

## Caractéristiques des échos quasi-périodiques observés par le radar NOSTRADAMUS en bande HF

---

A. Bourdillon <sup>(1)</sup>, P. Dorey <sup>(2)</sup> and S. Saillant <sup>(2)</sup>

(1) IETR, Université de Rennes 1, UMR CNRS 6164, Campus de Beaulieu, 35042, Rennes, France, [alain.bourdillon@univ-rennes1.fr](mailto:alain.bourdillon@univ-rennes1.fr)

(2) ONERA, DEMR/RBF, Chemin de la Hunière, 91761 Palaiseau, France

---

**Résumé.** Depuis leur découverte au MU radar au Japon, les échos quasi-périodiques (QP) ont fait l'objet d'un grand nombre études à l'aide de systèmes radar. En raison de la forte dépendance de la puissance rétrodiffusée avec l'angle d'aspect, pendant longtemps on a essayé d'imaginer des processus avec des irrégularités se déplaçant le long des lignes de force du champ magnétique. On présente ici des échos QP observés avec le radar NOSTRADAMUS à la fréquence 13.4 MHz. On utilise la possibilité de balayer l'espace avec le faisceau de l'antenne de réception pour montrer que les irrégularités se déplacent en fait à altitude quasiment constante. Parfois les échos peuvent provenir de plusieurs azimuts en même temps. Dans les exemples présentés ici les irrégularités se déplacent vers le sud-ouest.

**Mots clés.** Irrégularités, radar HF, échos quasi-périodiques

---

### Introduction

Les échos QP ont été observés pour la première fois au MU radar par Yamamoto et al. [1] et ils ont ensuite fait l'objet de nombreuses études pour tenter de comprendre ce phénomène [2], [3], [4], [5]. Ces échos sont dus à la rétrodiffusion des ondes radar par des irrégularités du plasma de la région E et qui satisfont à la condition de Bragg. Ce mécanisme dépend fortement de l'angle d'aspect ( $\psi$  angle entre le vecteur d'onde et le champ magnétique terrestre) aussi, pendant longtemps, on a supposé que la condition de l'angle d'aspect était strictement vérifiée ( $\psi=90^\circ$ ), ce qui permettait d'estimer l'altitude des irrégularités. Dans ce travail on utilise les possibilités de balayage de l'espace fournies par le radar NOSTRADAMUS pour étudier les variations temporelles de l'altitude et de l'azimut des zones rétro diffusantes et on montre que la condition d'angle d'aspect n'est pas strictement vérifiée. La configuration expérimentale est exposée dans le paragraphe 1 et les échos QP sont ensuite présentés dans le paragraphe 2. Le traitement des données par balayage de l'espace fait l'objet du paragraphe 3 et il est suivi par la discussion-conclusion dans le paragraphe 4.

### 1. Echos QP

La figure 1 présente un diagramme distance-temps-intensité obtenu par le radar NOSTRADAMUS le 20 juillet 2006 dans l'azimut  $357^\circ$ , un angle d'élévation de  $25^\circ$ , une résolution distance de 5 km à la fréquence 13,4 MHz. Ce diagramme montre plusieurs types d'échos : des échos dus à la rétrodiffusion du sol au delà de 300 km, quelques échos de météorites, avec en particulier un écho fort de météorite à l'indice temporel 1400 et 3 échos quasi-périodiques (QP) aux distances comprises entre 190 km et 240 km. La pente négative des échos QP correspond à une variation de la distance d'environ 67 m/s.

