

LE RADAR AU SERVICE DE LA SCIENCE

A. PERLAT

Ingénieur en Chef de la Météorologie

Instrument permettant d'appliquer à la réalité un nouveau mode de connaissance, le radar a évidemment trouvé des applications dans diverses branches de la technique et de la recherche scientifiques.

La Météorologie.

Les applications du radar à la météorologie ont déjà été évoquées dans le n° 15 de Diagrammes.

La présence dans l'atmosphère de gouttes de pluie, de grêlons, de flocons de neige, etc., provoquant une diffusion suffisante des ondes centimétriques, a pour conséquence, d'une part une atténuation de l'énergie au cours de sa propagation dans les zones de précipitations, et d'autre part, l'apparition d'échos sur les indicateurs des radars qui utilisent ces longueurs d'ondes.

Pour obtenir un écho il est nécessaire que le radar recueille une fraction suffisante de l'énergie. On montre que, pour un objectif plus large que le faisceau, ce qui est le cas général pour les précipitations rapprochées, le rapport de l'énergie reçue à l'énergie émise est, pour un radar donné, inversement proportionnel au carré de la distance et à la quatrième puissance de la longueur d'onde, et, si les gouttes sont petites devant la longueur d'onde, proportionnel au produit du nombre de gouttes compris dans un centimètre cube par la sixième puissance de leur diamètre dans le volume irradié par une impulsion.

A première vue il y aurait intérêt à choisir un radar à ondes très courtes, puisque plus la longueur d'onde est faible, plus le rapport est grand. Mais intervient l'atténuation de l'énergie par les gouttes d'eau, dont nous avons déjà dit qu'elle était d'autant plus forte qu'était plus courte la longueur d'onde, rendant même pratiquement impossible l'emploi d'un radar travaillant sur un centimètre si l'on veut obtenir plus de quelques kilomètres de portée. Aussi est-ce dans la gamme comprise entre 3 et 10cm que sont réglés les radars d'observations météorologiques.

Les nuages et les précipitations sont constitués par des amas de gouttes d'eau dont le diamètre est très variable, même au sein du même nuage ou de la même précipitation. On retient généralement comme valeur caractéristique du diamètre celle pour

laquelle existe un nombre égal d'observations inférieures et supérieures à cette valeur. Dans les différents types de nuages cette valeur est comprise entre 10 et 15 microns, et, dans les pluies et les averses, elle varie entre 1 et 2 millimètres, les gouttes étant d'autant plus fortes que l'intensité de la pluie est plus grande. Le produit du nombre de gouttes contenu dans un centimètre cube par la puissance sixième de leur diamètre est pour les différents types de nuages 100 000 fois plus faible que pour une faible pluie et un million de fois plus faible que dans une averse. Ces chiffres expliquent qu'une pluie modérée à 150 kilomètres donne un écho plus fort qu'un nuage à 100 mètres. L'écho est seize fois plus fort sur les gouttes de pluie que sur la neige, qui est donc détectée moins loin que la pluie.

Le nombre total de particules diffusantes (gouttes d'eau, cristaux de glace) contenues dans le volume irradié par une impulsion détermine donc la puissance reçue de l'écho par un radar donné. Ce volume peut être défini comme un segment sphérique ou elliptique (suivant la forme du faisceau) et d'épaisseur égale à la moitié du trajet de l'énergie pendant la durée de l'impulsion. On a donc intérêt à allonger la durée de l'impulsion, mais on est limité par l'imprécision qui en résulte sur les contours de la zone pluvieuse.

Pratiquement une durée de 2 à 5 microsecondes est fréquemment adoptée par l'exploration des échos dus aux précipitations.

Les radars opérant sur 3cm peuvent détecter des gouttelettes plus fines que ceux qui travaillent sur 10cm, mais par suite de l'atténuation plus grande, ils ont une portée de détection plus faible. En gros, l'on peut dire que la détection des précipitations très fortes est favorisée par l'emploi d'une longueur d'onde de 10cm, tandis que pour des pluies fines, une longueur d'onde de 3cm est préférable.

