



Traitements différés de détection et caractérisation de pulses radars sur accélérateur GPU

11/04/2024

François VERDEIL & Chakib BELAFDIL

Sommaire

- ▶ Introduction et contexte
- ▶ Simulateur de données
- ▶ Algorithme de traitement : Détection + Caractérisation
- ▶ Résultats
- ▶ Perspectives

AVANTIX

Introduction & Contexte

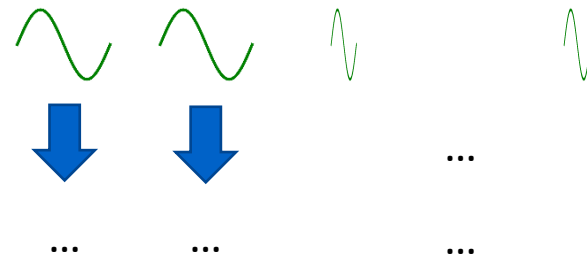
IQ → PDW



Time Of Arrival (TOA)	23132
PulseWidth (PW)	20
Frequency	2053
Level	7
MOP_TYPE	PMOD - BARKER
Nb Hops	7



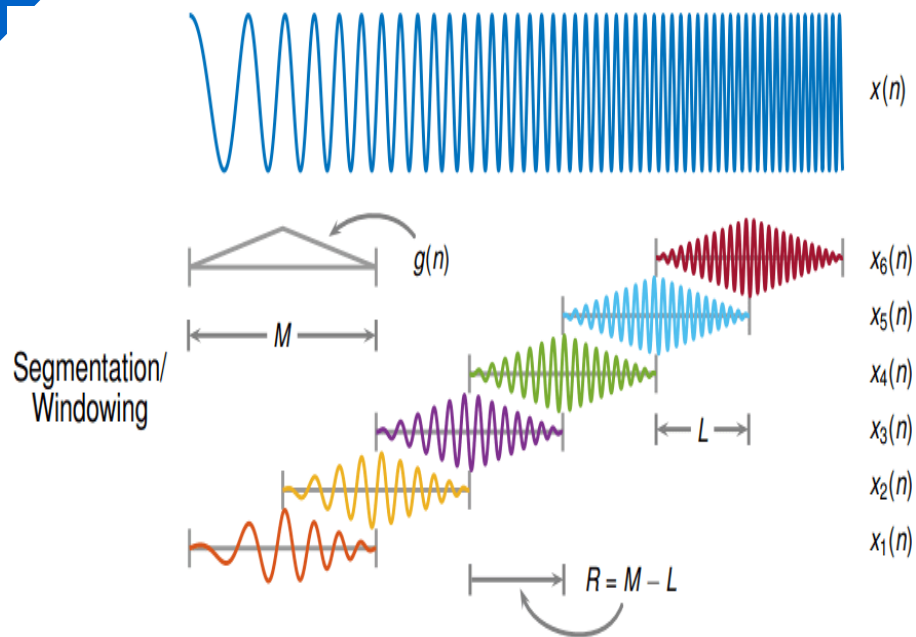
Time Of Arrival (TOA)	23457
PulseWidth (PW)	18
Frequency	2073
Level	9
MOP_TYPE	FMOD - SLAW
Delta Freq	10 MHz



Objectif : à partir d'un enregistrement IQ, être capable d'extraire les PDW de toutes les impulsions radar.

DETECTION + CARACTERISATION

Prétraitement : Spectrogramme



nperseg : Nombre d'échantillons sur lesquels est calculé la FFT →

128,256,512,1024,2048,8k,32k, 131k

window : Fenêtre d'apodisation à appliquer sur les échantillons → **Tukey**

nfft : Si $> \text{nperseg}$, on fait du zeros padding →
nfft=nperseg

noverlap : Nombre d'échantillons à chevaucher à chaque itération → **50%**

scaling='density'

Mode = 'psd'

