

Union internationale des télécommunications

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Recommandation UIT-R M.1849-1
(09/2015)

Aspects techniques et opérationnels des radars météorologiques au sol

Série M

**Services mobile, de radiorepérage et d'amateur
y compris les services par satellite associés**



Union
internationale des
télécommunications

Avant-propos

Le rôle du Secteur des radiocommunications est d'assurer l'utilisation rationnelle, équitable, efficace et économique du spectre radioélectrique par tous les services de radiocommunication, y compris les services par satellite, et de procéder à des études pour toutes les gammes de fréquences, à partir desquelles les Recommandations seront élaborées et adoptées.

Les fonctions réglementaires et politiques du Secteur des radiocommunications sont remplies par les Conférences mondiales et régionales des radiocommunications et par les Assemblées des radiocommunications assistées par les Commissions d'études.

Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

La politique de l'UIT-R en matière de droits de propriété intellectuelle est décrite dans la «Politique commune de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI en matière de brevets», dont il est question dans l'Annexe 1 de la Résolution UIT-R 1. Les formulaires que les titulaires de brevets doivent utiliser pour soumettre les déclarations de brevet et d'octroi de licence sont accessibles à l'adresse <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/fr>, où l'on trouvera également les Lignes directrices pour la mise en oeuvre de la politique commune en matière de brevets de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI et la base de données en matière de brevets de l'UIT-R.

Séries des Recommandations UIT-R

(Egalement disponible en ligne: <http://www.itu.int/publ/R-REC/fr>)

Séries	Titre
BO	Diffusion par satellite
BR	Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision
BS	Service de radiodiffusion sonore
BT	Service de radiodiffusion télévisuelle
F	Service fixe
M	Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés
P	Propagation des ondes radioélectriques
RA	Radio astronomie
RS	Systèmes de télédétection
S	Service fixe par satellite
SA	Applications spatiales et météorologie
SF	Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe
SM	Gestion du spectre
SNG	Reportage d'actualités par satellite
TF	Emissions de fréquences étalon et de signaux horaires
V	Vocabulaire et sujets associés

Note: Cette Recommandation UIT-R a été approuvée en anglais aux termes de la procédure détaillée dans la Résolution UIT-R 1.

Publication électronique
Genève, 2017

© UIT 2017

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, par quelque procédé que ce soit, sans l'accord écrit préalable de l'UIT.

RECOMMANDATION UIT-R M.1849-1*

Aspects techniques et opérationnels des radars météorologiques au sol

(2009-2015)

Domaine d'application

La présente Recommandation traite des caractéristiques techniques et opérationnelles importantes des radars météorologiques, décrit les produits connexes fournis, met en évidence leurs principales particularités, examine les effets des brouillages sur les radars météorologiques et établit des critères de protection contre les brouillages. Elle porte uniquement sur les radars météorologiques au sol, mais pas sur les radars profileurs de vent, également utilisés à des fins météorologiques, qui sont traités dans une Recommandation UIT-R distincte.

Mots clés

Radar, météorologique, protection

Sigles/glossaire

CASA	Centre for collaborative adaptive sensing of the atmosphere
GC	fouillis radar au sol (<i>ground clutter</i>)
P_d	probabilité de détection (<i>probability of detection</i>)
PRF	fréquence de récurrence des impulsions (<i>pulse repetition frequency</i>)
PRT	temps de récurrence de l'impulsion (<i>pulse repetition time</i>)
SAR	radar à synthèse d'ouverture (<i>synthetic aperture radar</i>)
VAD	affichage en azimut à la verticale du radar (<i>vertical azimuth display</i>)
VCP	schéma de couverture volumique (<i>volume coverage pattern</i>)
WTC	fouillis radar causé par des éoliennes (<i>wind turbine clutter</i>)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que les caractéristiques d'antenne, de propagation du signal, de détection des cibles et de grande largeur de bande nécessaire propres aux radars pour remplir leurs fonctions sont optimales dans certaines bandes de fréquences;
- b) que des caractéristiques techniques et opérationnelles représentatives des radars météorologiques sont nécessaires pour déterminer la possibilité d'introduire de nouveaux types de systèmes dans les bandes de fréquences dans lesquelles ces radars sont exploités;
- c) que des procédures et des méthodologies sont nécessaires pour analyser la compatibilité entre les radars météorologiques et les autres services auxquels la bande de fréquences est attribuée;

* La présente Recommandation devrait être portée à l'attention de l'Organisation météorologique mondiale (OMM).

- d) que les radars météorologiques présentent des caractéristiques techniques et opérationnelles spécifiques par rapport aux autres types de radar, ce qui justifie une Recommandation UIT-R distincte;
- e) que les radars météorologiques fonctionnent principalement dans les bandes de fréquences 2 700-2 900 MHz, 5 250-5 725 MHz et 9 300-9 500 MHz;
- f) que les radars météorologiques sont des stations d'observation essentielles utilisées pour les observations météorologiques et la surveillance de l'environnement;
- g) que les radars météorologiques jouent un rôle crucial dans la fourniture d'alertes en cas de mauvaises conditions météorologiques imminentes (par exemple, inondations, cyclones ou ouragans) qui peuvent mettre en danger les populations et causer des dégâts à l'infrastructure économique stratégique;
- h) que l'application de critères de protection doit être examinée, en vue de tenir compte de la nature statistique des critères et d'autres éléments de la méthode permettant d'effectuer les études de compatibilité (balayage d'antenne et affaiblissement de propagation par exemple). La mise au point de ces considérations statistiques pourra être intégrée dans des versions révisées futures de la présente Recommandation, selon qu'il conviendra,

reconnaissant

- a) que, conformément au numéro **5.423** du Règlement des radiocommunications (RR), les radars météorologiques au sol exploités dans la bande de fréquences 2 700-2 900 MHz sont autorisés à fonctionner sur une base d'égalité avec les stations du service de radionavigation aérienne;
- b) que, conformément au numéro **5.452** du RR, les radars météorologiques au sol exploités dans la bande de fréquences 5 600-5 650 MHz sont autorisés à fonctionner sur une base d'égalité avec les stations du service de radionavigation maritime;
- c) que, conformément au numéro **5.475B** du RR, les radars météorologiques au sol exploités dans la bande de fréquences 9 300-9 500 MHz ont priorité sur les autres utilisations aux fins de la radiolocalisation,

notant

- a) que la Recommandation UIT-R M.1461 sert également de référence pour l'analyse de la compatibilité entre les radars et les autres services auxquels la bande de fréquences est attribuée;
- b) que les critères de protection des radars dépendent des types de signaux brouilleurs, tels que ceux qui sont décrits dans l'Annexe 1,

recommande

- 1** que les aspects techniques et opérationnels des radars météorologiques décrits dans l'Annexe 1 et les caractéristiques données dans l'Annexe 2 soient pris en considération lors de la réalisation d'études de partage;
- 2** que le critère de protection global des radars météorologiques au sol soit un rapport I/N de -10 dB.

Annexe 1

Aspects techniques et opérationnels des radars météorologiques au sol

1 Introduction

Les radars météorologiques au sol sont utilisés pour la météorologie opérationnelle et les prévisions météorologiques, la recherche atmosphérique et la navigation aéronautique et maritime, et jouent un rôle crucial dans les processus d'alerte météorologique et hydrologique immédiate. Ces radars fonctionnent en permanence, 24 heures sur 24. Les réseaux de radars météorologiques représentent la dernière ligne de détection de conditions météorologiques pouvant entraîner la perte de vies humaines ou de biens lors de crues soudaines ou de tempêtes violentes.

Le principe de fonctionnement des radars météorologiques et les produits qu'ils génèrent sont très différents de ce qu'ils sont pour les autres radars. Il est important de comprendre ces différences lors de l'évaluation de la compatibilité entre les radars météorologiques et les autres services auxquels la bande de fréquences est attribuée. Les caractéristiques techniques et opérationnelles des radars météorologiques font que les effets dus aux brouillages admissibles sont différents par rapport au cas des autres radars.

2 Présentation générale

Les radars météorologiques sont utilisés pour détecter les conditions atmosphériques afin d'effectuer les prévisions quotidiennes, de détecter les mauvaises conditions météorologiques, de détecter les vents et les précipitations, d'estimer les précipitations, de détecter les conditions de formation de givre sur les aéronefs et d'éviter le mauvais temps pour la navigation.

Les radars météorologiques émettent des impulsions polarisées horizontalement qui permettent de mesurer la dimension horizontale des nuages (eau des nuages et glace des nuages) et des précipitations (particules de neige, de grésil, de grêle et de pluie).

Les radars polarimétriques, également appelés radars à double polarisation, émettent à la fois une impulsion à polarisation horizontale et une impulsion à polarisation verticale. Ils sont nettement plus performants que les systèmes non polarimétriques en ce qui concerne l'estimation des précipitations, la classification des précipitations, la qualité des données et la détection des risques météorologiques.

Les radars météorologiques ne relèvent pas d'un seul service de radiocommunication au sein de l'UIT-R, ils relèvent du service de radiolocalisation et/ou du service de radionavigation au sens du RR. La question de savoir si un radar donné relève du service de radiolocalisation et/ou du service de radionavigation dépend de son utilisation. Un radar météorologique au sol utilisé pour la recherche atmosphérique ou les prévisions météorologiques est exploité dans le cadre du service de radiolocalisation. Un radar météorologique aéroporté sur un aéronef commercial est exploité dans le cadre du service de radionavigation. Un radar météorologique au sol peut aussi être exploité dans le cadre du service de radionavigation si, par exemple, il est utilisé par le contrôle du trafic aérien pour déterminer la route des aéronefs en cas de mauvaise météo. Il s'ensuit que les radars météorologiques peuvent être exploités dans diverses bandes de fréquences attribuées au service de radiolocalisation et au service de radionavigation, sous réserve que l'utilisation soit conforme à la définition du service de radiocommunication. Le RR contient trois références spécifiques aux radars météorologiques dans le Tableau d'attribution des bandes de fréquences. Ces trois références figurent dans des renvois associés aux bandes de fréquences 2 700-2 900 MHz (numéro **5.423** du RR), 5 600-5 650 MHz (numéro **5.452** du RR) et 9 300-9 500 MHz (numéro **5.475** du RR).

2.1 Equation du radar pour une cible ponctuelle¹

Les radars météorologiques ne poursuivent pas des cibles ponctuelles. Toutefois, l'équation du radar peut être adaptée pour être utilisée avec des radars météorologiques. La quantité de puissance retournée à un radar météorologique qui a effectué un balayage volumique détermine si des phénomènes météorologiques seront détectables. L'équation du radar exprime la puissance renvoyée par une cible en fonction des caractéristiques de la cible et du radar émetteur.

Les variables de l'équation du radar pour une cible ponctuelle sont les suivantes:

- P_R : puissance reçue par le radar
- P_T : puissance de crête émise par le radar
- A_T : surface de la cible
- R : distance entre le radar et la cible
- G : gain de l'antenne d'émission.

L'équation générale du radar pour une cible ponctuelle est alors la suivante:

$$P_R = \frac{P_T \cdot G^2 \cdot \lambda^2}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot r^4} \cdot A_T$$

L'équation ci-dessus repose sur l'hypothèse d'un rayonnement isotrope et d'une diffusion isotrope. Toutefois, la plupart des cibles ne diffusent pas un rayonnement incident de manière isotrope, et la section efficace de rétrodiffusion, σ , de la cible est alors nécessaire:

$$P_R = \frac{P_T \cdot G^2 \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot r^4} \cdot \sigma$$

2.2 Equation du radar météorologique

A partir de l'équation pour une cible ponctuelle, l'étape suivante consiste à éditer cette équation compte tenu des cibles du radar météorologique. Les gouttes de pluie, les flocons de neige et les gouttelettes de nuage sont des exemples d'une catégorie importante de cibles de radar, à savoir la catégorie des cibles distribuées.

L'impulsion radar incidente éclaire un volume atmosphérique, le volume de résolution du radar météorologique. La puissance moyenne reçue en provenance des particules météorologiques contenues dans ce volume est donnée par l'équation ci-dessous, où $\Sigma\sigma$ est la somme des sections efficaces de rétrodiffusion de toutes les particules contenues dans le volume de résolution.

$$P_R = \frac{P_T \cdot G^2 \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot r^4} \cdot \left(\sum_n \sigma \right)$$

Etant donné que le volume du faisceau radar augmente en fonction de la distance, le faisceau radar contient de plus en plus de cibles. Le volume défini du faisceau radar est équivalent à:

$$V = \pi \left(\frac{r \cdot \theta}{2} \right)^2 \cdot \frac{h}{2}$$

¹ Les informations et la détermination des équations figurant dans ces paragraphes proviennent de YAU, M. K. et ROGERS, R. R. [1er janvier 1989] *A Short Course in Cloud Physics*, Chapitre 11.

où $h = c\tau$ est la longueur de l'impulsion et θ est l'ouverture de faisceau de l'antenne. Si on combine l'équation générale du radar avec le volume du faisceau radar, la puissance moyenne retournée devient:

$$P_R = \frac{P_T \cdot G^2 \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot r^4} \cdot \pi \left(\frac{r \cdot \theta}{2} \right)^2 \cdot \frac{h}{2} \eta$$

où η désigne la réflectivité du radar par unité de volume. Dans l'équation ci-dessus, on suppose toutefois que le gain d'antenne est uniforme à plus ou moins 3 dB, ce qui est faux. Dans l'hypothèse d'un diagramme de faisceau gaussien, le volume effectif est alors mieux défini sur le diagramme de faisceau radar et la puissance moyenne retournée devient:

$$P_R = \frac{P_T \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \theta^2 \cdot h}{1024 \pi^2 \cdot \ln(2)} \frac{\eta}{r^2}$$

Si on prend en considération une seule particule sphérique qui est petite par rapport à la longueur d'onde du radar, la section efficace de rétrodiffusion peut être représentée par $\sigma = 64 \pi^5 / \lambda^4 |K|^2 r_o^2$, où K est l'indice de réfraction complexe et r_o représente le rayon de la sphère. Les particules météorologiques qui sont suffisamment petites pour que la loi de diffusion de Rayleigh s'applique sont appelées diffuseurs de Rayleigh. Les gouttes de pluie et les flocons de neige sont considérés comme des diffuseurs de Rayleigh mesurés avec une approximation précise lorsque la longueur d'onde du radar est comprise entre 5 cm et 10 cm, longueurs d'onde de fonctionnement courantes des radars météorologiques. A une longueur d'onde de 3 cm, la diffusion approchée peut encore être utile, mais elle est moins précise.

Pour un groupe de gouttes sphériques qui sont petites par rapport à la longueur d'onde du radar, la puissance moyenne retournée est alors donnée par:

$$P_R = \frac{P_T \cdot G^2 \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot r^4} 64 \frac{\pi^5}{\lambda^4} (|K|)^2 \cdot \left(\sum_n r_o^6 \right)$$

où Σ est une sommation du rayon sphérique de chacun des diffuseurs météorologiques. En prenant $(D/2)^6$ égal à r_o^6 , la puissance moyenne retournée peut être exprimée en fonction du diamètre des diffuseurs sphériques:

$$P_R = \frac{P_T \cdot G^2}{(4\pi)^3 \cdot r^4} \frac{\pi^5}{\lambda^2} K^2 \cdot \left(\sum_n D^6 \right)$$

Par conséquent, pour des diffuseurs sphériques qui sont nettement plus petits que la longueur d'onde du radar, la puissance moyenne reçue par le radar météorologique est déterminée par les caractéristiques du radar, la distance, l'indice de réfraction des diffuseurs ($|K|^2$), et leur diamètre (D^6).

Enfin, le facteur de réflectivité des cibles, Z , peut être exprimé comme suit: $Z = \Sigma_V D^6 = \int N(D) D^6 dD$, où Σ_V est la sommation sur une unité de volume et $N(D) D^6$ est le nombre de diffuseurs par unité de volume. Si l'on tient compte des corrections apportées précédemment pour représenter un diagramme de faisceau gaussien, l'équation du radar météorologique prend alors la forme finale suivante:

$$P_R = \frac{\pi^3 c}{1024 \cdot \ln(2)} \left(\frac{P_T \cdot G^2 \theta^2 \tau}{\lambda^2} \right) \cdot \left[(|K|^2) \cdot \frac{Z}{r^2} \right]$$

3 Principes généraux des radars météorologiques

Les radars météorologiques effectuent principalement deux types de mesures:

- mesures des précipitations;
- mesures des vents.

Ces mesures sont effectuées sur des grilles de pixels qui permettent de présenter une cartographie des phénomènes météorologiques mentionnés ci-dessus.

3.1 Exemple de fonctionnement d'un radar météorologique dans la bande de fréquences 2,7-2,9 GHz

Le radar 1 décrit dans le Tableau 1 de l'Annexe 2 est un système représentatif des radars météorologiques exploités à des fréquences voisines de 2,8 GHz. L'intersection entre la courbe à 0 dBZ de ce radar et le niveau de bruit du récepteur (−113 dBm) se situe à une distance de 200 km.

3.1.1 Estimation des précipitations

Les radars types exploités au voisinage de 2,8 GHz utilisent diverses formules réflectivité-distance (Z-R) et réflectivité-intensité des précipitations (Z-S) pour l'estimation des précipitations. L'effet des brouillages sur la portée peut varier en fonction de l'algorithme.

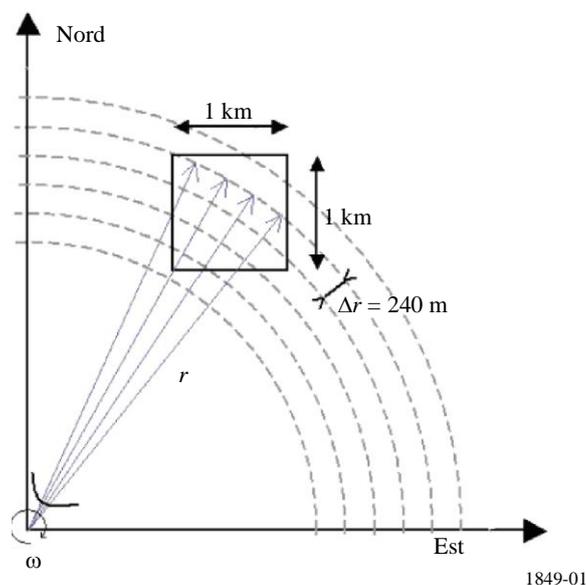
Exemple de fonctionnement d'un radar météorologique dans la bande de fréquences 5,6-5,65 GHz

En règle générale, la couverture du radar va au-delà de 200 km, avec des pixels de 1 km × 1 km. Dans certains cas, une grille plus détaillée est présentée avec des pixels de 250 m × 250 m.

Pour chaque pixel, les mesures du radar sont calculées sur toutes les réponses impulsionnelles correspondant à ce pixel, c'est-à-dire pour chaque paire d'impulsions et chaque fenêtre de distance, puis sont projetées directement sur une grille cartésienne (voir la Fig. 1).

