



CLASSIFICATION ET IDENTIFICATION POLARIMETRIQUE DE CIBLES RADAR
PAR L'UTILISATION D'UN MODELE DE RESEAUX NEURONAUX.

E. POTTIER - J. SAILLARD

IRESTE

Laboratoire S2HF (Systèmes et Signaux Hautes Fréquences)
La Chantrerie - cp 3003 - 44087 NANTES CEDEX - FRANCE.

RÉSUMÉ

L'objectif de ce papier concerne l'amélioration du pouvoir de "reconnaissance" des zones brillantes localisées sur les images électromagnétiques haute résolution, et présente une méthode originale de classification polarimétrique.

Cette étude a conduit à la conception d'un système "intelligent" de caractérisation de la structure d'une cible, basée sur l'utilisation des modèles de réseaux neuronaux.

1 INTRODUCTION.

L'imagerie Radar est utilisée pour effectuer l'analyse fine de la signature de cibles.

Le problème inverse de la diffraction électromagnétique est en voie d'être résolu en retrouvant à partir de la connaissance du champ complexe rétrodiffusé, les coordonnées géométriques et les propriétés physiques des contributeurs élémentaires. Par calculs se construit une Image Electromagnétique Haute Résolution de la cible dans le plan d'observation.

Le concept de la POLARIMETRIE, c'est-à-dire l'étude de l'état de polarisation, sous son aspect vectoriel, des ondes émises et rétrodiffusées est introduit dans le domaine de l'imagerie radar afin d'améliorer la classification des cibles.

L'objectif de ce papier concerne l'amélioration du pouvoir de "reconnaissance", qui consiste à déterminer quelles sont les caractéristiques physiques et géométriques de la cible qui sont à l'origine des zones brillantes localisées sur les images électromagnétiques haute résolution.

A partir de la "théorie phénoménologique des cibles radar", énoncée par J.R HUYNEN, nous avons développé une méthode originale de classification, qui nous a conduit à la conception d'un système "intelligent" de caractérisation de la structure d'une cible, basée sur l'utilisation des modèles de réseaux neuronaux.

2 METHODE DE L'HOLOGRAPHIE RADAR.

L'holographie radar [1], est un procédé conduisant à la réalisation d'une image électromagnétique haute résolution d'une cible radar complexe, à partir de la connaissance des valeurs du champ électromagnétique rétrodiffusé par celle-ci relevé en fonction de deux paramètres de mesure: la fréquence d'émission (f) ainsi que la position angulaire (θ) du radar par rapport au centre de phase de la cible.

Le coefficient de rétrodiffusion représente le rapport du champ de l'onde réfléchi par la cible et de l'onde incidente au niveau de la source. Ce coefficient complexe traduit un affaiblissement et un déphasage. De plus, le coefficient de rétrodiffusion est fonction du couple de polarisation utilisé à l'émission et à la réception.

L'image électromagnétique haute résolution est obtenue par sommation cohérente sectorielle des réponses impulsionnelles représentant les fonctions temporelles de l'écho renvoyé par la cible. L'image radar, ainsi obtenue, représente la projection des points brillants dans le plan d'observation, ce qui permet de localiser spatialement les positions des centres de diffraction.

2 - 1: Formulation mathématique.

Considérons qu'une cible radar puisse se

ABSTRACT

This paper introduces the Polarimetry concept in radar imaging to improve the classification of a scattering area, which has been located in the High Resolution Electromagnetic Images.