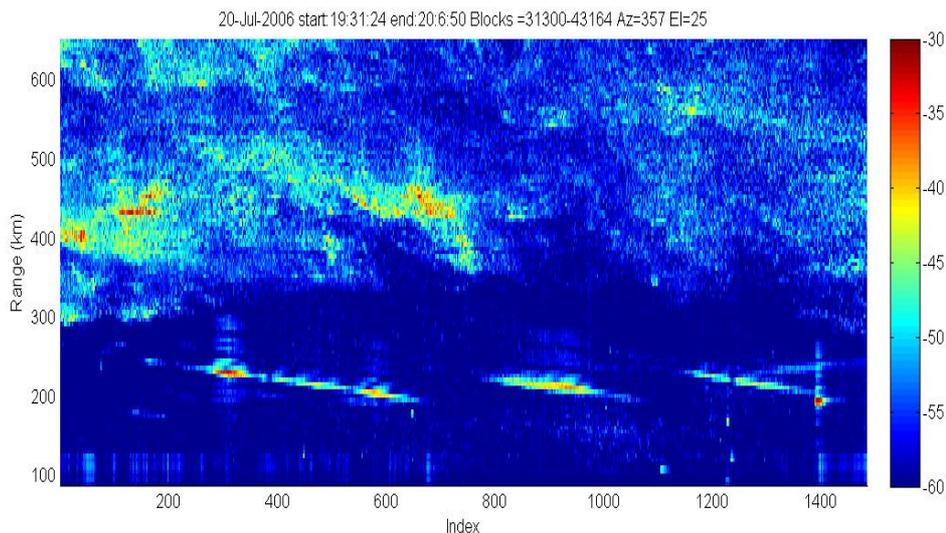


Fig. 1. Diagramme distance-temps-intensité montrant des échos dus à la rétrodiffusion du sol au delà de 300 km, un écho de météorite à l'indice 1400 et 3 échos quasi-périodiques aux distances comprises entre 180 km et 240 km avec une pente négative. L'échelle horizontale représente au total 36 minutes.

## 2. Expérience et traitement des données

L'antenne du radar est formée de 3 bras et les antennes de ces bras sont regroupées de façon à former 18 sous-réseaux de 16 antennes. Seuls les éléments centraux de l'antenne sont connectés aux émetteurs. La conséquence est que le diagramme de rayonnement est plus large à l'émission qu'à la réception et il est donc possible de former plusieurs faisceaux de réception à l'intérieur du lobe d'émission. Pour cette expérience le signal en sortie des 18 sous-réseaux est échantillonné et enregistré après le filtrage de Hilbert dans 113 portes jusqu'à une distance maximale de 655 km. La période de répétition des impulsions modulée en fréquence est 10 ms et le temps d'intégration cohérente utilisé ici est égal à 2,56 s.

Les antennes utilisées à l'émission sont alimentées avec les phases permettant de pointer le faisceau dans l'azimut  $357^\circ$  et l'élévation  $25^\circ$ . La géométrie particulière de l'antenne entraîne l'existence de lobes d'ambiguïtés à des niveaux relativement élevés et il est nécessaire de mettre en place un traitement permettant de diminuer l'influence des ces ambiguïtés. Ce traitement consiste à balayer l'espace en calculant un grand nombre de faisceaux et pour chaque cellule de résolution en distance, à sélectionner le faisceau qui donne le signal de puissance maximale. Ce traitement élimine d'office les échos faibles puisque pour chaque point un seul faisceau est conservé et, de plus, il est coûteux en temps de calcul. Les variations temporelles de la puissance des échos permettent d'avoir une idée de l'évolution des régions rétro diffusantes pendant l'évènement considéré. Les 3 striations présentes sur la figure 1 ont été traitées séparément et les résultats sont présentés dans l'ordre sur les figures 2, 3 et 4 qui correspondent respectivement aux striations 1, 2 et 3. Le faisceau de l'antenne a balayé l'espace en azimut entre  $345^\circ$  et  $369^\circ$  avec un pas de  $1,5^\circ$  et en site entre  $19,75^\circ$  et  $32^\circ$  avec un pas de  $0,25^\circ$ . Pour chaque point temporel, correspondant à une intégration cohérente de 2,56 s, on calcule donc 850 faisceaux et, dans chaque cellule distance, on sélectionne uniquement le faisceau présentant le maximum de puissance.

### 2.1 Striation 1

La figure 2 montre une zone rétro diffusante principale se déplaçant vers le sud à une vitesse voisine de 67 m/s. En fait le balayage azimutal (Fig. 2b) montre qu'il y a ici au moins 3 zones rétro diffusantes séparées en azimut de  $5^\circ$  à  $7^\circ$ , ce qui correspond à une distance est-ouest de 17 à 25 km. Les irrégularités se déplacent vers l'ouest à une vitesse voisine de 20 m/s. Sur la figure 2c l'altitude fluctue entre 93 km et 99 km.

