. Cette coupe montre que la ligne de précipitations sur le CAPPI est formée de plusieurs cellules similaires à la coupe de la marge supérieure et donc est formée d'une série d'orages.

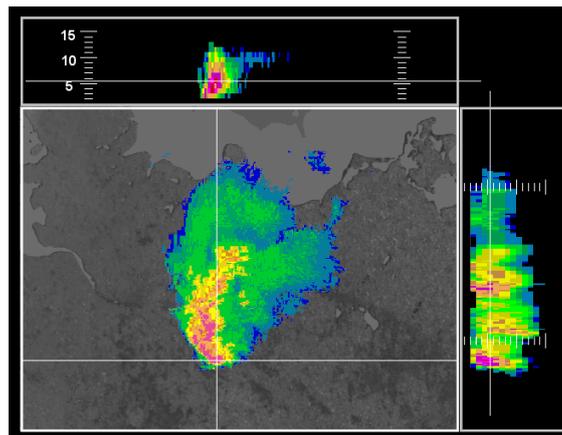


Figure 21 : CAPPI avec coupes verticales des réflectivités dans les axes indiqués.

Composites radar

Pour bien voir le déplacement des précipitations au-dessus d'une grande région, les sorties de plusieurs radars doivent être mis en réseau sur une carte mosaïque. Lorsque deux ou plusieurs radars ont des zones de recoupement, il faut prévoir un arbre de décision pour choisir quelle valeur sera affichée en un point de façon à avoir un continuum.

Pour les radars pouvant avoir une certaine atténuation dans les précipitations fortes, on mettra en général la donnée du radar ayant le plus fort retour en un point si deux radars couvrent cet endroit. Pour les radars n'ayant pas d'atténuation notable, on mettra plutôt la valeur du radar le plus près.

Ceci peut varier entre l'hiver et l'été. En effet, dans la pluie, les précipitations vues sur un angle de bas niveau sont relativement représentative de ce qui arrivera au sol. Par contre, dans la neige, il peut y avoir beaucoup de différence de position à cause du transport par les vents et la sublimation (virgases). Cela peut aboutir à une grande différence entre la valeur de la donnée du radar et celle au sol. Il faut donc choisir dans ce dernier cas le radar dont les données sont les plus près du sol en un point.

Artefacts

La bande brillante

La «bande brillante» est un effet de rehaussement des réflectivités dans les précipitations fondantes. Ceci est une situation normale dans les latitudes moyennes terrestres alors que les précipitations à grande échelle se forment en altitude, là où la température est sous le point de congélation de l'eau, sous forme de cristaux de glace.

L'image ci-contre montre les données prises par un radar météorologique pointant verticalement. Dans la moitié de droite, à environ 2,4 km d'altitude, la ligne de couleur rouge indique des réflectivités plus intenses qu'au-dessus et en dessous. C'est là un exemple de bande brillante.

Le diagramme montre ce qui se passe quand la neige produite en altitude tombe dans une couche au-dessus du point de congélation et se change en pluie:

- À haute altitude les précipitations débutent sous forme de très petits cristaux de glace dans l'air très froid. En tombant, ceux-ci croissent par déposition de vapeur d'eau et par collision pour finalement donner des flocons de neige. La réflectivité augmente donc graduellement durant la chute de ces flocons à cause l'accroissement de leur diamètre.
- En général, la température de l'air augmente en s'approchant sur sol. Lorsque les flocons passent dans la couche au-dessus du point de congélation, ils commencent à fondre. C'est d'abord l'extérieur qui se transforme en eau, enrobant ce qui reste du flocon. Comme l'eau est de 9 à 10 fois plus réfléchive que la glace et que le diamètre du flocon est encore important, cela optimise les deux facteurs influençant la réflectivité.
- Pour un radar, la neige fondante donnera une réflectivité très augmentée par rapport à la neige, jusqu'à 10 dBZ, faussant l'estimation du taux de précipitations. C'est ce qu'on nomme la **bande brillante**.
- Les flocons finissent par fondre complètement. Les gouttes de pluie en résultant sont très petites et tombent plus rapidement que la neige. Comme le diamètre et la concentration diminuent grandement, la réflectivité retombe vers une valeur plus caractéristique.

