

Amplitude et polarisation des ondes UBF détectées à bord du satellite GEOS-1. Méthodes d'analyse, problèmes rencontrés et solutions pratiques

Patrick ROBERT *, Kunihiro KODERA *, Sylvaine PERRAUT *,
Roger GENDRIN *, Claude de VILLEDARY *

Analyse

Les auteurs décrivent rapidement une méthode d'analyse de signaux polarisés permettant de déterminer la fréquence, l'amplitude et la polarisation instantanées d'ondes UBF détectées dans un référentiel de mesure qui tourne à une fréquence proche de celles des ondes étudiées. Cette méthode est appliquée aux données des satellites européens GEOS-1 et 2, stabilisés par rotation à environ 0,17 Hz. Le champ magnétique statique local comporte une forte composante perpendiculaire à l'axe de rotation du satellite, qui induit donc dans les antennes une forte composante à la fréquence de rotation. Une partie de ce signal parasite est éliminée directement à bord par un système despin. Mais la perturbation restante affecte toutes les fréquences du spectre de puissance dans une proportion qui dépend de la valeur relative du temps d'intégration et de la période de rotation. Les auteurs étudient en détail cette modification du spectre et montrent que l'on peut s'en affranchir grâce à une méthode simple de traitement numérique au sol. Les deux méthodes conjointes permettent de produire en routine des sommaires pour expérimentateurs, grâce auxquels on peut suivre, au cours du temps, les principales caractéristiques des ondes détectées.

AMPLITUDE AND POLARIZATION OF THE ULF WAVES DETECTED ON BOARD THE GEOS-1 SATELLITE. METHOD OF ANALYSIS, PROBLEMS ENCOUNTERED AND PRACTICAL SOLUTIONS

Abstract

A method for analysing polarized signals is briefly described. This method is applied to the instantaneous

frequency, amplitude and polarization of ULF waves detected in a frame of reference rotating at frequency close to the one of the waves being studied. This method is being applied to the data obtained from the European satellites GEOS-1 and 2, which are stabilized by rotation at about 0.17 Hz. The local static magnetic field has a strong component perpendicular to the satellite rotation axis, therefore inducing in the antennas a strong component at the rotating frequency. Part of this parasitic signal is eliminated directly on board the satellite owing to a despin system. But the remaining disturbance affects all the frequencies of the power spectrum with a ratio depending on the relative value of the integration time and the rotation period. This modification of the spectrum is studied in detail and the authors demonstrate that it can be avoided with an easy method of signal processing at the ground. Both methods used jointly allow the production as a routine basis of experimenter summaries enabling to know at each moment the main characteristics of the waves being detected.

Sommaire

Introduction.

I. Résultats.

II. Méthode de traitement du signal utilisée.

III. Problèmes majeurs rencontrés et solutions pratiques.

Conclusion.

Bibliographie (1 réf.)

* Centre de Recherches en Physique de l'Environnement Terrestre et Planétaire CNET/ETE, 3, avenue de la République, 92131 Issy-les-Moulineaux, France.

INTRODUCTION

I. RÉSULTATS

L'article montre comment les principales caractéristiques des ondes électromagnétiques d'ultra-basse fréquence ($f < 11$ Hz) détectées par le satellite européen GEOS-1 ont pu être étudiées, principalement par le calcul de la variation au cours du temps de leur amplitude et de leur polarisation.

L'article présente d'abord les résultats, et ensuite la méthode numérique de traitement du signal utilisée, en mentionnant les problèmes majeurs rencontrés et leurs solutions pratiques.

La figure 1 représente un exemple de *sommaire expérimentateur*, qui permet de résumer sur 2 vues les principales caractéristiques des ondes détectées pendant une durée de 3 h.

La vue supérieure (frame 1) est constituée de spectrogrammes, c'est-à-dire d'une représentation, dans un diagramme temps-fréquence, de la densité spectrale de puissance des ondes détectées. Le noircissement du grisé est une fonction croissante de la densité spectrale de puissance, la correspondance étant loga-

