

3. Les données du club STAP

Stéphanie Bidon¹, Marc Montécot², Laurent Savy³

1. Université de Toulouse

Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace

Département Électronique Optronique et Signal

10 avenue Edouard Belin

F-31055 Toulouse Cedex 4

stephanie.bidon@isae.fr

2. Thalès Systèmes Aéroportés

2 avenue Gay Lussac

F-78851 Élancourt Cedex

marc.montecot@fr.thalesgroup.com

3. Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales

BP 80100

F-91123 Palaiseau Cedex

laurent.savy@onera.fr

RÉSUMÉ. Cet article présente un panel illustratif des données radar qui sont à la disposition des membres du club STAP. En particulier, on présente les données semi-synthétiques de la DGA-Maîtrise de l'Information, les données synthétiques de l'ONERA et enfin les données réelles fournies par Thalès Systèmes Aéroportés. Les spécificités de chaque jeu de données sont soulignées.

ABSTRACT. This paper gives an overview of the radar data that are available to the "club STAP" members. More specifically, datacubes of the DGA-Maîtrise de l'Information are described as well as the synthetic data of ONERA and the experimental data from Thales Airborne Systems. Special features are highlighted according to each data set.

MOTS-CLÉS : filtrage, traitement spatio-temporel adaptatif, données STAP expérimentales et synthétiques.

KEYWORDS: filtering, space-time adaptive processing, experimental and synthetic STAP data.

Extended abstract

In 2006, a technical meeting about space-time adaptive processing (STAP) has been organized by the French Department of Defense (DGA, *Délégation Générale de l'Armement*) at ENSTA, Paris. During this meeting, it appeared to the French radar community as a good opportunity to create a group that could federate the work of people in this research area. The French “Club STAP” was then borne.

Soon, it appeared essential to club members to share common sets of data to compare the efficiency and assess the robustness of STAP algorithms that either already exist or will be developed in the future.

The “club STAP” gathers people coming from different affiliations: state agency, firms and universities. Due to this diversity, club members share nowadays an interesting variety of data sets. Among them one can mention datacubes provided by the DGA/MI (DGA *Maîtrise de l'Information*), by THALES and by ONERA. This data can be :

- synthetic data generated via numerical simulations;
- experimental data collected with a reel airborne radar system;
- hybrid data, i.e., in between synthetic and experimental data.

In this paper, characteristics of three types of data sets available to club members are presented.

Firstly, the data set provided by the DGA/MI consists of several datacubes that are either purely synthetic or hybrid. Their generation is based on an original technique where SAR (Synthetic Aperture Radar) images are merged with synthetic target signals. The SAR image can be either synthetically simulated with Gaussian clutter or experimental; in this case the data are said to be hybrid. Realistic phenomena are also taken into account in the simulation chain.

Then, data sets provided by ONERA are described. They are synthetically generated according to the conventional STAP model. However, a realistic antenna with a forward looking configuration is considered. Also, some real-world phenomena, such as calibration errors, can be introduced during the simulation. Gaussian clutter and/or spiky clutter can be chosen when generating the data.

Finally, experimental data sets provided by THALES are presented. Data have been collected with a forward looking antenna configuration. New phenomena, which are usually not observed with synthetic data, arise here. Also, many targets are present in the observed scene.

Compared to conventional synthetic STAP data, the three types of datacubes presented in this paper offer the possibility to assess performance and robustness of STAP algorithms in more realistic scenarios and even real scenarios. So far, many studies have been conducted with these data and are presented in this special issue.

1. Introduction

Le club STAP est né sous l'impulsion du responsable de métier Détection électromagnétique de la Délégation générale de l'armement (DGA) (Ovarlez *et al.*, 2011) à la suite d'un séminaire tenu dans les locaux de l'ENSTA à Paris en 2006 portant sur les traitements spatio-temporels adaptatifs (STAP). Dès la naissance du club STAP, il est apparu essentiel à ses membres d'avoir à disposition des jeux de données communs, constituant un outil de référence précieux pour tester l'efficacité et la robustesse des algorithmes STAP existants ou à venir.

De par la diversité des affiliations des membres du club STAP (Ovarlez *et al.*, 2011), un nombre varié de jeux de données est ainsi à ce jour constitué. On compte en particulier des cubes de données fournis par la DGA-Maîtrise de l'information (DGA/MI), Thalès, et l'ONERA.

Ces données sont de différentes natures :

- elles peuvent être entièrement synthétiques, c'est-à-dire issues de simulations numériques complexes basées sur la modélisation avancée des signaux STAP ;
- elles peuvent être réelles, c'est-à-dire issues de campagnes de mesures par un système radar aéroporté ;
- elles peuvent être hybrides, c'est-à-dire mi-réelles/mi-synthétiques.

On voit tout l'avantage de la mise en commun de telles données, que ce soit pour le coût que peut représenter une campagne de mesures de données réelles ou bien que ce soit pour le temps et l'expérience métier que représente la simulation d'un cube de données STAP en conformité avec un scénario opérationnel.

Dans cet article, nous ne présentons pas de manière exhaustive l'ensemble des jeux de données à disposition des membres du club STAP, mais plutôt un panel illustratif de ceux-ci. Par la suite, les spécificités de chaque jeu de données sont mises en avant. En particulier, les signaux fournis par la DGA/MI sont présentés dans la section 2. Les signaux synthétiques de l'ONERA sont décrits dans la section 3. Enfin, les signaux réels fournis par Thalès sont présentés dans la section 4. La section 5 dresse finalement une conclusion sur la mise à disposition de ces données.

Notons que dans ce numéro spécial de la revue du Traitement du signal, la majorité des auteurs se sont concentrés sur les jeux de données fournies par la DGA/MI par souci de clarté.

2. Données de la DGA Maîtrise de l'information

2.1. Contexte et principe de génération

La DGA/MI sur le site de Bruz (anciennement CELAR) travaille depuis plusieurs années sur des applications militaires SAR (*Synthetic Aperture Radar*) et a ainsi développé un simulateur nommé SIROS (simulateur d'images radar à ouverture synthétique) (Busson, 1988). Après plusieurs évolutions, l'outil permet à ce jour également de générer des données STAP en vue de détecter des cibles mobiles sur le sol (mode GMTI, *Ground Moving Target Indicator*). Le principe de génération est

original et diffère de la méthode classique de génération rappelée dans (Bidon, 2011). Il consiste à mixer une image source (représentant la réflectivité complexe du sol dans le plan distance-azimut) avec la signature de cibles puis à intégrer sur chaque voie spatiale les effets du mouvement du centre de phase de la voie ainsi que ses défauts.

Le simulateur SIROS comporte principalement deux modules de génération de données qui sont MOCEM (Cochin *et al.*, 2009)(Cochin *et al.*, 2008) et MIXSAR (MIXSAR, 2006). MOCEM est un outil de simulation de signature radar qui produit le modèle de diffusion électromagnétique 3D de cibles à partir de modèles classiques CAD (*Computer-Aided Design*) et de modèles simples électromagnétiques. Le module MIXSAR permet, lui, de « mixer » à proprement parler les images source (les fonds) avec les signatures des cibles. Plus précisément, la version MIXSAR V2 (mode GMTI) a permis de générer des données brutes multi-voies composées de cibles mobiles ponctuelles dans un environnement de scène de type image SAR SLC.

