

# NEUVIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 16 au 20 MAI 1983

---

ETUDE DE LA STRUCTURE D'ECHOS D'AVIONS EN VOL

MEVEL J., MEVEL A., ESNAULT A.

UNIVERSITE DE RENNES I - LABORATOIRE DE RADIOELECTRICITE - CAMPUS DE BEAULIEU - 35042 RENNES CEDEX

---

## RESUME

Nous présentons des résultats d'observation d'avions commerciaux à réaction en vol. Le principe des mesures consiste à enregistrer l'amplitude de l'écho, puis, en temps différé, à effectuer l'analyse de Fourier de ces enregistrements découpés en tranches successives de deux secondes. Les figures présentées ici, sont découpées dans des séquences de mesure beaucoup plus longues, dont elles illustrent des aspects typiques.

Les résultats concernent plusieurs types d'avions des catégories bi, tri ou quadrimoteurs, ils complètent les résultats déjà publiés par ailleurs relatifs aux avions à hélice. Essentiellement on observe, à côté d'une structure basse fréquence caractérisant le défilement des lobes de la figure de diffraction, des raies fines que nous attribuons aux modulations de l'onde radar par les pales de l'étage d'entrée du compresseur et peut être par celles de l'étage de sortie de la turbine.

L'analyse de ces fréquences de modulation pourrait fournir des éléments de signature des types d'avions (nombre et caractéristiques des moteurs).

## SUMMARY

We present some results relating to radar observation of commercial jets in flight. The principle of the measurements is first to record the amplitude of the echo, then, to compute the Fourier spectra of these records cut in two second periods. The figures appearing here are cut in sequences a great deal longer. They illustrate some typical aspects of these sequences.

These results relate to several aircraft types with two, three or four engines. They complete the results relating to propeller aircrafts already published. Fundamentally, in addition to a low frequency structure relating to the variations of the radar cross section during the relative motion of the aircraft in relation to the radar, we observe several well defined frequencies that we relate to radar wave modulations by the blades of the first stage of the compressor and perhaps by the blades of the last stage of the turbine.

The analysis of these frequencies can furnish signature data for these aircrafts (number of engines and motor characteristics).



## I - PRINCIPE DE LA METHODE D'ETUDE

Les études qui suivent concernent la structure d'échos d'avions de lignes commerciales observés en vol à l'aide d'un radar à poursuite automatique fonctionnant en bande S, soit une fréquence porteuse voisine de 3 GHz. Le principe d'analyse utilisé consiste à déterminer le spectre de la fonction du temps constituée par les amplitudes d'échos, approximativement compensée du terme en  $R^{-4}$  qui caractérise l'atténuation géométrique de propagation, par l'action d'une commande automatique de gain agissant d'après l'amplitude moyenne de l'écho.

Le montage utilisé est, dans son principe, identique à celui décrit antérieurement [1]. Il en diffère par l'amélioration de la réalisation technique. Les caractéristiques essentielles en sont :

- radar à poursuite automatique par balayage cône à 35,5 Hz. Fréquences de récurrences très stables, valeur nominale 400 Hz commutable à 405 Hz. Durée d'impulsion : 1  $\mu$ sec. Polarisation réglable, horizontale, verticale, circulaire droite ou gauche, la même polarisation est employée à l'émission et à la réception.
- analyse fréquentielle par calcul de la transformée de Fourier : la bande analysée est en général 0-200 Hz avec un pas de 0,5 Hz.

Le balayage cône présente l'inconvénient de provoquer une modulation parasite de fréquence fondamentale 35,5 Hz. Cette modulation se traduit dans le spectre par des raies harmoniques surtout observables à 35,5 et 71 Hz dont l'amplitude varie selon l'importance du dépointage, donc avec la "qualité" de la poursuite. Dans la plupart des enregistrements ces raies apparaissent nettement.

L'échantillonnage à 400 Hz provoque un repliement du spectre, toutes les fréquences supérieures à 200 Hz sont altérées. La permutation 400/405 Hz permet de lever le doute sur la vraie valeur de la fréquence par observation du sens et de la grandeur du déplacement correspondant de la fréquence apparente des raies, excepté lorsque celles-ci se trouvent au voisinage des fréquences de repliement, soit  $k \times 200$  Hz et  $k' \times 202,5$  Hz,  $k$  et  $k'$  entiers. Cette restriction n'apparaît pas gênante en pratique.

