

Émission radar de formes d'ondes bio-inspirées

Anthony TORRE¹ Abigael TAYLOR¹ Dominique POUILLIN¹ Thierry CHONAVEL² Milan ROZEL¹

¹DEM, ONERA, Université Paris Saclay, F-91123, Palaiseau, France

²IMT Atlantique, Lab-STICC UMR CNRS 6285, F-29238, Brest, France

Résumé – Afin de répondre à la problématique de congestion du spectre électromagnétique, de nombreuses études visent à créer et optimiser de nouvelles formes d'ondes radar. Regroupées sous l'appellation plus générale de diversité des formes d'ondes, cet axe de recherche couvre aussi bien la conception de systèmes joints radar-communications que des approches biomimétiques comme celle présentée dans ce papier. L'étude des signaux de chauves-souris a en effet permis de proposer une forme d'onde bio-inspirée, la fonction de Parsons, adaptée à des applications radar. Ses capacités et sa réponse au traitement radar usuel ayant fait l'objet d'études et de simulations préalables, cet article est consacré à la présentation de résultats acquis lors d'émissions réelles de la forme d'onde bio-inspirée, afin de suivre des avions de ligne et ainsi valider les résultats théoriques.

Abstract – In order to address the issue of electromagnetic spectrum congestion, several studies aim to create and optimise new radar waveforms. More generically designated as waveform diversity, this area of research can cover joint radar-communications systems as well as biomimicry approaches like the one presented in this article. Indeed, the study of bat signals has enabled the proposition of a bio-inspired waveform, the Parsons function, adapted to radar applications. Its capacities and response to classical radar processing have already been evaluated through simulations. Therefore, this article is dedicated to the presentation of real data experiments obtained in a plane tracking framework to validate the theory.

1 Introduction

Les applications radars sont multiples, allant de la surveillance météorologique au contrôle aérien, en passant par la surveillance spatiale ou la sécurité automobile [1]. Par conséquent, les différentes utilisations du radar nécessitent d'occuper une partie non négligeable du spectre électromagnétique pour fonctionner. Néanmoins, cette ressource est partagée avec d'autres services comme les communications ou les systèmes de radio- et télédiffusion. Le spectre électromagnétique se retrouve alors encombré et la situation empire avec la croissance du nombre d'utilisateurs et de la demande en bande spectrale de chaque service [2]. Cela conduit à la recherche de solutions pour réduire les interférences entre services et/ou coexister au sein d'une même bande spectrale. Dans cette optique, cet article aborde l'étude de la diversité des formes d'ondes en adoptant une approche biomimétique.

La Nature a effectivement doté les chauves-souris d'un mécanisme complexe de repérage dans l'espace, similaire au radar : l'écholocation. Grâce à l'émission d'ondes ultrasonores, les chauves-souris peuvent se repérer dans leur environnement et surtout chasser sans pour autant se gêner entre elles. En effet, chaque espèce dispose de sa propre forme d'onde, adaptée à son environnement et à ses proies de prédilection [3], créant ainsi un vaste catalogue de formes d'ondes possibles. De plus, elles ont un excellent contrôle sur les paramètres d'émission d'une impulsion à l'autre, ce qui leur confère une grande flexibilité dans la conception de leurs signaux.

Les études ont permis d'adapter une forme d'onde issue de la littérature, la fonction de Parsons [4], afin de la proposer comme forme d'onde bio-inspirée pour des applications radar. Des travaux ont permis d'évaluer ses capacités radar, notamment en examinant les bornes de Cramér-Rao (BCR) [5]. Il a ainsi pu être démontré que la fonction de Parsons, en plus d'offrir une certaine flexibilité dans la conception de formes d'ondes, disposait de capacités similaires au chirp¹ en termes

de performances d'estimation de la distance. La vérification de ces résultats théoriques a été réalisée via des essais réels présentés dans cet article.

Dans un premier temps, l'expression de la fonction de Parsons est rappelée. Le cadre expérimental est ensuite présenté, ainsi que le traitement effectué avec notamment l'utilisation du filtre désadapté pour gérer le niveau de lobes secondaires. Enfin, les résultats obtenus sont présentés et discutés.

