

Noms – Prénoms :
GOMES GUERRA Anna Terra
BECKER Gonzalo

TP CAO : Simulation d'un radar automobile d'aide à la conduite

Dans la continuité du BE « Etude d'un radar automobile d'aide à la conduite », nous allons aborder ici la simulation orientée « système » avec le logiciel ADS de Keysight. Ce type de simulation permet de simuler la plateforme radar (radar, canal, cible et traitement) à partir de composants décrits sous forme de boîtes noires pour lesquelles il faut renseigner un certain nombre de paramètres (électriques, géométriques, ...).

Le radar étudié ici est composé d'un seul émetteur et d'un ou deux récepteurs et les formes d'onde générées (CW, FMCW, SAWTOOTH et FSK) vont permettre de déterminer les différents paramètres de la cible : vitesse, distance, angle en azimut.

Deux simulateurs sont utilisés conjointement (cosimulation) lors de la simulation du radar : DATA FLOW (DF) pour la simulation de données discrètes (avec ou sans référence au temps d'échantillonnage) et ENVELOPE (ENV) pour la simulation non-linéaire de signaux RF modulés décrits dans le domaine temporel pour l'enveloppe complexe (i.e. la modulation) et dans le domaine fréquentiel pour la porteuse RF. Des blocs spécifiques sont alors utilisés pour passer des données simulées du simulateur DF au simulateur ENV et réciproquement.

Le traitement des données sous ADS à l'issue de la simulation étant limité en termes de fonctions disponibles et d'écriture sous forme d'algorithme, celui-ci sera volontairement simplifié et consistera essentiellement à analyser les signaux obtenus en bande de base dans le domaine temporel et fréquentiel (spectre). Quelques équations simples permettront d'exploiter facilement les données affichées.

Le fichier à désarchiver via ADS (file/unarchive) en local sur le répertoire C:/temp ou D:/users se trouve sous MOODLE à la page de l'UE B. **Les réponses aux questions doivent être illustrées par vos résultats de simulation commentés.**

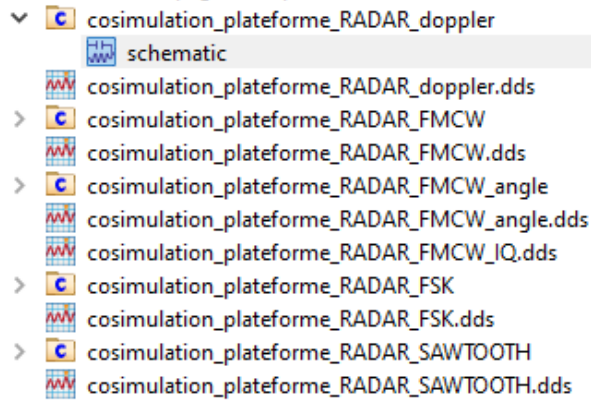
On respectera les limites des paramètres de la cible : distance < 200 m et $|v_r| < 180$ km/h lors du paramétrage des simulations.

NB : ne pas tenir compte des warnings qui s'affichent au moment de la simulation, toute chose étant correctement réglée par ailleurs...

3 séances de TP sont dédiées à la simulation des différentes plateformes : RADAR Doppler, RADAR FMCW et RADAR Sawtooth. La plateforme FSK pourra être abordée au cours de la dernière séance et sera finalisée en travail personnel qui sera évalué sur la base de ce document complété par vos résultats de simulations et commentaires associés.

Plateforme RADAR Doppler

- 1) Ouvrir le *schematic* « cosimulation_plateforme_RADAR_doppler » et analyser le schéma de simulation



- 2) Utiliser l'icône du bandeau supérieur



pour visualiser le contenu de la plateforme radar constituée de l'émetteur-récepteur RF, du canal et de la cible. Quelle est la tension appliquée au VCO ? En déduire la fréquence émise.

La tension appliquée au VCO est de 1V. Tenant en compte son sensibilité (50 MHz), on peut déduire la fréquence émise par le radar

Fréquence émise par le radar : $(f_{min} + (1V) \cdot f_{sensibilité}) * 4 = 76.7 \text{ GHz}$

- 3) Compléter le tableau ci-dessous à partir des paramètres des blocs constituant le radar.

paramètres	valeur	Unité
Fréquence du VCO (f_{VCO})	19.175	GHz
Rang de multiplication (N) de la fréquence	4	-
Fréquence RF (f_0) du signal émis	76.7	GHz
Gain de l'antenne (G_e) d'émission (Tx)	15	dBi
Puissance d'émission ($EIRP$)	20	dBm
Gain de l'antenne (G_r) de réception (Rx)	10	dBi
Gain du LNA (G_{LNA})	15	dB
Facteur de bruit du LNA (F_{LNA})	11	dB
Gain de conversion (G_{conv}) du mélangeur	7.5	dB
Facteur de bruit du mélangeur (F_{MX})	17	dB

Calculer le facteur de bruit de la chaîne de réception.

Facteur de bruit :

$$F = F_{LNA} + \frac{F_{MIXER} - 1}{G_{LNA}} \cong 11.5 \text{ dB}$$

- 4) Visualiser les contenus des blocs indiqués dans le tableau ci-dessous et Identifier leurs paramètres. Justifier la modélisation par ces différentes fonctions (on s'aidera de l'équation radar que l'on décomposera sous la forme : antenneTx -> propagation aller -> cible -> propagation retour -> antenneRx).

Elément	Modèle sous ADS	Paramètre(s) & Valeur(s)
<i>antenne_Tx_patch_gauss</i>	Amplificateur	Gain_max_dB = 15 DOD_deg = 0
<i>antenne_Rx_patch_gauss</i>	Amplificateur Source, resistance et power splitter pour le bruit	Gain_max_dB = 10 DOA_deg = teta_deg = 0 Frequency = 4 * F0 = 76.5GHz TantRX = 290
<i>CanalPropagation</i>	Attenuator, retard	Range = Target_range_m = 150m
<i>Target_xxx</i>		Velocity = Target_velocity_kmh = -130 km/h Frequency = 76.5 GHz SER: variable

Décomposition de l'équation radar associée au découpage fonctionnel sous ADS :

Il est possible de déduire l'équation radar :

$$P_{reçue} = \frac{P_e G_e G_r \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4}$$

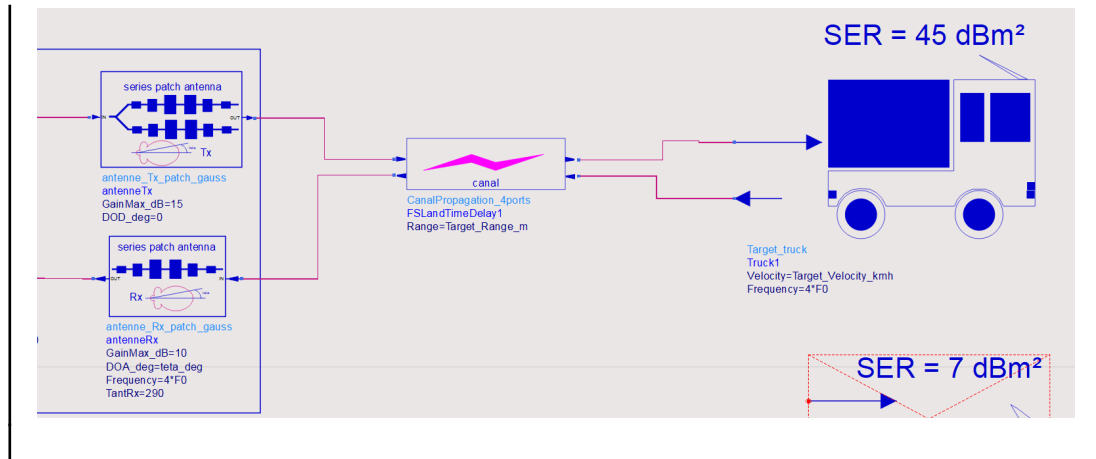
En échelle logarithmique,


$$P_{reçue} [dBm] = (P_e G_e)_{dBm} + (G_r)_{dB} + (\sigma)_{dBm2} - 20 \cdot \log \log (4\pi R^2) + 10 \cdot \log \log (A_{eff})$$

Où $A_{eff} = \frac{\lambda^2 G_r}{4\pi}$ est l'aire efficace de l'antenne, $EIRP = P_e G_e$ et $R = 150m$.

Alors,

$$P_{reçue} [dBm] = (20 + 10 + 45 - 109 - 49) \text{ dBm} = -93 \text{ dBm}$$



- 5) Revenir à la plateforme de simulation globale (retour par ) et identifier les paramètres de la simulation temporelle (durée, pas temporel) ainsi que ceux de la cible. Simuler (attendre patiemment 1 à 2 minutes...).

La durée est de 2 ms et le pas temporel de 0.25 us. La cible est à une distance de 150 m, avec une vitesse de -130 Km/h, impliquant qu'elle se rapproche au capteur a cette vélocité.

Parametres de la simulation/plateforme

D F

DF
DF2
DefaultNumericStart=0
DefaultNumericStop=50000
DefaultTimeStart=0 sec
DefaultTimeStop=Tstop sec

VAR
VAR_simu_DF
T_step=0.25e-6
Tstop=2e-03

VAR
VAR_simu_ENV
F0_osc=19.125 GHz
deltaF=50e6

VAR
INPUT_TARGET_PARAMETERS1
Target_Range_m=150
Target_Velocity_kmh=-130
teta_deg=0

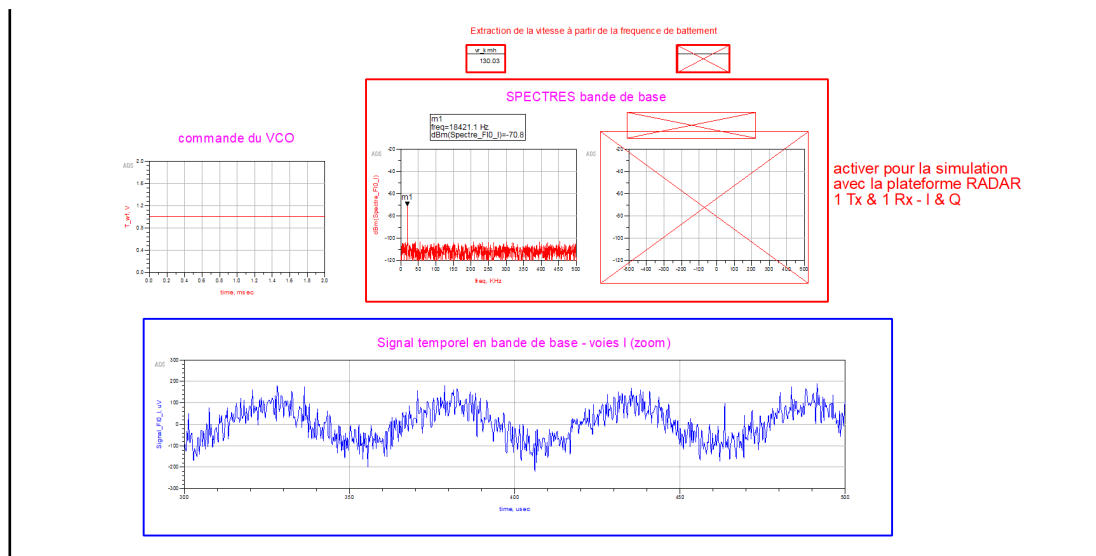
- 6) Dans la fenêtre d'affichage *DataDisplay*, examiner les données temporelles et spectrales affichées. Identifier le type de commande du VCO et le signal en bande de base. Comparer le niveau de la raie du spectre avec la valeur théorique (par le bilan de liaison). Commentaire.