Comparé à la méthode présentée dans (Bidon, 2011), divers effets sont pris en compte grâce au simulateur SIROS. À l'émission, des défauts sur le *chirp* sont introduits. En réception, des erreurs en phase et amplitude ainsi que des déséquilibres amplitude et phase sont simulés. Des erreurs codeurs et des phénomènes de non-linéarité sont également introduits. Grâce à de telles données, la robustesse des algorithmes STAP peut être ainsi étudiée dans des contextes technico-opérationnels. Également, celles-ci peuvent compléter des expérimentations en vol. Enfin, notons que le fond de l'image pouvant être une image SAR réelle à très haute résolution (programme THR RAMSES), les données SIROS seront dites hybrides dans ce cas.

Quatre scénarios mettant en œuvre 3 types de fonds sur 4 voies de réception ont permis de constituer les jeux de données mis à la disposition du club STAP. Pour ces jeux de données, il n'a pas été mis en œuvre la capacité du module MIXSAR V2 à prendre en compte le Doppler propre de la végétation.

2.2. Description des essais

L'ensemble des cubes de données SIROS mis à la disposition du club STAP partagent des paramètres de scénario commun donnés dans le tableau 1. On notera en particulier que le radar considéré est à faible fréquence de répétition (PRF, *Pulse Repetition Frequency*) et est donc non ambigu en distance, que la visée est latérale et que l'antenne est linéaire uniforme comportant 4 voies spatiales formées à partir de 20 éléments chacune¹ (figure 1).

Les cubes de données diffèrent entre eux suivant le nombre et les caractéristiques des cibles ainsi que les fonds utilisés qui peuvent être des mires gaussiennes ou bien des images SAR réelles. Au total, on dispose ainsi de 12 essais différents qui sont détaillés dans les tableaux 2 et 3. Pour chacun de ces essais, on dispose de 11 cubes de données. Notons que pour tous les essais, les cibles sont placées dans la direction de visée de l'antenne, c'est-à-dire à la fréquence spatiale $f_s = 0$.

1. En sommant les signaux d'un groupe d'éléments de l'antenne, on définit une voie spatiale. Le paramètre d désigne alors dans ce cas l'espacement entre deux voies.

– Pour les essais (1, 3, 9) décrits dans le tableau 2, trois cibles sont présentes dans le cube de données à des cases distance différentes. Il en est de même pour les essais (2, 4, 10), la différence étant que les cibles ont des niveaux de puissance plus faibles.

– Pour les essais (5, 7, 11) décrits dans le tableau 3, dix cibles sont situées dans le cube de données et sont présentes à la même case distance mais avec des vitesses radiales différentes. Il en est de même pour les essais (6, 8, 12), la différence étant que les cibles ont des niveaux de puissance plus faibles.

Pour tous les essais, le rapport fouillis-à-bruit thermique par voie spatiale après compression distance est égale à $CNR = 20$ dB. Le rapport-signal-à-fouillis par voie spatiale dépend lui de l'essai considéré :

– pour les essais (1, 3, 9, 5, 7, 11), il est pris égal à $SCR = 10$ dB ; ce qui correspond à une surface équivalente radar (RCS, *Radar Cross Section*) de $\zeta = 34$ dBm² ;

– pour les essais (2, 4, 10, 6, 8, 12), il est pris égal à $SCR = -5$ dB ; ce qui correspond à une SER de $\zeta = 19$ dBm².

Tableau 1. Paramètres des données hybrides de la DGA-Maîtrise de l'Information

Porteur	
vitesses	$v_a = 100$ m/s
altitude	$h_a = 2,6$ km
Forme d'onde	
type	<i>chirp</i>
porteuse	$f_0 = 10$ GHz
longueur d'onde	$\lambda_0 = 0,03$ m
largeur de bande	$B = 4,43$ MHz
résolution distance	$\delta_R = c/2B = 30$ m
PRF	$f_r = 1$ kHz
nombre d'impulsions	$M = 64$
nombre de rafales	$N_b = 11$
Antenne	
nombre de voies	$N = 4$
nombre d'éléments par voie	$N_e = 20$
interespacement capteur	$\delta = 1,5$ cm
interespacement voie	$d = 0,3$ m
Pointage	
incidence	$\theta = 5^\circ$
visée	latérale

Tableau 2. Description des essais (1, 3, 9) et (2, 4, 10) des données DGAMI

	Essai 1	Essai 3	Essai 9
Fonds type réflectivité Cibles cellule, vitesse, SCR CNR par voie comprimée	mire Gaussienne $\sigma_0 = -20\text{dBm}^2/\text{m}^2$ $\ell = 216, v = 4 \text{ m/s}, SCR = 10 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = 4 \text{ m/s}, SCR = 10 \text{ dB}$ $\ell = 296, v = -4 \text{ m/s}, SCR = 10 \text{ dB}$ $CNR = 20\text{dB}$	image SAR THR RAMSES $\sigma_0 = -20\text{dBm}^2/\text{m}^2$ $\ell = 215, v = 4 \text{ m/s}, SCR = 10 \text{ dB}$ $\ell = 255, v = 4 \text{ m/s}, SCR = 10 \text{ dB}$ $\ell = 295, v = -4 \text{ m/s}, SCR = 10 \text{ dB}$ $CNR = 20\text{dB}$	image SAR THR RAMSES $\sigma_0 = -20\text{dBm}^2/\text{m}^2$ $\ell = 216, v = 4 \text{ m/s}, SCR = 10 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = 4 \text{ m/s}, SCR = 10 \text{ dB}$ $\ell = 296, v = -4 \text{ m/s}, SCR = 10 \text{ dB}$ $CNR = 20\text{dB}$
Fonds type réflectivité Cibles cellule, vitesse, SCR CNR par voie comprimée	mire Gaussienne $\sigma_0 = -20\text{dBm}^2/\text{m}^2$ $\ell = 216, v = 4 \text{ m/s}, SCR = -5 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = 4 \text{ m/s}, SCR = -5 \text{ dB}$ $\ell = 296, v = -4 \text{ m/s}, SCR = -5 \text{ dB}$ $CNR = 20\text{dB}$	image SAR THR RAMSES $\sigma_0 = -20\text{dBm}^2/\text{m}^2$ $\ell = 215, v = 4 \text{ m/s}, SCR = -5 \text{ dB}$ $\ell = 255, v = 4 \text{ m/s}, SCR = -5 \text{ dB}$ $\ell = 295, v = -4 \text{ m/s}, SCR = -5 \text{ dB}$ $CNR = 20\text{dB}$	image SAR THR RAMSES $\sigma_0 = -20\text{dBm}^2/\text{m}^2$ $\ell = 216, v = 4 \text{ m/s}, SCR = -5 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = 4 \text{ m/s}, SCR = -5 \text{ dB}$ $\ell = 296, v = -4 \text{ m/s}, SCR = -5 \text{ dB}$ $CNR = 20\text{dB}$