2 Une forme d'onde bio-inspirée

La fonction de Parsons, désignée par la fonction exponentielle-2 décroissante dans [4], décrit la fréquence instantanée d'un signal par l'équation suivante :

$$f(t) = \frac{f_0}{f_0 - af_1} \left[(f_0 - f_1) \left(\frac{af_1}{f_0} \right)^{\frac{t}{T}} + (1 - a)f_1 \right], \quad (1)$$

où f_0 représente la fréquence de début, f_1 la fréquence de fin et T la durée d'impulsion. La particularité de la fonction de Parsons réside dans le paramètre a qui permet d'ajuster la courbure hyperbolique du signal. Ce paramètre est néanmoins soumis à certaines conditions listées ci-dessous. On considère $f_0 > f_1$:

- $a = 0$, la courbe temps-fréquence décrit une composante verticale modulée en fréquence suivie d'une composante à fréquence constante.
- $a < \frac{f_0}{f_1}$, le balayage fréquentiel est convexe et approxime un chirp quand a se rapproche du rapport $\frac{f_0}{f_1}$.
- $a > \frac{f_0}{f_1}$, le balayage fréquentiel est concave.

Il est ainsi possible d'approcher la flexibilité observable chez les chauves-souris et cela à durée d'impulsion et excursion fréquentielle fixées comme montré sur la figure 1. Cela présenterait un intérêt pour des radars cognitifs où la forme d'onde s'adapterait en temps réel par exemple.

¹modulation linéaire de fréquence classique en radar.

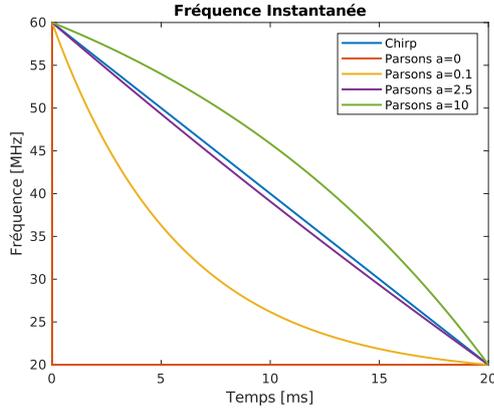


FIGURE 1 : Fréquences instantanées de fonctions de Parsons avec différentes courbures ($\frac{f_0}{f_1} = 3$ avec $f_0 = 60\text{kHz}$, $f_1 = 20\text{kHz}$ et $T = 20\text{ms}$).

La fréquence instantanée étant obtenue en dérivant la phase du signal en bande de base, ce dernier s'écrit donc :

$$u(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} \text{Rect} \left\{ \frac{t}{T} \right\} e^{\frac{2i\pi f_0}{f_0 - a f_1} \left[\lambda \beta \frac{t^2}{T} + (1-a) f_1 t \right]}, \quad (2)$$

où $\lambda = \frac{(f_0 - f_1)T}{\ln(\beta)}$ et $\beta = \frac{a f_1}{f_0}$. Le terme $\text{Rect} \left\{ \frac{t}{T} \right\}$ est la fonction porte définie par

$$\text{Rect}\{t\} = \begin{cases} 1 & \text{pour } -\frac{1}{2} \leq t \leq \frac{1}{2} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}. \quad (3)$$

3 Émissions réelles

3.1 Cadre expérimental

Afin de compléter l'étude de la validité de la forme d'onde bio-inspirée en tant que forme d'onde radar [5], une étude expérimentale a été menée. Le radar HYCAM [6], situé à l'ONERA Palaiseau, a été utilisé pour émettre des signaux réels et vérifier le comportement radar du signal bio-inspiré. HYCAM, présenté en figure 2, opère dans la bande S (2 à 4GHz) grâce à deux antennes (une pour l'émission et la seconde pour la réception) montées sur une tourelle, le rendant capable de traquer des cibles sur une large région.