This study has allowed us to derive an original polarimetric method of classification based on a neural network modelization, and show how it is possible to identify the target structure.

décomposer en une somme finie de N contributeurs indépendants et possédant la propriété d'isotropie fréquentielle. Le coefficient de rétrodiffusion s'exprime alors par:

$$S(\vec{k}) = \sum_{i=1}^N a_i \cdot e^{-2j\vec{k}\vec{x}_i} \quad (1)$$

où a_i désigne l'amplitude complexe du i ème contributeur, et \vec{x}_i le vecteur définissant sa position spatiale dans le repère cible. La relation (1) peut être considérée comme la transformée de Fourier tridimensionnelle de l'image, ce qui donne:

$$I(\vec{x}) = \iiint S(\vec{k}) \cdot e^{2j\vec{k}\vec{x}} d\vec{k} \quad (2)$$

Généralement, l'analyse est restreinte au cas bidimensionnel en imposant $k_z=0$ (site nul). Ceci permet d'obtenir une représentation des contributeurs projetés sur le plan $z=0$. Ainsi, à partir de la connaissance du coefficient de rétrodiffusion global mesuré en fonction du couple (f, θ), l'image électromagnétique haute résolution de la cible complexe est déterminée par:

$$I(\vec{x}) = 4 \left[\frac{\pi}{c} \right]^2 \int_{F^{\theta}} \int_{\theta} f \cdot S(f, \theta) e^{\frac{j4\pi f}{c}(x \cos \theta + y \sin \theta)} df d\theta \quad (3)$$

où le couple (x, y) représente les coordonnées du vecteur \vec{x} dans le plan de la cible.

3 PRESENTATION DE LA CIBLE TEST.

La cible test est constituée de quatre cibles canoniques et indépendantes, à savoir:

- un dipôle métallique horizontal d'une longueur de 65 cm et d'un diamètre de 1 mm.
- une plaque métallique carrée de surface 2cm^2
- une sphère de diamètre 7 cm.
- un dipôle métallique de mêmes caractéristiques que le précédent, mais orienté d'un angle de 45° autour de la ligne de visée du radar. Ce dipôle n'appartient pas au plan de la cible mais lui est perpendiculaire.

La localisation spatiale de ces cibles sur le support de mesure est représentée figure n°1.

En fonction de la bande d'analyse [8-12GHz], les dimensions des cibles canoniques ont été déterminées afin de vérifier le postulat suivant, à savoir:

"Toute cible complexe peut se décomposer en une somme finie de cibles simples canoniques indépendantes et isotropes".

Ainsi, en travaillant en zone optique, c'est-à-dire en limite supérieure de la zone de résonance, la cible complexe peut être modélisée par un ensemble de sources ponctuelles indépendantes appelées encore contributeurs élémentaires, ou tout simplement points brillants.



4 MESURE DE LA CIBLE PAR UN RADAR MONOSTATIQUE VECTORIEL.

Afin d'obtenir, toute l'information relative à la cible complexe, il faut concevoir et utiliser un système radar vectoriel possédant deux antennes émission-réception, dont l'état de polarisation de chacune d'entre elles est lié à une base canonique de l'espace des états de polarisation.

Un tel système radar vectoriel est alors capable de fournir toute l'information relative à la cible sous la forme d'une matrice de rétrodiffusion et non plus d'un simple coefficient de rétrodiffusion.

En effectuant une mesure de la cible au moyen d'un système radar vectoriel dont le couple de base des états de polarisation est le couple (H,V), quatre Images Electromagnétiques Haute Résolution correspondant à chacun des termes de la matrice de rétrodiffusion peuvent alors être construites. Ces images sont représentées figure n°2. La cible a été mesurée, sur un secteur angulaire de 8° par pas de 0,4°, la bande d'analyse s'étendait de 8 GHz à 12 GHz, et la rampe de fréquence était découpée en 339 valeurs correspondant à un pas fréquentiel de 13 MHz.

L'antenne radar se situant dans le haut de l'image, il est aisé de déterminer la correspondance de ces zones brillantes par comparaison avec la localisation des cibles élémentaires sur le support de mesure.

L'image "co-polarisée" VV fait apparaître trois zones brillantes, correspondant à la plaque, à la sphère ainsi qu'au dipôle orienté à 45°.