Tableau 3. Description des essais (5, 7, 11) et (6, 8, 12) des données DGAMI

	Essai 5	Essai 7	Essai 11
Fonds type réflectivité Cibles cellule, vitesse, SCR	<p>mire Gaussienne $\sigma_0 = -20\text{dBm}^2/\text{m}^2$ $\ell = 256, v = -5 \text{ m/s}, SCR = 10 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = -4 \text{ m/s}, SCR = 10 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = -3 \text{ m/s}, SCR = 10 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = -2 \text{ m/s}, SCR = 10 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = -1 \text{ m/s}, SCR = 10 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = 1 \text{ m/s}, SCR = 10 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = 2 \text{ m/s}, SCR = 10 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = 3 \text{ m/s}, SCR = 10 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = 4 \text{ m/s}, SCR = 10 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = 5 \text{ m/s}, SCR = 10 \text{ dB}$ $CNR = 20\text{dB}$</p>	<p>image SAR THR RAMSES $\sigma_0 = -20\text{dBm}^2/\text{m}^2$ $\ell = 250, v = -5 \text{ m/s}, SCR = 10 \text{ dB}$ $\ell = 250, v = -4 \text{ m/s}, SCR = 10 \text{ dB}$ $\ell = 250, v = -3 \text{ m/s}, SCR = 10 \text{ dB}$ $\ell = 250, v = -2 \text{ m/s}, SCR = 10 \text{ dB}$ $\ell = 250, v = -1 \text{ m/s}, SCR = 10 \text{ dB}$ $\ell = 250, v = 1 \text{ m/s}, SCR = 10 \text{ dB}$ $\ell = 250, v = 2 \text{ m/s}, SCR = 10 \text{ dB}$ $\ell = 250, v = 3 \text{ m/s}, SCR = 10 \text{ dB}$ $\ell = 250, v = 4 \text{ m/s}, SCR = 10 \text{ dB}$ $\ell = 250, v = 5 \text{ m/s}, SCR = 10 \text{ dB}$ $CNR = 20\text{dB}$</p>	<p>image SAR THR RAMSES $\sigma_0 = -20\text{dBm}^2/\text{m}^2$ $\ell = 256, v = -5 \text{ m/s}, SCR = 10 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = -4 \text{ m/s}, SCR = 10 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = -3 \text{ m/s}, SCR = 10 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = -2 \text{ m/s}, SCR = 10 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = -1 \text{ m/s}, SCR = 10 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = 1 \text{ m/s}, SCR = 10 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = 2 \text{ m/s}, SCR = 10 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = 3 \text{ m/s}, SCR = 10 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = 4 \text{ m/s}, SCR = 10 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = 5 \text{ m/s}, SCR = 10 \text{ dB}$ $CNR = 20\text{dB}$</p>
CNR par voie comprimée			
	Essai 6	Essai 8	Essai 12
Fonds type réflectivité Cibles cellule, vitesse, SCR	<p>mire Gaussienne $\sigma_0 = -20\text{dBm}^2/\text{m}^2$ $\ell = 256, v = -5 \text{ m/s}, SCR = -5 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = -4 \text{ m/s}, SCR = -5 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = -3 \text{ m/s}, SCR = -5 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = -2 \text{ m/s}, SCR = -5 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = -1 \text{ m/s}, SCR = -5 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = 1 \text{ m/s}, SCR = -5 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = 2 \text{ m/s}, SCR = -5 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = 3 \text{ m/s}, SCR = -5 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = 4 \text{ m/s}, SCR = -5 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = 5 \text{ m/s}, SCR = -5 \text{ dB}$ $CNR = 20\text{dB}$</p>	<p>image SAR THR RAMSES $\sigma_0 = -20\text{dBm}^2/\text{m}^2$ $\ell = 250, v = -5 \text{ m/s}, SCR = -5 \text{ dB}$ $\ell = 250, v = -4 \text{ m/s}, SCR = -5 \text{ dB}$ $\ell = 250, v = -3 \text{ m/s}, SCR = -5 \text{ dB}$ $\ell = 250, v = -2 \text{ m/s}, SCR = -5 \text{ dB}$ $\ell = 250, v = -1 \text{ m/s}, SCR = -5 \text{ dB}$ $\ell = 250, v = 1 \text{ m/s}, SCR = -5 \text{ dB}$ $\ell = 250, v = 2 \text{ m/s}, SCR = -5 \text{ dB}$ $\ell = 250, v = 3 \text{ m/s}, SCR = -5 \text{ dB}$ $\ell = 250, v = 4 \text{ m/s}, SCR = -5 \text{ dB}$ $\ell = 250, v = 5 \text{ m/s}, SCR = -5 \text{ dB}$ $CNR = 20 \text{ dB}$</p>	<p>image SAR THR RAMSES $\sigma_0 = -20\text{dBm}^2/\text{m}^2$ $\ell = 256, v = -5 \text{ m/s}, SCR = -5 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = -4 \text{ m/s}, SCR = -5 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = -3 \text{ m/s}, SCR = -5 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = -2 \text{ m/s}, SCR = -5 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = -1 \text{ m/s}, SCR = -5 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = 1 \text{ m/s}, SCR = -5 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = 2 \text{ m/s}, SCR = -5 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = 3 \text{ m/s}, SCR = -5 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = 4 \text{ m/s}, SCR = -5 \text{ dB}$ $\ell = 256, v = 5 \text{ m/s}, SCR = -5 \text{ dB}$ $CNR = 20 \text{ dB}$</p>
CNR par voie comprimée			

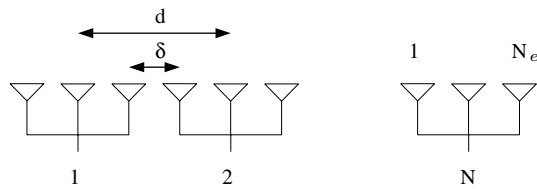


Figure 1. Antenne multi-voies pour les données DGA/MI

2.3. Voie somme

Afin de mieux appréhender les signaux STAP fournis par la DGA/MI, on s'intéresse dans cette section à la sortie classique du traitement Doppler appliqué sur la voie somme. On rappelle que la voie somme correspond au signal obtenu en sommant, sans pondération, les N voies spatiales du réseau. Les sorties du traitement Doppler sont représentées pour la première rafale de chaque essai sur les figures 2, 3, 4 et 5.

D'après les figures 2 et 3, les trois cibles présentes dans le cube de données sont clairement visibles et retrouvées aux positions attendues. On observe également bien que la puissance des cibles est plus forte pour les essais (1, 3, 9) que pour les essais (2, 4, 10). Le fouillis lui est localisé autour de la vitesse nulle ; ce qui est attendu pour un radar aéroporté en visée latérale. La comparaison entre l'essai 1 (respectivement 2), pour lequel le fond d'image est une mire gaussienne, et les essais 3 et 9 (respectivement 4 et 10), pour lesquels les fonds d'image sont des images SAR réelles, permet de constater que le fouillis a une allure bien plus homogène avec des données purement synthétiques qu'avec des données hybrides. Soulignons que pour les essais (1, 3, 9) et (2, 4, 10), les cibles sont clairement détectables grâce à un simple traitement Doppler car celles-ci sont localisées, en sortie de ce traitement, loin du fouillis dans l'espace distance-vitesse. On les qualifie de cible exo-fouillis.

Ceci n'est en revanche plus le cas pour les essais (5, 7, 11) et (6, 8, 12) représentés sur les figures 4 et 5. On rappelle que pour ces essais dix cibles se trouvent présentes dans le cube de données à la même case distance mais avec des vitesses distinctes. D'après les figures 4 et 5, on observe ainsi que les cibles lentes sont trop proches du fouillis dans la carte distance-vitesse obtenue par traitement Doppler pour être détectables. C'est en particulier pour ce type de cibles, dites endo-fouillis, que le STAP aura un réel apport.

Disposer de scénarios similaires comportant soit des cibles exo-fouillis soit des cibles endo-fouillis a ainsi un double avantage. Dans un premier temps, les scénarios avec cible exo-fouillis permettent de « calibrer » l'algorithme STAP étudié ; c'est-à-dire de vérifier que l'algorithme permet de détecter correctement des cibles qui sont visibles par un simple traitement Doppler. Dans un second temps, les scénarios comportant des cibles endo-fouillis permettent de quantifier plus précisément les performances de l'algorithme et de ce fait l'apport du STAP. Par exemple, une question d'intérêt est la détermination de la vitesse minimale de détection d'une cible grâce au STAP.