### 2.2 Striation 2

La situation est un peu différente pour la striation n°2 (Fig. 3) où le balayage azimutal montre une seule zone rétro diffusante qui se déplace vers le sud et vers l'ouest. Les vitesses sont d'environ 70 m/s vers le sud et 50 m/s vers l'ouest. Entre  $t_0$  et  $t_0 + 200$  s l'altitude augmente. A  $t_0 + 120$  s une seconde région apparaît qui se déplace elle aussi vers le haut. On peut en déduire une longueur d'onde verticale d'environ 5 km avec une vitesse verticale de l'ordre de 25 m/s.

### 2.3 Striation 3

La qualité des données est moins bonne, on observe cependant 2 zones rétro diffusantes dans des azimuts différents et qui se trouvent à des altitudes différentes. La séparation verticale est d'environ 5 km et la séparation est-ouest est d'environ 20 km.

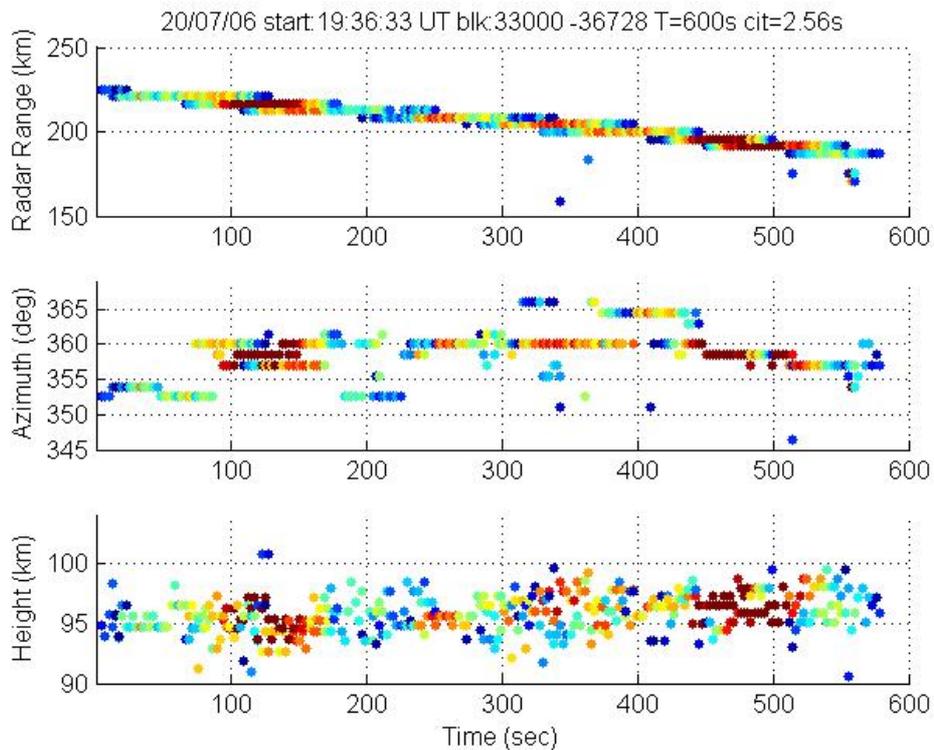


Fig. 2. Striation numéro 1. La figure 2a (haut) montre l'évolution temporelle de la distance radiale, la figure 2b (milieu) montre l'évolution temporelle de l'azimut et la figure 2c (bas) montre l'évolution temporelle de l'altitude. La figure 2b montre l'existence d'au moins 3 zones rétro diffusantes qui évoluent en parallèle en se déplaçant vers l'ouest à environ 20 m/s. Dans la striation l'altitude fluctue entre 93 km et 99 km.

