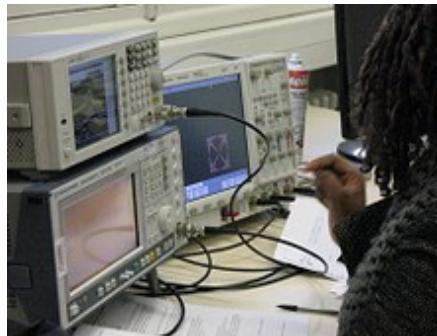
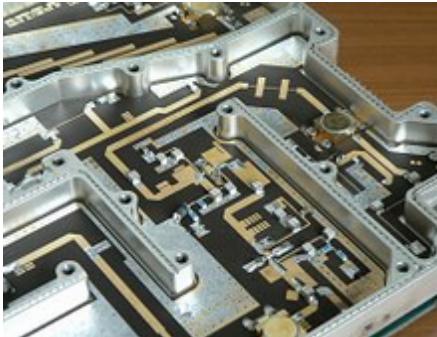


Systèmes Radar

24 – 25 juin 2021



*Bureau d'études
Systèmes radar*

Franck Daout
fdaout@parisnanterre.fr

<https://cva-geii.parisnanterre.fr/>

CFD - Bourges

Lab. : Réalisation d'un récepteur ADS-B et décodage à l'aide d'une radio logicielle



- Réaliser l'antenne $\lambda/4$
- Réaliser une adaptation d'impédance
- Faire la recette de l'antenne adaptée
- Mise en œuvre du système



$F = 1090 \text{ MHz}$

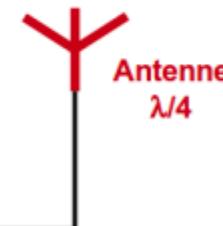


Longitude
Latitude
Altitude

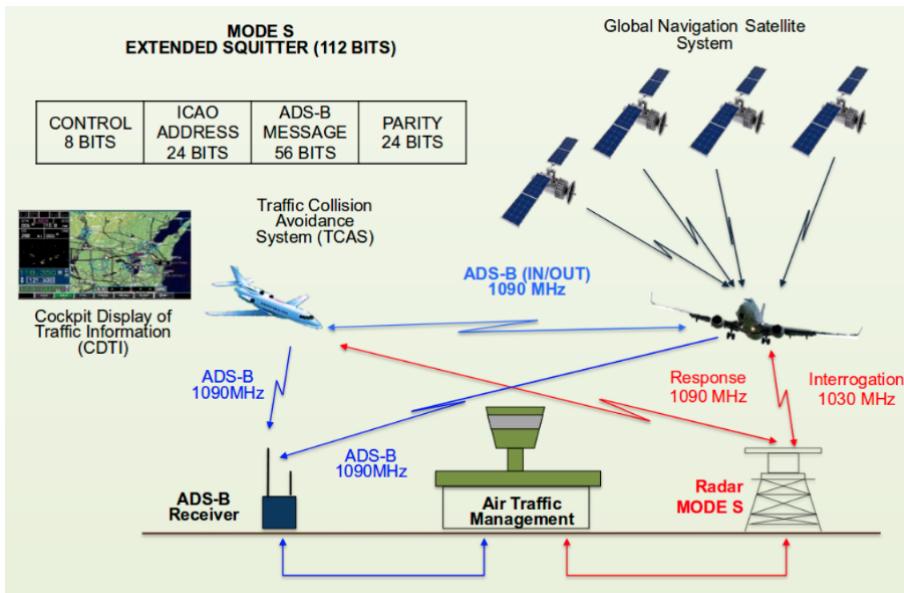
Traitement numérique



Clé logicielle



Lab. 2 : Introduction et fonctionnement



Afin de surveiller l'état du réseau aérien (localisation des avions, respect des plans de vol, ...), un système de diffusion appelé ADS-B a été proposé (radar secondaire).

Dans ce système, les appareils estiment leur position (longitude, latitude, altitude) grâce aux techniques de positionnement par satellite et diffusent ces informations toutes les secondes environ.

Ces informations sont ensuite récupérées au sol :

- par des stations intermédiaires ou des tours de contrôle,
- dans les autres appareils : qui peuvent utiliser ces signaux pour leurs systèmes anti-collision.

Lab. 2 : Radio logiciel ?



Système RF

*Signal RF
analogique*



SDR Hardware

*Bande de Base
Échantillons IQ*



Application
GNU Radio

- Antenne
- Filtre RX/LNA
- PA Tx
- Duplexeur

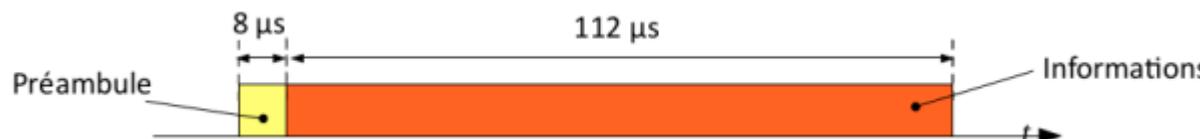
- CAN/CNA
- Conversion Up/Down
- Filtrage
- Ré-échantillonnage

Votre
application

- Présentation des signaux ADS-B (1/3)

Les signaux ADS-B (Automatic Dependent surveillance-Broadcast) sont émis par les avions, environ toutes les secondes, pour communiquer leur immatriculation (adresse OACI : Organisation de l'Aviation Civile Internationale), leur position (longitude, latitude, altitude), leur destination...

Ils utilisent une modulation particulière basée sur la modulation ASK et la modulation par position d'impulsion (PPM : « Pulse Position Modulation »). Toutes ces informations (immatriculation, position, destination...) sont transmises à la fréquence porteuse de 1090 MHz dans une trame d'une durée de 120 µs. La trame ADS-B est constituée d'un préambule de 8 µs suivie des informations codées en binaire.

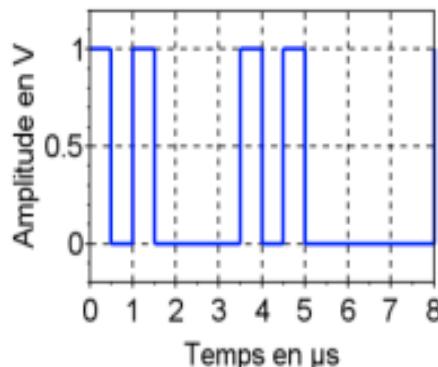


- Présentation des signaux ADS-B (2/3)

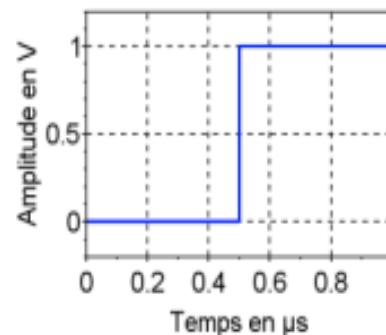
Le préambule, toujours identique, permet de synchroniser temporellement le signal reçu pour détecter les bits d'informations.

Un bit a une durée de $1 \mu\text{s}$, donc il y a 112 bits dans une trame ADS-B ayant un débit binaire de 1 Mbits/s .

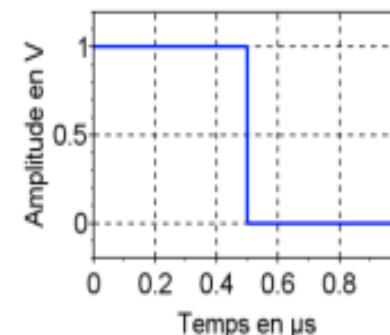
Le préambule et les bits sont codés à l'aide d'impulsion de largeur $0,5 \mu\text{s}$.



a. Préambule



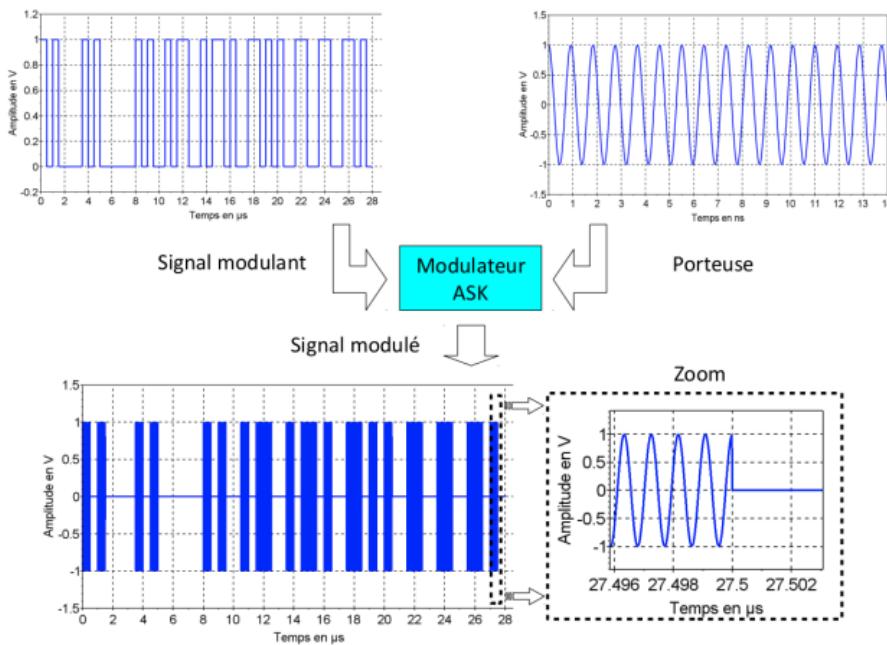
b. Impulsion encodant le bit 0



a. Impulsion encodant le bit 1

• Présentation des signaux ADS-B (3/3)

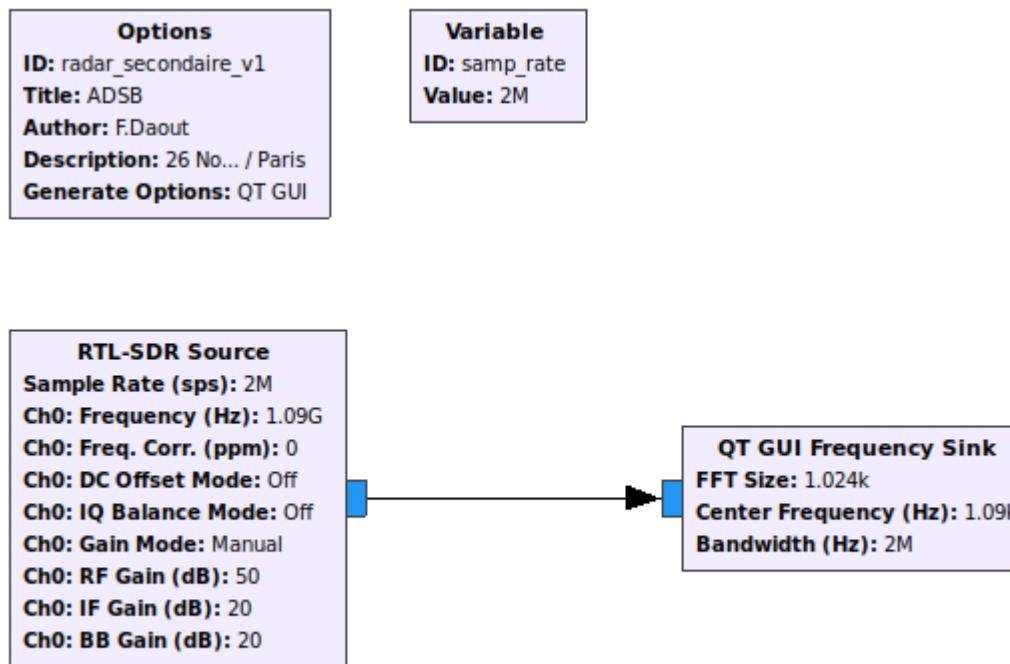
La trame ADS-B (le signal modulant) est multipliée par une sinusoïde à la fréquence de 1090 MHz (la porteuse) : c'est la modulation ASK.
A la sortie du multiplicateur, le signal modulé est amplifié puis émis par une antenne pour une transmission sans fil.



