

# Modélisation de la Surface Equivalente Radar instantanée de nuages de particules en suspension dans l'atmosphère. Traitement de Signal et Analyse de signature.

Laurent BOUILLOT - Gérard CHASSAY.

Laboratoire Composants et Systèmes pour Télécommunications  
URA CNRS 834, Institut National des Sciences Appliquées  
20, avenue des Buttes de Cœsmes 35043 RENNES CEDEX.

## RÉSUMÉ

L'étude de la diffraction d'une onde électromagnétique par un nuage de particules dans l'atmosphère nécessite d'une part une modélisation électromagnétique décrivant la diffraction de chaque type de particule puis de l'ensemble du nuage, et d'autre part une modélisation aérodynamique réaliste afin d'estimer l'évolution du nuage dans l'espace en fonction du temps. Il est alors possible *d'analyser très finement la réponse impulsionnelle* du nuage en mouvement pour différentes polarisations et conditions atmosphériques et *de modéliser finement la non stationnarité du processus*.

## ABSTRACT

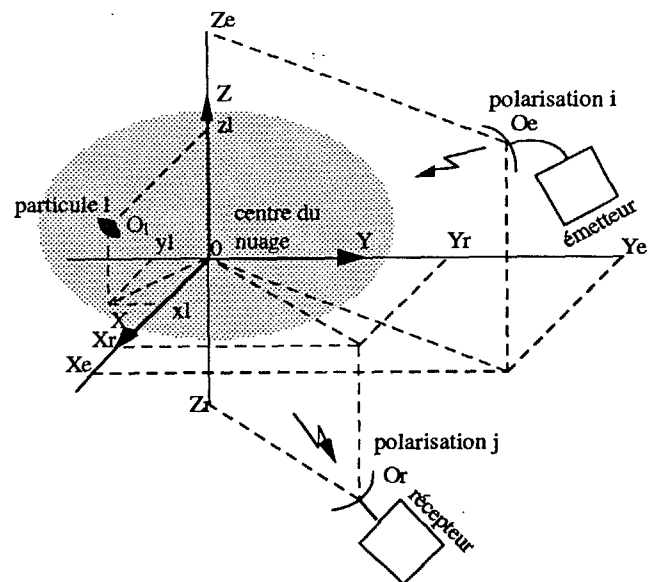
The diffraction of a plane wave by a cloud of particles needs on the one hand an electromagnetic modelisation to describe the diffraction of each particle and the whole cloud, and on the other hand an realist aerodynamic modelisation to estimate the evolution of the cloud in space and time. We can then analyse the right impulse response of cloud in evolution for different polarisations and atmospheric conditions, and also modelise correctly the non stationarity of the processus.

## 1. INTRODUCTION

Le champ diffracté par un nuage est égal, en négligeant en première approximation les effets interactifs de couplage, à la somme des champs diffractés par chacune des particules:

$$\vec{E}_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i. \quad (1.1)$$

Le champ complexe est fonction de la fréquence  $f$  et de la polarisation  $i$  à l'émission, de la polarisation  $j$  à la réception, des propriétés électromagnétiques des matériaux (dissipation énergétique, conductivité, résonance), des formes géométriques des particules, de leurs vitesses ainsi que du déphasage  $\phi_i$  introduit par la distance radiale mesurée entre chaque particule et le radar. Le nuage étant situé à une distance supérieure à la distance de Fraunhofer, les ondes



- figure 1 -

Représentation des positions et orientations de chaque particule du nuage et des aériens dans un référentiel OXYZ à un instant donné.



diffractées par les particules sont planes au niveau du récepteur, et nous pouvons ainsi formuler la S.E.R. bistatique d'un nuage en fonction du temps:

$$\sigma_{\text{nuage}}^{i,j}(t) = 4\pi \left| \sum_{p=1}^N \overline{A_p^{i,j}} \cdot e^{j\phi_p} \right|^2 \quad (1.2)$$

avec,

$$\phi_p = k \cdot \left( \overrightarrow{OO_p} \cdot \left( \frac{\overrightarrow{OO_e}}{|\overrightarrow{OO_e}|} + \frac{\overrightarrow{OO_r}}{|\overrightarrow{OO_r}|} \right) \right), \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1.3)$$

et

$\overline{A_p^{i,j}}$ , terme complexe fonction des polarisations  $i$  et  $j$  et des angles d'incidence et de diffusion définis dans un repère lié à la particule  $p$ .

