



ENSTA Bretagne
2, rue François Verny
29806 BREST cedex
FRANCE
Tel +33 (0)2 98 34 88 00
www.ensta-bretagne.fr

Rapport
promo 2017
9 février 2016

Rapport d'avancement

Équipe Smart

Table des matières

Table des matières	1
Introduction	3
I Analyse fonctionnelle	4
1 Présentation du contexte	5
1.1 Acoustique	5
1.2 Optique	6
1.3 Radar	6
1.4 Radiogoniométrie	7
1.5 Synthèse	7
2 Analyse fonctionnelle	8
2.1 Interview	8
2.2 Tableau des spécifications	8
2.3 Diagramme pieuvre	10
2.4 SADT	11
2.5 FAST	12
2.6 Diagramme 3 axes	13
2.7 Fonctionnement de notre système	13
II État de l’art	15
3 Radio-goniométrie	16
3.1 Type de goniométrie	17
3.2 Selection de la technologie	18
4 Choix des composants	20
4.1 Antennes	20
5 Le Montréal 3V2	22
5.1 Évolution du Montréal	22
5.2 Avantages du Montréal 3v2	23
5.3 Caractéristiques	23
5.4 Fonctionnement	23
5.5 Schéma bloc	24
5.6 Liste des composants	25

5.7 Modification à apporter	25
Conclusion	26
Annexe	28
A Drone	28
A.1 Définition	28
A.2 Type des drones	28
A.3 Fréquence	29
A.4 Types de modulations	29
A.5 Législations	31
B Organisation du travail	32
B.1 Méthode de travail	32
B.2 Outils utilisés	32
C Correspondance	34
Table des figures	37
Bibliographie	38

Introduction

Ce document constitue le rapport d'avancement du projet Smart. L'équipe Smart est constituée de Rigaud Michaël, D'Acremont Antoine, Cotten Guillaume, Legay Kevin, Kenaan Aya, et Shehade Mohamed.

Le projet Smart a pour but de mettre en place un système de détection et de neutralisation de drones.

Compte tenu du temps imparti, nous avons choisi de nous concentrer sur la détection d'un drone. Pour réaliser cette détection, nous utiliserons un ensemble de goniomètre permettant de réaliser la localisation d'un drone. Ce projet étant nouveau, l'ensemble des recherches et la réalisation du système devront être mené dans le temps imparti.

Première partie

Analyse fonctionnelle

Présentation du contexte

L'actualité récente a montré que l'intrusion de drones dans des sites sécurisés représentaient un risque de sécurité majeur. Des gouvernements et entreprises privées se sont lancés dans la mise au point de systèmes de détection et de neutralisation de ces drones. Une recherche bibliographique nous a permis de mettre en évidence plusieurs méthodes de détection, pouvant être classées selon trois types principaux : acoustiques, optiques et électromagnétiques. Les paragraphes qui suivent détailleront les différents avantages et inconvénients que ces systèmes possèdent.

1.1 Acoustique

Plusieurs entreprises proposent des outils de détection acoustique des drones. Ces derniers se présentent sous forme de boîtiers reliés à des micros, positionnés en hauteur : c'est par les sons qu'ils génèrent, principalement ceux de leurs hélices, que les drones sont repérés et cela dans un rayon d'une centaine de mètres. Certains systèmes utilisent une analyse fréquentielle poussée du signal afin de détecter les moteurs en fonction de leurs fréquences de fonctionnement. Une alerte est alors envoyée à l'utilisateur du dispositif, sur un ordinateur ou par un SMS. L'avantage principal du système est qu'il peut détecter les drones n'émettant aucun rayonnement électromagnétique comme les systèmes auto-pilotés. Au-delà de cet aspect, il présente un avantage et des plus importants, son coût. En effet, un tel système est très économique à produire. Actuellement diverses solutions actives comme passives sont déjà présentes sur le marché et la démocratisation de ce type de système tend à faire baisser leur prix.

Toutefois ces appareils présentent certains défauts qui peuvent affecter leur fiabilité. Leur efficacité est en effet dépendante du bruit de fond qui doit être inférieur à un certain seuil pour que le système puisse détecter un drone. D'autres phénomènes acoustiques comme la réverbération du son et la présence d'échos peuvent aussi perturber son fonctionnement. Cela rend l'utilisation de telles solutions difficile en milieu urbain. Enfin, il est nécessaire de disposer préalablement d'une base de données des signatures acoustiques des différents drones qui peuvent émettre sur un domaine de fréquences acoustiques larges. Il est assez simple pour un drone de parer ce système de détection. Par la simple émission d'une onde sonore couvrant sa propre signature acoustique, un drone passerait totalement inaperçu.

Ces solutions sont orientées vers une utilisation domestique et non professionnelle pour les raisons évoquées précédemment. Leur prix se situe aux alentours de 100 dollars pour un modèle simple.

1.2 Optique

Une caméra normale a besoin de lumière pour produire une image, une caméra thermique (ou infrarouge) peut capter de très faibles différences de température et les convertir en une excellente image thermique sur laquelle les plus petits détails sont visibles. Contrairement à d'autres technologies, comme l'amplification de lumière qui nécessite une petite quantité de lumière pour produire une image, l'imagerie thermique permet de voir dans l'obscurité totale. Elle ne nécessite aucune source de lumière.

Depuis qu'il est possible de produire une image lisible dans l'obscurité totale, la technologie de l'imagerie thermique permet de voir et de cibler les forces ennemies dans la nuit la plus noire. Les caméras thermiques voient à travers la brume, la pluie et la neige. Elles voient aussi à travers la fumée, ce qui était particulièrement intéressant pour l'armée.[5]

En mode passif, des caméras thermiques d'observation savent repérer un drone de 50 cm d'envergure à une distance d'environ 1 km, de jour comme de nuit. Lorsqu'un drone entre dans son champ de vision, des algorithmes identifient son image. La forme, la couleur et la géométrie de l'objet permettent de distinguer le drone d'éventuels oiseaux et lancer une alerte, à condition qu'il n'y ait pas d'obstacle entre la caméra et lui.

En mode actif, on peut éclairer une scène à 360° avec un laser. Les photons, les particules de lumière, se réfléchissent sur l'appareil, le signal est récupéré et analysé. D'une portée similaire à celle de la caméra, le laser a l'avantage de décamoufler (observation à travers brouillard, pluie ou filet de camouflage), de livrer la distance précise de l'objet, et de le reconstituer en imagerie 3D. Une fois le drone suffisamment proche, une caméra classique avec un opérateur humain peuvent prendre le relai pour vérifier visuellement la nature de l'intrus et éventuellement passer à la phase de neutralisation.

L'utilisation d'un caméra optique simple pourrait aussi convenir à condition d'utiliser un traitement d'image adapté. La complexité de ce traitement associé au nombre de formes de drones pouvant être achetées dans le commerce rend cette technique difficilement exploitable.

1.3 Radar

Le radar (de l'anglais RAdio Detection And Ranging) est un système qui utilise les ondes électromagnétiques pour détecter la présence d'objets. Le radar émet des ondes, elles rebondissent sur les objets rencontrés et il est possible de mesurer leur distance, la direction, l'altitude ainsi que la vitesse en analysant le signal renvoyé. Les modèles Doppler peuvent ainsi détecter les objets en mouvement : avion, hélicoptère et certains modèles de drones, même « légers ». C'est le cas du radar Squire de Thales Air Systems.



FIGURE 1.1 – Le radar portable Squire de Thales Air Systems

Il existe néanmoins certains drones construits en carbone pouvant être perméables à certaines ondes radars et ainsi indétectables par cette technologie. Cependant le "radar passif", radar exploitant les variations d'ondes électromagnétiques en milieu urbain, telles que les ondes de la TNT, pourrait être exploité en milieu urbain.

1.4 Radiogoniométrie

Parmi les moyens existants pour détecter un drone on peut citer la radiogoniométrie. Le principe de la radiogoniométrie est de mesurer la direction d'arrivée d'une onde électromagnétique polarisée incidente sur un réseau de capteur, par rapport à une direction de référence. Les radio-goniomètres sont donc des détecteurs passifs.

La radiogoniométrie possède de nombreuses applications. Cependant, en interception, la radiogoniométrie permet de localiser un émetteur inconnu soit en employant plusieurs récepteurs en des positions différentes, soit par calcul en fonction de la cinématique propre du récepteur.

On distingue deux types de goniomètres : les goniomètres à une dimension qui n'estiment que le gisement ou l'azimut, et les goniomètres à deux dimensions qui estiment le gisement ou azimut ainsi que l'élévation.

Dans le cas d'une détection de drones, le radio-goniomètre réalise une écoute de l'environnement avec un balayage de fréquences. Lorsque le drone émettra avec la personne qui le guide on pourra ainsi le localiser précisément.

L'avantage principal de la radiogoniométrie est qu'il s'agit d'une méthode de détection passive. Elle est donc difficilement décelable et cela fait d'elle une technique fréquemment utilisée en guerre électronique.

Seulement, la radiogoniométrie a des failles. En effet, il existe sur le marché des drones auto-pilotés qui n'émettent pas car ils chargent avant le début de leur vol leurs trajectoires. Ainsi il n'y a pas de communication avec un quelconque utilisateur, et donc il n'y a aucun signal émis. Il est donc impossible de les localiser à l'aide de cette technique.

1.5 Synthèse

Une solution technique idéale couplerait l'ensemble des méthodes décrites ci-dessus pour pouvoir parer à toute éventualité. Une analyse des solutions présentes sur le marché ou en développement montre que les configurations les plus performantes associent au moins deux des modes de détection cités. On peut notamment citer le cas du système drone-detector [10].

Néanmoins nous avons choisi pour ce projet de nous concentrer, dans un premier temps, sur une détection uniquement à base de radiogoniométrie.

Les raisons de ce choix sont les suivantes : Dans un premier temps, pour pouvoir réaliser un prototype fonctionnel il est plus aisé de se baser sur la radiogoniométrie compte tenu du matériel à notre disposition. Dans un second temps, notre équipe a choisi de se concentrer sur la détection de drones de loisir disponibles dans le commerce. Selon la réglementation ces drones doivent maintenir un lien radio avec un pilote qui doit être en mesure de reprendre le contrôle du drone à tout instant. Il y a donc une liaison permanente qui peut être exploitée par le système.