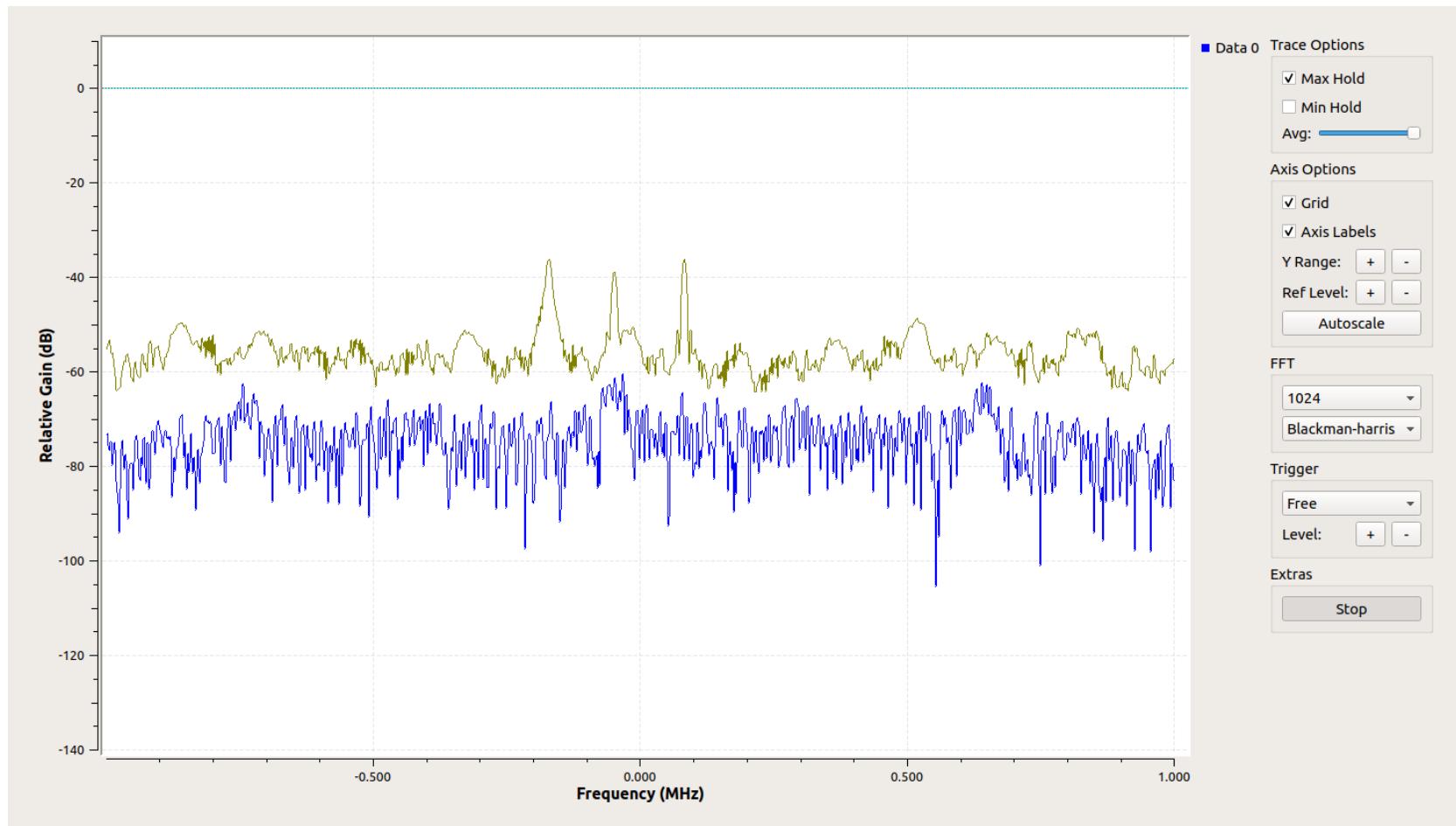
A la réception, afin de pouvoir décoder l'information, il faut :

- détecter l'enveloppe pour retrouver la trame,
- faire une synchronisation temporelle pour localiser le début de la trame (maximisation de la corrélation entre le préambule et la séquence binaire reçue),
- récupérer les bits et en extraire les informations.

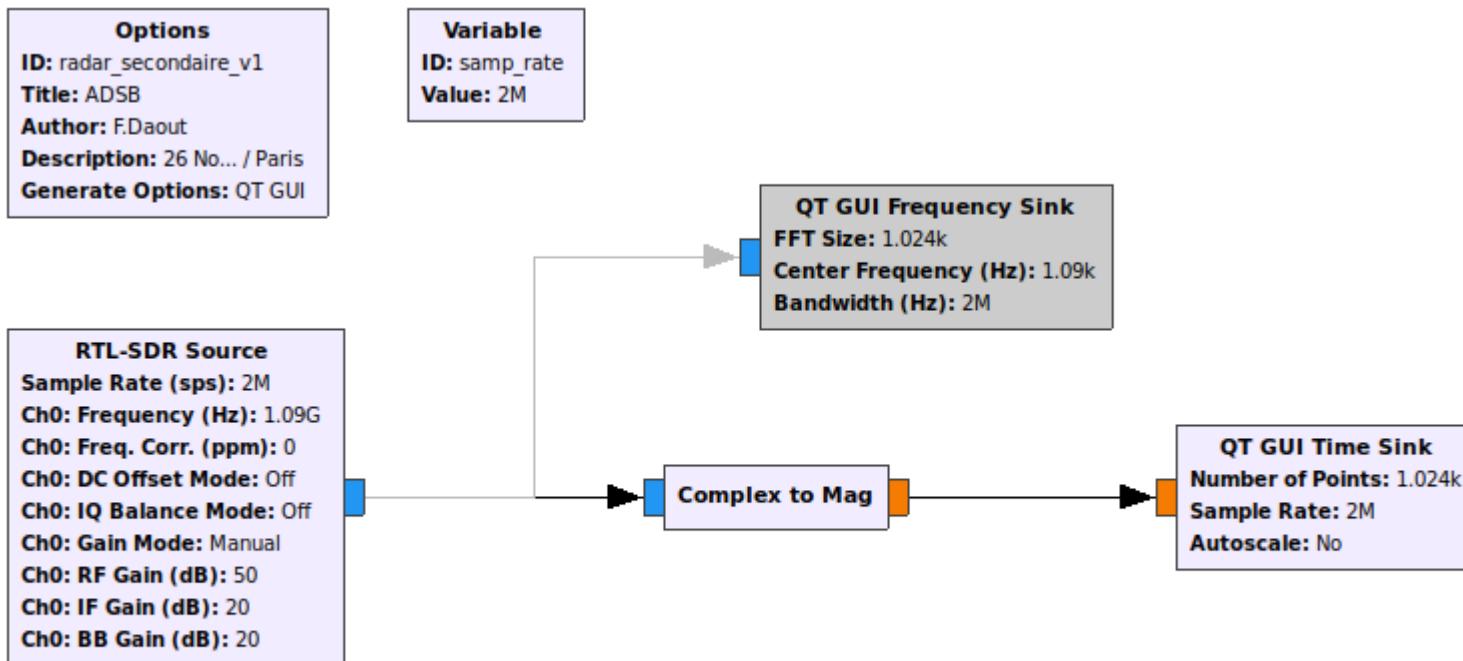
- Capture du signal ADS-B (1/2)



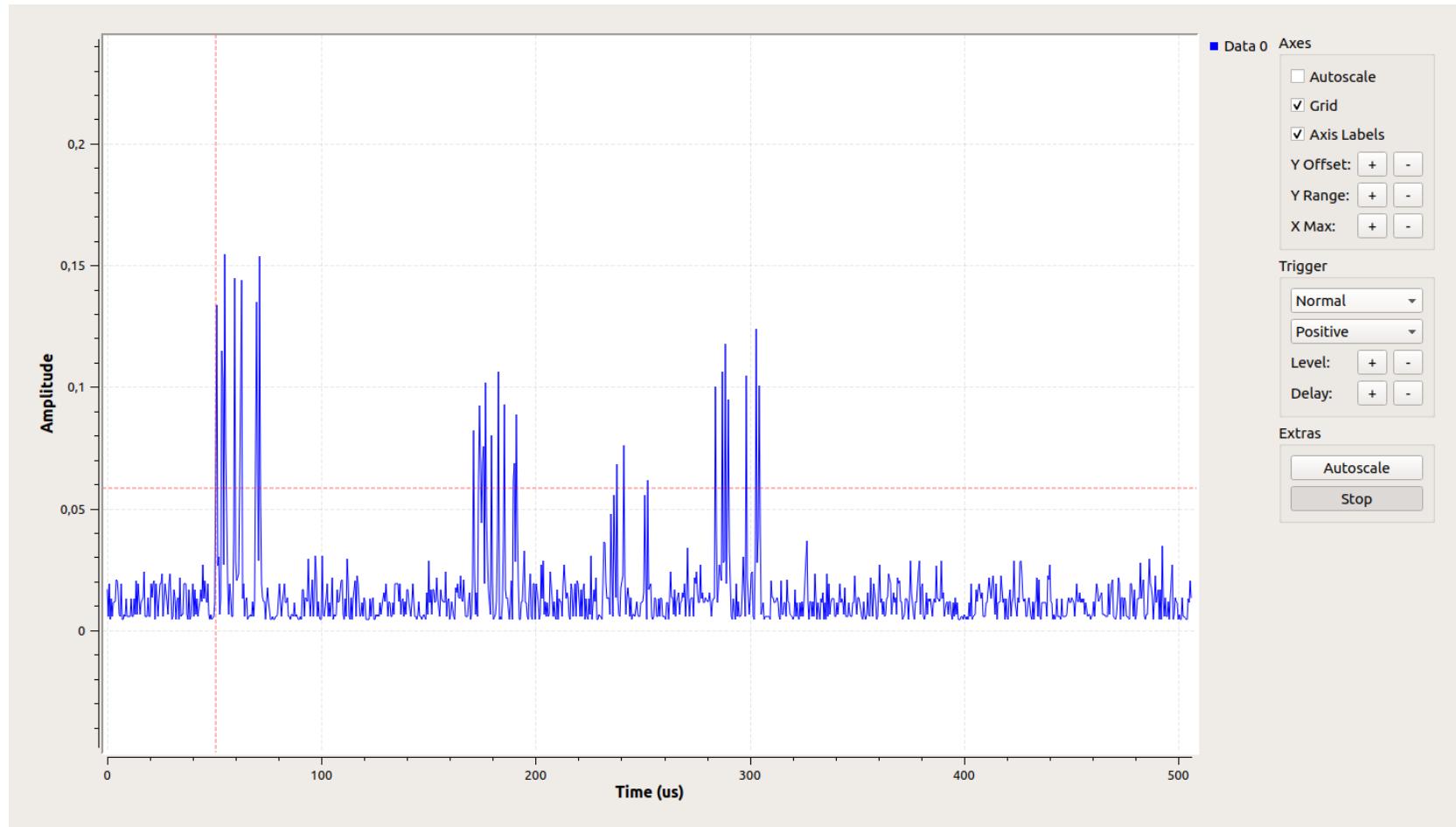
- Capture du signal ADS-B (2/2)