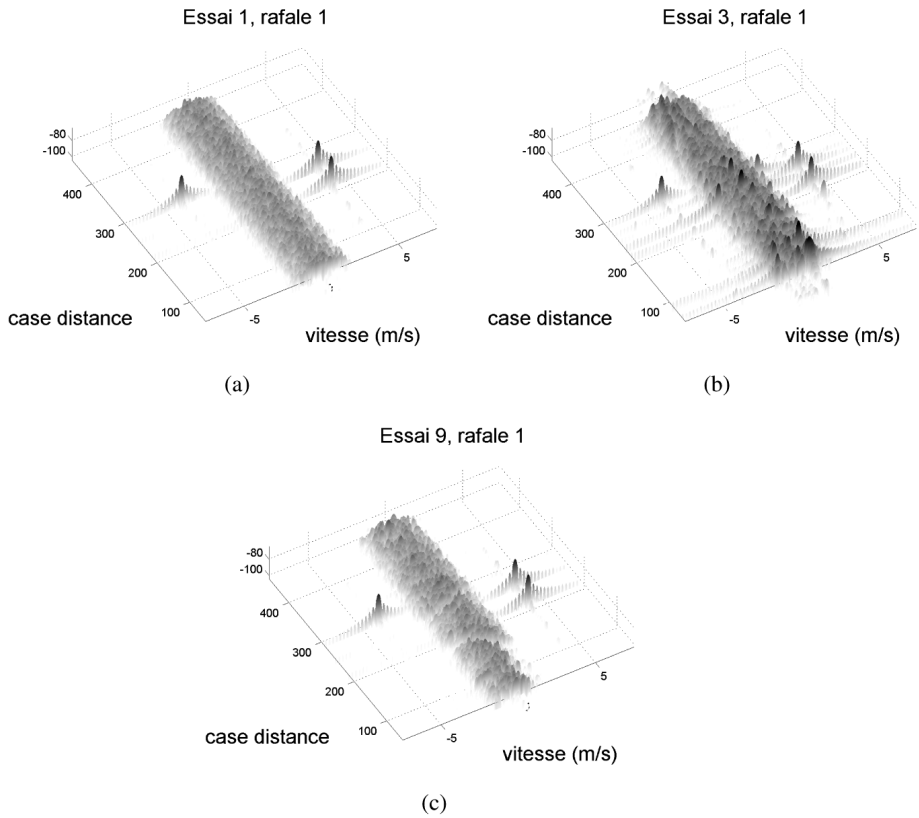


Figure 2. Voie somme pour les signaux DGA. (a) Essai 1, rafale 1. (b) Essai 3, rafale 1. (c) Essai 9, rafale 1

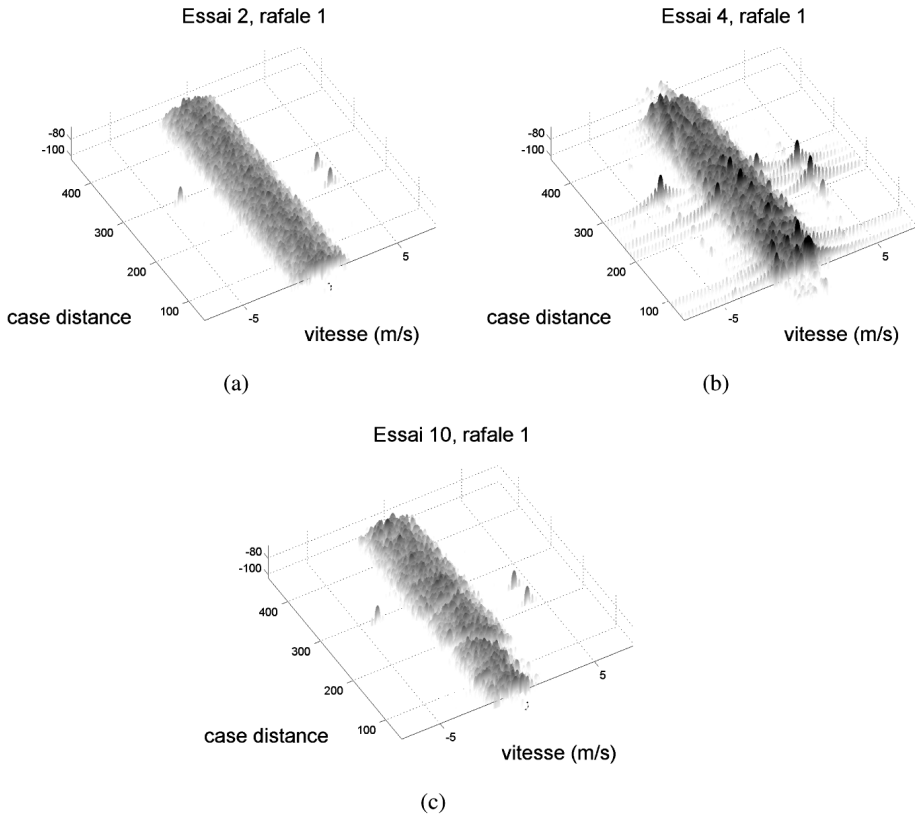


Figure 3. Voie somme pour les signaux DGA. (a) Essai 2, rafale 1. (b) Essai 4, rafale 1. (c) Essai 10, rafale 1

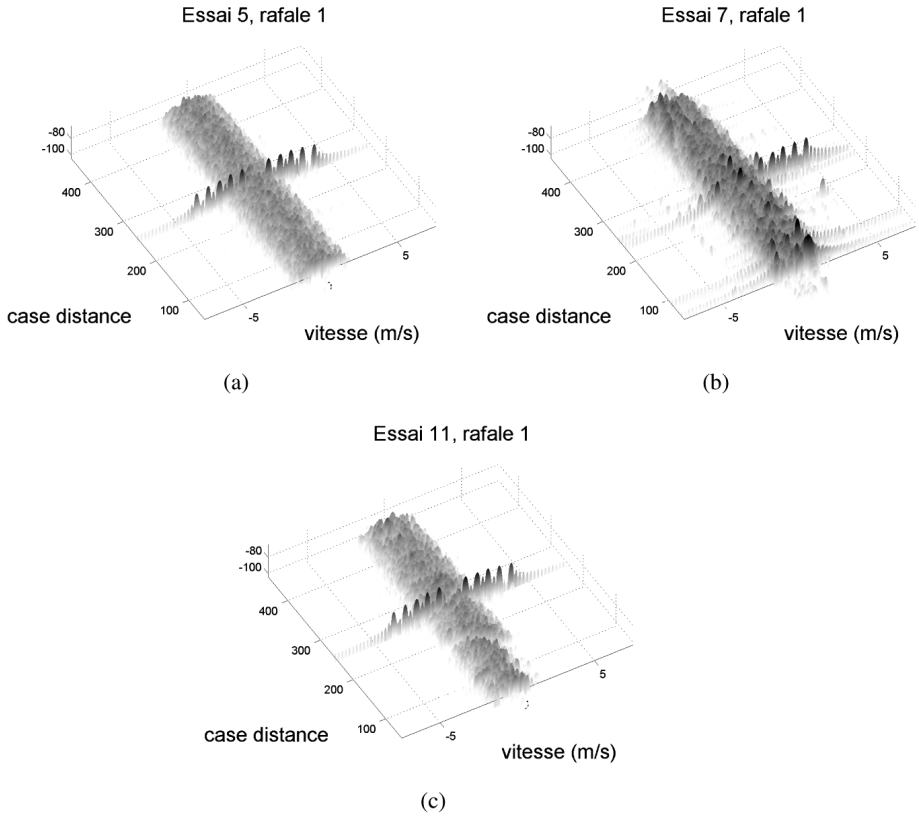


Figure 4. Voie somme pour les signaux DGA. (a) Essai 5, rafale 1. (b) Essai 7, rafale 1. (c) Essai 11, rafale 1