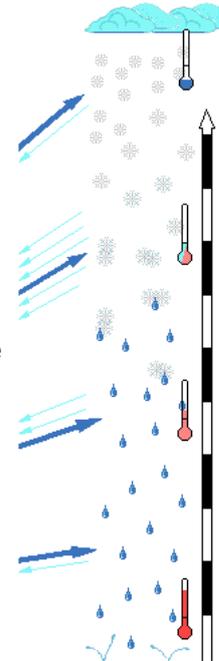


Figure 22 : Variation de la réflectivité avec le passage des flocons de neige à la pluie sous le point de congélation

L'altitude où l'on retrouve la bande brillante varie avec la saison. Elle se retrouve à plusieurs kilomètres au-dessus du sol en été et descend graduellement à l'automne. Elle est absente en hiver lors de chutes de neige et remonte au printemps.

Atténuation dans la pluie

Toute onde électromagnétique peut être absorbée en passant dans un milieu quelconque car elle excite les molécules qui le composent. Cela peut donc enlever une partie des photons pour faire changer le niveau énergétique du milieu. L'air est très peu absorbant mais la molécule d'eau l'est. Plus la longueur d'onde porteuse du faisceau radar se rapproche de celle des gouttes d'eau (0,1 à 7 millimètres), plus le dipôle de ces molécules sera excité et plus l'onde sera atténuée par la précipitation rencontrée.

Ce diagramme montre l'effet de l'atténuation du signal radar par la pluie à différentes longueurs d'onde. Le cas utilisé est celui d'un orage de 20 kilomètres de

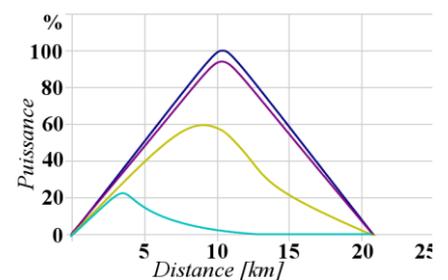


Figure 23 : Atténuation dans la pluie pour différentes longueurs d'onde

diamètre, dont le taux de précipitations augmente linéairement jusqu'au centre, à **100 mm/h**, puis diminue linéairement de l'autre côté.

La ligne en bleu représente la courbe théorique normalisée du signal non atténué faisant un aller-retour à travers l'orage. La courbe en violet est celle observable avec un radar utilisant la bande S (10 cm). Les courbes suivantes, en jaune et cyan, sont respectivement le signal de retour pour des radars de bandes C (5 cm) et X (3 cm). La différence avec le signal théorique est de plus en plus grande très grande à mesure que la longueur d'onde raccourcit à cause de l'absorption d'une partie grandissante de l'énergie par les molécules d'eau.

Le diagramme montre également que l'atténuation varie avec le taux de précipitations: le faisceau de bande X est totalement absorbée dès 20 mm/h, celui de bande C à partir de 60 mm/h mais la perte est négligeable pour le faisceau de bande S, même dans le pic de précipitations.

L'atténuation est donc généralement minimale dans la neige, même pour la bande X. Dans la pluie faible à modérée, la bande X est affectée significativement mais la bande C l'est encore peu. Par contre, dans la pluie forte, seule la bande S a une perte minimale. C'est pour ces raisons que les radars météorologique de bande S, plus coûteux, sont utilisés dans les régions où des orages/pluies intenses se produisent une bonne partie de l'année: les Tropiques, le sud des États-Unis ou de l'Europe, etc. Les radars de bande C sont un bon compromis pour les régions tempérées où le taux de précipitations est le plus souvent faible à modéré. Les radars de bande X ne servent que pour la courte portée à cause de la forte atténuation de leur signal.