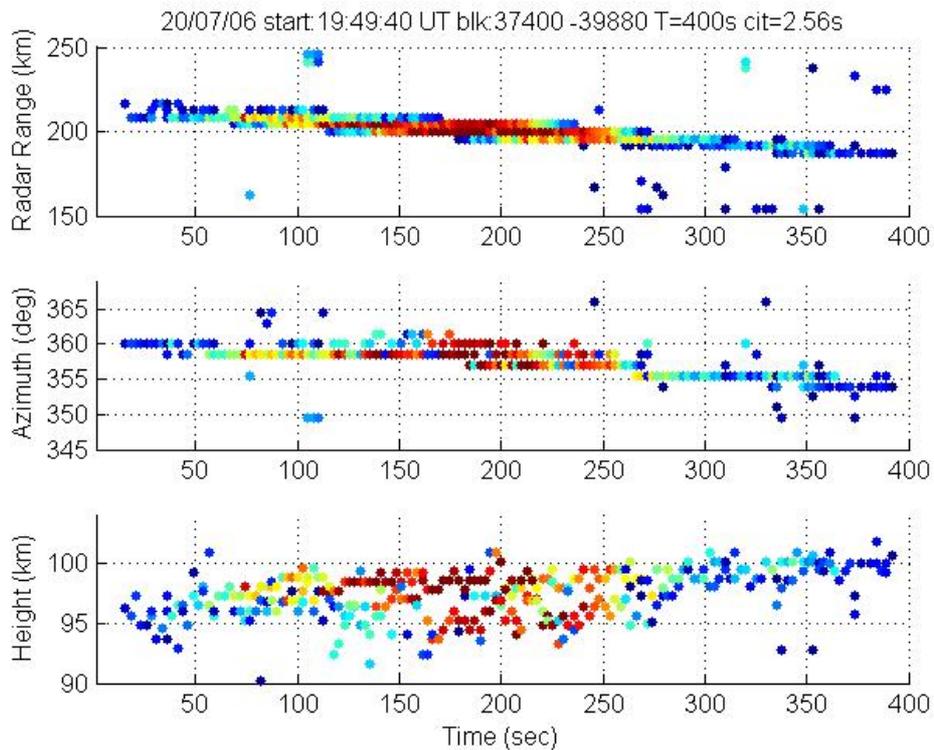


Fig. 3. Striation numéro 2. La figure 3a (haut) montre l'évolution temporelle de la distance radiale, la figure 3b (milieu) montre l'évolution temporelle de l'azimut et la figure 3c (bas) montre l'évolution temporelle de l'altitude. Le balayage azimutal montre une seule zone rétro diffusante qui se déplace vers l'ouest à une vitesse d'environ 50 m/s. L'altitude augmente entre  $t_0$  et  $t_0 + 200$  s. A  $t_0 + 120$  s une seconde région apparaît qui se déplace elle aussi vers le haut. On peut en déduire une longueur d'onde verticale d'environ 5 km avec une vitesse verticale de l'ordre de 25 m/s.