Analyse fonctionnelle

2.1 Interview

Après notre interview avec notre encadrant Ali Mansour, nous avons réalisé un tableau des spécifications suivantes :

Synthèse exigences première interview	
Demande principale	détecter un drone
	utiliser la radiogoniométrie comme technologie détection
Demande secondaire	travailler sur un domaine de fréquence à définir
	une interface homme/machine pourra être réalisée
Spécifications techniques	Le budget est de 300€
	Aucun matériel n'est préalablement disponible pour la réalisation du démonstrateur

2.2 Tableau des spécifications

En prenant en compte les recommandations de notre encadrant, et les recherches que nous avons réalisées, nous avons établi les contraintes et les spécifications suivantes :

Tableau des Exigences du SMART					
Client			Concepteur/Réalisateur		
Numéro	Désignation	Critère	Niveau	Niveau de flexibilité	Classe
FS1	Détecter des drones à portée de réception par les antennes dans un domaine de fréquence prédéfini	Puissance du signal, fréquence	WiFi 2.4 GHz (2400 - 2483,5 MHz)	Tolérance faible	0
FS2 a.	Retourner la position du drone à l'utilisateur en temps réel	Clarté, temps de réponse	Mise à jour des données dans un tableau d'information	Tolérance faible	1
FS2 b.	Avoir une précision de l'ordre du mètre	Précision	Entre 0 et 2 mètres	Tolérance faible	0
FS3	Suivre les déplacements du drone en temps réel	Fiabilité	Projection de la position sur une représentation de la zone géographique	Tolérance moyenne	2
FS4	Alerter l'utilisateur en cas de nouvelle détection par un message dans la console du PC	Temps de réponse	Entre 0 et 2s	Tolérance moyenne	2
FS4 b.	Alerter l'utilisateur en cas de nouvelle détection par un message via application Android	Temps de réponse	Entre 0 et 2s	Tolérance élevée	3
FS5	Analyser et retourner la vitesse de déplacement du drone	Clarté, temps de réponse	Mise à jour des données dans un tableau d'information	Tolérance moyenne	2
FS6	Retourner la trajectoire du drone à l'utilisateur	Fiabilité, temps de réponse	Projection de la trajectoire sur la carte permettant de visualiser la position u drone	Tolérance moyenne	2
C1	Utiliser la radiogoniométrie pour réaliser la localisation	Critère client	Radiogoniométrie multi-antenne	Tolérance faible	0
C2	le système doit posséder au minimum deux goniomètres pour la réception	Critère client	Antennes disposées en treilli pour optimiser la localisation	Tolérance faible	0
C3	Etre alimenté uniquement par le réseau électrique	Simplification des sources d'alimentation	230V	Tolérance faible	0
C4	Etre paramétrable par l'utilisateur	Souplesse d'utilisation	Configurer l'IHM selon ses envies	Tolérance moyenne	1
C5	Respecter les normes environnementales	Juridique	Normes minimales environnementales	Tolérance faible	0
C6	Respecter un budget restreint	Budget proposé	300 €	Tolérance faible	0
C7	Résister aux contraintes météorologiques	Réalité du terrain	Etre résistant à l'eau et au vent de faible puissance	Tolérance moyenne	0
C8	Tenir un délai de réalisation	Planning	7 mois comprenant l'analyse et la réalisation du projet	Tolérance faible	0

Types d'exigence	
Fonction de service	FS
Contrainte	C

Classe	
Non négociable	0
Peu négociable	1
Négociable	2
Non nécessaire	3

2.3 Diagramme pieuvre

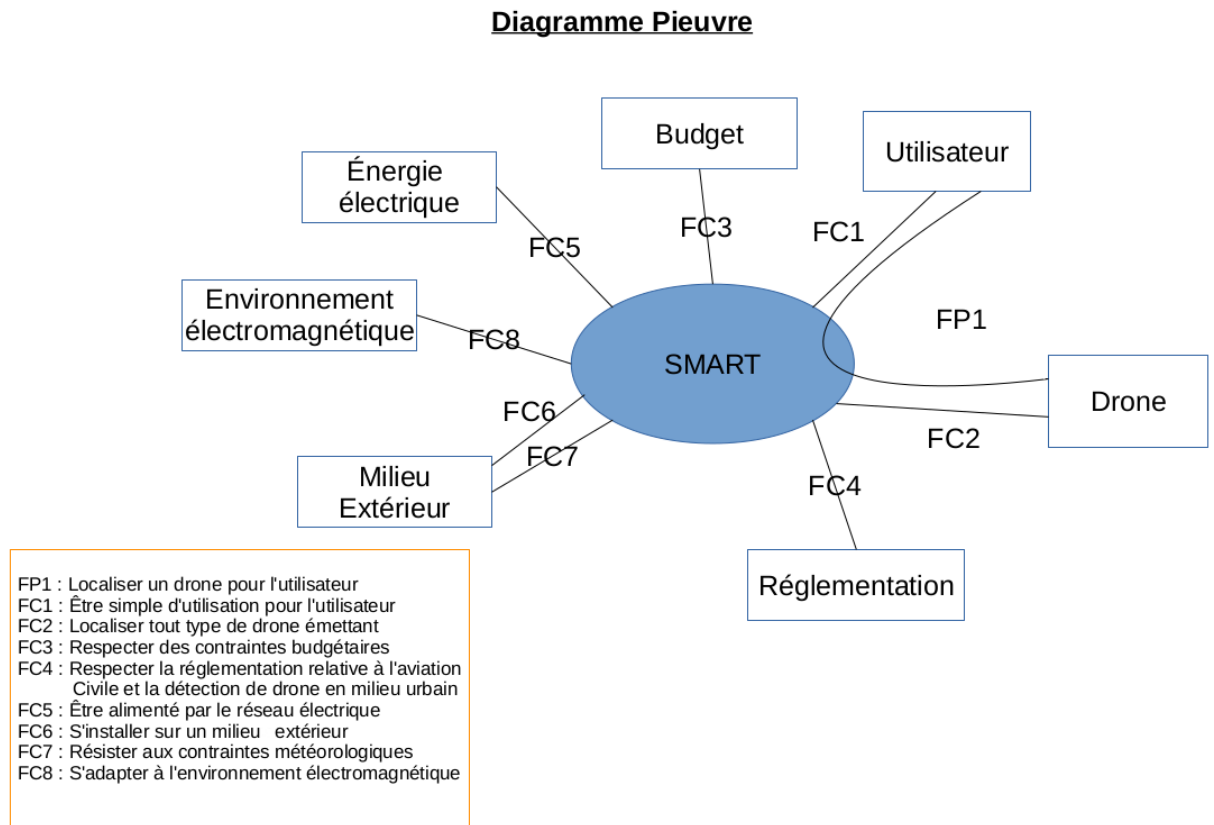


FIGURE 2.1 – Diagramme pieuvre

2.4 SADT

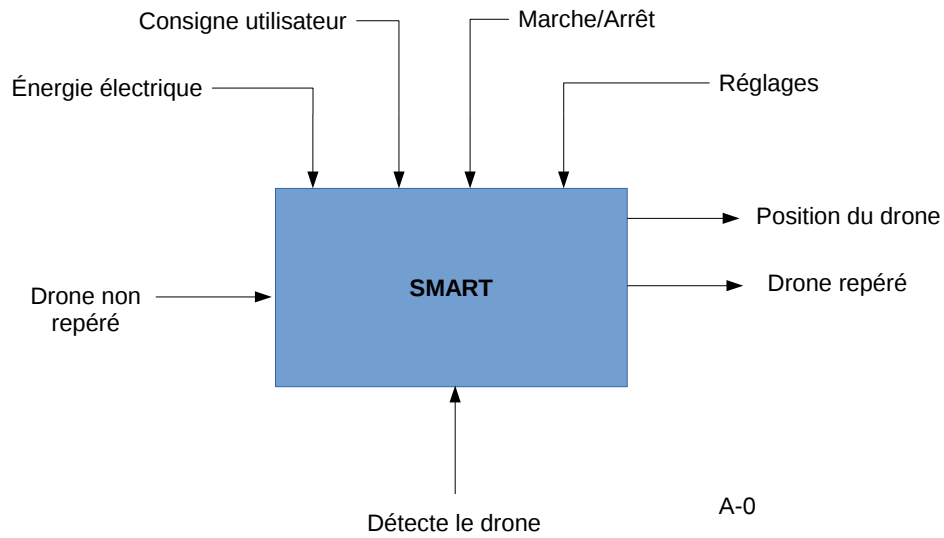


FIGURE 2.2 – SADT A-0

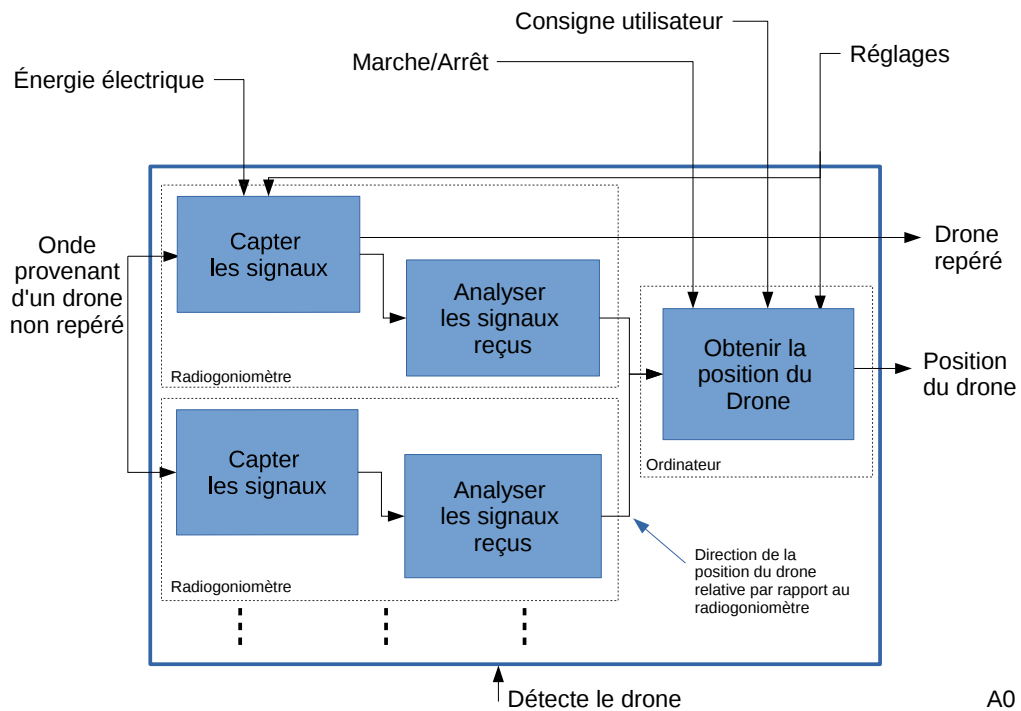


FIGURE 2.3 – SADT A0

Comme on peut le voir sur le SADT A0, nous avons découpé notre objectif en trois parties.