Les images "cross-polarisées", c'est-à-dire celles obtenues à la réception, avec une polarisation orthogonale à celle de l'émission (HV, VH), ne font apparaître qu'une seule zone brillante correspondant au dipôle orienté à 45° par rapport à la ligne de visée du radar. Dûe à son orientation, cette cible rétrodiffuse toute son énergie d'une manière équirépartie dans chaque canal (HH, HV, VH ou VV).

En examinant plus attentivement l'image "co-polarisée" HH, une quatrième zone brillante apparaît en haut de l'image. Cette zone correspond au dipôle horizontal.

L'examen global de ces quatre Images Electromagnétiques Haute Résolution montre que toute l'information relative à la cible est bien contenue dans la Matrice de rétrodiffusion, et qu'il est nécessaire de la connaître afin d'étudier au mieux toute cible complexe.

De plus, étant à la base même de la théorie Polarimétrique des ondes, il est absolument indispensable de pouvoir mesurer et d'obtenir la matrice de rétrodiffusion d'une cible par un système radar vectoriel avant d'introduire tout concept, quel qu'il soit, de la Polarimétrie dans le domaine de l'imagerie radar [2].

5 DESCRIPTION PHENOMENOLOGIQUE D'UNE CIBLE RADAR.

Toute l'information qu'il est possible d'extraire d'une cible est obtenue à partir de la connaissance complète de la matrice de rétrodiffusion.

L'information contenue dans la matrice de rétrodiffusion décrit d'une manière générale, le processus très complexe de l'interaction entre la structure de la cible et l'onde électromagnétique émise. De plus, l'information qu'elle contient peut être altérée par la variation des paramètres d'observation mis en jeu (fréquence, état de polarisation, forme d'onde) ainsi que par la localisation de la cible dans son environnement et par sa position vis à vis du radar.

La confusion généralement faite est de considérer la matrice de rétrodiffusion comme la réponse d'une "cible pure" à une excitation électromagnétique. Mais c'est oublier que la matrice [S] est dépendante de la phase absolue, ce qui signifie qu'elle résulte d'un processus complexe de sommation cohérente de tous les phénomènes électromagnétiques créés par la source d'émission dans l'environnement radar-cible.

La matrice de rétrodiffusion présente une information complète de la cible mais cependant assez complexe à exploiter. Le problème de l'identification d'une cible ne peut donc pas être résolu aisément par

l'utilisation de l'information contenue dans la matrice de rétrodiffusion.

C'est pour cette raison qu'est née dans les années 1970, une nouvelle approche au problème de classification et d'identification, qui se nomme "la théorie phénoménologique des cibles radar" énoncée par J.R HUYNEN [3].

Le but de la théorie phénoménologique est de caractériser la cible comme un "objet" de la façon la plus précise qu'il soit, donc de la discriminer et de l'extraire de son environnement, en le considérant alors comme "débarassé" de toutes les altérations dues à l'observation. L'objectif final de cette caractérisation est de déterminer à travers l'analyse du signal rétrodiffusé, une représentation de la cible qui dénuée de bruit.

Pour cela, il est nécessaire d'utiliser une représentation en terme de puissance pour la description du phénomène de rétrodiffusion.

L'avantage de cette représentation est l'élimination de la phase absolue de la cible, c'est-à-dire qu'elle fait appel à une notion de sommation non cohérente des phénomènes électromagnétiques. Il est alors possible d'interpréter plus aisément la contribution de chaque points brillants, considérés maintenant comme indépendants [3].

La matrice de réflexion de Stokes, ou Matrice de Mueller [M], établit une relation linéaire entre les vecteurs de Stokes associés aux ondes incidente et rétrodiffusée [2].

J.R. HUYNEN a redéfini cette matrice de MUELLER, [2], suivant:

$$[M] = \begin{bmatrix} A_0 + B_0 & C_\psi & H_\psi & F_\psi \\ C_\psi & A_0 + B_\psi & E_\psi & G_\psi \\ H_\psi & E_\psi & A_0 - B_\psi & D_\psi \\ F_\psi & G_\psi & D_\psi & -A_0 + B_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

où les coefficients A_0 , B_0 , B , C , D , E , F , G , et H sont connus sous le nom des "paramètres de HUYNEN". Ces paramètres sont indépendants de tout modèle, donc applicables à tout type de cible.