La commande du VCO est un signal constant, et le signal en bande de base est approximativement sinusoïdal.

Le signal représenté dans la voie I, se correspond à une puissance égale à :

$$P_{re\grave{c}ue} + G_{LNA} + G_{conv} = -70.5 \text{ dBm}$$

Par conséquent, la puissance observé dans la simulation de -70.8 dBm, est cohérente.



- 7) Comment est calculée la vitesse de la cible (voir les équations sur la page « Equations » de cette même fenêtre d'affichage) ? Comparer à la valeur injectée dans la plateforme. Peut-on déterminer le signe de la fréquence Doppler (donc de la vitesse) ? Commentaire.

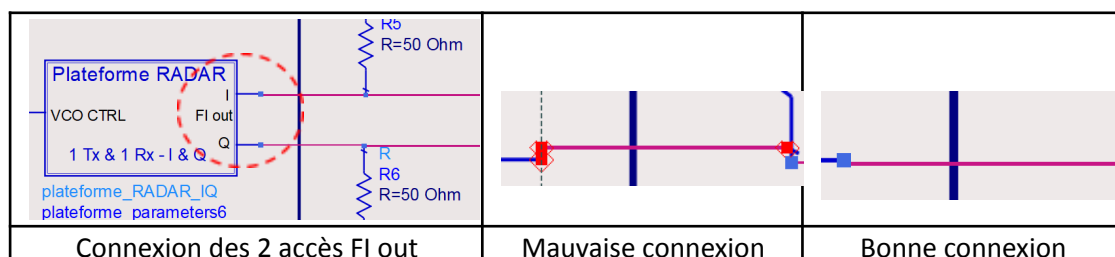
Pour une vitesse de 130 km/h, la fréquence de Doppler, f_d , obtenue devrait être :

$$f_d = \frac{2vf_0}{c} = 18.46 \text{ kHz}$$

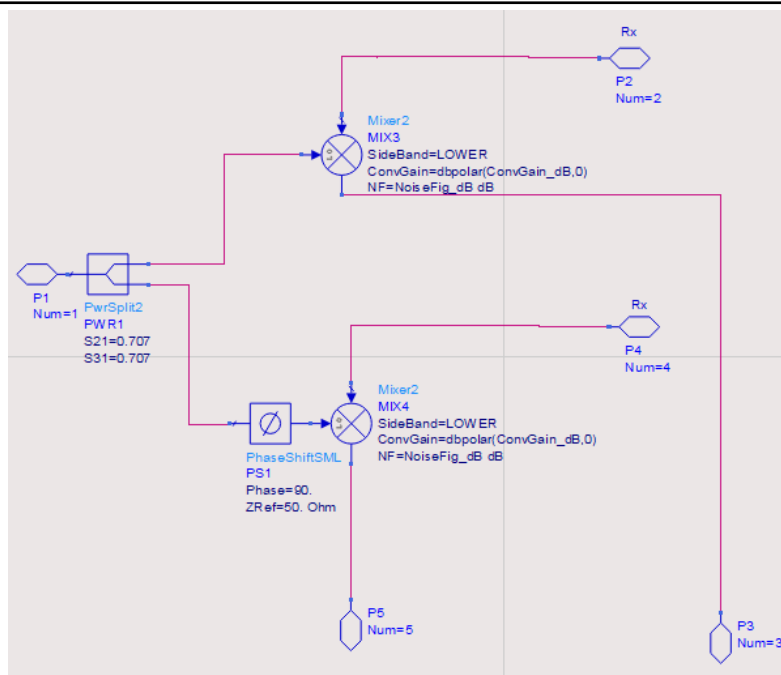
Il se observe donc une fréquence de 18.42 kHz dans le simulateur, soit un erreur percentuel d'à peu près 0.2%.

Il n'est pas possible de déterminer le signe, car le mélangeur calcule la différence entre les fréquences des 2 signaux d'entrée, sans distinguer lequel est le plus élevé.

- 8) Afin de déterminer automatiquement le signe de la fréquence Doppler un mélangeur I&Q est nécessaire en réception. Remplacer la plateforme RADAR en place par la « plateforme_RADAR_IQ » puis connecter les 2 sorties « FI out » après avoir activé tous les blocs désactivés. Vérifier la bonne connexion comme ci-dessous.



Visualiser le mélangeur I&Q dans la plateforme RADAR et identifier sa structure. Comment peut-on « agréger » les signaux I & Q après mélange pour n'obtenir qu'un seul signal ? Quelle est alors la nature de ce signal résultant ?




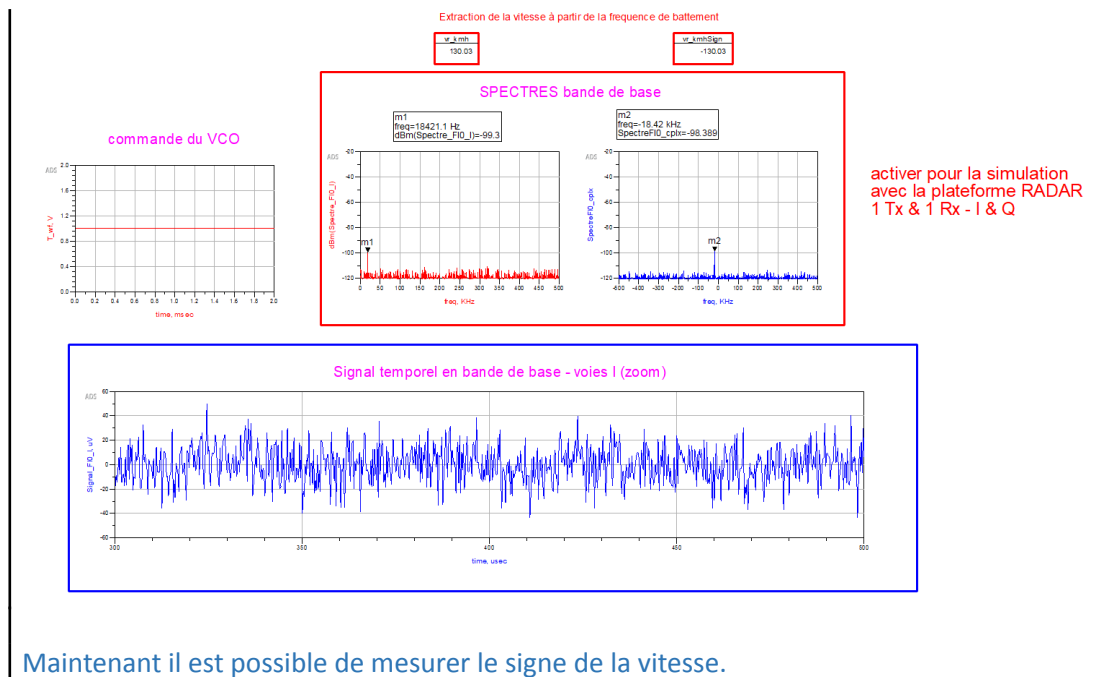
Il est possible d'ajouter les signaux I et Q de façon d'obtenir l'amplitude et la phase d'une signal réel, d'après les relations suivantes:

$$A = \sqrt{I^2 + Q^2}$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{Q}{I}\right)$$

de façon que le signal obtenu est $x(t) = \text{Re}\{Ae^{j\varphi}\}$

- 9) Simuler (1 à 2 minutes...). Dans la fenêtre d'affichage, activer  les blocs désactivés. Quelle est la différence avec la simulation précédente sans mélangeur I&Q ? Modifier vitesse de la cible (y compris le signe) et re-simuler. Commentaire.



- 10) Peut-on calculer la distance à partir des données affichées ? Justifier.

Seulement si $R \leq \lambda = 4 \text{ mm}$

C'est lié au changement de phase, qui peut s'observer seulement sur un période.

Plateforme RADAR FMCW

Afin de déterminer la distance de la cible, le VCO doit être modulé, par exemple en appliquant une commande en tension de type « Rampe de tension » pour obtenir une variation linéaire de la fréquence émise : Frequency Modulation Continuous Wave.

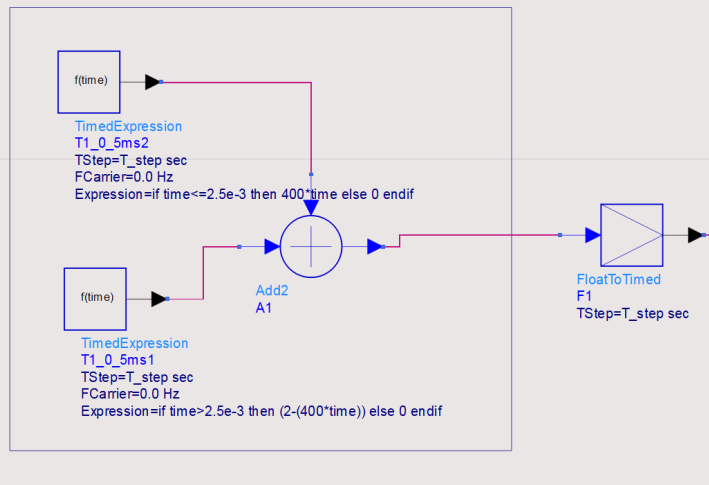
- 11) Fermer le *schematic* précédent et ouvrir le *schematic* « cosimulation_plateforme_RADAR_FMCW ». Analyser le schéma de simulation et en particulier la commande du VCO. Quels sont les paramètres de la modulation (durée, bande, nombre de rampes,...)

