

PROPRIETES STATISTIQUES DE RETRODIFFUSION DES NUAGES DE DIPOLES

Philippe POULIGUEN* , Gérard CHASSAY**

* Ingénieur, Centre Electronique de l'Armement (CELAR), 35170 BRUZ

** Professeur, INSA, 20 avenue des buttes de coesmes, 35043 RENNES Cedex

RÉSUMÉ

Dans cet article, nous présentons une modélisation mathématique des principaux phénomènes susceptibles de modifier la rétrodiffusion par un ensemble de dipôles dispersés sous forme de nuage dans l'atmosphère. Nous présentons successivement:

- une méthode basée sur une simulation statistique des mouvements des dipôles (orientation, dispersion, positions...) permettant de prévoir avec réalisme la non stationnarité de la SER et l'écart mesuré entre les polarisations horizontale et verticale

- une analyse de la propagation des champs dans le nuage, montrant que les couplages électromagnétiques se neutralisent en moyenne statistique, mais que le masquage provoque de sévères dégradations de la SER moyenne.

INTRODUCTION

Depuis la seconde guerre mondiale, afin de brouiller des radars susceptibles d'opérer dans une large bande de fréquences, une technique consiste à disperser à partir de navires, d'aéronefs ou de véhicules terrestres d'énormes quantités d'antennes dipôlares (chaff) de différentes longueurs. Ces distributions aléatoires de dipôles permettent en effet de générer en un temps très bref de fortes réflectivités radar.

L'étude de la diffraction des ondes électromagnétiques par un nuage de dipôles est d'une complexité telle qu'aucune théorie n'est actuellement disponible pour décrire de façon satisfaisante l'ensemble des phénomènes observés. Cela n'a rien de surprenant si l'on souligne les nombreux paramètres dont dépend la réflectivité: les caractéristiques technologiques des dipôles, leur comportement aérodynamique, les conditions atmosphériques, ainsi que l'ensemble des perturbations purement électromagnétiques pouvant se développer dans les nuages suffisamment denses.

En pratique, on observe toujours d'importantes limitations du niveau de réflectivité par rapport aux prévisions théoriques données par les méthodes de calcul simplifiées dont on dispose.

Dans cette communication, nous modélisons trois effets susceptibles de limiter les "performances

ABSTRACT

A mathematical modelization for some restricting phenomena of the radar cross section (RCS) in a chaff cloud is investigated in this paper.

Statistical simulations for chaff movements are given, to describe the polarimetric horizontal/vertical ratio and the variation of the mean RCS with the time.

We also give new results about shielding effects, which are restricting phenomena for the mean RCS, and mutual coupling between dipoles, showing they only affect instantaneous signals.

statistiques" d'un nuage de dipôles supposés technologiquement parfaits:

- le comportement aérodynamique des dipôles, qui limite la réflectivité en polarisation verticale
- les trajets multiples, qui engendrent des phénomènes de couplage
- la dispersion énergétique, ou effet de masquage.

I - INFLUENCE DU COMPORTEMENT AERODYNAMIQUE DES DIPOLES SUR LA SECTION EFFICACE RADAR (SER) MOYENNE D'UN NUAGE.

I-1. Rappels

Le schéma général de la géométrie du problème de rétrodiffusion par un dipôle est donné sur la figure 1.

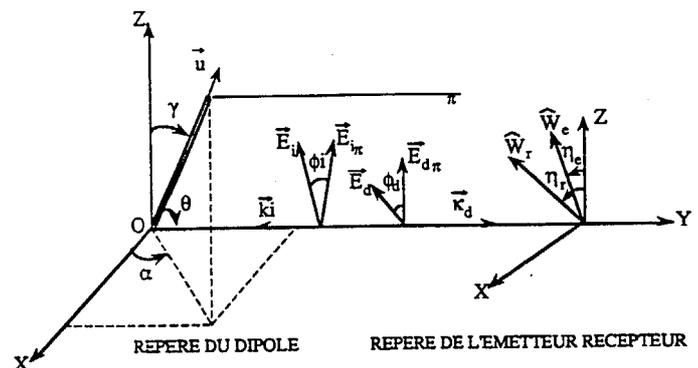


FIGURE 1



L'équation du radar et l'utilisation de la notion d'onde plane permettent d'écrire la SER sous la forme:

$$\sigma(\alpha, \gamma, \eta_e, \eta_r) = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{|\vec{E}_d|^2}{|\vec{E}_i|^2} \quad (1)$$

α, γ : variables angulaires décrivant l'orientation du dipôle dans le référentiel OXYZ

η_e, η_r : variables angulaires définissant les vecteurs unitaires de polarisation W_e et W_r dans le plan OXZ, des champs électriques E_i à l'émission et E_r à la réception, par rapport à l'axe vertical OZ.