Trois fonctions de Parsons et un chirp servant de référence ont été envoyés successivement, comme présenté sur le spectrogramme (représentation temps-fréquence) de la figure 3. Les paramètres d'émission sont fournis dans le tableau 1. Chaque impulsion dure $T = 5\mu\text{s}$ et est séparée de la suivante, qui est une forme d'onde différente, par un interpulse de $T_p = 50\mu\text{s}$. La même forme d'onde se répète alors avec une PRI (Période de Répétition des Impulsions) de $T_r = 200\mu\text{s}$.

De par la présence des aéroports de Roissy et d'Orly, le trafic aérien au-dessus de Paris offre de nombreuses cibles d'intérêt. L'objectif des essais était donc de traquer des avions dans la zone d'opération d'HYCAM. Dans la suite de l'article, les résultats présentés concernent un Airbus A320 (HEX code 440128) quittant Orly le Vendredi 31 Mai 2024.

3.2 Traitement des données

Les formes d'ondes étant entrelacées, la réception des échos liés à une impulsion donnée n'est possible que sur une période



FIGURE 2 : HYCAM - antennes à l'horizontale <https://www.onera.fr/en/demr-research-units>.

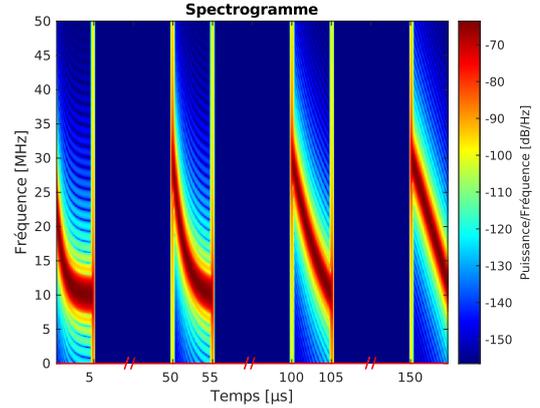


FIGURE 3 : Formes d'ondes entrelacées et émises avec HYCAM.

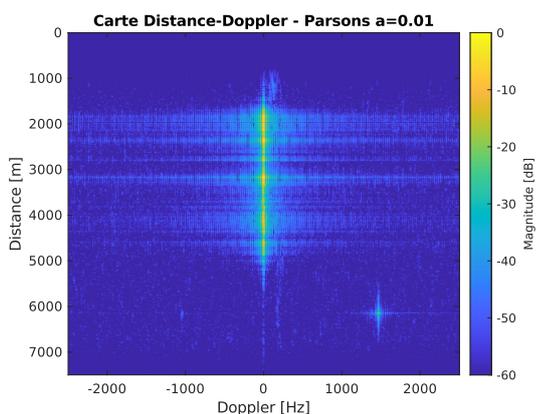
Paramètres	Valeurs
Largeur de bande B	20MHz
Fréquence d'échantillonnage F_s	25MHz
Durée d'impulsion T	5 μs
Durée interpulse T_p	50 μs
PRI T_r	200 μs
Paramètre a	[0.01, 0.1, 1]

TABLE 1 : Paramètres d'émission.

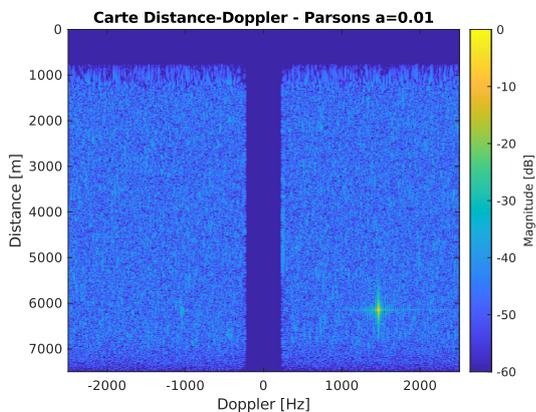
$T_p = 50\mu\text{s}$, soit une ambiguïté distance de 7.5km. De plus, les antennes d'émission et de réception étant proches l'une de l'autre, le couplage doit être pris en compte. Cela équivaut à ignorer au minimum les $T = 5\mu\text{s}$ initiales de la période de réception liées au signal émis. Pour assurer une bonne lecture des données, les $10\mu\text{s}$ initiales sont ignorées, ce qui équivaut à une zone aveugle de 1.5km. Cela n'a aucun impact dans notre cas, étant donné que les avions ciblés évoluent à de plus grandes distances.