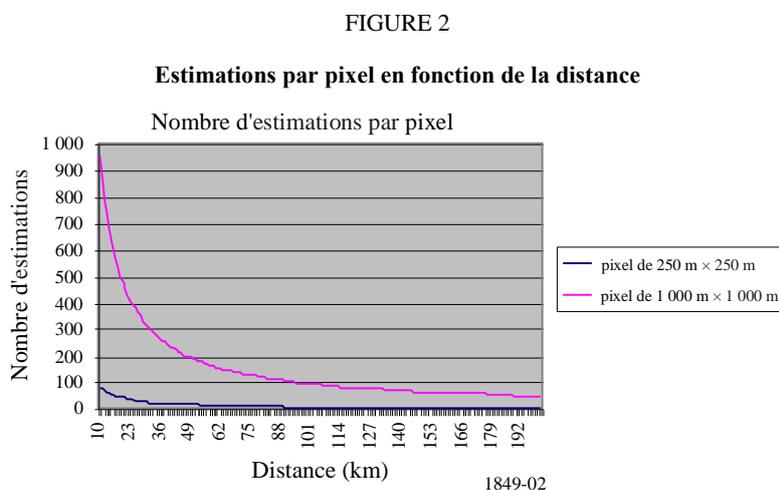
FIGURE 1

Projection cartésienne pour les paires d'impulsions et les fenêtres de distance



En conséquence, le nombre d'estimations par pixel varie en fonction de la distance. Il est lié à la PRF (fréquence de répétition des impulsions) moyenne et à la vitesse de rotation de l'antenne. En moyenne, avec une vitesse de rotation d'antenne de 6 degrés/s, une PRF moyenne de 333 Hz et un espacement des fenêtres de 240 m, on obtient environ 1 000 estimations à 10 km et environ 100 estimations à 100 km, pour un pixel de 1 km².

La Fig. 2 présente un calcul simplifié de ce nombre d'estimations en fonction de la distance pour des pixels de 250 m × 250 m et de 1 km × 1 km, confirmant que les mesures radar sont plus sensibles pour les distances plus élevées ainsi que pour les pixels plus petits.



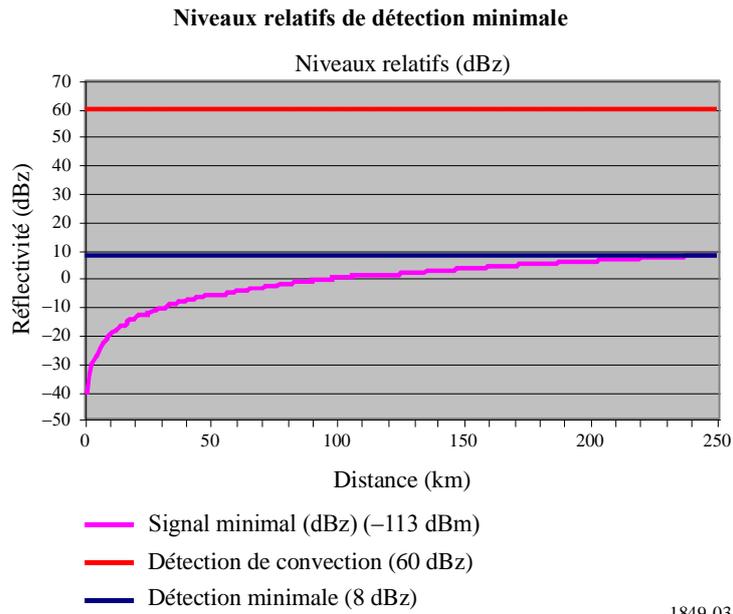
3.1.2 Principe des mesures des précipitations

Les radars météorologiques effectuent des mesures des précipitations, exprimées en réflectivité (dBz). Les principes de ces mesures sont énoncés ci-dessous pour un type de radar particulier. D'autres types de radars fonctionneront de manière analogue, mais les niveaux de signal varieront suivant le type.

Les radars déployés dans le réseau d'une administration sont étalonnés afin de faire coïncider le niveau de bruit du récepteur (à savoir environ -113 dBm) avec le niveau de réflectivité de 0 dBz à 100 km. Par ailleurs, le niveau de détection minimale d'une cellule de pluie est fixé à 8 dBz.

La Fig. 3 donne les niveaux relatifs (dBz) de détection minimale (8 dBz), d'une cellule de convection importante (60 dBz) et le niveau équivalent au bruit du récepteur.

FIGURE 3



La relation entre la puissance et la réflectivité est donnée par la formule suivante:

$$P = \frac{Cz}{r^2}$$

avec:

- P : puissance (mW)
- C : constante (environ 10^{-7} ou -70 dB)
- z : réflectivité
- r : distance (km)

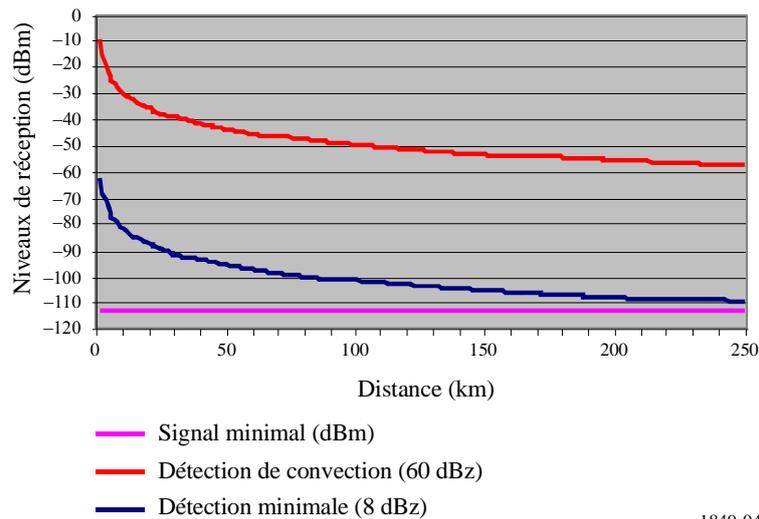
ce qui donne (en dB) la formule suivante:

$$\text{dBm} = \text{dBz} + C - 20 \log I$$

Cela étant, la Fig. 4 donne les niveaux de réception (en dBm) correspondant aux niveaux de réflectivité de la Fig. 3.

FIGURE 4

Niveaux relatifs (dBm) correspondant aux niveaux de réflectivité et à la distance



Enfin, les niveaux de réflectivité sont convertis en niveaux d'intensité des précipitations à l'aide de la formule suivante (pour une pluie normale):

$$R_{(\text{mm/h})} = \left(\frac{z}{200} \right)^{\left(\frac{1}{1,6} \right)}$$

Il est à noter que cette formule de conversion est valable pour une intensité de pluie normale ($a = 1,6$), mais que d'autres formules sont définies pour des types de précipitation différents (pluie tropicale, neige, grêle, etc.), avec une valeur de a ajustée en conséquence.

Pour un pixel donné de la grille du radar, les niveaux de réflectivité pour chaque estimation (correspondant à une réponse impulsionnelle et une fenêtre) sont pris en considération pour déterminer les éléments suivants:

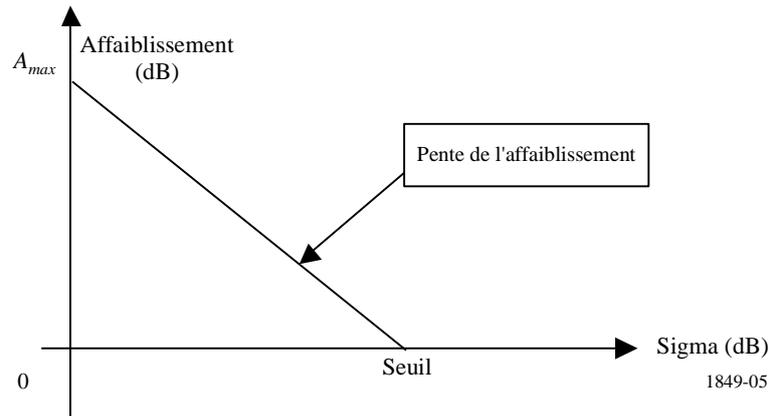
- la moyenne (dBz) sur toutes les estimations;
- l'écart type.

Les réponses pour les cellules de pluie sont caractérisées par une certaine variabilité, ce qui permet de les distinguer du fouillis radar, grâce à la valeur de l'écart type.

Pour les radars déployés par une administration, les valeurs de réflectivité sont ensuite corrigées à l'aide de l'algorithme suivant:

FIGURE 5

Pente de l'affaiblissement



$$\text{Si } (\sigma \leq \text{seuil}) \Rightarrow Z_{aeef} = Z_{seef} - (\text{seuil} - \sigma) * \text{pente}$$

$$\text{Sinon } \Rightarrow Z_{aeef} = Z_{seef}$$

σ : écart type (dB)

Z_{seef} : valeur de la réflectivité avant correction

Z_{aeef} : valeur de la réflectivité après correction.

La pente est la pente de l'affaiblissement indiquée sur la Fig. 5 ci-dessus, donnée par:

$$\text{pente} = \frac{A_{max}}{\text{seuil}}$$

Dans les applications opérationnelles, les valeurs du seuil et de la pente sont définies de sorte qu'il n'y ait pratiquement pas d'affaiblissement des signaux météorologiques (en réalité moins de 5%) et sont actuellement de 20 dB pour la pente et comprises entre 2,3 et 2,7 dB pour le seuil sigma, ces valeurs étant fondées sur des expériences. Enfin, il convient de noter que, lorsque l'affaiblissement calculé est supérieur à 25 dB, la réflectivité résultante est prise égale à 0.

3.2 Principe des mesures des vents

Contrairement à la réflectivité (dBz), qui est une mesure d'intensité de signal, les mesures des vents sont basées sur la détection Doppler effectuée sur la phase et la variation de phase du signal et peuvent avoir lieu dès que le signal reçu est supérieur au niveau de bruit (à savoir -113 dBm).

Pour éviter toute détection de phase qui pourrait être causée par une variation de bruit ou des sources non météorologiques, un seuil de 3 dB au-dessus du bruit (à savoir -110 dBm) est pris en considération pour certains radars tandis que d'autres radars météorologiques sont capables de traiter des niveaux S/N depuis -3 dB à -6 dB.

Il est également à noter que ces mesures sont effectuées à la fois par temps pluvieux et par temps clair. Par temps pluvieux, les niveaux de réception sont analogues à ceux décrits sur la Fig. 2. Par temps sec, il est facilement compréhensible que les niveaux de réflectivité correspondants sont très faibles, et ne permettent pas en principe d'effectuer des mesures des vents à des distances supérieures à environ 30 à 50 km.

Pour chaque estimation (correspondant à une réponse impulsionnelle et une fenêtre), les valeurs de phase et de réflectivité sont considérées comme un vecteur et, pour un pixel donné de la grille du radar, le vecteur de vent résultant est obtenu comme étant la combinaison de tous les différents vecteurs.

Cela signifie que la phase de chaque estimation est associée au module de réflectivité correspondant et qu'une seule estimation présentant une forte réflectivité (à savoir le module du vecteur) peut dominer la mesure relative au pixel.

Les mesures des vents sont utilisées pour obtenir deux ensembles différents de produits liés aux vents:

- la vitesse radiale sur l'ensemble de la grille du radar, de manière analogue à l'affichage des précipitations;
- l'affichage VAD (*vertical azimuth display*) pour lequel l'ensemble des données (pour toutes les altitudes) dans un rayon de quelques kilomètres ou de quelques dizaines de kilomètres sont intégrées afin de calculer le profil du vent à la verticale du radar.

3.3 Exemple de fonctionnement de radars météorologiques dans des portions de la gamme de fréquences 8,5-10,5 GHz

Les radars météorologiques qui fonctionnent dans des portions de la gamme de fréquences 8,5-10,5 GHz (c'est-à-dire à une longueur d'onde comprise entre 2,5 cm et 4 cm) peuvent détecter de petites particules. Ils sont généralement utilisés pour étudier la formation des nuages du fait de leur capacité à détecter de très petites particules d'eau et de faibles précipitations. Ils ont généralement une portée de 30 km pour des cibles météorologiques de 10 dBz et fonctionnent à des niveaux de puissance relativement faibles (par exemple 12 kW).

Par ailleurs, on étudie actuellement la possibilité d'utiliser les réseaux de radars exploités qui fonctionnent dans des portions de la gamme de fréquences 8,5-10,5 GHz de façon complémentaire aux radars météorologiques existants pour détecter les signes précurseurs de phénomènes météorologiques graves.

«L'utilisation de radars fonctionnant dans des portions de la gamme de fréquences 8-12 GHz pour la détection des conditions météorologiques présente l'inconvénient suivant: en cas de pluie, l'affaiblissement du signal peut être élevé. Cet affaiblissement est particulièrement marqué en cas de pluie modérée à forte, lorsque le facteur de réflectivité est supérieur à 40 dBz. Tant que le radar peut obtenir un signal détectable après affaiblissement, les mesures de vitesse peuvent être faites et les estimations relatives à l'affaiblissement peuvent être appliquées afin de corriger les valeurs de réflectivité. Les mesures en double polarisation peuvent être particulièrement efficaces pour corriger l'affaiblissement (par exemple Lim et Chandrasekar, 2005).»

Lorsque le signal affaibli passe au-dessous de la sensibilité du radar, on ne peut plus obtenir de mesures de vitesse, ce qui compromet la capacité du radar à détecter les risques météorologiques.

Il faudra entreprendre d'autres études analytiques et mesures expérimentales afin de quantifier l'impact de brouillages localisés sur ces systèmes et de déterminer les niveaux I/N nécessaires pour assurer la protection de ces systèmes.

4 Comparaison entre les radars météorologiques et les autres radars

La plupart des radars sont utilisés pour la détection et la poursuite de cibles ponctuelles dans leur zone de détection. Par comparaison, les radars météorologiques ne se concentrent pas sur la détection de cibles discrètes. Ils mesurent toute l'atmosphère qui les entoure. Les échos correspondant à chaque case distance le long de chaque radiale sont traités afin de fournir une mesure complète de l'atmosphère; on parle généralement de balayage volumique. C'est la raison pour laquelle le terme probabilité de détection (p_d) n'est en principe pas utilisé pour la caractérisation des radars météorologiques. En fait, l'absence d'écho est une indication de temps clair et constitue donc aussi une information pour l'utilisateur des données.

Comme l'indique le terme balayage volumique, le radar effectue un balayage du volume atmosphérique afin d'établir une représentation complète des conditions atmosphériques. Tandis que de nombreux types de radars poursuivent des cibles discrètes pour obtenir des informations (vitesse, section efficace radar, etc.) à partir des caractéristiques des échos, ce sont les caractéristiques des échos d'un radar météorologique qui fournissent presque toutes les informations. Sauf par temps absolument clair, les radars météorologiques reçoivent et traitent les échos correspondant à pratiquement toutes les cases distance le long d'une radiale.

Les critères retenus pour l'évaluation opérationnelle d'un radar météorologique type comprennent:

- a) des aspects techniques;
- b) la performance en matière d'alerte; et
- c) la qualité et la fiabilité des produits obtenus.

Les aspects techniques comportent des facteurs comme la couverture à certaines altitudes, la résolution spatiale et temporelle, la sensibilité, la couverture Doppler et la disponibilité du radar. La performance en matière d'alerte peut être considérée comme une mesure objective, mais en réalité, elle est directement liée à la capacité de détection. La qualité et la fiabilité des principaux produits obtenus – réflectivité, vitesse radiale moyenne et largeur spectrale – influent sur la capacité du prévisionniste à fournir des alertes en cas de risques météorologiques et des prévisions rapides et précises.

4.1 Particularités concernant les critères de protection

Pour les radars qui poursuivent des cibles discrètes, un rapport I/N de -6 dB, conduisant à une réduction de la portée de 6%, est considéré comme acceptable. De fait, le signal reçu par ces radars est proportionnel à $1/r^4$ (r étant la distance), et la portée en espace libre est donc proportionnelle à la racine quatrième du rapport signal/bruit résultant. Un rapport I/N de -6 dB correspond à une augmentation de 1 dB de la puissance de bruit et à un facteur 1,26 pour la puissance. Par conséquent, la portée en espace libre résultante est réduite par un facteur $1/(1,26^{1/4})$, ou 1/1,06, soit une réduction de la portée d'environ 6%.

Pour les radars météorologiques, la situation est différente pour des cibles étendues étant donné qu'en règle générale, les précipitations remplissent souvent la totalité du faisceau radar étroit. Si on utilise l'équation du radar figurant au § 2.2, pour des cibles étendues, le signal reçu est proportionnel à $1/r^2$ et la portée en espace libre est proportionnelle à la racine carrée du rapport signal/bruit résultant. En pareils cas, une réduction acceptable analogue de la portée de 6% pour les radars météorologiques implique un facteur de brouillage de 1,12 pour la puissance (au lieu de 1,26 pour les autres types de radar), ce qui correspond à une augmentation du bruit de 0,5 dB et à un rapport I/N résultant de -10 dB.

Les détails concernant l'élaboration et la justification de ce critère sont donnés au § 8.

4.2 Particularités concernant les schémas d'émission et les stratégies de balayage

Pour effectuer un balayage volumique (d'une durée de l'ordre de 15 min), les radars météorologiques utilisent divers schémas d'émission à différentes élévations, avec des ensembles de différentes largeurs d'impulsion, PRF et vitesses de rotation, dans le cadre de ce qu'on appelle les «stratégies de balayage». Il n'existe malheureusement pas de schémas types; en effet, les schémas varient en fonction d'un certain nombre de facteurs, tels que les capacités du radar et l'environnement du radar pour les produits météorologiques requis.

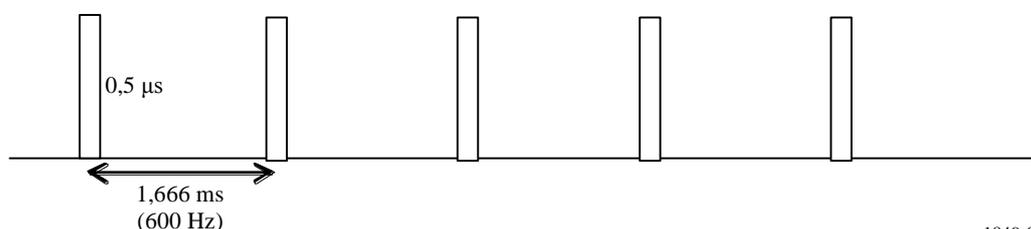
C'est ce qu'a confirmé une enquête menée sur les radars météorologiques dans la bande C en Europe, qui a montré que les intervalles de valeurs des différents paramètres des schémas d'émission sont larges:

- Élévation de fonctionnement comprise entre 0° et 90°.
- Largeur d'impulsion comprise entre 0,5 et 2,5 μs (pour les radars opérationnels). Les radars existants sont capables d'émettre des impulsions dont la largeur peut aller jusqu'à 3,3 μs pour les impulsions non compressées, tandis que certains radars utilisent une compression d'impulsion avec une largeur d'impulsion d'environ 40 μs et qui devrait atteindre 100 μs dans l'avenir.
- Fréquence de répétition des impulsions (PRF) comprise entre 250 et 1 200 Hz (pour les radars opérationnels). Les radars existants sont capables d'émettre des impulsions dont la PRF peut aller jusqu'à 2 400 Hz.
- Vitesse de rotation comprise entre 1 et 6 tr/min.
- Utilisation pour un radar donné de différents schémas d'émission combinant différentes largeurs d'impulsion et PRF, et utilisant notamment une PRF fixe, des PRF décalées ou des PRF entrelacées (c'est-à-dire différentes PRF dans un même schéma).