Cependant, en utilisant des radars opérant sur une longueur d'onde de l'ordre du centimètre et possédant une puissance de crête élevée, on peut détecter les nuages dans un rayon de l'ordre de 10 kilomètres, mais seulement en l'absence de précipitations de forte intensité dont l'effet d'atténuation est très élevé. La longueur d'onde de 0,8 millimètres est la plus avantageuse, car c'est avec elle que l'absorption par la vapeur d'eau présente un léger minimum relatif. En dirigeant le faisceau du radar vers le zénith on peut ainsi connaître la répartition verticale des différentes couches nuageuses dans toute la troposphère.

On voit donc que seuls seront détectés à quelque distance par un radar les précipitations et les nuages orageux très développés verticalement, sièges de courants ascendants assez forts pour maintenir en leur sein, en compensant leur vitesse de chute, des grosses gouttes de la taille de celles des averses.

Un radar à écran panoramique donne ainsi une image de la répartition des précipitations et des nuages orageux. La distance maximum de détection dépend de l'intensité des précipitations et de leur nature (eau, neige ou grêle), mais dans tous les cas elle se trouve limitée par la courbure de la terre.

Pour les latitudes tempérées, les nuages orageux détectables par les amas de grosses gouttes entraînées par des courants ascendants vers leur partie supérieure dépassent rarement 10 kilomètres, tandis que le niveau supérieur des précipitations reste très inférieur à ce chiffre. L'extension verticale des échos est un peu plus grande sous les tropiques, mais dans tous les cas elle varie avec la saison et la situation météorologique.

Il en résulte que les distances maxima de détection varient également et que les nuages d'instabilité sont détectés plus loin que les précipitations.

Fréquemment le faisceau du radar doit être incliné d'un degré au-dessus de l'horizon et aux distances de 200 et 300 kilomètres, passe alors respectivement à 6 et 11 kilomètres au-dessus de la terre. On voit que dans ces conditions la portée maxima du radar est limitée, quelle que soit sa puissance, à 300 kilomètres; pratiquement elle n'est efficace que pour des précipitations situées à une distance nettement inférieure. Il ne semble donc pas nécessaire d'employer, pour l'observation météorologique, des radars de très grande puissance.

Plusieurs services météorologiques utilisent des radars donnant sur 3 centimètres de longueur d'onde une puissance de crête de 20 kW seulement; l'énergie est concentrée par l'aérien dans un faisceau de section conique dont l'ouverture est seulement de $3/4$ de degré à l'horizontale contre 4° à la verticale. L'axe du faisceau peut être incliné depuis l'horizontale jusqu'à un angle de 15° . Les impulsions d'une durée de 2 microsecondes sont émises à la fréquence de 250 à la seconde. L'écran de l'indicateur panoramique a un diamètre de 30cm. Des portées dépassant 300 kilomètres sont atteintes sur les sommets de nuages orageux très développés en hauteur.

Aspects des échos.

Si une zone pluvieuse étendue couvre le radar, on voit au centre de l'indicateur panoramique une sorte de voile sensiblement circulaire qui représente l'écho. En effet, l'énergie se propage uniquement dans une zone pluvieuse; dans toutes les régions du plan il y a diffusion et apparition d'écho, mais au delà d'une certaine distance l'affaiblissement du faisceau est tel que l'écho n'apparaît plus. Il n'est donc pas possible de définir avec de telles situations les limites exactes de la zone.

pluvieuse. Si au contraire la zone pluvieuse ne couvre pas le radar, il devient possible d'en observer le déplacement, mais on ne peut être sûr de sa profondeur.

Les échos peuvent être répartis au hasard sur l'écran indiquant alors les averses ou les nuages situés au sein d'une zone d'instabilité, ou au contraire groupés suivant des lignes simples, qui correspondent à des "lignes de grains" dont le mouvement est repérable par la comparaison des positions des échos à 15 ou 30 minutes d'intervalle.

Les violents cyclones tropicaux accompagnés de fortes averses et de nuages orageux sont détectables par le radar qui fournit parfois une représentation très spectaculaire de la structure de ces phénomènes.

Dans les régions tropicales ces violentes manifestations provoquent sur leur passage des destructions et même des pertes de vies humaines par les inondations et les vents violents qui les accompagnent.

Aussi, dans certaines régions du globe, comme dans la mer des Antilles, on a organisé l'observation radar des cyclones auxquels les Américains donnent des noms charmants (Hazel, Gerda, Ellen, etc.) malgré les ravages qu'ils occasionnent chaque année sur les Antilles et la côte Est des Etats-Unis.

