

Radiogoniométrie Doppler

Jean-Paul / F1LVT
F1LVT@yahoo.fr
www.F1LVT.com

Dans les bandes VHF et UHF, la localisation par « effet Doppler » est très efficace. On trouve différents radiogoniomètres Doppler commerciaux ou à construire. Nous avons testé et comparé les performances de plusieurs de ces goniomètres Doppler. Tous fonctionnent correctement sur porteuse. Mais pour les signaux très courts, le seul Doppler capable de faire correctement la localisation est le **Montréal 3 V2**. Il permet par exemple de localiser les émissions des trames des balises 406. La construction des antennes pour le Montréal 3 V2 et le fonctionnement global de l'ensemble seront décrits par la suite.

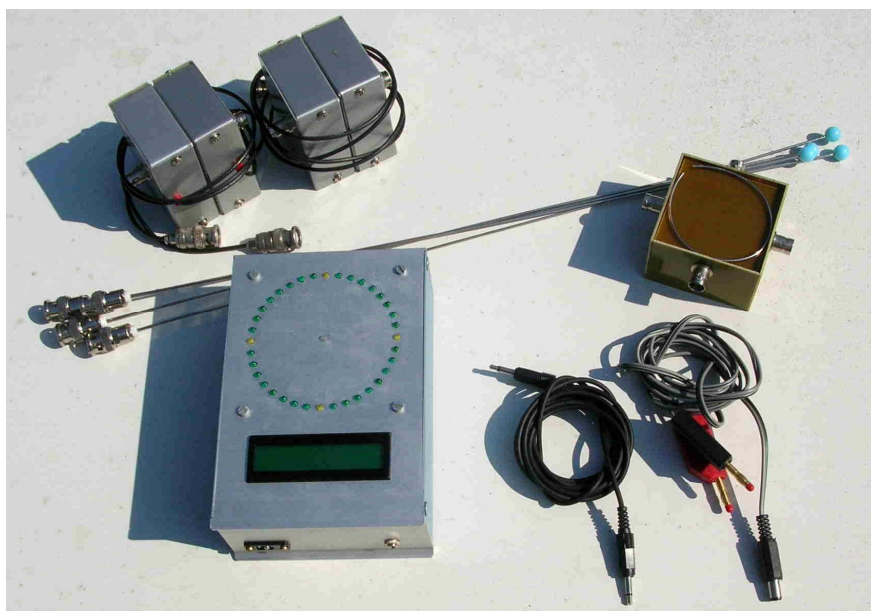


Figure 1 : Les différents éléments du Doppler Montréal 3 V2 avec son antenne VHF

L'effet Doppler-Fizeau

Le principe de base de l'effet Doppler a été décrit par l'autrichien Christian Doppler au 19^{ème} siècle (1842) pour la lumière. Quand la distance entre une source et un récepteur change, la fréquence reçue par le récepteur diminue si la source s'éloigne du récepteur et augmente quand les deux se rapprochent. Cette variation a été baptisée « effet Doppler ». Il se produit aussi bien pour les ondes sonores que pour les ondes électromagnétiques. Pour ces dernières, ce phénomène a été étudié par le physicien français Hippolyte Fizeau (travaux publiés en 1848). Ce décalage en fréquence d'une onde électromagnétique devrait s'appeler l'« Effet Doppler – Fizeau », mais on n'utilise souvent que le terme « Effet Doppler ».

L'exemple classique de l'effet Doppler est celui d'un train qui s'approche d'un observateur fixe. Quand le train arrive, le son est plus aigu (fréquence plus élevée). Le changement de fréquence se produit parce que le mouvement du train raccourcit la longueur d'onde. Au contraire, plus le train s'éloigne de l'observateur, plus le son est grave (fréquence plus basse). C'est dû au fait que la distance entre la voiture et l'observateur devient de plus en plus importante, et la longueur d'onde devient virtuellement plus longue.

Dans le domaine des ondes électromagnétiques, il se produit exactement la même chose. C'est un phénomène bien connu des OM qui trafiquent par satellite. Quand le satellite approche, la fréquence transmise est plus élevée, alors qu'elle est plus basse quand le satellite s'éloigne.