Le champ électrique diffusé par le dipôle a été calculé analytiquement par VAN-VLECK /1/, en utilisant la théorie des antennes dipolaires de KING /2/.

I-2. SER théorique moyenne d'un nuage

Un nuage de dipôles est généralement composé de plusieurs dizaines de millions d'éléments dont les positions et les orientations à chaque instant sont des paramètres nécessaires au calcul de la SER totale théorique, donnée pour un couple I, J de polarisations par la relation (2) /3/:

$$\sigma_T^{IJ} = \frac{4\pi r^2}{|\vec{E}_i|^2} \sum_{u=1}^N |E_{du}^J|^2 + \frac{8\pi r^2}{|\vec{E}_i|^2} \sum_{u=1}^{N-1} \sum_{v=u+1}^N |E_{du}^J| |E_{dv}^J| \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} [du-dv] + P_{uv}\right) \quad (2)$$

Dans cette relation, du et dv désignent respectivement les projections, sur la direction de propagation, des distances entre les dipôles u et v et un point arbitraire, et P_{uv} est un terme caractérisant l'écart entre leurs phases propres.

La SER du nuage est donc une fonction du temps dont la description fine nécessiterait une excellente modélisation du comportement aérodynamique des dipôles, qui est par ailleurs fortement lié à leur technologie et aux conditions météorologiques locales. Ces difficultés justifient pleinement l'emploi des statistiques comme moyen d'étude. L'hypothèse d'ergodicité permet par ailleurs de confondre la moyenne statistique avec la moyenne temporelle observée. Du fait de l'incohérence des champs diffusés, on montre que les fonctions d'interférence se neutralisent en moyenne, ce qui permet d'exprimer la SER du nuage sous forme de la somme des SER moyennes des N dipôles qui le composent:

$$\text{avec:} \quad \langle \sigma_T^{I,J} \rangle \approx N \langle \sigma^{I,J} \rangle \quad (3)$$

$$\langle \sigma^{I,J} \rangle = \langle \sigma(\eta_e, \eta_r) \rangle = \iint \sigma(\alpha, \gamma, \eta_e, \eta_r) P(\alpha, \gamma) d\alpha d\gamma \quad (4)$$

ou $P(\alpha, \gamma)$ désigne la densité de probabilité d'orientation d'un dipôle.

L'analyse de mesures effectuées sur des ensembles désordonnés de dipôles projetés dans l'espace /3/ a permis de mettre en évidence une

limitation importante de la SER mesurée en polarisation verticale par rapport à celle mesurée en polarisation horizontale.

Nous avons modélisé ce phénomène en nous basant sur une étude de VAKIN et SHUSTOV /4/ qui postulent, selon une théorie due à ZAGORODINKOV, l'existence de deux grands groupes d'orientations préférentielles des dipôles à l'intérieur d'un nuage, privilégiant respectivement l'orientation horizontale (chûte lente) et l'orientation verticale (chûte rapide). Nous avons effectué des expérimentations photographiques, aussi bien en laboratoire qu'en espace libre, qui ont confirmé ce postulat (exemple figure 2).



FIGURE 2

A partir de cette analyse, nous avons montré que la densité de probabilité bidimensionnelle de l'orientation des dipôles peut s'écrire:

$$P(\alpha, \gamma) = P(\alpha) P(\gamma) = \frac{1}{2\pi} P(\gamma) \quad (5)$$

avec:

$$p(\gamma) = \frac{1}{I} \left[\frac{K_H}{S_H} e^{\frac{1}{2} \left(\frac{\gamma - M_H}{S_H} \right)^2} + \frac{K_V}{S_V} e^{\frac{1}{2} \left(\frac{\gamma - M_V}{S_V} \right)^2} \right] \sin \gamma \quad (6)$$

et:

$$I = \int_0^{\pi} \left[\frac{K_H}{S_H} e^{\frac{1}{2} \left(\frac{\gamma - M_H}{S_H} \right)^2} + \frac{K_V}{S_V} e^{\frac{1}{2} \left(\frac{\gamma - M_V}{S_V} \right)^2} \right] \sin \gamma d\gamma \quad (7)$$

Dans ces expressions, les grandeurs K_H et K_V sont respectivement des coefficients de pondération des quantités de dipôles suivant leur orientation préférentielle. Les coefficients S_H et S_V , puis M_H et M_V , représentent respectivement les écarts types et moyennes statistiques de deux lois de Gauss représentatives des distributions angulaires préférentielles. On peut noter que pour de fortes valeurs des écarts types, notre loi s'identifie avec la loi équiprobable utilisée par VAN VLECK /1/.