Dans un premier temps il faut capter les signaux. Pour cela il faut réaliser un balayage sur le radiogoniomètre pour détecter les bons signaux.

Ensuite, il faut analyser les signaux reçus pour s'assurer que nous sommes bien en présence d'un drone.

Enfin, il faut récupérer les données des radiogoniomètres pour déterminer la position du drone.

2.5 FAST

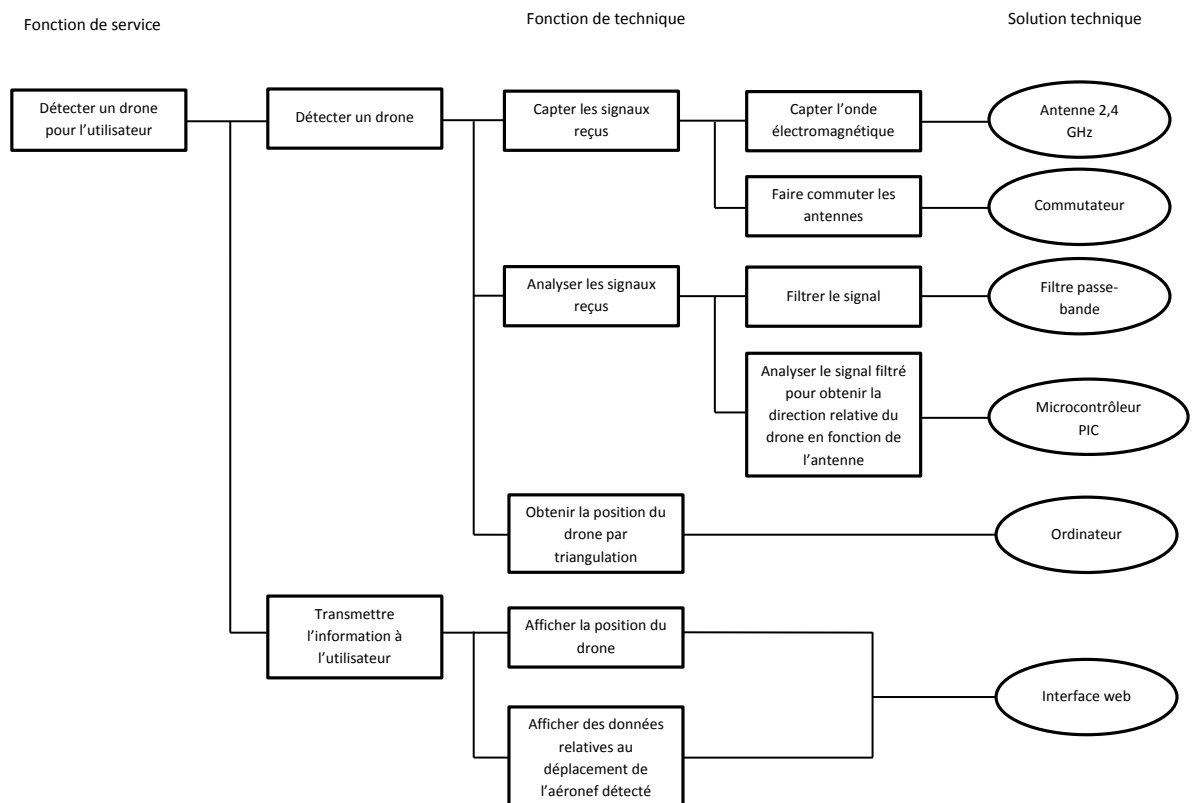


FIGURE 2.4 – Diagramme FAST

2.6 Diagramme 3 axes

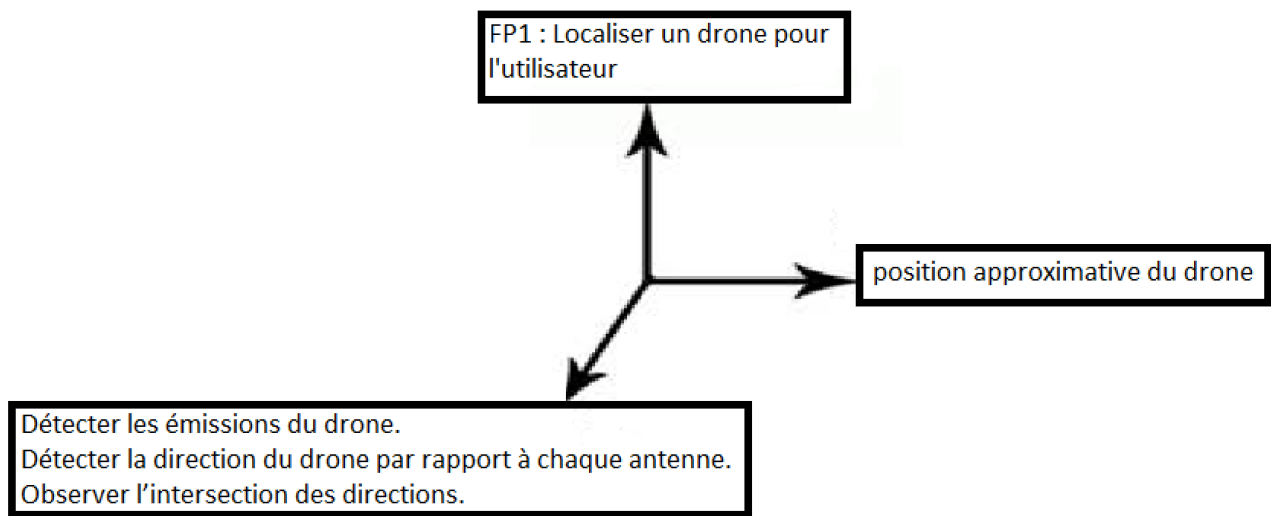


FIGURE 2.5 – Diagramme 3 axes

Le diagramme 3 axes ci-dessus présente les étapes clés du traitement du problème. En effet, la détection d'un drone nécessite de repérer une perturbation dans la bande de fréquence que l'on écoute, de détecter la direction de laquelle elle provient et enfin de regrouper les données pour, à partir des directions, obtenir la position.

2.7 Fonctionnement de notre système

Nous avons donc imaginé positionner plusieurs radiogoniomètres, chaque appareil indiquerait la direction du drone par rapport à sa position. Chacun d'eux serait connecté à un ordinateur central qui analyserait chacune des positions données par les radiogoniomètres et en déduirait la position du drone dans l'espace.

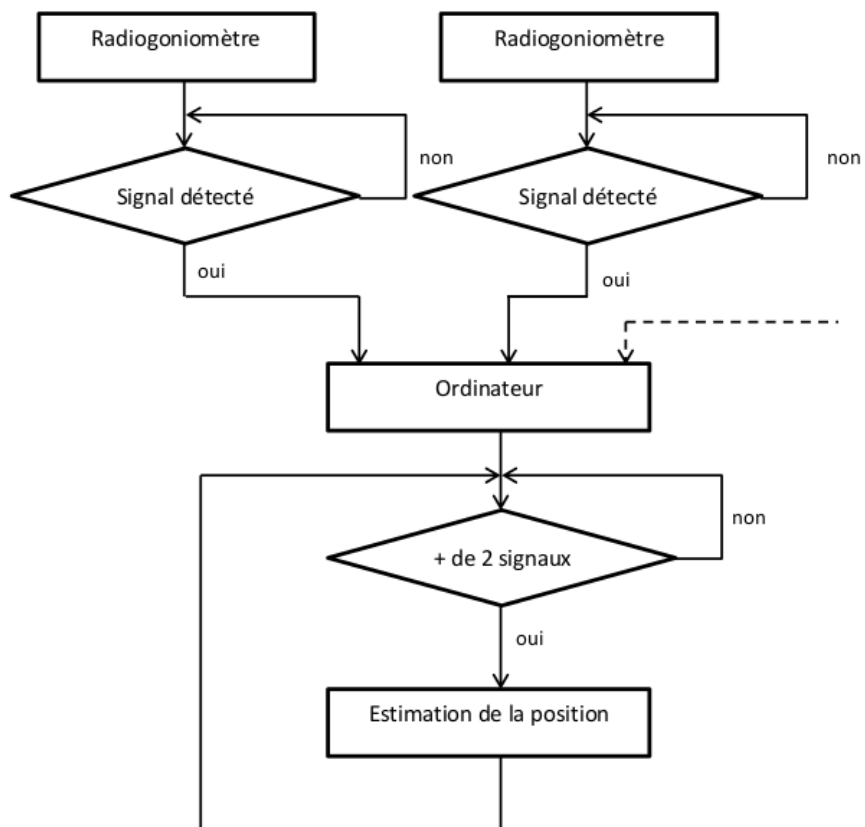


FIGURE 2.6 – Schéma Logique du système

Deuxième partie

État de l'art

Radio-goniométrie

Dans cette partie, nous allons nous attacher à étudier les différents types de goniométrie existant afin de retenir la solution la plus pertinente pour notre système. Cette étude redéfinira dans un premier temps le cadre de l'étude, puis suivra une explication de chaque technologie existante afin de conclure sur le choix que nous aurons retenu.