Ce principe permet la localisation des balises par les satellites en orbite basse (LEO). Les satellites du système COSPAS-SARSAT sont équipés d'un système qui analyse la fréquence des signaux reçus. Pour les balises ARGOS, dont la fréquence est assez voisine de celle des balises COSPAS-SARSAT, le système est similaire (Figure 2). Quand la fréquence passe par la valeur f_0 , sa valeur moyenne, la balise se situe dans le plan perpendiculaire à la trajectoire du satellite. Ce point est aussi appelé TCA (Time of Closest Approach). La pente autour de ce point permet d'obtenir la distance par rapport à la trajectoire. On localise ainsi 2 points : la position de la balise, ainsi qu'un deuxième point qui est l'image de la position de la balise par rapport à la trajectoire. Un deuxième passage ou la réponse d'un second satellite va permettre de lever le doute. La précision est de quelques de kilomètres (elle est donnée pour 3 km pour les balises UHF).

Les systèmes utilisant cet effet Doppler sont assez nombreux. Par exemple c'est avec cet effet Doppler que des émetteurs-récepteurs à 10 GHz ou à 24 GHz au bord des routes peuvent mesurer la vitesse des véhicules.

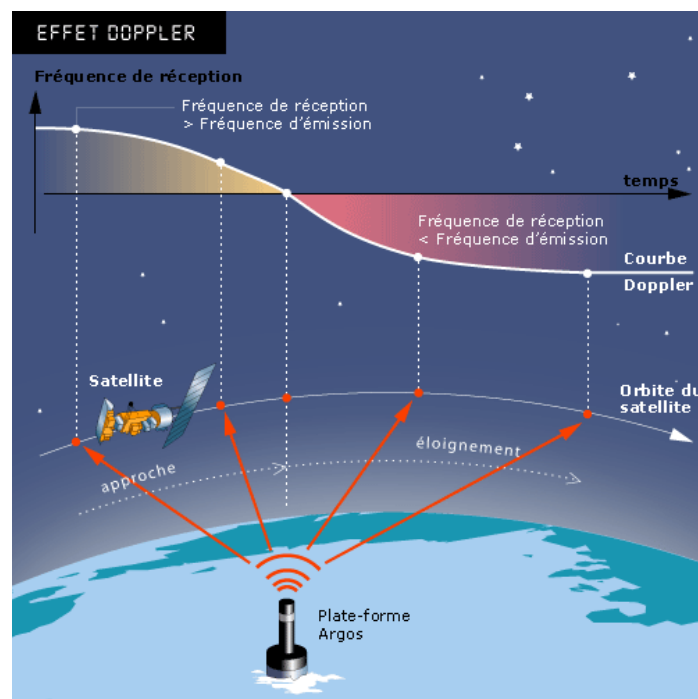


Figure 2 : Principe de la localisation des balises ARGOS par satellite (doc Argos System.org).

La radiogoniométrie par effet Doppler

Quand une antenne tournant autour d'un axe est placée dans le champ d'un émetteur, il se produit une variation de fréquence due à cet effet Doppler. Le signal reçu est à une fréquence plus élevée que celle de la fréquence réelle quand cette antenne se rapproche de la source, et la fréquence est plus faible quand l'antenne s'éloigne de la source. La figure 3 nous montre une antenne tournant dans le champ rayonné par un émetteur.

