

# Les Radars Stratosphériques et Troposphériques

Gérard Sookahet  
Mai 1997

---

*Bonjour Noble Lecteur*

## 1 Introduction.

Les radars Stratosphériques et Troposphériques(ST) sont des radars pulsés à effet Doppler qui permettent, à partir du sol, d'étudier la dynamique (vents et turbulence) de la Troposphère et de la basse Stratosphère par analyse du signal rétrodiffusé. Ces types de radars très performants sont en plein développement à l'heure actuelle. En effet, ils sont utilisés dans de nombreux champs d'application en recherche atmosphérique, notamment pour les prévisions météorologiques. Par exemple en France, ces types de radars ont été installés dans la région bretonne à Brest, Lorient et Lannion.

## 2 Technique de mesure.

Les radars ST utilisent comme principal traceur atmosphérique les inhomogénéités de l'indice de réfraction de l'air créées par les turbulences et transportées par ce que l'on pourrait appeler le vent moyen. Il est donc question de détection électromagnétique des variations spatiales de l'indice de réfraction de l'air. Celle-ci est bien évidemment associée aux fluctuations thermiques, hygrométriques et barométriques.

Le signal rétrodiffusé est issu de divers processus:

- Le phénomène de diffusion lié aux inhomogénéités de l'indice de réfraction de l'air résultant de la turbulence.

Ce phénomène a lieu uniquement si des fluctuations turbulentes sont présentes dans le volume d'air observé. En tenant compte de la loi de diffusion de Bragg, la demi longueur d'onde du radar se situe dans le domaine inertiel du spectre de la turbulence. Sous ces conditions et en faisant l'hypothèse d'une turbulence homogène et isotrope(hypothèse raisonnable!), la réflexivité  $\xi(\lambda)$  est, pour une longueur d'onde  $\lambda$ , proportionnelle à la constante de structure de l'indice de réfraction de l'air  $C_{air}^2$ . Nous avons donc:

$$\xi(\lambda) = 0.38 C_{air}^2 \lambda^{-1/3}$$

La puissance du signal rétrodiffusé par ces inhomogénéités s'écrit:

$$P(r) = P_e \left(\frac{S}{r}\right) \xi(\lambda)$$

, avec  $P_e$  pour la puissance émise par le radar,  $S$  la caractéristique du radar et  $r$  la distance entre le radar et le volume d'air observé.

- Le phénomène de réflexion partielle sur des structures horizontales créées par des gradients importants de l'indice de réfraction de l'air. C'est un phénomène qui est significatif seulement pour les grandes longueurs d'onde. Cette contribution intervient essentiellement en Très Hautes Fréquences(VHF) pour des visées voisines de la verticale. Cela permet, en outre, de calculer l'altitude de la tropopause.

- Le phénomène de diffusion par les hydrométéores(pluies, neige, grêle, ....) est faible en VHF alors qu'elle est importante en UHF quand il pleut.

En fin de compte, par l'analyse du signal rétrodiffusé, on détermine le décalage Doppler par rapport à la fréquence d'émission. Ensuite, cela nous permet d'en déduire le vent radial dans la direction d'observation en fonction de l'altitude échantillonnée.

### 3 Principe de la mesure du vent par effet Doppler.

Soit une onde électromagnétique émise par le radar de la forme  $\cos(2\pi f_o t)$ . Le signal diffusé par une cible ponctuelle située dans le domaine du faisceau, à la distance  $r$  du radar sera:

$$s(t) = a \cos(2\pi f_o t + \phi(t))$$

, avec une phase  $\phi(t) = -\frac{4\pi r}{\lambda}$ .

Pour une cible diffusante qui se déplace par rapport au radar avec une vitesse radiale  $v_r$ , la fréquence angulaire  $2\pi f_o t + \frac{d\phi(t)}{dt}$  du signal est décalée de  $f_d$ (fréquence Doppler) tel que:

$$\frac{d\phi(t)}{dt} = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{dr}{dt} = -\frac{4\pi}{\lambda} v_r = 2\pi f_d$$

D'où:

$$f_d = -2\frac{v_r}{\lambda} = -2\left(\frac{v_r}{c}\right)f_o$$

, avec  $c$  la vitesse de la lumière et  $v_r = -(c/2)(f_d/f_o)$ .