Des radars puissants sont nécessaires pour préciser au mieux les zones de précipitations, car l'atténuation du faisceau radar est très forte étant donné l'intensité des précipitations.

La bande brillante.

Le sommet d'une source d'échos indique seulement qu'il n'existe au-dessus aucun amas de gouttes d'eau de dimensions assez grandes pour produire un écho, mais le nuage peut s'étendre plus haut. L'extension verticale d'une source d'échos donne néanmoins une indication sur l'intensité d'un phénomène et l'altitude minima de ses parties visibles, c'est-à-dire du nuage.

Pour faire la mesure, on élève le faisceau dans la source d'échos jusqu'à cessation de l'écho. L'indicateur RHI est le plus commode pour effectuer cette mesure au cours de laquelle on constate, mais seulement en présence de précipitations liées à des nuages donnant des pluies étendues, un renforcement de l'intensité des échos à une altitude voisine de celle à laquelle règne une température de zéro degré.

Ce phénomène, qui a reçu le nom de bande brillante, a fait l'objet de nombreuses études; il provient de ce que le pouvoir

ou les nuages d'instabilité liés à des fronts, à des lignes de grains, aux orages et aux tornades ou cyclones dont il devient alors possible de préciser la position et la vitesse, en même temps que d'en surveiller l'évolution.

En conjuguant les renseignements fournis par un radar avec les techniques classiques de la météorologie, on facilite l'élaboration des prévisions à échéance courte (quelques heures), mais précise, de l'arrivée du "mauvais temps". Ces prévisions permettent de prendre certaines dispositions avant le début de cérémonies officielles ou des réunions sportives; à l'obscurcissement des grandes villes au moment du passage des masses nuageuses importantes, correspond une demande accrue de courant électrique et les mesures à prendre pour y satisfaire peuvent être prises en temps utile; les autorités responsables des villes menacées par les cyclones tropicaux sont alertées et les mesures de sécurité appliquées avant qu'il ne soit trop tard. Dans le domaine de l'aéronautique on peut déterminer le moment où l'atterrissage sur un aéroport deviendra impossible ou difficile et dérouter éventuellement un avion, guider les avions en vol dans la périphérie des orages et éviter la traversée des zones à forte turbulence, améliorant ainsi le confort et la sécurité des voyages aériens.

Dans le domaine de la recherche, le radar est un outil précieux pour l'étude de la formation des pluies et averses.

Radio-astronomie.

Le soleil, les planètes, les étoiles et les galaxies émettent non seulement des ondes lumineuses mais aussi des ondes hertziennes, notamment dans la bande des longueurs d'ondes comprises entre 1cm et 30 mètres. L'étude de ces dernières a donné naissance à la radio-astronomie qui constitue un chapitre important de l'astronomie générale.

Pour obtenir une exploration détaillée des zones de ces émissions sur la sphère céleste, il est nécessaire d'utiliser un collecteur d'ondes très directives et un récepteur sensible; aussi a-t-on construit des télescopes en appliquant la technique radar aux aériens et aux récepteurs. Un radiotélescope comporte essentiellement un collecteur d'ondes formé d'un grand miroir parabolique, d'une antenne placée à son foyer et d'un poste récepteur souvent associé à un enregistreur qui donne sur un graphique l'intensité du signal reçu. Les réflecteurs atteignent des dimensions énormes. Le radiotélescope de l'observatoire de Bonn possède un réflecteur de 25 mètres de diamètre orientable. Le record actuel est détenu par le radiotélescope orientable de l'université de Manchester (Jodrell Bank); c'est un immense miroir parabolique de 76 mètres de diamètre pesant 750 tonnes, orientable en inclinaison entre deux piliers de 60 mètres de hauteur, reposant sur des wagons déplaçables sur une voie ferrée circulaire

pour permettre l'orientation en azimut. L'antenne est placée au sommet d'un mât de 19 mètres au centre du réflecteur. Malgré son poids, l'appareil peut être constamment pointé sur une radio-étoile par un cerveau électronique.

Si les installations de radio-astronomie bénéficient de la technique radar dans la détection des ondes radio, elles s'en différencient par le fait qu'elles sont simplement réceptives et n'émettent pas elles-mêmes d'ondes hertziennes.