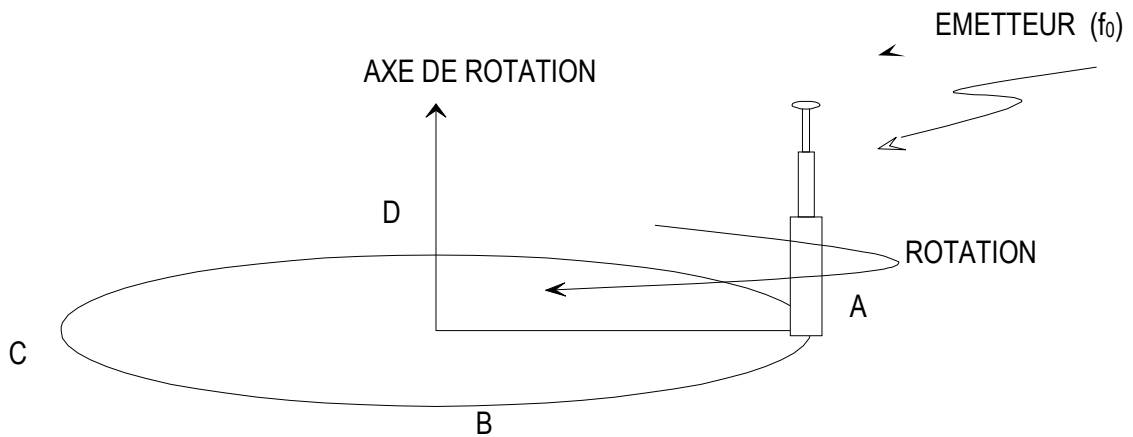


Figure 3 : Antenne de réception se déplaçant circulairement dans le champ d'un émetteur

En considérant l'antenne à la position A, la plus proche de la source de transmission à la fréquence f_0 , on constate que la fréquence du signal reçu au point A est égale à celle du signal transmis parce que la distance entre l'émetteur et l'antenne reste constante. Ensuite, la fréquence du signal reçu diminue quand l'antenne se déplace du point A au point B (Figure 3 et Figure 4). La déviation de fréquence $-\Delta f$ est maximale lorsque l'antenne passe par le point B. La fréquence du signal reçu au point C est la même que celle du signal transmis f_0 parce que la distance entre l'antenne et la source ne varie plus. Quand l'antenne se déplace du point C au point A, la fréquence du signal reçu augmente. La déviation de fréquence maximale se produit à nouveau quand l'antenne passe par le point D, elle vaut $+\Delta f$.

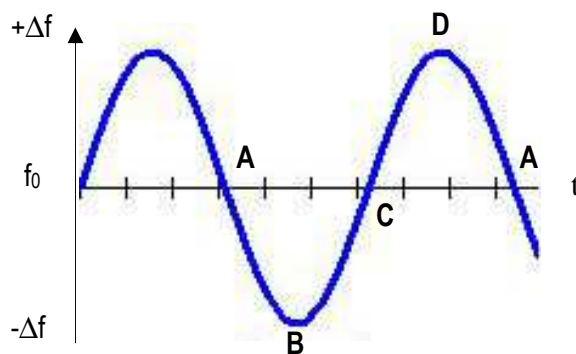


Figure 4 : Variation de fréquence due à l'effet Doppler

Calcul de l'Effet Doppler

Le calcul est assez simple. Les ondes électromagnétiques se propagent à la vitesse de la lumière, appelée c ($c = 300\,000\text{ km/s} = 300\,10^6\text{ m/s}$). Quand la distance entre un émetteur (à la fréquence f_0) et un récepteur change à la vitesse V , la fréquence reçue par le récepteur varie linéairement avec la vitesse V . La variation de fréquence Δf est donnée par :

$$\Delta f = f_0 \cdot V / c$$

Quand l'émetteur et le récepteur se rapprochent, la fréquence reçue est plus élevée. Au contraire quand le récepteur s'éloigne de l'émetteur, la fréquence reçue est plus basse.

Sur la figure 3, l'antenne tourne dans le sens des aiguilles d'une montre avec une vitesse de rotation constante N (en tours par seconde), sur un rayon de rotation R . En position B, elle s'éloigne rapidement avec la vitesse $2\pi NR$, alors qu'en position D, elle s'en rapproche avec la même vitesse. Le récepteur connecté à l'antenne reçoit la fréquence f_0 avec une modulation de fréquence Δf .

$$\Delta f = f_0 \cdot 2\pi \cdot N \cdot R / c$$

Par exemple, pour une vitesse de rotation de 500 tours par seconde, avec une antenne qui tourne sur un rayon de 30 cm, pour une porteuse à une fréquence de 150 MHz, on obtient :

$$V = 2\pi \cdot N \cdot R = 6,28 \cdot 500 \cdot 0,3 = 942\text{ m/s}$$

Ce qui correspond à une variation de fréquence de :

$$\Delta f = 471\text{ Hz}$$

Cela signifie que la fréquence de la porteuse à 150 000 000 Hz varie sinusoidalement entre 150 000 471 Hz et 149 999 529 Hz à la fréquence $N = 500\text{ Hz}$. En démodulant en FM le signal reçu, on obtient un signal démodulé à 500 Hz dont l'amplitude est proportionnelle à $\Delta f = 471\text{ Hz}$.