Nombre de rampes = 1

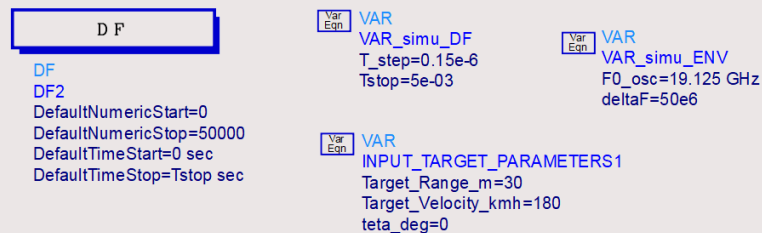
Durée = 5 ms

Bande = $4 \times 50 = 200 \text{ MHz}$

FMCW : Commande du VCO



Parametres de la simulation/plateforme



Pour la suite, on doit modifier le paramètre T_{step} en fonction de la distance D de la cible à détecter afin que le retard (delay) τ du modèle de canal soit un multiple entier de ce dernier. On a donc : $D = c * \tau = c * n * T_{\text{step}} = 300 * n * T_{\text{step}}(\mu\text{s})$, ce qui donne le tableau suivant :

$T_{\text{step}} (\mu\text{s})$	Distance D (m)
0.30	$n \times 90$
0.25	$n \times 75$
0.20	$n \times 60$
0.15	$n \times 45$
0.10	$n \times 30$
0.05	$n \times 15$
0.01	$n \times 3$

NB : plus T_{step} est petit, plus le temps de simulation augmente et devient « prohibitif » (> 10 mn). Par ailleurs, la modification de ce paramètre impacte directement la bande d'analyse en fréquence et donc les fréquences maximales (de battement et Doppler) exploitables respectant le théorème de Shannon (i.e. sans repliement de spectre).

12) La plateforme RADAR contient un mélangeur simple dans un premier temps. Simuler et analyser les données affichées à l'issue de la simulation. Vérifier la distance et la vitesse affichée. Pourquoi les paramètres distance/vitesse sont-ils calculés correctement (voir page « equations ») ? Commentaire.

Cible : **Camion**

Vitesse : 180,24 km/h

Distance : 202,79 m

$T_{step} = 0,15 \mu s$

$f_{beatUp} = \text{indep}(m1)$

$f_{beatDwn} = \text{indep}(m2)$

$\text{index_fbeatUp} = \text{find_index}(\text{Spectre_FI0_up_I.DF.freq}, f_{beatUp})$

$\text{index_fbeatDwn} = \text{find_index}(\text{Spectre_FI0_up_I.DF.freq}, f_{beatDwn})$

$\text{Distance} = -T_{stop} * 3e8 * (f_{beatUp} - f_{beatDwn}) / (8 * (N_{mult} * \Delta F))$

$v_{r_kmh} = (3e8 * (f_{beatUp} + f_{beatDwn}) / (4 * (N_{mult} * F0_{osc}))) * 3.6$

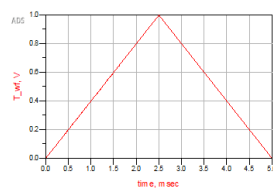
NB : facteur 4 car $F0_{osc} = 19.125 \text{ GHz}$ et ΔF du VCO

$N_{mult} = 4$

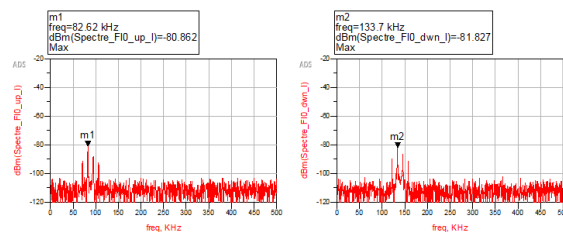
Extraction de la distance et de la vitesse à partir des fréquences de battement

Distance	v_r km/h	f_{beatUp}	$f_{beatDwn}$
202.79	180.24	-82622.88	133691.25

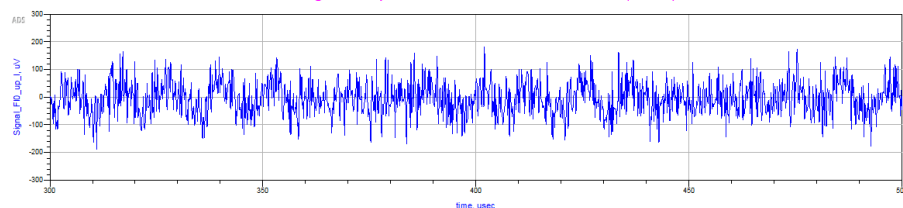
commande du VCO



SPECTRES bande de base : rampes UP & DOWN

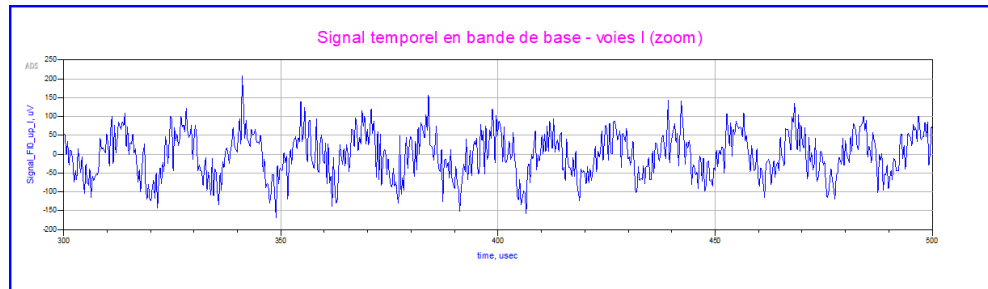
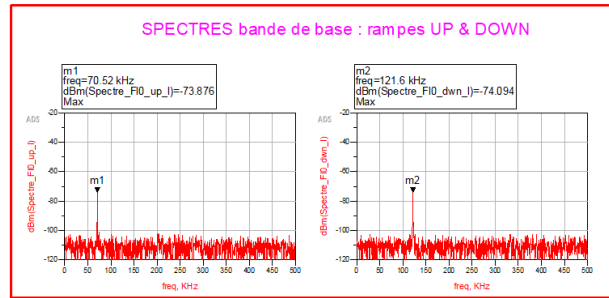
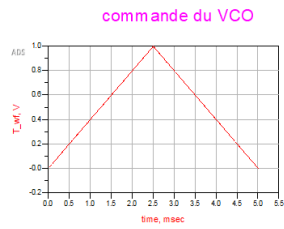


Signal temporel en bande de base - voies I (zoom)



Extraction de la distance et de la vitesse à partir des fréquences de battement

Distance	vr_kmh	fbeatUp	fbeatDwn
180.08	180.17	-70518.89	121566.15



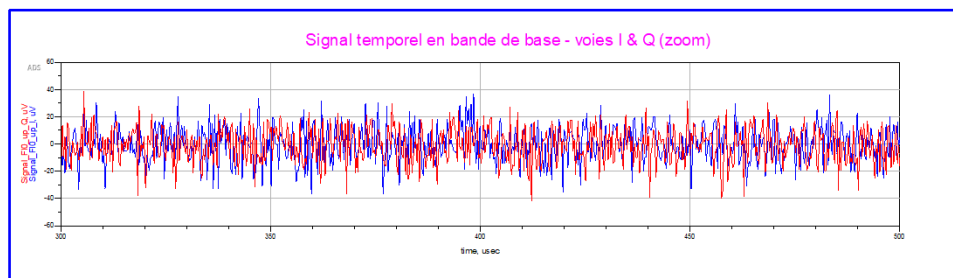
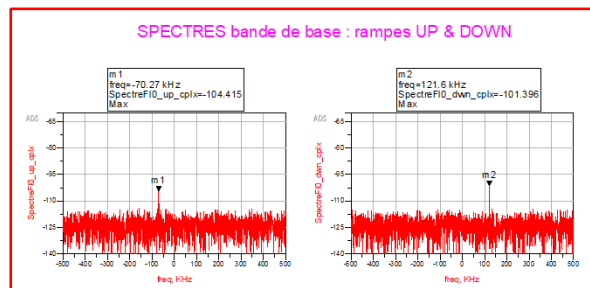
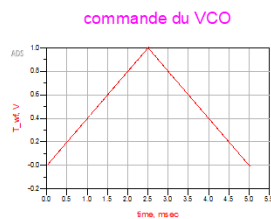
Comme nous sommes sûrs que la fréquence de l'un des spectres est négative et on rajoute le signe, les calculs sont effectués correctement.

- 13) Pour obtenir sans « artifice » la bonne valeur des paramètres, il faut à nouveau un mélangeur I&Q. Remplacer la plateforme RADAR en place par la plateforme RADAR I&Q puis connecter les 2 sorties « FI out » après avoir activé tous les blocs désactivés.

Dans le menu *Simulate/Simulation Settings*, modifier le nom du **datadisplay** en « cosimulation_plateforme_RADAR_FMCW_IQ ». Simuler et analyser les résultats affichés. Commentaire.

Extraction de la distance et de la vitesse à partir des fréquences de battement

Distance	vr_kmh	fbeatUp	fbeatDwn
179.94	181.06	-70298.88	121566.15



A partir des données obtenues, nous avons pu calculer la distance et la vitesse (positive ou négative) de manière plus directe.

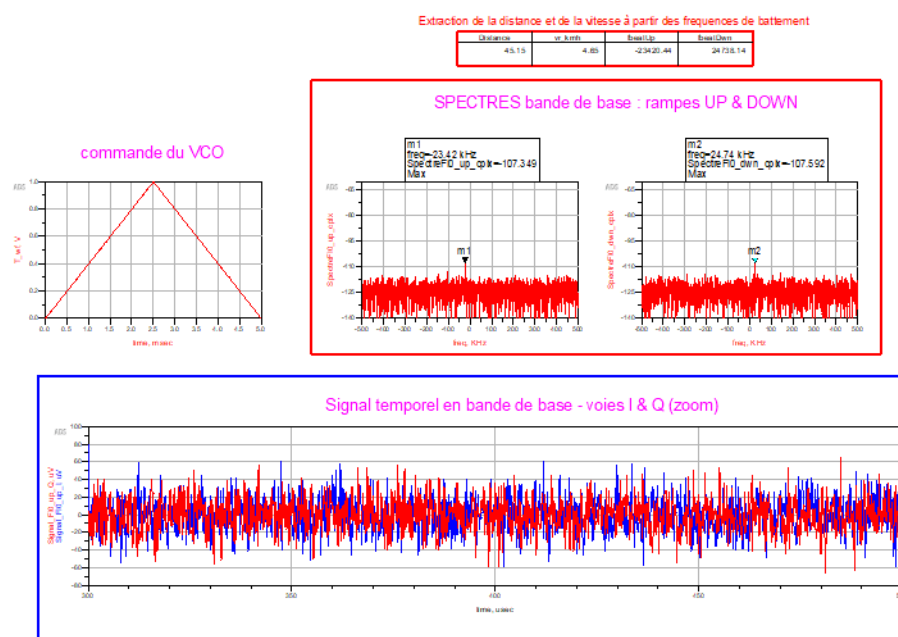
- 14) Tester un piéton à plus et moins de 50 m en respectant la contrainte de simulation indiquée ci-dessus. Commentaire.