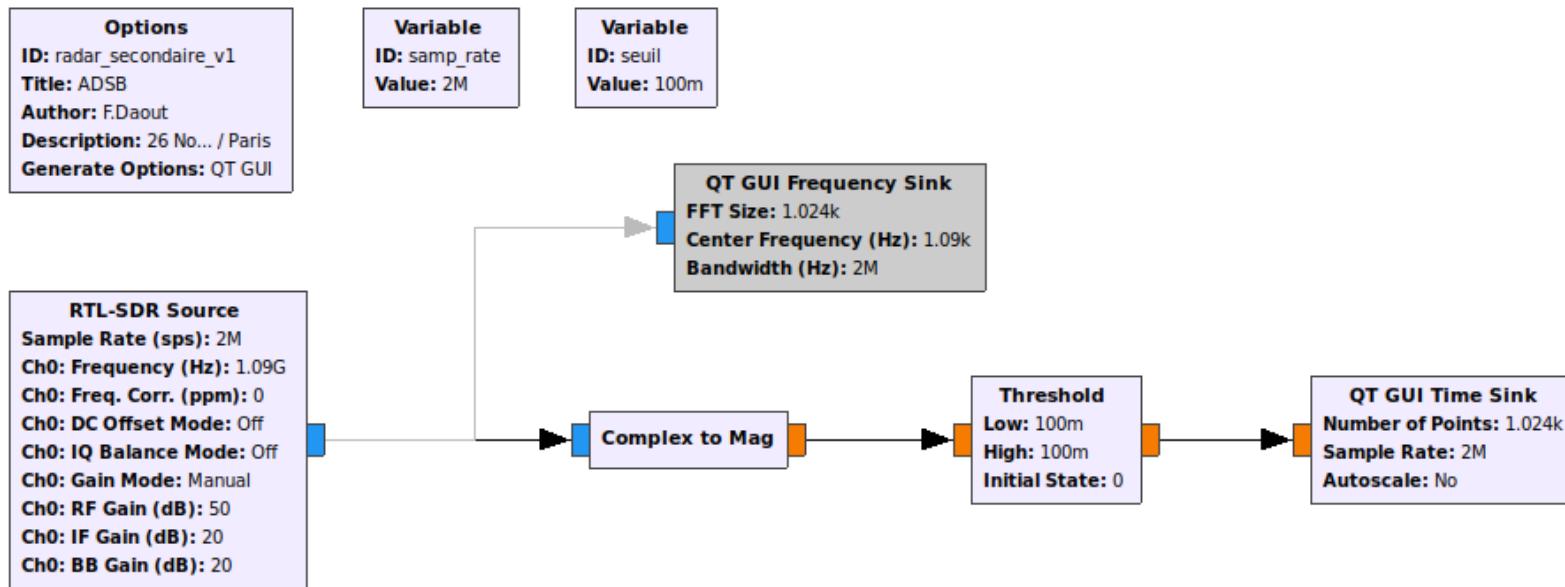
- Démodulation du signal ADS-B (1/4)



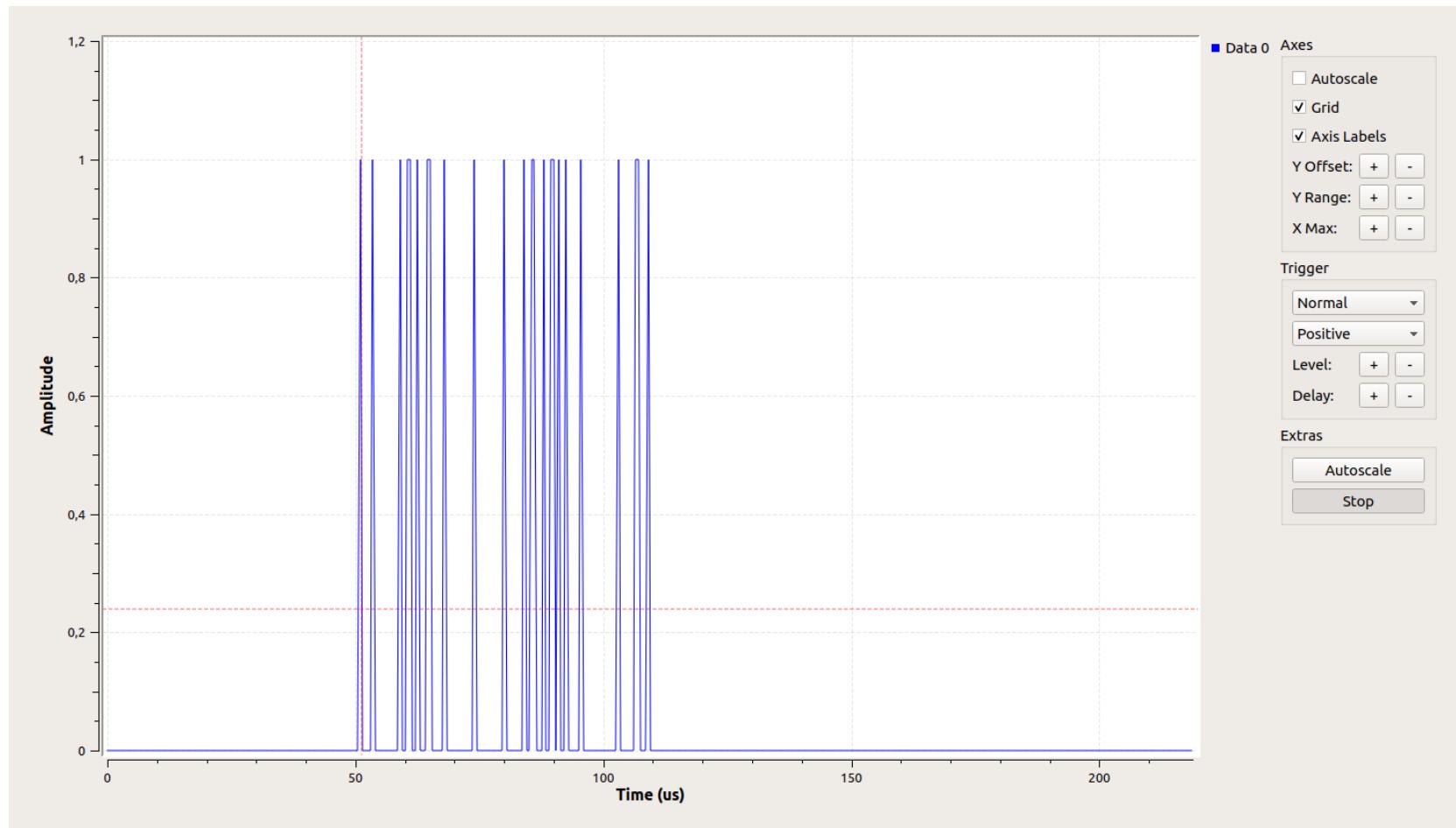
- Démodulation du signal ADS-B (2/4)



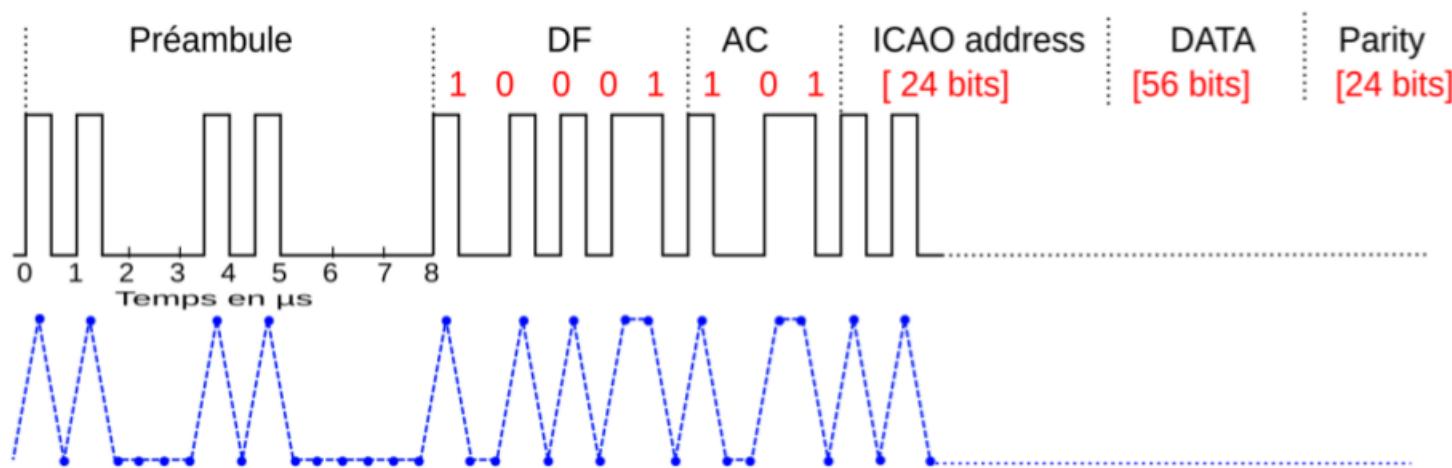
- Démodulation du signal ADS-B (3/4)



- Démodulation du signal ADS-B (4/4)



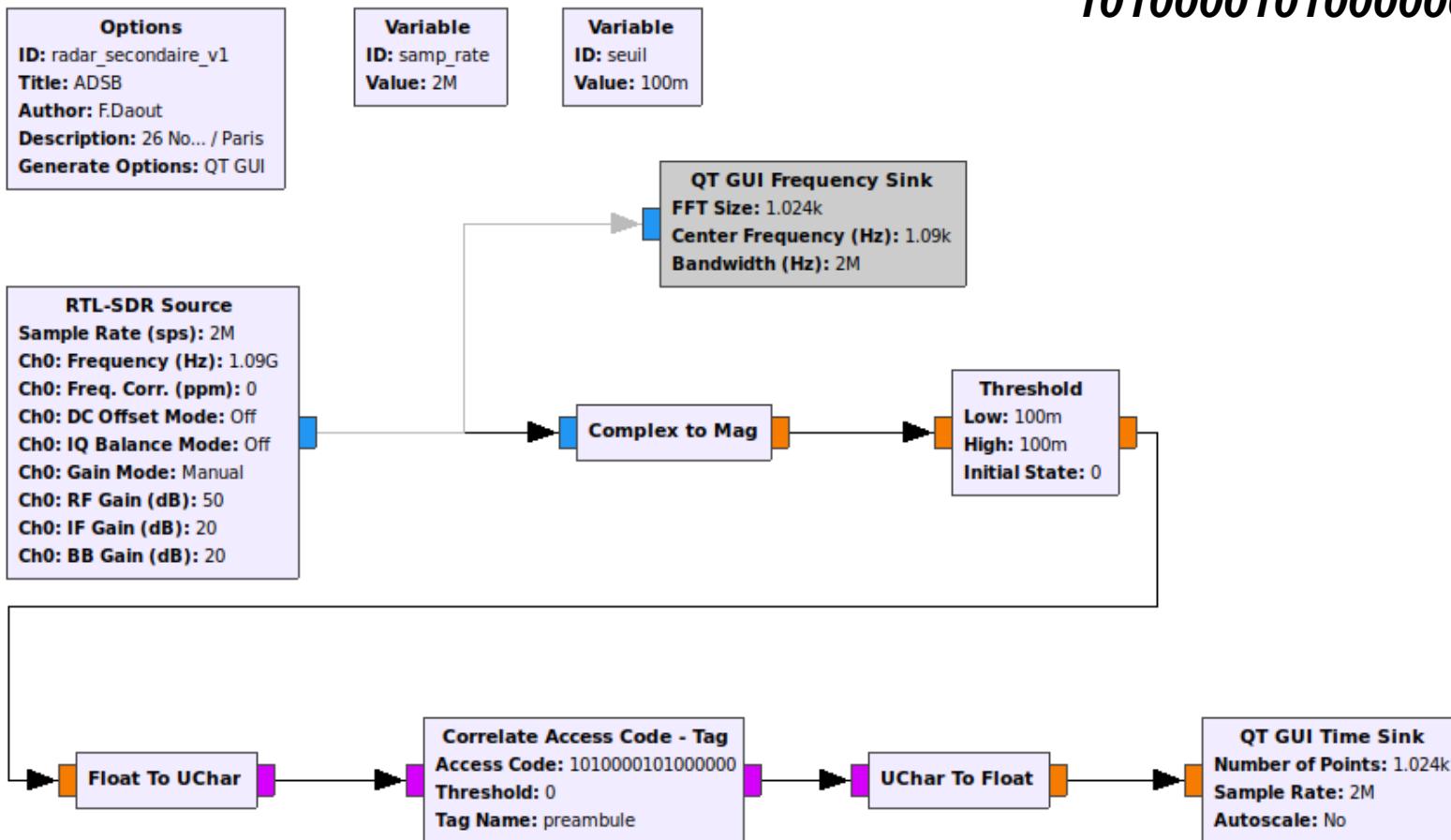
- Recherche du préambule et synchronisation (1/3)