Cependant, dès la fin de la seconde guerre mondiale, les astronomes ont cherché à utiliser le radar pour détecter la lune, le soleil et des planètes. Mais les dimensions et les distances de ces objectifs différaient totalement de celles des objectifs habituels. Il a donc fallu construire des radars spécialement adaptés à cette nouvelle utilisation.

Les premiers échos sur la lune ont été obtenus par les ingénieurs du Signal Corps américain dès 1946 au moyen d'un radar dont le faisceau d'antenne, orientable en azimut mais non en élévation, ne permettait la réception de signaux qu'au lever et au coucher de l'astre.

Le dernier radar en date, spécialement conçu par le Naval Research Laboratory à Washington pour obtenir des échos sur la lune, utilise un réflecteur parabolique cimenté et métallisé creusé dans le sol; l'axe est dirigé vers un point de l'espace où passe la lune. Les impulsions de 1,2 mégawatts ont une durée de 10 microsecondes.

Les expériences de détection radar sur la lune ont surtout permis de connaître les propriétés diffusantes de la lune aux fréquences radio-électriques, ce qui a permis d'utiliser l'astre comme réflecteur passif, tant pour l'étude de l'ionosphère que pour la réalisation de communications à longue distance.

En effet, l'ionosphère est composée de plusieurs couches; une onde qui perce la couche d'ionisation maximum perce également les couches plus élevées qui, par conséquent, ne renvoient pas d'énergie vers la terre.

En utilisant la lune comme réflecteur, on s'est aperçu que, par suite de la réfraction subie par les ondes à leur passage dans l'ionosphère, les échos lunaires n'étaient perçus que lorsque l'élévation de l'astre dépassait une certaine valeur; ce fait expérimental a conduit à des hypothèses sur la structure de l'ionosphère et à un certain nombre d'expériences pour vérifier ces hypothèses.

Dans le domaine des télécommunications, des portées considérables sont obtenues sur ondes courtes par la réflexion sur les couches ionisées des ondes qui retournent alors vers la terre. La

lune a été utilisée comme réflecteur pour établir une liaison radiotélégraphique à grande distance par ondes de fréquences élevées (supérieures à 50 Mc) qui traversent sans réflexion les couches ionisées. Une liaison expérimentale a été ainsi réalisée sur 400 Mc entre deux points de la surface terrestre distants de 1.250 kilomètres.

Il a été proposé d'utiliser la lune comme réflecteur pour transmettre au loin les émissions de télévision. Mais les propriétés de la surface réfléchissante lunaire (rugueuse) entraînent des déformations des signaux à large bande de fréquence qui rendent actuellement impossible cette application dans le domaine de la télévision.

On pourra probablement bientôt utiliser la télémétrie radar en astronomie. La distance Terre-Vénus, par exemple, n'est guère connue qu'avec une précision du millième. On sait déjà que le matériel radar nécessaire pour obtenir un écho sur Vénus est réalisable et permettrait de mesurer cette distance avec une précision du cent millième. La distance Terre-Soleil, basée sur des mesures astronomiques, pourrait également être évaluée avec précision.

La détection du soleil ou des planètes exige des radars d'une sensibilité beaucoup plus grande encore que celle du matériel utilisé pour obtenir des échos sur la lune. Pour détecter Vénus, qui se trouve être la planète la plus accessible au radar, il faut donc réaliser un radar plus puissant et plus sensible. On utilisera simplement les grands radio-télescopes comme celui de Jodrell Bank. Pour obtenir des échos sur le soleil, on a envisagé de construire un réflecteur de 200 mètres de diamètre...

Dans le cas du soleil, la réflexion des ondes ne se fait plus sur une surface opaque mais sur des couches ionisées au sein desquelles les ondes pénètrent et sont réfléchies suivant un processus qui dépend de la forme des surfaces d'égale densité électronique. La mesure de la profondeur de pénétration des ondes dans la couronne solaire apporterait des renseignements sur la distribution de la densité électronique qui y règne.

La détection des météorites.

L'espace est sillonné par un très grand nombre de corps solides, généralement très petits, animés de vitesses considérables: les météorites.