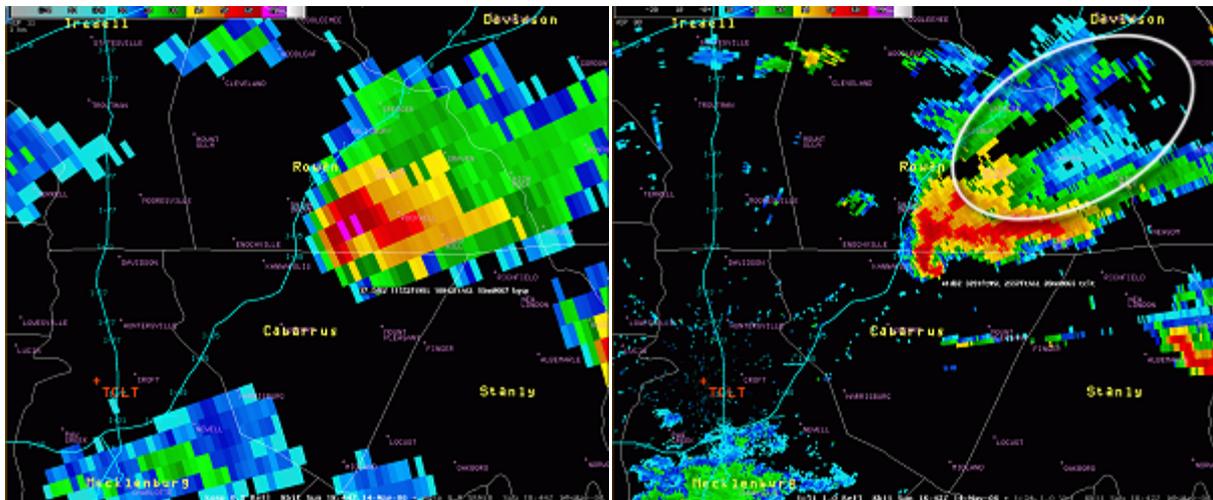


Figure 24 : Orage intense vu à gauche par un radar de bande S. À droite, le même orage vu par un radar co-localisé de bande C avec la zone d'échos atténués dans le cercle blanc (source [NOAA](#))

Dans la figure 24, on peut voir l'effet de l'atténuation du signal par un orage intense. À gauche, nous pouvons voir l'image obtenue par un radar NEXRAD de bande S situé dans le coin inférieur gauche. À droite, nous avons les données d'un radar du FAA de bande C qui est localisé presque au même endroit.

Les intensités en rouge et violet dans le flanc gauche de l'orage sont de 60 à 70 dBZ, donnant un taux de précipitations de plus de 100 mm/h et sont probablement liés à la présence de grêle. Le faisceau doit passer à l'aller à travers le cœur des précipitations pour atteindre la région sur le flanc arrière de l'orage. Le signal rétrodiffusé dans cette région doit retraverser le cœur avant d'atteindre le radar.

Dans l'image du radar de bande C, à droite, on remarque dans le cercle blanc, que les échos sont plus faibles que sur l'image de gauche (le bleu domine au lieu du vert), le signal ayant subi une importante atténuation dans les deux directions. Il y a même une zone sans échos derrière le cœur de précipitations (bande noire), indiquant une atténuation totale du signal.

Comparaison entre radars

Les données d'un seul radar météorologique sont utiles mais les données peuvent souffrir de différents artefacts. Il est souvent important de pouvoir comparer les informations venant de deux radars quand ils couvrent une partie de la même zone.