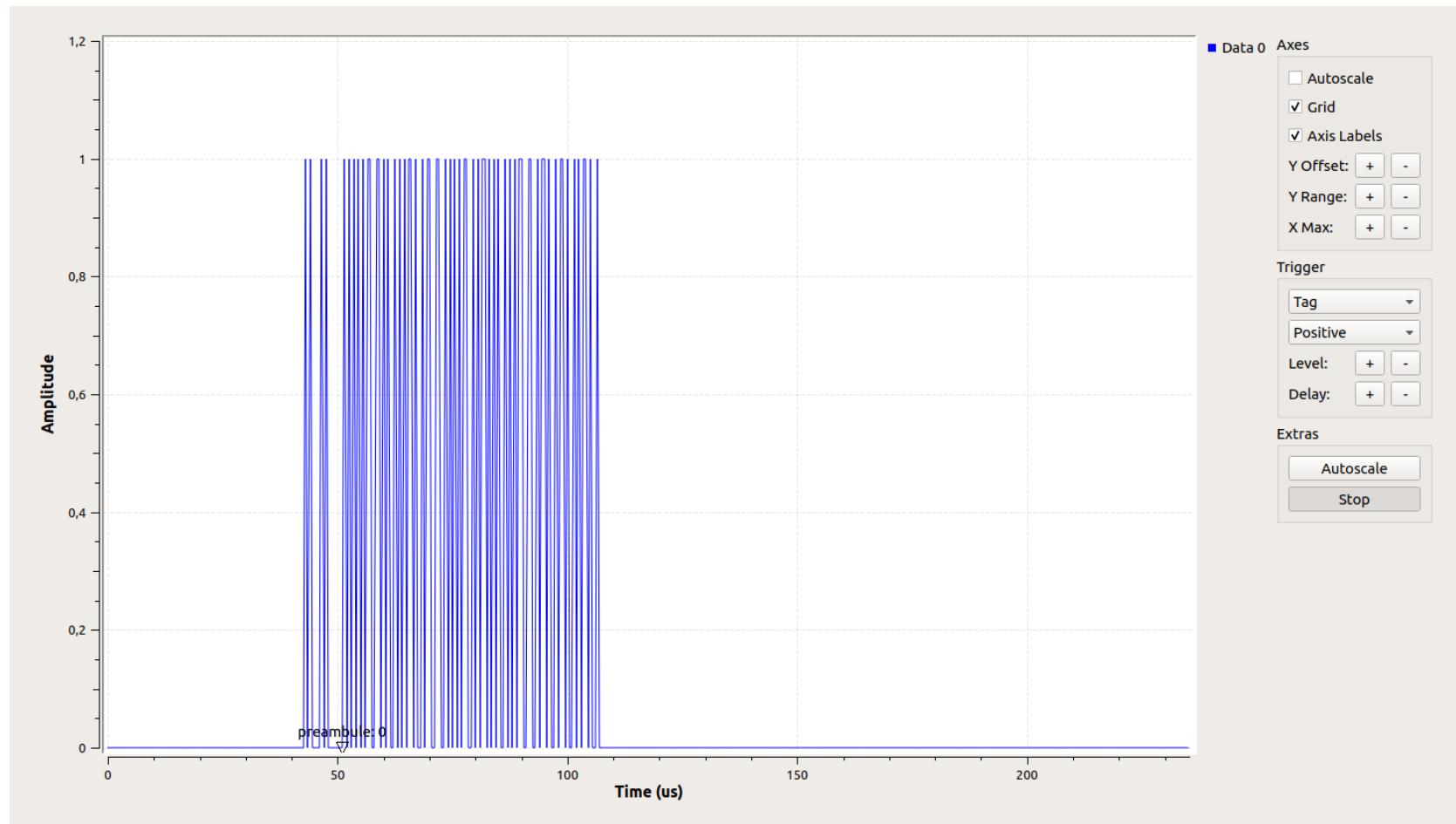
Revient à détecter le mot binaire
'1010000101000000' (à la fréquence de 2MHz)

- Recherche du préambule et synchronisation (2/3)

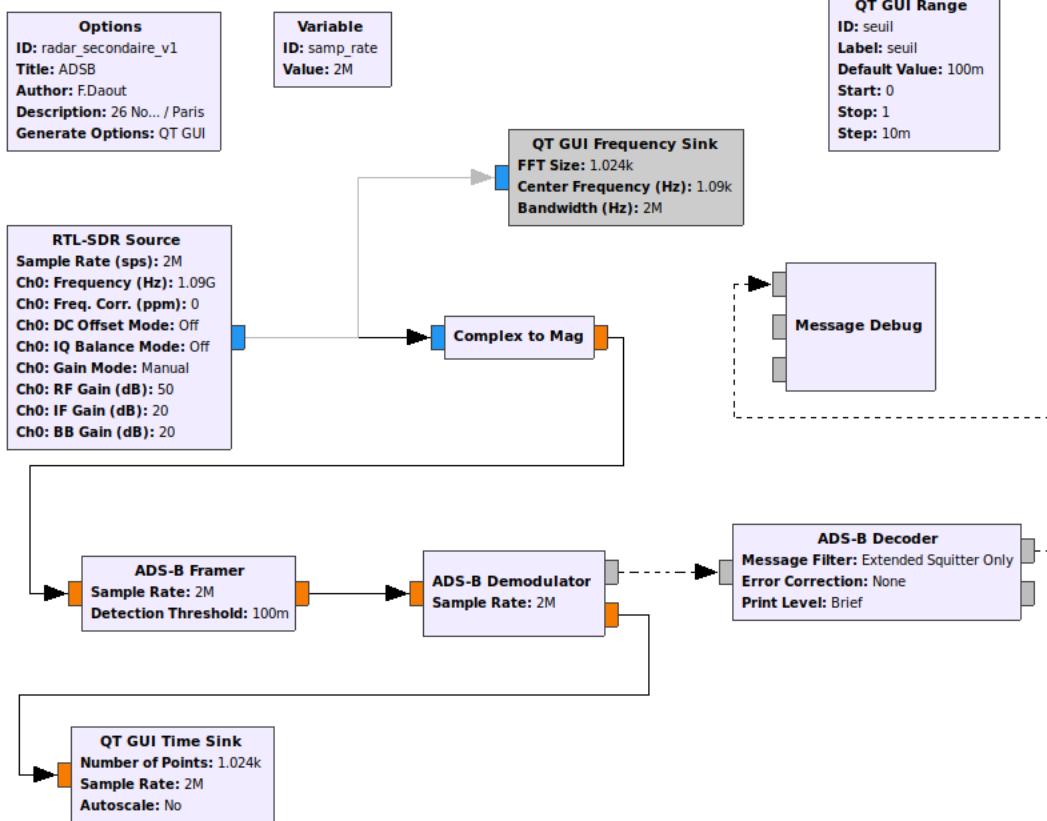
Préambule :
1010000101000000



- Recherche du préambule et synchronisation (3/3)



• Décodeur ADS



TERM environment variable not set.

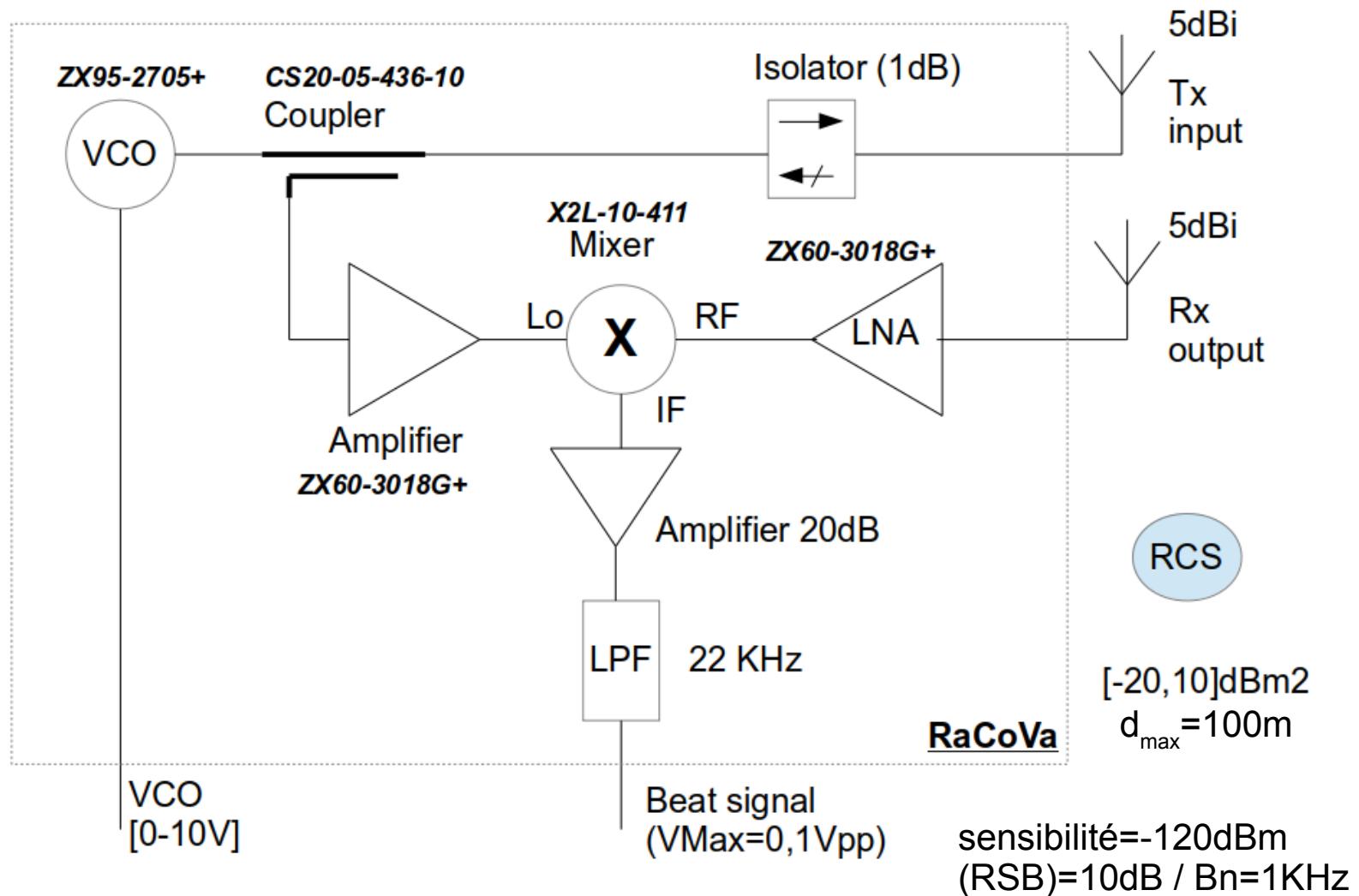
ICAO Callsign	Alt (ft)	Climb (ft/m)	Speed (kt)	Hdng (deg)	Latitude	Longitude	Msgs (s)	Age (s)
04c11c	11150	1792	400	1	48.8342743	2.3759343	18	3
396443	8800	2432	263	-92	48.9102949	2.2228522	4	0
3985a9	12300	-832	301	5	48.9154156	2.4389648	5	6
48436d	33000	64	449-115	48.7272491	2.5450252	11	3	

***** MESSAGE DEBUG PRINT *****

TERM environment variable not set.