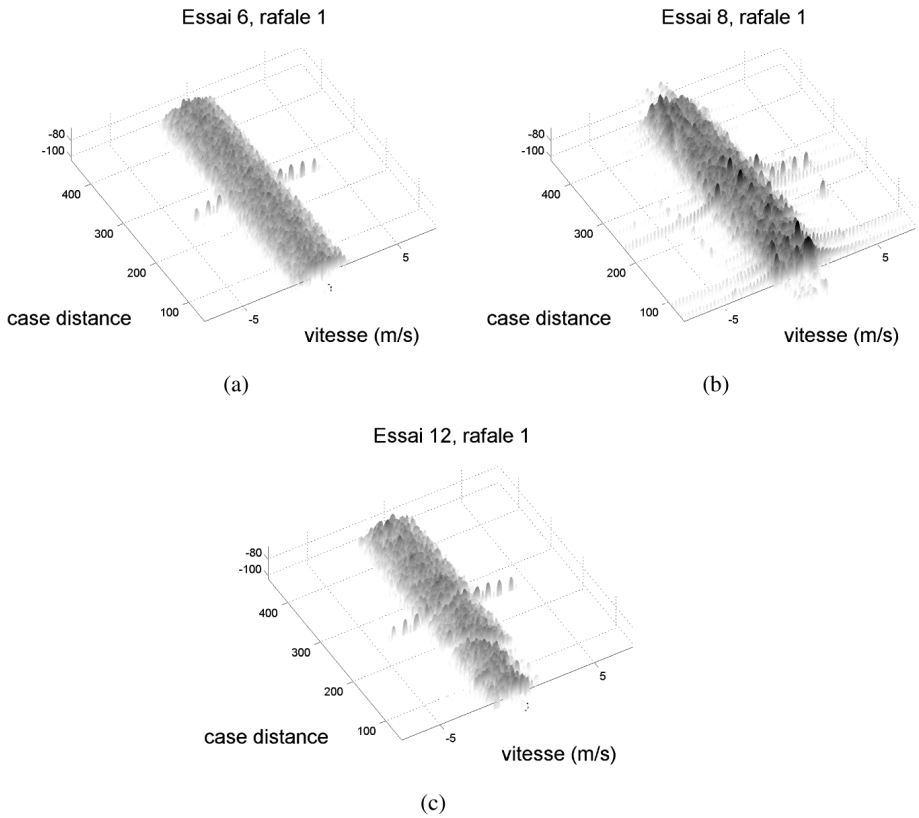


Figure 5. Voie somme pour les signaux DGA. (a) Essai 6, rafale 1. (b) Essai 8, rafale 1. (c) Essai 12, rafale 1

2.4. Analyse spectrale

L'application du traitement Doppler sur la voie somme, présentée dans la section précédente, permet de localiser les différentes composantes du signal reçu dans le domaine distance-vitesse mais sans discriminer celles-ci par rapport à leur direction angulaire. Pour aller plus loin dans l'analyse des signaux de la DGA/MI, on s'intéresse ici au contenu spectral dans l'espace angle-Doppler pour une case distance du cube de données. Nous focalisons l'étude sur la rafale 1 de l'essai 1, et, en particulier, sur la case distance $\ell = 256$ qui contient une cible à la vitesse $v = 4$ m/s, ce qui correspond à une fréquence Doppler égale à $f_d \approx 0,27$.

Le contenu spectral angle-Doppler est obtenu grâce à des estimateurs éprouvés dans la littérature que sont la transformée de Fourier (FFT), l'APES (Li *et al.*, 1996 ; Stoica *et al.*, 2000) et le filtrage de Capon (Capon, 1969). On rappelle que l'analyse par transformée de Fourier donne lieu à de forts lobes secondaires, les estimateurs APES et Capon donnent une analyse plus fine : l'APES estime mieux les amplitudes alors que le Capon à une plus grande résolution mais sous-estime les amplitudes. Les résultats sont représentés sur la figure 6. On y retrouve le fouillis de sol localisé sur une droite de pente $\beta = 2v_a T_r / d \approx 2/3$ et la cible qui est localisée à la fréquence $(f_d, f_s) = (0,27; 0)$.

À titre de comparaison, on présente également l'analyse spectrale de la matrice de covariance $\mathbf{R} = \mathbf{R}_c + \mathbf{R}_n$ qui est la somme de la matrice de covariance du fouillis \mathbf{R}_c et de celle du bruit thermique \mathbf{R}_n . La matrice \mathbf{R} est obtenue avec la méthode classique de génération du fouillis rappelée dans (Bidon, 2011). Les paramètres utilisés pour la simulation sont ceux du tableau 1, le rapport fouillis-à-bruit total défini par le ratio $\text{tr}\{\mathbf{R}_c\}/\text{tr}\{\mathbf{R}_n\}$ est choisi égal à 24 dB. Les estimateurs spectraux utilisés sont les méthodes SM (*Signal Match*) et MVE (*Minimum Variance Estimator*). Ceux-ci sont les pendants respectifs de la transformée de Fourier et de l'estimateur Capon pour un vecteur de données (Klemm, 2002). Les résultats sont donnés sur la figure 7. On y a également représenté les pertes en rapport signal-à-bruit optimal dans la direction $f_s = 0$ – le critère est défini dans (Bidon, 2011) – qui permettent d'observer aussi le lieu du fouillis. Ainsi, on retrouve bien la droite du fouillis de pente $\beta \approx 2/3$. Notons que l'analyse MVE est plus fine et permet d'observer de très faibles contributions du fouillis sur d'autres droites. Celles-ci correspondent en fait au repliement spatial de la droite principale ; en effet on a pour ce scénario $d \gg \lambda_0/2$. Ces contributions se retrouvent sur la figure 7(c), où de légères pertes sont observées par rapport aux pertes en bruit blanc qui sont nulles avec cette métrique.

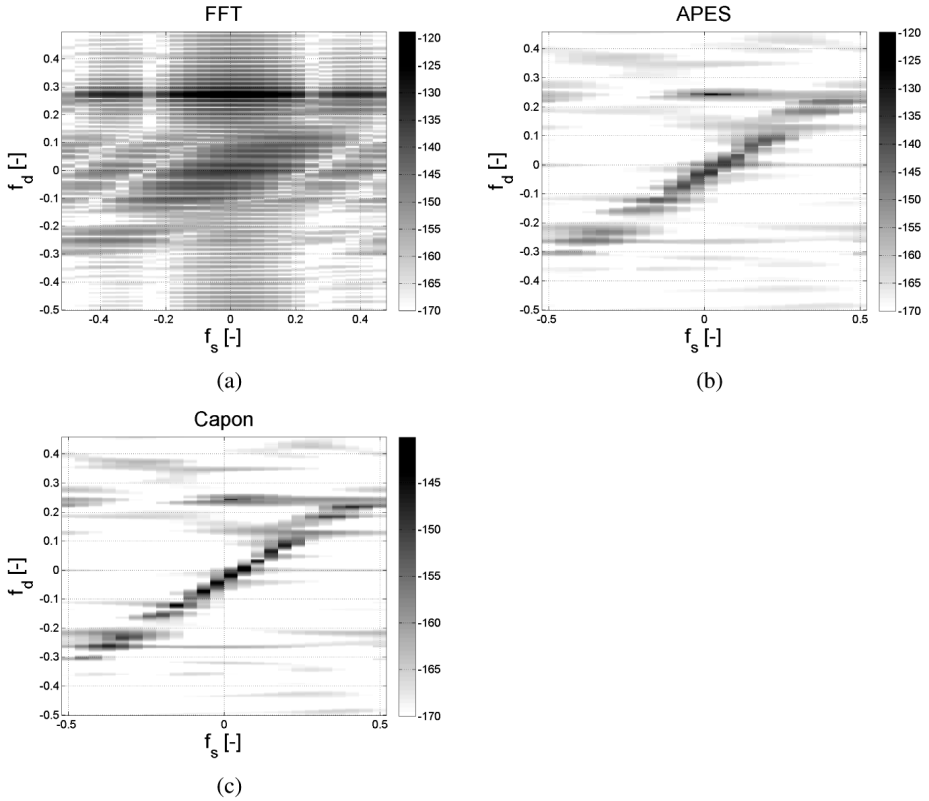


Figure 6. Analyse spectrale pour la case distance $\ell = 256$ – rafale 1 de l'essai 1 des données de la DGA/MI. (a) 2D-FFT. (b) Estimateur APES. (c) Estimateur Capon