Cependant, en comparant les données entre deux radars, il faut se rappeler que:

- La calibration entre deux radars peut varier. Elle doit être faite régulièrement en comparant les réflectivités de chaque radar avec les données des stations météorologiques environnantes.
- La longueur d'onde est-elle la même pour les deux radars. En effet, le faisceau radar sera atténué dans certaines circonstances et si on compare l'information venant d'un radar de bande S avec un autre de bande C, la réflectivité ne sera pas nécessairement la même.
- Le niveau regardé peut être différent. Par exemple, deux radars pointant vers un orage vont intercepter celui-ci à un niveau différent, même si leur faisceau a le même angle de site, si la distance entre les radars et la cible est différente.
- Le volume de résolution peut être différent si la largeur du faisceau ou la distance au radar ne sont pas les mêmes.

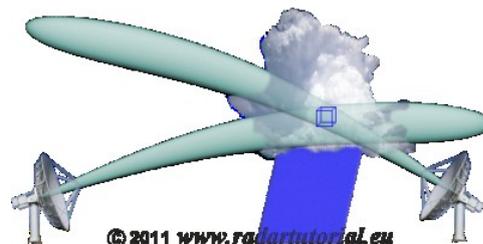


Figure 25 : Orage sondé par deux radars à une distance différente: remarquez la différence du volume de résolution

Échos parasites

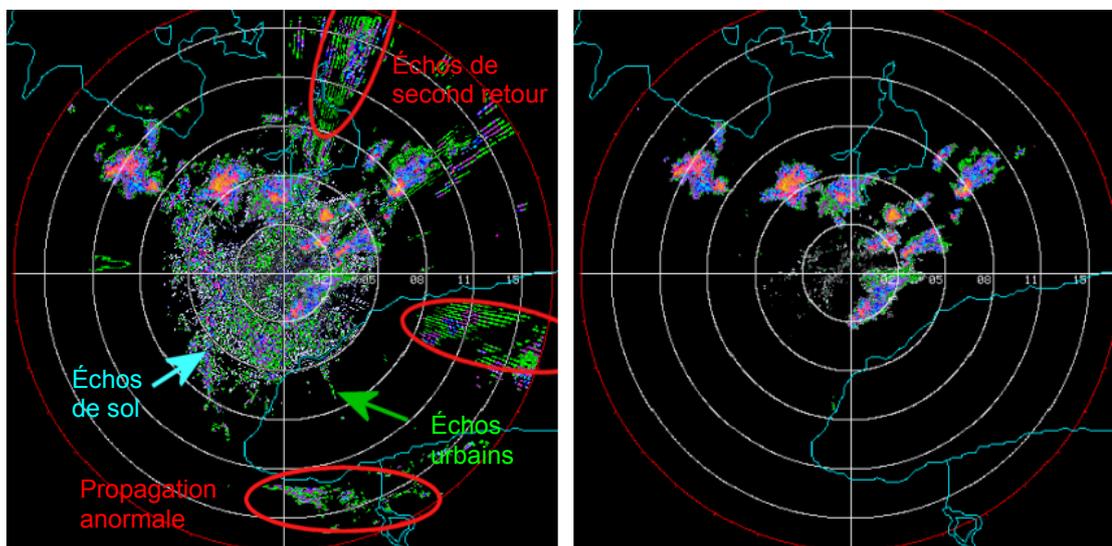


Figure 26 : Image radar avec plusieurs échos parasites à gauche. Même situation après filtrage à droite.

Le signal retourné au radar peut contenir plusieurs types d'échos parasites. Voici quelques exemples qui sont parfois très surprenants:

- **Insectes**
Les insectes ont une section équivalente radar qui peut être assez importante quand ils se déplacent en nuée. La rétrodiffusion de ces cibles, spécialement à bas angle de site, peut servir de «traceur» pour divers phénomènes en air clair comme les vents de bas niveau où les brises de mer car ils sont concentrés par la convergence des vents. Ils sont surtout perceptibles près du radar;
- **Rouleaux de convection sans précipitations dans la couche limite**
Quand les conditions sont instables mais peu humides, l'air près du sol est soulevée et celui au sommet de la couche limite redescend pour former de long rouleaux de convection ayant quelques centaines de mètres de hauteurs. Comme ils ne contiennent pas de précipitations,

ils ne retournent pas de signal au radar, sauf si des oiseaux ou des insectes se trouvent pris dans leur circulation. Leur détection peut être très utile à l'aviation;