La SER moyenne, par exemple pour un dipôle de rapport longueur / rayon = 900, calculée suivant les relations (4), (5), (6) et (7) est représentée sur la figure 3, pour un couple de polarisations émission et réception parallèles.

Les différents pics observés correspondent aux résonances successives du dipôle. le résultat présenté a été obtenu en posant $K_V = 0$ (aucun dipôle vertical), $M_H = 80^\circ$ et $S_H = 0,7$ (orientation Gaussienne centrée sur un angle de 80° par rapport à la verticale).

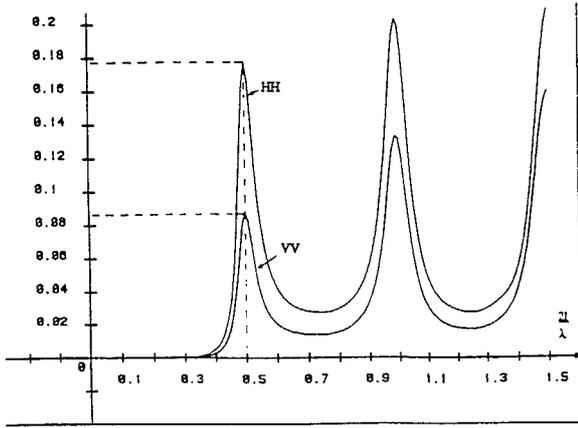


FIGURE 3

Il met en évidence la nette prédominance de la SER moyenne en polarisation horizontale par rapport à la polarisation verticale.

En rendant fonction du temps les paramètres de la loi Gaussienne (6), on peut simuler avec beaucoup de réalisme le phénomène de dispersion des dipôles dans l'atmosphère et reproduire la non stationnarité du processus. La figure 4 illustre l'effet de la dispersion sur la réflectivité radar moyenne d'un nuage de dipôles demi-onde, pour des couples de polarisations verticale et horizontale.

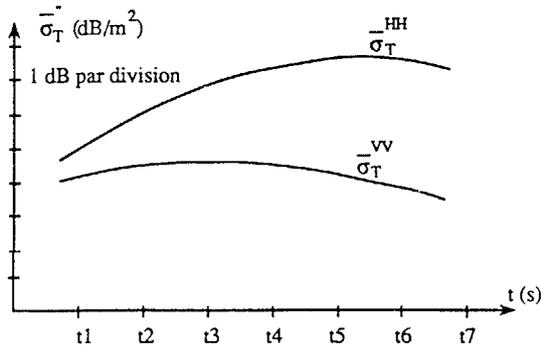


FIGURE 4

En conclusion, en substituant la densité de probabilité proposée à la loi équiprobable de VAN VLECK, nous disposons d'un modèle de calcul réaliste permettant de reproduire un très grand nombre de situations réelles.

II - PHENOMENES ELECTROMAGNETIQUES SUPPOSES LIMITATIFS DE LA SER MOYENNE

L'analyse fine de la propagation dans un ensemble de diffuseurs montre que chaque élément est électromagnétiquement perturbé par la présence des autres. Il est alors possible d'isoler deux effets distincts liés entre eux par un bilan de puissance précis / 3 /. L'extraction par un dipôle d'une partie de la puissance transportée par l'onde incidente provoque deux phénomènes:

- le couplage, par rerayonnement de la puissance captée dans toutes les directions, donc vers les dipôles environnants

- le masquage, par atténuation progressive de l'onde incidente lors de sa pénétration dans le nuage

II - 1 . Le couplage

Nous avons montré que le couplage peut être pris en compte en projetant sur l'axe d'un dipôle les champs diffusés par les dipôles voisins. La figure 5 définit la géométrie du problème de projection.