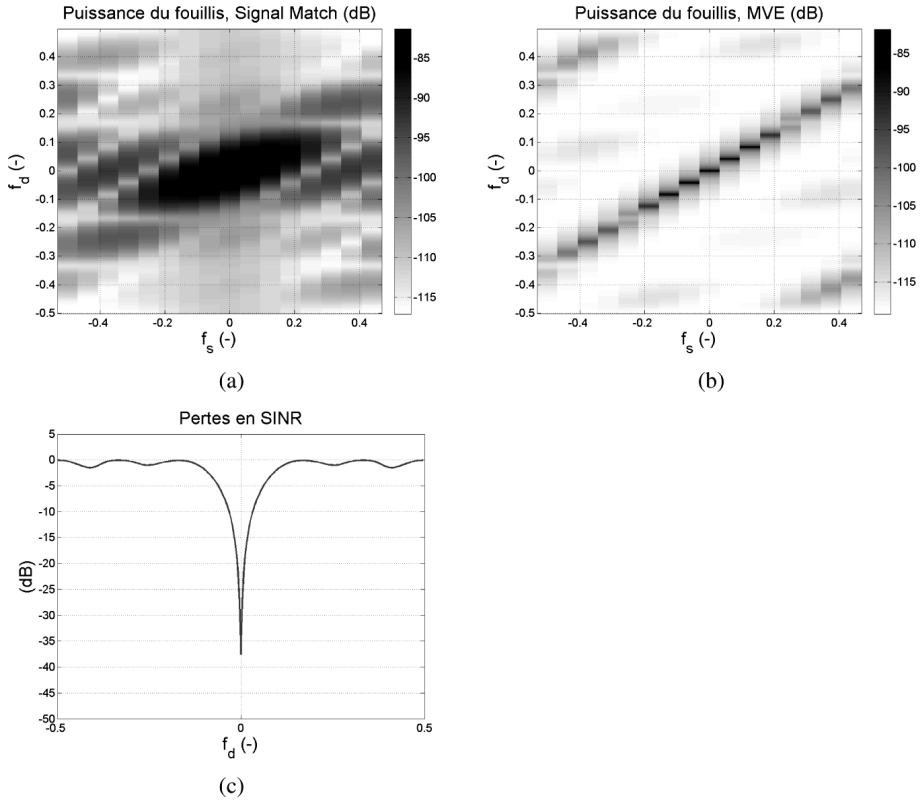


Figure 7. Analyse spectrale du contenu de la matrice de covariance du fouillis et de bruit thermique obtenue pour un scénario proche de celui de la DGA/MI. (a) Analyse spectrale SM. (b) Analyse spectrale MVE. (c) Pertes en SINR optimal

3. Données ONERA

3.1. Contexte et principe de génération

Les données ONERA mises à la disposition du club STAP sont des données synthétiques. Elles sont générées à l'aide d'une simulation du signal radar renvoyé par le fouillis et les cibles, incluant une modélisation fine de l'antenne. Cette dernière prend en compte la découpe spécifique en sous-réseaux, la disparité des diagrammes amplitude-phase entre sous-réseaux et les inévitables erreurs de positionnement/gain/phase des éléments rayonnants. La démarche retenue pour la génération de données s'appuie entièrement sur le calcul direct de la matrice de covariance spatio-temporelle du fouillis. Les avantages de cette démarche sont nombreux.

- Le calcul de la matrice de covariance du fouillis permet la mise en œuvre du traitement clairvoyant. Cela permet d'accéder à une référence ultime pour l'évaluation des algorithmes sous-optimaux, et d'évaluer de manière exacte certaines métriques de performance (pertes en SINR, résidu de fouillis, etc).

- Capacité à générer plusieurs tirages de la même scène avec la matrice de covariance en un temps rapide (le calcul de la matrice de covariance est de très loin le plus gros consommateur de temps de calcul).

- Capacité à rajouter aisément des textures différentes lors de la génération, toujours sur la base de la même matrice de covariance.

- Possibilité d'inclure des défauts radars supplémentaires entre voies dus aux chaînes de réception, après génération d'un signal réaliste « sortie antenne ».

Le principe de calcul de la matrice de covariance du fouillis réside dans le calcul de la surface du sol interceptée par chaque cellule distance-Doppler élémentaire, sous une hypothèse de terre ronde et de décorrélation spatiale du fouillis. Cette surface, associée à un angle d'incidence, permet de calculer la SER (surface équivalente Radar) du fouillis dans chaque cellule. Dans une deuxième étape, le calcul d'une équation radar en amplitude/phase incluant les gains d'antenne complexes des sous-réseaux (en tirant partie de la relation entre fréquence Doppler et direction de visée), permet de calculer la matrice de covariance spatiale du fouillis au sein de chaque cellule distance-Doppler. Une transformée de Fourier inverse sur l'ensemble des fréquences Doppler permet ensuite finalement d'obtenir la matrice de covariance spatio-temporelle dans une cellule distance.

3.2. Description des données

Les données mises à disposition correspondent à un radar pointe-avant (implantation frontale de l'antenne) en mode air-sol. Une illustration de la géométrie de ce scénario est donnée sur la figure 8, et les principaux paramètres associés sont résumés dans le tableau 4. L'antenne modélisée est une antenne circulaire à 8 sous-réseaux de type AMSAR (*Airborne Multi-role Solid-state Active-array Radar*) (Milin *et al.*, 2010), dont la découpe est rappelée sur la figure 9. Les données générées sont stockées dans un tableau 3D (numéro de case distance, numéro d'impulsion, numéro de sous-réseau). La sortie voie somme classique est ainsi obtenue aisément par sommation sur la 3^e dimension (sommation des signaux en sortie des différents sous-réseaux).