Si on rapproche les brins à 20 cm au lieu de 30 cm, cette variation de fréquence à 500 Hz se réduit à : $\Delta f = 314\text{ Hz}$ au lieu de 471 Hz. On voit que l'espacement des antennes joue sur l'amplitude de la modulation.

Pour une fréquence de 450 MHz, et avec une antenne tournant sur un rayon de 10 centimètres, on obtient la même valeur : $\Delta f = 471\text{ Hz}$

Au niveau du récepteur, il faut d'abord démoduler les signaux reçus en NBFM (Narrow Band Frequency Modulation).

Dans le boîtier Doppler, il faut filtrer très proprement la fréquence de base N (500 Hz) correspondant à la rotation des antennes dans le signal démodulé. La direction est donnée par le déphasage entre les signaux de commutation à la fréquence N (envoyés par le boîtier Doppler) et les signaux reçus du récepteur. Cette mesure du déphasage est généralement réalisée par extraction du fondamental et détection des instants de passage par zéro.

La phase de la modulation à 500 Hz est directement liée à la direction de l'onde reçue. Sur la Figure 4, on voit que la modulation passe par 0 pour les points A et C. Le repérage des passages par zéro de la modulation à 500 Hz va donner les points A et C et donc la direction de l'émetteur.

Remarque : la vitesse de rotation $N = 500\text{ tr/s}$ et donc la fréquence $N = 500\text{ Hz}$ est un exemple. Cette fréquence N doit être choisie dans la bande BF du récepteur.

Comment faire de la radiogoniométrie avec l'effet Doppler

En pratique, la réalisation d'une antenne en rotation rapide est très difficile. Par exemple faire tourner une antenne à 500 Hz correspond à une vitesse de rotation de 30 000 tours par minute, c'est énorme. Il est beaucoup plus facile de réaliser la communication électronique par diodes PIN d'une série d'antennes placées en cercle. On utilise couramment 4 ou 8 dipôles (ou 4 ou 8 monopôles sur un plan de masse) commutés par des diodes PIN. Pendant 0,5 ms, on va écouter avec l'antenne 1 ; les 0,5 ms suivantes, on va écouter avec l'antenne 2, et ainsi de suite avec les 4 antennes (Figure 5). Le cycle dure 2 ms pour 500 Hz.

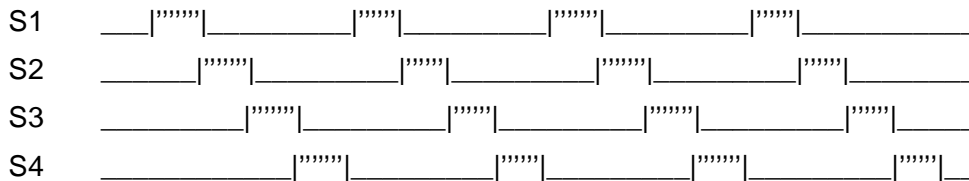


Figure 5 : Les signaux de commande des antennes

Au lieu d'avoir une rotation continue, avec une antenne commutée par diodes PIN on va avoir des sauts d'antenne, donc des sauts de phase, avec un fondamental à 500 Hz. Le signal modulé est riche en harmoniques, sur plusieurs kilohertz. Ce phénomène pourrait être réduit en faisant du « soft switching », mais c'est plus compliqué ; c'est pourquoi ce n'est pas fait dans la plupart des Doppler commerciaux ou construits.

Pour faire de la radiogoniométrie Doppler, il faut 3 éléments :

- une antenne à rotation pilotée, que nous appellerons l'« Antenne Doppler »,
- un récepteur NBFM connecté à l'antenne pour pouvoir décoder correctement la modulation,
- et un système de pilotage et de mesure, capable de commander la rotation de l'antenne, et de déterminer la direction de l'émetteur par corrélation entre la position de l'antenne et le passage par zéro de la modulation. Nous l'appellerons le « Goniomètre Doppler ». Il fait aussi l'affichage de la direction.