Des exemples de ces différents schémas d'émission sont présentés ci-dessous:

FIGURE 6

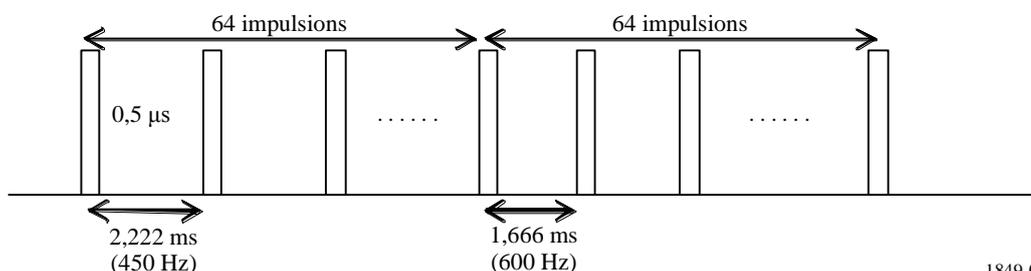
PRF fixe



1849-06

FIGURE 7

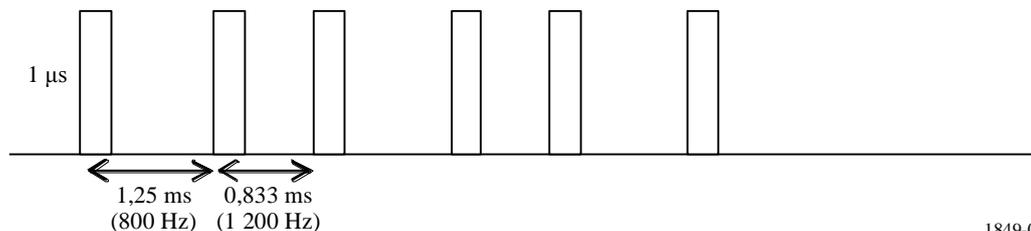
PRF décalées



1849-07

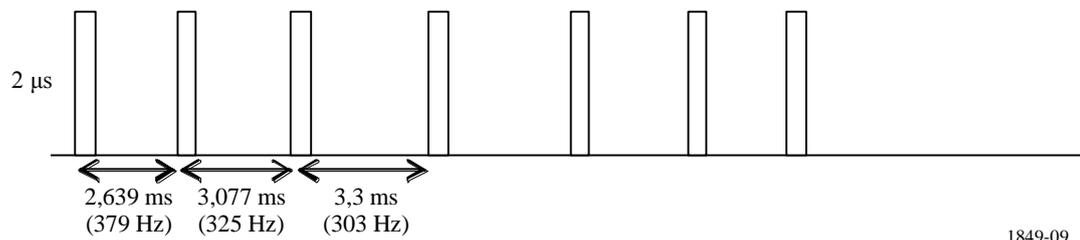
FIGURE 8

Deux PRF entrelacées (double PRT)



1849-08

FIGURE 9
Trois PRF entrelacées (triple PRT)



1849-09

Ces différents schémas d'émission sont utilisés par un certain nombre de radars dans leur stratégie de balayage, qui, pour différentes élévations et vitesses de rotation, fait intervenir un seul schéma d'émission.

Il convient de souligner que, d'un radar à l'autre, les valeurs de PRF et de largeur d'impulsion données dans ces exemples varient dans les intervalles définis ci-dessus. De plus, pour un schéma donné, la largeur d'impulsion peut varier d'une impulsion à l'autre.

On trouvera ci-dessous un exemple de stratégie de balayage:

FIGURE 10

Stratégie de balayage type (durée totale d'environ 15 min):

- 1 passage à une élévation de 0,8° avec la configuration 2 (2 tr/min) (30 s)
- 1 passage à une élévation de 10° pour l'étalonnage du bruit (3 tr/min) (20 s)
- 12 passages à des élévations de 37, 29, 23, 21, 19, 17, 15, 13, 11, 9,5, 8,5 et 6,5° avec la configuration 3 (3,167 tr/min) (19 s/passage) (3 min 47 s au total)
- 1 passage à une élévation de 0,8° avec la configuration 2 (2 tr/min) (0,5 min)
- 2 passages à des élévations de 6,5 et 5,5° avec la configuration 3 (3,167 tr/min) (19 s/passage) (38 s au total)
- 5 passages à des élévations de 4,5, 3,5, 2,5, 1,5 et 0,5° avec la configuration 3 (3 tr/min) (20 s/passage) (40 s au total)
- 4 passages à des élévations de 0,5, 1,5, 2,5 et 3,5° avec la configuration 1 (2 tr/min) (2 min)
- 1 passage à une élévation de 0,8° avec la configuration 2 (2 tr/min) (30 s)
- 2 passages à des élévations de 3,5 et 4,5° avec la configuration 1 (2 tr/min) (60 s)
- 1 passage à une élévation de 10,5° avec la configuration 3 (3 tr/min) (20 s)
- 1 passage à une élévation de 1,3° avec la configuration 2 (3 tr/min) (20 s)
- 1 passage à une élévation de 0,8° avec la configuration 2 (2 tr/min) (30 s)
- 1 passage à une élévation de 10° pour l'étalonnage du bruit (3 tr/min) (20 s)

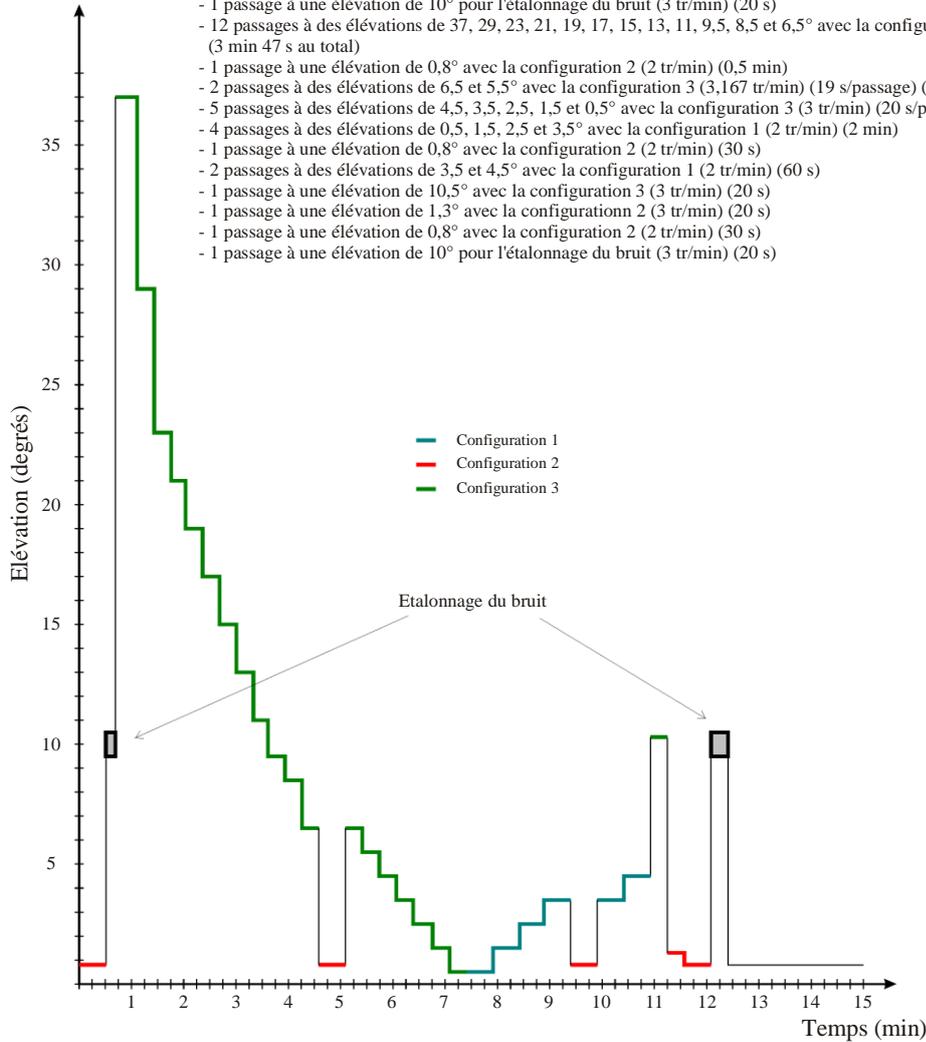
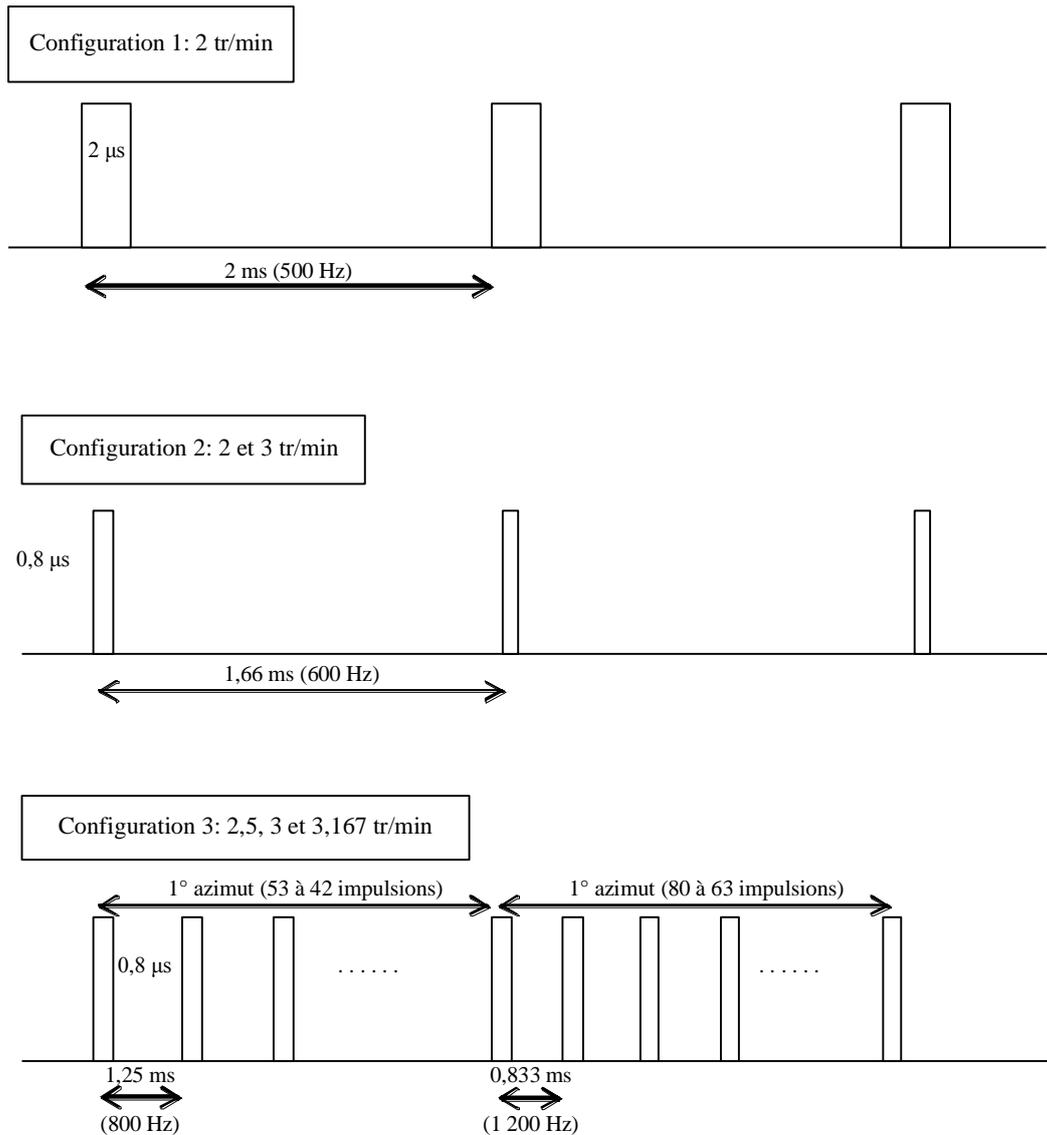


FIGURE 11



1849-11

4.3 Particularités concernant l'étalonnage du bruit

Etant donné que le signal d'écho parvenant aux radars météorologiques est faible, il faut en extraire le niveau de bruit afin d'obtenir les mesures les plus précises possible et des produits météorologiques pertinents.

Soit N le niveau de bruit et S le signal utile (c'est-à-dire le signal d'écho météorologique), les radars météorologiques procèdent comme suit:

- 1) Pour chaque fenêtre, le radar mesure le signal d'écho, qui correspond au signal utile (S) et au bruit (N), à savoir $N + S$.
- 2) Pour obtenir S , le radar extrait de $N + S$ le niveau de bruit, N .
- 3) Puis, à partir de S (dBm), le radar est capable de déterminer tous les produits météorologiques, tels que les précipitations (obtenues à partir du facteur de réflectivité (dBz)) ou la vitesse du vent, par analyse Doppler.

Afin d'obtenir les produits météorologiques les plus précis possibles, le signal S doit être aussi précis que possible, ce qui signifie que l'étalonnage du bruit du radar est extrêmement important.

L'étalonnage du bruit, également appelé «contrôle du zéro», est donc réalisé régulièrement, soit pendant des émissions normales du radar (par estimation), soit pendant des périodes spécifiques (voir l'exemple de stratégie de balayage ci-dessus) pendant lesquelles le bruit est mesuré.

Dans de nombreux cas, cette mesure du bruit est réalisée sans émission du radar (ce qui pourrait en particulier avoir un impact sur la conception de certains systèmes radioélectriques qui cherchent à détecter le signal du radar pour réduire les brouillages).

Dans tous les cas, les brouillages reçus pendant l'étalonnage du bruit vont altérer toutes les collectes de données jusqu'à ce que l'étalonnage suivant sans brouillage soit réalisé.

5 Modes de fonctionnement des radars météorologiques

Le radar météorologique Doppler type fonctionne dans deux modes sélectionnables par l'utilisateur: mode temps clair et mode précipitations. Le mode temps clair nécessite une sélection manuelle par l'utilisateur. Le mode précipitations peut être sélectionné manuellement à tout moment pendant le fonctionnement ou peut être activé automatiquement chaque fois que le radar météorologique détecte des précipitations (sur la base de valeurs prédéterminées de la réflectivité dans la zone de couverture). D'une manière générale, les radars météorologiques mettent à profit les deux modes.

5.1 Mode temps clair

Le mode temps clair permet aux radars météorologiques de détecter des signes annonciateurs de précipitations.

Certaines petites variations de vitesse et de densité de l'air permettent de détecter des précipitations potentielles. Le radar utilise une vitesse de balayage faible, couplée avec une faible fréquence de répétition des impulsions (PRF), pour une sensibilité élevée, idéale pour des modifications très subtiles des conditions atmosphériques à des distances élevées. Le mode temps clair est particulièrement utile lorsque l'activité de convection est faible voire inexistante dans la zone de couverture du radar, et convient parfaitement pour détecter les signes annonciateurs de tempêtes ou d'autres types de phénomènes météorologiques graves.

La sensibilité élevée du radar météorologique est liée au schéma de balayage volumique dans le mode temps clair. En choisissant un schéma dans le mode temps clair, l'antenne du radar est capable de rester pendant une période étendue dans n'importe quel volume spatial et reçoit plusieurs échos, tout en permettant un fonctionnement avec un faible rapport S/N . L'utilisation d'une grande largeur d'impulsion et d'une faible PRF donne approximativement une puissance d'écho de 8 dB pour un dBz donné de réflectivité.

5.2 Mode précipitations

Le mode précipitations a une finalité distincte de celle du mode temps clair. La vitesse de balayage pour le mode précipitations est fonction de l'angle d'élévation. Cette dépendance permet d'avoir le nombre le plus élevé possible d'angles d'élévation pour échantillonner le volume radar total. Dans le mode précipitations, on tire parti de multiples schémas de couverture volumique (VCP) pour mettre en œuvre différents types de stratégies de balayage (voir l'exemple du § 4.2) avec un échantillonnage différent en fonction de l'élévation. Les phénomènes météorologiques surveillés normalement dans le mode précipitations sont associés à la formation de précipitations avec des tempêtes convectives (averses de pluie, grêle, orages violents, tornades, etc.) et des systèmes synoptiques à grande échelle.

6 Données produites par les radars météorologiques

Afin de mieux comprendre les radars météorologiques pour l'analyse des brouillages et la gestion du spectre, deux catégories de données produites par les radars météorologiques doivent être prises en considération: les données de base et les données dérivées.

6.1 Données de base produites par les radars météorologiques classiques

Un radar météorologique Doppler produit trois catégories de données de base à partir des échos: réflectivité de base, vitesse radiale moyenne et largeur spectrale. Tous les produits de niveau supérieur sont générés à partir de ces trois produits de base. La précision des produits de base fait souvent partie des spécifications fondamentales de performance pour la conception des radars. Sans la précision requise à ce niveau inférieur, la précision des produits dérivés de niveau supérieur ne peut pas être atteinte. Dans une étude menée précédemment par l'UIT-R sur les radars météorologiques, l'impact des brouillages admissibles sur les données de base produites a servi de paramètre pour les critères de protection. Par exemple, un radar type conçu avec les précisions de données de base figurant dans le Tableau 1 a été utilisé dans une étude pour déterminer le rapport brouillage/bruit pour lequel le radar ne peut plus respecter ses spécifications nominales. Le § 8.3 et l'Annexe 1 du Rapport UIT-R M.2136 présentent en détail la détermination des critères de protection des radars météorologiques.

TABLEAU 1

Précision requise des données de base pour un radar météorologique type (2 700-2 900 MHz)

Données produites de base	Précision nominale requise
Réflectivité de base	< 1 dB
Vitesse radiale moyenne	< 1 m/s
Largeur spectrale	>1 000 Hz

6.1.1 Réflectivité de base

La réflectivité de base est utilisée dans de multiples applications des radars météorologiques, la plus importante étant l'estimation de l'intensité des précipitations. La réflectivité de base est l'intensité des impulsions échos, et elle est calculée à partir d'une moyenne linéaire de la puissance d'écho. La puissance des éventuels brouillages causés au radar s'ajoute à la puissance des impulsions échos, ce qui biaise les valeurs de la réflectivité. Les mesures de la réflectivité peuvent être compromises si le biais est supérieur à la précision requise des données de base.

6.1.2 Vitesse radiale moyenne

La vitesse radiale moyenne est également appelée vitesse Doppler moyenne, et représente la vitesse moyenne des cibles pondérée par la réflectivité dans un échantillon de volume donné. La vitesse radiale moyenne est donnée par le premier moment de la densité spectrale. Elle est généralement déterminée à partir d'un grand nombre d'impulsions successives et est calculée à partir de l'argument de la variance complexe avec décalage unique. L'argument de covariance complexe donne une estimation du déplacement angulaire du vecteur de signal Doppler d'une impulsion radar à l'autre. La vitesse angulaire du vecteur Doppler est égale au déplacement divisé par l'intervalle de temps entre impulsions. Le spectre Doppler fait apparaître la réflectivité et la distribution des vitesses avec pondération du radar dans le volume radar. Un signal de brouillage apparaissant sous la forme de

bruit large bande a une probabilité uniforme sur le plan complexe; par conséquent, il n'introduit ni rotation systématique du vecteur Doppler ni biais dans l'estimation. Cependant, la nature aléatoire des signaux composites et des brouillages a pour effet d'augmenter la variance de l'estimation du signal Doppler.