- **Échos de mer**

Lorsque le faisceau d'un radar rase ou frappe la mer ou un lac, une partie de son énergie peut être retournée au radar par la surface (une goutte d'eau dans un nuage ou sur la mer a les mêmes propriétés). De plus, si les conditions de vents sont favorables, des vagues vont se former et donner une vitesse à ces échos, le sommet des vagues se déplaçant entre chaque impulsion.

Ces échos sont donc difficiles à éliminer et peuvent également se mêler au signal de vraies précipitations pour corrompre l'analyse. Une situation commune où se produit ce phénomène est lors d'inversion de température à basse altitude qui dévie le faisceau vers le bas, lui permettant de s'approcher de la surface;

- **Navires**

Les échos de mer peuvent subir une perturbation lors du passage de navires;

- **Oiseaux et chauves-souris**

Les oiseaux et les chauves-souris ont une importante *section équivalente radar* ce qui les rend visible au radar, surtout en temps de migration alors que des milliers d'individus remplissent le ciel. Pour les gros oiseaux, il ne faut qu'un individu par cellule de résolution pour simuler des précipitations. Même les petits oiseaux passereaux causent des échos importants car ils se déplacent en énormes groupes. Le traitement Doppler permet d'en filtrer une partie car leur vitesse de déplacement est généralement caractéristique. Une meilleure technique est celle du radar à double polarisation;

- **Propagation anormale**

Sous certaines conditions atmosphériques, l'indice de réfraction de l'air s'éloigne de la normale et le faisceau radar suit une trajectoire anormale, soit vers la surface, soit vers le haut. C'est ce qu'on nomme la propagation anormale. Le faisceau n'étant pas à l'endroit où il devrait être, les échos de retour seront mal placés. La propagation anormale la plus commune se produit dans une inversion de température à basse altitude et le faisceau frappe alors le sol, retournant des échos intenses au radar;

- **Échos de sol**

Le faisceau radar peut frapper des obstacles à basse altitude comme des collines, des édifices, des forêts, etc. qui vont donner de forts échos permanents;

- **Paillettes de contre-mesures**

Les avions militaires peuvent procéder au largage de long filaments métallisés et minces derrière un avion pour perturber le radar de leur poursuivant. Ces paillettes de contre-mesures électroniques chutent lentement et ressemblent à des précipitations qui s'étendraient dans la direction du vent dominant;

- **Avions**

Pour un radar météorologique, la réflexion d'un avion passant dans sa région de couverture est considéré comme un écho parasite. Comme généralement les avions n'occupent qu'une faible portion du volume sondé et en sortent avant le sondage suivant, ils n'apparaissent que comme des échos très ponctuels et sont faciles à discerner;

- **Échos du radôme**

Le radôme, dôme protecteur entourant le radar, peut comporter des imperfections qui ajoute des échos parasites vers l'antenne;

- **Éoliennes**

Les parcs d'éoliennes constituent une nouvelle source de faux retours. Les pales de ces appareils sont métalliques et donc réfléchissantes. De plus, les pales étant en rotation, les données de vitesse radiale seront non nulles, rendant leur filtrage difficile. L'écho provenant d'une seule éolienne loin du radar peut être négligeable mais celui d'un parc d'éoliennes situé près du radar donnera un retour total important.

- etc.