Généralement, un système de radiogoniométrie est composé de :

- Un réseau de N capteurs avec ou sans processus de mise en forme des signaux d'antennes.
- Un commutateur d'antenne
- Un récepteur à plusieurs voies
- Une unité de traitement du signal

De plus, la composition du système d'acquisition et les techniques de traitement du signal dépendent :

- Des caractéristiques de l'onde à étudier
- Du type d'acquisition de l'information

Dans notre application, le système devra détecter une onde émise dans la gamme de fréquence UHF (2,4 GHz). Bien qu'existant dans le domaine de réalisation des radiogoniomètres, il n'est pas commun qu'un radiogoniomètre travaille sur cette gamme de fréquence.

Les caractéristiques principales qui interviennent principalement dans le choix d'un radiogoniomètre sont :

- La précision de mesure angulaire (précision de la position obtenue)
- La sensibilité (portée maximale du système)
- La vitesse de mesure
- Le comportement en présence de plusieurs ondes dans la bande d'analyse
- La susceptibilité du système

La spécificité de notre système est la cible à localiser. En effet, la source peut ne pas émettre en continue et sur de très courtes périodes (inférieure à 1 seconde). Il nous faut donc un radiogoniomètre capable de réaliser la mesure en une fraction de seconde. La gestion de conservation de la donnée mesurée en attendant une valeur ultérieure sera gérée par l'ordinateur.

3.1 Type de goniométrie

Goniométrie d'amplitude

La mesure se fait par repérage d'un maximum d'amplitude, d'un minimum d'amplitude, ou par comparaison de l'amplitude en sortie de deux diagrammes se recouvrant partiellement. La recherche du minimum d'amplitude à partir d'une antenne à cadre tournante est l'approche la plus ancienne. Un dipôle électrique est utilisé pour lever l'ambiguïté de 180° en formant un diagramme en cardioïde par sommation.

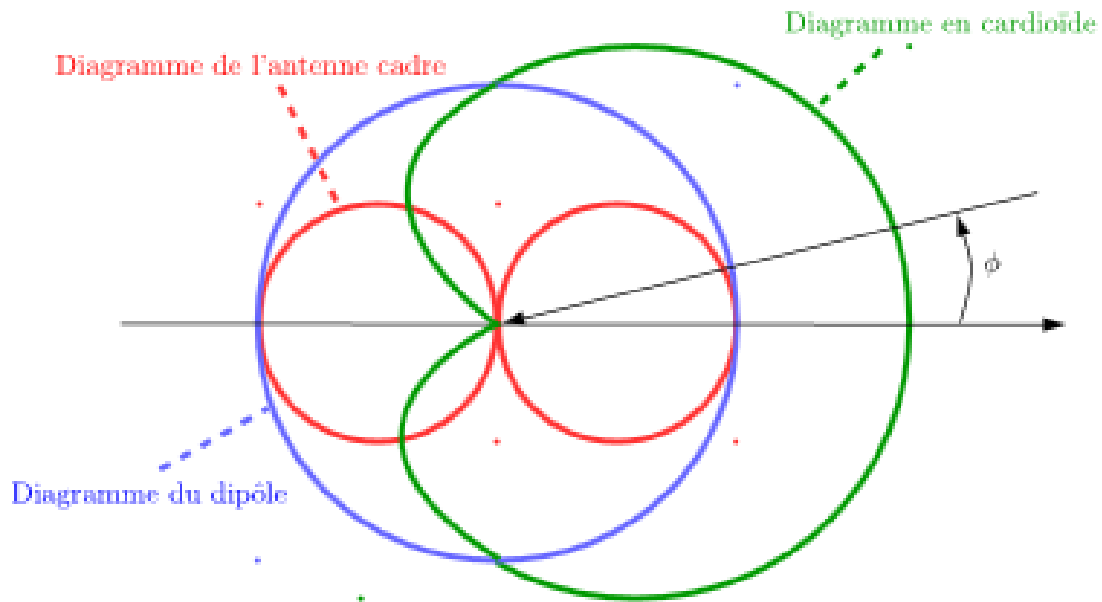


FIGURE 3.1 – diagramme en cardioïde d'une antenne à cadre

La formation de faisceaux est une technique plus récente issue des traitements radar. Elle utilise un ensemble de capteurs spatialement répartis. Les sorties d'antennes sont pondérées en phase puis sommées. Cette pondération est fonction du déphasage progressif d'une antenne à une autre, qui dépend de la direction d'arrivée et de la distance entre capteurs. Les pondérations permettent ainsi de remettre en phase les signaux et d'obtenir un diagramme avec un maximum dans la direction d'arrivée. Cette technologie est la plus ancienne. L'antenne utilisée était une antenne cadre et la gamme de fréquence étudiée était la HF et la VHF.

Goniométrie Watson-Watt

Un radiogoniomètre Watson-Watt est un radiogoniomètre automatique. L'onde électromagnétique du système à localiser est reçue par deux antennes perpendiculaires dont le rapport des amplitudes est très proche de \tan (l'une en \sin et l'autre en \cos). Les premières antennes utilisées pour cette technique étaient des antennes cadres orthogonales. Depuis, d'autres antennes telles que l'antenne Adcock ont été utilisées.

Goniométrie par interférométrie

La goniométrie par interférométrie est considérée comme une technique plus performante comparée à celles citées précédemment. A la différence des deux techniques précédentes, le traitement n'est pas entièrement analogique. Des calculs numériques, plus ou moins complexes, sont nécessaires suivant la topologie de l'antenne utilisée. Elle n'a donc pu être mise en œuvre qu'à partir de l'arrivée des microprocesseurs. L'interférométrie utilise la mesure de la différence de phase de signaux délivrés par deux antennes proches illuminées par la même onde électromagnétique.

Goniométrie par effet Doppler

Une antenne tournant autour d'un axe est placée dans le champ d'émission d'un émetteur de porteuse pure. A cause du mouvement de l'antenne, le signal reçu subit un effet Doppler qui se traduit par une modulation FM du signal reçu. La fréquence instantanée du signal augmente quand l'antenne se rapproche de la direction d'arrivée du signal et décroît lorsqu'elle s'en éloigne. En effectuant une démodulation FM, on peut détecter la direction de provenance des ondes en comparant la phase du signal obtenu et celle de la rotation angulaire de l'antenne. Afin d'éviter de devoir faire tourner mécaniquement l'antenne, on peut en disposer plusieurs en cercle et les commuter successivement.

3.2 Selection de la technologie

Après étude des différentes technologies existantes, nous nous baserons sur une étude comparative menée par le site F1LVT [4].

	Très grande distance (Point haut)	Grande dist. (En voiture de loin)	Moyenne dist. (En voiture sur zone)	Courte dist. (A pied)	Démod.	Possibilité radiogonio 406 MHz
Directive grand gain + Att + RX	Très bien adapté	Bien adapté	Peut convenir	Mal adapté		Pas du tout adapté
Directive faible gain + Att + RX						
Homing intégré (L-Per, GHQ)					AM	
Homing (tte bande, 4Q)					AM	
Doppler + RX			Très bien adapté	Mal adapté	FM	Bien adapté
TDOA + RX					FM	
Ant racc. + Att + RX (ABC)						

FIGURE 3.2 – Radiogoniométrie VHF-UHF pour les bandes aviation et les bandes RA

Ce tableau compare plusieurs technologies ainsi que leurs caractéristiques. Dans le cadre d'un système devant opéré en extérieur sur zone (environs de zone industrielle ou de central électrique) nous retenons le goniomètre Doppler.

Il reste ensuite à déterminer le modèle précis de radiogoniomètre à effet Doppler pouvant être utilisé pour notre démonstrateur. Ce modèle devra correspondre aux exigences énoncées précédemment ou, à défaut, être modifiable ou adaptable à notre problématique.

Cependant il apparait très rapidement que les radiogoniomètres en vente sur le marché ne correspondent pas à notre domaine de fréquence, sont beaucoup trop chers, ou appartiennent au marché de la défense et ne sont donc pas en vente au public. Malgré tout, de nombreux sites proposent des plans de montages, des tutoriels et des solutions techniques pour réaliser soit même son radiogoniomètre pour un prix raisonnable. Le site F1LVT, site sur lequel est paru l'étude comparative précédente, publie d'ailleurs un article pour construire le radiogoniomètre Montréal 3v2 correspondant à bon nombre de

nos critères et adaptable à notre gamme de fréquence pour un prix raisonnable estimé à 50€. Nous partirons donc sur ce modèle dont une étude approfondie est proposée par la suite¹. De plus, la correspondance avec l'auteur de la documentation sur le Montréal 3v2² nous conforte dans cette voie.

1. voir page 22

2. correspondance mis en annexe à la page 34

Choix des composants

4.1 Antennes

Principes généraux

Les goniomètres utilisent les ondes radioélectriques pour pouvoir localiser la direction d'une source d'émission. Chaque type de goniomètre utilisera une ou plusieurs antennes pour pouvoir analyser les caractéristiques de l'onde reçue. Le fonctionnement de ces antennes est décrit par les lois de l'électromagnétisme. Chaque onde électromagnétique possède une composante électrique et une composante magnétique. La composante ou champ électrique de cette onde fera apparaître des variations de potentiel dans l'antenne dont l'amplitude et la fréquence seront directement liés à l'onde qui les a générés. Leur analyse permettra de récupérer les caractéristiques de l'onde reçue et d'en extraire les informations pertinentes pour le système équipé de l'antenne.