Première simulation (moins de 50 m):

Distance : 45, 15 m

Vitesse : 4, 65 km/h

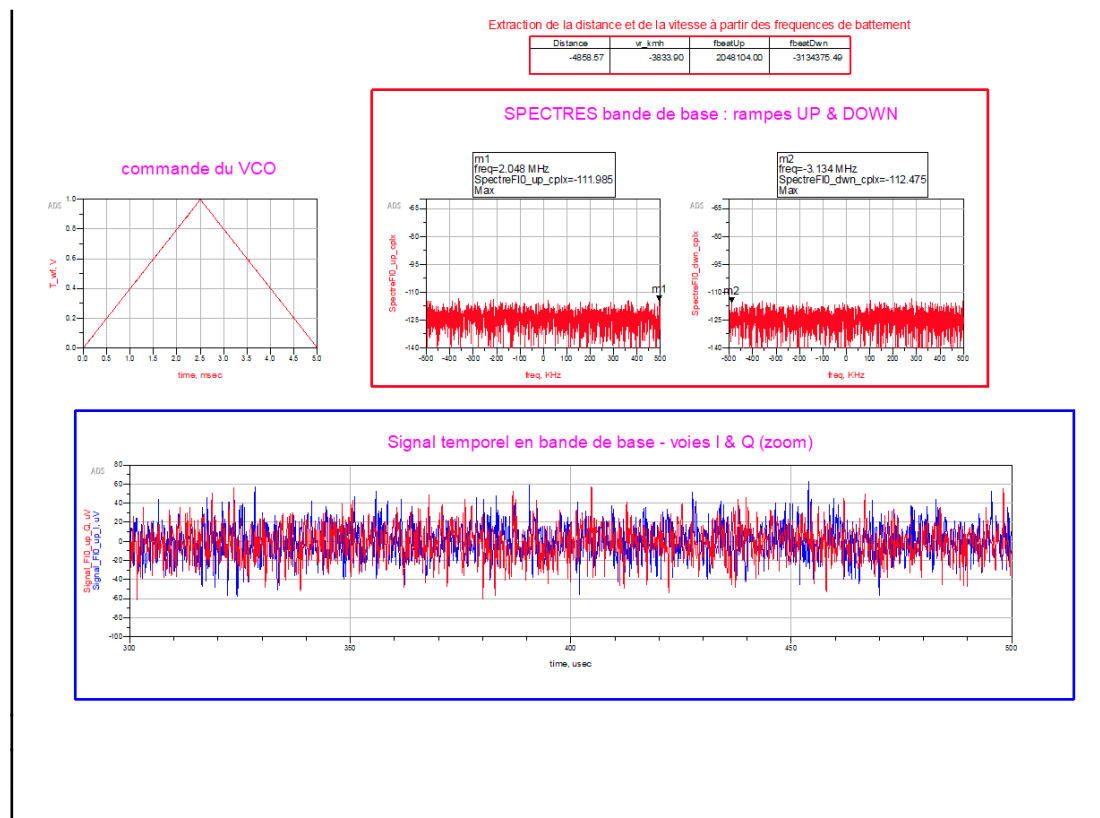
$T_{step} = 0,15 \mu s$



Deuxième simulation (plus de 50 m):

Distance : Indétectable

Vitesse : Indétectable

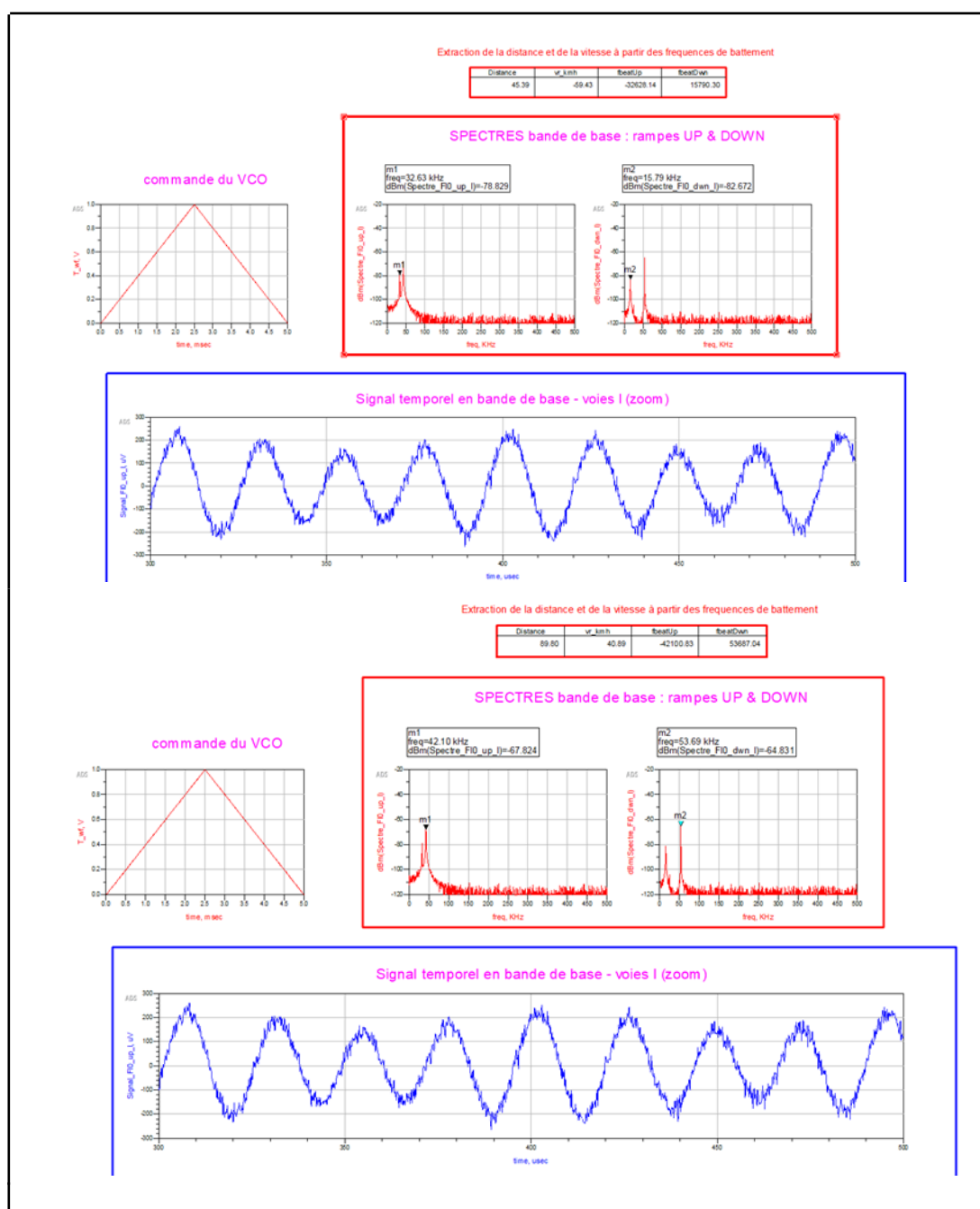


- 15) Remplacer la plateforme RADAR I&Q active par la plateforme désactivée nommée « Plateforme_RADAR_IQ_multicibles ». Activer-la et désactiver celle remplacée.

Visualiser le contenu de la plateforme_RADAR, choisir les 3 cibles (copier/coller si besoin un même type de cible) et renseigner leurs vitesse/distance.

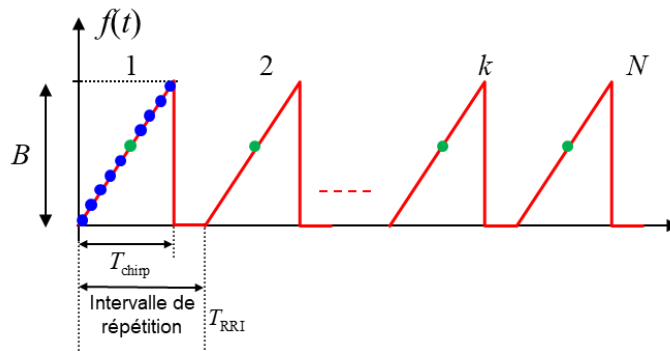
Modifier le paramètre T_{step} pour qu'il respecte la contrainte indiquée précédemment. Simuler et analyser les résultats. Quel est le problème à traiter dans cette situation (déplacer les marqueurs sur les différentes raies) ? Sur quel critère peut-on a priori associer les raies fbeatUp et fbeatDwn pour obtenir les bons couples (distance,vitesse) ?

Cibles choisies	Distance	Vitesse
Personne	45	5
Simulation :	Non détectable	Non détectable
Voiture	90	40
Simulation :	89,80	40,89
Camion	45	-60
Simulation :	45,39	-59,43



Plateforme RADAR SAWTOOTH

La forme d'onde SAWTOOTH est très proche de la FMCW à la différence près qu'elle consiste à générer une rampe montante qui constitue le motif de base qui sera répété N fois (trame), comme cela est rappelé ci-dessous (voir cours « Formes d'ondes et traitement »). Le signal reçu en bande de base est échantillonné à raison de M échantillons par rampe x N rampes. Les MxN échantillons sont alors agencés en une matrice MxN de façon à réaliser une FFT 2D.



Le traitement implémenté sous ADS est volontairement simplifié (pas de FFT 2D). Les échantillons prélevés sur une rampe quelconque permettent d'obtenir par FFT la fréquence de battement qui donne directement la distance si la durée T_{chirp} est très courte. En prenant ensuite un échantillon par rampe sur les N rampes et par FFT on obtient la fréquence Doppler qui permet de calculer la vitesse.

- 16) Fermer le *schematic* précédent et ouvrir le *schematic* « *cosimulation_plateforme_RADAR_SAWTOOTH* ».
Analyser le schéma de simulation et en particulier la commande du VCO. Identifier les paramètres de la modulation (durée de la trame, du chirp, bande, nombre de rampes, nombre d'échantillons par rampe, ...).