Les formes d'ondes radar à détecter et caractériser

<i>DI (ns)</i>	<i>Sans Modulation</i>	<i>Modulations de Fréquence (MHz/μs)</i>		<i>Modulations de Phase Phase / Nombre de moments</i>
10-100	Oui	-	-	-
100-1_000	Oui	-	-	-
1_000-10_000	Oui	20	100	180° 7, 8
10_000-100_000	Oui	2	10	180° 7, 8, 13, 25, 33, 39 60° 25, 30 45° 8, 35, 70
100_000-1_000_000	Oui	10 ⁻³	1	180° 7, 8, 13, 25, 33, 39 60° 25, 30 45° 8, 35, 70
1_000_000-10_000_000	Non	0,001	0,1	-
10_000_000-100_000_000	Non	0,0001	0,01	-
100_000_000-inf	Non	0,00001	0,001	-
CW	Oui	-	-	-

Modulation fréquentielle :

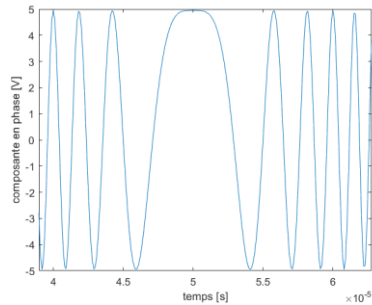
- Linéaire
- Loi en S
- FMCW

Modulation en phase :

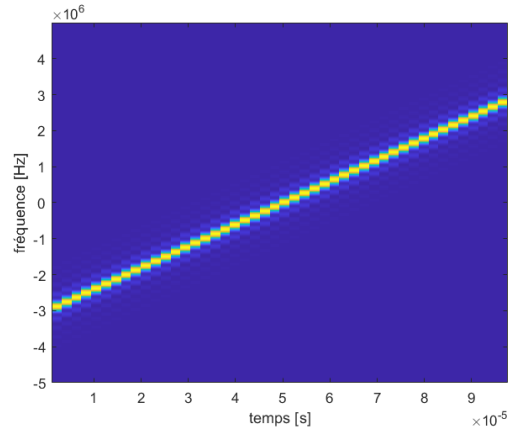
- Barker biphase
- Frank
- P1, P2, P3 et P4
- TODO T1, T2, T3 et T4

Chirps

Chirps linéaires

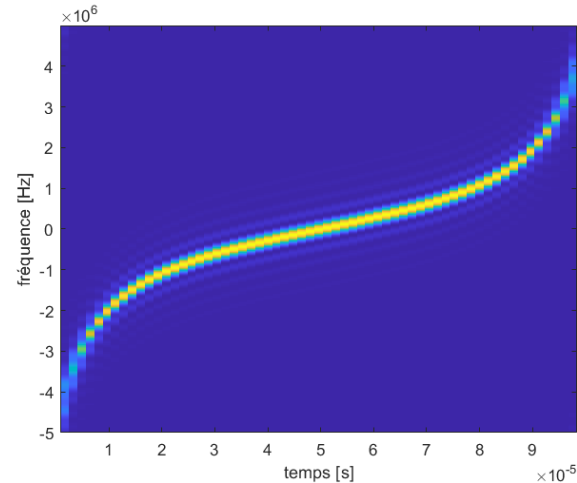


$$\begin{aligned}f(t) &= a t + b \\ \phi(t) &= \frac{a}{2} t^2 + b t \\ s(t) &= e^{i\phi(t)}\end{aligned}$$

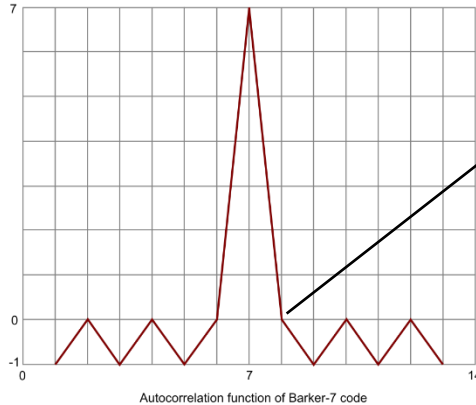


Chirps s-law

$$\begin{aligned}f(t) &= \Delta_f \frac{\tan\left(\frac{2\beta t}{\Delta_T}\right)}{2 \tan(\beta)} \\ \phi(t) &= F(t) \\ s(t) &= e^{i\phi(t)}\end{aligned}$$



Barker



$$\begin{array}{c}
 +++--+- \\
 +++--+- \\
 = \\
 ++-+- - \\
 \Sigma = +1
 \end{array}
 \times$$

Exemple de séquences

Code Length	Code Elements	PSL (dB)
2	-+, +-	-6.0
3	++-	-9.5
4	++-+	-12.0
4	+++ -	-12.0
5	+++ - +	-14.0
7	+++ - - + -	-16.9
11	+++ - - - + - - + -	-20.8
13	+++++ - - + + - + - +	-22.3

- Minimise l'autocorrélation → synchro télécom
- En réalité il y a une porteuse (décalée de 0 ou π)
- Bien pour les radars mais pas LPI

Source : Pace, P. E. (2009). *Detecting and Classifying Low Probability of Intercept Radar*.