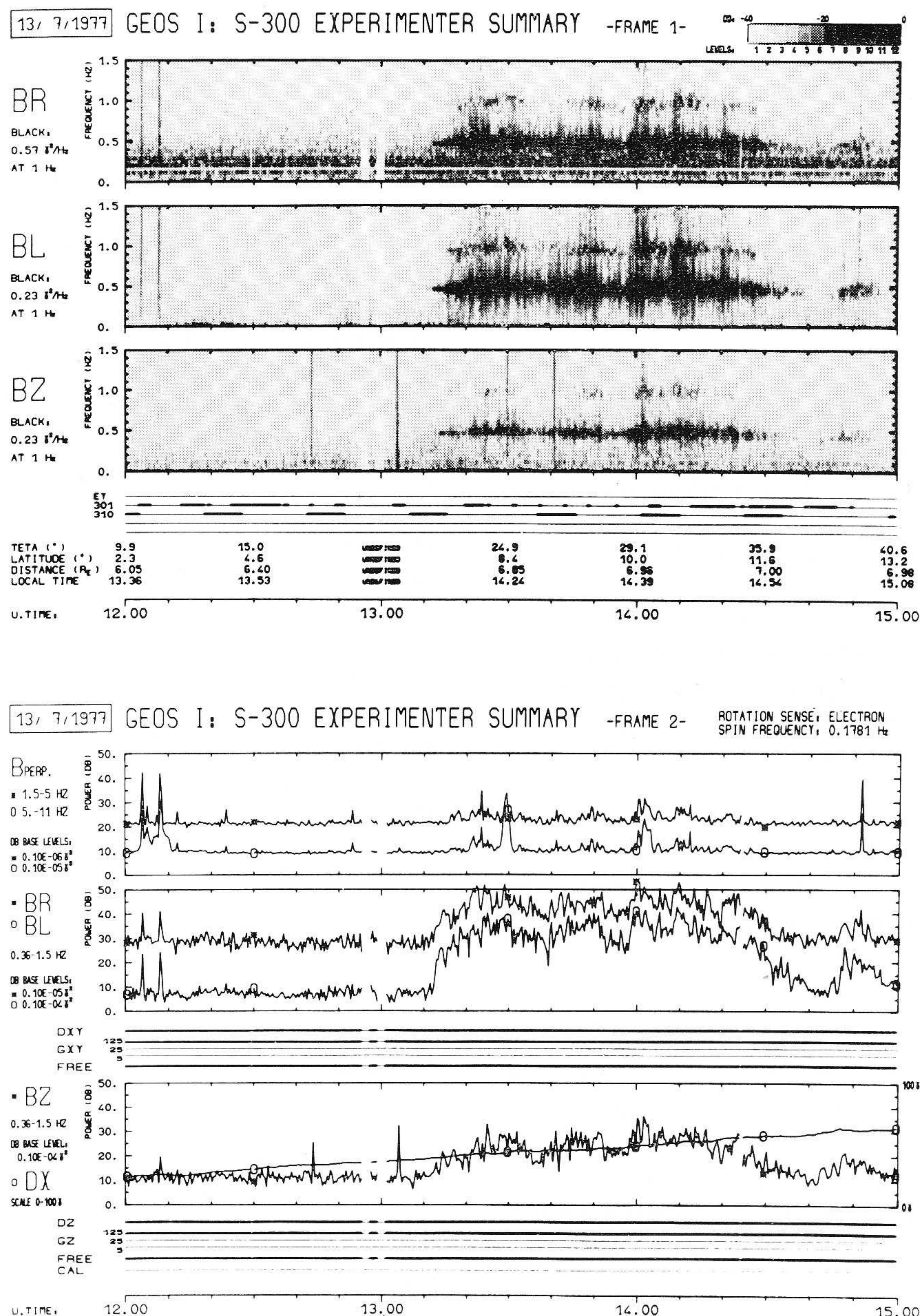


FIG. 1. — Exemple de sommaire expérimentateur (2 vues couvrant une durée de 3 heures de données).

Example of an experimenter summary (2 frames per 3 h).

rithmique et les 12 niveaux de grisé couvrant une plage totale de 40 dB. La valeur du niveau le plus fort (en noir) est donnée pour chaque mode en γ^2/Hz , à gauche de la représentation tridimensionnelle.

Les ondes sont décomposées sur 3 modes de polarisation de base : un mode longitudinal (B_z), correspondant à l'axe $\vec{z}$ de rotation du satellite, et 2 modes circulaires gauche et droit (B_L et B_R), dont le sens de rotation est défini dans le plan perpendiculaire à $\vec{z}$.

D'autres informations sont également mentionnées, mais il faut noter particulièrement la valeur de l'angle θ entre l'axe $\vec{z}$ de rotation et le vecteur de champ magnétique statique local $\vec{B}_0$. En effet, la décomposition en ondes droite et gauche a un sens géophysique lorsqu'elle est effectuée dans le plan perpendiculaire à la ligne de force du champ statique $\vec{B}_0$. La connaissance de l'angle θ permet donc d'évaluer la validité physique de la décomposition effectuée dans le plan perpendiculaire à l'axe $\vec{z}$ de rotation.

La vue inférieure (frame 2) représente simplement la puissance du signal, intégrée dans diverses bandes de fréquences entre 0 et 11 Hz, qui est la fréquence de Nyquist utilisée.

II. MÉTHODE DE TRAITEMENT DU SIGNAL UTILISÉE

La méthode d'analyse du signal est celle définie par Koderá *et al.* [1], appliquée au cas d'une onde plane. La mise en œuvre pratique de cette méthode appliquée aux données de GEOS-1, ainsi que les principaux problèmes rencontrés et les solutions adoptées seront détaillés ailleurs ultérieurement (*), et il ne sera présenté ici qu'un résumé.

On s'intéresse aux composantes x et y contenues dans le plan perpendiculaire à l'axe z de rotation, et on forme le signal complexe

$$S_{xy} = x + iy.$$

Ce signal est décomposé par une transformée de Fourier rapide FFT (Fast Fourier Transform), non pas dans une base de fonctions sinusoïdales, mais dans une base de fonctions circulaires, gauches et droites (désignées respectivement par S_{xy}^- et S_{xy}^+), ce que l'on peut toujours faire dans le cas d'une onde plane.

L'intérêt du signal complexe S_{xy} est que la partie correspondant aux fréquences négatives de sa transformée de Fourier nous donne directement et simplement le mode gauche, tandis que la partie correspondant aux fréquences positives donne le mode

droit. On notera toutefois que la distinction entre les modes S^+ et S^- ne constitue qu'un premier pas dans la détermination de la polarisation des ondes. La vraie distinction s'établit entre puissance circulaire,

$$P_c = |S^+|^2 - |S^-|^2$$

qui peut être positive ou négative suivant que l'onde est principalement droite ou gauche, et puissance linéaire [1]

$$|P_l| = 2|S^+ S^-|.$$

La figure 2 montre trois exemples d'ondes planes monochromatiques, et la transformée de Fourier de leur signal complexe associé S_{xy} . Ainsi, une seule transformée de Fourier donne directement la polarisation et l'amplitude dans chaque mode, gauche et droit, des ondes détectées dans le plan xy . Un autre point important réside dans le fait que les densités spectrales de puissance obtenues par cette méthode sont complètement indépendantes de la direction des axes de mesure x et y , ce qui est particulièrement intéressant dans le cas de mesures effectuées à bord d'un satellite en rotation sur lui-même.

Ainsi, et comme c'est le cas pour le satellite GEOS, lorsque le référentiel de mesure tourne autour de l'axe $\vec{z}$ à une fréquence f_s proche des fréquences des ondes que l'on veut étudier, le changement de base effectué dans le domaine temps pour se ramener à un référentiel fixe est simplement égal à une translation dans le domaine des fréquences, et l'on trouve

$$R_{xy}(f) = S_{xy}(f + f_s)$$

où R_{xy} est la densité spectrale de puissance dans le référentiel en rotation, et S_{xy} la densité spectrale de puissance dans un référentiel fixe.

Le diagramme de la figure 3 illustre cette relation. Par exemple, le champ magnétique statique B_0 est vu dans le référentiel en rotation comme une onde gauche de fréquence $-f_s$. Cette raie est fortement atténuée (de l'ordre de 25 dB) par un système *despin* implanté dans le satellite. Ce système atténuant différemment les voies x et y (la différence est de l'ordre de 3 dB), le champ continu statique est vu à la sortie de la chaîne de mesure, non pas comme une onde circulaire gauche, mais comme une onde elliptique gauche, et il apparaît donc une seconde raie à $+f_s$.

Après translation, nous avons donc 2 raies dues à la rotation, l'une à $f = 0$ et l'autre à $f = 2f_s$, sur le mode droit. A ces deux raies parasites s'ajoute le fait que la fonction de transfert des antennes est nulle pour $f = 0$ dans le repère du satellite, les antennes étant constituées par des bobines d'induction.

La densité spectrale de puissance que l'on déduit des mesures n'est donc pas définie pour cette fréquence qui, après translation, devient égale à f_s . Les spectres de puissance pour le mode droit présenteront donc une cannelure blanche à la fréquence f_s .