Du chirp: $T_{chirp} = 256 \times 0,1E^{-6}$
 Durée de la trame: $T_{trame} = 128 \times T_{chirp}$
 Bande: $4 \times 24 = 96 \text{ MHz}$
 Nombre de rampes: 128
 Nombre d'échantillons par rampe: 256

Parametres de la simulation/plateforme

DF

DF3
DefaultNumericStart=0
DefaultNumericStop=500
DefaultTimeStart=0 sec
DefaultTimeStop=T_trame sec

VAR4

T_step=0.1e-6
Nbsample=256
T_trame=128*Tchirp
Tchirp=Nbsample*T_step
deltaF=24 MHz

VAR1

F0_osc=19.125 GHz

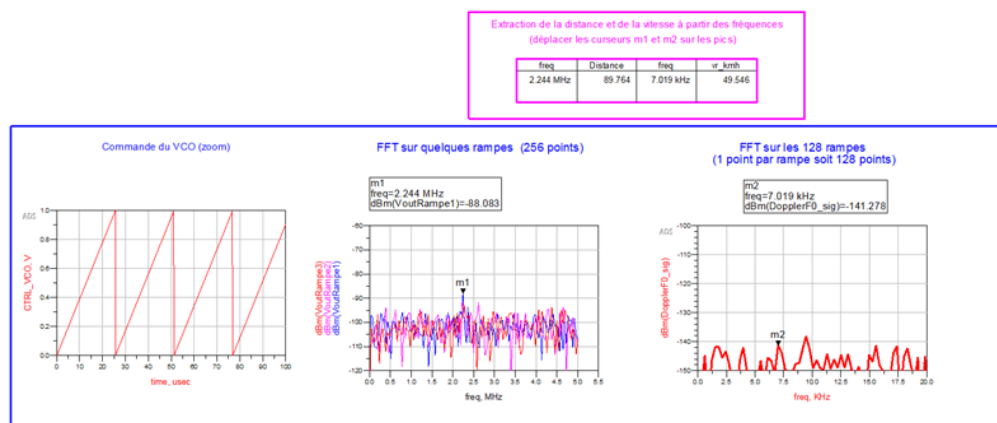
VAR

INPUT_TARGET_PARAMETERS1
Target_Range_m=90
Target_Velocity_kmh=50
teta_deg=0

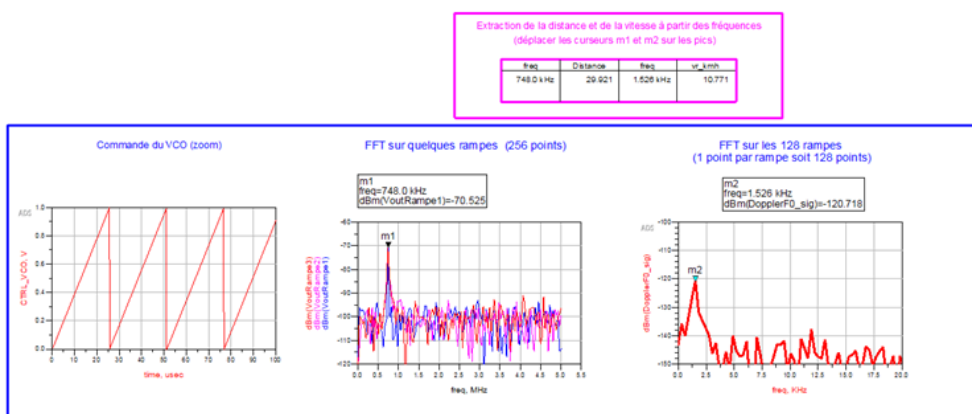
deltaF : Bande de modulation de l'OL à F0_osc => x4 à 77 GHz = B

- 17) Simuler et analyser les résultats de simulation pour différentes cibles.

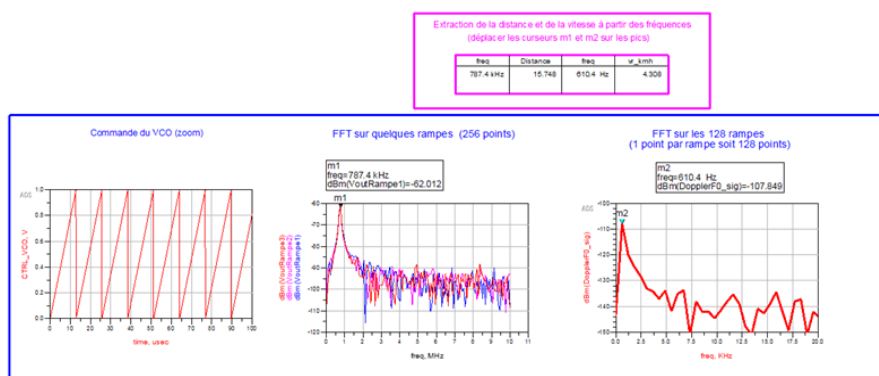
Cible : voiture
 Vitesse : 50 km/h
 Distance : 90 m



Cible : voiture
Vitesse : 10 km/h
Distance : 30 m



Cible : voiture
Vitesse : 5 km/h
Distance : 15 m



Pour une même cible, on observe que l'intensité du signal reçue augmente considérablement quand on augmente la distance.

- 18) Quelle est la résolution en distance ? en vitesse ? Quelle vitesse maximale peut-on détecter correctement avec les paramètres donnés ? Justifier à partir des valeurs théoriques

$$\Delta R = \frac{c}{2B} = 1.5625m$$

$$\Delta v = \frac{c}{2f_0 NT_{chirp}} = 0.6 m/s = 2.16 km/h$$

La résolution de la distance et la vitesse théoriques sont en accord avec les valeurs simulées.

$$T_{chirp} = 256 \times T_{step} = 25.6 us$$

$$\Delta f = \frac{1}{NT_{chirp}} = 305.17 Hz$$

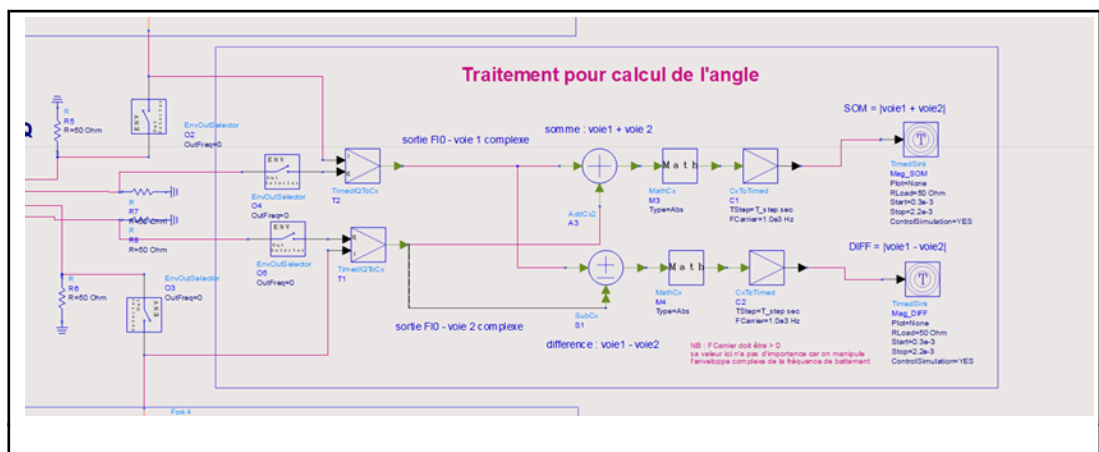
$$f_{doppler-max} = \frac{2f_0 v_{max}}{c} = \frac{1}{2T_{chirp}} = 19531.25 Hz$$

$$v_{max} = 38.2 m/s = 137.5 km/h$$

Détermination de l'angle de la cible (en azimuth) (plateforme FMCW)

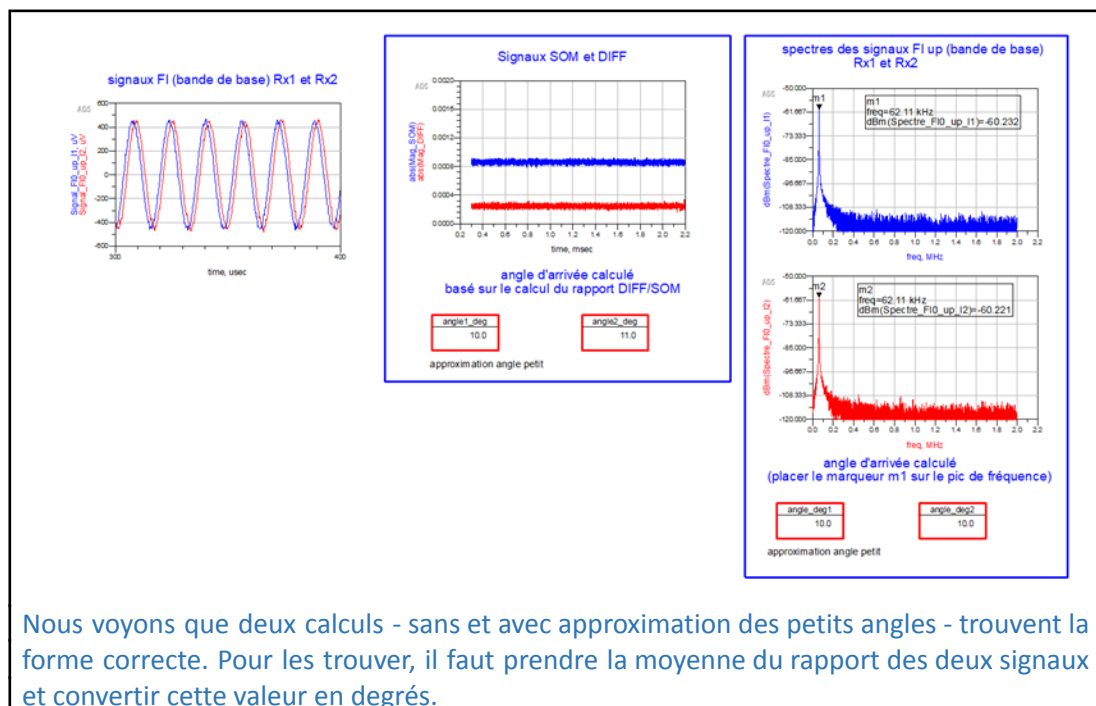
On s'aidera du principe vu en cours sur le calcul de l'angle par la mesure de différence et de la somme des signaux temporels.

- 19) Fermer le *schematic* précédent et ouvrir le *schematic* « cosimulation_plateforme_RADAR_FMCW_angle » ainsi que la plateforme RADAR : Plateforme_RADAR_IQ_angle. Analyser le schéma de simulation et en particulier le traitement effectué sur les signaux en bande de base.