Pour une cible s'éloignant du radar ( $v_r > 0$ )  $f_d$  est positif et négatif au cas contraire.

Nous pouvons donc mesurer la composante radiale de la vitesse du vent en fonction de l'altitude grâce au décalage Doppler subit par le signal rétrodiffusé. La projection de la vitesse sur la direction d'observation est donnée par:

$$v_r = \frac{c}{2} \left(\frac{\Delta f}{f_o}\right) = \frac{10}{3} \Delta f$$

, avec  $\Delta f = f_o - f$ .

Notons au passage que les fréquences d'émission des radars ST vont de 40 MHz à 3 GHz. Ainsi les

fréquences Doppler des cibles atmosphériques sont très faibles devant la fréquence d'émission. Par exemple pour une vitesse radiale de  $10 \text{ ms}^{-1}$ , nous avons  $f_d=200 \text{ Hz}$  pour la fréquence  $961 \text{ MHz}$ . Pour une direction d'observation oblique donnée, la vitesse radiale s'exprime en fonction de la composante du vent horizontal  $v_h$  et du vent vertical  $v_v$  de cette manière:

$$v_r = v_h \sin \theta + v_v \cos \theta$$

, avec  $\theta$  l'angle que fait la direction de la vitesse radiale avec la direction d'observation.

De cette équation, on en déduit la composante horizontale du vent dans le plan défini par les directions verticales et obliques d'observations.

Ainsi grâce à la connaissance des trois composantes orthogonales du vent, on évalue le vecteur vent avec l'hypothèse d'un champ de vent homogène et stationnaire durant la mesure.

## 4 La mesure dans la pratique.

Dans la pratique, on obtient les trois composantes du vecteur vent en recombinaison des mesures effectuées dans trois directions de visée données. On oriente une antenne selon la direction verticale et deux autres selon un angle de  $15^\circ$  avec la verticale et dans deux plans orthogonaux.

Le vecteur vent nous est alors donné pour chaque altitude en recombinaison des vitesses radiales mesurées dans ces trois directions.

## 5 Restitution d'un spectre de puissance pour une altitude donnée.

A chaque essai, le radar ST émet dans l'atmosphère une impulsion codée ou non, d'une durée  $\tau$ . Après un temps  $t_o$  qui est lié à la distance minimale observable, on échantillonne le signal rétrodiffusé. Cela revient à un échantillonnage en altitude. Si le temps entre deux échantillons est inférieur à  $\tau$ , alors deux échantillons consécutifs correspondent alors à des volumes d'air qui se chevauchent. Il s'agit donc d'un suréchantillonnage en altitude.

Pour chaque altitude, on cherche à obtenir une série de spectres en effectuant une succession de tirs espacés par la période de répétition  $P_{rp}$ . Cette période est déterminée une fois pour toute par l'altitude maximale à partir de laquelle on est sûr de ne plus recevoir le signal rétrodiffusé. Cela permet d'éviter le chevauchement des signaux rétrodiffusés provenant de deux impulsions successives.

Grâce à la démodulation, on récupère deux signaux en phase et en quadrature. De ces deux séries temporelles, la première correspond à la voie réelle et la seconde à la voie imaginaire.

## 6 Aspects techniques du radar ST.

Chaque radar possède trois antennes directives commutées successivement de manière à restituer le vecteur vent dans un espace à trois dimensions. Un ordinateur relié à des processeurs DSP gère indépendamment et simultanément les radars UHF et VHF, afin d'acquérir des profils de spectres qui seront ensuite enregistrés.

Les antennes d'émission et de réception du radar UHF sont des paraboles d'un diamètre de 5 mètres

tandis que l'antenne du radar VHF est constitué d'un réseau de dipôles coaxiaux colinéaires s'étendant sur une surface de  $0.5 \text{ km}^2$ . Lors de l'émission, on utilise un amplificateur de puissance de l'ordre de 5 kW.