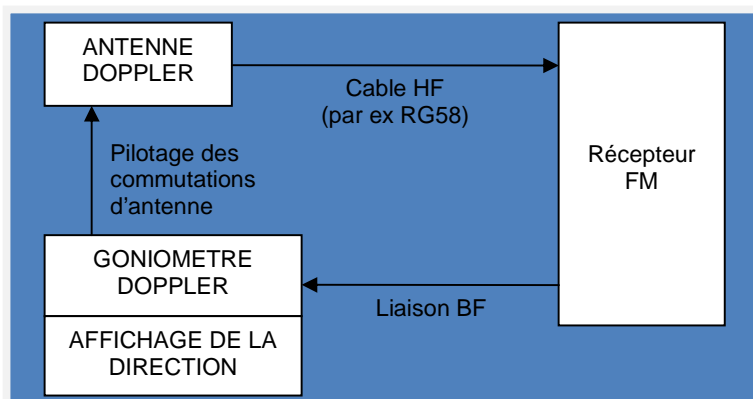


Figure 6 : Les différents éléments du système de radiogoniométrie Doppler

Ces 3 éléments (Figure 6) : le Goniomètre Doppler, l'Antenne Doppler et le Récepteur FM constituent un système bouclé. Le Goniomètre envoie les signaux de commutation à l'Antenne Doppler, et les signaux reçus sont transmis au Récepteur FM ; ce Récepteur FM est calé sur la fréquence des signaux à recevoir qu'il démodule en NBFM ; les signaux BF démodulés par le Récepteur FM sont envoyés au Goniomètre Doppler qui fait la corrélation de phase entre les signaux et qui affiche la direction du signal reçu.

Le Goniomètre Doppler est le cœur du système. D'une part il génère les signaux de commutation des antennes à 500 Hz. D'autre part il reçoit les signaux à 500 Hz démodulés en FM venant du Récepteur. Un filtre d'entrée très étroit permet de ne recueillir que les signaux sur cette fréquence. La phase de ces signaux par rapport à la phase des signaux de commutation des antennes permet de déterminer et d'afficher la direction de l'émission.



Photo 1 : Radiogoniomètre Doppler de la société Doppler Systems (Sce dopsys)

L'évolution des radiogoniomètres Doppler

On trouve la trace d'une première description faite en 1947 par H.T. Badenbom, qui utilisa la modulation Doppler à l'aide d'un véritable système d'antenne rotatif. Depuis cette date, il y a eu une série de réalisations dans le domaine professionnel. Par exemple, la société Doppler Systems commercialise toute une gamme de radiogoniomètres Doppler qui fonctionnent de 50 MHz à 1000 MHz (Photo 1) [1]. Le site internet de cette société est bien documenté. Le coût de ses systèmes est assez élevé.

Chez les radioamateurs, les réalisations sont peu nombreuses. Cela vient surtout de la complexité du système, en particulier pour le module « Goniomètre Doppler ». Une étude systématique des publications dans la revue QST, revue des radioamateurs américains, n'a montré que 2 réalisations avant 2000 : celle de WA4BVY en 1978 [2], et celle de WA2EBY en 1999 [3]. Le montage présenté dans cette dernière publication a ensuite été diffusé en série sous forme de kits par la société Ramsey, sous le nom de DDF1 [4].

Chez les radioamateurs français, on trouve un article de Jean-Marc Delprat, F1GQS, qui décrit un Goniomètre Doppler VHF ; cet article est paru en 1985 dans le magazine Mégahertz [5]. L'antenne fonctionne avec les huit fouets sur un très grand plan de masse.

La plupart des réalisations anciennes sont basées sur des composants analogiques. Un pas très important a été franchi en utilisant des composants programmés.

La société Byonics commercialise un Doppler en kit basé sur un DSP (W6DFW) [6]. Le montage original a été publié dans QST en 2002 par N0GSG [7]. L'affichage est effectué par une rose des vents à 16 LED (Photo 2).

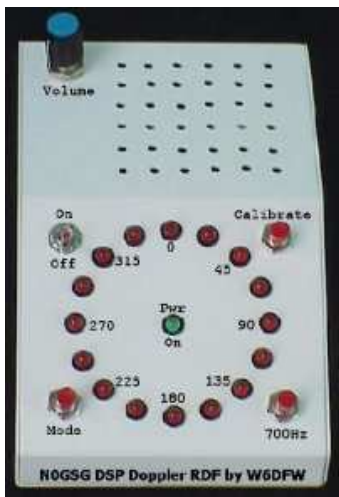


Photo 2 : Doppler commercialisé par Byonics [6]