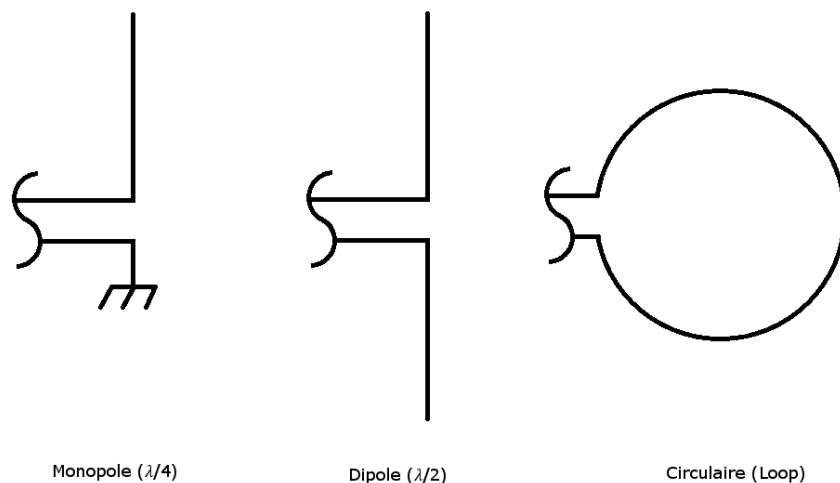


FIGURE 4.1 – Type d'antennes

Antennes en Radiogoniométrie

En radiogoniométrie il est possible de travailler avec plusieurs types d'antennes. La méthode la plus simple pour déterminer la direction d'une onde sera d'utiliser une antenne à ouverture dite faible et de la faire pivoter pour pouvoir déterminer la direction du maximum d'émission. Une antenne circulaire ou rectangulaire pourra convenir. Parfois le type de goniomètre utilisé déterminera le choix de l'antenne. Par exemple dans le cas d'un radiogoniomètre de type Watson-Watt¹ plusieurs solutions

1. principe décrit en 3.1 à la page 17

sont envisageables :

- l'utilisation de deux antennes circulaires ou rectangulaires.
- L'utilisation d'une antenne dite "Adcock" qui est une combinaison d'antennes monopoles ou dipolaires.

Dans le cadre de notre projet, nos recherches nous ont conduit à choisir un goniomètre Doppler. Ce type de goniomètre utilise au minimum quatre antennes monopoles ou dipolaires disposées en croix autour d'une antenne de référence omnidirectionnelle (une antenne monopole est souvent utilisée). Pour un nombre d'antennes supérieur celles-ci seront disposées en cercle à intervalle régulier autour de l'antenne de référence.

En théorie deux antennes pourraient suffire. Si on parvenait à mettre en rotation une antenne omnidirectionnelle autour de l'antenne de référence suffisamment rapidement le goniomètre Doppler fonctionnerait. Il est toutefois beaucoup plus simple d'utiliser un ensemble d'antennes disposées en cercle et "d'écouter" successivement chaque antenne à l'aide d'un commutateur pour simuler cette rotation.

Système d'antennes retenue

Le goniomètre Montréal possède cinq antennes, quatre disposées en croix et une antenne centrale connectée au système électronique de traitement. Les antennes sont reliées à un commutateur permettant de sélectionner successivement les antennes de la croix. Le système est dimensionné autour de trois critères :

- La bande de fréquence surveillée par les antennes : On utilisera ici des antennes monopoles (quart d'onde) adaptées au 2,4GHz
- Le rayon d'écartement des antennes (distance entre les quatre antennes de la croix et l'antenne de référence) : Si ce rayon est trop faible les écarts de fréquence seront plus difficiles à remarquer et le bruit électromagnétique peut être plus gênant lors de la mesure.
- La vitesse de commutation des antennes.

Deux des paramètres sont fixés à l'installation du dispositif. Les formules suivantes permettent de déterminer le paramètre manquant.

$$dF = \frac{w * r * f_c}{c} \quad (4.1)$$

avec

dF = la variation maximale de fréquence par effet Doppler(Hz) w= la vitesse angulaire(2π *fréquence de rotation)(m/s) r = Rayon de l'antenne (mètre) f_c = fréquence de la porteuse(Hz) c = vitesse de la lumière

et

$$f_r = \frac{dF * 1879.8}{R * f_c} \quad (4.2)$$

avec :

fr = la fréquence du signal reçu (MHz) R = le rayon du système d'antennes (pouces) f_c = fréquence de la porteuse(mégahertz)

Les antennes utilisées pour le montage pourront être celles utilisées dans l'aéromodélisme et sur les drones amateurs qui utilisent dans leur grande majorité la bande des 2,4 GHz.

Les modèles d'antennes suivants pourraient convenir :

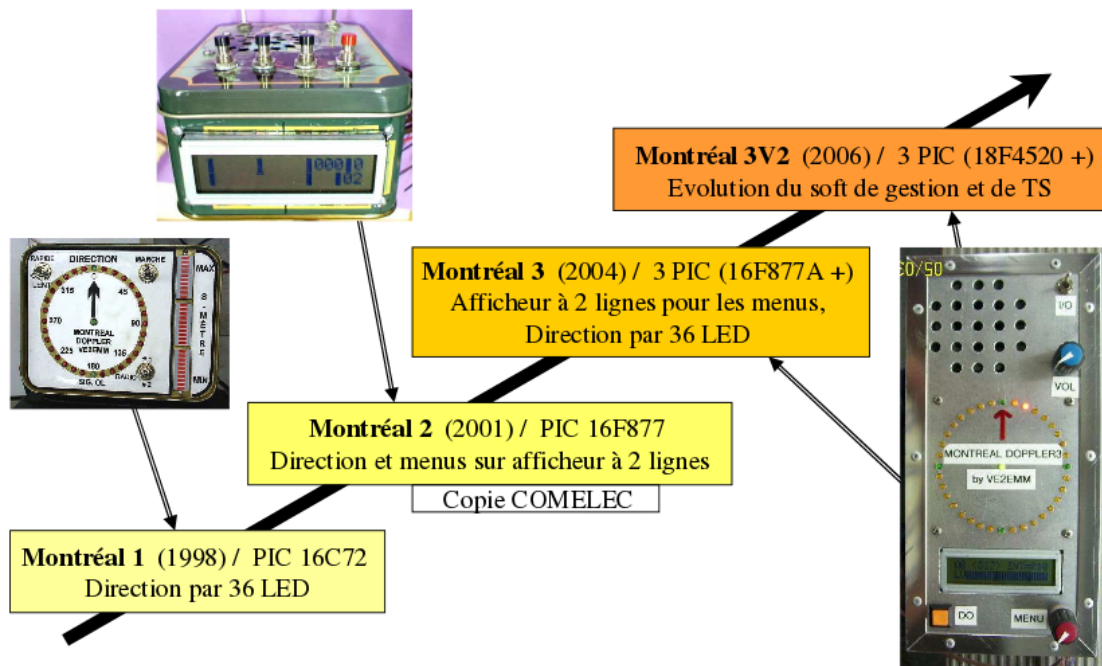
- FrSky 2.4G V8 Series 5db module Antenna
- Orange 2.4G Antenna 2db (Extended wire)

Il est aussi possible de les concevoir nous même en respectant les dimensions (3,125 cm pour une monopole, 6.25 cm pour une dipôle)

Le Montréal 3V2

Nous allons ici présenter la solution sur laquelle nous nous appuyons pour réaliser notre propre radiogoniomètre à effet Doppler, le Montréal 3V2. Pour réaliser cette documentation nous nous sommes appuyés sur la documentation trouvée sur le site filvt [4]

5.1 Évolution du Montréal



Radiogoniométrie Doppler / Montréal 3V2 – AG FNRASEC Bordeaux 2008 – FILVT@yahoo.fr

FIGURE 5.1 – Evolution du Montréal

5.2 Avantages du Montréal 3v2



FIGURE 5.2 – Photographie prise du Montréal 3v2

Le Montréal 3v2 sert principalement à l'FNRASEC¹ et aux chasseurs d'onde amateurs. Ce radiogoniomètre est utilisé pour la détection de balise de détresse de 406MHz.

Un des intérêts majeurs du Montréal 3-V2, c'est sa capacité de localiser des signaux très courts, son prix de revient est très raisonnable, son traitement très rapide et la mise en mémoire automatique du dernier relevé. On peut aussi noter qu'il est simple d'utilisation grâce à son affichage à 36 LEDs disposées en cercle et qui indiquent la direction. De plus une LED centrale indique le fonctionnement ; verte la direction affichée est bonne, rouge le signal est insuffisant, la direction reste alors figée dans la dernière bonne direction reçue.

5.3 Caractéristiques

Le Montréal 3v2 est un radiogoniomètre à effet Doppler, il possède donc toutes les caractéristiques associés à ce type de radiogoniomètre.

Fréquences	distance gamme	moyenne portée 50MHz-1.3GHz
	démodulation	FM
Affichage	LED	36LEDs
	écran	LCD en 2 lignes
Filtre	capa	très faible largeur de bande (0.5Hz)
Coût		estimé à 50€

5.4 Fonctionnement

La partie centrale contient les circuits d'amplification et de commutation. Les 4 brins verticaux (les brins actifs) se fixent par BNC.

Les antennes sont alimentées de façon séquentielle pour imiter une antenne en rotation. Une fois que les antennes ont capté les ondes provenant du drone, il faut faire une démodulation et enlever tous les bruits.

Un système à LED permet de visualiser la composante continue qui passe dans les antennes. A partir du boîtier Doppler et de son menu de test, on peut ainsi vérifier individuellement chaque antenne. Ceci permet soit de faire fonctionner le système Doppler avec une antenne sur 4 , soit avec 3 antennes sur 4.

Trois micro-contrôleurs Pics sont utilisés un 16F628A pour l'affichage, un 16F877A pour le circuit principal et un 12F675 comme diviseur de fréquence.

1. Fédération Nationale des Radioamateurs au service de la Sécurité Civile, agréée de sécurité civile

Ce Doppler est la version la plus récente et la plus performante de la série. Il commute les antennes et il affiche la direction mesurée sur la boussole à 36 LEDs.