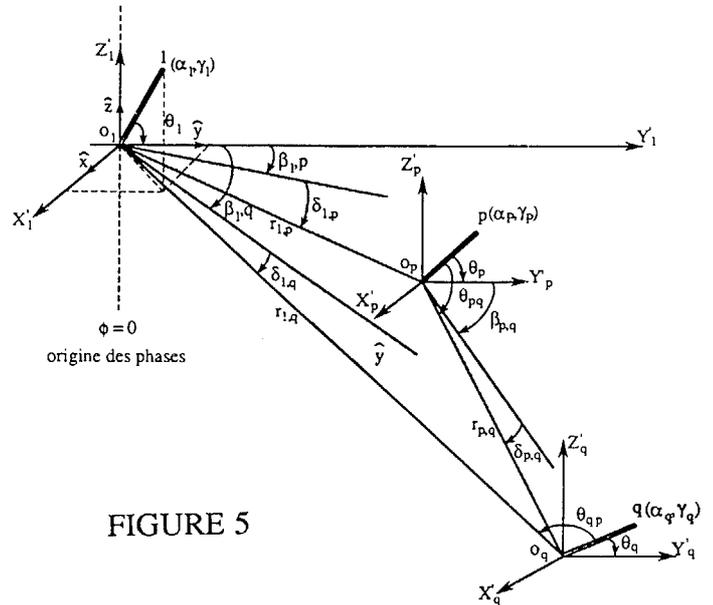


FIGURE 5

La SER d'un nuage de N dipôles s'écrit alors:

$$\sigma_T = \left| \sum_{p=1}^N H_p e^{-j P_p} + \sum_{p=1}^{N-1} \sum_{q=p+1}^N H_{pq} e^{-j P_{pq}} \right|^2 \quad (8)$$

avec:
$$H_p = \frac{4\lambda^2}{\pi} K_{1P} F_p(\theta_p, \theta_{qp}) A_p \quad (9)$$

et:
$$H_{pq} = \frac{8\lambda^2}{\pi} K_{2P} F_q(\theta_p, \theta_{qp}) F_p(\theta_{pq}, \theta_p) A_{pq} \quad (10)$$

Les grandeurs F_p et F_q sont extraites de l'expression du champ diffusé. En utilisant respectivement les méthodes "A" et "B" de VAN VLECK, nous obtenons respectivement les relations (11) et (12):

$$F_\alpha(\theta_i, \theta_j) = \frac{1}{2\Omega} \left[\frac{A'}{\cos x + j \frac{f}{\Omega}} - \frac{B'}{\sin x + j \frac{g}{\Omega}} \right] \quad (11)$$

$$F_\alpha(\theta_i, \theta_j) = -[F'u + G'v + H'w + j(F''u + G''v + H''w)] \quad (12)$$

où les divers coefficients sont définis dans / 3 /. Ces expressions, très complexes montrent que la SER instantanée peut être perturbée par les couplages.

La SER moyenne de l'ensemble ne peut être calculée analytiquement. Nous avons donc réalisé un logiciel simulant statistiquement des structures géométriques aléatoires de nuages par tirages successifs et nous moyennons arithmétiquement l'expression (8) de la SER instantanée pour un nombre N_0 significatif de structures:

$$\langle \sigma_T \rangle = \frac{1}{N_0} \sum_{j=1}^{N_0} \sigma_{Tj} \quad (13)$$



Après un grand nombre de simulations sur des structures obtenues avec des positions gaussiennes et des orientations équiprobables, nous pouvons conclure à une *neutralisation en moyenne statistique des phénomènes de couplage*.

II - 2 . Le masquage

Le masquage traduit la captation par les dipôles d'une partie de la puissance de l'onde incidente, puis sa répartition dans toutes les directions de l'espace. Cet effet atténue la contribution directe de l'onde incidente dans le nuage.

Considérons une tranche infinitésimale d'épaisseur dx d'un tube de rayons de section ΔS .

Soit N le nombre de dipôles présents dans la tranche dx . Nous avons montré /3/ que la densité de puissance incidente directe s'écrit en fonction de la profondeur x :

$$p_e(x) = p_0 e^{-N_d \langle \sigma_s \rangle X}, \text{ avec } N_d = \frac{N}{\Delta S dx} \quad (14)$$

avec:

$\langle \sigma_s \rangle$: surface efficace de diffusion moyenne d'un dipôle (égale à $0,159 \lambda^2$ pour un dipôle demi-onde)
 p_0 : densité de puissance incidente en $x=0$