(*) ROBERT (P.). Intensité et polarisation des ondes UBF détectées à bord de GEOS 1. Méthode d'analyse numérique du signal et production en routine de sommaires expérimentateurs. Problèmes rencontrés et solutions. Note technique CRPE/ETE du CNET, à paraître.

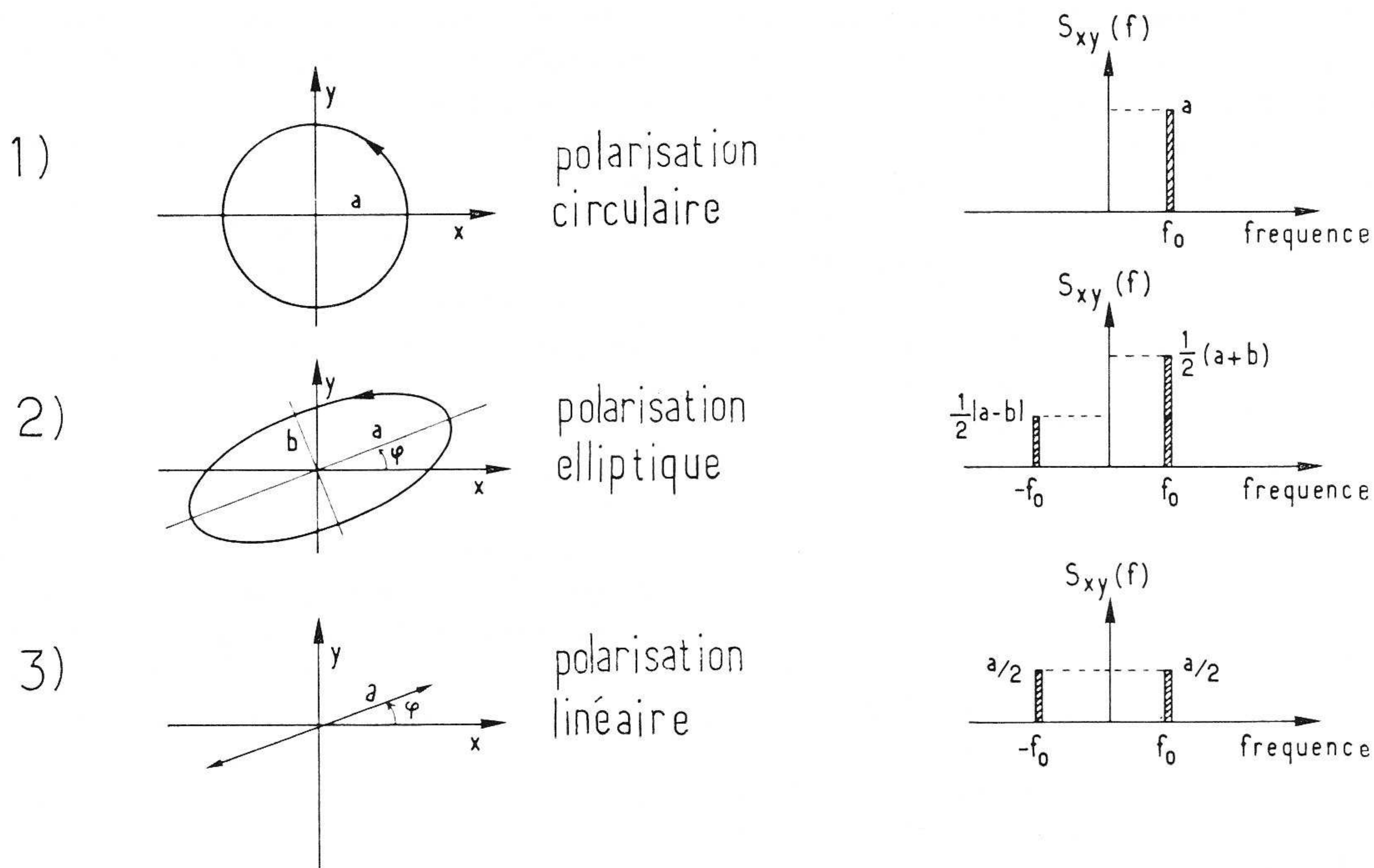


FIG. 2. — Transformée de Fourier du signal complexe S_{xy} associé à une onde plane monochromatique pour 3 exemples particuliers.

Fourier transform of the complex signal S_{xy} associated to a monochromatic plane wave for three particular examples.