6.1.3 Largeur spectrale

Pour la conception des radars météorologiques, la largeur spectrale est calculée à partir de la corrélation avec décalage unique dans l'hypothèse d'une densité spectrale gaussienne. C'est une mesure de la dispersion des vitesses dans le volume échantillon du radar et c'est l'écart type du spectre de vitesse. La largeur spectrale dépend des gradients de réflectivité et de vitesse à travers le volume radar et de la turbulence dans ce volume [Doviak et Zrnic, 1984]². On ne calcule pas la moyenne des échantillons utilisés dans les calculs de largeur spectrale. Mais on accumule les parties réelle et imaginaire de la série d'échantillons, à savoir les échantillons pris le long de la radiale.

6.2 Produits des radars météorologiques à double polarisation

6.2.1 Réflectivité différentielle

La réflectivité différentielle est un produit qui est associé aux radars météorologiques polarimétriques, et c'est un rapport entre les puissances réfléchies horizontalement et verticalement. Entre autres choses, c'est un bon indicateur de la forme des gouttes, qui, à son tour, donne une bonne estimation de la taille moyenne des gouttes.

6.2.2 Coefficient de corrélation

Le coefficient de corrélation est un produit de radar météorologique polarimétrique et c'est une corrélation statistique entre les puissances réfléchies horizontalement et verticalement. Le coefficient de corrélation décrit les analogies dans les caractéristiques de rétrodiffusion des échos polarisés horizontalement et verticalement. C'est un bon indicateur des régions dans lesquelles différents types de précipitations sont mélangés (par exemple, pluie et neige).

6.2.3 Taux de dépolarisation linéaire

Le taux de dépolarisation linéaire est un autre produit de radar polarimétrique, qui donne le taux de puissance d'écho verticale pour une impulsion horizontale ou de puissance d'écho horizontale pour une impulsion verticale. C'est aussi un bon indicateur des régions dans lesquelles différents types de précipitations sont mélangés.

6.2.4 Phase différentielle spécifique

La phase différentielle spécifique est aussi un produit de radar météorologique polarimétrique. C'est une comparaison de la différence de phase retournée entre les impulsions horizontale et verticale. Cette différence de phase est due à la différence de nombre de cycles d'onde (ou longueurs d'onde) le long du trajet de propagation pour les ondes polarisées horizontalement et verticalement. Il ne faut pas la confondre avec le décalage de fréquence Doppler, qui est dû au déplacement des nuages et des particules de précipitation. Contrairement à la réflectivité différentielle, au coefficient de corrélation et au taux de dépolarisation linéaire, qui dépendent tous de la puissance réfléchie, la phase différentielle spécifique est un «effet de propagation». Elle donne également une très bonne estimation de l'intensité des précipitations.

² DOVIK, R. J. et ZRNIC. D. S. [1984] *Doppler and Weather Observations*. Academic Press, Inc. San Diego, Etats-Unis d'Amérique.

6.3 Données produites dérivées

A partir des données produites de base, le processeur produit des données dérivées de niveau supérieur pour l'utilisateur du radar. Le présent texte ne donne pas de détail sur les produits dérivés car ceux-ci varient d'un radar à l'autre et sont relativement nombreux. Pour faire en sorte que les données produites dérivées soient précises, il faut disposer de données produites de base précises.

7 Diagramme de l'antenne et comportement dynamique de l'antenne

Les radars météorologiques utilisent généralement des antennes de type réflecteur parabolique qui émettent un faisceau-crayon. Les diagrammes standards de l'UIT pour les antennes paraboliques ne sont pas applicables aux antennes utilisées pour les radars météorologiques, car le faisceau principal est souvent beaucoup plus large que le faisceau-crayon réel. L'utilisation d'un diagramme d'antenne à faisceau plus large conduit souvent à des résultats de partage indiquant des problèmes de brouillage plus importants qu'un diagramme d'antenne précis.

7.1 Mouvement de l'antenne pour un balayage volumique

La couverture horizontale et verticale nécessaire pour un balayage volumique afin de produire une coupe à un angle d'élévation donné, est obtenue par une rotation de l'antenne dans le plan horizontal à un angle d'élévation constant. On augmente l'angle d'élévation de l'antenne d'un incrément prédéfini après chaque coupe. L'angle d'élévation le plus faible est généralement compris entre 0° et 1° , et le plus élevé entre 20° et 30° , mais pour certaines applications, il peut aller jusqu'à 60° . La vitesse de rotation de l'antenne varie en fonction des conditions météorologiques et du produit nécessaire à l'instant considéré. La vitesse de rotation, l'intervalle des angles d'élévation, les incréments intermédiaires d'angle d'élévation et la fréquence de répétition des impulsions sont réglés de façon à optimiser la performance. Une rotation d'antenne lente permet de rester longtemps sur chaque radiale pour une sensibilité maximale.

Une vitesse de rotation d'antenne élevée permet à l'opérateur d'effectuer un balayage volumique en un temps court lorsqu'on souhaite couvrir la totalité du volume aussi rapidement que possible. La variation des incréments d'angle d'élévation et de la vitesse de rotation font que la durée d'acquisition du balayage volumique est comprise entre une minute et 15 min. Les longues durées nécessaires pour un balayage volumique complet, par rapport à d'autres radars qui effectuent une rotation à un angle d'élévation constant, font qu'il est nécessaire de réaliser des simulations dynamiques beaucoup plus longues pour obtenir un échantillonnage de résultats significatif sur le plan statistique.

7.2 Autres stratégies de mouvement de l'antenne

Les radars météorologiques utilisent aussi d'autres stratégies de mouvement de l'antenne pour des applications spéciales et la recherche. Les balayages sectoriels sont utilisés pour obtenir une partie de coupe à un angle d'élévation donné. Les balayages volumiques sectoriels consistent à effectuer un balayage volumique sur un intervalle d'angles d'azimut pour lesquels l'antenne produit plusieurs coupes à différents angles d'élévation. Dans un troisième mode, l'antenne est maintenue à un angle d'azimut et à un angle d'élévation constants pour surveiller un endroit spécifique dans l'atmosphère. Les trois stratégies permettent à l'opérateur du radar de se concentrer sur une partie spécifique de l'atmosphère.

7.3 Diagrammes d'antenne

Chaque fois que c'est possible, les études de partage devraient être menées en utilisant le diagramme réel de l'antenne du radar à l'étude. Mais lorsqu'on ne dispose pas de données sur le diagramme d'antenne réel, il peut être utile de recourir à un ensemble générique de courbes ou de formules pour obtenir des caractéristiques d'antenne représentatives.

Trois modèles mathématiques de diagramme d'antenne radar sont actuellement utilisés dans les analyses de brouillage avec des radars; ils sont donnés dans les Recommandations UIT-R F.1245, UIT-R M.1652 et UIT-R F.699. Représentatifs d'antennes paraboliques, ces modèles ont tendance à surestimer l'ouverture du faisceau-crayon qui est généralement utilisé par les radars météorologiques.

Actuellement, l'UIT-R ne dispose d'aucune équation définie pour représenter les diagrammes de rayonnement d'antenne radar à faisceau-crayon. En l'absence de données mesurées, on peut utiliser en cas de besoin les modèles génériques de diagramme de rayonnement d'antenne décrits dans le Tableau 2, dans les analyses de brouillage avec une seule ou plusieurs sources de brouillage, voir également la Recommandation UIT-R M.1851. θ_3 est l'ouverture de faisceau à mi-puissance (degrés).

TABLEAU 2

Diagrammes possibles

Intervalle de niveaux du 1er lobe latéral au-dessous de la crête (dB)	Type possible de distribution d'antenne	Diagramme de rayonnement $F(\mu)$	Equation du gabarit au-delà du point de rupture du diagramme au-delà duquel le gabarit diffère du diagramme théorique (dB)	Point de rupture du diagramme des valeurs de crête au-delà duquel le gabarit diffère du diagramme théorique (dB)	Point de rupture du diagramme des valeurs moyennes au-delà duquel le gabarit diffère du diagramme théorique (dB)	Constante ajoutée au diagramme des valeurs de crête pour le convertir en gabarit des valeurs moyennes (dB)	Niveau plancher proposé pour le gabarit (dB)
-13,2 à -19 dB	Uniforme	$\frac{\sin(\mu)}{\mu}; \mu = (\pi \cdot 50,8 \cdot \sin(\theta)) / \theta_3$	$-8,584 \cdot \ln \left(2,876 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-5,75	-12,16	-3,72	-40
-20 à -30 dB	COS	$\frac{\pi}{2} \left[\frac{\cos(\mu)}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - \mu^2} \right]; \mu = (\pi \cdot 68,8 \cdot \sin(\theta)) / \theta_3$	$-17,51 \cdot \ln \left(2,33 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-14,4	-20,6	-4,32	-50
-31 à -38 dB	COS ²	$\frac{\pi^2}{2 \cdot \mu} \left[\frac{\sin(\mu)}{\pi^2 - \mu^2} \right]; \mu = (\pi \cdot 83,2 \cdot \sin(\theta)) / \theta_3$	$-26,882 \cdot \ln \left(1,962 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-22,3	-29,0	-4,6	-60
-39 dB ou plus	COS ³	$\frac{3 \cdot \pi \cdot \cos(\mu)}{8} \left[\frac{1}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - \mu^2} - \frac{1}{\left(\frac{3 \cdot \pi}{2}\right)^2 - \mu^2} \right];$ $\mu = (\pi \cdot 95 \cdot \sin(\theta)) / \theta_3$	$-35,84 \cdot \ln \left(1,756 \cdot \frac{ \theta }{\theta_3} \right)$	-31,5	-37,6	-4,2	-70

8 Effets des brouillages et du bruit solaire sur les radars météorologiques

Il est relativement simple de déterminer les effets des brouillages sur les radars utilisés pour détecter des cibles ponctuelles: on peut injecter des cibles connues simulées dans le champ du radar et déterminer visuellement le niveau de brouillage auquel les cibles sont perdues ou de fausses cibles sont produites. En revanche, une inspection visuelle des données dérivées produites par un balayage volumique effectué par un radar météorologique, telles qu'elles sont affichées sur la console d'un opérateur, ne donne pas d'indication évidente sur la question de savoir si des brouillages ont dégradé la performance du radar. Par exemple, si des brouillages causent un biais de 1 dB dans les données de réflectivité de base, ce biais ne sera pas évident à déceler sur un affichage graphique de données relatives aux précipitations. Par ailleurs, si les brouillages sont présents pendant une grande partie du balayage volumique, chaque case distance sera biaisée dans le volume affecté. L'effet cumulatif sera une surestimation importante des précipitations dans une région géographique.

Tous les radars météorologiques subissent des traces solaires au moment du lever et du coucher du soleil. Des traces solaires sont causées lorsque le faisceau principal de l'antenne coïncide avec la direction du soleil pendant un balayage volumique. Elles ont pour effet, dans le cas particulier des radars météorologiques, d'entraîner la perte totale des données le long d'une ou deux radiales dans la direction du soleil. Il convient de noter que leur prévisibilité peut permettre d'étalonner en azimut la direction de pointage des radars.

Les effets du soleil sont néfastes, mais ils sont prévisibles. En ce qui concerne les autres formes de brouillage et de bruit, la localisation et l'intensité sont inconnues, de sorte que les prévisions sont impossibles et que le traitement ou l'interprétation par un opérateur sont difficiles.

Les produits de base sont affectés par les brouillages de deux façons différentes. Premièrement, les valeurs peuvent être biaisées, ce qui diminue la précision du système, et deuxièmement, la variance des produits peut être affectée. En présence de brouillages, la réflectivité est sensible au biais, la vitesse radiale moyenne est sensible aux erreurs de variance, et la largeur spectrale est affectée à la fois par le biais et par les erreurs de variance. Pour la largeur spectrale, les erreurs liées au biais sont plus importantes que les erreurs liées à la variance car le biais, ou décalage, représente une erreur de mesure de la vitesse, tandis que la variance représente l'incertitude des vitesses mesurées.

8.1 Impact des brouillages sur les modes de fonctionnement

C'est en mode temps clair que le rapport signal/bruit des échos est le plus faible et que les données risquent le plus d'être altérées par les brouillages. Dans ce mode, le météorologue scrute les premiers signes de convection, étant donné qu'il peut s'ensuivre une mauvaise météo, voire des tornades. Pour détecter les zones de convection, il faut détecter les fines raies causées par les diffuseurs, indiquant des limites de discontinuité à l'origine de convection. Ces zones de convection ont souvent une largeur de l'ordre de une à deux radiales, et la détection est en principe impossible en cas de brouillages le long de ces radiales. Par conséquent, des brouillages, même de courte durée, peuvent entraîner une perte de données permettant de détecter la formation de phénomènes météorologiques graves. Si de telles données sont perdues le long d'une radiale critique pendant un balayage volumique, la détection sera retardée de l'ordre de 10 min, temps qu'il faut pour que l'antenne effectuant le balayage volumique pointe à nouveau vers cette zone de l'atmosphère.

Le mode précipitations est le mode le plus exigeant en termes de communications, de produits générés par le radar ainsi que de traitement par l'utilisateur et d'affichage. Dans ce mode, presque tous les algorithmes reposent sur les données de base de réflectivité, vitesse moyenne et largeur spectrale pour générer des produits dérivés qui seront utilisés par l'opérateur.

8.2 Impact des brouillages sur les produits de base

Les produits de base sont affectés par les brouillages de deux façons différentes. Premièrement, les valeurs peuvent être biaisées, ce qui diminue la précision du système, et deuxièmement, la variance des produits peut être affectée. En présence de brouillages, la réflectivité est sensible au biais, la vitesse radiale moyenne est sensible aux erreurs de variance, et la largeur spectrale est affectée à la fois par le biais et par les erreurs de variance. Pour la largeur spectrale, les erreurs liées au biais sont plus importantes que les erreurs liées à la variance car le biais, ou décalage, représente une erreur de mesure de la vitesse, tandis que la variance représente l'incertitude des vitesses mesurées.

La réflectivité est calculée à partir d'une moyenne linéaire de la puissance. Pour certains radars météorologiques, les estimations de la réflectivité sont faites pour des cases distance de 250 m de profondeur et d'une radiale de largeur (environ $1,0^\circ$ en azimut). Ces radars font une moyenne sur des cases distance pour produire une estimation de la réflectivité à des intervalles spécifiés. Cette moyenne, faite sur quatre éléments, permet de réduire encore les effets des brouillages qui se produisent sur une impulsion unique. Pour les radars météorologiques de prochaine génération, il est prévu d'ajouter un produit de réflectivité à «super résolution», pour lequel il n'y aura pas de moyennage et les estimations de réflectivité seront produites à intervalles de 250 m. De plus, la radiale sera réduite de moitié ($0,5^\circ$), ce qui réduira de moitié la taille des échantillons. Il en résultera au total une réduction de la taille des échantillons par huit. Ainsi, les brouillages pourront être plus prononcés dans le produit de réflectivité à «super résolution» que dans les estimations actuelles.

Pour les moments Doppler, les effets des brouillages sont non linéaires. La vitesse est calculée à partir de l'argument de covariance complexe et la largeur spectrale à partir de l'autocorrélation. Une combinaison de signal et de brouillage ne suit pas une échelle linéaire, comme dans le cas de la moyenne pour la réflectivité. Les estimations résultent de l'accumulation de mesures de signal comportant à la fois des informations d'amplitude et de phase. Les sources de brouillage auront tendance à avoir des phases aléatoires, contrairement au signal cohérent des radars météorologiques, et leur contribution à la précision des estimations est difficile à prédire.

En termes de largeur spectrale, les brouillages sont à l'origine à la fois d'un biais et d'une augmentation de variance concernant l'estimation de la largeur spectrale, le biais étant plus préjudiciable que l'augmentation de variance.

Il faut spécifier les erreurs de mesure afin de pouvoir assimiler correctement les observations radar pour les prévisions météorologiques numériques. Ce problème présente deux aspects interdépendants:

- 1) erreurs dans les mesures d'origine dans chaque volume radar qui sont dues en partie à des signaux brouilleurs; et
- 2) représentation des estimations de données radar utilisées pour l'assimilation.

Pour les vitesses radiales, la première source d'erreurs dépend de l'intensité de l'écho et de l'étalement ou de la largeur spectrale des vitesses Doppler. La largeur spectrale dépend à son tour principalement des gradients de réflectivité et de vitesse dans et à travers le volume radar et de la turbulence dans ce volume [Doviak et Zrnic, 1984]. L'estimation de ces erreurs est compliquée par le fait que les éléments nécessaires pour une estimation fiable des erreurs sont eux-mêmes uniquement mesurés et, par conséquent, comportent des incertitudes intrinsèques.

L'approche suivante a été proposée: pour une cellule de résolution en distance donnée, les radars météorologiques font la moyenne de plusieurs échos d'impulsion sur la durée de présence sur une radiale. Ainsi, dans le cas où des brouillages se produisent pendant une petite partie de la durée de présence sur une radiale, l'effet des brouillages sera moyenné avec les échos d'impulsion sans brouillage, ce qui permet de le réduire. Par exemple, si le radar fonctionne avec un rapport brouillage/bruit (I/N) bien inférieur à -10 dB, mais que la valeur de -10 dB est dépassée pendant une courte durée (petit pourcentage de la durée de présence sur la radiale), l'effet des brouillages sera alors

moyenné avec les échos sans brouillage. Si la valeur de I/N de -10 dB est dépassée, mais que le niveau de brouillage n'est pas trop élevé, il est possible que le biais de réflectivité des échos moyennés reste dans les limites de l'objectif nominal du radar considéré. Malheureusement, cette approche ne peut s'avérer efficace que si le ou les signaux brouilleurs sont cohérents sur la durée de présence. Etant donné que c'est rarement le cas, les techniques de moyennage ne seront peut-être pas les plus efficaces pour atténuer les effets des brouillages sur les moments Doppler. Toutefois, à l'exception des radars météorologiques qui utilisent un traitement spectral, le moyennage peut s'avérer efficace pour atténuer les effets des brouillages à supposer que le brouillage moyen sur la durée de présence corresponde à un rapport I/N inférieur à -10 dB.

Comme expliqué au § 4.2 ci-dessus, un rapport I/N de -6 dB conduit à une réduction de la portée d'environ 12% pour les radars météorologiques et de 6% pour les autres radars. Mais cette réduction de la portée de 6% (qui correspond également à une réduction de 11% de la zone de couverture) correspond à une augmentation du bruit d'environ 0,5 dB pour les radars météorologiques, et donc à un rapport I/N de -10 dB. Des tests de validation du rapport I/N de -10 dB pour le brouillage constant ont été réalisés récemment (voir l'Annexe 2 du Rapport UIT-R M.2136).