## II - PRESENTATION GENERALE DES RESULTATS

Les avions observés appartiennent à un petit nombre de classes présentant de nombreuses variantes, notamment au niveau de l'appareil de propulsion. Les vols s'effectuent généralement suivant une direction à peu près méridienne, dont le plan passe à quelques kilomètres du radar. Pour chaque passage, nous représentons la trajectoire par sa projection horizontale et par sa projection verticale sur le plan méridien, cette procédure facilite l'interprétation des résultats.

Les analyses fréquentielles sont effectuées sur des ensembles de 512 points dont les 400 premiers sont retenus pour la présentation. Ils couvrent la bande 0 - 200 Hz sauf indication contraire et l'intervalle de temps séparant deux spectres successifs correspond à deux secondes environ. Les origines des spectres sont régulièrement décalées pour une meilleure lecture.

Dans leur très grande généralité, les trajectoires sont rectilignes, à altitude constante. Dans ces conditions, nous avons montré [2] que si l'on suppose l'avion rigide avec un vecteur vitesse constant, le défilement des lobes de la section efficace de rétrodiffusion

provoque une modulation de l'écho radar dont le spectre ne s'étend pas au-delà de 15 à 20 Hz. Ce calcul utilise le modèle classique des "points brillants" certainement valable à la longueur d'onde utilisée.

On observe effectivement ce spectre sur toutes les trajectoires lorsque l'avion est assez proche. Ce spectre est très fluctuant, donc difficile à analyser. La figure 1 en donne un exemple.

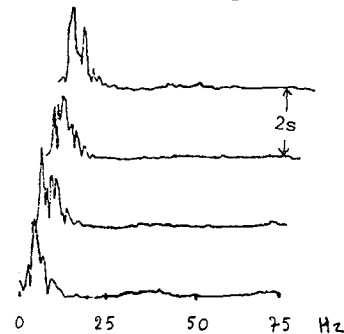


FIGURE 1 - SPECTRES BASSE FREQUENCE DES ECHOS

On remarque par ailleurs, sur des portions bien définies de la trajectoire, des raies très nettes correspondant à une fréquence apparente souvent très stable. Les mesures de lever d'ambiguïté montrent que ce sont en fait des raies repliées correspondant à des fréquences réelles de l'ordre de quelques kilohertz. Nous les attribuons à la modulation par les éléments tournants des turboréacteurs, essentiellement par l'étage d'entrée du compresseur. On sait que la vitesse de rotation de ces machines est, pour des conditions de vol données, très stable, parce que réglée au minimum de consommation qui est très pointu pour un régime de marche donné.

La disparition de ces raies spectrales intervient en général au voisinage du passage au plus près : on pourrait donc penser à l'intervention d'une saturation par l'action de la commande automatique du gain. L'introduction d'un atténuateur dans la chaîne de réception a permis d'éliminer cette hypothèse. De plus, dans certains cas, les raies ne réapparaissent pas lorsque l'avion est vu de l'arrière.

## III - ETUDE DES DIFFERENTS TYPES D'APPAREILS

### A - BIREACTEURS

#### BOEING 737

Le Boeing 737 est équipé de deux réacteurs placés en dessous des ailes. Les étages d'entrée des compresseurs sont très visibles pour un radar au sol, lorsque l'appareil est vu de l'avant. La visibilité des réacteurs cesse peu avant le passage au plus près. 98 passages d'avions de ce type ont été analysés.

Sur tous les enregistrements on constate la présence de deux raies voisines très stables (figure 2) lorsque l'appareil circule en vol horizontal.

La procédure de lever de doute montre que la fréquence est repliée et que sa valeur vraie est de l'ordre de 3500 Hz. Par exemple, un passage donne 3900 Hz, un autre 3581 Hz. Selon la revue Aviation Week [3] la fréquence caractéristique de l'étage d'entrée du compresseur définie comme étant le produit de la vitesse maximale de rotation de cet organe par son nombre de pales est 3875 Hz. Les valeurs observées correspondent respectivement à 85 % et 93 % du maximum, elles semblent



# ETUDE DE LA STRUCTURE D'ECHOS D'AVIONS EN VOL

compatibles avec les conditions de vol horizontal.

