



**HAL**  
open science

## Détection d'Obstacles par Radar Embarqué sur DrOne

Morgand Philippe, Reynaud Sebastien, Khenchaf Ali, Alexandre Christophe,  
Anthony Disserand, Fabrice Comblet

► **To cite this version:**

Morgand Philippe, Reynaud Sebastien, Khenchaf Ali, Alexandre Christophe, Anthony Disserand, et al.. Détection d'Obstacles par Radar Embarqué sur DrOne. Journées ENVIREM, Onera, Oct 2022, Palaiseau (91), France. hal-03959871

**HAL Id: hal-03959871**

**<https://cnam.hal.science/hal-03959871v1>**

Submitted on 27 Jan 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Public Domain

# DOREDO

## Détection d'Obstacles par Radar Embarqué sur DrOne

Morgand Philippe  
CISTEME  
Limoges, France  
morgand@cisteme.net

Khenchaf Ali,  
Lab-STICC, UMR CNRS 6285  
ENSTA Bretagne  
Brest, France  
[ali.khenchaf@ensta-bretagne.fr](mailto:ali.khenchaf@ensta-bretagne.fr)

Alexandre Christophe  
CNAM- CEDRIC- LAETITIA  
Paris  
christophe.alexandre@lecnam.net

Reynaud Sebastien  
CISTEME  
Limoges, France  
reynaud@cisteme.net

Comblet Fabrice  
Lab-STICC, UMR CNRS 6285  
ENSTA Bretagne  
Brest, France  
[fabrice.comblet@ensta-bretagne.fr](mailto:fabrice.comblet@ensta-bretagne.fr)

Anthony Disserand  
CISTEME  
Limoges, France  
disserand@cisteme.net

**Abstract**—DOREDO est un radar monostatique bande X, destiné à être embarqué sur un drone de fret, et est dédié à la détection et localisation d'obstacles de type mini ou micro-drone, hélicoptère, avion de tourisme câbles ou pylônes EDF et autres infrastructures dans le souci de la protection de l'environnement humain et matériel. Un autre usage possible réside dans la surveillance des aéronefs en phase d'atterrissage sur un vertiport ou en approche de sites sensibles. Ce système est développé dans le cadre d'un projet RAPID supporté par la DGA.

**Keywords**—drone, radar, bande X, détection, localisation, obstacles

## I. INTRODUCTION

L'objectif de DOREDO est de déterminer une route de collision potentielle avec un obstacle statique ou dynamique. Le volume réduit possible à bord d'un drone de fret a conduit le dimensionnement de ce radar en bande X (10.2 GHz). Il est constitué d'une antenne réseau de faible taille (cylindre de 20\*25 cm) de 48 capteurs assurant la surveillance en site ( $\pm 30^\circ$ ) et en gisement (360°) et d'un coffret de traitement des signaux délivrant les estimations site, gisement, distance et vitesse. Le type d'obstacle sera déterminable à partir du SER évalué et de ses caractéristiques de mobilité.

Le paragraphe II suivant décrit l'architecture du radar en cours d'intégration, le chapitre III présente le traitement de signal axé sur la localisation de cibles par algorithmes HR de SER faibles (0 à -20 dBm<sup>2</sup>) donc de SNR reçus sur les capteurs fortement négatif compte tenu des portées visées. Le drone étant limité en altitude à 120m, des algorithmes de traitement du fouillis sol et ciel sont en cours d'étude. Le chapitre IV décrit les travaux spécifiés avec la maquette M1 destinée aux premières mesures et vérifications de portée en fonction de l'obstacle et des enregistrements temps réel de signaux reçus par les antennes sur le site d'essais.