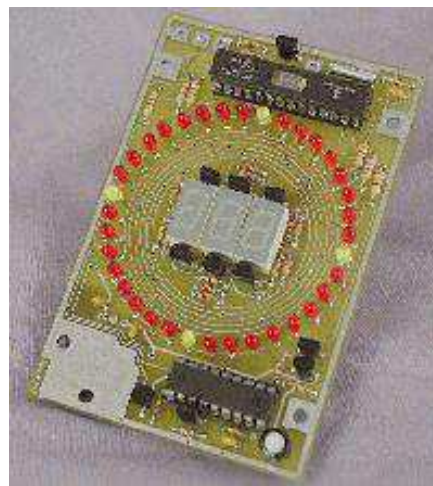


Photo 3 : Module PicoDopp

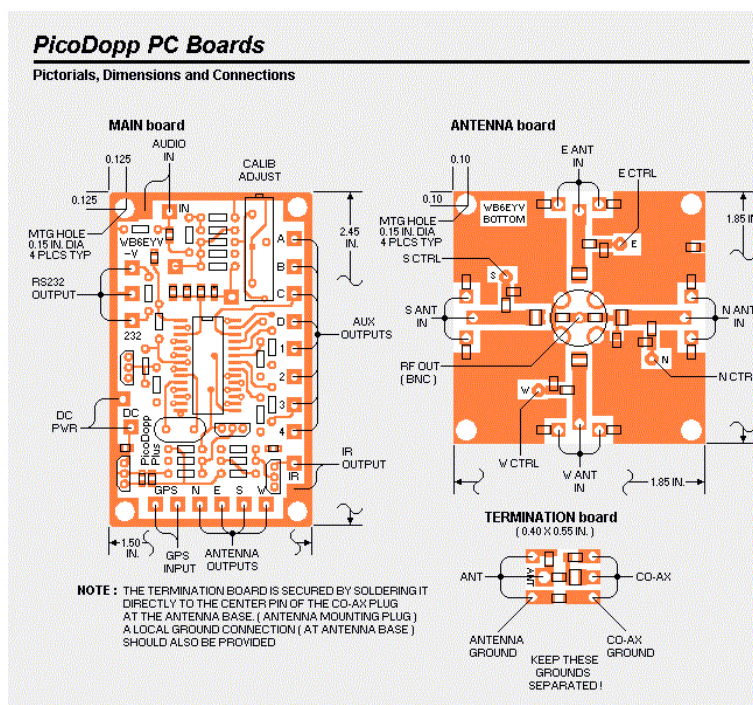


Figure 7 : Schéma du PicoDopp

Plus récemment WB6EYV de la société « Doppler DF Instruments » a sorti le PicoDopp sous forme de semi-kit [8]. Ce sont des sous-ensembles qu'il faut assembler (Photo 3 et Figure 7). L'affichage par un écran de PC permet de visualiser facilement la direction. Les modules PicoDopp sont aussi utilisés dans des systèmes de détection de micros-espions de KN2C (Global TsCM Group). Ce dispositif est aussi vendu sous l'appellation DDF2020, et distribué par exemple par WIMO [9].

Dans les ouvrages, on trouve la description très complète d'un système appelé « Roanoke Doppler » sous la plume de Joe Moell, K0OV, et Thomas Curlee, WB6UZZ [10]. Cet ouvrage, intitulé « Transmitter Hunting—Radio Direction Finding Simplified » est une mine d'information pour tous ceux qui s'intéressent à la radiogoniométrie (Photo 4). Le nom du système, « Roanoke », vient de la ville de Virginie où il a été développé. Toutes les bases sont très bien expliquées. On trouve aussi des informations complémentaires sur le site internet de Joe Moell [11].