Techniques anti-artefacts

Voici un résumé des techniques utilisées pour filtrer les échos indésirables que l'on retrouve assez communément dans les données d'un radar météorologique. Les méthodes et algorithmes varient selon le type d'artefact, et incluent:

- **Masque des échos permanents** Une carte des échos de sol, de mer et autres échos permanents autour d'un site radar peut être obtenue lors d'une période sans précipitation. Cette carte, qui inclut la position et l'intensité de ces retours, peut être utilisée ensuite comme un masque pour les filtrer des données.
- **Traitement Doppler** Le traitement Doppler est utilisé couramment pour séparer les cibles qui bougent de celles qui sont immobiles en obtenant la vitesse radiale des échos par rapport au radar. On peut ainsi différencier les précipitations des échos de sol ou de la propagation anormale. Le point faible de cette méthode est que la vitesse obtenue n'est que radiale. Les précipitations passant à angle droit avec le radar ayant une vitesse radiale nulle, ils pourraient donc être confondus avec des échos de terrain.
- **Polarisation** La polarisation du faisceau radar est utilisée pour déterminer l'orientation du plan du champ électrique (E) de l'onde radioélectrique reçu des cibles. On peut utiliser des ondes polarisées linéairement ou circulairement pour éliminer les retours ayant des caractéristiques non désirées. La polarisation linéaire (surtout par conditions sans précipitation) et circulaire (lors de précipitations) sont utilisées par les radars de surveillance aérienne pour éliminer les échos venant des précipitations et d'autres artefacts. Dans le domaine de la météorologie, les radars Doppler à double polarisation sondent avec un faisceau qui alterne entre la polarisation verticale et horizontale. Cela permet de comparer différentes caractéristiques des échos revenant des précipitations. Grâce à des tables ou des algorithmes, l'utilisateur peut déterminer le type de précipitations auquel il a affaire. Ce type de radar se répand graduellement à travers le monde, à mesure que les services météorologiques nationaux renouvellent leur réseau de radars.
- **Autres** Différentes techniques informatiques sont appliquées aux données brutes des radars pour en extraire l'information pertinentes. Ces techniques visent à réduire les échos parasites en combinant les données et le comportement habituel des artefacts. Par exemple, les échos de sol ont une vitesse nulle, sont très réfléchifs à basse altitude mais disparaissent dès que le faisceau radar s'en éloigne en altitude et ils sont très localisés. Un algorithme qui analyse selon ces critères peut les éliminer plus sûrement que l'utilisation d'une donnée seule.

Radar à double fréquence

Une façon de déterminer si les précipitations contiennent de la grêle est d'utiliser deux fréquences différentes de sondage et de comparer ensuite leurs intensités. La première doit être de longueur d'onde assez grande pour que le retour soit proportionnel à l'intensité des précipitations, suivant la règle de diffusion de Rayleigh, et la seconde ne doit pas l'être, selon la diffusion de Mie.

Typiquement, on utilise la longueur d'onde de 10 cm (bande S) dans le premier cas et 3 cm (bande X) dans le second.

Si la réflectivité est la même pour une zone de précipitations, on a affaire à de petits hydrométéores. Par contre, si le retour avec le faisceau de 3 cm est plus faible que celui de 10 cm, de larges particules sont contenues dans les précipitations. En général, cela indique la présence de grêle car les grosses gouttes de pluie ont tendance à être instables passé 5 mm de diamètre et à se briser.

Cependant, le résultat est influencé par l'atténuation du faisceau de longueur d'onde la plus courte par les précipitations. En effet, si le signal doit passer à travers de fortes intensités de pluie avant d'atteindre la zone de grêle, le faisceau de bande X frappant les grêlons sera déjà beaucoup plus faible que celui de bande S et la comparaison entre les deux retours sera biaisée. Des algorithmes de corrections peuvent être utilisés mais ceux-ci sont différents pour la grêle, la neige et la pluie qui ont des coefficients différents d'atténuation. Si on n'applique pas le bon correctif, de fausses détections de grêle peuvent survenir.