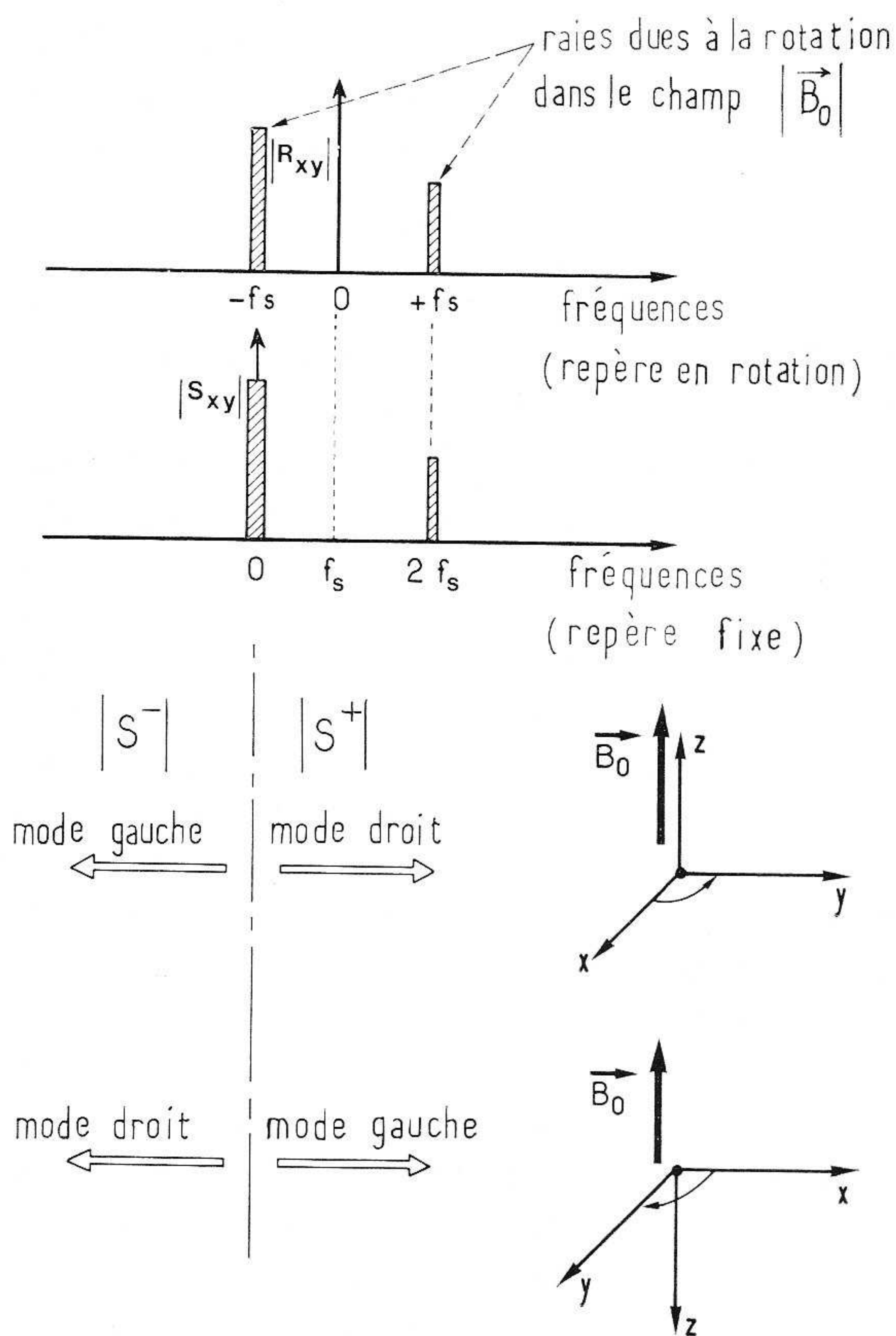


FIG. 3. — Correspondance entre les fréquences mesurées dans un repère en rotation et les fréquences calculées dans un repère fixe. Définition des modes gauche et droit.

Correspondence between the frequency measured in a rotating frame and the frequency computed in a fixed frame. Definition of the left-hand and right-hand modes.

L'intérêt de l'utilisation du signal complexe S_{xy} est également mis en valeur sur la figure 4, où l'on a comparé l'analyse obtenue en traitant chaque composante x , y et z séparément, et celle obtenue en traitant le signal complexe S_{xy} et la composante z .

Dans les deux cas, la correction de toutes les fonctions de transfert de la chaîne a été effectuée, ce qui nous permet de remonter aux densités spectrales de puissance initiale, en γ^2/Hz .

On peut remarquer que dans le cas des composantes individuelles x , y , z , la composante z parallèle à l'axe de rotation montre un seul phénomène à la fréquence $f_1 \approx 0,52 \text{ Hz}$, tandis que pour les composantes perpendiculaires x et y , le phénomène est dédoublé. En effet, pour chacune de ces composantes mesurées dans un repère tournant, la fréquence du mode gauche est augmentée, tandis que celle du mode droit est diminuée. Il y a par conséquent un mélange de modes qu'il est difficile d'interpréter, plus particulièrement lorsque plusieurs ondes de fréquences différentes se superposent simultanément.

En revanche, lorsqu'on effectue par l'intermédiaire du signal complexe la séparation entre ondes gauche et droite, et qu'on se ramène par simple translation dans un repère fixe, le phénomène est observé à la même fréquence f_1 sur chaque mode. Il n'y a donc aucune ambiguïté dans ce cas, même pour plusieurs phénomènes simultanés de fréquence différente.

Comme on l'a vu précédemment, le champ magnétique statique introduit une raie parasite à $f = 2f_s$ sur le mode droit, et la forme de la fonction de trans-

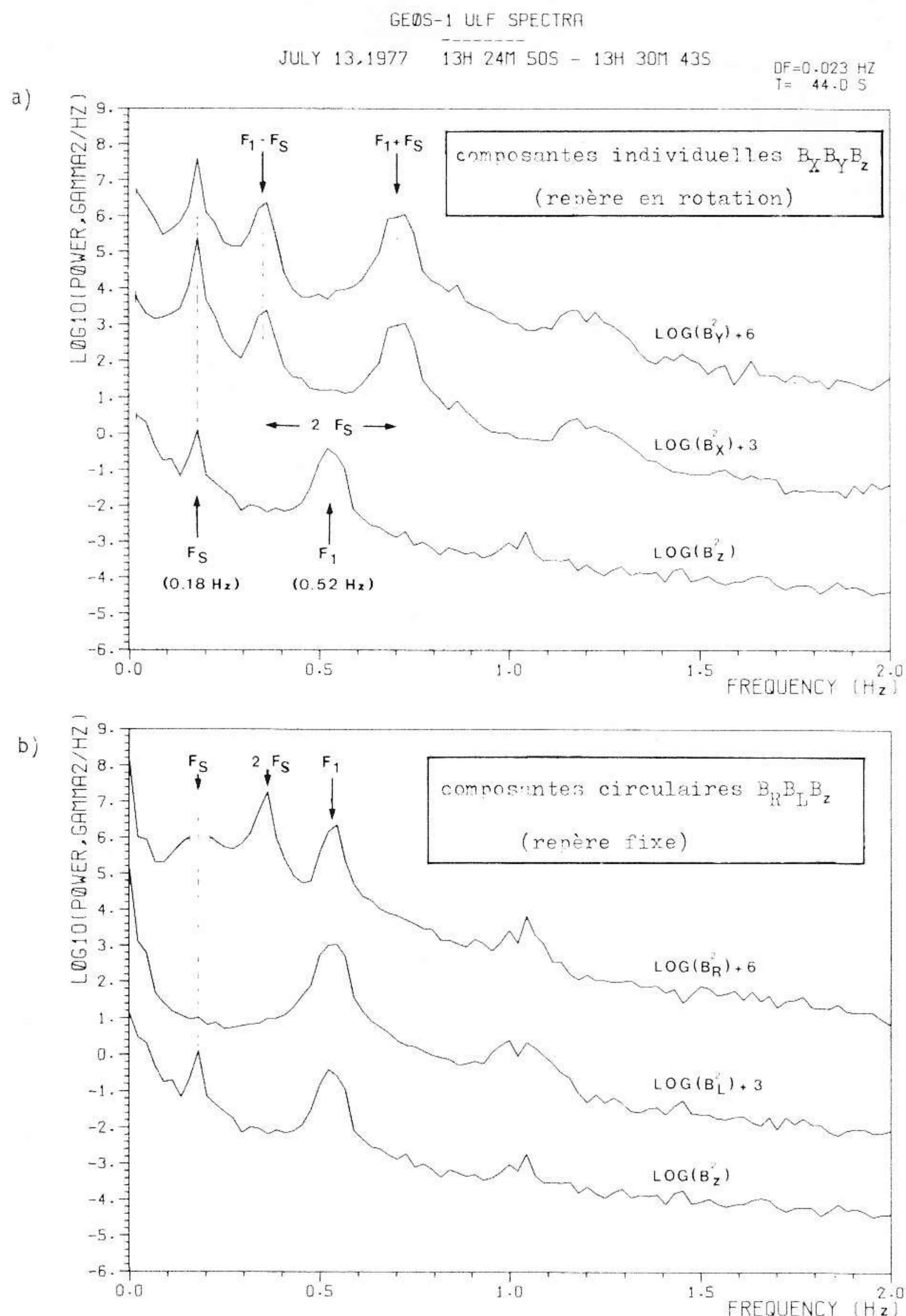


FIG. 4. — Comparaison entre l'analyse spectrale des composantes individuelles xyz (a) et l'analyse spectrale du signal complexe S_{xy} et de la composante z (b).