Pour le radar UHF, un seul type d'impulsion est utilisé. Sa durée est de  $1 \mu\text{s}$ . D'un tir à l'autre, on change la phase de  $180^\circ$ .

Quant au radar VHF, deux types d'impulsions sont utilisés. Il y a des impulsions non codées d'une durée de  $15 \mu\text{s}$  et des impulsions plus longues codées de 10 éléments de largeur  $2.5 \mu\text{s}$  auxquelles sont attribuées une phase allant de  $0^\circ$  à  $180^\circ$  suivant une règle qui dépend du code adopté par le radar.

## 7 Le traitement du signal rétrodiffusé.

Dès la réception du signal analogique, sont effectués un ensemble de traitements en temps réel grâce aux DSP de chaque radar: séquençage, conversion analogique-numérique, addition cohérente, décodage, transformées de Fourier rapides(FFT).

Le signal des radars UHF et VHF codé est échantillonné respectivement sur une période de  $1 \mu\text{s}$  et  $2.5 \mu\text{s}$ . Cela correspond à la largeur de l'impulsion d'émission. En mode non codé( $15 \mu\text{s}$ ) on suréchantillonne le signal( $2.5 \mu\text{s}$ ) afin de disposer de données tous les 375 m. Dans ce cas, les échantillons ne sont pas indépendants.

### 7.1 Comment déterminer le spectre de puissance.

A l'émission, le signal émis  $\cos(2\pi f_o t)$  est modulé en impulsion par  $P(t)$ . Le signal s'écrit sous la forme:

$$e(t) = P(t) \cos(2\pi f_o t)$$

On prend  $P(t)$  d'une largeur en temps de  $P_{rp}$  (période de répétition des impulsions).

A la réception, le signal rétrodiffusé est amplifié et passe au travers d'un filtre passe-bande pour y diminuer la contribution due au bruit. Le rapport signal/bruit se voit ainsi augmenté afin de pouvoir détecter les échos de faible puissance noyé dans le bruit. C'est souvent le cas à hautes altitudes.

Par la suite, on effectue une démodulation de phase qui consiste à mélanger le signal rétrodiffusé avec un signal à la fréquence  $f_o$  en phase(voie réelle) et en quadrature(voie imaginaire). Cela permet d'obtenir le signe du décalage Doppler du signal rétrodiffusé. Les voies réelles et imaginaires sont:

$$\begin{aligned} R(t) &= P(t) \cos(2\pi(f_o + f_d)t) \cos(2\pi(f_o + F_o)) \\ I(t) &= P(t) \sin(2\pi(f_o + f_d)t) \cos(2\pi f_o t + F_o + \pi/2) \end{aligned}$$

Ensuite, on réalise un filtrage avec un filtre passe-bas de Bessel pour ne garder que le terme comportant la fréquence Doppler. D'où:

$$\begin{aligned} R(t) &= \Pi(t)/2 * \cos(2\pi f_d t + \Phi_o) \\ I(t) &= \Pi(t)/2 * \sin(2\pi f_d t + \Phi_o) \end{aligned}$$

## 7.2 Comment déterminer les séries temporelles liées au signal.

Le signal rétrodiffusé est échantillonné pour obtenir des séries temporelles discrètes constituées de 256 points. La fréquence d'échantillonnage de chaque série est alors de  $f_e = 1/T = 6400$  Hz. On peut alors déterminer la gamme de vitesses radiales explorées par le radar. En tenant compte du critère de Nyquist, les fréquences varient de  $-f_e/2$  à  $f_e/2$  dans le domaine spectral. Cela a pour effet de créer un décalage Doppler qui peut aller jusqu'à  $v_{rmax} = \pm \frac{10}{3} f_e/2$ . Ce qui nous fait  $\pm 10666 \text{ ms}^{-1}$ . Cependant, on remarque que dans la troposphère et la basse atmosphère les vitesses sont inférieures à  $120 \text{ ms}^{-1}$ . Il est donc intéressant de réduire la bande spectrale à explorer afin d'avoir une meilleure visualisation des paramètres physiques.