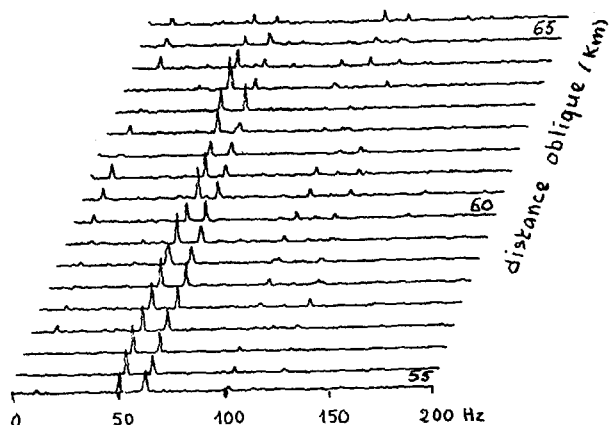


FIGURE 2 - VOL HORIZONTAL EN DIRECTION DU RADAR

La figure 3 présente un enregistrement correspondant à une descente de l'avion. Dans ces conditions, le pilote réduit le régime du moteur. Ceci se traduit par un accroissement de la fréquence ambiguë résultant évidemment du repliement. Ce comportement se reproduit chaque fois qu'un avion de ce type amorce une descente.

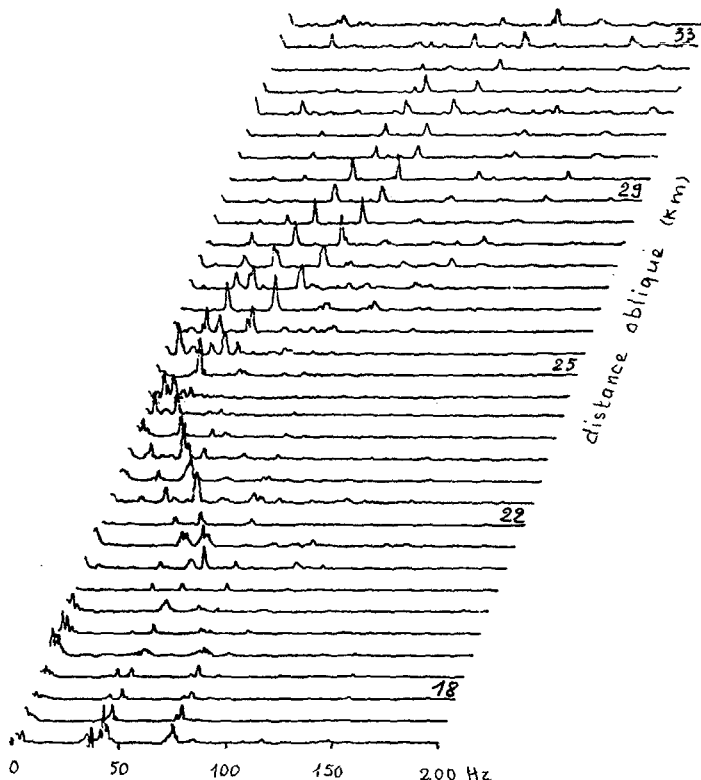


FIGURE 3 - DEBUT DE DESCENTE DE L'AVION

Pour ces raisons, nous attribuons à la modulation par les palettes de l'étage d'entrée du compresseur, la double raie fine du Boeing 737. Notons que cet aspect du spectre est si caractéristique qu'un opérateur exercé peut identifier immédiatement ce type d'avion.

### Mc DONNELL DOUGLAS DC 9

L'avion Mc Donnell Douglas DC 9 est équipé de deux réacteurs disposés de part et d'autre de la carlingue, à l'arrière de cette dernière et sensiblement plus haut que l'aile. Il en résulte qu'ils sont peu visibles

pour un radar au sol.