De plus, sachant qu'il existe une corrélation très forte entre les valeurs prises par ces paramètres et les caractéristiques physiques et géométriques de la cible, la théorie phénoménologique peut être utilisée pour caractériser au mieux la forme générale de la cible sans pour autant identifier par le détail, la finesse de la structure de l'objet.

6 RECONNAISSANCE D'UNE CIBLE RADAR PAR LA METHODE DES RESEAUX NEURONAUX.

L'étude globale de l'ensemble des paramètres de HUYNEN, permet de s'imaginer ce que représente la perception du radar et de la manière dont celui-ci interprète le monde environnant [4].

Aussi, à partir de la théorie phénoménologique de la cible, il va être possible de concevoir une méthode "intelligente" de caractérisation de la structure d'une cible, basées principalement sur l'utilisation de certaines notions d'intelligence artificielle, et permettant ainsi à un système radar de classifier puis d'identifier l'objet.

La méthode proposée repose sur l'utilisation des réseaux neuronaux, dont l'objectif consiste en une modélisation primaire de l'architecture du cerveau humain, et dont le but est d'employer ses capacités d'apprentissage et de décision.

L'application du modèle de réseaux neuronaux que nous avons développé [3], concerne la classification de cibles radar. La modélisation de ce processus par une structure neuronale consiste à reproduire sur une machine l'ensemble des perceptions du radar, par analogie à l'organisation du système visuel humain. Les études sur le système visuel ont permis de concevoir une modélisation par couches successives qui a abouti à la définition de la structure de "réseau à couches" où les neurones qui appartiennent à une même couche ne sont pas inter-connectés [5].

La structure d'un réseau de neurones mono-couche est représentée figure n°3.



6 - 1: Phase d'apprentissage.

La phase d'apprentissage est la phase la plus importante car décisive des performances du réseau. Elle consiste à présenter séquentiellement aux neurones d'entrée les cibles canoniques à mémoriser. Pour chacune d'entre elles, la réponse observée est comparée à la réponse théorique attendue. Un algorithme d'apprentissage est mis en place qui vient modifier les coefficients synaptiques de façon à obtenir une réponse satisfaisante.

L'algorithme d'apprentissage utilisé, est l'algorithme de rétro-propagation du gradient. A chaque étape de l'apprentissage, un exemple est présenté à l'entrée du réseau. Une sortie réelle est calculée. Ce calcul est effectué de proche en proche de la couche d'entrée vers la couche de sortie. Cette phase est appelée propagation avant. Ensuite l'erreur entre la sortie mesurée et la sortie attendue est calculée. Le problème est alors de savoir comment répercuter sur chacune des connexions internes le signal d'erreur qui n'a été mesuré que sur la couche de sortie. Le principe de cet algorithme repose sur le fait que s'il a été possible de propager un signal provenant des cellules d'entrées vers la couche de sortie, il est alors possible, en suivant le chemin inverse, de rétropropager l'erreur commise en sortie vers les couches internes.

Les équations qui régissent l'algorithme de rétro-propagation du gradient sont données ci après.

Considérons le réseau de neurones mono-couche, représenté figure n°3, possédant N_e neurones d'entrée N_s neurones de sortie et N_c neurones cachés.

Soit X le vecteur des entrées, Y le vecteur des sorties désirées, et S le vecteur des sorties obtenues. Dénommons par $IC(j)$ l'entrée du neurone caché $n^o j$ et par $OC(j)$ la sortie de ce même neurone, par $IS(k)$ l'entrée du neurone de sortie $n^o k$.