## 7.3 Addition cohérente des séries temporelles.

Pour une meilleure visualisation des paramètres physiques on fait subir aux séries temporelles  $N_{coh}$  additions cohérentes. Cela revient à sommer les  $N_{coh}$  échantillons successifs et à en prendre la moyenne. Cela nous donne alors le premier échantillon d'une nouvelle série temporelle. Ensuite, le deuxième échantillon est obtenu avec les  $N_{coh}$  échantillons qui suivent. L'opération est répétée jusqu'à l'obtention d'un nombre suffisant d'échantillons pour le calcul de la FFT.

En fait, cela revient à faire une moyenne glissante sur  $N_{coh}$  points:

Cette opération rallonge la période d'échantillonnage qui devient égale à  $N_{coh}T$ . La bande spectrale explorée est donc réduite d'un facteur  $N_{coh}$  et les fréquences maximales avec 256 points de FFT sont:

$$\begin{aligned} -f_{max} &= -\frac{1}{2N_{coh}T} = -\frac{1}{2}f_e \\ f_{max} &= \frac{1}{2N_{coh}T} = \frac{1}{2}f_e \end{aligned}$$

Suivant le mode utilisé  $N_{coh}$  varie de 64 à 1024. Avec  $N_{coh} = 256$  et  $T = 156.25$  ms, nous avons:

$$\begin{aligned} -f_{max} &= -12.5 \text{ Hz} \\ f_{max} &= 12.5 \text{ Hz} \end{aligned}$$

Quel est l'intérêt d'une telle opération ? On en tire les avantages suivants:

- Une adaptation de la bande spectrale à la bande de fréquence des phénomènes observés.
- Un gain de temps compatible avec un traitement en temps réel puisqu'il y a moins de points pour le calcul du spectre (e.g. pour  $N_{coh} = 64$ , 256 points au lieu de 16384).
- Une amélioration du rapport signal/bruit d'un facteur  $N_{coh}$  car le signal est cohérent durant un temps de  $N_{coh}P_{rp}$  ce qui n'est pas le cas du bruit.
- Une résolution spectrale ( $1/T$ ) inchangée car la durée totale de la série reste la même.

## 7.4 Addition incohérente et calcul du spectre.

En utilisant des FFT sur les séries temporelles réelles et imaginaires, on calcule la densité spectrale de puissance grâce à des processeurs DSP( TMS320Cxx). Pour chaque altitude, on somme plusieurs spectres consécutifs(  $N_{coh}$  additiosn incohérentes). Cette opération à tendance à accroître le rapport signal/bruit d'un facteur  $\sqrt{N_{coh}}$ . Le temps de calcul du spectre est:

$$T = -P_{rp}N_{coh}N_{FFT}N_{incoh}$$

, avec  $N_{FFT}$  le nombre de points du spectre(i.e. 256).

## 7.5 Symétrisation du spectre.

Notre spectre est donc constitué de 256 points FFT. Néanmoins, il reste une dernière opération à effectuer afin de faciliter l'interprétation du spectre. Dans ce but, on effectue une symétrisation du spectre par rapport à la fréquence centrale située au point de FFT 129. Nous avons donc le repère suivant: le point 129 du nouveau spectre sera associé à la fréquence 0 Hz. Les points situés à gauche du point central seront multipliés par -1 tandis que ceux qui sont à droite auront un signe positif.

# 8 Les différentes composantes spectrales.

Il y a deux types de composantes:

Les composantes utiles.

- Les échos atmosphériques: air, pluie, neige, ....

Les composantes inutiles ou polluantes.

- Le Bruit.
- Les échos de sol.
- La composante symétrique due à un déséquilibre des voies réelles et imaginaires.
- Les harmoniques résultant de la saturation de récepteur.
- Les interférences radioélectriques.
- Les parasites divers.

Pour une étude convenable de ces spectres, il est nécessaire d'éliminer le mieux possible les composantes inutiles.

Voilà, c'est tout pour cette fois.

---

*Gérard Sookahet 1997*

e-mail: [gerard.sookahet@voila.fr](mailto:gerard.sookahet@voila.fr)