## II. ARCHITECTURE DE RADAR BANDE X

Le projet DOREDO est animé par la PME Cisteme en partenariat avec le Lab-STICC de l'ENSTA Bretagne et le CNAM- Laboratoire CEDRIC- LAETITIA de Paris. Les tâches sont réparties comme suit :

- Cisteme : antenne et coffret RF

- Lab-STICC : algorithmes de détection/localisation et traitement anti-fouillis
  - CNAM portage des algorithmes sur FPGA
- Le synoptique suivant (Figure 1) détaille l'architecture du radar embarquable

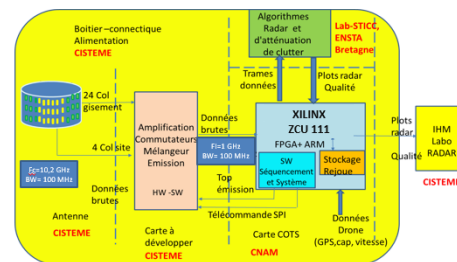


Fig. 1. Architecture du radar DOREDO

### A. Réseau antenne cylindrique

L'antenne réseau spécifiée et réalisée est cylindrique et composée de 24 colonnes d'estimation de gisement réparties sur 360° et de 4 colonnes sites espacées angulairement de 90°.

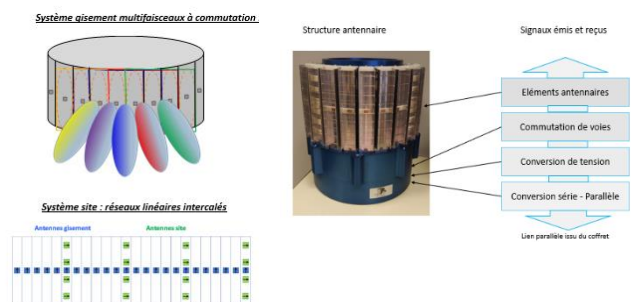


Fig. 2. Réseau antenne cylindrique

Les 24 colonnes gisement sont de type BIE, les 6 colonnes site sont des réseaux de 6 patches distribués verticalement. Ces deux types de colonne présentent un gain de 13 dB à  $\theta_{3dB}$  et sont respectivement de polarisation V et H. Les mesures en chambre anéchoïque de différents types de drones ont donné des résultats de SER similaires pour les deux polarisations.

## B. Commutateur de colonnes

La carte FPGA de traitement de signal permet d'assurer l'acquisition temps réel de 6 voies synchrones.

Un commutateur de colonnes a été développé de façon à prélever du réseau antennaire :

- Soit les 6 patchs de l'une des 4 colonnes site
- Soit les 4 colonnes gisement parmi les 24 disponibles.

La commutation des colonnes gisement est réalisé par pas d'une colonne afin d'assurer une veille panoramique.

Ce commutateur assure aussi la réinjection d'un signal de calibration afin de compenser les dérives en amplitude et phase des composants électroniques RF des 6 cartes d'émission et de réception.



Fig. 3. Carte de commutation des colonnes et capteurs

## C. Coffret RF, d'estimation et visualisation

Le système radar est constitué de deux coffrets : un coffret d'alimentation accueillant les éléments de conversion de tension et un coffret RF.

Le coffret RF accueille la carte FPGA permettant le pilotage du système radar, la génération des formes d'onde radar en fréquence intermédiaire à 1 GHz et le traitement des données radar, les 6 cartes RF TX et RX et la carte de contrôle numérique associée. Le principe de fonctionnement de la partie émission RF est le suivant : un synthétiseur de fréquence génère la RF à 11.2GHz à partir d'une référence partagée. Le signal d'OL est ensuite mixé avec le signal à 1GHz issu du FPGA. Une amplification spécifique en mode pulsé est appliquée puis un filtrage permet de restreindre l'émission au gabarit fourni par l'ANFR à la fréquence de 10.2 GHz. Côté réception, chacune des 6 cartes Rx est constituée d'un LNA d'entrée ( $F=1.7\text{dB}$ ) puis de chaînes de gain, de filtres passe-bande cascades pour réduire la bande de bruit recueilli par les antennes ; le gain RF total est supérieur à 60 dB. Le signal est ensuite mixé avec le signal d'OL, puis une amplification variable supplémentaire est réalisée à 1 GHz pour adapter le signal reçu à la dynamique de codage de l'ADC (14 bits) en fonction des différentes SER visées (de  $-20\text{dBm}^2$  à  $10\text{dBm}^2$ ) et de la distance de la cible. Un Contrôle Automatique de Gain (CAG) commun assure cette adaptation de niveaux via l'estimation RMS des signaux reçus réalisée par le FPGA et le gain programmable cité précédemment.