La variable $WE_{(j,i)}^{(n)}$ représente le poids de l'axone reliant le neurone d'entrée $n^o i$ au neurone caché $n^o j$, obtenue à la n^o itération. La variable $WS_{(k,j)}^{(n)}$ représente le poids de l'axone reliant le neurone caché $n^o j$ au neurone de sortie $n^o k$, obtenue à la n^o itération.

Les fonctions d'entrée et de sortie des neurones s'expriment par:

$$IC(j) = \sum_{i=1}^{N_e} X(i) WE_{(j,i)}^{(n)} \quad OC(j) = f[IC(j)] \quad (5)$$

$$IS(k) = \sum_{j=1}^{N_c} OC(j) WS_{(k,j)}^{(n)} \quad S(j) = f[IS(j)] \quad (6)$$

La rétropropagation s'exprime à la n^o itération sur les axones WS par:

$$WS_{(k,j)}^{(n)} = WS_{(k,j)}^{(n-1)} - \eta \cdot d(k) \cdot OC(j) \quad (7)$$

$$\text{avec } d(k) = 2 \left[S(k) - Y(k) \right] \cdot f' \left[IS(k) \right]$$

et sur les axones WE par:

$$WE_{(j,i)}^{(n)} = WE_{(j,i)}^{(n-1)} - \eta \cdot d(j) \cdot X(i) \quad (8)$$

$$\text{avec } d(j) = \left\{ \sum_{k=1}^{N_s} d(k) \cdot WS_{(k,j)}^{(n)} \right\} \cdot f' \left[IC(j) \right]$$

où η représente le pas du gradient et f la fonction sigmoïde liée au neurone.

7 APPLICATION A LA RECONNAISSANCE DE CIBLES.

7 - 1: Définition du réseau de neurones implanté.

La principale définition d'un réseau de neurones consiste à déterminer le nombre de neurones d'entrées celui des couches cachées, et le nombre de sorties.

L'étude précédemment menée, a montré qu'il était tout à fait possible de caractériser la structure d'une cible à partir de la connaissance de la matrice de Mueller. L'information contenue dans cette matrice de puissance va donc imposer le nombre de neurones d'entrées à 16, correspondant aux seize coefficients contenus dans la matrice de Mueller [4].

Le nombre de sorties est par définition sans limite. Celui-ci est fixé à 6, correspondant au nombre de cibles canoniques définissant a priori la population des cibles test choisies arbitrairement.

Ayant choisi une structure de réseau mono-couche (par analogie entre reconnaissance de cibles et perception visuelle), le nombre de neurones appartenant à la couche cachée est, de toute évidence assez délicat à déterminer. Si ce nombre est trop important, le réseau a tendance à dupliquer les éléments de la couche cachée. Si ce nombre est trop petit, le réseau requiert dans ce cas, un grand nombre d'itérations lors de l'apprentissage, et la précision finale n'est pas optimale. En étudiant pour chaque axone de sortie la sensibilité de l'erreur globale (E) à l'élimination de celui-ci, suivant:

$$S_{(k,j)} = E \left[WS_{(k,j)} = 0 \right] - E \left[WS_{(k,j)} = WS_{(k,j)}^{(Finale)} \right] \quad (9)$$

il est alors possible de déterminer le nombre optimal de neurones cachés pour que ceux-ci aient finalement une sensibilité voisine. Dans notre modèle, le nombre de neurones de la couche cachée est fixé à 10.

L'opération la plus délicate, lors de la définition du réseau de neurones, consiste à déterminer les exemples les plus appropriés pour l'apprentissage.

Pour cela, nous avons voulu faire figurer six types de cibles canoniques, liées chacune à une caractéristique particulière de la structure générale d'une cible. Les six cibles choisies sont la plaque, le dièdre, le dipôle horizontal, le dipôle vertical, ainsi que les deux hélices gauche et droite. Ces cibles sont représentatives des cibles linéaires, symétriques, isotropes ainsi que non-symétriques, illustrant soit un phénomène de rétrodiffusion directe soit un phénomène de rétrodiffusion multiple.