Comparison between the spectral analysis of (a) the three individual components xyz and of (b) the complex signal S_{xy} and the z component,

fert des antennes introduit une cannelure à $f = f_s$ sur ce même mode, le mode gauche n'étant pas altéré.

On peut remarquer une raie parasite à $f = f_s$ sur le mode z , dont l'axe de mesure est supposé fixe. En fait, l'axe de mesure magnétique z et l'axe de rotation du satellite ne sont pas exactement parallèles : il y a une différence de l'ordre de 1° , qui, compte tenu de la valeur élevée du champ magnétique statique, suffit à expliquer l'existence de cette raie parasite.

III. PROBLÈMES MAJEURS RENCONTRÉS ET SOLUTIONS PRATIQUES.

En calculant les spectres consécutifs selon la méthode précédemment exposée, et en mettant à zéro les raies parasites, on peut obtenir une première version des sommaires. Néanmoins un effet perturbateur important apparaît alors, comme on peut le voir sur la figure 5. Dans le cas de spectres consé-

cutifs, on observe une très forte modulation avec le temps des densités spectrales de puissance. Cette modulation affecte toutes les fréquences sans discrimination ; elle est particulièrement visible sur les courbes de puissances intégrées, et elle peut présenter des formes variées d'un jour à l'autre, ainsi que nous le voyons sur les différents exemples de la figure 5.

On peut interpréter cette modulation par le fait que les transformées de Fourier sont prises sur une durée de signal qui n'est pas un multiple entier de la période de rotation (entre 3 et 4), alors que la composante du signal à la fréquence de rotation est la composante majeure de ce signal. En conséquence, la valeur moyenne du signal est calculée sur un nombre non entier de période de rotation, et présente donc au cours du temps une modulation lente à une période qui va dépendre du rapport du temps T sur lequel est calculée la transformée de Fourier (dans notre cas, $T = 22,016$ s) sur la période de rotation T_r du satellite (de l'ordre de 5 à 6 s).

On peut démontrer (*) que toutes les composantes du spectre de puissance, et pas seulement la fréquence nulle correspondant à la valeur moyenne, sont également modulées avec cette même période lente. Cette modulation est en phase quelle que soit la fréquence considérée. La puissance spectrale intégrée sera donc modulée à ladite période.

Considérons en effet la sinusoïde due à la seule rotation des antennes de mesure dans le champ statique, et exprimée sous la forme :

$$x_n(t) = a_r \sin [2\pi t/T_r + \varphi_n]$$

où n est l'indice des portions successives (de durée T) sur lesquelles on effectue la transformée de Fourier. Puisque ces portions sont consécutives, $\varphi_n = \varphi_1 + 2\pi(n-1)T/T_r$, et on peut montrer que leur spectre de puissance est donné par :

$$X_n(k) X_n^*(k) = a_r^2 \{ A(k, T, T_r) + B(k, T, T_r) \times \sin^2 [(2n-1)\pi T/T_r + \varphi_1] \} / 4,$$

où B représente l'amplitude du terme de modulation, dont l'expression exacte est donnée dans (*). n étant une variable discrète, le spectre de puissance n'est pas à proprement parler périodique. Cependant, il reprend une valeur à peu près égale lorsque n a varié de p , entier, tel que $2pT/T_r$ soit lui-même voisin d'un entier. La pseudo-période de modulation est alors $T_m = pT$.

Dans le cas particulier où T/T_r est un entier m , et dans ce cas seulement, B est nul et $A = \delta_{mk}$, mais ce cas n'est hélas pratiquement jamais réalisé dans la mesure où, d'une part T est imposé par l'utilisation d'une transformée de Fourier rapide agissant sur un nombre de points égal à une puissance de 2, et d'autre part la période de rotation T_r varie lentement au cours du temps.

(*) Voir note page 181.