ICAO Callsign	Alt (ft)	Climb (ft/m)	Speed (kt)	Hdng (deg)	Latitude	Longitude	Msgs (s)	Age (s)
04c11c	11150	1792	400	1	48.8342743	2.3759343	18	4
396443	8800	2496	264	-89	48.9102949	2.2228522	5	0
3985a9	12300	-832	301	5	48.9154156	2.4389648	5	7
48436d	33000	64	449-115	48.7272491	2.5450252	11	4	

Analyse d'un système Radar FMCW (Doppler)



Mode Doppler

- Fréquence Doppler

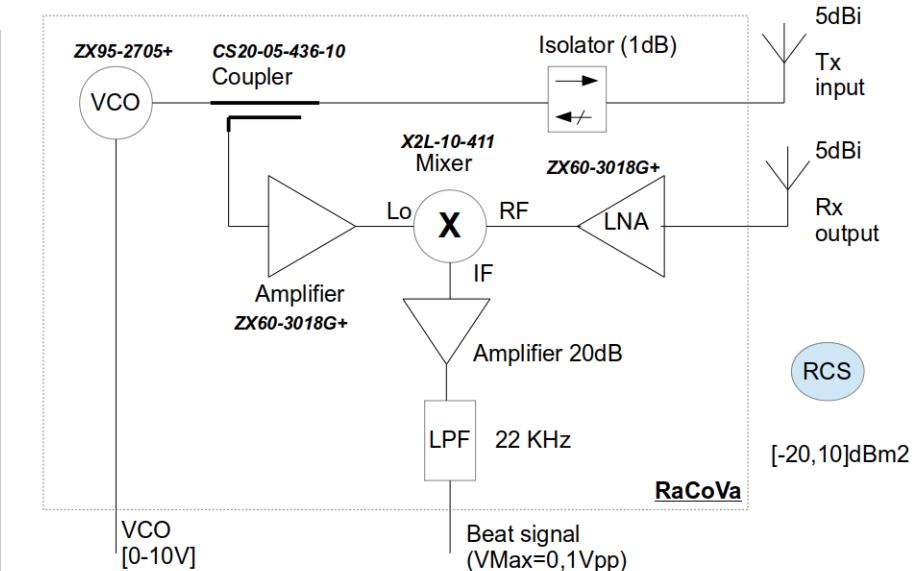
$$f_d = \frac{2v}{\lambda}$$

- Equation Radar

$$P_r = \frac{P_e G_e G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 d^4}$$

- SER

	<u>Square meters</u>
Small, single engine aircraft	1
Four passenger jet	2
Large fighter	6
Medium jet airliner	40
Jumbo jet	100
Helicopter	3
Small open boat	0.02
Small pleasure boat (20-30 ft)	2
Cabin cruiser (40-50 ft)	10
Ship(5,000 tons displacement, L Band)	10,000
Automobile / Small truck	100 - 200
Bicycle	2
Man	1
Birds	$10^{-2} - 10^{-3}$
Insects	$10^{-4} - 10^{-5}$



Rétro-ingénierie

- Déterminer la fonction du système
 - Recherche des spécifications
 - Rôle de chaque composant
- Modéliser le système
 - Déterminer la dynamique
 - Dynamique haute
 - Sensibilité
- Réaliser un prototype / Manipulation
 - Plan de mesure

Analyse du système

Désignation	Référence	Fonction
VCO	Mini-circuit : Zx95-2705	Générer un signal RF dont la fréquence est proportionnelle à la tension présente en entrée.
Coupleur	Pulsar : CS20-05-436-10	Prélève une partie du signal RF (dépend de la valeur du couplage).
Amplificateur	Mini circuit : ZX60-3018G+	Amplifie le signal, caractérisé par son gain et son facteur de bruit.
Mélangeur	Pulsar : X2L-10-411	Composant à 2 entrées (LO et RF) et une sortie (FI). Réalise la fonction $F_{FI} = F_{LO} \pm F_{RF} $.
Antenne	Boite à « T »	Réalise la transition entre la propagation guidé et l'espace libre.
Isolateur		Protège le système contre la désadaptation de l'antenne d'émission

VCO

Maximum Ratings

Operating Temperature	-55°C to 85°C
Storage Temperature	-55°C to 100°C
Absolute Max. Supply Voltage (Vcc)	9.5V
Absolute Max. Tuning Voltage (Vtune)	12V
All specifications	50 ohm system

Permanent damage may occur if any of these limits are exceeded.

ZX95-2705+



Electrical Specifications

MODEL NO.	FREQ. (MHz)	POWER OUTPUT (dBm)	PHASE NOISE dBc/Hz SSB at offset frequencies, kHz Typ.	TUNING					NON HARMONIC SPURIOUS (dBc)	HARMONICS (dBc)	PULLING pk-pk @12 dBr (MHz)	PUSHING (MHz/V)	DC OPERATING POWER	
				VOLTAGE RANGE	SENSITIVITY	PORT CAP	3 dB MODULATION BANDWIDTH	(MHz)					(MHz/V)	(volts)
Min. Max.	Typ.	1 10 100 1000	Min. Max. Typ. Typ. Typ.	0.5 10 98-161 20	10 98-161	20 300	300	3 dB	Typ.	Typ. Max.	Typ.	Typ.	8.5	30
ZX95-2705+	1950 2705	+8.5	-64 -90 -112 -132	0.5 10 98-161 20	10 98-161	20 300	300	3 dB	-90	-29 -15	18	3	8.5	30

Fréquence = 2400MHz
Puissance P_{VCO} = 8.5dBm

Coupleur

SPECIFICATIONS

Frequency Range:	2.0 - 4.0 GHz
Coupling:	20.0 ± 1.25 dB
Insertion Loss ¹ :	0.20 dB Max
Coupling Flatness:	± 0.75 dB Max
Directivity:	22 dB Min
VSWR:	1.15:1 Max
Input Power ² :	50 Watts Max
Connector Type:	SMA

Notes:

1. Does not include coupling loss.
2. For load VSWR better than 1.20:1

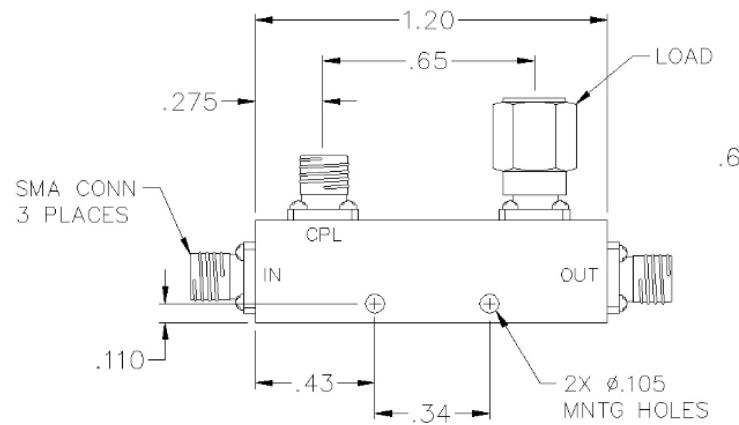
PULSAR MICROWAVE CORPORATION

DESCRIPTION :

Directional Coupler

MODEL NO. :

CS20-05-436/10



Couplage = 20dB
Pertes d'insertion = 0.2dB +0.04dB

Amplificateur

ZX60-3018G+

Maximum Ratings

Operating Temperature	-45°C to 85°C case
Storage Temperature	-55°C to 100°C
DC Voltage	12.5V
Input Power(no Damage)	13dBm
Power	0.7W

Permanent damage may occur if any of these limits are exceeded.



Electrical Specifications at $T_{AMB} = 25^\circ C$

MODEL NO.	FREQ. (GHz) $f_L - f_U$	DC VOLTAGE @ Pin V+ (V)	GAIN over frequency in GHz					MAXIMUM POWER (dBm) Output (1 dB Comp.) Typ. f_L f_U	DYNAMIC RANGE		VSWR (:1) Typ.	ACTIVE DIRECTIVITY (dB) Isolation-Gain Typ.	DC OPERATING CURRENT @ Pin V+ (mA) Typ. Max.		
			0.1	1.0	2.0	3.0	Min. at 2 GHz		NF (dB) Typ.	IP3 (dBm) Typ.	In				
ZX60-3018G+	0.02 - 3	12.0	22.8	21.9	20.3	18.8	18.0	12.8	10.2	2.7	25.0	1.3	1.4	2-6	34 45

G = 20 dB
P@1dB = 10 dBm
NF = 2.7dBm

Mélangeur

Electrical Specifications:

Frequency Range	
RFin/LO:	800 - 4000 MHz
IFout:	DC - 700 MHz
LO Drive Level:	+7 dBm
Conversion Loss:	9.0 dB Max.
Isolation	
LO/RFin:	25 dB Min.
LO/IFout:	20 dB Min.
1 dB Compression Point:	+1 dBm Typ.

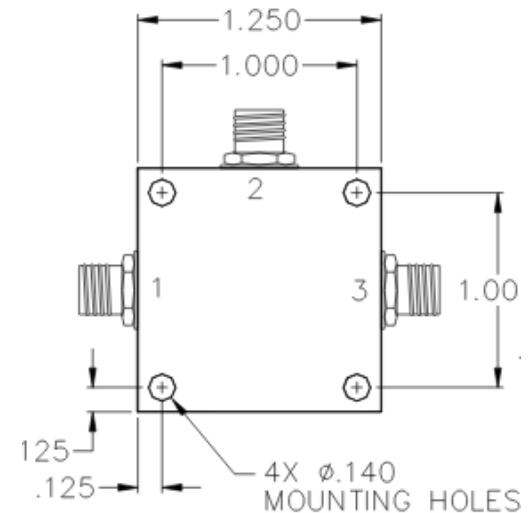
$$\text{Pertes de conversion} = 9 \text{ dB}$$

$$\text{NF} = 9 + 1 = 10 \text{ dB}$$

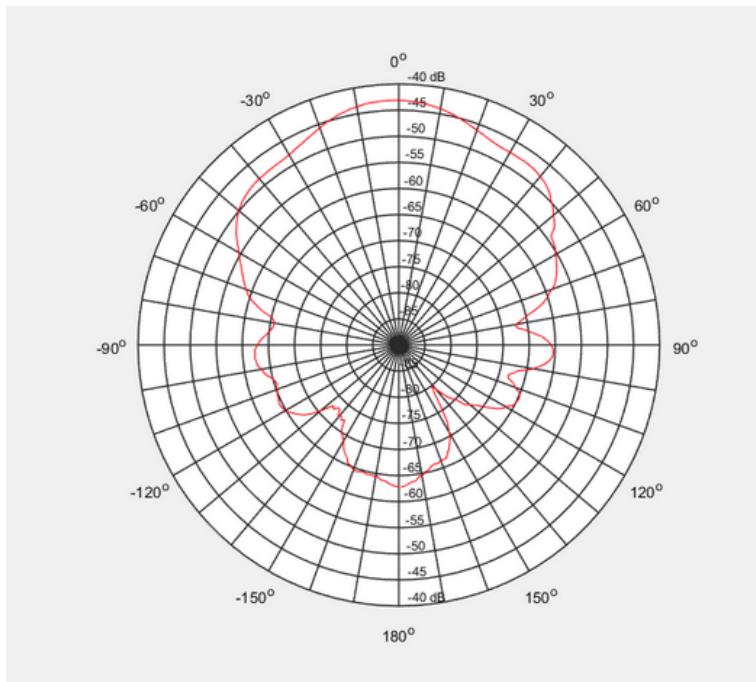
$$P_{\text{lo}} = 7 \text{ dBm}$$

Pulsar

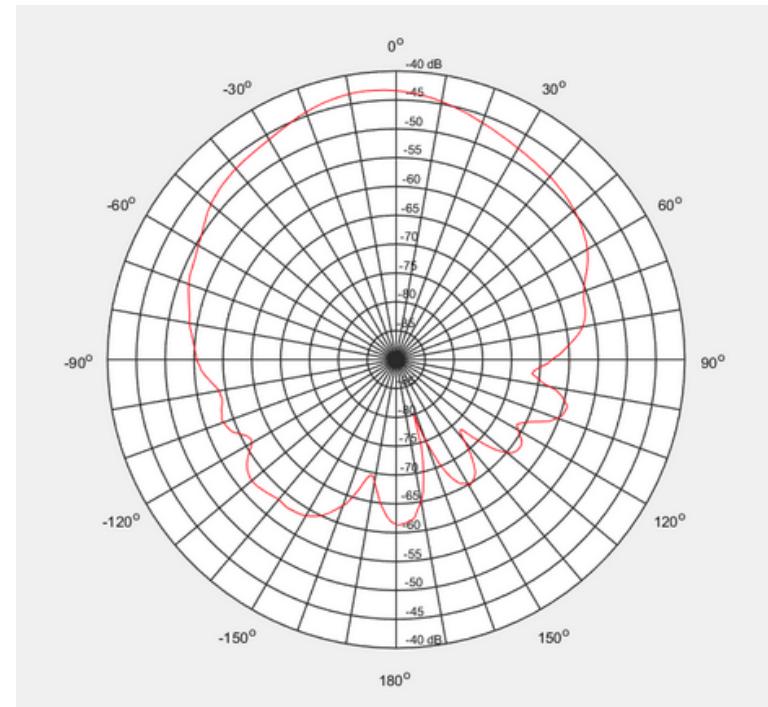
X2L-10-411



Antennes



Polarisation verticale



Polarisation horizontale

Gain estimé : 5dBi
ROS= X@2400MHZ
Bande = (ROS<2)