La SER équivalente d'un dipôle situé à la profondeur x dans le nuage s'écrit donc en fonction de la ser σ_0 du même dipôle isolé:

$$\sigma(x) = \sigma_0 e^{-2 N_d \langle \sigma_s \rangle X} \quad (15)$$

La SER moyenne de l'élément volumique de surface ΔS et d'épaisseur dx est donnée par:

$$d\langle \sigma_N^u \rangle = N_d \langle \sigma_0 \rangle e^{-2 N_d \langle \sigma_s \rangle X} \Delta S dx \quad (16)$$

avec:

$\langle \sigma_0 \rangle$: SER moyenne d'un dipôle isolé

La SER moyenne d'un nuage se calcule en intégrant (16) sur le volume du nuage:

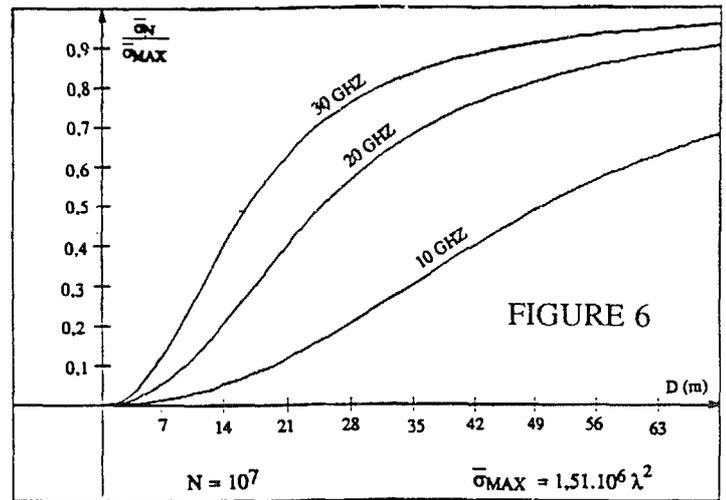
$$\sigma_N = \iiint_V d\langle \sigma_N^u \rangle \quad (17)$$

A titre d'exemple, la figure 6 quantifie l'effet du masquage, pour plusieurs fréquences, en fonction du diamètre d'un nuage sphérique contenant 10^7 dipôles. La SER moyenne du nuage est normalisée par rapport à sa SER moyenne maximum (σ_{MAX}) calculée par la relation (18) en négligeant le masquage.

$$\langle \sigma_{MAX} \rangle = N \sigma_0 \quad (18)$$

Cette modélisation d'un nuage de dipôles par un milieu à pertes, continu, homogène et isotrope, montre que le masquage provoque une limitation de la réflectivité moyenne.

Nos résultats, pessimistes comparés à ceux obtenus en utilisant les modèles d'atténuation proposés par KOWNACKI /5/, GARBACZ et WICKLIFF /6/, sont cependant en excellent accord avec ceux de VAKIN et SCHUSTOV/4/.



CONCLUSION

Dans cette communication, nous ne prétendons pas avoir présenté une théorie précise de description du comportement d'un nuage de chaff. Nous avons simplement cherché à apporter des réponses à quelques questions fréquemment posées: la justification et la prévision du rapport polarimétrique mesuré sur la SER moyenne, sa variation en fonction du temps, l'influence des couplages et une quantification des effets de masquage. Un important travail reste à faire pour bien cerner les phénomènes extrêmement complexes qui prennent simultanément naissance dans les nuages de dipôles.

BIBLIOGRAPHIE

- /1/ J.H. VAN VLECK, F. BLOCH and M. HAMMERMESCH; Theory of radar reflection from wires or thin metallic strips, Journal of applied physics (1946)
- /2/ R.W.P. KING and C.W. HARRISSON; The distribution of current along a symmetrical center-driven antenna, Proc. of the I.R.E., (oct 1943)
- /3/ P. POULIGUEN; Etude des propriétés électromagnétiques de quelques cibles radar diffuses artificielles; Thèse de Doctorat de l'Université de Rennes I, 24 octobre 1990
- /4/ VAKIN-SHUSTOV; osnovy radioprotivodystviya I radiotekhnicheskoy ryzvedki, sovetskoye radio, Moscou (1968)
- /5/ S. KOWNACKI; Screening (shelding) effect of chaff cloud, IEEE trans. on aerospace and electronic systems, 1967
- /6/ R.G. WICKLIFF R.J.GARBACZ; The average backscattering cross-section of clouds of randomized dipoles, IEEE (1974)

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient vivement la Société Etienne LACROIX pour l'intérêt qu'elle a apporté à la réalisation de ce travail et pour son aide dans les vérifications expérimentales.