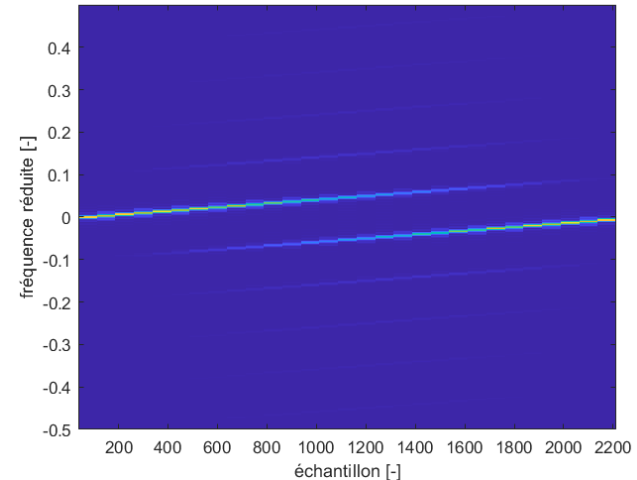
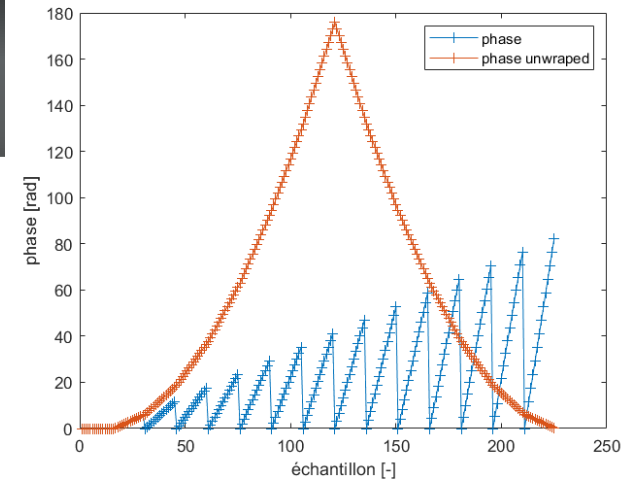
Frank Code

$$\phi_{i,j} = \frac{2\pi}{M}(i-1)(j-1)$$

where $i = 1, 2, \dots, M$, and $j = 1, 2, \dots, M$.

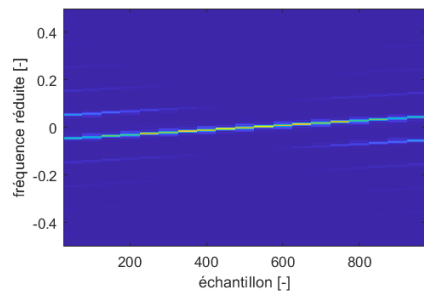
- Phase linéaire par morceau
- Chaque phase est maintenue Δ_T
- Bonne autocorrélation
- LPI car M est grand est la puissance est répartie en temps et en fréquence

Source : Pace, P. E. (2009). *Detecting and Classifying Low Probability of Intercept Radar*.