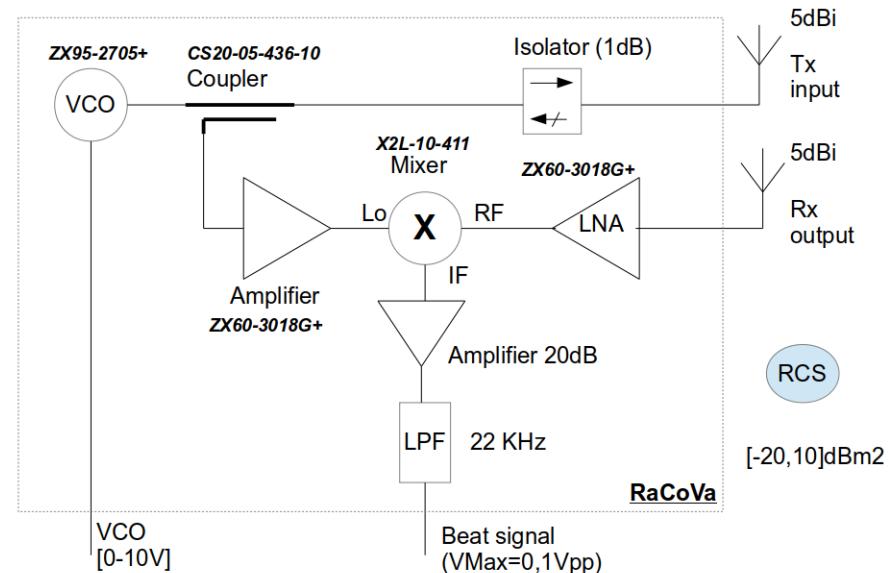
Analyse

$$IL_{cable} = 1\text{dB} \text{ (par câble)}$$

$$IL_{isolateur} = 1\text{dB}$$

Récepteur

- NF=14dB
- $P_{rmax} = -16\text{dBm}$ (50Ω)

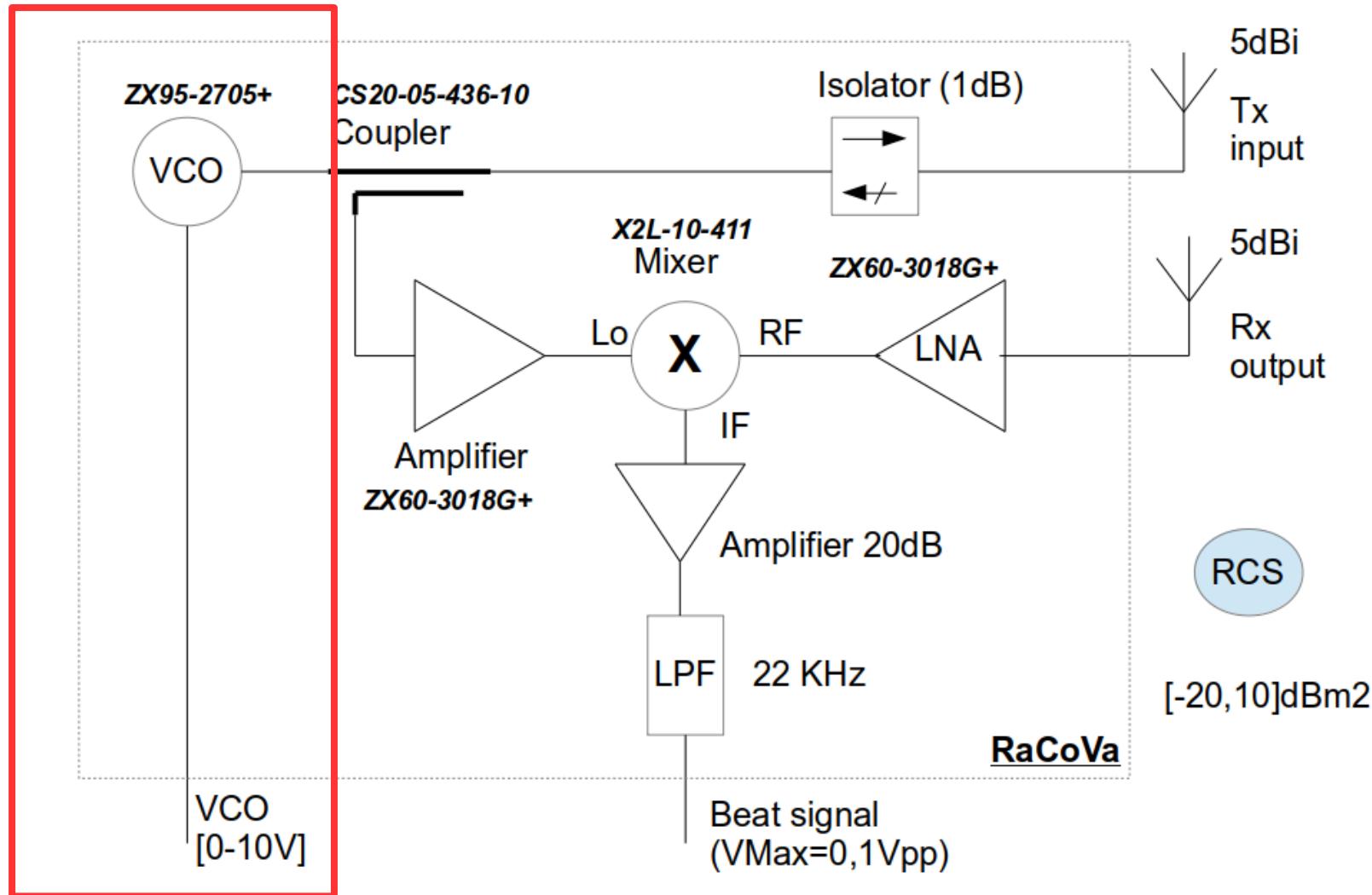


Freq (MHz)	P_{source} (dBm)	P_{Tx} (dBm)	P_{Rx} (dBm)	P_R (dBm)	P_s (dBm)	Dynamique SER (dB)
2400	8.5	6.3	-105	-74.7	-120	15

(1) P_s : sensibilité considérée au niveau du connecteur de l'antenne de réception (« le pied d'antenne ») pour un récepteur paramétré pour 1 kHz de bande passante finale, et sans moyennage et avec un rapport signal sur bruit de 10 dB (RSB = 10 dB).

(2) Dynamique SER : dynamique de niveau de puissance disponible, considérée en pied d'antenne, entre le niveau reçu pour une SER de 10 dBm2 (point haut de la dynamique) et la sensibilité définie à RSB = 10 dB (point bas de la dynamique),

Mode FMCW



Mode FMCW

- Mode Doppler : La fréquence du signal émis = cte → **ne permet pas de localiser** une cible.
- Mode FMCW : la fréquence du signal émis varie (modulation) → **permet de localiser** une cible