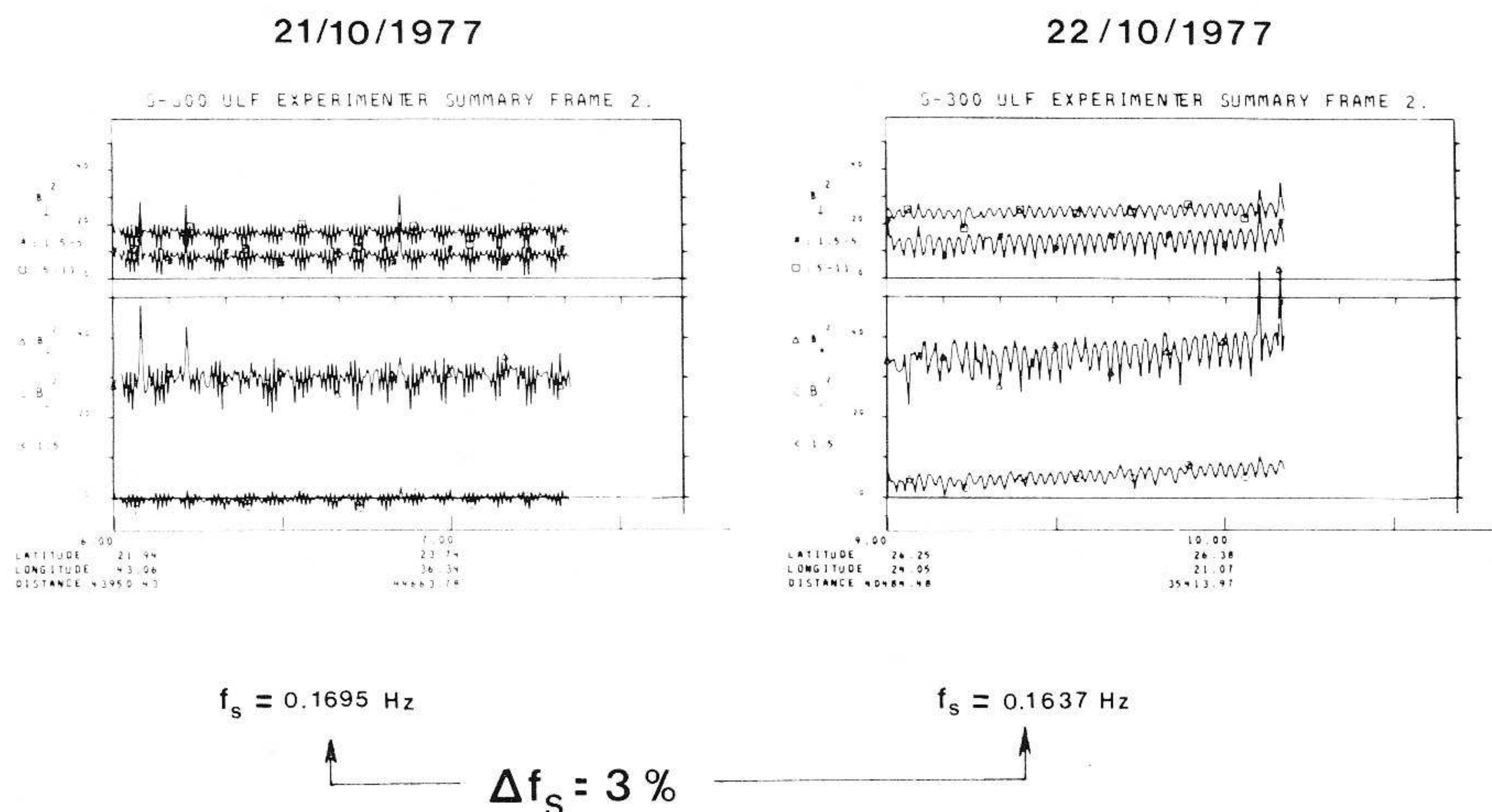
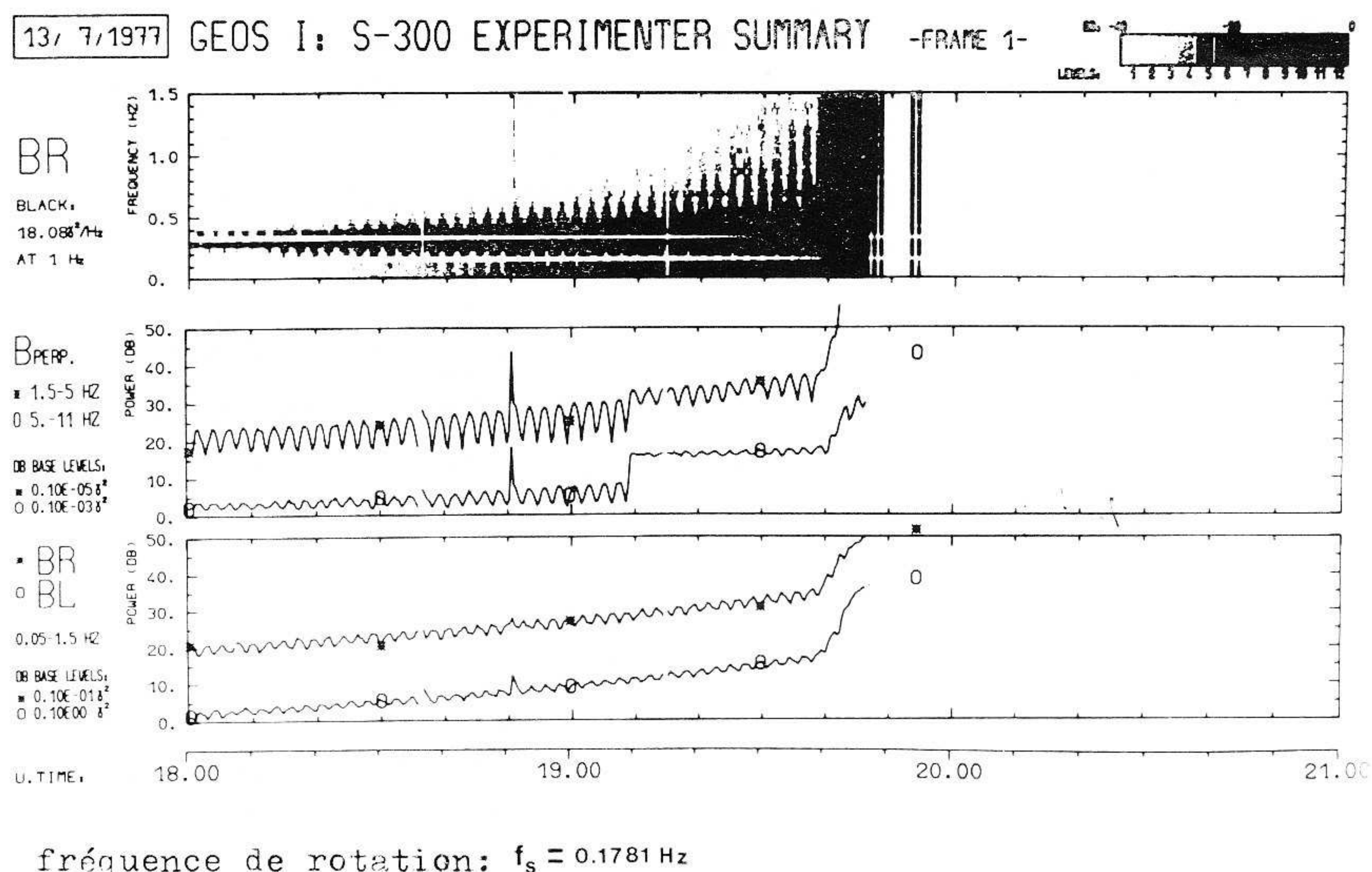


FIG. 5. — Exemples de modulation au cours du temps des densités spectrales de puissance (spectres consécutifs). Cette modulation est due à la superposition au signal utile de la forte composante sinusoïdale à la fréquence de rotation f_s du satellite.

FIG. 5. — *Examples of observed modulations of the spectral density (consecutive spectra). This modulation is produced by the superposition of the useful signal and of the large sinusoidal component induced at the spin frequency f_s of the space craft.*

La forme de la modulation est très sensible aux variations de la fréquence de rotation, comme on peut le remarquer sur le bas de la figure 5, où une variation de 3 % de cette fréquence donne des allures très différentes à la modulation des courbes de puissance (la variation de 3 % observée entre ces deux jours consécutifs est liée à une manœuvre du satellite). Le calcul analytique précédent, associé à une simulation numérique, a montré que cette interprétation était correcte, et nous a conduits à mettre au point un système numérique de suppression du signal à la fréquence de rotation (*).