Pour la compression distance, le filtre adapté (MF pour Matched Filter) est utilisé, car connu pour maximiser le rapport signal à bruit. Néanmoins, des lobes secondaires de fort niveau peuvent apparaître et empêcher la détection de cibles de faible énergie. Dans ce cas, le filtre désadapté (MMF pour MisMatched Filter) peut aussi être utilisé [7]. C'est la solution d'un problème d'optimisation convexe, communément utilisée en radar pour minimiser le niveau des lobes secondaires. Des contraintes sur la longueur du filtre ou encore la perte de gain maximale (126 échantillons et 2dB dans cette étude) peuvent être incluses pour calculer le MMF de chaque forme d'onde via un algorithme basé sur une approche primale-duale [8].

Enfin, avant d'obtenir les cartes Distance-Doppler, l'impact du fouillis environnemental doit être pris en compte. Ce fouillis, qui englobe la végétation, les bâtiments ou même la pluie présents dans la zone observée, répond fortement à Doppler nul ou faible. Cela a pour effet de gêner la détection de cibles potentielles. Un algorithme de suppression du fouillis, l'Extensive Cancellation Algorithm (ECA) [9], est donc implémenté. Les données comprimées en délai sont projetées sur un sous-espace orthogonal au sous-espace de perturbations, une zone de faible Doppler autour du Doppler nul ($[-200; 200]$ Hz dans le cas présent), afin d'annuler l'impact du fouillis. L'algorithme permet ainsi de passer de la carte distance-Doppler de la figure 4(a) à celle de la figure 4(b) où les lobes secondaires dus au fouillis ne s'étalent plus en Doppler. De plus, la réponse de la cible située à environ 6km dans cet exemple est nettement plus visible, avec un gain d'environ 15dB.



(a) Avant ECA.



(b) Après ECA.

FIGURE 4 : Cartes distance-Doppler pour une fonction de Parsons ($a = 0.01$) avant et après réjection du fouillis. La compression distance est obtenue avec le filtre adapté.

3.3 Observations et discussion

L'acquisition a permis de suivre l'A320 pendant 2 minutes. La position réelle de l'aéronef peut être vérifiée grâce aux données ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast) disponibles librement dans des bases de données [10]. Il est ainsi possible de comparer les mesures obtenues avec le filtre adapté et les différentes formes d'ondes, à la distance réelle donnée par les coordonnées GPS de l'avion. La figure 5 permet d'observer l'évolution de la distance entre le radar et l'avion

au cours du temps sur une période de 10 secondes. L'intervalle en gris prend en compte l'incertitude sur la position estimée de l'avion² d'environ ± 30 m liée à l'imprécision du GPS. Il est ainsi visible que les différentes formes d'ondes permettent d'obtenir le même résultat. En prenant le chirp comme référence, l'erreur intégrée sur 50 secondes est de 4 à 3m environ avec les trois formes d'ondes bio-inspirées. En ce qui concerne la différence avec la trace GPS réelle, l'erreur intégrée commise avec les formes d'ondes est inférieure à l'intervalle d'imprécision de ± 30 m. La fonction de Parsons permet donc de pister un aéronef avec une précision comparable à celle du chirp.

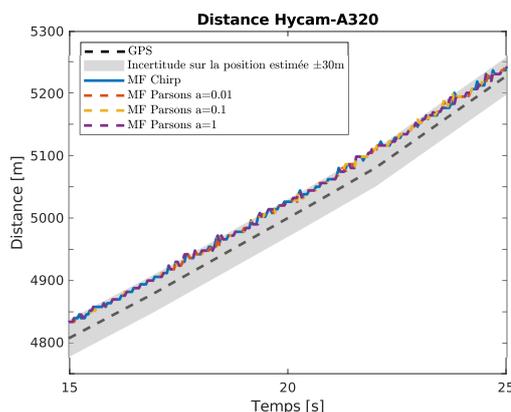


FIGURE 5 : Évolution de la distance radar-avion au cours du temps.