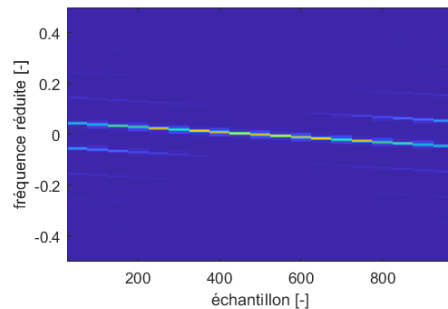


P1, P2, P3, P4

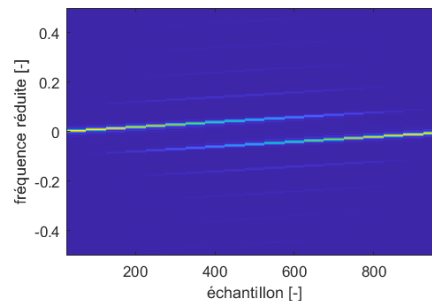
P1



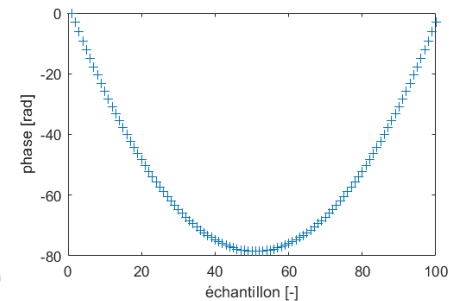
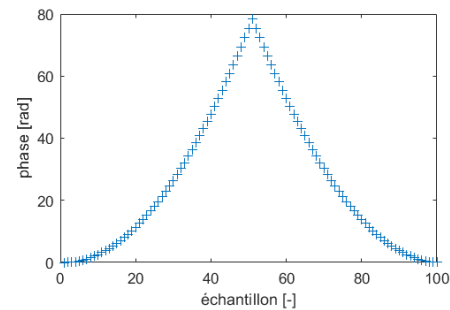
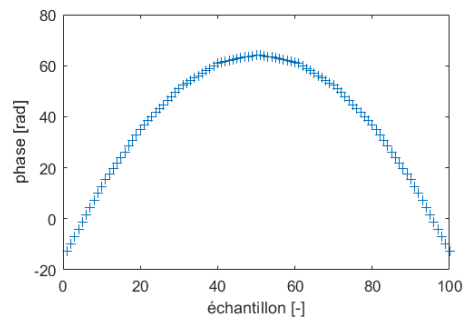
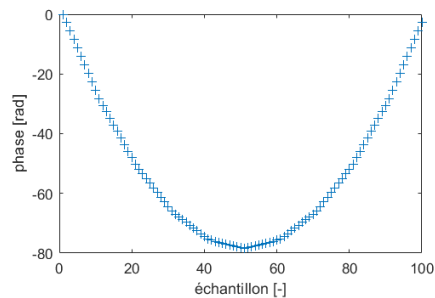
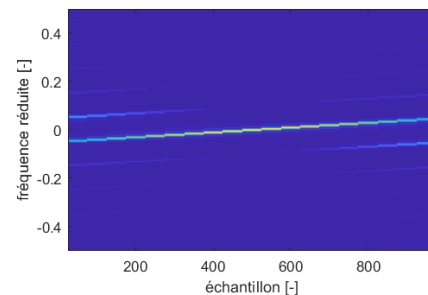
P2