Au cours de leur marche, les météorites pénètrent dans l'atmosphère terrestre et en raison de leur vitesse ils s'échauffent par frottement, donnant naissance aux phénomènes lumineux bien connus sous le nom d'étoiles filantes ou de bolides.

Certaines nuits et en général aux mêmes dates de chaque année, on observe de véritables pluies d'étoiles filantes. Des millions de météorites pénètrent chaque année dans l'atmosphère, le plus grand nombre pesant à peine une fraction de milligramme. Ces météorites sont volatilisés avant de tomber sur la terre. On estime que le nombre de météorites pesant 5kg ou plus est d'environ six par an pour une étendue comme celle de la France. Si une partie de la masse de tels météorites est volatilisée pendant la traversée de l'atmosphère, des morceaux pesant quelques dizaines de grammes arrivent jusqu'au sol. La masse des météorites peut atteindre une valeur considérable, mais leur arrivée sur la terre devient heureusement de plus en plus rare au fur et à mesure que la masse augmente. On cite les chiffres suivants de probabilité: 1 fois en 30 ans un météorite pesant 50 tonnes et plus, 1 fois tous les 150 ans pour un météorite de 220 tonnes; 1 fois en 100 000 ans un météorite de 50 000 tonnes... On trouve à la surface du globe des traces de la rencontre de la terre avec les gros météorites, comme par exemple dans le désert de l'Arizona où un cratère de 1 200 mètres de diamètre et de 180 mètres de profondeur n'est pas d'origine volcanique, mais est dû à la chute d'un énorme météorite il y a quelques dizaines de milliers d'années.

La détermination de la vitesse, de la direction et de la hauteur des météorites, ainsi que les déductions sur la constitution de la haute atmosphère et sur la cosmogonie que l'on peut déduire de ces renseignements, font depuis longtemps l'objet de nombreuses recherches. Les physiciens observent par des méthodes visuelles et photographiques les traînées lumineuses qui accompagnent la traversée de l'atmosphère par les météorites.

La détection des météorites par radar a apporté aux chercheurs non seulement une méthode de mesure extrêmement précise, mais encore la possibilité d'effectuer leurs observations au cours des nuits où le ciel est masqué par les nuages et pendant le jour.

Les échos obtenus sur des nuages de météorites trop petits pour donner lieu à des traînées visibles ne permettent pas d'identifier isolément un météorite, mais donnent une sorte de voile sur l'indicateur du radar. Lorsque le passage des météorites donne lieu à une traînée lumineuse, observable la nuit, il se forme également une colonne ionisée de plusieurs kilomètres de long. Cette colonne, en diffusant les ondes qui la traversent, provoque l'apparition d'échos irréguliers qui signalent le passage des météorites.

De nombreuses pluies diurnes de météorites ont été ainsi découvertes.

La détection électromagnétique s'applique encore à l'étude des aurores boréales et des éclairs, car dans les deux cas il peut y avoir diffusion de l'onde incidente par une région de l'atmosphère ionisée par l'aurore ou la décharge électrique.

COURS DE PREPARATION MILITAIRE DE L'ARMEE DE L'AIR

Spécialité: METEOROLOGIE

I - Les Cours de préparation militaire de l'Armée de l'Air, spécialité "METEOROLOGIE" (PREMAIR - METEO), sont organisés dans certains grands centres déterminés par l'Armée de l'Air (se renseigner auprès des Etats-Majors de Région Aérienne - 2° Bureau)

- 1° Région Aérienne - Caserne Krien à Dijon (C. d'Or)
- 2° " " - 35 Rue St-Didier Paris (16°)
- 3° " " - Bordeaux (Gironde)
- 4° " " - Aix-en-Provence (B. du R.)
- 5° " " - Alger (Algérie)

Il est rappelé que, pour être admis à ces cours de PREPARATION MILITAIRE "AIR", les jeunes gens doivent être:

- a) volontaires,
- b) de nationalité française,
- c) âgés de plus de 17 ans au 1er Janvier de l'année de l'examen,
- d) âgés de moins de 20 ans au 1er Juillet de l'année de l'examen.

II - Les cours débutent généralement en Novembre et l'examen a lieu au mois de Mai de l'année suivante.

III - La PREPARATION MILITAIRE de l'ARMEE de l'AIR a rang de préparation militaire ELEMENTAIRE.

Paris, le 21 Mai 1959