Les mesures effectuées sur 43 passages mettent en évidence une différence d'allure frappante par rapport aux spectres du Boeing 737. Alors que pour ce dernier, il était possible d'observer les raies dans le spectre des échos dès l'acquisition par le radar de l'avion, c'est-à-dire dès les distances de 90 km, pour le DC 9, les raies correspondantes n'apparaissent que faiblement et à des distances qui excèdent rarement 40 km, (figure 4). On remarque la disparition rapide au passage au plus près des raies de turbine. Par ailleurs, suivant la manière dont l'avion se présente, un seul réacteur peut être visible du radar, l'autre étant masqué par la carlingue.

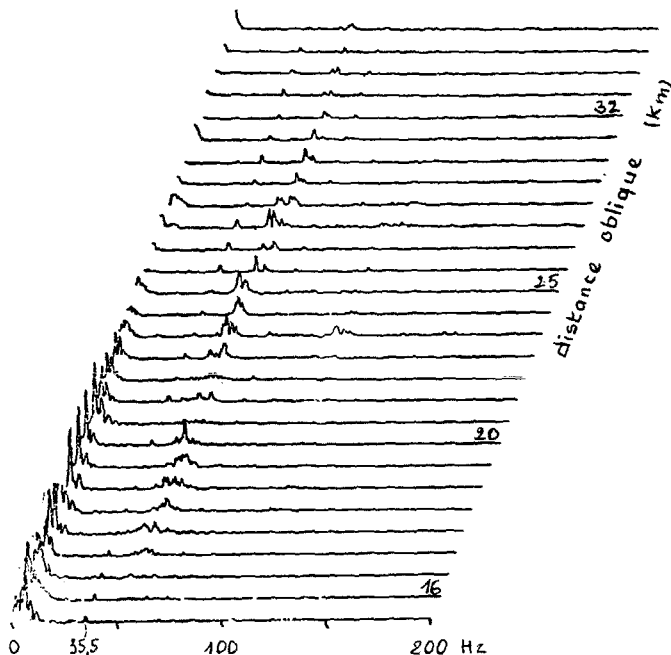


FIGURE 4 - DC 9 - VOL HORIZONTAL EN DIRECTION DU RADAR

Sur certains graphiques on aperçoit, lorsque l'avion est vu d'arrière, des raies faibles qui pourraient correspondre à une modulation de l'onde électromagnétique par les étages de sortie de la turbine. Les mesures sont trop incertaines pour permettre une attribution sûre.

### BRITISH AIRCRAFT CORPORATION BAC 111

Géométriquement, le biréacteur BAC 111 ressemble au DC 9, mais ses dimensions sont légèrement inférieures. Il n'est donc pas étonnant que l'allure générale des spectres présente de fortes similitudes avec celle du DC 9.

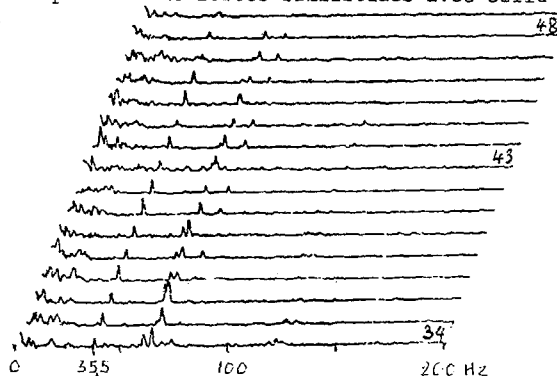


FIGURE 5 - BAC 111 - VOL HORIZONTAL EN DIRECTION DU RADAR



## ETUDE DE LA STRUCTURE D'ECHOS D'AVIONS EN VOL

Les mesures effectuées sur 18 passages, mettent en évidence une ou deux raies de moteurs suivant l'attitude de l'avion, à des distances quelque peu supérieures (45 à 50 km) à celles qui étaient perçues dans le cas du DC 9. On remarque la disparition rapide au passage au plus près des raies de turbines.

### AIRBUS 300

L'Airbus 300 est un biréacteur dont les groupes turbopropulseurs implantés sous les ailes sont très visibles de l'avant. Son aspect rappelle assez celui du Boeing 737. On note cependant que l'aile de l'Airbus présente une structure très complexe, formée de plusieurs volets que l'on étend au décollage et à l'atterrissage et qui sont repliés en vol.