Les matrices de Mueller liées à ces cibles pures sont les suivantes [2],[3]:

$$[M_{\text{PLAQUE}}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad [M_{\text{DIEDRE}}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[M_{\text{DIP H}}] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad [M_{\text{DIP V}}] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[M_{\text{HEL G}}] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [M_{\text{HEL D}}] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

7 - 2: Exemples d'application.

L'objectif consiste à déterminer qu'elles sont les caractéristiques physiques et géométriques de la cible qui induisent les points brillants localisés sur les images électromagnétiques haute résolution. Pour cela est isolée à partir des quatre images, la zone contenant le point brillant à étudier. A partir des matrices de rétrodiffusion spatiales reconstruites, il est possible de définir les paramètres de HUYNEN correspondants.

La matrice de rétrodiffusion spatiale reconstruite, correspondant au dipôle orienté à 45°, est donnée par:

$$[S_{\text{Dip45}}] = \begin{bmatrix} -1,1267 + j1,3248 & -1,1535 + j1,8903 \\ -1,0763 + j1,9175 & -1,3595 + j2,2022 \end{bmatrix}$$

A partir de cette matrice, il est possible de déterminer les "paramètres d'Euler" correspondants [2], qui prennent les valeurs suivantes:

m^2	Span	ψ (°)	τ (°)	ν (°)	γ (°)
19,40	19,46	50,45	1,68	75,66	12,77

Les paramètres de Huynen bruts correspondants, sont donnés par:

A0	B0	B	C	D	E	F	G	H
4,65	5,11	-4,69	-1,83	0,68	-1,92	0,57	0,63	9,53



Si nous appliquons ces valeurs à l'entrée du processus de caractérisation nous obtenons les résultats suivants (en %).

Sphère	Dièdre	Dip H	Dip V	Hélice G	Hélice D
1,33	23,20	77,67	0,001	71,23	0,28

Nous pouvons constater que le système ne peut pas caractériser le dipôle orienté à 45°, puisqu'il présente des résultats faisant apparaître la présence d'un dipôle horizontal, d'une hélice gauche, ainsi que d'une cible du type dièdre.

L'application directe des paramètres de Huynen bruts ne permet pas d'obtenir des résultats satisfaisants. Au regard, des valeurs prises par les paramètres d'Euler, il se dégage une orientation de la cible autour de la ligne de visée du radar non nulle ($\psi=50,45^\circ$), ce qui est confirmé par la forte valeur du paramètre H ($H=9,53$).

Dans ce cas, il s'avère indispensable d'effectuer une opération de désorientation, afin d'éliminer l'angle d'orientation de la cible [2] ainsi qu'une opération de normalisation [2], qui est effectuée en divisant chaque paramètre par la valeur du SPAN correspondant au dipôle orienté à 45°.

Les paramètres de Huynen "désorientés" et "normalisés" sont égaux à :

AO	BO	B	C	D	E	F	G	H
0,23	0,26	0,26	0,49	-0,03	0,01	0,03	0,03	0,00

Les résultats obtenus après l'application du processus de caractérisation sont les suivants (en %)

Sphère	Dièdre	Dip H	Dip V	Hélice G	Hélice D
3,87	2,39	95,19	0,00	21,75	0,48

La cible a donc été caractérisée comme un dipôle horizontal à 95%. Il ne faut pas oublier que l'angle d'orientation de la cible a été intégré aux états de polarisation émission-réception, aussi, dans cette nouvelle base le radar perçoit maintenant le dipôle comme étant aligné ici, avec le vecteur de polarisation parallèle unitaire, d'où l'identification à un dipôle horizontal. L'angle d'orientation étant égal à 50,45°.

8 CONCLUSION.

L'introduction du concept de la POLARIMETRIE dans le domaine de l'imagerie électromagnétique haute résolution a montré qu'il était possible d'utiliser l'aspect vectoriel des ondes afin d'améliorer la reconnaissance des zones brillantes [3].