L'impact des brouillages sur les produits des radars météorologiques polarimétriques ou à double polarisation, tels que la réflectivité différentielle, le coefficient de corrélation, le taux de dépolarisation linéaire et la phase différentielle spécifique, nécessite un complément d'étude à la fois sur le plan mathématique et sur le plan des mesures afin de quantifier les critères de protection nécessaires pour garantir que ces produits ne soient pas compromis par les brouillages.

En conclusion, il convient de minimaliser les brouillages causés aux radars météorologiques, l'objectif étant d'empêcher tous les brouillages ou d'en atténuer les effets. Contrairement aux systèmes de communication qui utilisent la redondance et la correction d'erreur, les radars météorologiques ne peuvent pas réacquérir des informations perdues. Toutefois, pour les études de partage de l'UIT-R faisant intervenir des caractéristiques des radars, il faut prendre en considération d'autres facteurs, qui sont abordés dans les paragraphes qui suivent.

8.3 Obtention mathématique de critères de protection des radars météorologiques

Les radars météorologiques effectuent trois mesures de base, qui, conjointement avec les informations dont dispose l'opérateur, sont utilisées pour obtenir des produits météorologiques. Les trois produits de base à partir desquels d'autres produits sont dérivés sont la réflectivité, la vitesse radiale et la largeur spectrale.

Le § 2 de l'Annexe 1 du Rapport UIT-R M.2136 présente en détail comment obtenir mathématiquement des critères de protection des radars météorologiques contre les brouillages pour ces trois produits, qui sont ensuite validés par des résultats de test.

Dans un souci de commodité, une seule valeur de critère de protection est souvent appliquée à tous les radars météorologiques fonctionnant dans une même bande, mais cette façon de procéder n'est pas rigoureuse. Les radars météorologiques sont conçus avec différents objectifs de performance, optimisés pour des conditions météorologiques spécifiques. La précision des produits de base et le rapport signal/bruit minimal du radar, S/N , varient d'une application radar à l'autre. Plus le rapport S/N minimal utilisé par le radar est faible, plus le critère de protection requis sera faible.

Le traitement du signal supprime un grand nombre des effets du bruit du radar dans les mesures de réflectivité et de largeur spectrale; il s'ensuit que certains systèmes peuvent fournir des estimations de ces produits pour des niveaux de signal qui sont inférieurs au niveau de bruit du récepteur.

L'opérateur du radar choisit le seuil du rapport signal/bruit³, qui, dans certains systèmes, peut être compris entre -12 dB et 6 dB.

Le radar météorologique type utilisé dans les exemples présentés au § 2 de l'Annexe 1 du Rapport UIT-R M.2136 donne des mesures utiles à partir d'un rapport signal/bruit de -3 dB. Un niveau de brouillage égal ou supérieur à ce niveau de signal entraînera une dégradation de la qualité des produits de base, ce qui souligne la nécessité d'établir un rapport I/N qui assure la protection de l'intégrité de ces produits.

Compte tenu des spécifications techniques et de la précision requise des données de base pour n'importe quel radar météorologique donné, on peut déduire les rapports I/N théoriques qui sont nécessaires pour garantir que les produits de base ne soient pas compromis en termes de biais et de variance.

8.4 Types de brouillage possibles

Le brouillage subi par les radars météorologiques peut être de différents types:

- constant;
- variable dans le temps;
- de type impulsionnel.

Pour commencer, il est proposé de déterminer l'impact d'un brouillage constant correspondant à un critère de protection $I/N = -10$ dB, puis d'évaluer les critères de protection possibles contre les autres sources de brouillage pour un niveau analogue de dégradation de la performance du radar.

8.4.1 Impact d'un brouillage constant

Un critère de protection $I/N = -10$ dB correspond à une augmentation de bruit ou d'énergie de $0,5$ dB.

Partant du principe que les radars sont étalonnés afin de faire coïncider le niveau de bruit du récepteur (c'est-à-dire environ -113 dBm) avec le niveau de réflectivité de 0 dBz à 100 km, une augmentation de bruit modifie les conditions nominales du radar, ce qui a pour effet de réduire la portée du radar.

Cela étant, dans l'hypothèse où la couverture des radars météorologiques types fonctionnant dans la bande de fréquences $5 250-5 725$ MHz s'étend actuellement jusqu'à environ 200 km, le Tableau 3 donne les réductions de portée et de couverture en fonction de l'augmentation de bruit et du rapport I/N correspondant.

³ Le seuil du rapport signal/bruit est le niveau le plus bas pour lequel le signal d'écho est traité.

TABLEAU 3
Réduction de portée et de couverture

Augmentation de bruit (dB)	Rapport I/N correspondant (dB)	Réduction de couverture (km)	Réduction de couverture (% par rapport à la surface)
0,5	-10	11	11%
1	-6	22	21%
2	-2,3	42	38%
3	0	59	50%
4	1,8	75	61%
5	3,3	88	69%
6	4,7	100	75%
7	6	111	80%
8	7,3	121	84%
9	8,4	130	88%
10	9,5	137	90%

Par ailleurs, un brouillage constant crée également une augmentation de l'énergie reçue par le radar qui sera prise en considération dans le calcul de la réflectivité.

D'après la description donnée au § 2.2, l'intensité des précipitations correspondant à un certain niveau de réflectivité (dB) est donnée par:

$$z = AR^B$$

où:

- z : réflectivité
- A : constante de diffusion
- B : multiplicateur d'intensité

et

$$z = 10 \log z \text{ (dBz)}$$

où:

dBz: réflectivité (dB).

Une réorganisation des termes permet d'aboutir à la formule de R suivante:

$$R_{(\text{mm/h})} = \left(\frac{10^{\left(\frac{\text{dBz}}{10} \right)}}{200} \right)^{\left(\frac{1}{1,6} \right)}$$

Dans l'hypothèse d'une augmentation d'énergie constante, C , l'intensité des précipitations résultante est la suivante:

$$R_{(\text{mm/h})} = \left(\frac{10^{\left(\frac{\text{dBz} + C}{10} \right)^{\left(\frac{1}{1,6} \right)}}}{200} \right)$$

L'augmentation de l'intensité des précipitations en pourcentage est alors une constante qui est donnée par:

$$p(R_{(\text{mm/h})}) = 100 \times \left(10^{\left(\frac{C}{16} \right)} - 1 \right)$$

Le Tableau 4 contient des valeurs types de la constante de diffusion et de multiplicateur d'intensité pour plusieurs types de précipitations⁴.

TABLEAU 4
Valeurs de la constante de diffusion et du multiplicateur d'intensité
pour divers types de précipitations

Variables	Pluie stratiforme	Pluie convective	Neige	Grêle
Constante de diffusion (A)	200	500	2 000	2 000
Multiplicateur d'intensité (B)	1,6	1,5	2	1,29

Le Tableau 5 donne l'augmentation d'intensité en pourcentage pour plusieurs types de précipitations.

⁴ Les valeurs de la constante de diffusion et du multiplicateur d'intensité pour une pluie stratiforme, une pluie convective, de la neige et de le grêle sont obtenues à partir de mesures.

TABLEAU 5
Surestimation des précipitations

Augmentation de bruit (dB)	Rapport I/N correspondant (dB)	Augmentation d'intensité pour une pluie stratiforme (%)	Augmentation d'intensité pour une pluie convective (%)	Augmentation d'intensité pour de la neige (%)	Augmentation d'intensité pour de la grêle (%)
0,5	-10	7,5	8,0	5,9	9,3
1	-6	15,5	16,6	12,2	19,5
2	-2,3	33,4	35,9	25,9	42,9
3	0	54,0	58,5	41,3	70,8
4	1,8	77,8	84,8	58,5	104,2
5	3,3	105,4	115,4	77,8	144,1
6	4,7	137,1	151,2	99,5	191,8
7	6	173,8	192,9	123,9	248,8
8	7,3	216,2	241,5	151,2	317
9	8,4	265,2	298,1	181,8	398,5
10	9,5	321,7	364,2	216,2	495,9

Ces calculs montrent que, quels que soient la valeur de l'intensité et le type de précipitations, le pourcentage de surestimation correspondant à une augmentation d'énergie constante donnée est également constant, et ne peut donc pas être négligé.

Par ailleurs, si on considère le calcul de la réflectivité pour un pixel donné qui est fondé sur la moyenne (dBz), parmi toutes les estimations, et l'écart type associé, il convient de noter qu'une augmentation d'énergie constante de toutes les estimations augmentera la moyenne mais ne modifiera pas l'écart type. Autrement dit, elle ne modifiera pas la détection de précipitations par le radar (une mesure considérée comme ne correspondant pas à une cellule de précipitations sera toujours considérée comme telle), mais aura uniquement une incidence sur l'intensité des précipitations.

Il est également intéressant de noter que, aussi bien dans le cas d'une réduction de couverture que dans celui d'une surestimation de l'intensité des précipitations, un critère de protection de -10 dB représente une dégradation de la performance du radar comprise entre 7 et 11%, qui sont des valeurs communément admises pour tous les services de radiocommunication.

Dans le cas de mesures Doppler, l'évaluation de l'impact d'un brouillage constant donné est quelque peu différente et dépendra notamment de la manière dont la phase du signal brouilleur peut modifier la phase du signal utile.

Cette dernière hypothèse n'est certainement pas évidente à déterminer et dépendra du signal et/ou de l'environnement. On considère les deux situations suivantes:

- *Cas 1*: si la phase du signal brouilleur détectée par le radar est aléatoire, cela signifie que le vecteur résultant sera statistiquement nul, quel que soit son niveau. Par conséquent, il ne devrait théoriquement pas y avoir d'incidence sur les mesures des vents.
- *Cas 2*: si la phase détectée n'est pas aléatoire et presque constante, il en résultera un vecteur constant avec un certain module et l'incidence sur les mesures des vents dépendra de la phase et du module de ce vecteur.

En outre, on peut supposer que, lorsque le signal brouilleur a un niveau beaucoup plus faible que le signal utile, la phase du signal utile n'est pas modifiée. Si le signal brouilleur a un niveau beaucoup plus élevé, la phase détectée par le radar sera la phase du signal brouilleur et on revient à la discussion

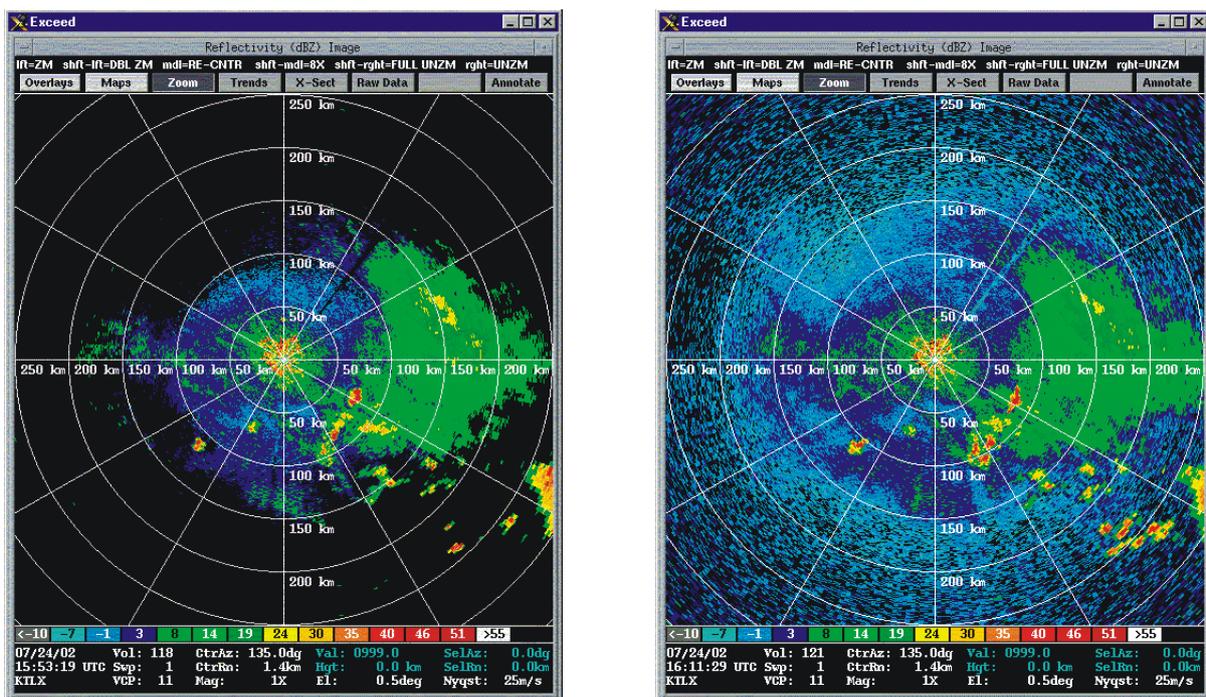
ci-dessus relative aux cas 1 et 2. Entre ces deux situations, c'est-à-dire lorsque les niveaux du signal brouilleur et du signal utile sont du même ordre, il semble relativement difficile d'évaluer lequel des signaux sera dominant pour la détection de phase.

8.4.2 Impact d'un brouillage par impulsions

Le brouillage par impulsions peut avoir une incidence considérable sur les données de réflectivité utilisées par les météorologues pour prévoir les phénomènes météorologiques graves. Dans certains cas, le brouillage par impulsions peut conduire à des données d'écho qui ne permettent pas de produire de façon fiable une image de cibles dans l'atmosphère. Voir par exemple l'illustration de la Fig. 12.

FIGURE 12

Images de radar météorologique en l'absence et en présence de brouillage (mode précipitations)

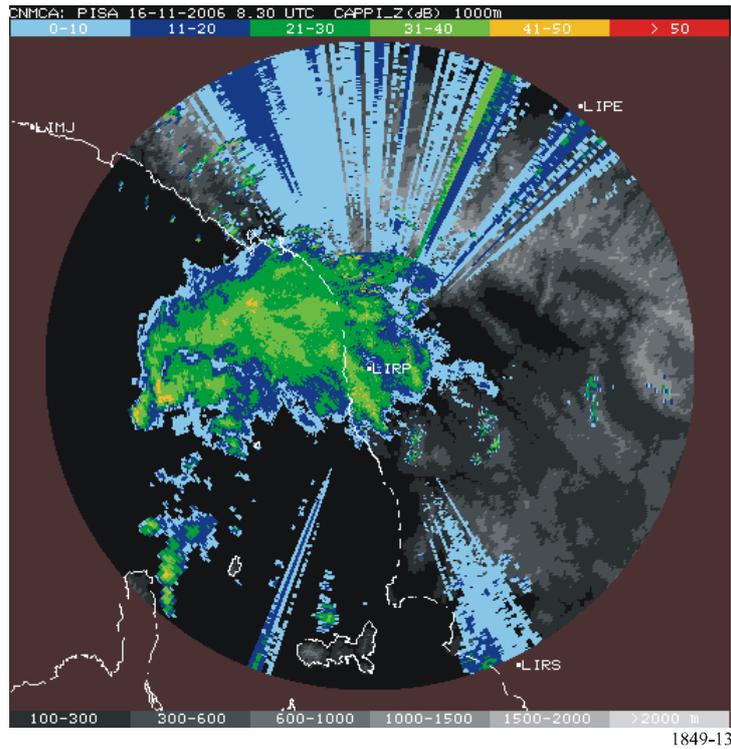


1849-12

La Fig. 13 illustre un autre exemple de brouillage causé à un radar météorologique par un seul émetteur de faible puissance en intérieur.

FIGURE 13

Brouillage causé à un radar météorologique (mode précipitations)



Dans le cas d'une application brouilleuse émettant des signaux par impulsions, et compte tenu du principe selon lequel les mesures des précipitations et des vents sont fondées sur une moyenne parmi de nombreuses impulsions radar, il semble probable que l'impact sur les radars météorologiques dépendra du rapport de fréquence PRF pour les fenêtres de radar météorologique (largeur d'impulsion) et pour la source brouilleuse.

Dans une première approche, on suppose que ce rapport peut être calculé à partir de la formule donnée au § 3.2 de la Recommandation UIT-R RS.1280, donnant la fraction d'impulsions coïncidentes entre deux applications émettrices d'impulsions, qui diffère suivant si les fréquences de répétition des impulsions utiles et parasites sont reliées par des multiples entiers (cas I) ou non (cas II). La fraction d'impulsions coïncidentes, f_c , est donnée par:

$$f_c = \frac{GCF(PR F_i, PR F_g)}{PR F_g} \quad \text{pour le cas I}$$

$$f_c = PR F_i(\tau_g + \tau_i) \quad \text{pour le cas II}$$

où:

$PR F_i$: fréquence de répétition des impulsions brouilleuses, unités Hz ou impulsions par seconde (pps)

$PR F_g$: fréquence de répétition de la fenêtre

$GCF (PR F_i, PR F_g)$: plus grand facteur commun entre $PR F_i$ et $PR F_g$

τ_i : largeur des impulsions brouilleuses, unités seconde

τ_g : largeur de la fenêtre.

Il est à noter que lorsque $\tau_l > \tau_g$ et que les PRF pour les impulsions utiles et parasites ne sont pas reliées par des multiples entiers (cas II), f_c correspond approximativement au coefficient d'utilisation des impulsions brouilleuses.

Cela étant, afin de maintenir le même niveau de dégradation (environ 10%) que pour un brouillage constant avec $I/N_{constant} = -10$ dB, on suppose que le rapport I/N maximal associé à un brouillage par impulsions pourrait être donné par:

$$I/N_{pulse} = I/N_{constant} - 10 \log(f_c)$$

En réalité, si la fraction des impulsions coïncidentes est de 0,5, ce qui signifie qu'une estimation radar sur deux sera polluée par le brouillage, et que le signal brouilleur est doublé (+3 dB) par rapport à la situation correspondant à un rapport $I/N = -10$ dB, il est évident que la moyenne calculée par le radar sera identique.

En revanche, l'écart type va augmenter, ce qui, dans certains cas, peut amener à interpréter à tort un phénomène non météorologique comme étant une situation de précipitations. Dans ce cas, on suppose qu'une dégradation de 10% serait acceptable, mais une validation et une justification par des calculs et par des tests restent nécessaires.

Il est à noter que l'hypothèse ci-dessus selon laquelle un rapport I/N plus élevé pour la puissance de crête d'un brouillage par impulsions peut être accepté par les radars météorologiques a été confirmée par des tests récents (voir l'Annexe 2 du Rapport UIT-R M.2136). Même si la formule ci-dessus n'a pas été complètement validée dans tous les cas, on suppose donc qu'elle représente une approche pertinente. Il pourrait toutefois être utile de mener une analyse complémentaire pour déterminer la relation entre les caractéristiques du signal utile et du signal brouilleur (PRF et largeur d'impulsion).

8.4.2.1 Autre méthode pour déterminer les niveaux I/N pour un brouillage par impulsions

Les radars météorologiques traitent les échos afin de mesurer les précipitations et les vents. Ce traitement comprend la collecte et le traitement de produits de base: réflectivité, vitesse radiale moyenne et largeur spectrale. Très simplement, le radar fait une moyenne sur un échantillon d'échos afin d'obtenir les estimations nécessaires pour la production de produits météorologiques. La fonction de moyennage permettra au radar météorologique de traiter des niveaux de brouillage par impulsions supérieurs aux niveaux des signaux de brouillage de type bruit ou ondes entretenues.