P3



P4

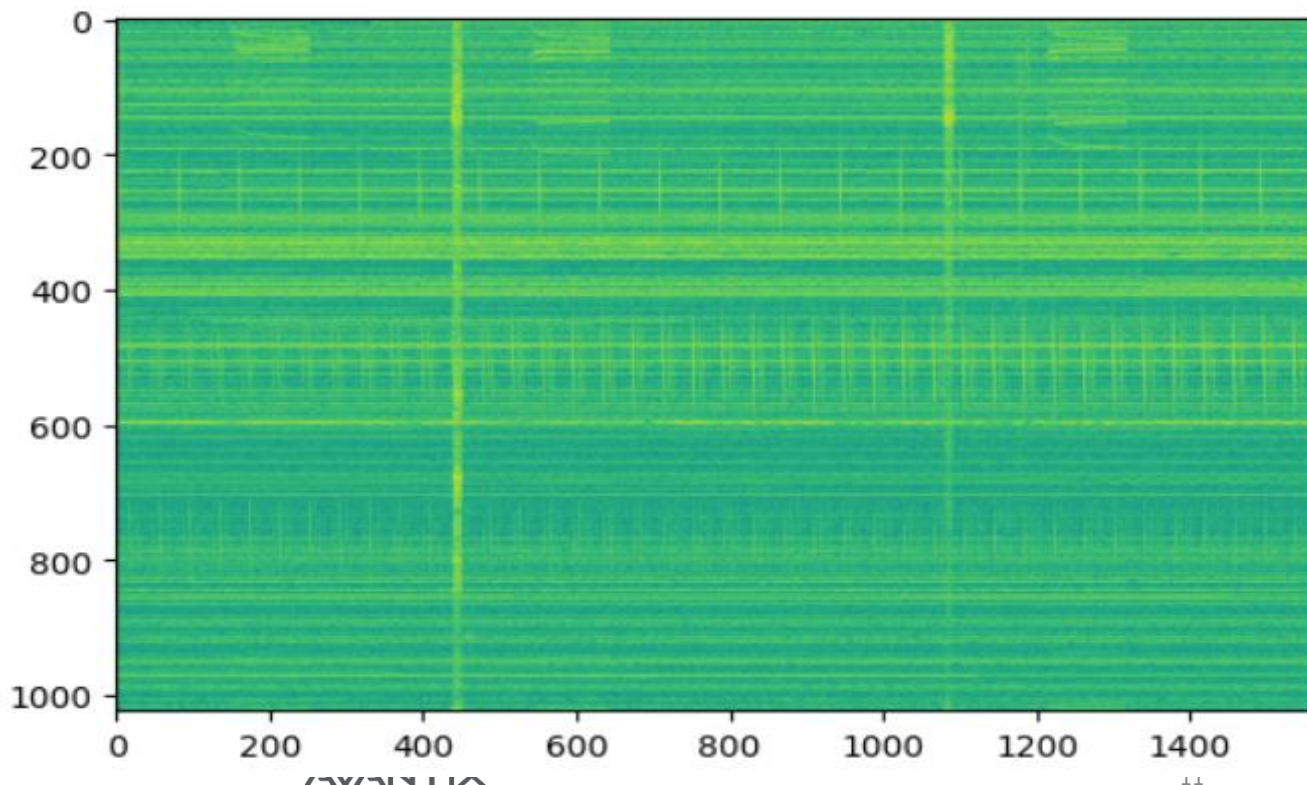


Les interférences COM

Liste des interférences :

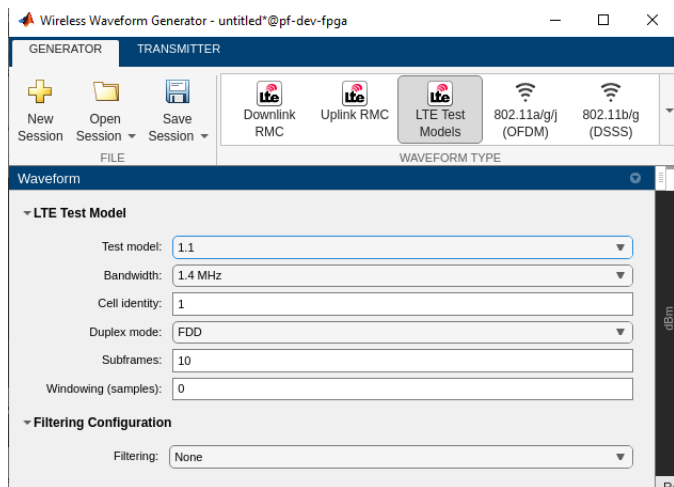
- **LTE/5G**
- V-UHF
- LoRA bande ISM
- Satellite :
 - THURAYA
 - INMARSAT
 - IRIDUM
 - OneWeb
 - Starlink

Extrait de 100ms d'un signal réel ayant des impulsions radar avec des interférences de COM