## 2. CONSTITUTION DU MODELE AERODYNAMIQUE.

En négligeant les phénomènes de sédimentation entre particules en évolution dans l'atmosphère, la trajectoire décrite par un objet en chute libre est fonction de paramètres propres à l'objet (masse volumique, géométrie, vitesse, élasticité, rugosité,...) et également propres au milieu d'évolution (pression, température, viscosité, altitude, relief, vitesse instantanée du vent, ...). La résolution de ce problème serait possible numériquement en résolvant les équations de Navier-Stokes qui décrivent le mouvement d'une particule dans un fluide [4]. Dans le cadre de notre application où nous voulons connaître l'expansion d'un nuage de plusieurs millions de particules, nous avons cherché à obtenir des relations empiriques liant les grandeurs (vitesse, orientation et densité de population) suffisamment précises et peu pénalisantes en temps de calcul.

La modélisation de la chute des particules (ou objets de petites tailles) dans l'atmosphère se déroule en plusieurs étapes:

### 2.1 Observation d'objets en chute libre.

*En l'absence totale de vent*, nous observons en laboratoire la chute libre de particules pour comprendre et mettre en évidence certains

comportements caractéristiques (trajectoire décrivant une hélice ou une droite, rotations, mouvements aléatoires ou déterministes liés aux déformations des objets, apparition d'un régime stationnaire de chute, vitesses de chute verticale et latérale, ...).

### 2.2 Acquisition d'images.

En utilisant un système de vision assisté par ordinateur, nous effectuons successivement l'acquisition d'images toutes les 40 ms. d'objets en chute libre dans l'atmosphère. Les images floues des particules en mouvement obtenues sont traitées (filtrage, binarisation, ...) afin de mesurer les vitesses en fonction des orientations, de l'altitude, ainsi que l'évolution des différents paramètres au cours du temps.

En renouvelant cette expérience plusieurs fois dans les mêmes conditions, nous déterminons également les densités de répartition des angles d'orientation de l'objet. Cette information permet notamment de définir quelles sont les positions privilégiées prises par les particules dans l'atmosphère.

*L'ensemble de ces relevés expérimentaux de la chute de particules nous permet d'établir par lissage polynomial plusieurs lois empiriques et de disposer ainsi d'un modèle aérodynamique réaliste, basé sur l'observation et la mesure en laboratoire.*

### 2.3 Modélisation du vent.

Les perturbations atmosphériques présentes en atmosphère libre sont introduites dans un second temps dans les équations de déplacement des particules.

Pour des déplacements à faible nombre de Reynolds (mesurant le rapport entre l'inertie du fluide déplacé par le mouvement de l'objet et celle due à sa viscosité), on considère en première approximation que la composante du vent n'a qu'un effet de translation sur les composantes de déplacement des particules.

L'évolution de la position d'une particule p est alors fonction de la vitesse  $V_p$  mesurée en atmosphère calme et de la vitesse instantanée du vent  $V_{vent}$ :

$$P_p(t+\Delta t) = (V_{vent} + V_p) * \Delta t + P_p(t) \quad (2.1)$$

La vitesse du vent se décompose en une composante moyenne et une composante turbulente:

- La composante moyenne est considérée constante pour un temps d'observation faible et n'a pas d'influence sur les fluctuations de la S.E.R. instantanée.