Tableau 4. Paramètres des données ONERA

Porteur	
vitesse	$v_a = 180 \text{ m/s}$
altitude	$h_a = 3000 \text{ m}$
Forme d'onde	
type	<i>chirp</i>
porteuse	$f_0 = 10 \text{ GHz}$
longueur d'onde	$\lambda_0 = 0,03 \text{ m}$
largeur de bande	$B = 2 \text{ MHz}$
résolution distance	$\delta_R = c/2B = 75 \text{ m}$
PRF	$f_r = 1 \text{ kHz}$
nombre de rafales	$N_b = 1$
nombre d'impulsions	$M = 64$
Antenne	
type	circulaire
nombre de voies	$N = 8$
ouverture sur chaque axe	$\approx 4^\circ$
Pointage	
élévation	$\theta = -3^\circ$
azimut	30°

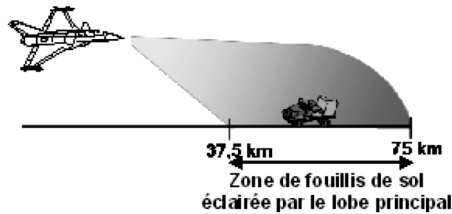


Figure 8. Géométrie de la configuration Air-Sol des données ONERA

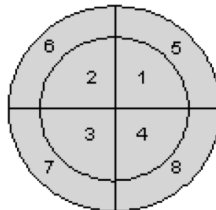


Figure 9. Découpe en sous-réseaux de l'antenne simulée (données ONERA)

La figure 10 montre la carte distance-vitesse de la voie somme dans le cadre de la configuration du tableau 1. Elle présente en particulier un fouillis piqué dans une zone entre 45 km et 52 km, et un fouillis gaussien de niveau plus faible entre 60 et 68 km. On peut également noter la grande densité de cibles. La figure 11 fournit les positions exactes des cibles mobiles et des échos forts de ponctuels fixes associées aux données mises à disposition afin de faciliter l'interprétation. Un convoi a été simulé à la distance de 60 km et à la vitesse de 4 m/s (non visible sur la voie somme car noyé dans les retours de fouillis). Les positions des échos fixes et mobiles sont sur-imprimées sur la carte distance-vitesse de la voie somme de la figure 10 représentée cette fois ci « à plat ».

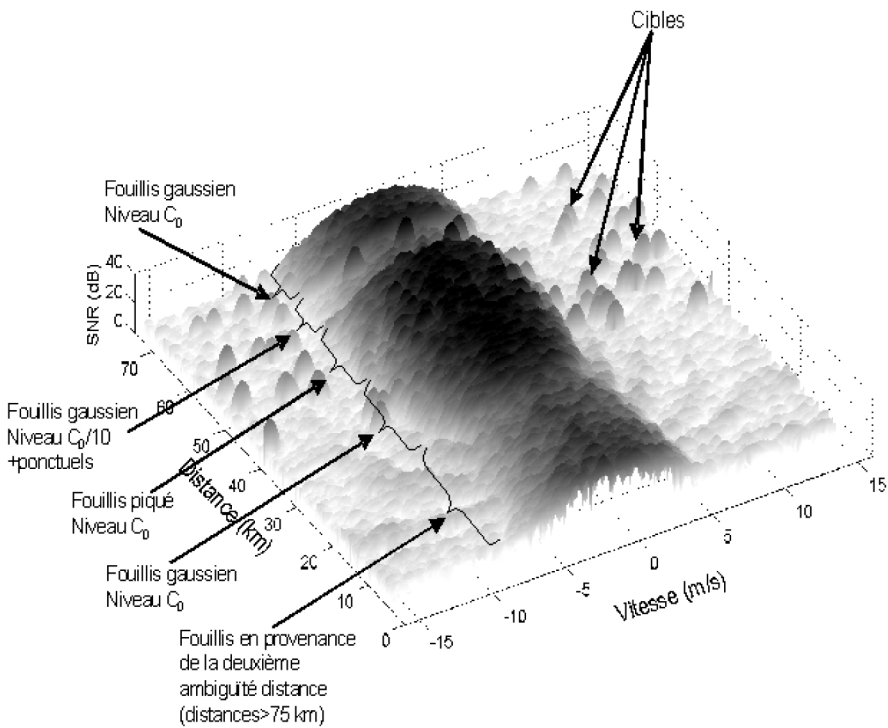


Figure 10. Carte distance-vitesse voie Somme (données ONERA)

4. Données Thalès

Un ensemble de cubes de données réelles a été mis à la disposition du club STAP par Thalès afin de tester la robustesse des différents algorithmes. Ce jeu de données est composé de 5 configurations de pointages différents avec la présence de cibles réelles endo- et exofouillis. La forme d'onde émise est une forme d'onde de type GMTI à faible PRF et ne présente pas d'ambiguïté distance. Le radar est un radar de pointe avant avec une antenne mécanique monopulse 3 voies :

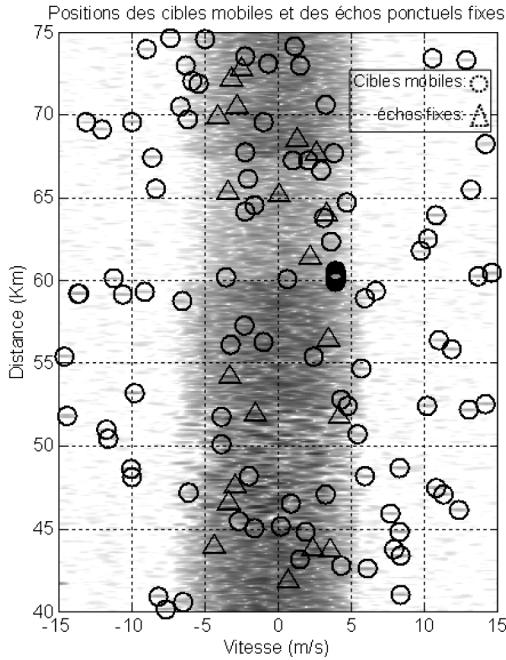


Figure 11. Carte distance-vitesse des cibles mobiles et des échos fixes (données ONERA)

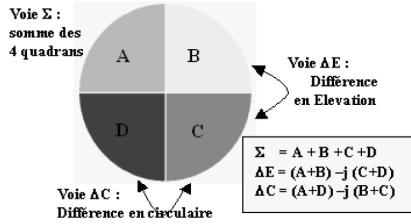


Figure 12. Antenne monopulse

- la voie somme, notée Σ ;
- la voie circulaire, notée ΔC ;
- la voie élévation, notée ΔE .

L'antenne et les voies Σ , ΔC et ΔE sont représentées sur la figure 12. Les diagrammes de rayonnement en cosinus directeur associés à ces 3 voies sont représentés sur la figure 13.

Les caractéristiques de la forme d'onde ainsi que les configurations d'acquisition sont présentées dans le Tableau 5.

Tableau 5. Paramètres des données Thalès

Porteur	
vitesse	$v_a = 160$ m/s
altitude	$h_a = 10\,000$ ft
Forme d'onde	
type	<i>chirp</i>
porteuse	$f_0 = 10$ GHz
longueur d'onde	$\lambda_0 = 0,03$ m
largeur de bande	$B = 2,5$ MHz
taux de compression	$B\tau_p = 8$
résolution distance	$\delta_R = c/2B = 60$ m
fréquence d'échantillonnage	$f_e = 2,5$ MHz
PRF	$f_r = 1,2$ kHz
nombre d'impulsions	$M = 32$
Antenne	
nombre de voies monopulse	$N = 3$
Pointage	
site	$\theta = -4^\circ$
gisement	$0^\circ ; 19^\circ ; -10^\circ ; -32^\circ ; -33^\circ, 5^\circ$

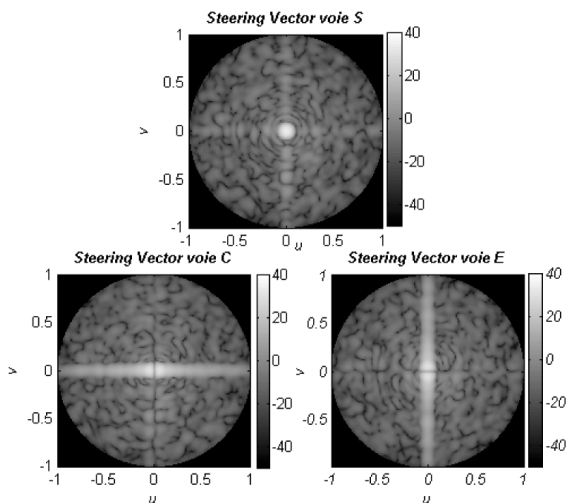


Figure 13. Diagrammes de rayonnement pour les voies somme, circulaire et élévation