On observe des raies doubles dans les huit passages enregistrés. Tandis que dans le Boeing 737 les raies doubles étaient stables, elles présentent dans le cas de l'Airbus 300 des variations importantes (figure 6). Une mesure de lever d'ambiguïté indique une fréquence vraie de 2500 Hz (figure 7). Les variations apparentes sont de l'ordre de 100 Hz, ce qui ne représente donc que 4% de la fréquence vraie.

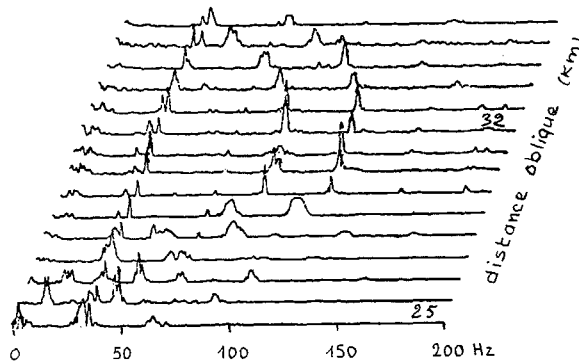


FIGURE 6 - AIRBUS 300 - INSTABILITE

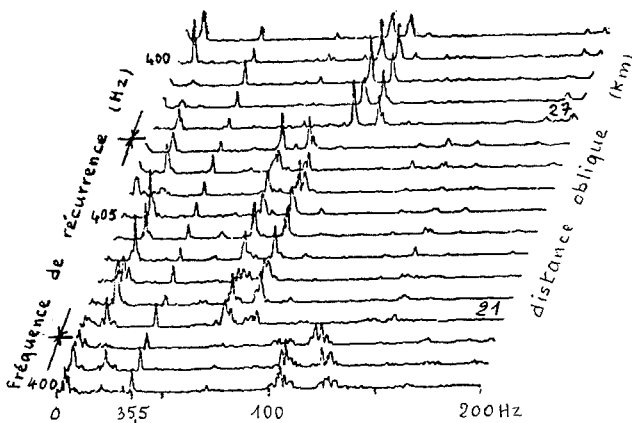


FIGURE 7 - AIRBUS 300 - LEVER D'AMBIGUITE

Contrairement aux autres types d'avions, l'Airbus présente des raies très nettes vues de l'arrière. Pour un même passage, la fréquence mesurée était de 2495 Hz en présentation avant et de 3315 Hz en vue arrière. Ceci suggère que l'origine des raies arrière pourrait être liée à la rotation des étages de sortie de la turbine. A cette date, aucune caractéristique précise des turbines Pratt et Whitney JT9 (nombre de tours et de pales), n'a pu être obtenue, ce qui laisse la question en suspens.

### FOKKER 28

L'aspect général du biréacteur Fokker 28 est presque semblable à celui du BAC 111 et du DC 9, mais les réacteurs sont situés plus près du centre de l'appareil. Nous n'avons observé que quatre de ces avions.

Vu de l'avant, le spectre apparaît à une distance de 70 km du radar. Il se traduit par une raie très régulière et généralement simple (figure 8). Vu de l'arrière, on observe de nouveau une structure que le trop petit nombre de passages n'a pas permis de préciser.

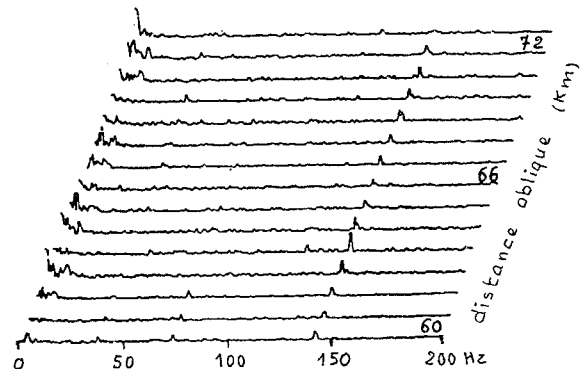


FIGURE 8 - VOL HORIZONTAL D'UN FOKKER 28 VERS LE RADAR

### B - TRIREACTEURS

#### BOEING 727

Les groupes turbopropulseurs de cet avion sont implantés au niveau de l'empennage arrière, deux de part et d'autre de la carlingue, le troisième encastré dans le stabilisateur longitudinal. 17 passages ont été analysés.