Un autre aspect observable du traitement réside dans la réduction des lobes secondaires. En effet, comme l'illustre la figure 6, une fonction hyperbolique telle que la fonction de Parsons peut présenter de forts niveaux de lobes secondaires surtout lorsque la courbure est importante ($a = 0.01$ dans l'exemple). Ces forts lobes secondaires, capables de masquer

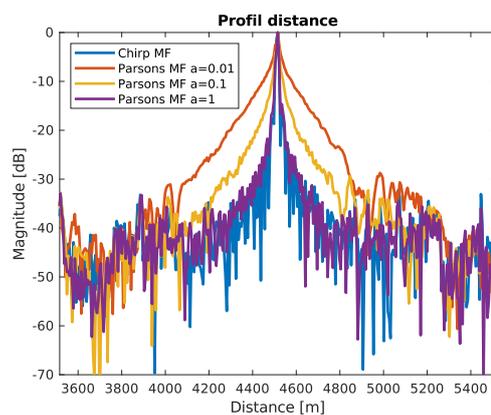


FIGURE 6 : Exemple de profil distance obtenu avec le filtre adapté pour les différents signaux.

des cibles de plus faible énergie, sont liés à la présence d'une composante fréquentielle constante, plus ou moins longue selon la courbure du signal. Comme pour les chauves-souris, une composante à fréquence constante est plus adaptée à la détection et à l'estimation du Doppler, tandis qu'une modulation de fréquence permet de réaliser une estimation précise de la distance à la cible [11][12].

²rayon du cercle de l'intervalle de confiance à 95% centré sur l'avion.

Il est néanmoins possible de réduire le niveau de ces lobes secondaires grâce au filtre désadapté. Le niveau de lobes secondaires peut être évalué par l'ISLR (Integrated SideLobe Ratio) et le PSLR (Peak-SideLobe Ratio). Le premier désigne le rapport entre l'énergie totale des lobes secondaires et celle du lobe principal tandis que le second décrit le ratio entre le plus énergétique des lobes secondaires et le lobe principal.

La figure 7 permet d'observer l'impact du MMF sur l'ISLR sur une période de 50 secondes (avant la première ambiguïté distance). Dans cet exemple, le niveau d'ISLR de la fonction de Parsons avec la courbure la plus hyperbolique est présenté. Il est alors observable que l'utilisation du MMF permet d'obtenir des niveaux comparables à ceux obtenus avec le chirp. Le tableau 2 résume les niveaux d'ISLR moyens mesurés pour chaque forme d'onde. Globalement, les résultats acquis avec le filtre désadapté concordent avec les niveaux obtenus dans des simulations avec les mêmes paramètres. Le gain minime et la différence avec les simulations sur le MMF pour le chirp et l'une des fonctions de Parsons ($a = 1$) peuvent s'expliquer par le sous-échantillonnage.

Concernant le PSLR, il est également diminué avec le MMF. Le niveau moyen atteint une vingtaine de décibels pour chaque forme d'onde, avec un gain variant de 5 à 8dB. Qui plus est, l'utilisation du filtre désadapté n'a que peu d'impact sur l'estimation en distance. L'erreur moyenne entre la distance mesurée avec le filtre adapté et celle obtenue avec le filtre désadapté n'est que de 3m.

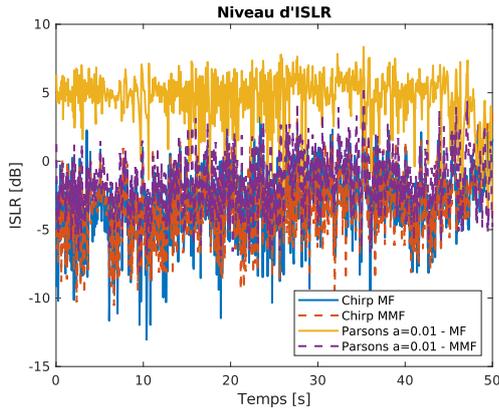


FIGURE 7 : Évolution de l'ISLR au cours du temps pour une fonction de Parsons et le chirp.