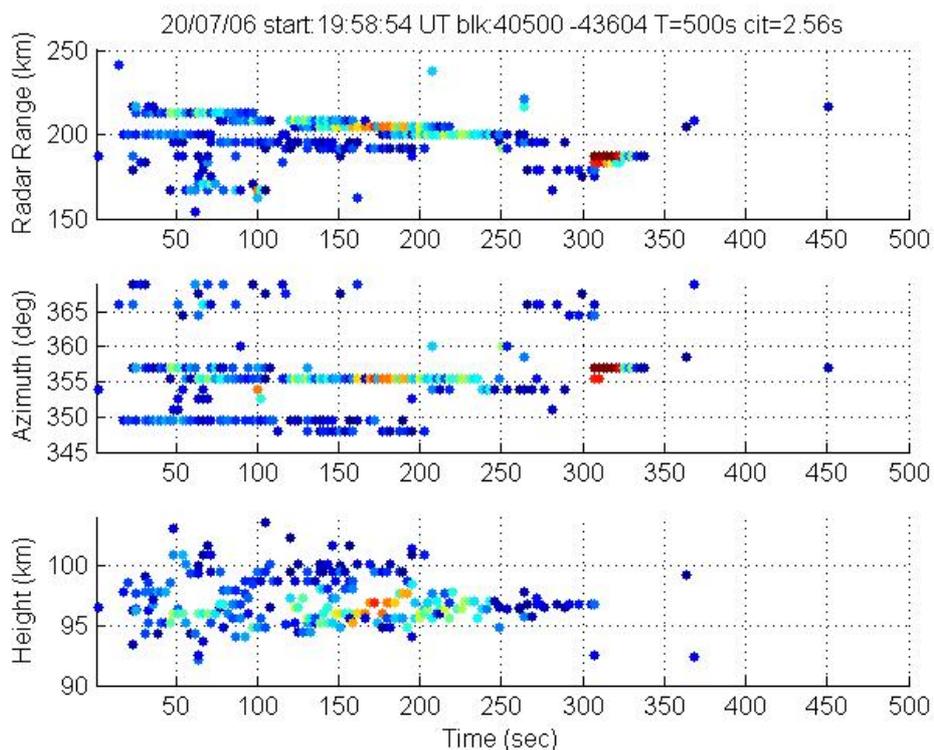


Fig. 4. Striation numéro 3. La figure 4a (haut) montre l'évolution temporelle de la distance radiale, la figure 4b (milieu) montre l'évolution temporelle de l'azimut et la figure 4c (bas) montre l'évolution temporelle de l'altitude. On observe 2 zones rétro diffusantes dans des azimuts différents et qui se trouvent à des altitudes différentes. La séparation verticale est d'environ 5 km et la séparation est-ouest est d'environ 20 km.

### 3. Discussion et conclusion

Le traitement des données du radar NOSTRADAMUS présenté ici permet de mettre en évidence avec une bonne précision les caractéristiques des échos QP. Les 3 exemples présentés montrent que les irrégularités associées à ces échos se déplacent vers le sud-ouest mais que la condition d'angle d'aspect n'est pas une contrainte très forte. Utiliser cette condition géométrique pour déterminer l'altitude des irrégularités ne peut que donner des résultats incorrects. Des structures orientées nord-ouest / sud-est et se déplaçant vers le sud-ouest sont fréquemment observées dans la région E sporadique [6], [7], [8]. Elles ont été expliquées par le mécanisme d'instabilité propre à la région Es et décrit par Cosgrove and Tsunoda [9].

### Références

- [1] Yamamoto, M., Fukao, S., Woodman, R., Ogawa, T., Tsuda, T., and Kato, S. (1991). Mid-latitude E region field-aligned irregularities observed with the MU radar. *J. Geophys. Res.* **96**(A9), 15943-15949.
- [2] Yamamoto, M., Fukao, R., Ogawa, T., Tsuda, T., and Kato, S. (1992). A morphological study on mid-latitude E region field-aligned irregularities observed with the MU radar. *J. Atmos. Terr. Phys.* **54**, 769-777.
- [3] Chau, J. L., and Woodman, R. F. (1999). Low-latitude quasi-periodic echoes observed with the Piura VHF radar in the E region. *Geophys. Res. Lett.* **26**, 2167-2170.
- [4] Huang, C. M., Kudeki, E., Frank, S. J., Liu, C. H., and Röttger, J., (1995). Brightness distribution of midlatitude E region echoes detected at Chung-LI VHF radar, *J. Geophys. Res.* **100**, 14703-14715.
- [5] Tsunoda, R. T., Buonocore, J. J., Saito, A., Kishimoto, T., Kukao, S., and Yamamoto, M. (1999). First observations of quasi-periodic radar echoes from Stanford, California. *Geophys. Res. Lett.* **26**(7), 995.
- [6] Sinno, K., Ouchi, C., Nemoto, C., and Futagawa, H. (1965). Structure and movement of Es detected by LORAN observations, *J. Radio Res. Lab.* **12**, 59.
- [7] Goodwin, G. L., and Summers, R. N. (1970). Es-layer characteristics determined from spaced ionosondes. *Planet. Space Sci.* **18**(10), 1417-1432, doi:10.1016/0032-0633(66)90105-X.
- [8] Bowman, G. G. (1989). Quasi-periodic scintillations at midlatitudes and their possible association with ionospheric sporadic E structures. *Ann. Geophys.* **7**, 259.
- [9] Cosgrove, R. B., and Tsunoda, R. T. (2002). A direction-dependent instability of sporadic-E layers in the nighttime midlatitude ionosphere. *Geophys. Res. Lett.* **29**(18), 1864, doi:10.1029/2002GL1014669, 11-1.