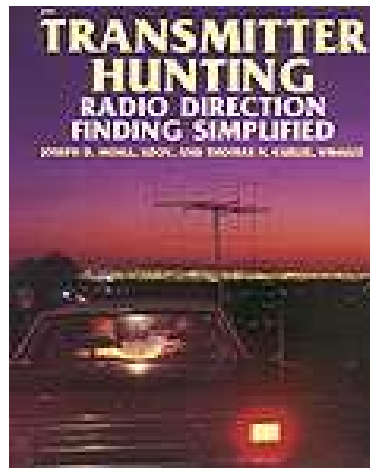


Photo 4 : Couverture de l'ouvrage « Transmitter Hunting »

Plus récemment Jacques Brodeur (VE2EMM / SK 2009), un radioamateur québécois, a développé un nouveau système Doppler [12]. En suivant la logique du « Roanoke », il a baptisé son système « Montréal ». Plusieurs générations ont été réalisées, appelées successivement « Montréal », « Montréal II », « Montréal 3 » et maintenant « **Montréal 3 V2** ». Cette réalisation en composants programmés permet une construction assez simple et très facile à reproduire : il n'y a que quelques composants passifs autour de PIC.

Sur le site internet de VE2EMM [12], on trouve toutes les informations pour construire le Goniomètre Doppler, c'est en français et en anglais. La dernière version, le « Montréal 3 V2 », est bâtie autour de trois pics, un 16F628A pour l'affichage, un 12F675 pour la base de temps, et un 18F4520 pour le cœur du montage : le calculateur et l'affichage. L'auteur fournit les schémas, le dessin des circuits imprimés, et même les logiciels à rentrer dans les PIC.

Comparaison des performances de différents Doppler

Nous avons essayé différents types de Goniomètres Doppler ; nous avons testé notamment leur aptitude à fonctionner sur la localisation des balises de détresse. Nous avons comparé plus particulièrement les performances du PicoDopp, du DDF2020 et du Doppler Montréal 3V2. Les conclusions sont assez simples à formuler.

Le cas le plus facile c'est la localisation d'une porteuse pure. Tous les Doppler testés fonctionnent correctement sur porteuse continue.

C'est beaucoup plus difficile de faire de la radiogoniométrie sur les balises de détresse. En 121,5 MHz, la porteuse hachée rend la localisation difficile. Quant aux balises 406, l'émission de 0,5 s toutes les 50s nécessite un système qui fait la mesure en une fraction de seconde associé à un affichage qui garde en mémoire la direction mesurée. Dans ces conditions difficiles, le seul Doppler qui fonctionne correctement est le **Doppler Montréal 3 V2**. Cela est dû à sa conception et à ses menus entièrement paramétrables.



Photo 5 : Doppler Montréal 3 V2 de VE2EMM

Le Doppler **Montréal 3 V2** est capable de fonctionner sur une émission très courte. Il suffit de paramétrer correctement le temps d'intégration de la mesure. Par exemple sur les radiosondes M2K2 ou M10, il fonctionne très bien sur les trames de moins de 0,2 s (Photo 6) [13]. A fortiori, sur les trames de 0,5 s des balises de détresse 406 MHz, il fonctionne parfaitement.

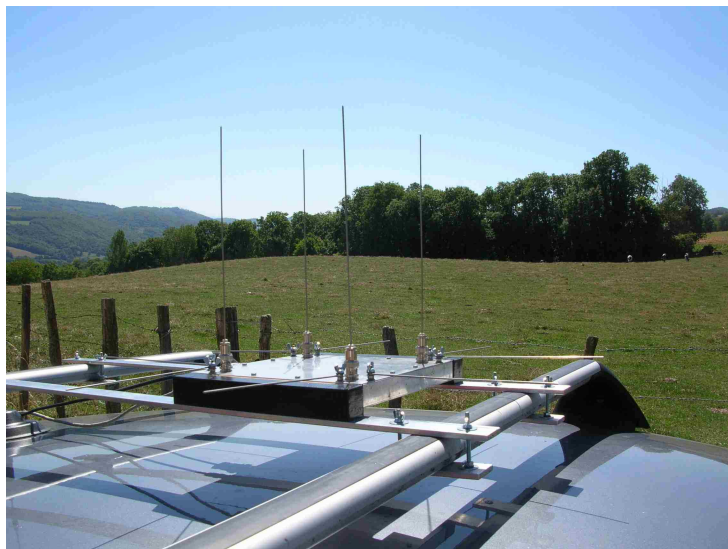


Photo 6 : Recherche des radiosondes avec un Doppler Montréal 3 V2

Comme il fonctionne avec un seuil de détection sur la fréquence de commutation (N = 500 Hz), il faut enlever le squelch sur le récepteur et régler le volume pour que le signal soit en dessous du seuil en l'absence de porteuse. La mesure ne sera effectuée que pour les signaux qui dépassent ce seuil. De plus le Montréal 3 V2 continue d'afficher la dernière mesure quand le signal disparaît, ce qui permet de figer l'affichage à la fin de l'émission sur la position mesurée.