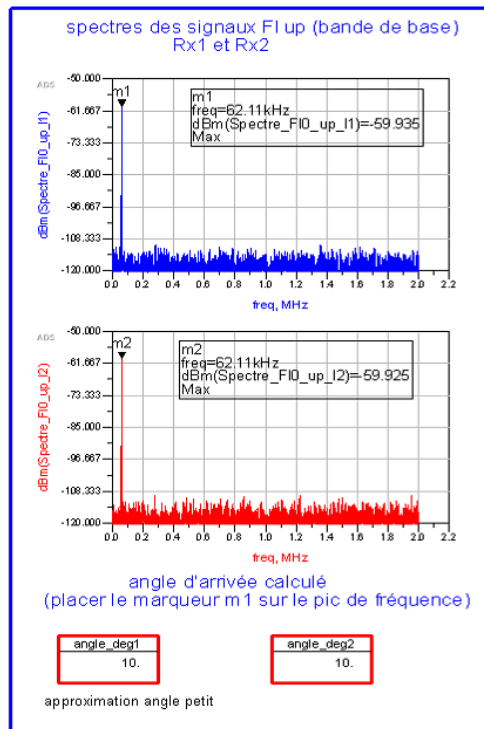
Dans le schéma représenté, nous observons qu'à la sortie de la plateforme RADAR le schematic trouve le spectre pour la voie I de chaque récepteur et pour chaque partie de la modulation du VCO (up et down) ainsi que l'évolution temporelle des signaux pour qu'ils soient affichés. Puis il y a un traitement des signaux en bande de base des deux récepteurs afin de calculer l'angle d'arrivée. Tout d'abord, à partir des deux voies on construit le signal analytique ($I+jQ$). Ensuite, on fait la somme ainsi que la différence des deux signaux.

- 20) Simuler pour un angle d'arrivée DOA_deg = 10° et analyser les résultats dans la fenêtre *DataDisplay* obtenus par traitement des signaux DIFF et SOM.

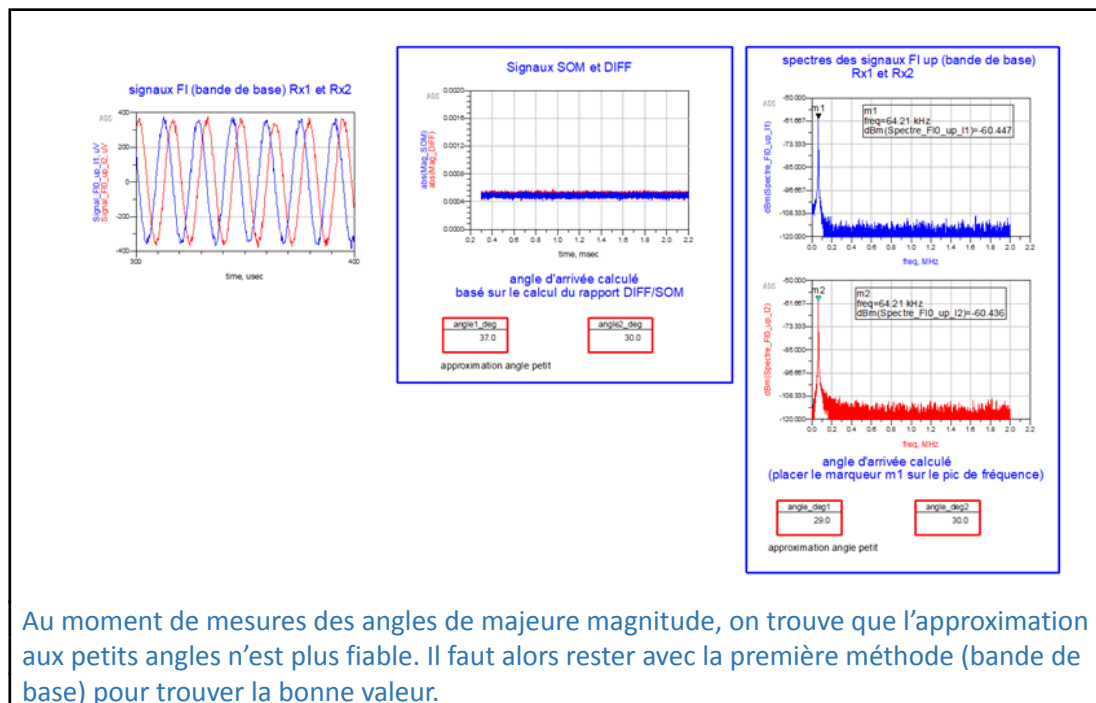


- 21) Comparer ce calcul avec celui utilisant les spectres des signaux en bande de base et la détection des raies (voir page « equations » du *DataDisplay*).

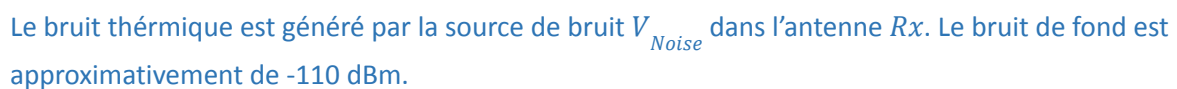
Les calculs ici sont également très proches des valeurs originales.



22) Modifier la valeur de DOA_deg = 30° et commenter les résultats.



Comment le bruit (thermique) est-il pris en compte dans la simulation ? Analyser les différents blocs et justifier le niveau de bruit simulé sur le spectre des fréquences de battement (reprendre par exemple les résultats de simulation de la plateforme « cosimulation_plateforme_RADAR_doppler »).



TRAVAIL PERSONNEL (A RENDRE)

Plateforme RADAR FSK

Une autre forme d'onde proche de la modulation SAWTOOTH est la FSK (Frequency Shift Keying) qui consiste à effectuer plusieurs paliers de fréquence f_i (N fréquences, $N > 2$) sur la durée du motif et à répéter ce motif de base M fois, comme cela est rappelé ci-dessous (voir également cours « Formes d'ondes et traitement »).

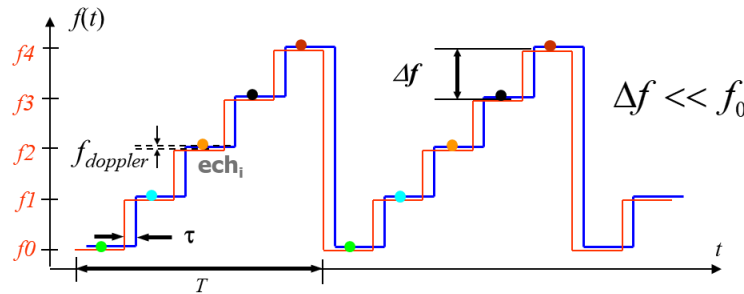
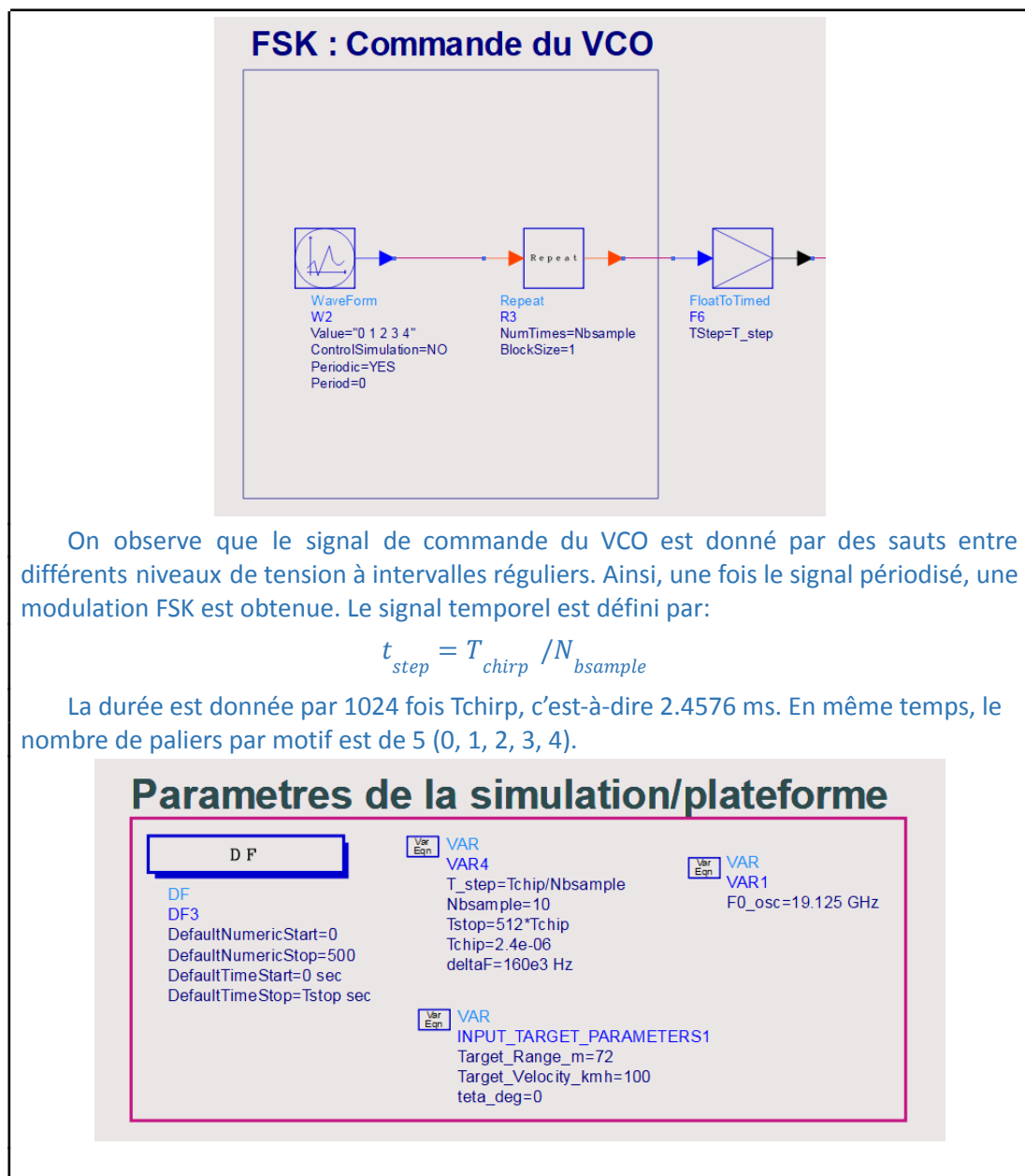


Fig. 1 : principe de la FSK et de l'échantillonnage du signal reçu (NB : ici on a représenté la fréquence des signaux temporels émis et reçus)

Le signal temporel reçu, après transposition en bande de base, sur la durée d'un palier est de la forme : $s(t) = A \cos(2\pi f_d t + \varphi_i)$ où f_d est la fréquence Doppler comme le montre le graphique de la Fig. 1 et φ_i la phase du signal sur le palier n°i. Ce signal étant échantillonné à raison de 1 échantillon par palier, on dispose, au bout de M motifs, de N sinusoïdes déphasées de fréquences f_d disponibles sous forme de M échantillons qui sont « entrelacés ». Un démultiplexage des échantillons est alors effectué sur N voies qui sont ensuite filtrées séparément. Une FFT est réalisée sur chaque voie afin d'obtenir le spectre qui montre une raie à la fréquence Doppler.