Les radars météorologiques traitent les multiples échos situés dans une case distance pour former un échantillon d'une taille définie par l'utilisateur. Ces échos sont moyennés afin d'obtenir une estimation sur la case distance. Les systèmes du SETS proposés et les radars météorologiques fonctionnent à des fréquences de répétition des impulsions très différentes, de sorte que la probabilité pour que plusieurs impulsions brouilleuses soient situées dans un même échantillon de case distance de radar météorologique est faible, si la taille d'échantillon est petite. L'approche consiste à déterminer le niveau maximal d'une seule impulsion qui ne conduira pas à une dégradation de la moyenne sur la taille de l'échantillon au-delà des objectifs de performance du radar concernant les données produites de base.

Pour déterminer un critère de protection, il faut connaître le niveau du récepteur du radar, le rapport signal/bruit minimal utilisé pour le traitement et la précision requise pour les produits de base du radar (réflectivité, vitesse radiale moyenne et largeur spectrale). Compte tenu de la variété de radars météorologiques qui sont exploités dans la bande de fréquences, il faut faire certaines hypothèses. Le radar utilisé dans l'analyse a un bruit de fond du récepteur de -110 dBm pour la largeur de bande FI la plus étroite.

Le rapport signal/bruit minimal est probablement la valeur la plus difficile à établir sans référence à un radar particulier. Pour les radars exploités dans la bande de fréquences 2 700-2 900 MHz, le rapport signal/bruit est généralement compris entre 0 et 3 dB, étant donné que les radars exploités à des

fréquences basses sont généralement utilisés pour la détection longue portée. Les radars météorologiques exploités dans la bande de fréquences 9 300-9 500 MHz sont généralement utilisés pour une détection à plus courte portée et à plus haute résolution, et peuvent fonctionner avec un rapport signal/bruit minimal plus élevé. Dans le cadre de cette analyse, avec un rapport S/N de +3 dB et un bruit de fond de -110 dBm, on obtient les valeurs de précision requise pour les données produites de base indiquées dans le Tableau 6.

TABLEAU 6

Précision requise pour les données

Précision requise pour les données de base	
Estimation de la réflectivité	1 dB
Estimation de la vitesse	1 m/s
Estimation de la largeur spectrale	1 000 Hz

Comme indiqué dans le Tableau 7, le biais maximal de réflectivité pour le radar météorologique utilisé dans cet exemple est supposé être de 1 dB, ce qui correspond à un rapport brouillage/signal minimal, I/S , de 0,26, ou à un rapport de puissance de 1,26. On prendra une taille d'échantillon de 25 pour la réflectivité. Il est possible de prendre une taille d'échantillon supérieure à 25, ce qui permet de réduire davantage les effets d'une impulsion unique, mais une taille d'échantillon plus grande augmente aussi la probabilité d'avoir une deuxième impulsion brouilleuse dans le même échantillon.

8.4.2.2 Calcul du rapport I/N pour une source de brouillage par impulsions (une seule occurrence)

8.4.2.2.1 Hypothèses

- Le niveau de signal minimal récupéré normalement a un rapport signal/bruit de 2 dB.
- Le biais dépend du rapport de puissance moyenne signal/brouillage. Il dépend donc à la fois du niveau de brouillage et du nombre d'occurrences dans le périodogramme estimé.
- Le niveau maximal de brouillage pour la réflectivité est défini par le biais de réflectivité.
- Un biais de réflectivité (R_b) de 1 dB conduit à un rapport de puissance de 1,2589.

$$\text{Rapport de puissance} = 10^{(R_b/10)} = 10^{(0,1)} = 1,2589$$

Si on soustrait le rapport de puissance non biaisé du rapport de puissance correspondant à un biais de 1 dB, on obtient un rapport brouillage/signal de 0,2589.

$$I/S = [10^{(R_b/10)} - 10^{(0)}] = [1,2589 - 1] = 0,2589$$

Le niveau de puissance de brouillage peut être calculé à partir de la formule suivante:

$$I_L = (N_s) (I/S) = (16) (0,2589) = 4,14$$

Cette valeur correspond à un signal de 6,17 dB.

$$I_L \text{ (dB)} = 10 \log (4,14) = 6,17 \text{ dB}$$

Pour un rapport signal/bruit de 3 dB, le rapport I/N peut être calculé comme suit:

$$I/N = 6,17 \text{ dB} + 3 \text{ dB} = 9,17 \text{ dB}$$

Si on combine ces facteurs en une fonction qui décrit I/N par rapport à N_s , I/N et R_b , on obtient une formule qui donne le rapport I/N maximal requis pour une seule occurrence:

$$I/N = [10 \log [(N_s) (I/S)]] + S/N$$

où:

- N_s : nombre d'échantillons dans l'estimation
 S_{mp} : puissance moyenne du signal
 S/N : rapport signal/bruit du récepteur
 I/S : rapport brouillage/signal

et I/S s'exprime comme suit:

$$I/S = [10(R_b/10)] - [10 \uparrow (N_{nf}/10)]$$

où:

- R_b : biais de réflectivité
 N_{nf} : niveau de bruit de fond normalisé.

Si on combine les formules, on obtient:

$$I/N = [10 \log [(N_s) ([10 \uparrow (R_b/10)] - [10 \uparrow (N_{nf}/10)])]] + S/N$$

Le paragraphe qui suit donne un exemple de calcul basé sur les hypothèses précédentes.

8.4.2.2.2 Exemple de calcul

Hypothèses:

- $N_s = 16$
 $S/N = 3$ dB
 $R_b = 1$ dB
 $N_{nf} = 0$ dB⁵

$$I/N = [10 \log [(N_s) ([10 \uparrow (R_b/10)] - [10 \uparrow (N_{nf}/10)])]] + S/N$$

$$I/N = [10 \log [(16) ([10 \uparrow (1/10)] - [10 \uparrow (0/10)])]] + 3 = 9,17 \text{ dB}$$

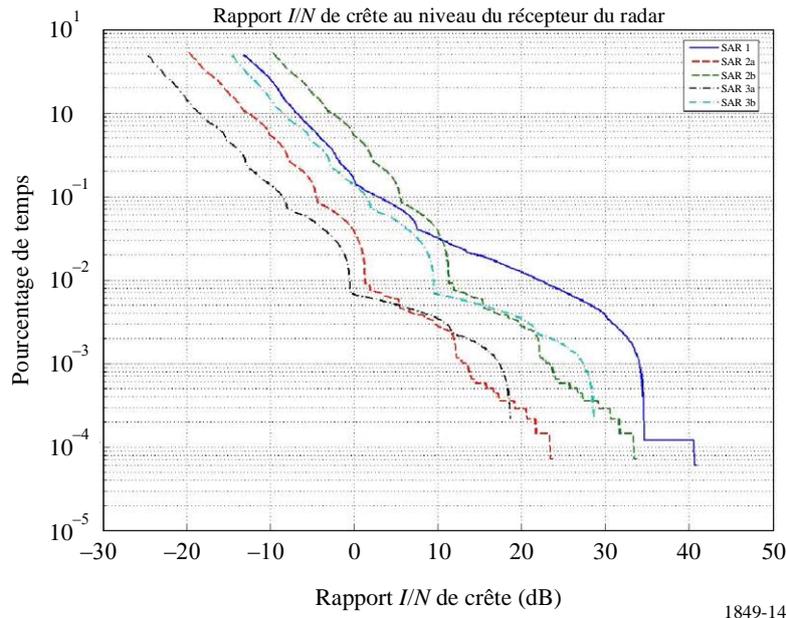
8.4.3 Impact d'un brouillage variable dans le temps

Les Fig. 14 et 15 décrivent le brouillage susceptible d'être causé par un système SAR à un radar météorologique, et présentent un brouillage variable dans le temps.

⁵ Dans cet exemple, le niveau de bruit de fond est normalisé par rapport au niveau de signal non biaisé et pris égal à 0 dB.

FIGURE 14

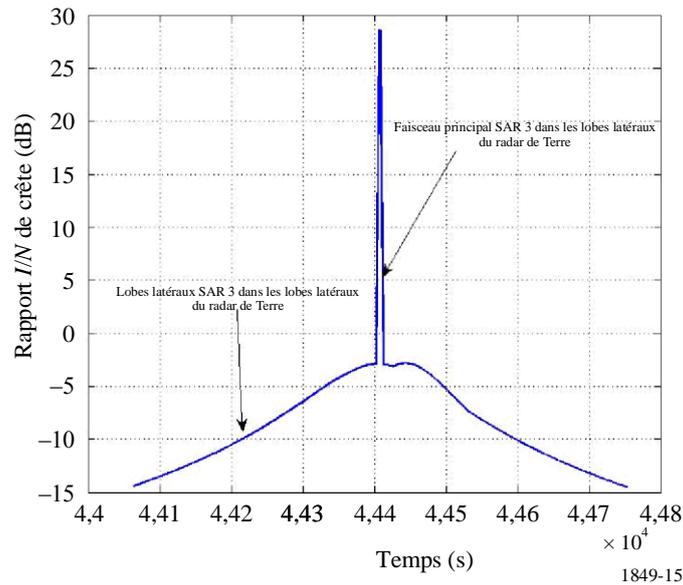
Fonction de distribution cumulative du rapport I/N de crête



1849-14

FIGURE 15

Rapport I/N de crête en fonction du temps pour un seul passage au-dessus du radar météorologique



1849-15

Compte tenu de ces figures, il apparaît que deux situations risquent de se produire:

- a) Dans la première, un niveau I/N élevé sera produit pendant une courte durée, ce qui risque de rendre le radar météorologique inexploitable pendant cette durée (blocage des capacités de mesure des précipitations ou présentation d'une forte surestimation de l'intensité des précipitations).
- b) Dans la deuxième, pendant une période plus longue (environ 400 s), le critère de brouillage sera dépassé.

Il est difficile d'évaluer l'impact de ce type de brouillage sur les radars météorologiques. Toutefois, on devrait supposer que, compte tenu de la courte durée d'intégration des pixels, un brouillage variable

dans le temps risque de présenter, à court terme (c'est-à-dire dans une analyse pixel par pixel), le même impact qu'un brouillage constant (par impulsions ou non) (voir les § 8.4.1 et 8.4.2). Au cas par cas et pixel par pixel, il est difficile de déterminer l'impact d'un brouillage variable dans le temps.

Tout en reconnaissant la nécessité d'une analyse complémentaire et plus détaillée, il convient de noter qu'un niveau I/N de 30 dB (sans tenir compte du fait que le système SAR émet par impulsions) correspondant à la première situation peut produire, dans une zone donnée, une grande surestimation de l'intensité instantanée des précipitations, ce qui altérera les statistiques de précipitations à long terme (1 heure à plusieurs jours) qui sont utilisées dans les processus d'alerte hydrologique. Une durée de brouillage d'environ 400 s correspond grosso modo à 7 rotations de radar et concerne les lobes latéraux du radar. Dans ce cas, un grand nombre de pixels (et, par conséquent, une grande zone géographique) seront affectés sur plusieurs occurrences, rendant impossible l'approximation des pixels. La taille de la zone géographique dépend bien évidemment du niveau de brouillage qui est supposé affecter en premier le bord de la couverture du radar. Même un brouillage léger peut entraîner une réduction de couverture de plusieurs dizaines de pourcent.

La détermination de l'impact d'un brouillage variable dans le temps n'est pas chose facile et nécessiterait une analyse au cas par cas dans laquelle il serait tenu compte des résultats de simulations dynamiques auxquels il faudrait appliquer les critères de brouillage utilisés pour les sources de brouillage constant ou par impulsions.

8.5 Conclusions sur les critères de protection des radars météorologiques

Même si les critères de protection des radars météorologiques dépendent fortement de leurs caractéristiques et spécifications, l'analyse développée ci-dessus au § 8, et les éléments figurant dans le Rapport UIT-R M.2136, prennent en considération l'impact sur la portée des radars et sur la précision des produits de base et confirment que, pour un brouillage constant, un rapport $I/N = -10$ dB est pertinent et devrait donc être utilisé pour garantir la protection des radars météorologiques. Ce critère est cohérent avec les Recommandations UIT-R en vigueur.

Pour le brouillage par impulsions, une analyse et des tests ont abouti à un rapport I/N plus élevé pour la puissance de crête du brouillage par impulsions, qui dépend des caractéristiques du système brouilleur et du système brouillé (essentiellement PRF et largeur d'impulsion). Dans l'attente d'études complémentaires, l'application de l'une des méthodes décrites au § 8.4.2 ou 8.4.2.1 permet d'obtenir une approximation appropriée.

Jusqu'à présent, aucune formule générique pour le brouillage variable dans le temps n'a été élaborée. Suivant si la source de brouillage produit un brouillage continu ou par impulsions, de courte durée (impact sur des radiales du radar) ou de longue durée (balayage volumique complet), l'analyse devrait être réalisée au cas par cas et à partir des résultats de simulations dynamiques, compte tenu des critères pertinents mentionnés ci-dessus pour le brouillage constant ou par impulsions.

9 Impact des éoliennes

Pour des prévisions météorologiques précises, les radars météorologiques sont conçus pour scruter une bande d'altitude relativement étroite. En raison de la sensibilité des radars, des éoliennes déployées en visibilité directe d'une installation de radar météorologique peuvent bloquer la propagation vers l'avant des signaux radar, causer un fouillis radar et produire des échos radar induits par la turbulence de sillage. Ces mécanismes de brouillage peuvent se traduire par de fausses estimations radar de l'accumulation des précipitations, de fausses signatures de tornade ou de mésocyclone et une identification incorrecte de caractéristiques d'orages ou de cellules de tempête. Ils peuvent aussi entraîner une dégradation de la performance des radars et nuire aux activités de prévision et d'alerte.

9.1 Effet d'écran

Toute caractéristique géographique ou structure se trouvant entre le radar et la cible entraînera un effet d'écran. Suivant leur taille, les éoliennes peuvent entraîner des effets d'écran, qui devraient varier en fonction de leurs dimensions, du type de radar émetteur et de la configuration (hauteur, angle de calage des pales, vitesse de rotation et position de l'éolienne par rapport au radar).

9.2 Fouillis radar

Des échos radar peuvent être reçus à partir de n'importe quelle surface réfléchissant les signaux radar. Dans certaines zones géographiques, ou dans des conditions météorologiques particulières, la performance des radars peut être affectée par des échos parasites, appelés fouillis radar, qui peuvent masquer les échos utiles. Pour les météorologues, une ou plusieurs éoliennes situées au voisinage d'un radar météorologique peuvent poser des problèmes d'exploitation du radar.

Les signaux de fouillis de sol présentent une grande réflectivité, un décalage Doppler proche de zéro, une faible largeur spectrale et une localisation homogène. Par rapport au fouillis de sol qui se produit couramment, le brouillage causé par les éoliennes est beaucoup plus problématique. Des réflexions directes seront reçues en provenance à la fois du mât (stationnaire) et des pales (mobiles). Comme le fouillis de sol, les signaux de fouillis causé par les éoliennes devraient aussi présenter une réflectivité relativement grande, avec une modulation possible due à la rotation des pales causant une variation systématique dans la section efficace du radar.

Le décalage Doppler sera affecté par plusieurs facteurs, notamment la vitesse de rotation des pales et l'orientation du rotor par rapport au faisceau radar. Les vitesses Doppler devraient être maximales lorsque le rotor est orienté à 90° par rapport à l'axe de visée du radar, et proches de zéro lorsque la face avant ou la face arrière du rotor est tournée vers le radar. Etant donné que le volume de résolution du radar comprendra probablement la totalité de la structure de l'éolienne, la largeur spectrale devrait être nettement agrandie. Ceci est due à la rotation des pales qui s'éloignent et se rapprochent du radar. La présence de plusieurs éoliennes dans un même volume de résolution ne ferait qu'exacerber cet effet.

9.3 Energie rétrodiffusée par des tourbillons turbulents

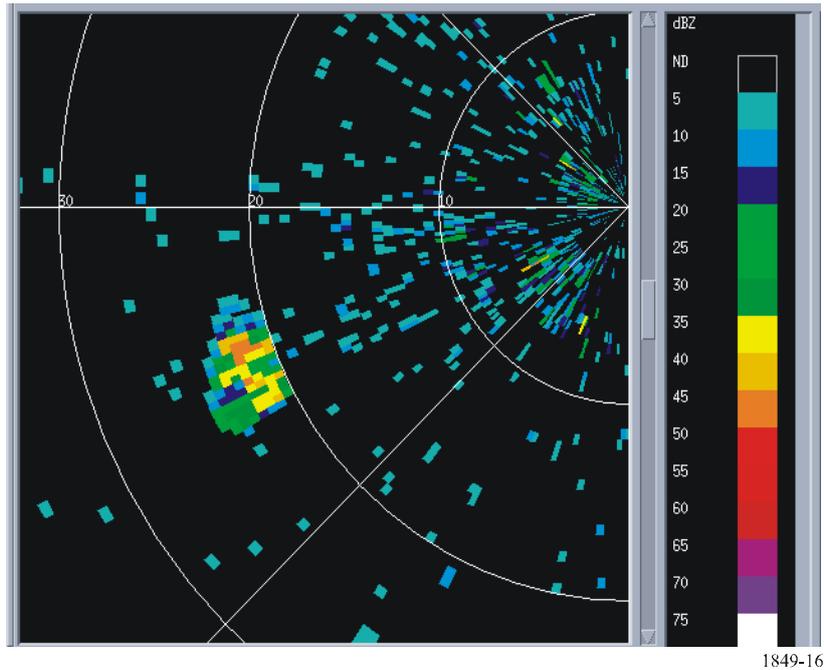
En plus du fouillis radar causé par les réflexions depuis les éoliennes, on peut aussi observer une énergie rétrodiffusée par des tourbillons turbulents dans le sillage du parc éolien. Les échos correspondants devraient présenter des caractéristiques analogues à celles découlant de la rétrodiffusion par temps clair à partir de discontinuités dans l'indice de réfraction à l'échelle de Bragg du radar. En principe, ces échos de sillage présenteront une certaine dérive en fonction du champ de vent et auront une réflectivité beaucoup plus faible que les échos associés aux réflexions directes depuis les éoliennes. Néanmoins, ils peuvent agrandir considérablement la zone de couverture radar affectée par le fouillis causé par les éoliennes et, par conséquent, exacerber le problème.

9.4 Exemples de fouillis radar causé par des éoliennes

La Fig. 16 montre comment un parc éolien (ensemble d'éoliennes) apparaît sur une image de radar météorologique (image de réflectivité faisant apparaître des échos provenant d'un parc éolien situé approximativement à 40 km au sud-ouest du radar météorologique).