Une présentation plus détaillée du fonctionnement interne des PIC est fournie dans la figure suivante :

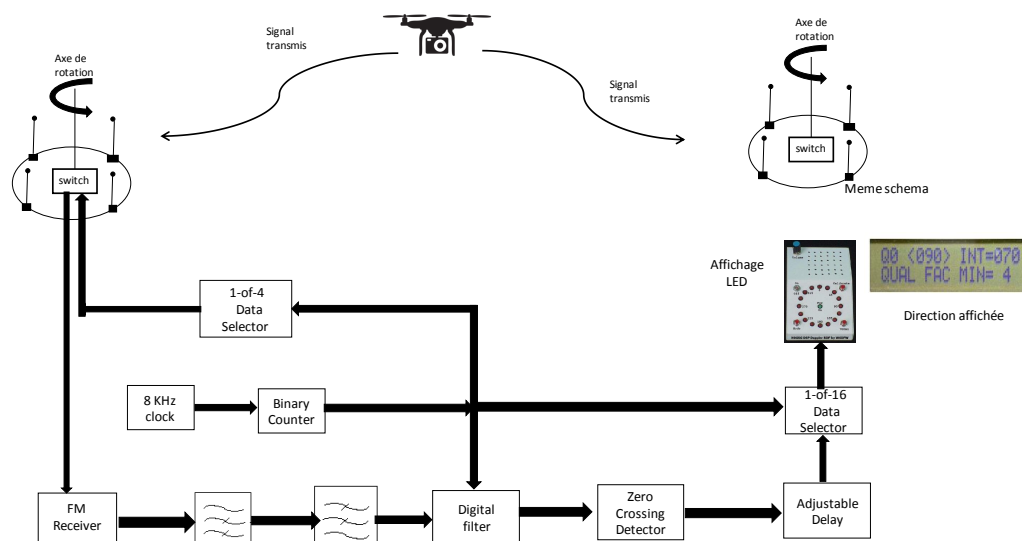


FIGURE 5.3 – Présentation détaillée du système

5.5 Schéma bloc

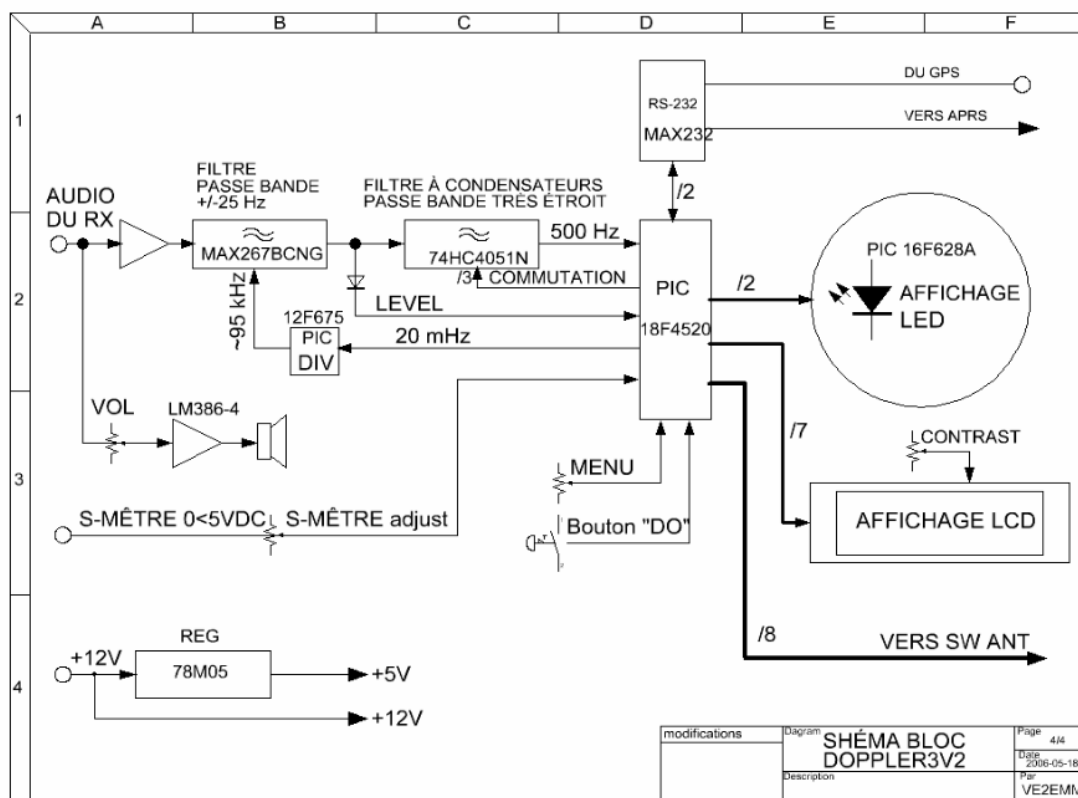


FIGURE 5.4 – Schéma bloc du Montréal 3v2

5.6 Liste des composants

Voici la liste des composants pour la construction du Montréal 3v2 :

IC30	LM386N-4	Ampli BF
IC50	MAX267BCNG	Filtre
IC51	PIC 12F675-I/P	PIC
IC52	74HC4051N	Filtre
IC53	MAX492CPA	Ampli Op
IC70	PIC 18F4520-I/P	PIC
VR20	7805 TO-220	Régulateur
X70	20 MHz HC49	Quartz
D50	1N5819	Diode Schottky
LCD20	LCD 2X16,	Afficheur 2 lignes de 16 car.
IC1	PIC16F628A-I/P	PIC
LED1 - LED36	ø3mm, Rouge et/ou Vert	
LED37	3 ou 5mm Bicolore Rouge/Verte	
FB1 - FB8	Ferrites ²	
IC100	= MAX232ACPE	en option
Q100	= 2N2222 TO-92	

FIGURE 5.5 – Liste des composants

5.7 Modification à apporter

Le Montréal ne correspond qu'en partie à nos critères. Il est donc impératif de le modifier. Le premier problème concerne la gamme de fréquence du système. En effet, notre démonstrateur doit pouvoir localiser un drone émettant en 2,4 Ghz. Il faut donc à la fois modifier le bloc antenne mais également la partie de comutation d'antenne permettant de réaliser l'effet Doppler. L'étude des antennes à déjà été réalisée ci-dessus.

De plus, pour pouvoir réaliser la localisation de la cible, il faut pouvoir réaliser le relevé de mesure en sortie du système afin d'en interpréter l'azimut de la cible par rapport au radiogoniomètre.

Conclusion

Bien que sommaire, cette première analyse comprenant de la recherche bibliographique, de la veille technologique et de l'analyse fonctionnelle, nous permet de nous recentrer sur l'essentiel. Le domaine de la localisation de drone étant en plein essor, il est primordial de se concentrer sur un type de détection et d'avancer pas à pas.

L'analyse de systèmes radio goniométriques existants nous a permis de valider cette solution technique pour la réalisation du projet. Les principes de cette méthode de localisation sont connus depuis près d'un siècle, il est donc aisé de trouver des ouvrages décrivant le mode de fonctionnements de ces appareils.

Après avoir réalisé l'état de l'art, nous envisageons de réaliser un radio-goniomètre doppler proche du Montréal 3v2 décrit dans ce document mais adapté à la recherche de drones.

Annexe

Drone

A.1 Définition

La définition suivante est extraite de futura science [1].

Un drone est un aéronef sans passager ni pilote qui peut voler de façon autonome ou être contrôlé à distance depuis le sol. Le mot « drone » est employé pour désigner des véhicules aériens, terrestres, de surface ou sous-marins, alors que la classification anglo-saxonne distingue chaque type d'appareil.

La taille d'un drone aérien peut aller de quelques centimètres pour les modèles miniatures à plusieurs mètres pour les drones spécialisés (surveillance, renseignement, combat, transport, loisirs). L'autonomie en vol va de quelques minutes à plus de 40 heures pour les drones de longue endurance.

A.2 Type des drones

On distingue deux types des drones selon leur utilisation et leur taille : militaires et civiles.

Les drones militaires

Le concept du drone a émergé durant la Première Guerre mondiale. À l'origine, le drone était un avion-cible à vocation militaire. Son développement a suivi le rythme des grands conflits du XX^e siècle : Seconde Guerre mondiale, guerre de Corée, du Vietnam, guerre froide, conflits au Moyen-Orient, guerre d'Irak, d'Afghanistan ou encore en ex-Yougoslavie. Les drones sont plus économiques tout en évitant de mettre en jeu la vie des pilotes et de déployer des troupes terrestres notamment pour les missions de reconnaissance, de surveillance et les attaques ciblées. Leur utilisation au sein des armées et forces de police est devenue prépondérante.

Les missions qui leur sont dévolues sont très variées :

1. Écoute des signaux électromagnétiques.
2. Observation et surveillance.
3. Détection de missile balistique grâce à une alerte avancée.
4. Relais de communication.
5. Illumination de cibles.
6. Brouillage.
7. Et pour certains, bombardement.

Les drones civils

Dans le civil, de nombreux domaines (cinéma, télévision, agriculture, environnement, etc.) ont vu les drones susciter des applications inédites grâce à leur capacité à embarquer des appareils photo, des caméras, des caméras infrarouge ou des capteurs environnementaux. Plusieurs sociétés spécialisées dans le transport (DHL, UPS, Allship, La Poste) ainsi que le géant du e-commerce Amazon travaillent sur des concepts de drones-livreurs. Ce type de service a été introduit en 2015 aux Émirats arabes unis pour la livraison de documents officiels.

Les drones de loisir ont connu un essor important à partir des années 2010 avec l'arrivée d'appareils miniaturisés, abordables et suffisamment maniables pour être accessibles aux novices. En France, l'utilisation des drones est réglementée par le Code de l'aviation civile, le Code des transports et deux arrêtés émis en 2012.

A.3 Fréquence

Il y a 3 fréquences utilisées pour la communication entre le drone et le télécommande :

- 1,3 GHz
- 2,4 GHz
- 5,8 GHz

Pour une meilleure qualité d'image, mieux vaut utiliser la bande de 5,8 GHz sachant que le 2,4 GHz permet de plus longues distances mais une qualité d'images plus faible.

Afin d'éviter les interférences, mieux vaut éviter d'émettre sur la même bande que votre radiocommande.

Le 2,4 GHz est la même bande que le Wifi, donc à éviter en milieu urbain et en cas d'utilisation évitez d'allumer votre smartphone à côté.

A.4 Types de modulations

Mais il est impossible d'envoyer un signal numérique tel quel par ondes électromagnétiques. Le signal a besoin d'être modulé, c'est-à-dire transformé d'un signal numérique à un signal analogique. L'opération inverse, la démodulation, se fait par la suite après la réception du signal par la station afin d'obtenir une information exploitable.

Il existe plusieurs types de modulation dont voici les plus connus :

AM (Amplitude Modulation) : Pour faire passer de l'information, on modifie l'amplitude du signal au cours du temps.