Dans ce papier, nous avons présenté une méthode originale de reconnaissance basée sur l'utilisation de modèles de réseaux neuronaux. Il semble qu'un tel processus de caractérisation, utilisant les capacités d'apprentissage et de décision équivalentes à celles du cerveau humain, devienne rapidement un axe de recherche très prometteur dans le domaine radar. Ce procédé utilisé pour l'analyse et l'identification de zones brillantes, permet de se faire une idée complète sur les caractéristiques géométriques et physiques de la cible.

Cette étude de faisabilité a permis de montrer que les théories de la POLARIMETRIE et de l'Intelligence Artificielle sont très complémentaires, grâce au nombre important d'invariants polarimétriques associés à toute cible radar.

Aussi, une étude plus approfondie de certains modules caractéristiques devrait permettre d'aboutir à la conception d'un processus de caractérisation "intelligent" des plus performants.

9 REMERCIEMENTS.

Les auteurs tiennent à remercier le CELAR (Centre Electronique de l'ARmement - BRUZ - FRANCE) sans qui, cette étude n'aurait pu être menée à bien.

10 REFERENCES.

[1] E. POTTIER - J. SAILLARD. "Polarimétrie et Imagerie radar haute résolution". Journées Internationales de la Polarimétrie Radar. IRESTE, NANTES, Mars 1990.

[2] J.R. HUYNEN. "Phenomenological theory of radar targets". Ph.D Dissertation. DRUKKERIJ BRONDER-OFFSET N.V., ROTTERDAM, 1970.

[3] E. POTTIER. "Contribution de la Polarimétrie dans la discrimination de cibles radar. Application à l'imagerie électromagnétique haute résolution". THÈSE de Doctorat de l'Université de RENNES I. IRESTE, Laboratoire S2HF. Décembre 1990.

[4] J. SAILLARD - E. POTTIER "Full polarimetric wide-band measurements and clutter signatures analysis". PIERS 91, Cambridge, Massachusetts, USA, Juillet 1991.

[5] E. DAVALO - P. NAIM "Des réseaux de neurones". Editions EYROLLES.

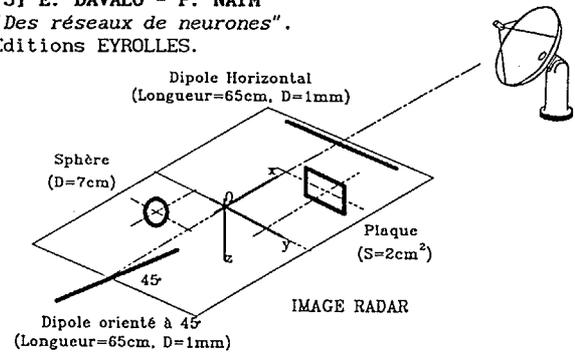


FIGURE N°1

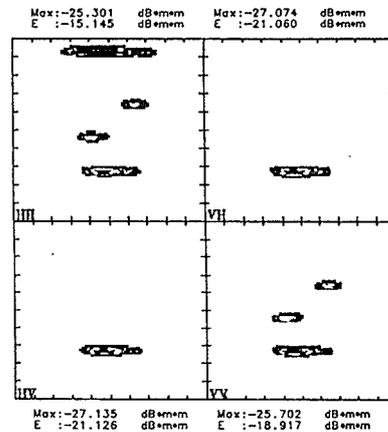


FIGURE N°2

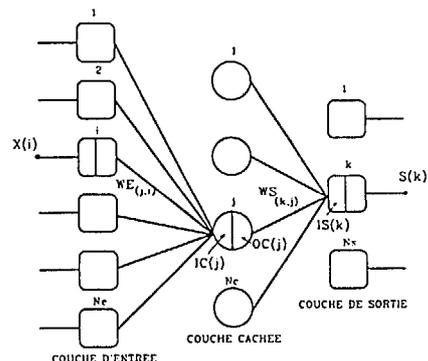


FIGURE N°3