Cette méthode exige la connaissance de la fréquence de rotation avec une précision supérieure à 1 %, ce qui permet de calculer avec la même précision l'amplitude et la phase de la sinusoïde pure qui peut

alors être retranchée numériquement point par point au signal.

Le principe de ce calcul est d'effectuer une transformée de Fourier réduite au calcul des deux seules composantes d'ordre $\pm q$ correspondant à la fréquence de rotation, mais effectuée sur une durée T' de signal qui corresponde à un nombre entier de périodes de rotation.

On calcule donc le nombre entier maximal q de périodes de rotation comprises dans l'échantillon de durée T (q doit être supérieur ou égal à 1) et le nombre N_c de points de numérisation correspondant (qui n'est généralement pas une puissance de 2), équivalent à la durée $T' = qT_r$ (dans le cas pratique qui nous intéresse, $q = 3$ et T' est de l'ordre de 16 à 18 s).

On calcule alors le terme

$$C_q = \frac{1}{N_c} \sum_{m=1}^{N_c} x'_m e^{-2i\pi qm/N_c} = \rho e^{i\lambda},$$

(*) Voir note page 181.

où x'_m est le signal numérisé contenant la sinusoïde pure à la fréquence de rotation $1/T_r$ et le signal utile.

Afin de réduire le temps de calcul (qui serait considérable si on programmait cette formule telle quelle), l'algorithme utilisé calcule les termes sinusoïdaux par récurrence, en utilisant la formule de Moivre, ce qui permet de calculer cette expression au moyen de deux appels seulement à la fonction sinus.

L'amplitude et la phase de la sinusoïde pure sont alors $a_r = 2\rho$ et $\varphi = x + \pi/2$.

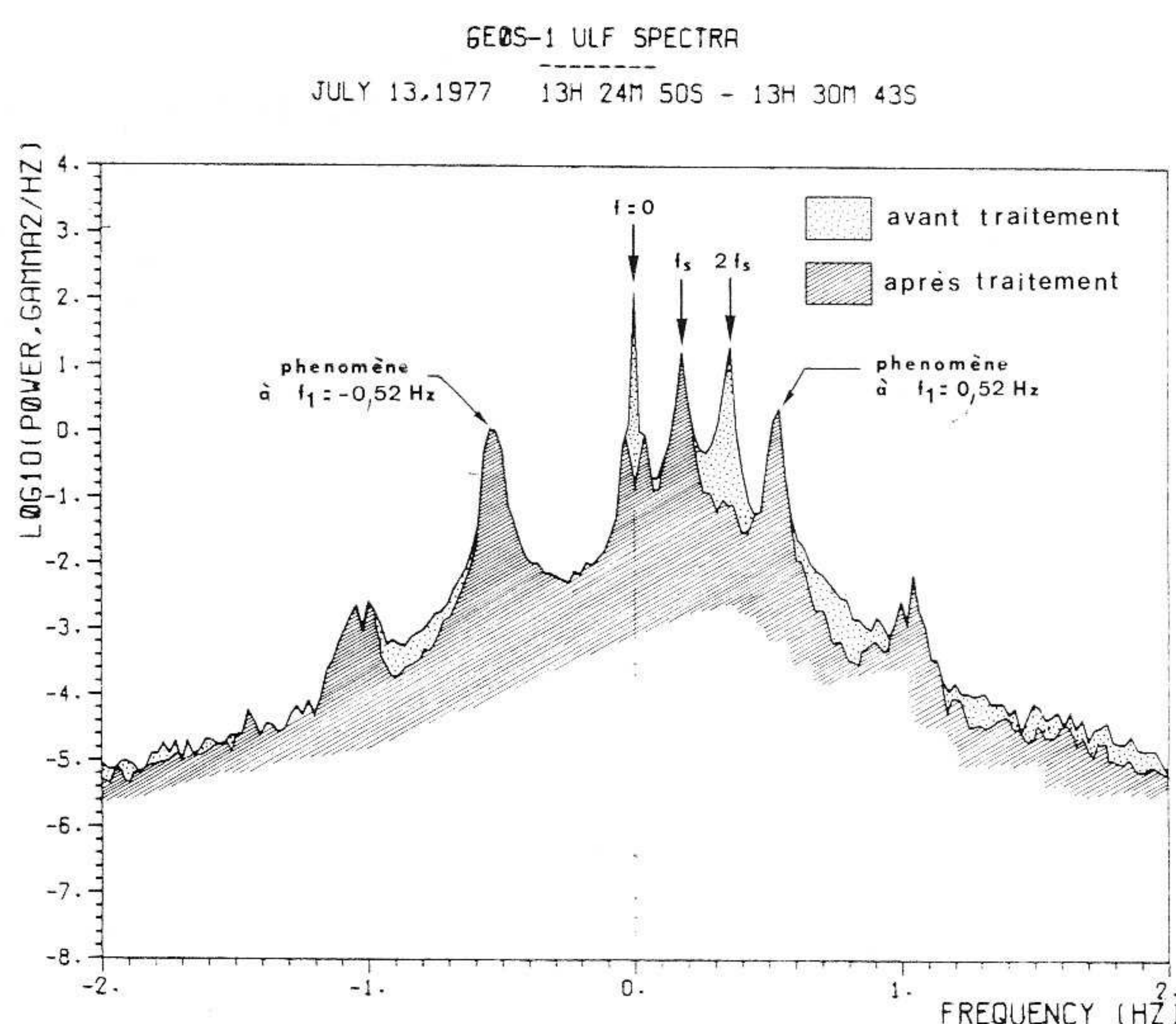


FIG. 6. — Spectre de puissance obtenu avant et après l'application du traitement numérique d'élimination, dans le domaine temps, de la sinusoïde à la fréquence de rotation du satellite. Power spectra obtained after the removal (in the time domain) of the strong signal at the spin frequency.

Cette sinusoïde est retranchée point par point au signal, également par récurrence, à partir des deux valeurs de base $\sin(2\pi q/N_c)$ et $\cos(2\pi q/N_c)$.

Ce système est efficace, comme on peut le voir sur la figure 6, où l'on a comparé un spectre calculé avec et sans ce traitement particulier. On peut remarquer que la correction effectuée affecte non seulement les raies liées à la fréquence de rotation, mais également toutes les fréquences. On peut noter également que, comme prévu, la raie à $f = 2f_s$ sur le mode droit a complètement disparu. Ce traitement est également appliqué au mode z, afin d'éliminer la raie parasite à $f = f_s$ sur ce mode.