Signal	$ISLR_{MF}$ [dB]	$ISLR_{MMF}$ [dB]
Chirp	-3.1 (-3.38)	-3.34 (-2.34)
Parsons $a = 0.01$	4.65 (4.79)	-1.58 (-1.42)
Parsons $a = 0.1$	0.9 (1.01)	-3.45 (-2.94)
Parsons $a = 1$	-2.51 (-2.72)	-3.45 (-2.66)

TABLE 2 : ISLR moyens obtenus avec le MF et le MMF. Entre parenthèses sont données les valeurs simulées.

4 Conclusion

L'étude des BCR [5] avait permis d'observer des performances d'estimation distance similaires entre le chirp et la fonction bio-inspirée. Les essais réels ont donc permis de vérifier expérimentalement la théorie. De plus, le niveau des

lobes secondaires, l'une des problématiques principales liée à ce type de modulation hyperbolique, a pu être mitigé via l'implémentation du filtre désadapté. Les résultats sont satisfaisants et montrent que le traitement désadapté peut être appliqué à la fonction de Parsons. Cette dernière représente donc une forme d'onde adéquate pour des applications radars. Ses performances sont satisfaisantes et la flexibilité offerte par le paramètre a permet de créer des signaux variés augmentant ainsi la diversité de formes d'ondes. Dans les perspectives futures, son application dans un cadre multistatique pourra également faire l'objet d'essais réels afin de valider les simulations présentées dans [13] et de répondre à la problématique de congestion de spectre.

Références

- [1] Merrill Ivan Skolnik. *Introduction to radar systems*. McGraw-Hill, New York, 2d ed edition, 1980.
- [2] Hugh Griffiths, Lawrence Cohen, Simon Watts, Eric Mokole, Chris Baker, Mike Wicks, and Shannon Blunt. Radar Spectrum Engineering and Management : Technical and Regulatory Issues. *Proceedings of the IEEE*, 103(1) :85–102, January 2015.
- [3] Annette Denzinger and Hans-Ulrich Schnitzler. Bat guilds, a concept to classify the highly diverse foraging and echolocation behaviors of microchiropteran bats. *Frontiers in Physiology*, 4, 2013.
- [4] S. Parsons and G. Jones. Acoustic identification of twelve species of echolocating bat by discriminant function analysis and artificial neural networks. *Journal of Experimental Biology*, 203(17) :2641–2656, September 2000.
- [5] Anthony Torre, Abigael Taylor, Dominique Poullin, and Thierry Chonavel. Formes d'ondes bio-inspirées : de la chauve-souris au radar. In *GRETSI 2023*, Grenoble, France, August 2023.
- [6] P. Brouard, P. Dreuillet, A. Brun, L. Constancias, J. Peyret, and S. Attia. HYCAM : a new S band surface radar testbed. In *IET International Radar Conference 2013*, pages 0313–0313, Xi'an, China, 2013. Institution of Engineering and Technology.
- [7] Olivier Rabaste and Laurent Savy. Mismatched filter optimization for radar applications using quadratically constrained quadratic programs. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 51(4) :3107–3122, October 2015.
- [8] Maria-Elisavet Chatzitheodoridi. *Processing Optimization for Continuous Phase Modulation-based Joint Radar-Communication System : Application on Imaging Radar*. Phd thesis, Université Paris-Saclay, February 2023.
- [9] F. Colone, D. W. O'Hagan, P. Lombardo, and C. J. Baker. A multistage processing algorithm for disturbance removal and target detection in passive bistatic radar. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 45(2) :698–722, 2009.
- [10] Adsb.fi. Worldwide ADS-B open database. <https://adsb.fi/>.
- [11] James A. Simmons. Response of the Doppler echolocation system in the bat, *Rhinolophus ferrumequinum*. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 56(2) :672–682, August 1974.
- [12] B. Vogler and G. Neuweiler. Echolocation in the noctule (*Nyctalus noctula*) and horseshoe bat (*Rhinolophus ferrumequinum*). *Journal of Comparative Physiology*, 152(3) :421–432, 1983.
- [13] Anthony Torre, Abigael Taylor, Dominique Poullin, and Thierry Chonavel. Bio-inspired Waveform in a Multistatic Configuration. In *RADAR 2024*, Rennes, France, October 2024.