Radar à double polarisation

Une méthode plus récente de détection du type de précipitations, en particulier de la grêle, est celle de la double polarisation. Le radar émet alternativement deux faisceaux polarisés linéairement mais dont la polarisation est à angle droit l'un de l'autre. Cette alternance peut être entre chaque impulsion ou entre groupes d'impulsions. Le récepteur comporte également un canal de réception pour chaque polarisation. Certains radars polarimétriques modernes peuvent émettre les deux polarisations simultanément.

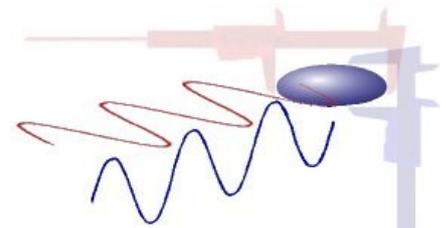


Figure 27 : Vue d'artiste de la mesure du diamètre de l'hydrométéore prise par chaque polarisation

Plusieurs pays introduisent la double polarisation lorsqu'ils modernisent leurs réseaux de radars météorologiques. Le service météorologique américain équipera graduellement tout son réseau de ce type de radar à partir de 2010. Le [radar de l'université McGill](#) (Montréal) et celui d'Environnement Canada à King City sont deux radars qui formeront la base de la prochaine modernisation dans ce domaine au Canada. En Europe la France, l'Allemagne (avec [Poldirad](#)) et d'autres pays s'en équipent graduellement.

La figure 28 montre le schéma d'un radar à double polarisation où l'énergie transmise est divisée en deux par un [connecteur de -3dB](#). Les deux signaux polarisés orthogonalement produits sont envoyés simultanément par leur cornet d'alimentation individuel et le signal retourné sera capté par le cornet qui correspond à sa polarisation.

Grâce à un commutateur, il est aussi possible d'utiliser toute la puissance dans seul plan de polarisation. Comme la réflexion sur des précipitations change toujours la direction de polarisation des ondes électromagnétique. Il est toujours possible de recevoir dans les deux plans de polarisations, grâce aux deux cônes, et d'évaluer les retours dans chaque plan de polarisation dans le récepteur.

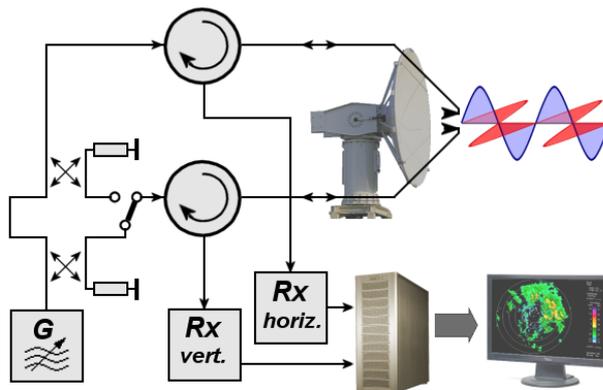


Figure 28 : Schéma simplifié du fonctionnement d'un radar à double polarité.

L'envoi de deux impulsions, avec polarisation verticale (V) et horizontale (H), permet de noter une différence de plusieurs caractéristiques entre ces retours:

- Les retours en réflectivité sont nommés Z_H (réflectivité horizontale) et Z_V (réflectivité verticale). Le rapport entre les deux est nommé réflectivité différentielle ou Z_{DR} et permet de déterminer le degré de sphéricité de la cible
- Le faisceau radar sonde un volume plus ou moins grand selon les caractéristiques de l'antenne émettrice. Ce qui revient est l'addition des ondes réfléchies par les cibles individuelles dans le volume. Comme les cibles peuvent changer de position dans le temps les unes par rapport aux autres, l'intensité des ondes V et H ne demeure constante que si les cibles ont toute la même forme. Le rapport d'intensité entre les canaux H et V revenant de sondages successifs s'appelle le *coefficient de corrélation* (ρ_{hv}) et donne donc une idée de l'homogénéité ou non des cibles dans le volume sondé ;