FIGURE 16

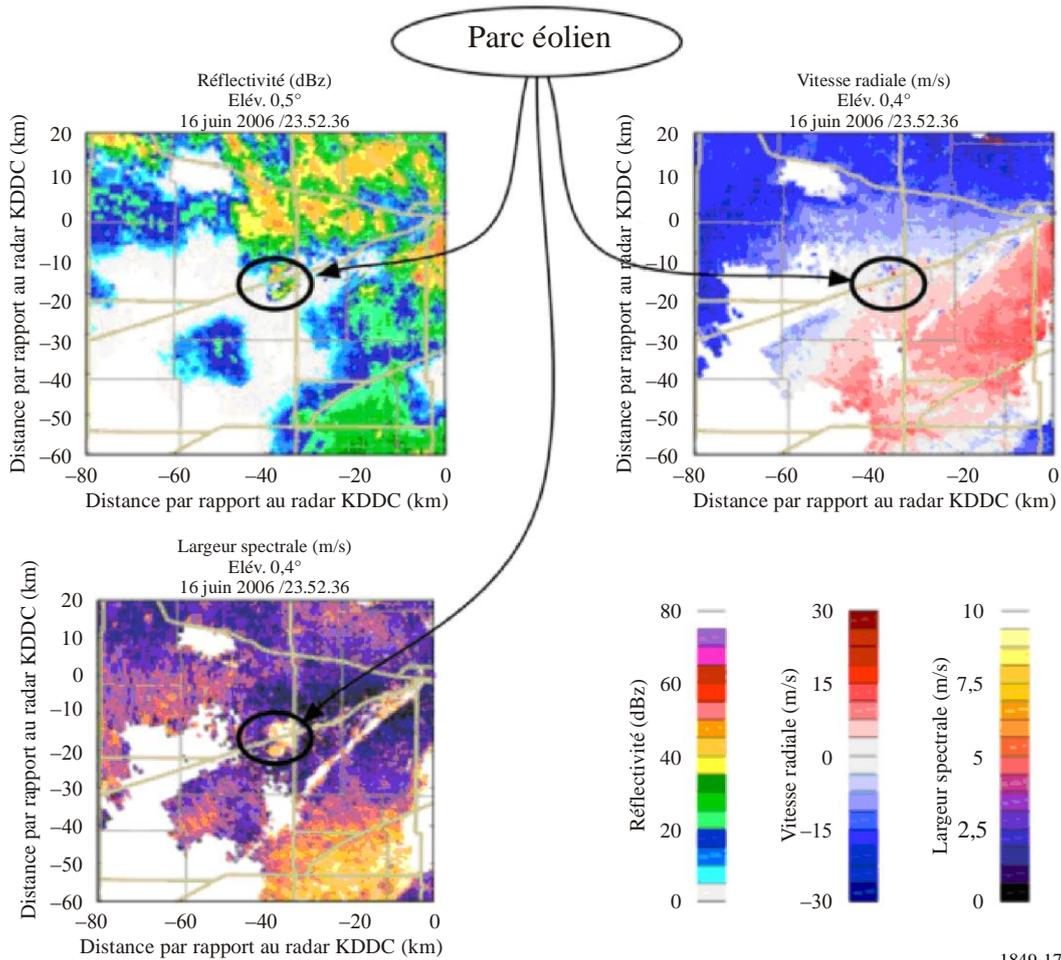
Image de radar météorologique faisant apparaître un parc éolien
au sud-ouest de l'emplacement du radar



La Fig. 17 montre des données de niveau II, avec une combinaison d'échos provenant de tempêtes isolées et du fouillis radar causé par des éoliennes. Les signaux provenant des éoliennes sont caractérisés par une vitesse radiale aléatoire et une grande largeur spectrale.

FIGURE 17

Impact du brouillage causé par un parc éolien sur des données de niveau II



1849-17

Sans connaissance préalable, il serait extrêmement difficile de faire une distinction entre le fouillis radar causé par les éoliennes et les orages. Etant donné qu'en tournant, les pales s'éloignent et se rapprochent du radar, la vitesse Doppler moyenne devrait être proche de zéro. Les grandes largeurs spectrales réduiront la précision des estimations de vitesse Doppler par de petits écarts par rapport à zéro (voir la Fig. 17).

9.5 Impact du fouillis radar causé par des éoliennes sur le fonctionnement des radars météorologiques et la précision des prévisions

Des études ont été menées sur le terrain afin d'illustrer l'impact du fouillis causé par des éoliennes sur des radars météorologiques. Elles ont montré que les parcs éoliens peuvent avoir une incidence considérable sur les radars météorologiques et que, en tant que tels, ils peuvent dégrader la prévision des phénomènes météorologiques graves.

Ces analyses ont clairement montré que le fouillis produit par une éolienne sera présent à des azimuts très élevés (plusieurs dizaines de degrés) par rapport à la direction de l'éolienne, même à des distances relativement grandes. L'impact des éoliennes sur la réflectivité mesurée par les radars météorologiques ne peut donc pas être négligé.

Les analyses ont également montré que l'impact d'une seule éolienne sur le mode Doppler d'un radar météorologique est très important, en particulier à des distances inférieures à 10 km, pour lesquelles toutes les données seront erronées à chaque azimut.

Il faudra donc, d'une manière ou d'une autre, atténuer les effets du fouillis causé par les éoliennes afin de protéger les radars météorologiques contre le brouillage préjudiciable causé par les parcs éoliens.

Avant de pouvoir formuler des conclusions finales concernant les méthodes à mettre en œuvre pour atténuer les effets du fouillis causé par les éoliennes, il faudrait mener des études complémentaires afin de bien comprendre ce fouillis et son impact sur les radars météorologiques. Après cela, il faudra peut-être élaborer des méthodes permettant d'atténuer les effets de ce fouillis, compte tenu de la croissance attendue des systèmes de production d'énergie éolienne.

Dans l'attente des résultats des études en cours sur l'atténuation des effets du brouillage causé par les éoliennes aux radars météorologiques, la solution actuelle pour éviter ou limiter l'impact des parcs éoliens est de garantir des distances de séparation entre les deux types de systèmes. Par exemple, certains pays européens examinent actuellement les recommandations suivantes:

- a) Aucune éolienne ne devrait être déployée à moins de:
 - 5 km d'un radar fonctionnant dans la gamme de fréquences 5 250-5 725 MHz;
 - 10 km d'un radar fonctionnant dans la bande de fréquences 2 700-2 900 MHz.
- b) Les projets de parcs éoliens devraient faire l'objet d'une étude d'impact lorsqu'ils concernent des distances inférieures à:
 - 20 km pour un radar fonctionnant dans la gamme de fréquences 5 250-5 725 MHz;
 - 30 km pour un radar fonctionnant dans la bande de fréquences 2 700-2 900 MHz.

10 Tests précédents de radars météorologiques

Des tests ont été réalisés concernant un radar météorologique afin de déterminer les critères de protection du radar. La procédure et la méthode d'analyse des données sont définies en détail dans l'Annexe 1 du Rapport UIT-R M.2136. Ces tests ont fait intervenir l'injection d'un signal de brouillage de niveau connu dans le récepteur. Le radar commençait par effectuer un balayage volumique partiel (1 ou 2 rotations d'antenne) ou complet en l'absence de brouillage. Il était ensuite réinitialisé avant d'effectuer le même balayage volumique partiel ou complet, en présence du signal de brouillage injecté dans le trajet de réception au moyen d'un combineur RF. Les données produites de base pour le balayage volumique partiel ou complet sans brouillage et avec brouillage étaient enregistrées. Des balayages volumiques partiels ou complets sans brouillage et avec brouillage en alternance ont été réalisés à des niveaux de signal de brouillage correspondant à des rapports brouillage/bruit, I/N , compris entre +6 dB et -15 dB.

Une analyse de données a ensuite été réalisée en effectuant une comparaison case de distance sans brouillage/case de distance avec brouillage le long de chaque radiale. A partir des données établies par régression, on a pu déterminer le niveau I/N à partir duquel la précision des produits de base n'était plus comprise dans les limites acceptables.

Les résultats des tests ont montré que des améliorations pouvaient être apportées à leur réalisation. Pour les tests décrits dans l'Annexe 1 du Rapport UIT-R M.2136, le radar a collecté des données depuis l'atmosphère. L'hypothèse était que les conditions atmosphériques ne changeraient pas considérablement au cours des 3 à 5 minutes nécessaires pour effectuer les balayages volumiques partiels ou complets sans brouillage et avec brouillage. Il est ressorti de l'analyse des données que cette hypothèse n'a pas toujours été correcte.

Il est important de noter que la sensibilité au brouillage peut varier d'un type de radar météorologique à l'autre car le niveau de brouillage tolérable pour chaque radar dépend du rapport signal/bruit minimal considéré et des critères concernant le biais et la variance dans les estimations.

Des tests plus récents ont été réalisés pour déterminer, pour un type de radar météorologique fonctionnant dans la gamme de fréquences 5 250-5 725 MHz, la sensibilité à différents types de brouillage (constant, à ondes entretenues ou MF et par impulsions) et ont confirmé l'analyse ci-dessus du § 8, ainsi que les conclusions des tests précédents concernant les radars météorologiques fonctionnant dans la bande de fréquences 2 700-2 900 MHz. Une synthèse des résultats de ces tests figure dans l'Annexe 2 du Rapport UIT-R M.2136.

11 Tests futurs

Pour les tests futurs, il faudrait envisager d'utiliser un système d'acquisition et de régénération de signal permettant de saisir, numériser et enregistrer les signaux radar FI ou I et Q. Les signaux d'un seul balayage volumique sans brouillage peuvent être saisis et numérisés.

A l'aide d'un ou de plusieurs générateurs de forme d'onde arbitraire et d'un générateur de signal RF, le signal radar reçu numérisé peut être recréé et injecté dans le récepteur radar autant de fois qu'il est nécessaire pour réaliser les tests, avec des échos de l'atmosphère simulés. Cette approche permet d'offrir des conditions de test identiques pour les balayages volumiques partiels ou complets sans brouillage et avec brouillage.

Il pourra être nécessaire de réaliser des tests avec un brouillage par impulsions et/ou un brouillage variable dans le temps pour évaluer et confirmer la susceptibilité des radars météorologiques à ces types de brouillage. Pour ces tests, il faudrait utiliser à la fois des radars météorologiques non polarimétriques (polarisés horizontalement) et polarimétriques (polarisés horizontalement et verticalement).

12 Modèles de propagation

Dans les paragraphes qui précèdent, il est fait mention de la nécessité de minimaliser la quantité de brouillage admissible reçu par les radars météorologiques. Mais il est également reconnu qu'il faudrait prendre en considération des modèles de propagation lors de la réalisation d'études de partage et ce sont les modèles de propagation les plus évolués (par exemple ceux des Recommandations UIT-R P.452 et UIT-R P.526) qui donnent les résultats les plus précis pour ces études. Ces modèles de propagation évolués nécessitent d'utiliser une valeur de dépassement autre que 0%. Une étude complémentaire est nécessaire afin de mieux définir la faisabilité de l'utilisation de ces modèles et comment appliquer correctement le résultat dans les études de partage.

13 Tendances futures

Les radars météorologiques de diverses administrations font actuellement l'objet d'une importante modernisation du matériel. La prochaine étape sera le passage à des radars polarimétriques, qui utilisent une polarisation verticale en plus de la polarisation horizontale utilisée par les radars actuels.

D'autres techniques permettant d'améliorer encore la performance des radars météorologiques sont actuellement étudiées, notamment divers algorithmes permettant de lever les ambiguïtés distance/vitesse, d'accélérer l'acquisition des données, de réduire les effets des artefacts, de diminuer le fouillis radar et de traiter efficacement les signaux pour fournir des estimations météorologiques qui soient les plus précises possible. D'autres efforts sont consacrés à l'utilisation combinée de radars météorologiques et profileurs ainsi que, dans une moindre mesure, à l'étude de la foudre et de ses dangers, pour déterminer si le début et la fin d'un épisode de foudre pourraient être prévisibles.

Des chercheurs vont bientôt commencer à adapter la technologie de radar à balayage électronique pour l'utiliser dans des applications de surveillance météorologique. Avec cette technologie, les antennes paraboliques orientées mécaniquement seront remplacées par une antenne réseau orientée

électroniquement. Ainsi, il sera possible de mettre en place des stratégies de balayage plus souples et de faire des mises à jour plus rapides lorsque les conditions météorologiques évoluent. Les premiers tests du radar à balayage électronique se sont avérés prometteurs. Les radars à balayage électronique permettront d'améliorer les connaissances fondamentales concernant l'évolution des tempêtes, ce qui permettra ensuite d'améliorer les modèles informatiques, de faire des prévisions plus précises et d'émettre des alertes plus tôt. Ils sont également susceptibles d'augmenter considérablement le délai moyen qui s'écoule entre l'alerte de tornade et le début de la tornade et qui est actuellement de 13 min. La puissance de sortie de l'émetteur et les caractéristiques spectrales sont les mêmes que pour les systèmes existants. Les améliorations, mises en œuvre de façon économique, concernent les sous-systèmes de réception et de traitement du signal. Bien qu'on ne prévoie pas de mettre en œuvre la technologie du radar à balayage électronique dans les dix prochaines années, il est possible que, lors du passage à cette technologie (en cas de mise en œuvre), les émetteurs existants ne soient pas réutilisés mais remplacés par des modules d'émission/réception répartis.

Il existe une possibilité de déploiement de radars météorologiques mis au point par CASA (*Center for collaborative adaptive sensing of the atmosphere*) dans la bande X dans la portion de spectre comprise entre 8 000 MHz et 12 000 MHz. La National Science Foundation a créé un nouveau centre de recherches techniques, CASA, en septembre 2003 afin de mettre au point de petits radars bon marché pour la télédétection haute résolution dans la basse atmosphère. Les conditions météorologiques dans la basse troposphère sont extrêmement sous-échantillonnées, ce qui empêche les prévisions et l'initialisation de modèle dans la région où les tempêtes se développent. Les radars CASA à haute densité spatiale pourront détecter l'évolution des conditions météorologiques dans la région de la basse atmosphère qui se trouve souvent au-dessous de la couverture actuelle des radars Doppler en service (c'est-à-dire les trois plus bas kilomètres). Les radars CASA seront placés sur des pylônes de téléphonie mobile ou une autre infrastructure existante avec une grande capacité de transmission de données. A la différence de l'actuel réseau de radars préprogrammés, les radars CASA communiqueront entre eux et adapteront leurs stratégies de détection directement en fonction de l'évolution de la météo et des besoins des utilisateurs finals. Ces données radar pourront être incorporées dans des modèles numériques de prévision météorologique pour une initialisation plus complète des données.

Il faudra suivre ces tendances futures qui, au fur et à mesure de l'évolution des technologies, auront un impact sur les futures stratégies d'atténuation des effets du brouillage et sur les définitions des critères de protection.

14 Résumé

Les radars météorologiques au sol fonctionnent et traitent les signaux différemment des autres radars, et leurs produits sont très différents de ceux des autres types de radar. Ces différences peuvent avoir une incidence sur la manière de réaliser les analyses de brouillage et d'évaluer leurs résultats.

Les radars météorologiques au sol sont spécifiques et utilisent différentes stratégies de mouvement d'antenne pour balayer le volume atmosphérique qui les entourent et mesurer une représentation complète des conditions atmosphériques. Par comparaison, la plupart des autres types de radar poursuivent des cibles discrètes et sont uniquement concernés par les échos correspondant aux cellules de distance qui sont associées aux cibles. Les radars météorologiques traitent quant à eux toutes les cellules de distance sur toutes les radiales.

Annexe 2

Caractéristiques des radars météorologiques

1 Radars météorologiques dans la bande de fréquences 2 700-2 900 MHz

Le Tableau 7 décrit les caractéristiques techniques des radars météorologiques types qui sont exploités dans la bande de fréquences 2 700-2 900 MHz. Le radar 1 peut toutefois être exploité jusqu'à 3 000 MHz. Ce sont les principaux radars météorologiques qui sont utilisés pour l'établissement des plans de vol. Souvent situés sur les aéroports du monde entier, ils fournissent des évaluations précises des conditions météorologiques qui sont utilisées pour gérer les opérations en vol. Ces radars fonctionnent 24 heures sur 24.

Le radar 1 utilise la technologie Doppler pour observer la présence et calculer la vitesse et la direction de déplacement de phénomènes météorologiques graves (par exemple tornades, ouragans ou orages violents). Le radar 1 fournit aussi des mesures quantitatives des précipitations par zones, qui jouent un rôle important dans les prévisions hydrologiques. De par ses capacités de détection de phénomènes météorologiques graves et de calcul de leur déplacement, ce radar permet d'augmenter la précision et la rapidité des services d'alerte. Le radar 1 est tout à fait adapté pour détecter très tôt les vents dangereux et pour estimer la pluviométrie, ce qui est très utile pour prévoir les régimes fluviaux et les inondations.

Le radar 1 est utilisé dans un réseau intégré couvrant la totalité des Etats-Unis d'Amérique, Guam, Porto Rico, le Japon, la Corée du Sud, la Chine et le Portugal. La bande de fréquences 2 700-2 900 MHz offre d'excellentes caractéristiques météorologiques et de propagation pour les prévisions et les alertes météorologiques. Les améliorations qu'il est prévu d'apporter au radar devraient prolonger sa durée de service jusqu'en 2040. Selon l'Organisation météorologique mondiale (OMM), plus de 320 radars météorologiques sont exploités dans cette bande de fréquences dans au moins 52 pays à travers le monde.

Le radar 2 est un radar non-Doppler qui est utilisé dans de nombreux pays.

Dans le cas des radars 3 et 4, les applications météorologiques pour l'aviation et les applications météorologiques sont conjuguées dans un seul et même radar.