- La composante turbulente est assimilée (comme pour beaucoup de phénomènes naturels) à un processus aléatoire gaussien centré. Elle est déterminée à un instant donné en additionnant un bruit blanc gaussien centré à celle obtenue à l'instant précédent:

$$V_{turb}(t+\Delta t) = R * V_{turb}(t) + \sqrt{1-R^2} * J_m(0, \sigma) \quad (2.2)$$

avec,

$J_m(0, \sigma)$  : bruit blanc gaussien centré d'écart type  $\sigma$ ,

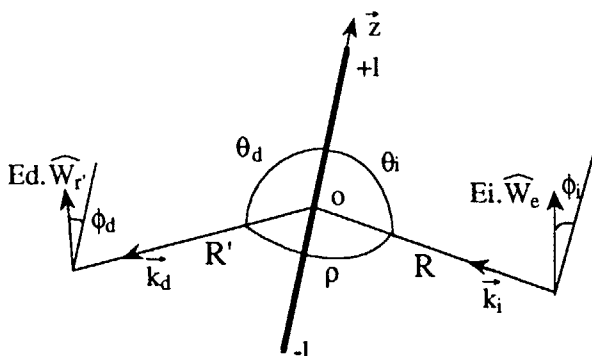
et

R, coefficient de corrélation.

### 3. EXEMPLE:

#### ETUDE DU NUAGE DE DIPOLES.

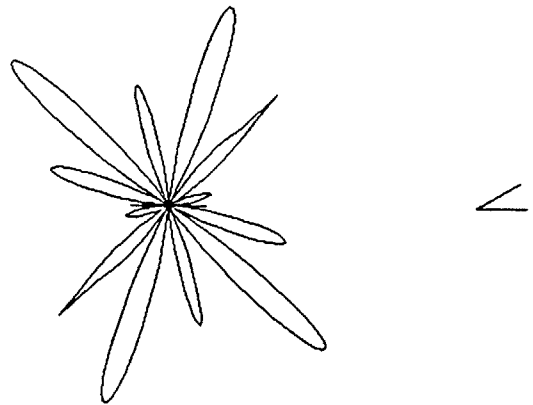
##### 3.1 Modèle électromagnétique (figure 2).



Pour calculer l'expression du champ diffracté par un dipôle parfaitement conducteur, nous utilisons au choix les méthodes analytiques A et B de Van Vleck [1] ou la méthode des moments développée par

Richmond [3].

A titre d'illustration, la figure 3 présente le rayonnement d'un dipôle (méthode A) de longueur égal à deux fois la longueur d'onde et de rapport longueur sur rayon de 500. Pour un angle de bistatisme fixe, l'angle d'incidence varie de 0 à 360°. Les angles de polarisation à l'émission et à la réception sont pris égaux à zéro:



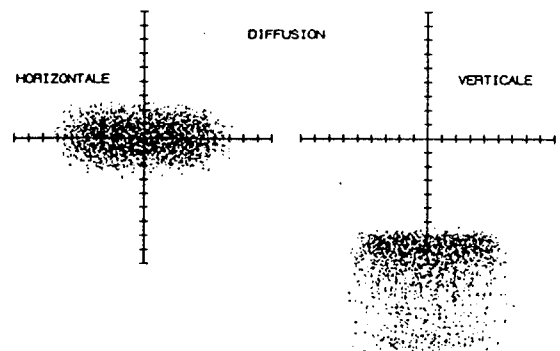
- figure 3 -

Diagramme de rayonnement bistatique ( $\rho = 30^\circ$ ).

##### 3.2 Modèle aérodynamique.

En utilisant notre système de vision et de traitement d'images, nous avons établi un modèle aérodynamique de la chute des dipôles. Nous avons développé plusieurs modules graphiques sur station de travail HP730 pour visualiser l'animation de la chute de particules.

La figure 4 représente l'image projetée dans le plan horizontal et vertical d'un nuage de dipôles après quelques dizaines de secondes de chute libre:

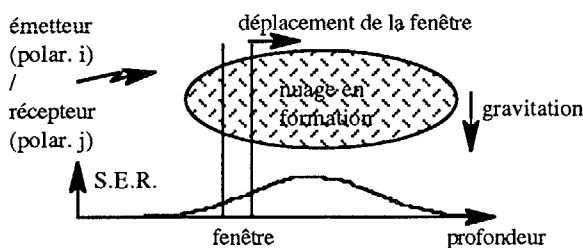


- figure 4 -



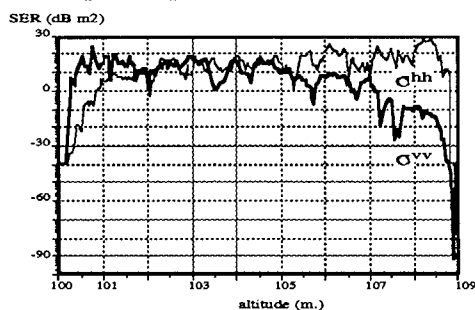
#### 4. ANALYSE DE SIGNATURE.