## IV. TRAITEMENT DU SIGNAL RADAR

L'objectif de cette partie est de présenter les algorithmes de détection, localisation, atténuation de fouillis et de poursuite d'une ou plusieurs cibles par un radar aéroporté. Une étude préliminaire a été réalisée en chambre anéchoïque afin de déterminer les principales caractéristiques et les

niveaux de SER des cibles considérées. En se basant sur ces estimations de SER et sur les performances visées par le système DOREDO, la structure du signal émis par le radar a été définie. Ce signal a ensuite été simulé en émission et réception afin de tester les différents traitements. Pour cela, les différents algorithmes retenus de suppression de fouillis, de détection, et de pistage ont été implémentés.

## A. Structure du signal

Afin de répondre aux exigences exprimées dans le cadre du projet DOREDO et notamment à la diversité des cibles à détecter (SER, distance, vitesse...) les signaux utilisés sont décomposés en plusieurs modes. Ces différents modes sont synthétisés dans le tableau 1. La forme d'onde retenue est un chirp dont la durée et la largeur de bande dépend du mode utilisé. Afin d'améliorer le SNR des signaux reçus, la première étape consiste à réaliser une formation de voies, une intégration cohérente et un filtrage adapté.

	MODE 1 SER $\geq 10\text{ dB}$	MODE 2 SER $\sim 0\text{ dB}$	MODE 3 SER $\geq -17\text{ dB}$
SER ( $\text{dBm}^2$ )	10	0	-17
Durée impulsion (s)	6,00E-06	2,00E-06	6,00E-07
Portée (m)	6000,00	2850,00	750,00
Zone aveugle (m)	901	300	90
Nb récurrences intégrées	125	125	125
Résolution distance	1,50	1,50	1,50
Doppler (Hz)	3396,60	2264,40	1509,60
Temps évitement (s)	60,00	42,75	16,88
Vitesse différentielle (m/s)	100,00	66,67	44,44
Type de cible	avion léger	ULM	DJI 0,3m

Tableau 1. DIFFERENTS MODES UTILISES POUR LES SIGNAUX EMIS

## B. Suppression de fouillis

Dans un contexte de détection de cibles aériennes par un radar aéroporté en mode Air-Air, la problématique est la détection des cibles lentes en présence du fouillis de sol. Les échos de sol pouvant provenir du lobe principal dont les échos sont importants et situés à des distances comparables aux distances des cibles d'intérêt, mais également des lobes secondaires qui sont souvent importants malgré l'atténuation du diagramme d'antenne car ils sont situés en distance proche. Il est donc difficile de discerner les cibles du fouillis dont les échos peuvent être vus à des vitesses comparables à celles des cibles recherchées.

Les traitements STAP (Space Time Adaptive Processing) [1] ont été choisis car ce sont des traitements adaptatifs qui exploitent conjointement les deux dimensions spatiale et temporelle des signaux reçus sur un réseau d'antennes. Ils permettent de tirer parti des propriétés bidimensionnelles spatio-temporelles et donc du couplage angle-fréquence des signaux reçus. Ces traitements apportent un gain important par rapport à un traitement classique et permettent de

diminuer la vitesse minimale détectable, permettant ainsi d'améliorer la détection des cibles lentes.