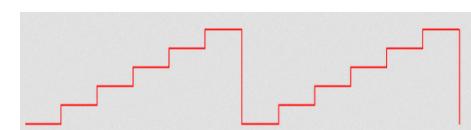
Tension de commande du VCO



Dent de scie

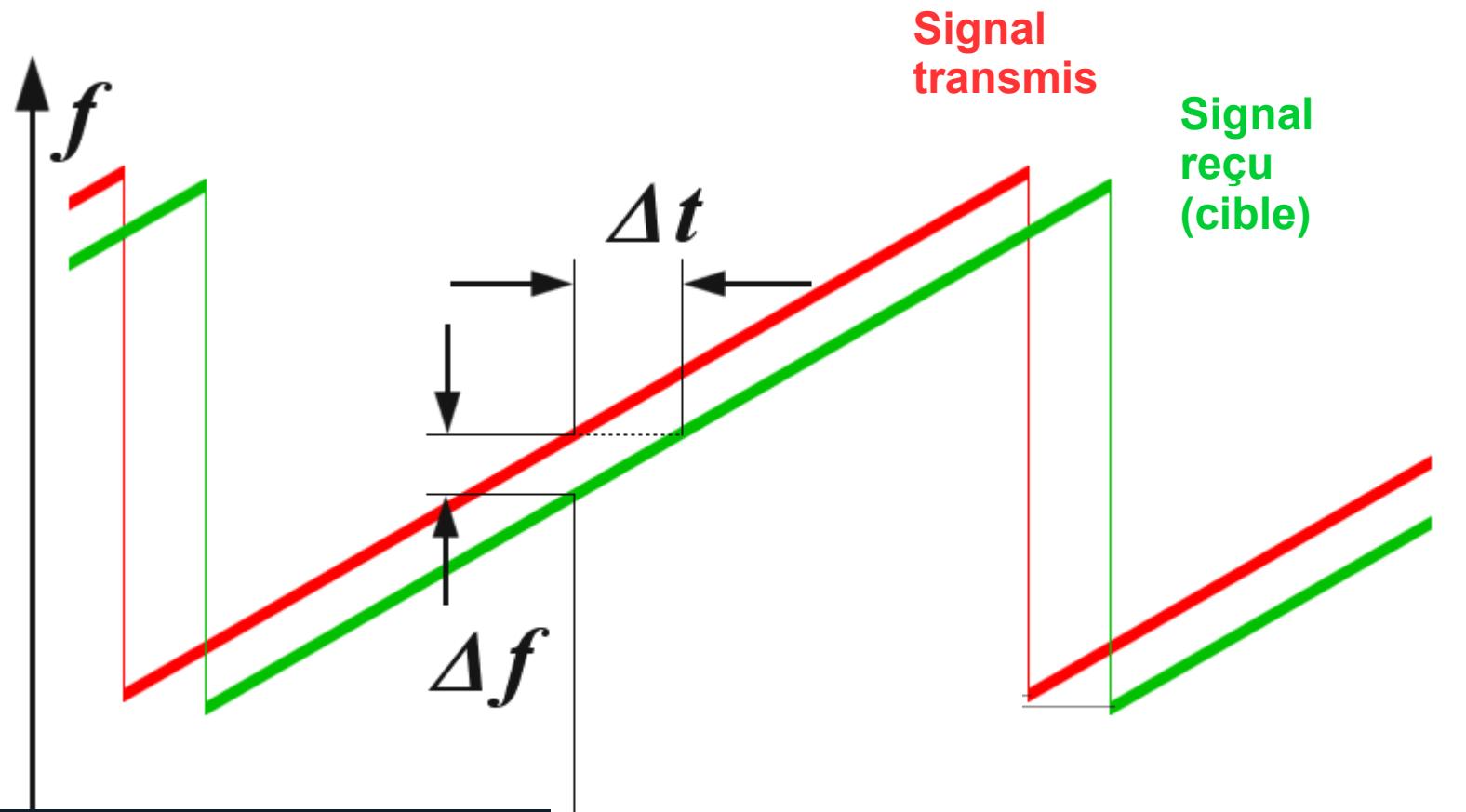


Triangle



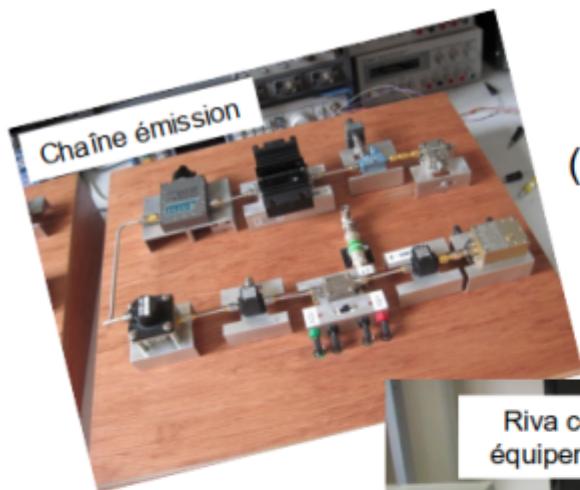
Step frequency

Mode FMCW : principe

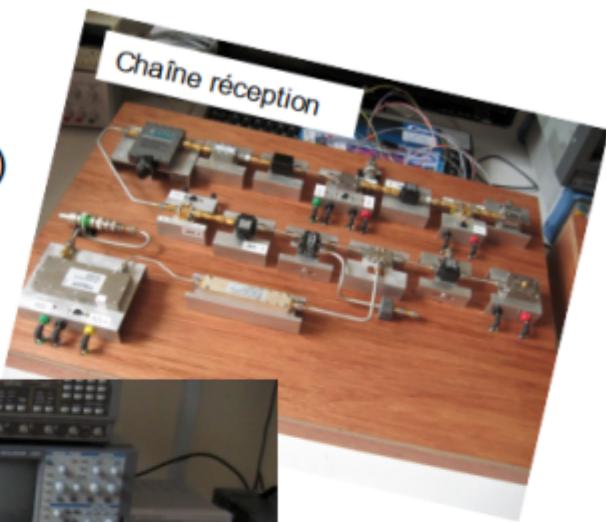


$$R = \frac{c_0 \cdot |\Delta t|}{2} = \frac{c_0 \cdot |\Delta f|}{2 \cdot (df/dt)}$$

Radar RIVA (Radar Impulsionnel Ville d'Avray)

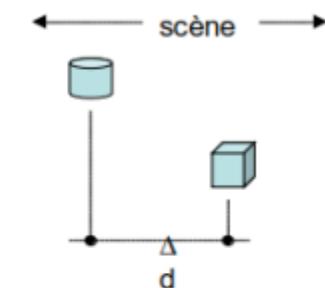
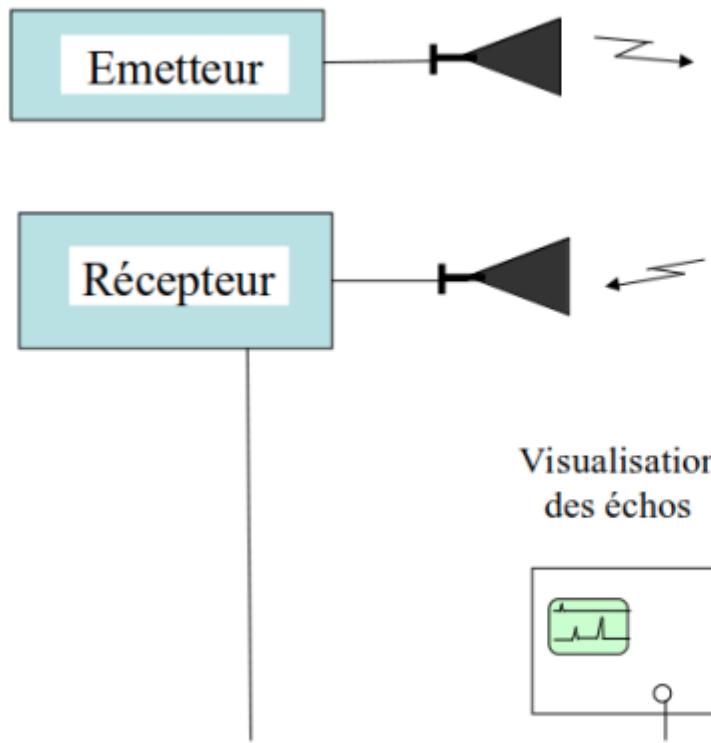


RIVA
(mise en œuvre labo)



Spécifications

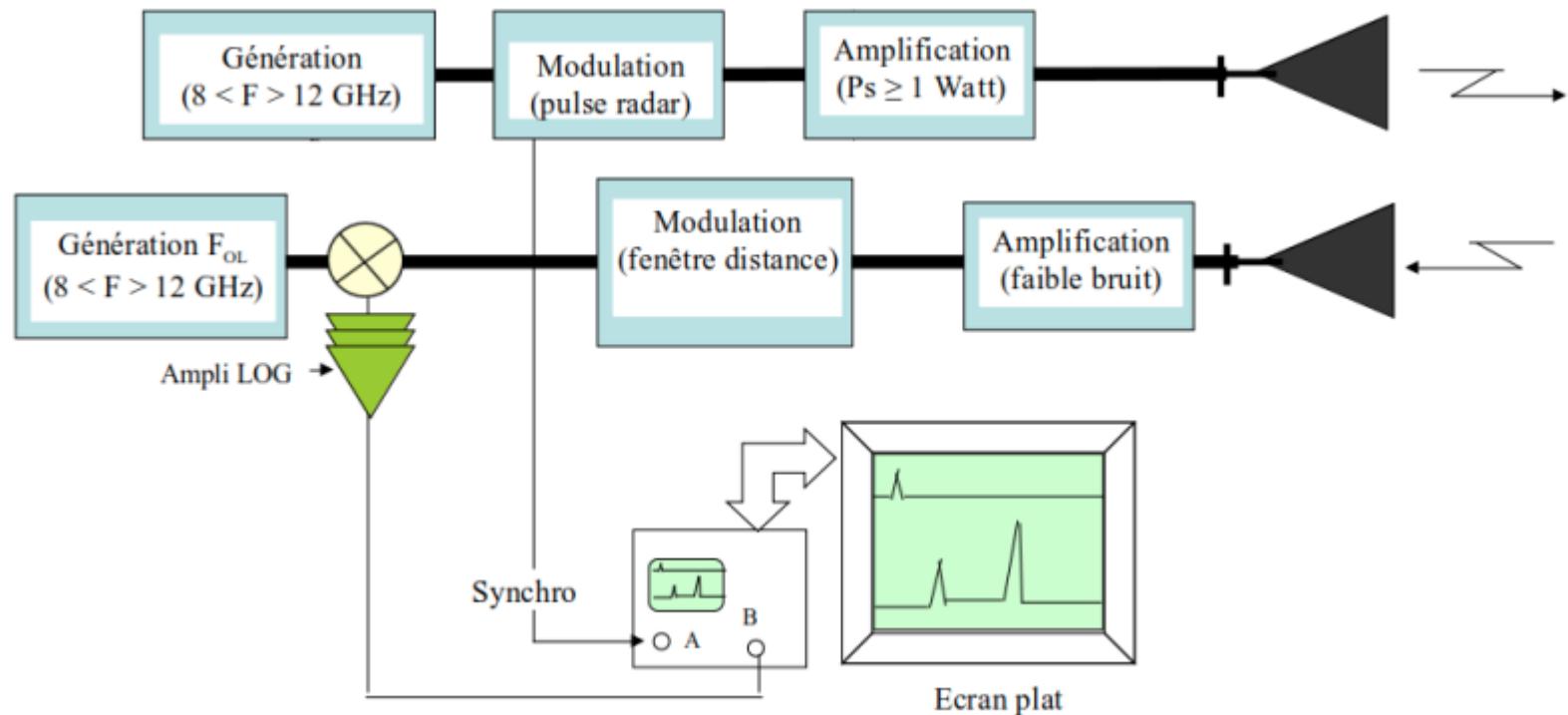
Cahier des charges



Détection:
dynamique ≥ 60 dB

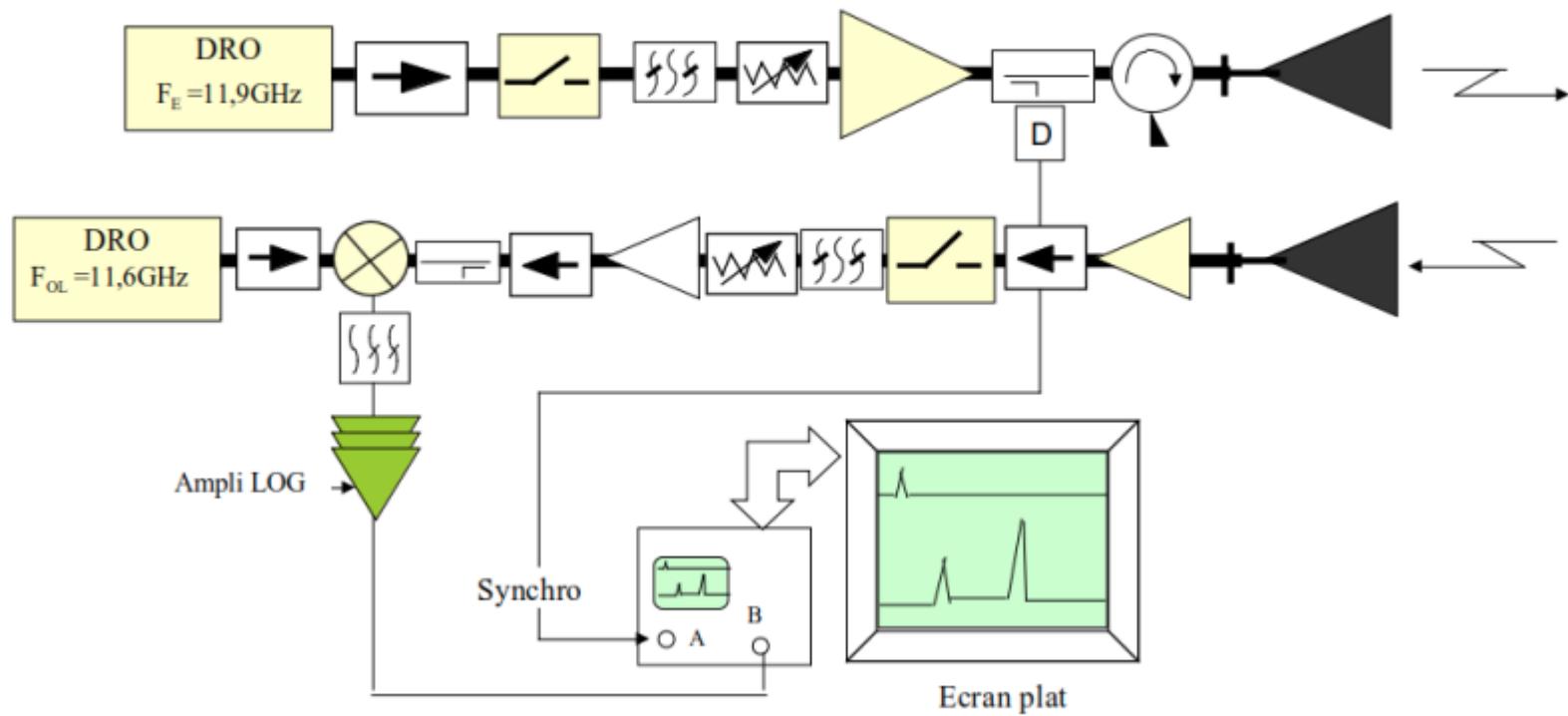
Résolution distance:
 $\Delta d \leq 3m$