Comme pour le DC 9 et le BAC 111, les raies spectrales sont souvent peu marquées. A quelques exceptions près, elles ne sont guère visibles en présentation avant, tant que la distance excède 50 km du radar. Il est possible, pendant des parcours limités, d'observer simultanément les raies des trois réacteurs (figure 9).

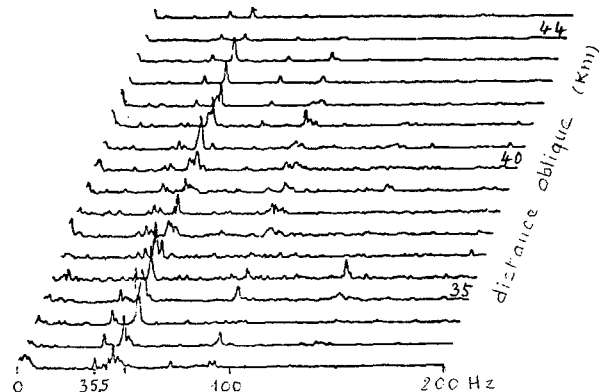


FIGURE 9 - VOL HORIZONTAL D'UN BOEING 727 VERS LE RADAR

#### Mc DONNELL DOUGLAS DC 10

Deux groupes turbopropulseurs sont implantés sous les ailes en position assez avancée par rapport au bord d'attaque, le troisième est encastré dans le stabilisateur arrière, un peu au-dessus de la carlingue, il est donc peu visible pour un radar au sol (figure 10).

ETUDE DE LA STRUCTURE D'ECHOS D'AVIONS EN VOL

Ce type d'avion n'a été observé que 5 fois. Il est caractérisé par des raies doubles très nettes observables à grande distance (dès 80 km), ces raies disparaissent lorsque l'avion s'approche du radar. On note souvent des variations assez importantes de la fréquence de ces raies, nous avons déjà signalé ce phénomène  $|4|, |1|$ .

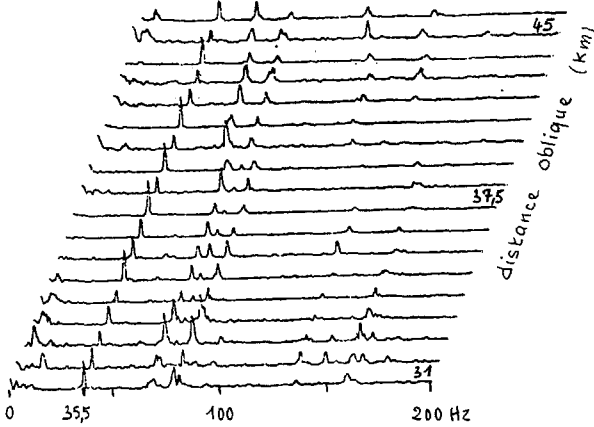


FIGURE 10 - VOL HORIZONTAL D'UN DC 10 VERS LE RADAR

C - QUADRIRÉACTEURS

Plusieurs quadriréacteurs ont été observés : ils appartiennent à 5 groupes différents. Le nombre de passages enregistrés par groupe est trop faible pour permettre une étude précise, mais des caractéristiques générales valables pour tous les quadriréacteurs peuvent être dégagées :

- 1) Lorsque l'avion est vu approximativement de l'avant, les raies caractéristiques des turboréacteurs sont visibles à très grande distance, en fait dès accrochage de la poursuite automatique vers 100 km.
- 2) Lorsque les turboréacteurs sont visibles du radar, on observe quatre raies qui peuvent être plus ou moins séparées, certaines d'entre elles peuvent se confondre presque exactement. De nombreux enregistrements donnent l'impression de deux raies doubles.
- 3) Pour certaines attitudes de l'avion vu du radar, la structure de l'appareil peut masquer certains réacteurs et provoquer la disparition des raies correspondantes.
- 4) Lorsque l'avion est vu d'arrière, on observe de nouveau les modulations dues aux réacteurs et ceci même si la direction du vol de l'avion est sensiblement inclinée relativement au radar.
- 5) Tous les enregistrements relatifs aux quadriréacteurs présentent un spectre fortement bruité.