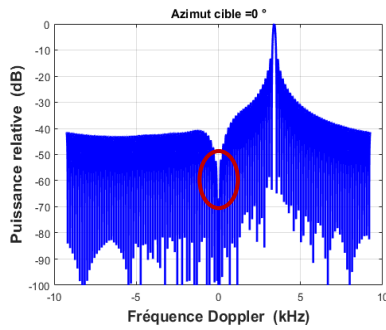


Fig. 4. Simulation d'un traitement STAP du fouillis

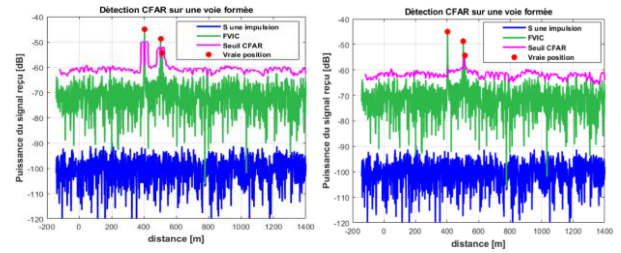
La figure 4 illustre le résultat de simulation d'un traitement STAP optimal. La cible est située à un angle d'azimut  $\phi_t = 0^\circ$  et une fréquence Doppler  $f_{dt} = 3396\text{Hz}$ . Le lobe principal du fouillis qui est centré autour de zéro a bien été fortement atténué.

### C. Détection

Les algorithmes de détection qui ont été retenus sont les algorithmes CFAR (Constant False Alarm Ratio) [2] du fait de leur robustesse et leur complexité calculatoire limitée. En effet, les traitements seront effectués directement sur le système DOREDO, la charge de calcul est donc un point important à prendre en compte. Ces algorithmes prennent en entrée le signal reçu par le radar, la probabilité de fausse alarme souhaitée, la taille de la fenêtre d'analyse et le nombre de cellules de garde. Ceci permet de définir un seuil adapté au niveau du bruit afin de détecter les cibles et estimer leurs positions. Le tableau ci-dessous résume les variantes qui ont été implémentées ainsi que leurs avantages et inconvénients et la figure 5 donne un exemple de l'intérêt du SO-CFAR comparé au CA-CFAR.

Algorithme	Avantages	Inconvénients
CA-CFAR	Optimal en fouillis homogène	Sensible aux non-homogénéités du fouillis dans la fenêtre d'analyse
SO-CFAR	Bonne performance en présence d'une cible interférente	Sensible aux transitions importantes du fouillis dans la fenêtre d'analyse et à la présence de plusieurs cibles interférentes
GO-CFAR	Bonne performance aux transitions de fouillis	Sensible aux échos élevés dans la fenêtre d'analyse (cibles multiples)
OS-CFAR	Bonne performance en cas de masquage auto-cible (cible étendue) ou dans le cas de cibles multiple	Sensible aux transitions importantes du fouillis

Tableau 2. COMPARAISON DES TRAITEMENTS CFAR



Détection CA-CFAR (à gauche) et SO-CFAR (à droite) en cas de présence d'une cible interférente dans la fenêtre d'analyse. L'algorithme SO-CFAR détecte les deux cibles proches, tandis que l'algorithme CA-CFAR ne détecte pas la cible de faible rapport signal sur bruit.

Fig. 5. Résultats de détection CFAR : intérêt du SO-CFAR par rapport au CA-CFAR\*

### D. Localisation

Il existe plusieurs méthodes permettant d'estimer l'angle d'arrivée et donc la localisation d'une cible. Celles-ci peuvent être classées en deux familles : les méthodes non paramétriques et les méthodes paramétriques. Dans la première famille nous retrouvons les méthodes CBF (Classical Beamforming) ou Capon. Elles présentent l'avantage d'avoir une complexité algorithmique limitée mais avec des résolutions également limitées. Les méthodes paramétriques telles que MUSIC ou ESPRIT (et leurs variantes) nécessitent d'introduire des hypothèses telles que le nombre de sources et le calcul de matrice de corrélation qui est assez lourd pour un système embarqué. Dans le cadre du projet DOREDO le choix se fera principalement en fonction des capacités de calcul de la carte utilisée dans le système DOREDO.