Couplé avec le module électromagnétique décrivant la diffraction élémentaire d'un dipôle à un instant donné, nous avons obtenu la S.E.R. instantanée d'un nuage en mouvement dans l'atmosphère. Nous pouvons alors effectuer une estimation du gabarit de la Densité Spectrale de Puissance [2] de la S.E.R. instantanée du nuage. Egalement en calculant la S.E.R. correspondant aux dipôles présents dans une fenêtre couissant suivant la profondeur (figure 5), nous avons reconstitué la réponse impulsionnelle d'un nuage pour différentes polarisations à l'émission et à la réception:



- figure 5 -

La figure 6 présente la S.E.R. du nuage obtenue lorsque la fenêtre se déplace suivant l'altitude pour des couples de polarisations HH ou VV du radar:



- figure 6 -

En polarisation parallèle horizontale, le niveau de S.E.R. le plus fort est obtenu au voisinage du sommet du nuage, alors qu'en polarisation parallèle verticale il correspond au bas du nuage. En conséquence, la répartition suivant les vitesses et orientations des dipôles dans l'atmosphère génère une signature polarimétrique très caractéristique du nuage.

#### 5. CONCLUSION.

Nous avons mis au point une méthode de travail qui nous permet de simuler et d'analyser le signal diffracté par un nuage d'objets de formes simples en

suspension dans l'atmosphère. Le modèle électromagnétique utilisé peut être de nature analytique ou numérique suivant la forme géométrique et la taille des objets étudiés par rapport à la longueur d'onde. Le modèle aérodynamique est établi après avoir déterminé certaines lois empiriques de comportement à l'aide du système de vision et de traitement d'image utilisé en laboratoire.

L'ensemble de ces travaux s'est concrétisé par l'établissement d'un logiciel général comprenant:

- un module "conditions initiales" où sont répertoriées les positions initiales de chaque objet de la simulation, les paramètres atmosphériques, le temps d'échantillonnage, la fréquence d'émission et les polarisations du radar.

- un module "électromagnétique" où l'on calcule la somme des champs diffusés par chaque particule à un instant donné.

- un module "visualisation graphique" qui offre différentes possibilités d'analyse de signature radar et de représentation graphique (diagramme de rayonnement monostatique ou bistatique, animations de la chute de particules, densité spectrale de puissance, réponse impulsionnelle, analyse suivant différentes polarisations,...).

- un module "aérodynamique" chargé de remettre à jour les positions et orientations de chaque objet en mouvement à l'instant  $t+\Delta t$  suivant.

- un module "évolution" où l'on indique les paramètres d'évolution de la simulation (temps, polarisation, fréquence, position du radar, fenêtre).

Les résultats obtenus en simulation ont été validés en espace libre suite à la confrontation de mesures radar recueillies au centre atmosphérique de Lannemezan, notamment avec le très bon accord des prédictions des fluctuations de la S.E.R. instantanée d'un nuage de dipôles.

#### Références:

- [1] P. POULIGUEN, G. CHASSAY "Propriétés statistiques de rétrodiffusion des nuages de dipôles", 13ème Colloque GRETI.
- [2] T.TENOUX. "Etude des propriétés statistiques de la S.E.R. de cibles modélisables par des ensembles de diffuseurs discrets", Thèse de Doctorat 3ème cycle
- [3] WANG. "Generalized moment methods in electromagnetic".
- [4] R.COMOLET. "Mécanique expérimentale des fluides" Tome II 1963