TABLEAU 7

Caractéristiques	Unités	Radar 1*	Radar 2*	Radar 3	Radar 4
Plage de syntonisation	MHz	2 700-3 000	2 700-2 900	2 700-3 000 ⁽²⁾	2 700-3 000 ⁽²⁾
Modulation		P0N		P0N, Q3N	P0N, Q3N
Puissance d'émission délivrée à l'antenne	kW	500	400 ou 556		250,0
Largeur d'impulsion	µs	1,6 (impulsion brève) 4,7 (impulsion longue)	1,0 (impulsion brève) 4,0 (impulsion longue)	1,0 (impulsion brève) 60,0 (impulsion longue)	1,0 (impulsion brève) ≤ 250,0 (impulsion longue)
Temps de montée/de descente des impulsions	µs	0,12		0,2 (impulsion brève), 3 (impulsion longue)	0,2 (impulsion brève), 3 (impulsion longue)
Fréquence de répétition des impulsions ou impulsions par seconde	Hz ou pps	318-1 304 (impulsion brève) 318-452 (impulsion longue)	539 (impulsion brève) 162 (impulsion longue)	320-6 100 ((impulsion brève) 320-1 300 (impulsion longue) Note (3)	320-4 300 ((impulsion brève) 320-1 500 (impulsion longue) Note (3)
Coefficient d'utilisation	%	0,21 maximum		0,2 ⁽⁴⁾ -0,6 (impulsion brève) ≤ 12,0 ⁽⁵⁾ (impulsion longue)	0,2 ⁽⁴⁾ -0,4 (impulsion brève) ≤ 12,0 ⁽⁵⁾ (impulsion longue)
Largeur de bande de modulation	MHz	Sans objet	Sans objet	3	3
Largeur de sous-impulsion codée en phase		Sans objet	Sans objet	Sans objet	Sans objet
Rapport de compression		Sans objet	Sans objet	180	≤ 750
Largeur de bande d'émission RF: -40 dB -20 dB -6 dB -3 dB	MHz	4,6		10,4 (impulsion brève)/ 6,2 (impulsion longue) 1,3 (impulsion brève)/ 2,0 (impulsion longue)	10,4 (impulsion brève)/ 6,2 (impulsion longue) 1,3 (impulsion brève)/ 2,0 (impulsion longue)
Dispositif de sortie		Klystron	Magnétron coaxial	Semi-conducteur	Semi-conducteur
Type de diagramme d'antenne (à faisceau-crayon, à faisceau en éventail, à faisceau en cosécante carrée, etc.)		Crayon	Crayon	Faisceau-crayon couvrant jusqu'à 70 000 pieds	Faisceau-crayon couvrant jusqu'à 100 000 pieds

TABLEAU 7 (suite)

Caractéristiques	Unités	Radar 1*	Radar 2*	Radar 3	Radar 4
Type d'antenne (réflecteur, à balayage électronique, à fentes, etc.)		Réflecteur parabolique	Réflecteur parabolique	Commande de phase, 4 panneaux (de 4 mètres de diamètre chacun)	Commande de phase, 4 panneaux (de 8 mètres de diamètre chacun)
Polarisation de l'antenne		Rectiligne: verticale et horizontale	Rectiligne: horizontale	Rectiligne, horizontale et verticale; circulaire	Rectiligne, horizontale et verticale; circulaire
Gain du faisceau principal de l'antenne	dBi	45,7	38,0	41	46
Ouverture angulaire en élévation du faisceau de l'antenne	degrés	0,92	2,0	1,6-2,7	0,9-1,5
Ouverture angulaire en azimut du faisceau de l'antenne	degrés	0,92	2,0	1,6-2,7	0,9-1,4
Vitesse de balayage horizontale de l'antenne	degrés/s	18	18 et pivotement entièrement manuel	Sans objet	Sans objet
Type de balayage horizontal de l'antenne (continu, aléatoire, 360°, sectoriel, etc.)		360° et sectoriel	360° et sectoriel	Irrégulier pour couvrir 360°	Irrégulier pour couvrir 360°
Vitesse de balayage verticale de l'antenne	degrés/s	14 pas en 5 min		Sans objet	Sans objet
Type de balayage vertical de l'antenne (continu, aléatoire, 360°, sectoriel, etc.)	degrés	Pas fixes: 0,5-20	-2,0 à +60	Irrégulier pour couvrir le volume requis	Irrégulier pour couvrir le volume requis
Niveaux des lobes latéraux de l'antenne (premiers lobes latéraux et lobes latéraux distants))	dBi	20	+15 (estimation)	17 à l'émission, 25 à la réception	17 à l'émission, 25 à la réception
Hauteur d'antenne	m	30	30		
Largeur de bande FI du récepteur	MHz	0,63 à -3 dB	0,25 à -3 dB (impulsion longue) 0,5 à -3 dB (impulsion brève)	1,2 à -6 dB (impulsion brève) 1,8 à -6 dB (impulsion longue)	1,2 à -6 dB (impulsion brève) 1,6 à -6 dB (impulsion longue)
Facteur de bruit du récepteur	dB	2,1	9,0	< 6	< 6
Signal minimal discernable	dBm, dBm/M Hz	-115	-110	-110	-110
Point de compression à 1 dB des étages d'entrée du récepteur	dBm	-17	-32	10	10
Niveau de saturation du récepteur syntonisé	dBm	-10		Sans objet	Sans objet

TABLEAU 7 (*fin*)

Caractéristiques	Unités	Radar 1*	Radar 2*	Radar 3	Radar 4
Largeur de bande RF à 3 dB du récepteur	MHz	1,6	0,5 (impulsion longue) 1,5 (impulsion brève)	200	200
Temps de reprise et niveaux de saturation RF et FI du récepteur	dBm µs	-10, 1		13 < 0,5	13 < 0,5
Largeur de bande de filtrage Doppler (Hz)	Hz	Estimée 95 ⁽¹⁾			
Caractéristiques d'affaiblissement du brouillage					
Distribution géographique		Monde entier			
Pourcentage de temps d'utilisation (%)	%	100			

- (1) Filtrage Doppler et suppression des impulsions saturées.
- (2) Plage d'accord 2,7-2,9 GHz pour la fonction de radionavigation aéronautique.
- (3) Fréquences de répétition des impulsions très élevées utilisées uniquement dans le cas de grands angles d'élévation.
- (4) Le rapport cyclique pour les impulsions brèves est de 0,2% lors d'un balayage avec l'angle d'élévation le plus faible (horizon).
- (5) La largeur d'impulsion et la fréquence de répétition des impulsions seront adaptées afin que le coefficient d'utilisation reste en dessous de 12%.

2 Radars météorologiques dans la gamme de fréquences 5 250-5 725 MHz

Dans la gamme de fréquences 5 250-5 850 MHz, sont exploités à la fois des radars météorologiques au sol et aéroportés. Les caractéristiques techniques des radars au sol figurent dans le Tableau 8.

Il est par ailleurs à noter que, dans le cadre de certains services météorologiques, des radars spécifiques non rotatifs sont utilisés dans cette gamme de fréquences pour poursuivre et localiser des radiosondes qui ne mettent pas en œuvre de fonction de radionavigation. Ces radars diffèrent principalement des radars météorologiques par le fait qu'ils utilisent une largeur d'impulsion plus petite (0,2 µs étant la valeur minimale) et, une fois verrouillés sur une radiosonde, ils suivent sa trajectoire jusqu'à la fin du lancement. Ces radars ne sont pas traités dans la présente Recommandation.

De plus, des radars météorologiques aéroportés sont utilisés pour la recherche et la reconnaissance des ouragans. Des engins spatiaux pénètrent dans le mur de l'œil de façon répétée à des altitudes comprises entre 457 m et 6 096 m. Ils collectent des données de mission de recherche qui sont essentielles pour les modèles informatiques utilisés pour prédire l'intensité des ouragans et l'endroit où ils atteignent la terre. D'autres engins spatiaux pénètrent dans les ouragans à des altitudes plus hautes, moins turbulentes (entre 9 144 et 13 716 m) pour déterminer la position de l'œil de l'ouragan. Ces radars ne sont pas traités dans la présente Recommandation.

Il convient de noter que les radars météorologiques au sol peuvent théoriquement être exploités dans la totalité de la gamme de fréquences 5 250-5 850 MHz, mais leur exploitation est généralement limitée à la gamme de fréquences 5 430-5 725 MHz. La plupart de ces radars sont exploités dans la bande de fréquences 5 600-5 650 MHz.

TABLEAU 8

Caractéristiques	Unités	Radar 1	Radar 2	Radar 3	Radar 4	Radar 5
Plage d'accord	MHz	5 300-5 700	5 600-5 650	5 600-5 650	5 300-5 700	5 600-5 650
Puissance d'émission à l'antenne	kW crête, W moy.	250 125	250 1 500	250	250	250
Largeur d'impulsion	µs	2,0	0,05-18	1,1	0,8-2,0	3,0
Temps de montée/descente d'impulsion	µs	0,2	0,005	0,11	0,08	0,3
Fréquence de répétition des impulsions)	pps	50, 250 et 1 200	0-4 000	2 000	250-1 180	259
Dispositif de sortie		Magnétron coaxial	Klystron	Klystron	Magnétron réglable	Magnétron coaxial
Type de diagramme d'antenne (à faisceau-crayon, à faisceau en éventail, à faisceau en cosécante carrée, etc.)		Conique	Crayon	Crayon	Crayon	Crayon
Type d'antenne (réflecteur, à balayage électronique, à fentes, etc.)		Parabolique en métal massif	Parabolique	Parabolique	Parabolique	Parabolique massive
Polarisation d'antenne		Verticale	Horizontale	Horizontale	Horizontale	Horizontale
Gain du faisceau principal	dBi	39	44	50	40	40
Ouverture du faisceau en élévation	degrés	4,8	0,95	< 0,55	< 1,0	1,65
Ouverture du faisceau en azimut	degrés	0,65	0,95	< 0,55	< 1,0	1,65
Vitesse de balayage horizontal	degrés/s	0,65	0-36 (0-6 tr/min)	21-24	30-48	30-48
Type de balayage horizontal (continu, aléatoire, 360°, sectoriel, etc.))	degrés	360	360	Continu 360 Sectoriel	360	360
Vitesse de balayage vertical (degrés/s)	degrés/s	Sans objet	Sans objet	15	15	15
Type de balayage vertical (continu, aléatoire, 360°, sectoriel, etc.)	degrés	Sans objet	Sans objet	Par pas, 0,5-60	Par pas, -2 à +60	-1 à +60
Niveau des lobes latéraux (premiers lobes et lobes distants)	dB	-26	-35	-27	-25	-25
Hauteur de l'antenne	m	30	10	30	30	30
Largeur de bande FI à 3 dB du récepteur	MHz	0,5	20	0,91	0,6	0,25 à 0,5
Facteur de bruit du récepteur	dB	7	4	2,3	3	3

TABLEAU 8 (suite)

Caractéristiques	Unités	Radar 6	Radar 7	Radar 8	Radar 9	Radar 10
Signal discernable minimal	dBm	-110	-97	-109	-109 à -112	-114
Plage d'accord	MHz	5 600-5 650	5 600-5 650	5 250-5 725	5 600-5 650	5 600-5 650
Modulation		Classique	Avec capacité Doppler	Avec capacité Doppler	Avec capacité Doppler	Avec capacité Doppler (y compris l'étalonnage du bruit sans émission)
Puissance d'émission à l'antenne	kW crête W moy.	250 150	250 150	2,25	250	250
Largeur d'impulsion	µs	0,8-5	0,8-5	0,1	0,8-2, 5 et 10	0,5 à 3,3
Temps de montée/descente d'impulsion	µs	0,2-2	0,2-2	0,005		
Fréquence de répétition des impulsions (PRF)	pps	250-1 200	50-1 200	100 000	50-1 200 PRF fixe ou PRF décalées	250-1 200 PRF fixe, PRF entrelacées ou PRF décalées
Dispositif de sortie		Magnétron coaxial ou Klystron	Magnétron coaxial	Magnétron coaxial	Magnétron coaxial	Magnétron coaxial
Type de diagramme d'antenne (à faisceau-crayon, à faisceau en éventail, à faisceau en cosécante carrée, etc.)		Crayon	Crayon	Crayon	Crayon	Crayon
Type d'antenne (réflecteur, à balayage électronique, à fentes, etc.)		Parabolique massive	Parabolique massive	Parabolique massive	Parabolique massive	Parabolique massive
Polarisation d'antenne		Horizontale et/ou verticale	Horizontale ou verticale	Horizontale ou verticale	Horizontale	Horizontale et verticale
Gain du faisceau principal	dBi	40-50	40-50	35-45	44-48	45
Ouverture du faisceau en élévation (degrés)	degrés	0,5-2	0,5-2	2,4-12	0,65-1	0,9
Ouverture du faisceau en azimut (degrés)	degrés	0,5-2	0,5-2	1,5-12	0,65-1	0,9
Vitesse de balayage horizontal (degrés/s)	tr/min	6-18 (1-3)	6-18 (1-3)	1,2	3-36 (0,5-6)	6-36 (1-6)
Type de balayage horizontal (continu, aléatoire, 360°, sectoriel, etc.) (degrés)	degrés	360	360	360	360	360
Vitesse de balayage vertical (degrés/s)	degrés	1-10	1-14	Sans objet		
Type de balayage vertical (continu, aléatoire, 360°, sectoriel, etc.)	degrés	-1 à +90	-5 à +90	Sans objet	-2 à +90	-2 à +90
Niveau des lobes latéraux (premiers lobes et lobes distants)	dB	-25 à -35	-25 à -35	-20	-25 à -45	-25 à -45

TABLEAU 8 (suite)

Caractéristiques	Unités	Radar 6	Radar 7	Radar 8	Radar 9	Radar 10
Hauteur de l'antenne	m	6-30	6-30	10	6-30	7-30
Largeur de bande FI à 3 dB du récepteur	MHz	0,7 à 4	0,1 à 3,0	10	0,1 à 1,25	0,3 à 2
Facteur de bruit du récepteur	dB	3,5-8	1,5-8	3	3	3
Signal discernable minimal	dBm	-113 à -120	-113 à -120	-113 à -118	-30 à -54 (à 1 km)	-107 à -115

TABLEAU 8 (suite)

Caractéristiques	Unités	Radar 11	Radar 12	Radar 13
Plage d'accord	MHz	5 250-5 350	5 330-5 370	5 250-5 370
Modulation		Classique	Avec capacité Doppler	Avec capacité Doppler
Puissance d'émission à l'antenne	kW crête	250	250	200
Largeur d'impulsion	µs	2,5-2,8	1 et 2,5	1
Temps de montée/descente d'impulsion	µs	0,1-0,8	0,1-0,9	0,2-0,5
Fréquence de répétition des impulsions (pps)	pps	260	260-1 500	400-2 000
Dispositif de sortie		Magnétron coaxial	Klystron	Klystron
Type de diagramme d'antenne (à faisceau-crayon, à faisceau en éventail, à faisceau en cosécante carrée, etc.)		Crayon	Crayon	Crayon
Type d'antenne (réflecteur, à balayage électronique, à fentes, etc.)		Parabolique	Parabolique	Parabolique
Polarisation d'antenne		Horizontale	Horizontale	Horizontale
Gain du faisceau principal	dBi	41-45	42-45	48-50
Ouverture du faisceau en élévation	degrés	1-1,5	1-1,2	0,58-0,65
Ouverture du faisceau en azimut	degrés	1-1,5	1-1,2	0,6-0,65
Vitesse de balayage horizontal	degrés/s	24	6-36	12/24
Type de balayage horizontal (continu, aléatoire, 360°, sectoriel, etc.)	degrés	360	360	360
Vitesse de balayage vertical de l'antenne	degrés/s	-2 à +45 en 15 s	-2 à +45 en 15 s	-2 à +90 en 10 s
Type de balayage vertical (continu, aléatoire, 360°, sectoriel, etc.)	degrés	-2 à +45	-2 à +45	-2 à +90

TABLEAU 8 (suite)

Caractéristiques	Unités	Radar 11	Radar 12	Radar 13
Niveau des lobes latéraux (premiers lobes et lobes distants)	dB	-25 à -33	-26 à -35	-28 à -34
Hauteur de l'antenne	m	18 à 53	10 à 60	33 à 44
Largeur de bande FI à 3 dB du récepteur	MHz	1,2 à 1,6	0,4 à 1,4	1,0 à 1,4
Facteur de bruit du récepteur (dB)	dB	1,2-5	1,9- 3	1-2
Signal discernable minimal (dBm)	dBm	-108 à -114	-110 à -114	-110 à -112

TABLEAU 8 (fin)

Caractéristiques	Unités	Radar 14
Plage de syntonisation	MHz	5 430-5 470
Modulation		Avec capacité Doppler
Puissance d'émission à l'antenne	kW crête	250
Largeur d'impulsion	µs	0,5
Temps de montée/descente d'impulsion	µs	0,25-0,30
Fréquence de répétition des impulsions	pps	600-1 500
Dispositif de sortie		Magnétron coaxial
Type de diagramme d'antenne (à faisceau-crayon, à faisceau en éventail, à faisceau en cosécante carrée, etc.)		Crayon
Type d'antenne (réflecteur, à balayage électronique, à fentes, etc.)		Parabolique massive
Polarisation d'antenne		Horizontale et verticale
Gain du faisceau principal	dBi	45
Ouverture du faisceau en élévation	degrés	1
Ouverture du faisceau en azimut	degrés	1
Vitesse de balayage horizontal de l'antenne	degrés/s	18-48
Type de balayage horizontal (continu, aléatoire, 360°, sectoriel, etc.)	degrés	360
Vitesse de balayage vertical de l'antenne	degrés/s	20 pas en 5 min
Type de balayage vertical (continu, aléatoire, 360°, sectoriel, etc.)	degrés	-0,2 à +40
Niveau des lobes latéraux de l'antenne (premiers lobes latéraux et lobes latéraux extrêmes)	dB	-28
Hauteur de l'antenne	m	5-45
Largeur de bande FI à 3 dB du récepteur	MHz	2,0
Facteur de bruit du récepteur	dB	1,8
Signal discernable minimal	dBm	-110

3 Radars météorologiques dans la bande 9 300-9 500 MHz

Il convient de noter que les radars météorologiques au sol peuvent théoriquement être exploités dans la totalité de la bande 8 500-10 500 MHz, mais leur exploitation est généralement limitée à la bande 9 300-9 500 MHz. Leurs caractéristiques techniques figurent dans le Tableau 9.

TABLEAU 9

Caractéristiques	Unités	Radar 1	Radar 2	Radar 3
Plage de syntonisation	MHz	9 300-9 375	9 200-9 500	9 375
Modulation		Impulsion	Impulsion	Modulation
Puissance d'émission à l'antenne	kW crête	50	250	35 (par polarisation)
Largeur d'impulsion	µs	0,1, 0,25 et 1,0	0,5, 1,0, 0,8 et 2,0	1 et 2
Fréquence de répétition des impulsions	pps	1 000 à 2 000	1 500 à 250	500
Rapport cyclique maximal	%	0,002	Non spécifié	Non spécifié
Temps de montée/descente d'impulsion	µs	0,05	Non spécifié	Non spécifié
Système de sortie		Klystron ou magnétron	Magnétron	Magnétron
Type de diagramme de rayonnement de l'antenne		Faisceau-crayon	Faisceau-crayon	Faisceau-crayon
Type d'antenne		Réflecteur parabolique avec alimentation Cassegrain	Réflecteur parabolique	Réflecteur parabolique
Polarisation d'antenne		Rectiligne (double polarisation)	Rectiligne	Rectiligne (double polarisation)
Gain d'antenne, faisceau principal	dBi	46	45	40
Ouverture du faisceau d'antenne en élévation	degrés	0,9	< 1,0	1,5
Ouverture du faisceau d'antenne en azimut	degrés	0,9	< 1,0	1,5
Vitesse de balayage horizontal de l'antenne	degrés/s	0 à 20	0 à 36	6
Type de balayage horizontal de l'antenne (continu, aléatoire, sectoriel, etc.)	degrés	Volumique, volumique sectoriel, stationnaire et poursuite	Volumique	Volumique
Balayage vertical de l'antenne	degrés/s	0° à 20°	Non spécifié	0° à 90°
Type de balayage vertical de l'antenne	degrés	Passage au degré d'élévation suivant après rotation horizontale ou modification d'élévation à azimut constant	Passage au degré d'élévation suivant après rotation horizontale	Non spécifié
Niveau des lobes latéraux de l'antenne (premiers lobes latéraux et lobes latéraux extrêmes)	dBi	26	16	10 (premiers lobes latéraux) 0 (lobes latéraux extrêmes)
Hauteur d'antenne	m	4 m	2 à 30 m	5 à 15 m

TABLEAU 9 (*fin*)

Caractéristiques	Unités	Radar 1	Radar 2	Radar 3
Largeur de bande du récepteur, FI à 3 dB (MHz)	MHz	10, 4 ou 1	Non spécifiée	Non spécifiée
Plancher de bruit du récepteur	dB	-110	-114	-113
Affaiblissement de réception	dBm	Non spécifié	Non spécifié	Non spécifié
Largeur de bande de modulation		Sans objet	Sans objet	Sans objet
Largeur de bande d'émission radiofréquence 3 dB -20 dB	MHz	Non spécifiée 6 à 60 – selon la largeur d'impulsion	Non spécifiée Non spécifiée	1 6