### E. Poursuite

Les études réalisées ont permis de retenir l'algorithme basé sur le filtrage JPDA (Joint Probability Data Association) [3] pour la poursuite multi-cibles. Il s'agit d'un algorithme de filtrage bayésien qui consiste à estimer l'évolution dynamique des cibles que l'on observe partiellement à travers une série de mesures bruitées. Les mesures disponibles pouvant être dues à différentes cibles ou au fouillis (fausses alarmes), l'algorithme repose sur une étape d'association de données qui consiste à affecter à chaque cible poursuivie une ou plusieurs mesures radar reçues à l'instant courant, afin de mettre à jour l'état des cibles.

## IV. DEVELOPPEMENTS MATERIELS

Le cœur numérique de DOREDO est basé sur une carte Xilinx ZCU111 utilisant un FPGA Zynq UltraScale+ RFSoc qui incorpore 8 ADC 4 GSPS 12 bits, 8 DAC 6.5 GSPS 14 bits, de la logique programmable ainsi qu'un ensemble de processeurs ARM 64 bits et 32 bits. La figure 6 montre la structure interne du circuit. La carte ZCU111 comporte différents connecteurs permettant l'interfaçage avec les 18 cartes du radar ainsi que 4 GB DDR4 coté logique programmable pour les acquisitions et 4 GB DDR4 coté processeurs pour le fonctionnement logiciel.

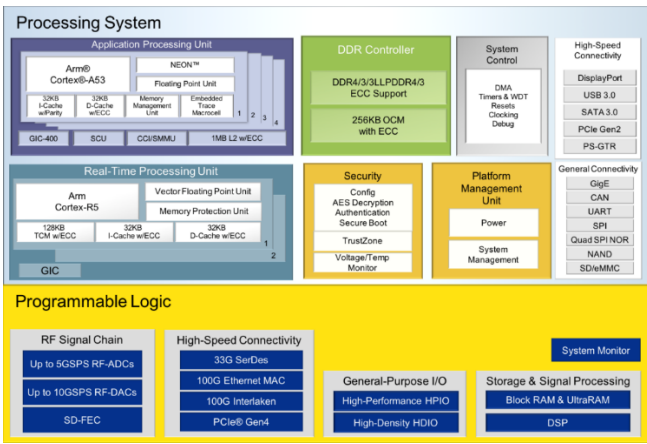


Fig. 6. Structure interne du RFSoc Xilinx

Dix IPs (cœurs de propriété intellectuelle) spécifiques à DOREDO ont été développés avec de la logique programmable afin de réaliser les différents traitements dans M1 (voir §V). Un système d'exploitation Linux spécifique a aussi été créé ainsi que tous les drivers nécessaires à l'utilisation des IPs. Un serveur de socket a été développé pour réaliser l'interface entre l'IHM du PC de commande d'une part et les IPs d'autre part. L'IHM du radar a été développée en python/Qt et est détaillée figures 7 et 10.

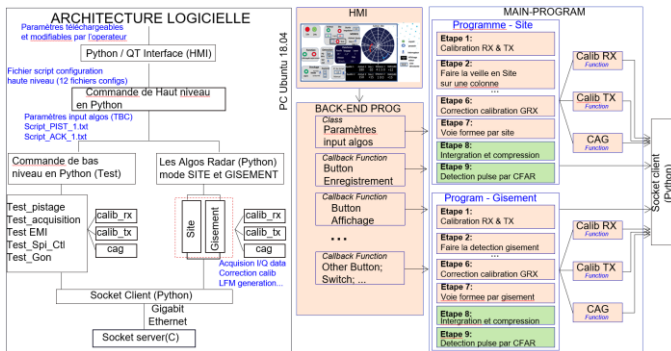


Fig. 7. Structure logicielle complète

Une procédure de test approfondie a été nécessaire afin de valider chacune des cartes du radar en laboratoire avec différents appareils de mesure comme le montre la figure 8.