BOEING 707

Trois appareils de ce type ont été observés. Sur la figure 11, l'avion vient approximativement vers le radar, le groupe des deux raies doubles est particulièrement caractéristique.

On note la présence sur le graphique de raies de fréquence apparente faible dont nous n'avons pu identifier l'origine, l'opération de lever de doute n'ayant pas été effectuée au moment opportun.

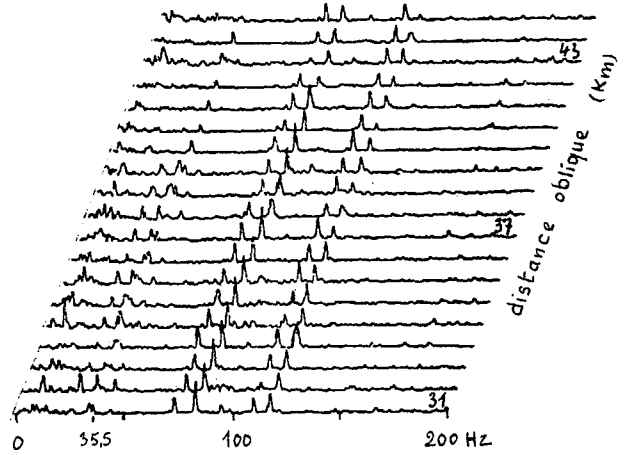


FIGURE 11 - VOL HORIZONTAL D'UN BOEING 707 VERS LE RADAR

BOEING 747

Cinq passages ont été enregistrés. Pour trois d'entre eux, l'avion était observé du radar sous forte inclinaison. La figure 12 est relative à l'un de ces trois cas, elle représente les phénomènes au voisinage d'une distance oblique de 60 km. Les quatre raies des réacteurs sont particulièrement nettes. Au cours du même passage, en vue arrière, les raies de réacteurs restaient observables jusqu'à plus de 60 km.

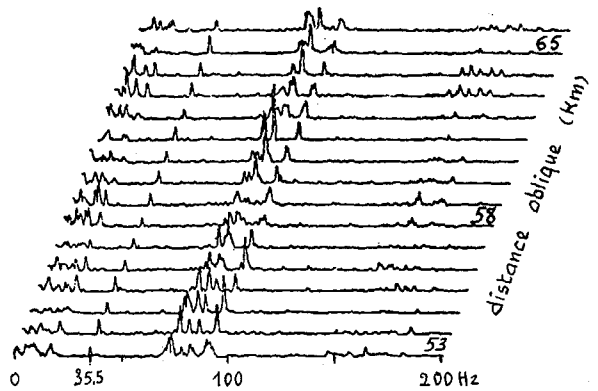


FIGURE 12 - VOL HORIZONTAL D'UN BOEING 747 EN ATTITUDE INCLINEE

Mc DONNELL DOUGLAS DC 8

Trois passages de DC 8 ont été analysés. On note la présence de raies très voisines de structure complexe présentant comme précédemment jusqu'à quatre composantes

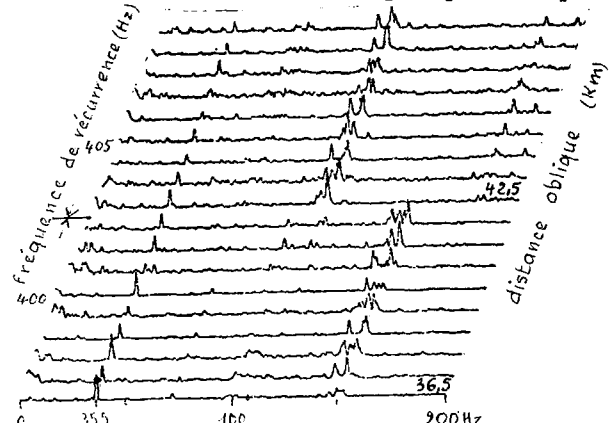


FIGURE 13 - VOL HORIZONTAL D'UN DC 8 EN ATTITUDE INCLINEE





## ETUDE DE LA STRUCTURE D'ECHOS D'AVIONS EN VOL

distinctes. Ces raies sont observables en vue avant (figure 13) et en vue arrière avec une intensité suffisante pour qu'il soit possible de déterminer les fréquences vraies correspondantes.