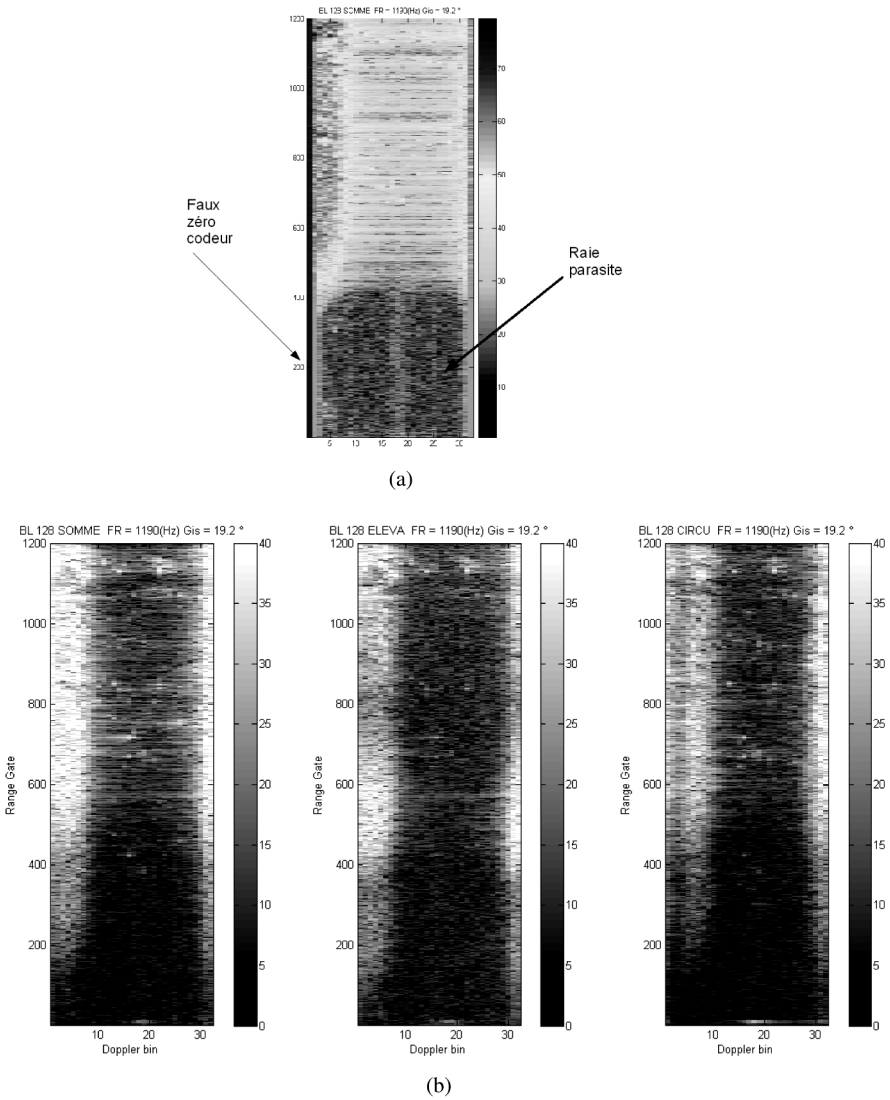


Figure 14. (a) Carte distance-Doppler pour la voie somme Σ . (b) Traitement MTI classique sur les trois voies monopulse

Les données mises à disposition des membres du club STAP correspondent aux données sur les voies I et Q en sortie codeur. Elles ne sont pas comprimées en distance et une loi de compensation sur la puissance en R^4 a été appliquée sur l'axe distance (cf. l'équation radar rappelée dans (Bidon, 2011)). Ces données ont également été compensées de la vitesse avion (CVA), c'est-à-dire que la fréquence

Doppler du sol correspond à la fréquence Doppler nulle. Sur la figure 14(a) représentant une carte distance-Doppler de la voie somme, on distingue également la présence d'un faux zéro codeur, c'est-à-dire la présence d'une composante continue sur les voies I et Q ainsi qu'une raie parasite de faible niveau.

Un exemple de traitement MTI classique sur les 3 voies monopulses est présenté sur la figure 14, faisant apparaître les cibles exo-fouillis.

5. Conclusion

Trois jeux de cubes de données STAP mis à la disposition des membres du club STAP ont été présentés dans cet article. Le premier jeu de données est celui fourni par la DGA/MI. Il est basé sur une méthode de simulation originale qui mixe des fonds d'image SAR synthétique ou réelle avec des signatures de cibles synthétiques. Des défauts classiquement rencontrés sur un système radar réel ont également été introduits sur la chaîne de simulation. Le second jeu de données fourni par l'ONERA consiste en des signaux synthétiques incluant des phénomènes réalistes introduits lors de la simulation (par exemple, génération de fouillis impulsif caractérisé par des pics de puissance). Enfin, le troisième jeu de données est celui fourni par Thalès et consiste en des données STAP réelles pour un mode GMTI. De nouveaux phénomènes perturbant le signal sont présents, tout comme la présence de nombreuses cibles dans le scénario.

Par rapport à des données synthétiques classiques, dont la génération est basée sur la méthode rappelée dans (Bidon, 2011), ces trois jeux de données illustrent bien le niveau de complexification qu'ils permettent d'atteindre dans la compréhension des performances des algorithmes STAP. En particulier, l'analyse de la robustesse des algorithmes peut être mieux testée grâce à la diversité des jeux de données. À ce jour, de nombreux travaux ont été effectués par les membres du club STAP grâce à ces signaux ; ceux-ci sont illustrés dans ce numéro spécial de la revue du Traitement du Signal.

Remerciements

Nous remercions la DGA/MI pour la fourniture des données STAP utilisées dans cet article.

Bibliographie

- Bidon S., (2011), « Introduction au STAP. Partie II : Modèle des signaux et principe du filtrage », *Revue Traitement du Signal*.
- Busson M., (1988), « SIROS : un simulateur pour la conception d'un système d'observation spatiale par radar », *SEE*, Gif-sur-Yvette.
- Capon J., (1969), « High resolution frequency-wavenumber spectrum analysis », *Proc. IEEE*, vol. 57, p. 1408-1418, August.

- Cochin C., Pouliguen P., Delahaye B., Le Hellard D., Gosselin P., Aubineau F., (2008), « MOCEM - An “all in one” tool to simulate SAR image », *7th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR)*, Friedrichshafen.
- Cochin C., Pouliguen P., Delahaye B., Le Hellard D., Gosselin P., Aubineau F., (2009), « MOCEM : fast generation of 3D scatterers models for radar simulation », *Proc. IEEE Radar Conference*, Bordeaux, October 12-16.
- Klemm R. (2002), *Principles of Space-Time Adaptive Processing*, IEE Press, London, U.K..
- Li J., Stoica P., (1996), « An Adaptive Filtering Approach to Spectral Estimation and SAR Imaging », *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 44, n° 6, p. 1469-1484, June.
- Milin J., Moore S., Burger W., Triboulloy P., Royden M., Gerster J., (2010), « AMSAR – A France-UK-Germany success story in active-array radar », p. 11-18, October 12-15.
- MIXSAR, (2006), « Génération de données brutes multi-voies à partir de la version V2 du logiciel MIXSAR », *Proc. Journée thématique SEE*, November.
- Ovarlez J.-P., Le Chevalier F., Bidon S., (2011), « Le club STAP », *Revue Traitement du Signal*.
- Stoica P., Li H., Li J., (2000), « Amplitude Estimation of Sinusoidal Signals : Survey, New Results, and an Application », *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 48, n° 2, p. 338-352, February.