- 23) Fermer le *schematic* précédent et ouvrir le *schematic* :
« cosimulation_plateforme_RADAR_FSK ».

Analyser le schéma de simulation et en particulier la commande du VCO et le traitement en bande de base. Identifier les paramètres de la modulation (durée, saut en fréquence, nombre de paliers par motif, nombre de motifs, ...). On règle la durée de la trame (Tstop) de façon à avoir 512 motifs. La plateforme RADAR simulée ici ne comporte qu'un mélangeur simple.



- 24) Simuler et analyser les résultats affichés. Sur la fenêtre *Display* (voir exemple Fig. 2 ci-dessous), suivre les instructions pour visualiser simultanément le signal en bande de base (F10), les échantillons d'une voie (signalEch0, par exemple) ainsi que le signal Doppler « reconstitué » à partir des échantillons (vSignalDoppler). Effectuer les réglages d'amplitude et de phaser du signal vSignalDoppler pour chaque voie en notant la phase obtenue.

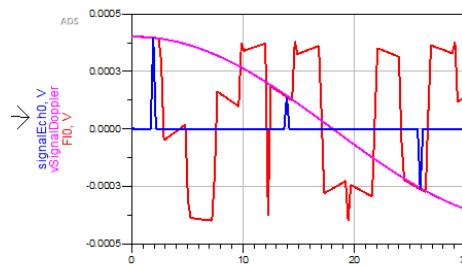
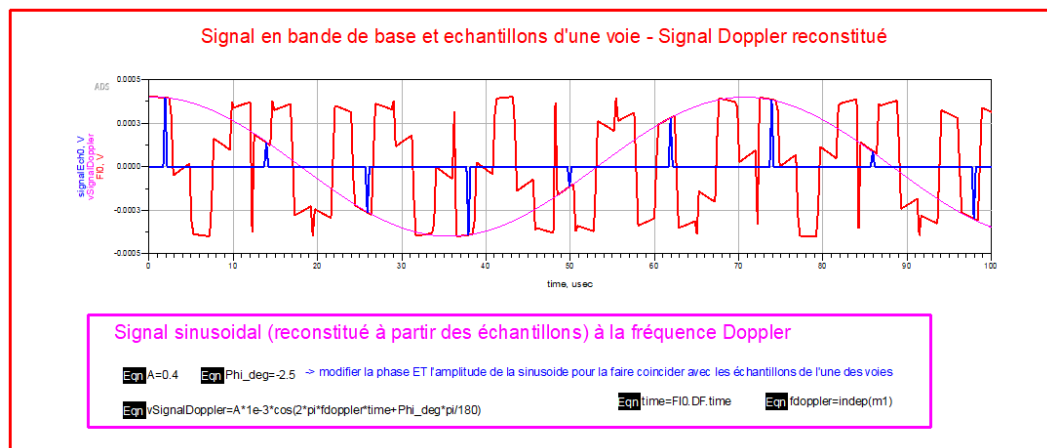



Fig. 2 : signal en bande de base (rouge) – signal échantillonné de la voie 0 (bleu) – signal Doppler reconstitué (rose)

Le signal Doppler en bande de base est donné par différents signaux sinusoidaux avec des déphasages entre eux, liés à la discrétisation des fréquences émises dans la modulation FSK. Pour faire la simulation, nous avons effacé les sources de bruit thermique, afin de voir plus clair la concordance entre le signal sinusoidal et le signal Doppler.

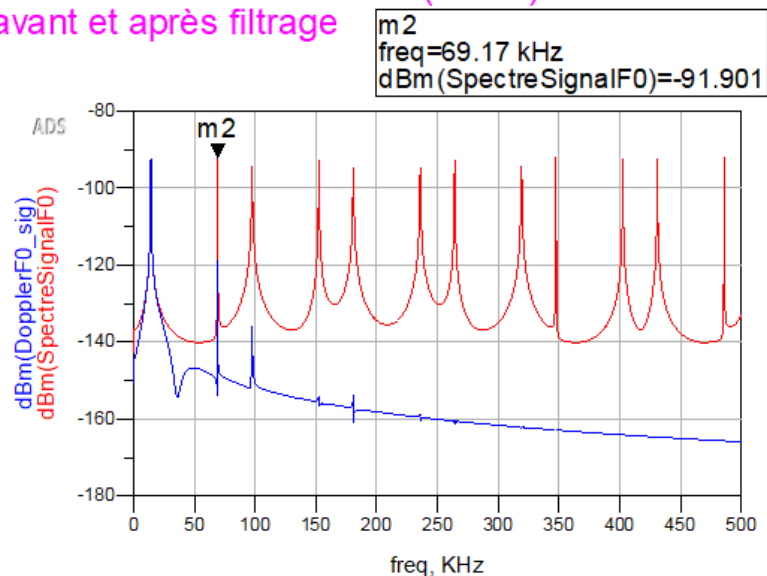


Valeurs de phase obtenues pour chaque voie:

- Voie 0: $\varphi = -2.5^\circ$
- Voie 1: $\varphi = -111.5^\circ$
- Voie 2: $\varphi = 140^\circ$
- Voie 3: $\varphi = 26^\circ$
- Voie 4: $\varphi = -85^\circ$

25) Visualiser le spectre du signal avant et après filtrage pour la voie 0 (activer le graphique avec l'icône ). Expliquer l'allure des spectres.

SPECTRE bande de base (voie 0) avant et après filtrage



En rouge, on observe le spectre du signal Doppler échantillonné, de façon que le spectre est périodisé. Chaque période est centrée dans des fréquences multiples de la fréquence d'échantillonnage. En bleu, le filtrage permet d'éliminer la périodisation et de rester seulement avec les plus basses fréquences qui contiennent l'information de la fréquence Doppler. Cela s'achève à travers d'un filtre pass bas, dont la fréquence de coupure est $f_s/2$.

- 26) Vérifier sur le spectre des signaux filtrés la fréquence du signal pour chaque voie et calculer la vitesse correspondante. Quelle est la résolution en vitesse (comparer à la valeur théorique) ?

La fréquence Doppler est très similaire pour toutes les voies. Alors,

$$v = \frac{cf_{\text{doppler}}}{2f_0} = 99.95 \text{ Km/h} \text{ où } f_{\text{doppler}} = 14.16 \text{ KHz, d'après la simulation}$$

$$\Delta v_{\text{simulation}} = \frac{c\Delta f_{\text{doppler}}}{2f_0} = 1.1 \text{ Km/h}$$

$$\text{où } \Delta f_{\text{doppler}} = \frac{1}{2.4E-6 \cdot 5.512} \text{ Hz}$$

- 27) Calculer la distance comme vue en cours à partir des différences de phase entre les voies prises 2 à 2 : $\Delta\phi_{01} = \text{phase0} - \text{phase1}$, $\Delta\phi_{12} = \text{phase1} - \text{phase2}$, etc. (on se rappellera que la phase est définie modulo 2π). Commentaire.

Les déphasages sont les suivants:

$$\Delta\phi_1 = -2.5^\circ - (-111.5^\circ) = 109.5^\circ$$

$$\Delta\phi_2 = -111.5^\circ - 140^\circ = 108.5^\circ$$

$$\Delta\varphi_3 = 140^\circ - 26^\circ = 114.0^\circ$$

$$\Delta\varphi_4 = 26^\circ - (-85^\circ) = 111.0^\circ$$

Cela donne un moyenne $\Delta\varphi_{moyenne} = 110.8^\circ$, ce qui implique une distance

$$R_{moyenne} = \frac{c \Delta\varphi}{4\pi\Delta f} = 72.14m$$

Cette valeur est très proche de la valeur réelle de 72 m. Même si les sources de bruit ont été annulées, l'erreur provient du calcul manuel de la phase.

- 28) Quelle est la fréquence d'échantillonnage du signal Doppler ? Quelle est alors la vitesse (relative) maximale mesurable avec cette fréquence ? Commentaire.

Fréquence d'échantillonnage du signal Doppler:

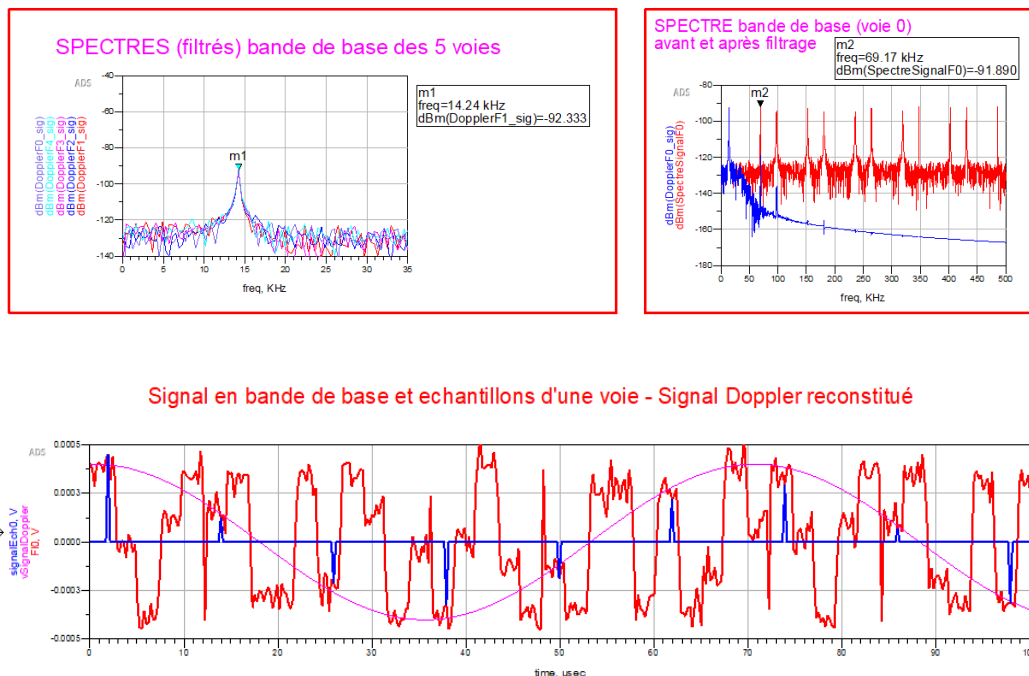
$$f_s = \frac{1}{2T_{chip}N_{voies}} = \frac{1}{2 \times 2.4576E^{-6} \times 5} = 40.69 \text{ kHz} = f_{doppler_MAX}$$

Selon le théorème de Nyquist-Shannon :

$$v_{MAX} = 79.78m/s = 287,22km/h$$

La fréquence maximale de Doppler se montre beaucoup plus élevée que pour les autres formes d'onde.

- 29) Pour prendre en compte le bruit, il faut mettre le paramètre EnvNoise = yes du contrôleur de simulation ENVELOPE dans la plateforme radar. Refaire la simulation. Commentaire sur les différents signaux traités et le calcul de la distance.