- La *phase* de l'onde change lorsqu'elle traverse un milieu de densité différente. En comparant le taux de changement de phase de l'onde de retour avec la distance, la *phase différentielle spécifique* ou K_{dp} , on peut évaluer la quantité de matière traversée;
- On peut également comparer le déphasage entre les retours H et V (*différentiel de phase* ou φ_{dp}).
- L'énergie émise dans le faisceau polarisée horizontalement peut être retourné au radar et reçu par le canal de réception vertical (Z_{HV}) et vice-versa. C'est ce qu'on appelle la polarisation croisée et elle est due au changement de polarisation du signal par les précipitations, ou dépolarisation. Le rapport logarithmique de la réflectivité à la réception entre le rayonnement dépolarisé (Z_{HV}) et celui polarisé (Z_H) est appelée rapport de dépolarisation linéaire (LDR):

$$LDR = 10 \log_{10}(Z_{HV}/Z_H)$$

Pour des particules sphériques, ce rapport est théoriquement nul, mais en pratique sa valeur peut atteindre 40 dB car les hydrométéores ont une variété de formes. LDR est donc extrêmement utile car elle permet de distinguer la phase des précipitations détectées: les très petites gouttelettes d'eau, de par leur forme sphérique, produisent un rapport de dépolarisation nul; en revanche, les cristaux de glace produisent des rapports de dépolarisation élevés. LDR est particulièrement grand dans la bande brillante, niveau de la neige fondante, et pour les échos de sol.

Interprétation et algorithmes

Les données obtenues avec ce type de sondage peuvent donc donner des indications sur la forme des cibles ainsi que sur le mélange de formes. Ceci peut être utilisé, en plus de l'intensité du retour, pour une identification directe du type de précipitations (pluie, neige, grêle, etc.) grâce à un algorithme.

À titre d'exemple, on peut différencier la grêle de la pluie forte grâce à Z_H et Z_{DR} . Les deux types de précipitations ont une très forte réflectivité Z_H , la constante diélectrique de la glace n'est que 20% de celle de l'eau mais les grêlons ont un diamètre beaucoup plus grand que ceux des gouttes de pluie, les deux effets se compensent dans l'équation météorologique du radar. Par contre, les gouttes dans la pluie forte à modérée sont de forme oblongue orientée horizontalement ce qui donne un retour horizontal plus fort que celui dans la verticale et donc un Z_{DR} positif. La grêle est elle plutôt sphérique et culbute en chutant ce qui donne un Z_{DR} près de 0. Le Z_{DR} est parfois même légèrement négatif (en décibel) dans la grêle car elle est la seule des deux à pouvoir être oblongue verticalement. En résumé:

- Z_H élevé avec $Z_{DR} \cong 0$ ou négatif est un signe de grêle;
- Z_H élevé avec Z_{DR} très positif est un signe de pluie modérée à forte.

Chaque type de précipitations a ainsi des valeurs caractéristiques pour Z_H , Z_{DR} , ρ_{hv} , φ_{dp} et K_{dp} . Cependant, l'atténuation pour certaines longueurs d'onde de sondage, ainsi que des recouvrements dans les caractéristiques de certains types de précipitations demandent en général un traitement poussé par des arbres de décisions utilisant la [logique floue](#). Dusan S. Zrnica et Alexandre V. Ryzhkov, du [NCAR](#) aux États-Unis, ont été des pionniers dans le domaine ces [algorithmes d'interprétation](#).

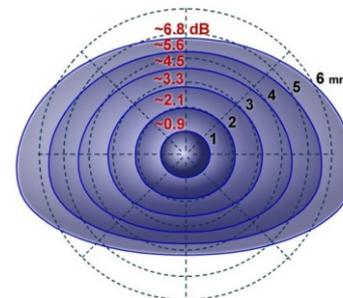


Figure 29 : Plus la goutte est aplatie, plus de ZDR est grand