FM (Frequency Modulation) : Pour faire passer de l'information on modifie la fréquence du signal au cours du temps.

PM (Phase Modulation) : C'est la technologie la plus utilisée pour les transmissions radio. Ici on fait passer l'information en modifiant la phase du signal. L'amplitude et la fréquence du signal restent donc fixes. Il existe plusieurs types de modulations par phases : BPSK¹, QPSK² ... BPSK est binaire, on peut donc utiliser deux phases différentes et ainsi faire passer deux types d'informations (0 ou 1). QPSK est quadratique c'est-à-dire que l'on peut utiliser quatre phases différentes donc que l'on peut trans-

1. Binary Phase Shift keying
2. Quadratic PSK

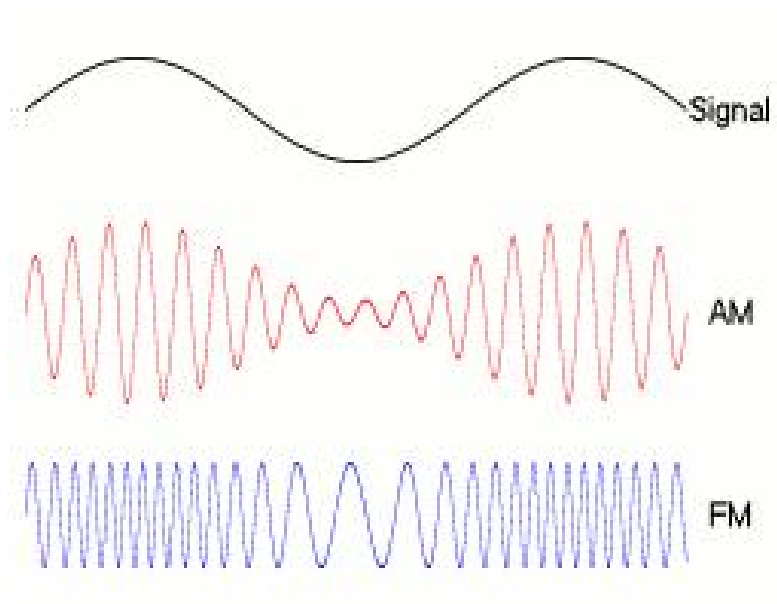


FIGURE A.1 – types de modulations

mettre quatre types d'informations (00, 01, 10, 11). Plus le nombre de phases augmente plus le nombre d'informations pouvant être véhiculé augmente. Mais cela rend le signal plus exposé aux erreurs car les phases sont de plus en plus proches.

Lorsque l'on modifie la phase d'un signal, on « décale » le signal dans le temps. Graphiquement, cela se traduit par une translation de la courbe du signal sur l'axe des abscisses. La modulation de phase s'exprime en degrés ou en radians. Ainsi 360° (ou 2π radians) correspond à un décalage d'une période. On dit de deux signaux qu'ils sont en phase lorsqu'ils se superposent.

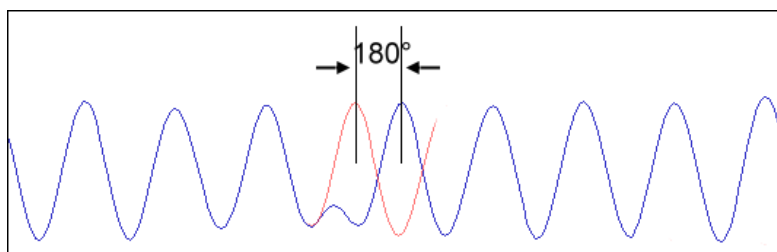


FIGURE A.2 – Exemple d'un signal modulé en phase avec un changement de phase de 180°

Une fois que ce signal modulé arrive à destination, on opère l'action inverse : la démodulation. Cela permet d'avoir une information numérique exploitable et d'ensuite pouvoir afficher l'image sur un écran afin que le pilote puisse voir ce que drone « voit ».

La transmission de données par ondes électromagnétiques ne se fait pas sans erreur, surtout lorsque celles-ci traversent plusieurs milliers de kilomètres dont l'atmosphère terrestre. Ces erreurs surviennent cependant en groupe et de façon très localisée. Mais de simples algorithmes de correction d'erreur comme le FEC³ peuvent assurer de bonnes conditions de transmissions.

3. Forward Error Correction

A.5 Législations

La législation en France impose une puissance d'émission maximale de 25 mW dans la fréquence des 5.8 GHz et 100 mW dans la fréquence 2.4 GHz.

Pour voler en immersion, il faut être 2 avec 2 radiocommandes, un « esclave » et un « maître » pouvant reprendre le contrôle à tout moment si besoin.

Les agents de contrôle peuvent, à tout moment, effectuer des contrôles, tant au niveau des utilisateurs amateurs que professionnels, sur le respect des caractéristiques techniques radios des drones. Une utilisation du spectre est trop dangereuse. En cas de non-respect de celles-ci, le matériel peut être saisi et un procès-verbal dressé.

Cependant, un arrêté sur les conditions d'utilisation et des personnes capables de piloter ces drones a été rédigé en France par les services de l'aviation civile le 10 Décembre 2009. Dans l'article 3, les drones doivent être connus des services de l'aviation civile lorsque les drones ne sont pas pour des activités sportives ou récréatives. Ils doivent être connus lorsqu'ils font partie d'une association d'aéromodélisme mais aussi lorsqu'ils évoluent à plus de 150 mètres d'altitudes (ils doivent fournir des justificatifs prouvant le besoin et disposer de précautions particulières, et surtout les vols de nuit ne sont pas autorisés.

L'utilisation de drones civils est très contraignante. En effet, l'utilisateur doit de demander une autorisation au service de l'aviation civile, pour chaque vol, plusieurs semaines à l'avance ce qui est presque impossible, car les drones dépendent de la météo. De plus, aucune autorisation n'est délivrée à l'heure actuelle pour des survols avec des drones civils dans des zones civiles de zones habitées ou avec un rassemblement de personnes (manifestation). Or, c'est dans ces zones que sont prises la majeure partie des photographies. Il est faux de croire qu'en dessous de 150 mètres d'altitudes il n'y a pas de réglementation et que les avions et hélicoptères avec pilote ne peuvent pas descendre à cette altitude. A cette altitude, il est nécessaire de posséder une autorisation, car sur le territoire français des milliers d'heures de vols se font entre 50 et 150 mètres d'altitudes avec des avions et hélicoptères traditionnels (vols basse altitude d'entraînements militaires, interventions d'hélicoptères de secours). Les aéronefs traditionnels ne peuvent pas éviter les drones à cette altitude à cause de leur faible taille, presque invisible en vol.

Organisation du travail

B.1 Méthode de travail

Nous avons cherché au mieux à répartir notre travail. Pour cela nous avons défini 3 grands axes de travail à l'issue de cette étude fonctionnelle.

- Dans un premier temps nous allons réaliser l'état de l'art.
- Dans un deuxième temps nous étudierons la phase de réalisation.
- Enfin nous testerons notre projet dans des conditions réelles.

Tout au long de ce projet nous avons choisi de réaliser notre travail en divisant notre équipe en 3 groupes de travail distincts formés respectivement de D'Acremont - Cotten, Legay - Rigaud, et Kenaan - Shehade. Notamment lors de l'état de l'art, ces groupes vont réaliser des recherches par binômes pour ensuite redistribuer les informations grâce aux outils mis à notre disposition (nous avons détaillé ces outils plus loin).

De plus, nous avons décidé lors de la phase de conception de diviser ce travail en plusieurs sous ensembles que nous définirons plus tard et qui seront chacun d'eux testés indépendamment, à l'image de tests unitaires en programmation.

B.2 Outils utilisés

Lors de notre projet nous avons choisi d'utiliser plusieurs outils de travail en collaboration.

- Nous utilisons Office 365. Nous avons créé un groupe de travail où nous partageons des fichiers et envoyons des mails de manière centralisée.
- Nous utilisons également \LaTeX pour la rédaction de nos rapports.
- Nous pensons finalement utiliser Git et GitHub lors de notre phase de conception. Nous avons pour cela créé un projet sur GitHub.
- Après plusieurs difficultés, nous avons réussi à utiliser Framaboard du groupe Framasoft pour gérer notre projet.

Framaboard

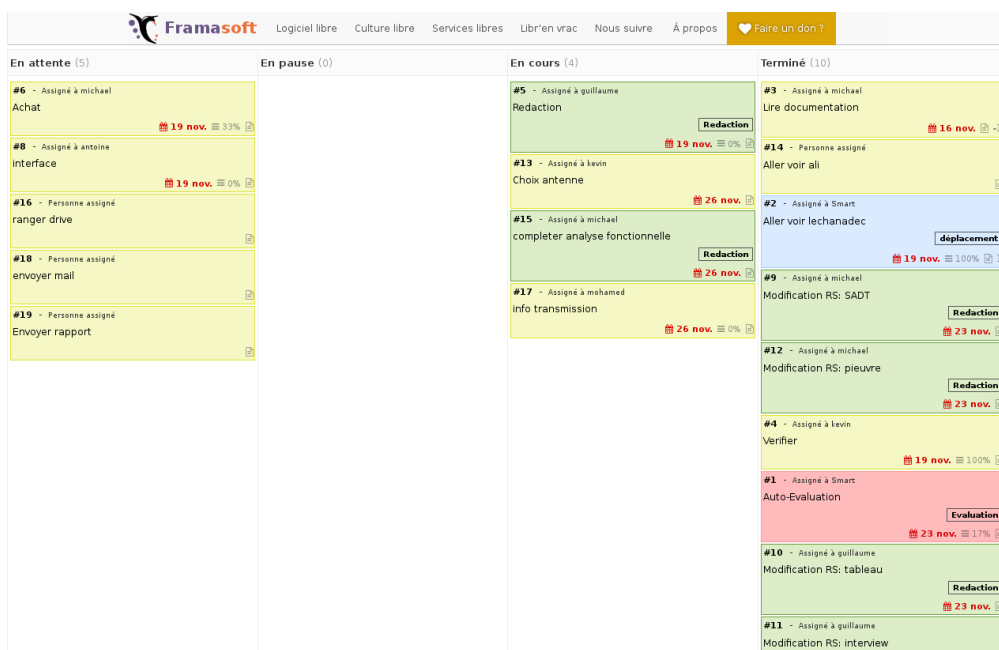


FIGURE B.1 – Impression d’écran de notre Framaboard

Il est possible d’avoir accès en lecture à notre page Framaboard en cliquant *ici*