Le Doppler **Montréal 3 V2** est même capable de fonctionner avec une démodulation AM, ou bien avec 4 antennes directives, et même avec 3 antennes sur 4. Ces types de fonctionnement ne sont pas du tout conventionnels ni cohérents avec le principe du Doppler. Nous reviendrons ultérieurement sur ces modes de fonctionnement très particuliers.

Le Doppler Montréal a été entièrement développé dans un parfait esprit radioamateur, et il n'existe pas de version commerciale. Il faut donc le construire, mais il n'y a pas de difficulté majeure dans cette construction qui est basée sur des PIC programmés [14].

Pour information, le RD2 est un Doppler commercialisé par la société Comelec. Ce système a été analysé dans la revue Mégahertz [15] et dans RASEC Infos [16]. Ce Doppler est une copie du Montréal 2 (2001), en version tout monté en composants CMS. Le RD2 (donc le Montréal 2 monté) peut constituer une solution de repli pour ceux qui n'ont aucune compétence dans le maniement du fer à souder. Mais il faut savoir que ce Montréal 2 a ensuite été très nettement amélioré pour concevoir le Doppler Montréal 3 (2004), puis il a encore été amélioré dans la version actuelle **Montréal 3 V2**. Ces améliorations portent sur les menus, le filtrage et surtout sur l'affichage de la direction.

Synthèse

Le fonctionnement de la radiogoniométrie Doppler a été présenté. La comparaison de différents Goniomètres Doppler nous a montré que pour la localisation des signaux courts comme ceux des trames des balises de détresse, il n'y a que le Doppler **Montréal 3 V2** qui fonctionne correctement.

Dans les prochains articles, nous nous intéresserons à la construction des antennes Doppler VHF et UHF adaptées à ce **Montréal 3 V2**.

Références

- [1] Site de la société Doppler Systems : www.dopsys.com
- [2] Terrence Rogers, WA4BVY, "A DoppleScAnt" QST, May 1978 pp 24-28, Feedback QST Jul 78, p 13
- [3] Mike Kossor, WA2EBY, "A Doppler Radio-Direction Finder", QST magazine, Part I, QST May 1999, p 35 - 40 / Part II, QST June 1999, p 37 - 40 / Feedback in QST July 1999
- [4] Notice de montage du kit DDF1 de Ramsay, DOPPLER DIRECTION FINDER DDF1 www.ramseyelectronics.com/downloads/manuals/DDF1.pdf
- [5] Jean-Marc Delprat, F1GQS, "Gonio Doppler VHF", Mégahertz Magazine, Janv 1985, p 54-62
- [6] Kit Byonics : <http://www.byonics.com/dsp-rdf/>
- [7] Tom Wheeler, N0GSG, "The N0GSG DSP Radio Direction Finder", QST, Nov 2002, p. 28 - 33 / QST Jan 2003, Feedback
- [8] PicoDopp, WB6EYV, « Doppler DF Instruments » <http://www.silcom.com/~pelican2/PicoDopp/PICODOPP.htm>

- [9] DDF2020, KN2C, « Global TsCM Group » : <http://www.kn2c.us/>
- [10] Joseph Moell, K0OV, and Thomas Curlee, WB6UZZ, "Transmitter Hunting—Radio Direction Finding Simplified," (Blue Ridge Summit, PA: TAB Books, 1987) Chapter 9, pp 120-141
- [11] Site web de K0OV, Joe Moell : <http://www.homingin.com/>
- [12] Site web de VE2EMM/SK, Jacques Brodeur : <http://www.gsl.net/ve2emm/>
- [13] <http://www.radiosonde.eu/RS08/RS08I03.html>
- [14] Site web www.F1LVT.com, <http://f1lvt.com/7b-Constructions2.18.html>
- [15] Denis Bonomo, F6GKQ, "Un radiogoniomètre Doppler : le COMELEC RD2", Mégahertz Magazine, n° 304, Juillet 2008, p 26 – 28.
- [16] Test du Doppler Comelec : <http://f1lvt.com/files/427-Test-Doppler-COMELEC-V4.88.pdf>