Structure du système



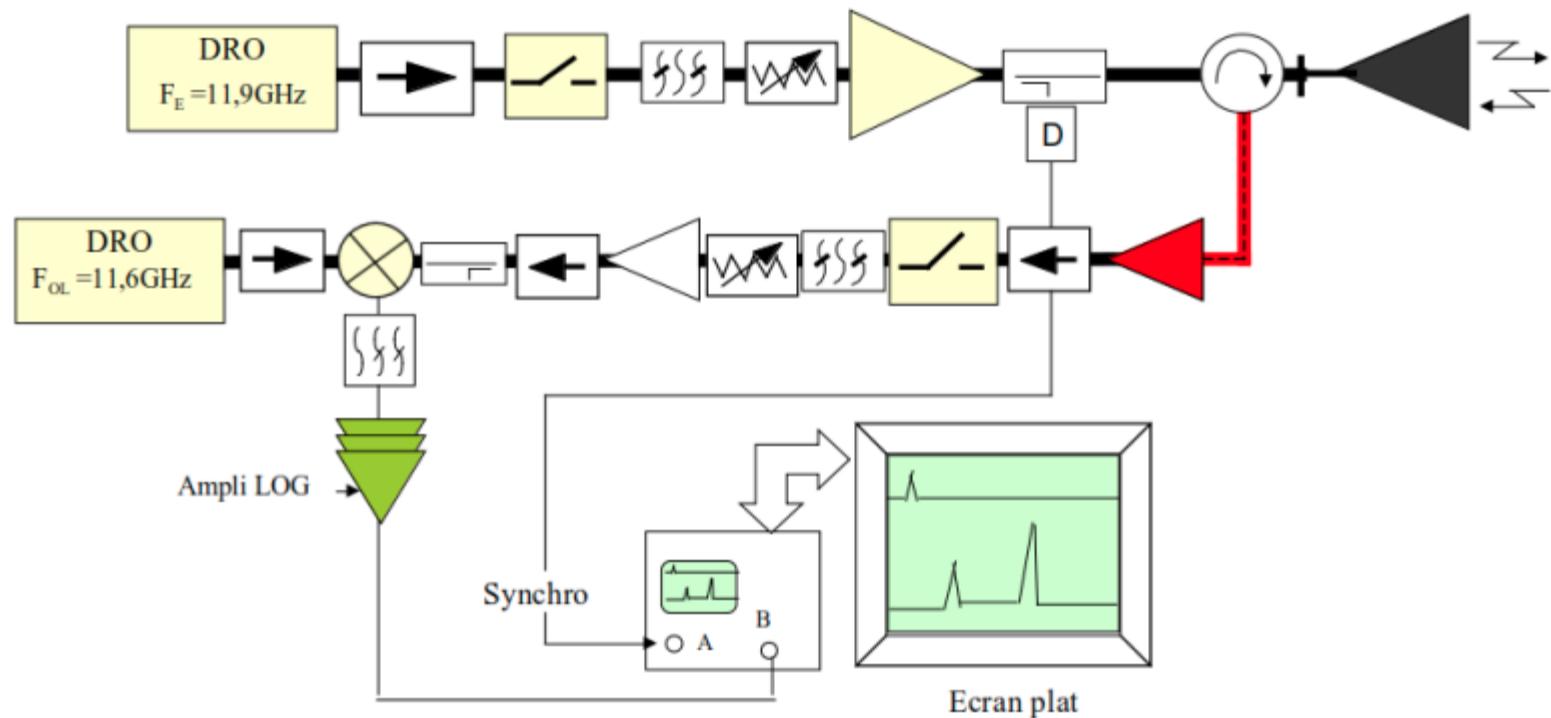
Mode quasi-monostatique

➤ Schéma complet (mode bistatique)



Mode monostatique

➤ Schéma complet (mode monostatique)



Justification des composants - Émission

➤ Justification des composants (chaîne émission)

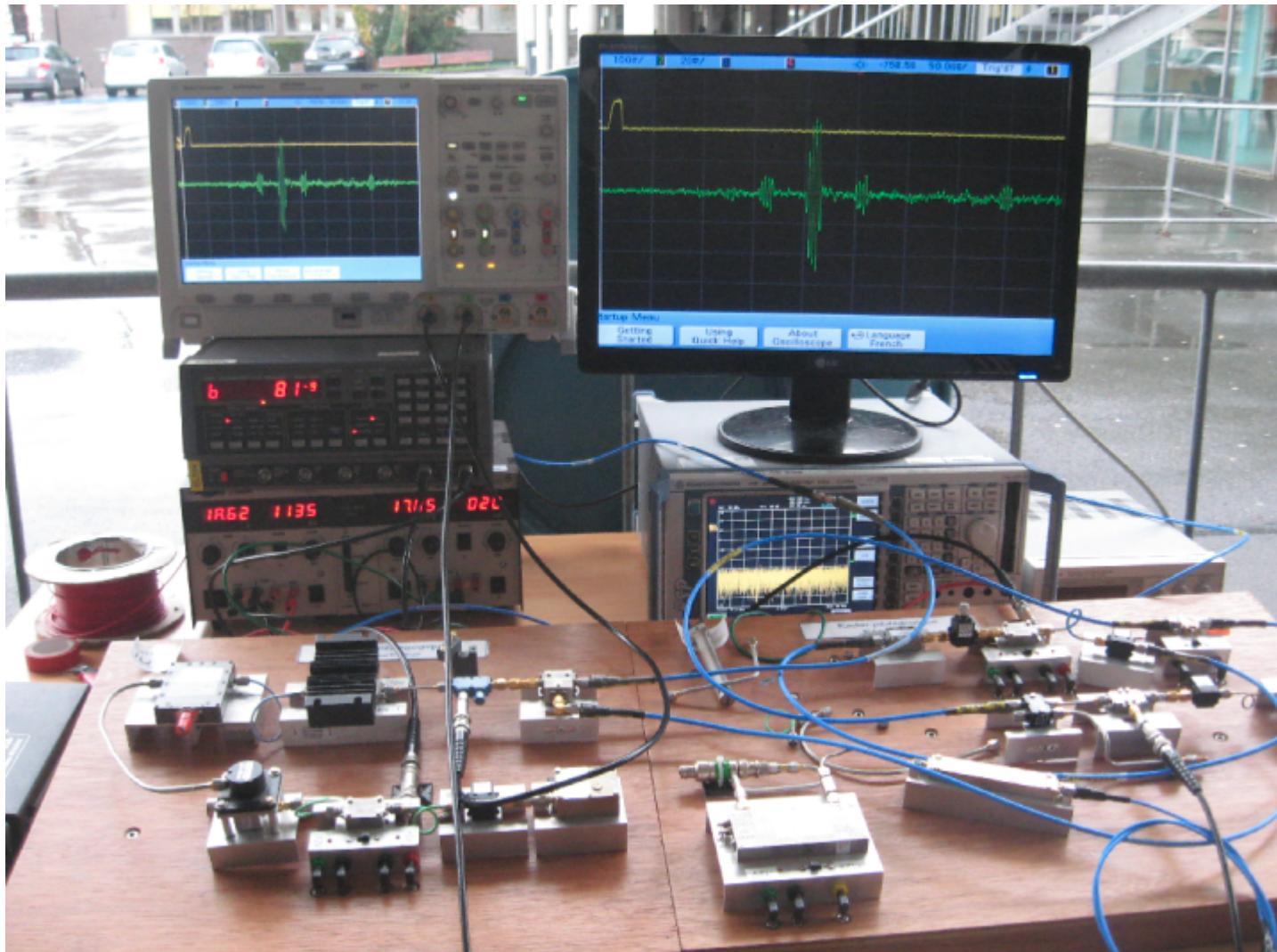
	Désignation	Rôle
E1	DRO	par exemple à 11,9 GHz, pour une solution intégrée (sinon, générateur de labo)
E2	Isolateur	pas indispensable, assure un bon fonctionnement du DRO qui pourrait être sensible à un ROS moyen du switch
E3	switch SPST	fournit un pulse type radar à partir d'un signal CW et d'un signal de commande aux paramètres temporels du pulse à générer
E4	filtre	passe haut 2 GHz ou passe-bande 8-12 GHz, pour filtrer les fuites vidéo du switch
E5	atténuateur variable	calibré de préférence, permet d'ajuster si besoin le niveau d'attaque de l'ampli,
E6	ampli MP	capable de sortir un niveau de l'ordre du Watt @ 1dB (proche de l'état de l'art), bon compromis coût performance. Un gain de l'ordre de 30 dB est courant et permet, à partir d'une source ($P_s \approx 10 \text{ dBm}$) et d'un atténuateur variable à suivre, de placer le bon niveau au port d'entrée de l'ampli d'émission pour que celui-ci délivre 1 Watt en sortie.
E7	coupleur 20 dB	permet de disposer d'un point de « test » ou de « contrôle » du signal en fin de chaîne émission (niveau et/ou paramètres du pulse émis) associé par exemple à un détecteur sur la sortie couplage
E8	détecteur	Permet un affichage sur le scope de « l'enveloppe » du pulse émis; sa sortie video, connectée directement à une voie du scope, sera la référence « 0 » de la période (temps entre 2 pulses)
E9	circulateur/isolateur	circulateur avec le port 2 chargé → isolateur (adaptation ampli-antenne), ou circulateur pour fonctionnement en <u>Mode monostatique</u> : dans ce cas sortie 3 vers entrée de la chaîne réception

Justification des composants - Réception

➤ Justification des composants (chaîne réception en mode bistatique)

	Désignation	Rôle
R1	ampli FB_1	avec un gain min de 25 dB, et un FB < 3dB, garantit un FB correct de la chaîne réception
R2	isolateur	précaution, entre 2 composants (ampli et switch) aux ROS importants
R3	switch SPST	filtre temporellement le signal utile reçu grâce à un signal de commande aux paramètres temps bien choisis <u>Mode monostatique</u> : placé en tête de réception pour protéger l'ampli FB pendant le passage du signal émis
R4	filtre	passe haut 2 GHz ou passe-bande 8-12 GHz, pour filtrer les fuites vidéo du switch
R5	Atténuateur variable (optionnel)	<i>Placé devant le 2^{ème} ampli de la chaîne réception, il permet d'ajuster le niveau global de la chaîne réception en fonction du signal capté le plus fort (pour rester en régime linéaire)</i>
R6	Ampli FB_2 (optionnel)	<i>complète le 1^{er} ampli FB pour assurer la « remontée » en niveau des signaux captés « faibles » (ses caractéristiques peuvent être identiques à celle du 1^{er} ampli)</i>
R7	isolateur	précaution, entre 2 composants (ampli et mélangeur) aux ROS importants
R8	coupleur 3 dB	pour donner la possibilité de tester le signal en fin de chaîne réception en bande X, sans toucher au montage
R9	mélangeur	permet d'obtenir une FI (300 MHz ?) à partir du signal capté et d'un oscillateur local
R10	DRO	par exemple 11,6 GHz (ou générateur de labo)
R11	isolateur	précaution, pour un bon fonctionnement du DRO
R12	filtre passe-bas	pour ne garder que la FI et éliminer tous les autres produits de mélange (réjection à spécifier jusqu'à 12 GHz)
R13	Ampli log SDLVA	pour obtenir un pulse détecté avec une dynamique allant de 70 dB (0 à -70dBm), et visible sur un écran de scope (échelle de l'ordre de 100 mV / dB)

Mise œuvre



Mise œuvre