On a effectué deux mesures de fréquences vraies pour chaque aspect. Les premières ont donné respectivement 3350 et 3345 Hz, les secondes 3415 et 3417 Hz. Entre ces deux groupes de mesures, l'avion avait parcouru plus de 60 km. En l'absence de données précises sur la structure des réacteurs, on ne peut pas établir si cette différence, d'ailleurs faible (2%) provient d'une variation du régime des moteurs ou du fait qu'on observerait dans le premier cas l'étage d'entrée du compresseur, dans le second, l'étage de sortie de la turbine. La question est importante en ce qu'elle permet d'évaluer les éléments du réacteur qui produisent l'écho.

### LOCKHEED C 141

Un seul appareil de ce type a été observé, la route suivie était dirigée presque exactement vers le radar.

On constate de nouveau la présence de deux groupes de deux raies en vue de l'avant qui réapparaissent lorsque l'avion est vu de l'arrière (figure 14).

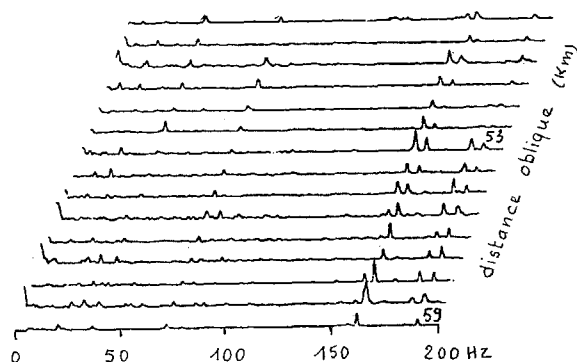


FIGURE 14 - VOL HORIZONTAL D'UN C 141 VERS LE RADAR

### CONCLUSION

Le résultat essentiel mis en évidence au cours de ce travail est la possibilité de mesurer les fréquences de la modulation d'amplitude de l'onde radar provoquée par la rotation des palettes des turboréacteurs. On peut donc déterminer à l'aide d'un radar classique le nombre de réacteurs et également des fréquences permettant une classification des types de réacteurs utilisés. L'observation de ces modulations fournit donc un élément de signature de cible. Dès à présent, certains types d'avions de ligne en vol régulier, peuvent être reconnus sûrement au seul aspect de l'évolution temporelle de leurs spectres.

Les études sont poursuivies afin d'obtenir des données supplémentaires sur des quadriréacteurs et également pour évaluer l'influence de modifications de paramètres du radar : fréquence, durée d'observation sur la qualité des résultats obtenus. En particulier on examine la possibilité d'utiliser un radar de veille, fournissant des informations discontinues, pour l'obtention des spectres.

### BIBLIOGRAPHIE

- [1] MEVEL J.Y., LAUNAY G.  
Signature d'avions à l'aide du radar monostatique. Annales des Télécommunications, tome 36, n° 5-6 (1981), p. 347-358.
- [2] CHASSAY G., LAUNAY G., MEVEL J.Y., SAILLARD J.  
Méthode d'extraction de données relatives à des modèles de points brillants à partir de l'analyse de la puissance diffractée. 8<sup>e</sup> Colloque sur le Traitement du Signal et ses applications. Nice, GRETSI, 1981.
- [3] AVIATION WEEK, 22 février 1982, p. 81. Air Florida 737 voice recorder transcribed.
- [4] LAUNAY G.  
Etude et réalisation d'un analyseur de spectre et d'un corrélateur en temps réel et applications à l'étude des échos radar. Thèse de Doctorat de 3<sup>e</sup>me cycle. "Electronique, option Electronique appliquée aux Télécommunications". Rennes, 28 septembre 1979.