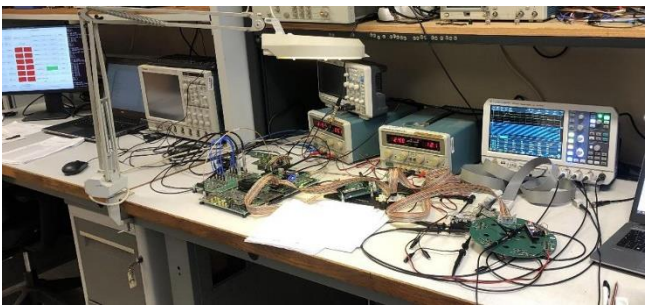


Fig. 8. Validation des cartes du radar

Il a fallu de plus interfacier DOREDO avec une centrale inertielle Xsens MTI7-DK comportant un GNSS intégré. La figure 9 montre le radar sans antennes avec son coffret et son PC de commande.

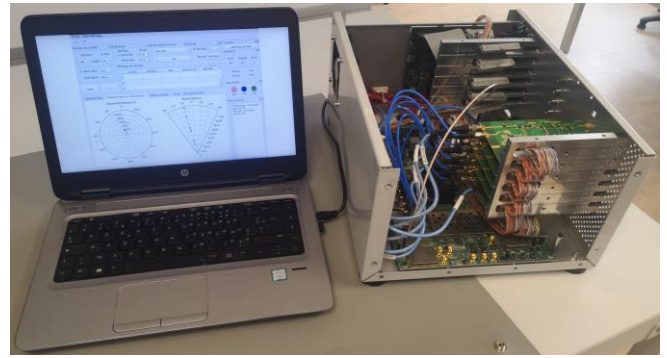


Fig. 9. Le coffret DOREDO avec son PC de commande

## V. MAQUETTE M1 ET PERSPECTIVES

Deux phases de tests et essais sont prévues :

- M1 avec un radar limité en ouverture gisement à 120° et un système d'enregistrement des signaux issus des colonnes site ou gisement
- M2 radar final de couverture site et gisement total

Ces deux phases seront réalisées avec l'installation de DOREDO sur l'ULM PIMA de l'IETR.

La première phase M1 emploie un demi-réseau antennaire limité en ouverture dans un secteur de 120° et est identique au radar final (M2) sur le plan électronique. Cette maquette M1 permettra les tests statiques et dynamiques avec différents types de drones, le stockage des colonnes et la vérification sur site de la validité des signaux.

Cette banque de données enregistrées permettra les tests et réglages algorithmiques en laboratoire avant leur implémentation dans le radar final (M2). Les algorithmes embarqués dans cette première phase sont prévus pour assurer la détection et localisation de cibles via un traitement de signal classique composé d'une formation de voies, d'une intégration puis compression avec la copie émission. Un logiciel de pilotage du système radar, et de visualisation des traces radar a été développé, illustré sur la figure 10

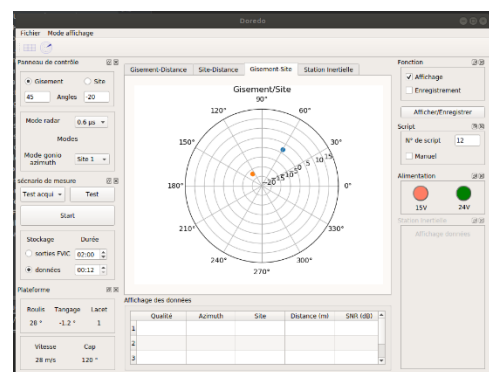


Fig. 10. IHM DOREDO

Il permet de configurer le radar en fonction des mesures souhaitées, et les traitements désirés. Ensuite, différentes fonctionnalités d'affichage sont implémentées afin de représenter les cibles détectées par les algorithmes de traitement radar décrits dans le chapitre III.

Cette phase d'essais sur site est prévue fin 2022.

## REFERENCES

- [1] R. Klemm, *Applications of Space-Time Adaptive Processing*, London: The Institution of Electrical Engineers, 2004.
- H. Rohling, "Radar CFAR thresholding in clutter and multiple target situations," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 19, pp. 608-621, Jul. 1983.
- [3] T. E. Fortmann, Y. Bar-Shalom, and M. Scheffe, "Multi-target tracking using joint probabilistic data association," in *Decision and Control including the Symposium on Adaptive Processes*, 1980 19th IEEE Conference on, pp. 807-812, IEEE, 1980.