LTE / 5G

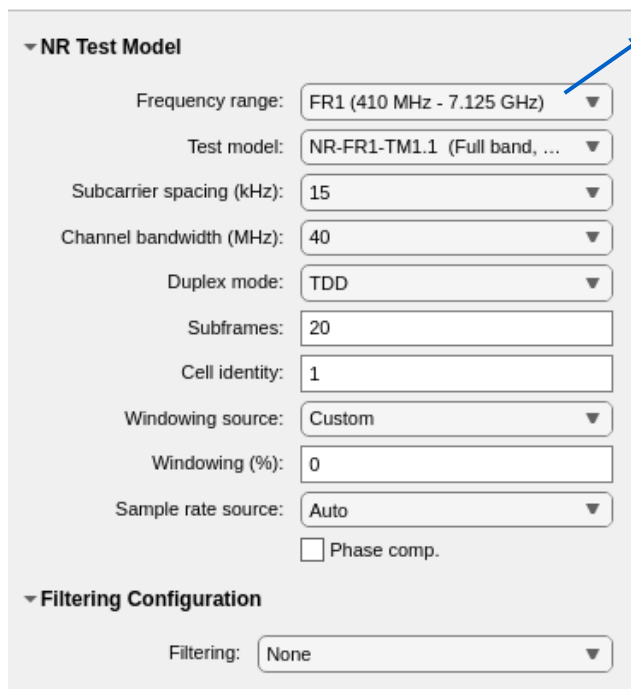
LTE



5G

Fixé en FR1

Waveform



Formes d'ondes LTE

Nom des bandes	Duplex mode	Fmin UL (MHz)	Fmax UL (MHz)	Fmin DL (MHz)	Fmax DL (MHz)	BW (MHz)	1,4	3	5	10	15	20
B1	FDD	1920	1980	2110	2170	60	N/A	N/A	5	10	15	20
B3	FDD	1710	1785	1805	1880	75	1,4	3	5	10	15	20
B7	FDD	2500	2570	2620	2690	70	N/A	N/A	5	10	15	20
B8	FDD	880	915	925	960	35	1,4	3	5	10	N/A	N/A
B20	FDD	832	862	791	821	30	N/A	N/A	5	10	15	20
B28	FDD	703	748	758	803	45	N/A	3	5	10	15	20
B38	TDD	2570	2620	2570	2620	50	N/A	N/A	5	10	15	20
B40	TDD	2300	2400	2300	2400	100	N/A	N/A	5	10	15	20
B41	TDD	2496	2690	2496	2690	194	N/A	N/A	5	10	15	20

Source : Florian BOGETTI

Formes d'ondes 5G

Nom des bandes	Duplex mode	Fmin UL (MHz)	Fmax UL (MHz)	Fmin DL (MHz)	Fmax DL (MHz)	BW (MHz)	SCS (kHz)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100
n1	FDD	1920	1980	2110	2170	60	15	5	10	15	20	25	30	N/A	40	45	50	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
n1	FDD	1920	1980	2110	2170	60	30	N/A	10	15	20	25	30	N/A	40	45	50	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
n1	FDD	1920	1980	2110	2170	60	60	N/A	10	15	20	25	30	N/A	40	45	50	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
n3	FDD	1710	1785	1805	1880	75	15	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
n3	FDD	1710	1785	1805	1880	75	30	N/A	10	15	20	25	30	35	40	45	50	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
n3	FDD	1710	1785	1805	1880	75	60	N/A	10	15	20	25	30	35	40	45	50	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
n7	FDD	2500	2570	2620	2690	70	15	5	10	15	20	25	30	35	40	N/A	50	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
n7	FDD	2500	2570	2620	2690	70	30	N/A	10	15	20	25	30	35	40	N/A	50	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
n7	FDD	2500	2570	2620	2690	70	60	N/A	10	15	20	25	30	35	40	N/A	50	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
n20	FDD	832	862	791	821	30	15	5	10	15	20	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
n20	FDD	832	862	791	821	30	30	N/A	10	15	20	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
n20	FDD	832	862	791	821	30	60	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
n38	TDD	2570	2620	2570	2620	50	15	5	10	15	20	25	30	N/A	40	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
n38	TDD	2570	2620	2570	2620	50	30	N/A	10	15	20	25	30	N/A	40	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
n38	TDD	2570	2620	2570	2620	50	60	N/A	10	15	20	25	30	N/A	40	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
n40	TDD	2300	2400	2300	2400	100	15	5	10	15	20	25	30	N/A	40	N/A	50	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
n40	TDD	2300	2400	2300	2400	100	30	N/A	10	15	20	25	30	N/A	40	N/A	50	60	70	80	90	100
n40	TDD	2300	2400	2300	2400	100	60	N/A	10	15	20	25	30	N/A	40	N/A	50	60	70	80	90	100
n41	TDD	2496	2690	2496	2690	194	15	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
n41	TDD	2496	2690	2496	2690	194	30	N/A	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100
n41	TDD	2496	2690	2496	2690	194	60	N/A	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100
n77	TDD	3300	4200	3300	4200	900	15	N/A	10	15	20	25	30	N/A	40	N/A	50	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
n77	TDD	3300	4200	3300	4200	900	30	N/A	10	15	20	25	30	N/A	40	N/A	50	60	70	80	90	100
n77	TDD	3300	4200	3300	4200	900	60	N/A	10	15	20	25	30	N/A	40	N/A	50	60	70	80	90	100
n78	TDD	3300	3800	3300	3800	500	15	N/A	10	15	20	25	30	N/A	40	N/A	50	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
n78	TDD	3300	3800	3300	3800	500	30	N/A	10	15	20	25	30	N/A	40	N/A	50	60	70	80	90	100
n78	TDD	3300	3800	3300	3800	500	60	N/A	10	15	20	25	30	N/A	40	N/A	50	60	70	80	90	100