GitHub

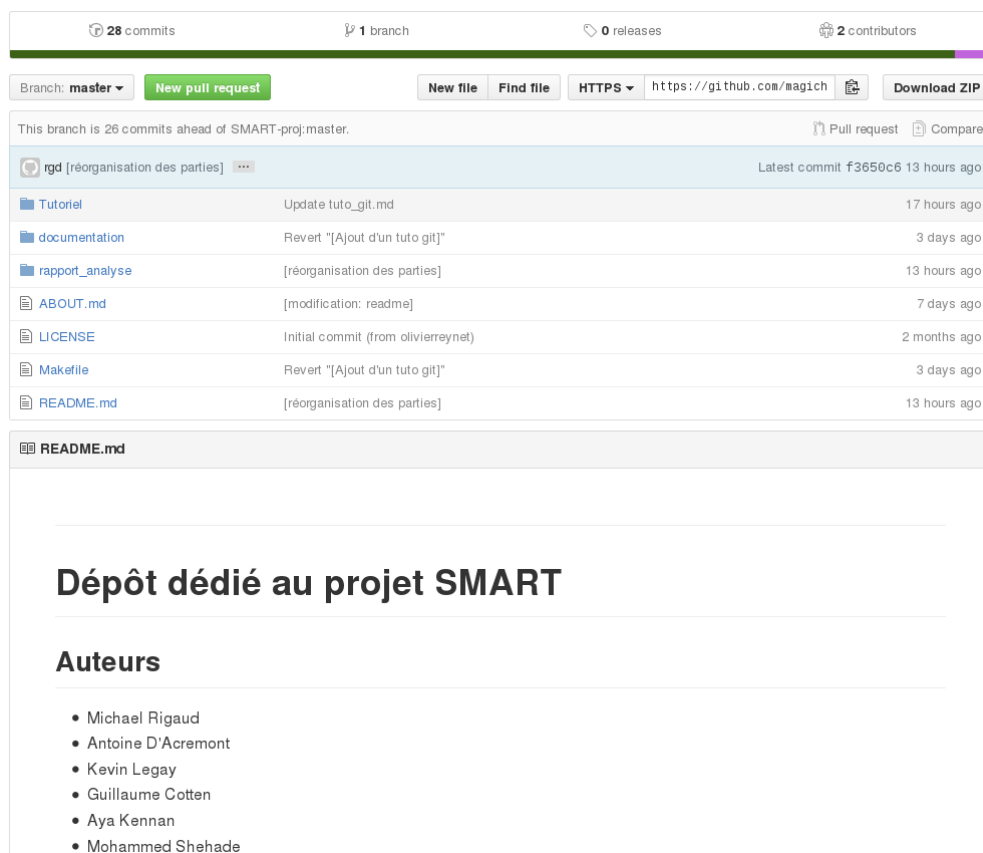


FIGURE B.2 – Impression d’écran de notre GitHub

Il est possible d’avoir accès à notre page GitHub en cliquant *ici*

Correspondance

De : Jean-Paul Yonnet <Jean-Paul.Yonnet@g2elab.grenoble-inp.fr>
Envoyé : mardi 8 décembre 2015 10:07
À : Guillaume COTTEN
Cc : Jean-Paul / F1LVT; Jean Paul Yonnet
Objet : Re: Tr : RE : Montréal 3

Bonjour,
Dans un Doppler, il y a 3 sous-ensembles : une antenne à 4 éléments commutés, un récepteur calé sur la fréquence reçue, et un boîtier qui affiche la direction mesurée.
Dans le Doppler Montréal, les 3 microcontrôleurs ne voient que de la basse fréquence. C'est l'antenne et le récepteur qui voient la haute fréquence. Le boîtier Doppler génère les commutations à 500 Hz et analyse le signal BF du récepteur. Il n'y a donc aucun problème pour travailler à 2,4 GHz (ou toute autre fréquence) pour le boîtier du Doppler Montréal.
Cordialement
Jean-Paul YONNET

--

Jean-Paul YONNET
Directeur de Recherche CNRS
Grenoble-INP -- Institut Polytechnique de Grenoble
Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble - G2E Lab (UMR CNRS 5269)
Bât. GreEn-ER, 21 rue des Martyrs, CS 90624, 38031 GRENOBLE Cedex,
FRANCE
Tel : 33.(0)4.76.82.62.97 Fax : 33.(0)4.76.82.63.00
<Jean-Paul.Yonnet@g2elab.grenoble-inp.fr>
Coord GPS UTM (WGS84) : 31T - 712.24 - 5009.00
Coord GPS dd.dddd (WGS84) : 45.2027 N - 5.7025 E

----- Mail transféré -----

DE : Guillaume COTTEN <guillaume.cotten@ensta-bretagne.org>
À : Jean-Paul / F1LVT <f1lvt@yahoo.fr>
ENVOYÉ LE : Mardi 8 décembre 2015 9h20
OBJET : RE : Montréal 3

Bonjour,
Merci pour votre réponse rapide. A vrai dire, nous allons acheter les antennes UHF. On interroge se porte surtout sur la partie électronique et la capacité du microprocesseur à gérer un signal en 2,4 GHz.
Nous avons encore le temps de la réflexion avant de nous lancer dans la réalisation donc nous envisageons toutes les pistes dont le remplacement du microprocesseur par un Arduino mega.

Cordialement

COTTEN Guillaume

Envoyé depuis mon appareil Samsung

----- Message d'origine -----

De : Jean-Paul / F1LVT <f1lvt@yahoo.fr>

Date : 07/12/2015 11:53 (GMT+01:00)

À : Guillaume COTTEN <guillaume.cotten@ensta-bretagne.org>

Cc : Jean-Paul / F1LVT <f1lvt@yahoo.fr>

Objet : Re: Montréal 3

Bonjour,

Sur le principe, ça doit fonctionner. Le problème, c'est la construction de l'antenne UHF.

En 400 MHz, ça fonctionne très bien. Je n'ai pas testé le Doppler plus haut en fréquence.

Il faudrait le tester en 1200 MHz avant de se lancer dans la construction en 2400 MHz. En 2400 MHz, les 4 brins font 4 cm et sont espacés de 4 cm.

Une solution alternative est d'asservir une antenne directive.

Bien cordialement

Jean-Paul YONNET

Jean-Paul / F1LVT

Adresse mail : F1LVT@yahoo.fr

Site web : www.F1LVT.com

DE : Guillaume COTTEN <guillaume.cotten@ensta-bretagne.org>

À : "F1LVT@yahoo.fr" <F1LVT@yahoo.fr>

ENVOYÉ LE : Lundi 7 décembre 2015 9h35

OBJET : Montréal 3

Bonjour,

Actuellement en deuxième année d'école d'ingénieur au sein de l'ENSTA Bretagne, je réalise au sein d'une équipe un système de détection de drone émetteur grâce à un positionnement par radiogoniométrie. Le système est simple en soit, positionner une source grâce à deux/trois azimuts relevé par les radiogoniomètre. Le Montréal 3 nous semble une solution convenable à la condition que celui-ci soit adaptable à notre gamme de fréquence. En effet nous souhaitons réaliser un démonstrateur pour des drones émettant en 2.4 GHz.

Pensez-vous que cela soit tout simplement réalisable?

Cordialement

COTTEN Guillaume

Table des figures

1.1	Le radar portable Squire de Thales Air Systems	6
2.1	Diagramme pieuvre	10
2.2	SADT A-0	11
2.3	SADT A0	11
2.4	Diagramme FAST	12
2.5	Diagramme 3 axes	13
2.6	Schéma Logique du système	14
3.1	diagramme en cardioïde d'une antenne à cadre	17
3.2	Radiogoniométrie VHF-UHF pour les bandes aviation et les bandes RA . .	18
4.1	Type d'antennes	20
5.1	Evolution du Montréal	22
5.2	Photographie prise du Montréal 3v2	23
5.3	Présentation détaillée du système	24
5.4	Schéma bloc du Montréal 3v2	24
5.5	Liste des composants	25
A.1	types de modulations	30
A.2	Exemple d'un signal modulé en phase avec un changement de phase de 180°	30
B.1	Impression d'écran de notre Framaboard	33
B.2	Impression d'écran de notre GitHub	33

Bibliographie

- [1] « Drone ». *futura science*, 2014.
- [2] François DELAVEAU et Yvon LIVRAN. « Radiosurveillance du spectre - Goniométrie et localisation ». *Techniques de l'ingénieur*, 2012. Ref. te6892.
- [3] Juliette DEMEY. « Comment détecter les drones ». *JDD*, 1 mars 2015.
- [4] F1LVT. « F1LVT : comment créer un radio-goniomètre Doppler le Montréal 3v2 ». <http://f1lvt.com/>.
- [5] Société FLIR. « L'imagerie thermique : Une technologie prête à conquérir le reste du monde ». <http://www.flir.fr/cs/display/?id=51839>.
- [6] Peter HAUSMANN. « *UAV Sound Source Localization* », 2014.
- [7] Jason KOEBLER. « Tiny Device Will Detect Domestic Drones ». *US.news*, 1 mai 2013. <http://www.usnews.com/news/articles/2013/05/01/tiny-device-will-detect-domestic-drones>.
- [8] Philippe MARTIN. « *Recepteur gonio (ou indicateur de champ) vhf* ». <http://ph-martin.pagesperso-orange.fr/f6eti/realisations/9901rxvhf/index.htm>.
- [9] Gilbert MULTEDO. « Radiosurveillance du spectre ». *Techniques de l'ingénieur*, 1994. Ref. e6890.
- [10] Société ORELIA. « Drone detector ». <http://www.drone-detector.com/fr/>.
- [11] H. Lissek P. MARMAROLI, X. Falourd. « *A UAV motor denoising technique to improve localization of surrounding noisy aircrafts : proof of concept for anti-collision systems* », 2012.