- 30) Pour tester d'autres valeurs de distance, il faut respecter la condition entre T_{step} et le retard (delay) du canal de propagation. Modifier la distance en conséquence (et la

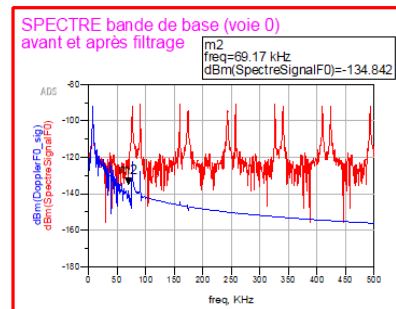
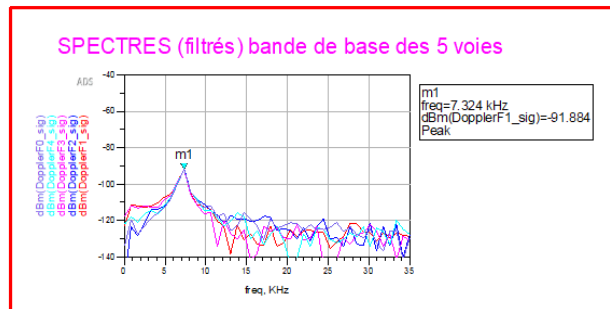
vitesse) pour différentes cibles (camion, voiture, moto, piéton). Simuler et analyser les résultats.

Cible : Camion

Vitesse : 60 km/h

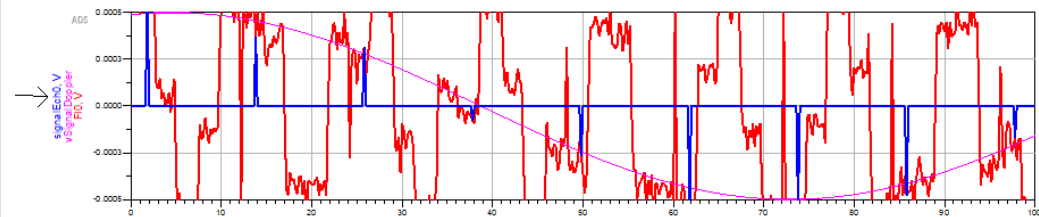
Distance : 60 m

Tstep : 0.2 us (Nsamples = 12)



$$v = \frac{cf_{\text{doppler}}}{2f_0} = 51.70 \text{ Km/h}$$

Signal en bande de base et échantillons d'une voie - Signal Doppler reconstitué



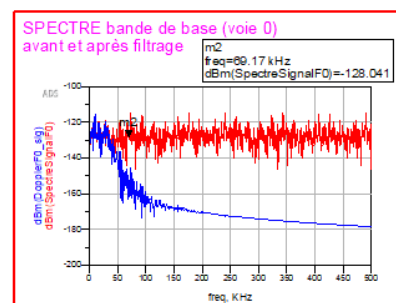
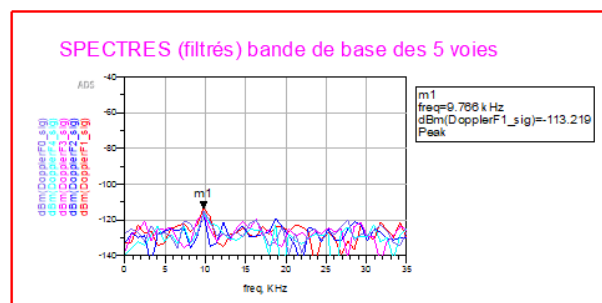
$$R_{\text{moyenne}} = \frac{c \Delta \phi}{4\pi \Delta f} = 61.85 \text{ m}$$

Cible : Voiture

Vitesse : 70 km/h

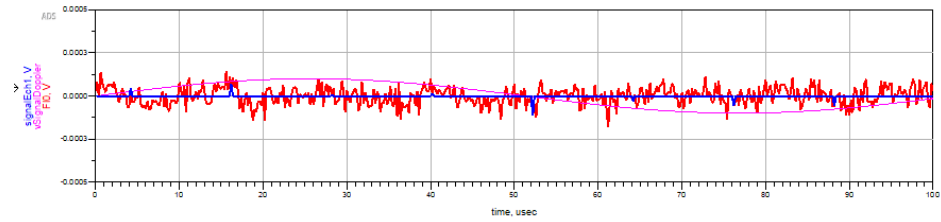
Distance : 60 m

Tstep : 0.2 us (Nsamples = 12)



$$v = \frac{cf_{\text{doppler}}}{2f_0} = 68.93 \text{ Km/h}$$

Signal en bande de base et échantillons d'une voie - Signal Doppler reconstitué



À cause du fort bruit et de la plus faible aire de la cible, le sinus est plus difficile à mesurer, et alors il est difficile d'estimer la distance.

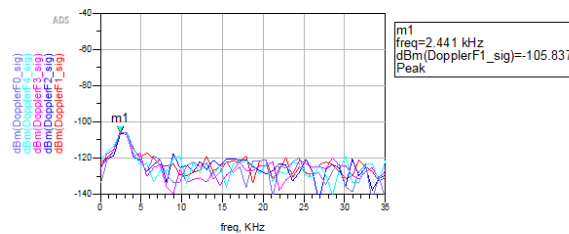
Cible : Moto

Vitesse : 20 km/h

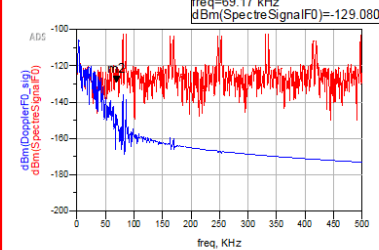
Distance : 15 m

Tstep : 0.05 us (Nsamples = 48)

SPECTRES (filtrés) bande de base des 5 voies



SPECTRE bande de base (voie 0) avant et après filtrage



$$v = \frac{cf_{doppler}}{2f_0} = 17.2 \text{ Km/h}$$

De nouveau, la mesure de la distance resulte trop difficile à faire.

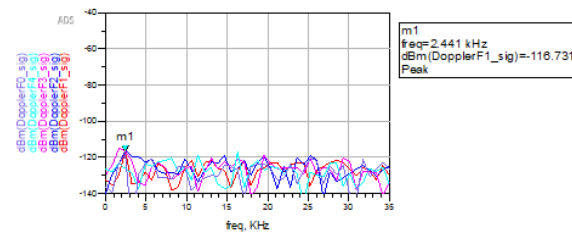
Cible : piéton

Vitesse : 15 km/h

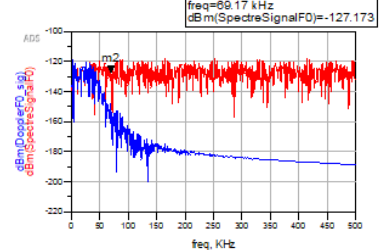
Distance : 15 m

Tstep : 0.05 us (Nsamples = 48)

SPECTRES (filtrés) bande de base des 5 voies

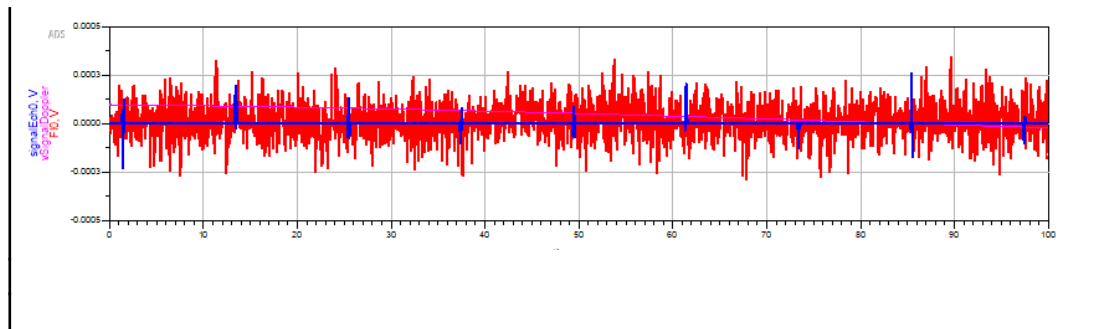


SPECTRE bande de base (voie 0) avant et après filtrage



$$v = \frac{cf_{doppler}}{2f_0} = 17.2 \text{ Km/h}$$

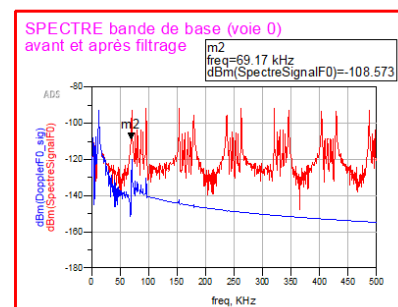
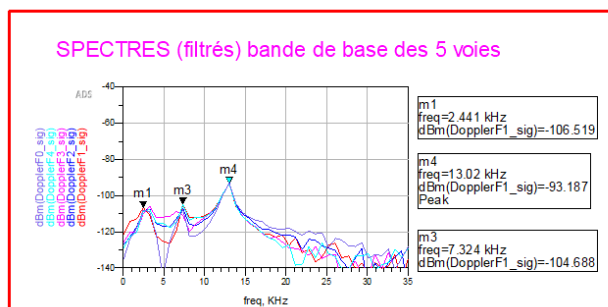
Même à une distance si courte comme 15m, l'aire de la cible est si faible (-10 dBm2) que la fréquence doppler est presque indistinguable. Autrement dit, le signal reçu a une très mauvaise SNR. La distance continue à être compliquée à mesurer.



- 31) Dans un scénario avec plusieurs cibles, comment sera le spectre de chaque voie (0 à 4) ?
Simuler en utilisant la plateforme « plateforme_RADAR_IQ_multicibles » (on chargera la voie Q sur 50 Ohms) et en paramétrant correctement les distances. Commentaires.

Cibles choisies	Distance [m]	Vitesse [km/h]
Camion	60	90
Voiture	30	20
Moto	15	-50

Tstep : 0.05 us (Nsamples = 48)



$$v_{camion} = \frac{cf_{doppler}}{2f_0} = 91.91 \text{ Km/h}$$

$$v_{voiture} = \frac{cf_{doppler}}{2f_0} = 51.70 \text{ Km/h}$$

$$v_{moto} = \frac{cf_{doppler}}{2f_0} = 17.2 \text{ Km/h}$$

Il s'observe que le spectre contient trois fréquences, chacune reliée à une cible avec une vitesse spécifique. Pour pouvoir observer les trois cibles, le choix des distances est tel que les cibles avec une aire plus faible sont plus proches du radar. Le calcul des vitesses montre que les résultats ont des erreurs percentuelles maximums de 15%.