Enfin, l'application de ce programme à des spectres consécutifs conduit à des sommaires propres, comme on peut en juger sur la figure 7, où l'on a comparé un exemple de sommaires calculés avant et après ce traitement particulier de suppression de l'effet de rotation. Non seulement la modulation et la raie parasite à $f = 2f_s$ ont complètement disparu, mais des phénomènes auparavant masqués ou peu visibles apparaissent à présent très nettement, en particulier sur les courbes de puissance qui étaient inexploitable auparavant.

CONCLUSION

La méthode de décomposition d'un signal polarisé en deux composantes circulaires de sens opposés est

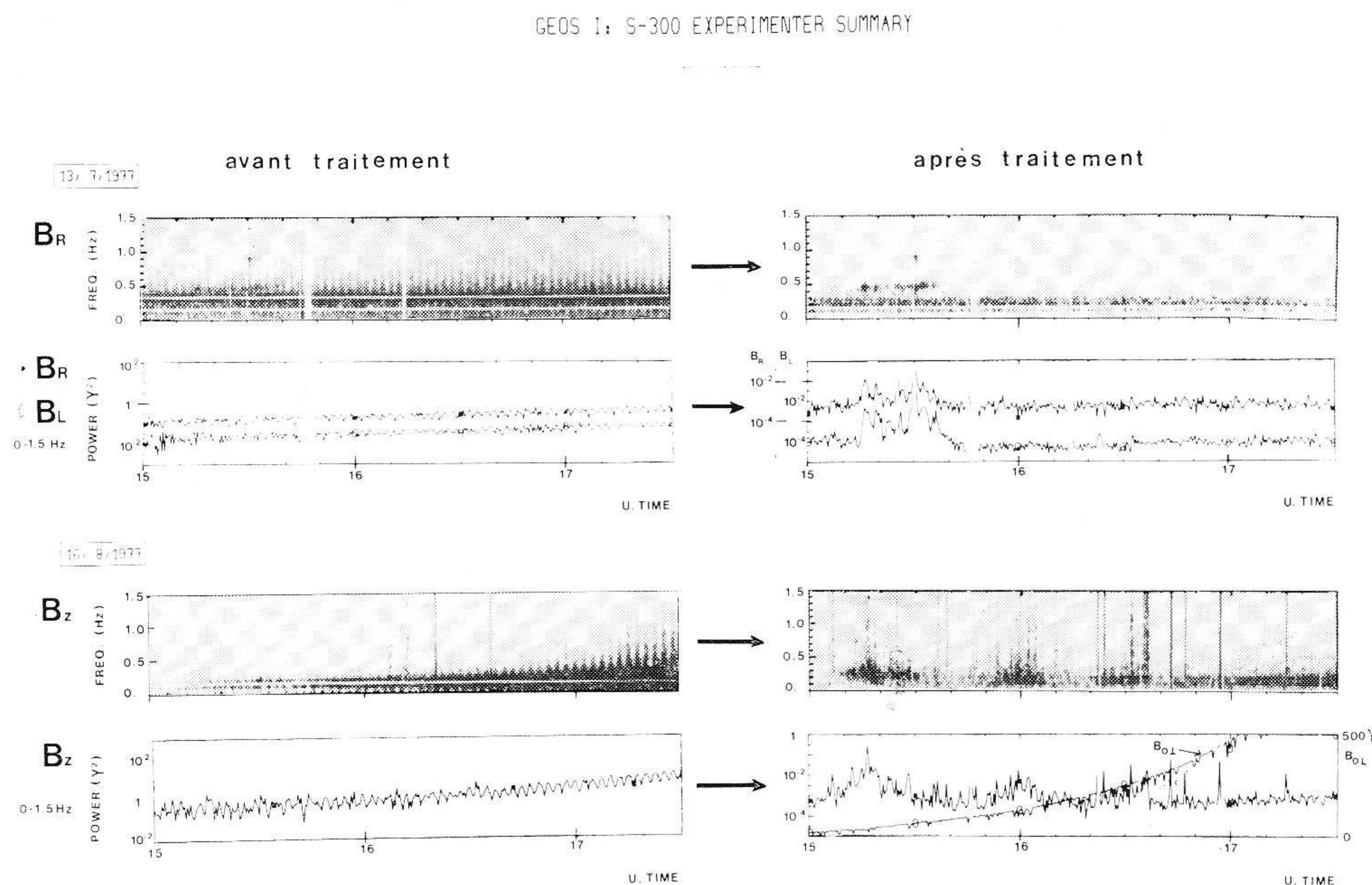


FIG. 7. — Exemples de sommaires expérimentateurs « propres » obtenus après le traitement numérique d'élimination de la sinusoïde à la fréquence de rotation du satellite. On remarque la disparition de la modulation très intense qui faussait la mesure de l'amplitude intégrée et l'apparition concomitante de phénomènes naturels sur les deux types de représentation.

FIG. 7. — Examples of « clean » experimenter summaries obtained after the removal of the signal at the spin frequency. One notices the disappearance of the intense modulation which perturbed the measurement of the integrated power, and the existence of natural phenomena which now become visible on both of representation.

particulièrement bien adaptée aux mesures effectuées dans un référentiel tournant. Dans le cas de la mesure des ondes UBF observées à bord d'un satellite stabilisé par rotation, un certain nombre de phénomènes parasites sont produits par l'existence du champ magnétique continu (de l'ordre de 100γ) qui risque de masquer les phénomènes naturels d'amplitude beaucoup plus faible (de l'ordre de $10 \text{ m}\gamma$). Bien qu'un système analogique ait été installé à bord du satellite pour diminuer ces effets, il a été nécessaire d'établir une méthode de traitement sur ordinateur pour les éliminer complètement. La méthode mise au point a permis de produire en routine des sommaires *propres* tels que celui présenté sur la figure 1, pour toutes les données UBF obtenues à l'aide du satellite GEOS-1. Cette méthode sera également appliquée aux données du satellite GEOS-2.

REMERCIEMENTS.

Les auteurs sont redevables au CNES des moyens informatiques puissants mis à leur disposition, et remercient tout particulièrement MM. Avignon et Forcioli pour leur efficacité et la part quasi totale qu'ils ont prise dans la réalisation et la mise au point des programmes d'exploitation.

Manuscrit reçu le 6 décembre 1978.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] KODERA (K.), GENDRIN (R.), DE VILLEDARY (C.). Complex representation of a polarized signal and its application to the analysis of ULF waves. *J. Geophys. Res.*, U. S. A. (1977), **82**, pp. 1245-1255.