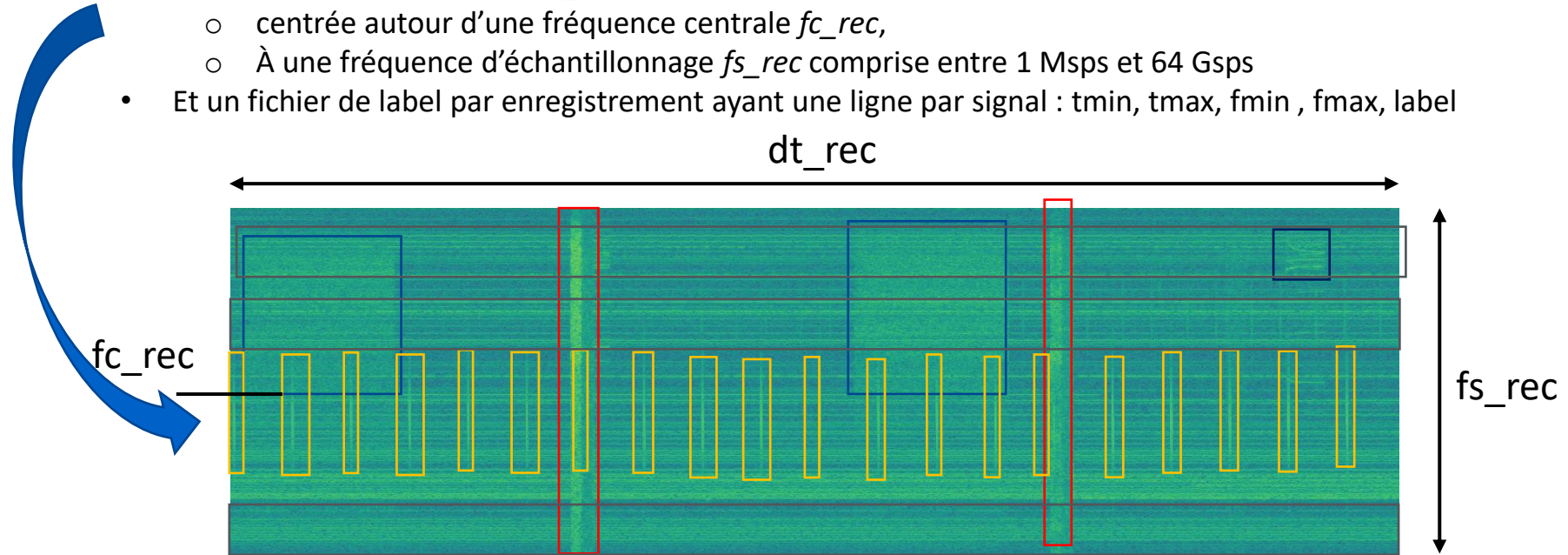
AVANTIX

Simulateur de données

Besoin

Avoir un programme qui génère en sortie :

- un enregistrement IQ avec mélange de signaux radar et de communications
 - d'une certaine durée dt_rec ,
 - centrée autour d'une fréquence centrale fc_rec ,
 - À une fréquence d'échantillonnage fs_rec comprise entre 1 Msps et 64 Gsps
- Et un fichier de label par enregistrement ayant une ligne par signal : $tmin$, $tmax$, $fmin$, $fmax$, label



Spécifications fonctionnelles

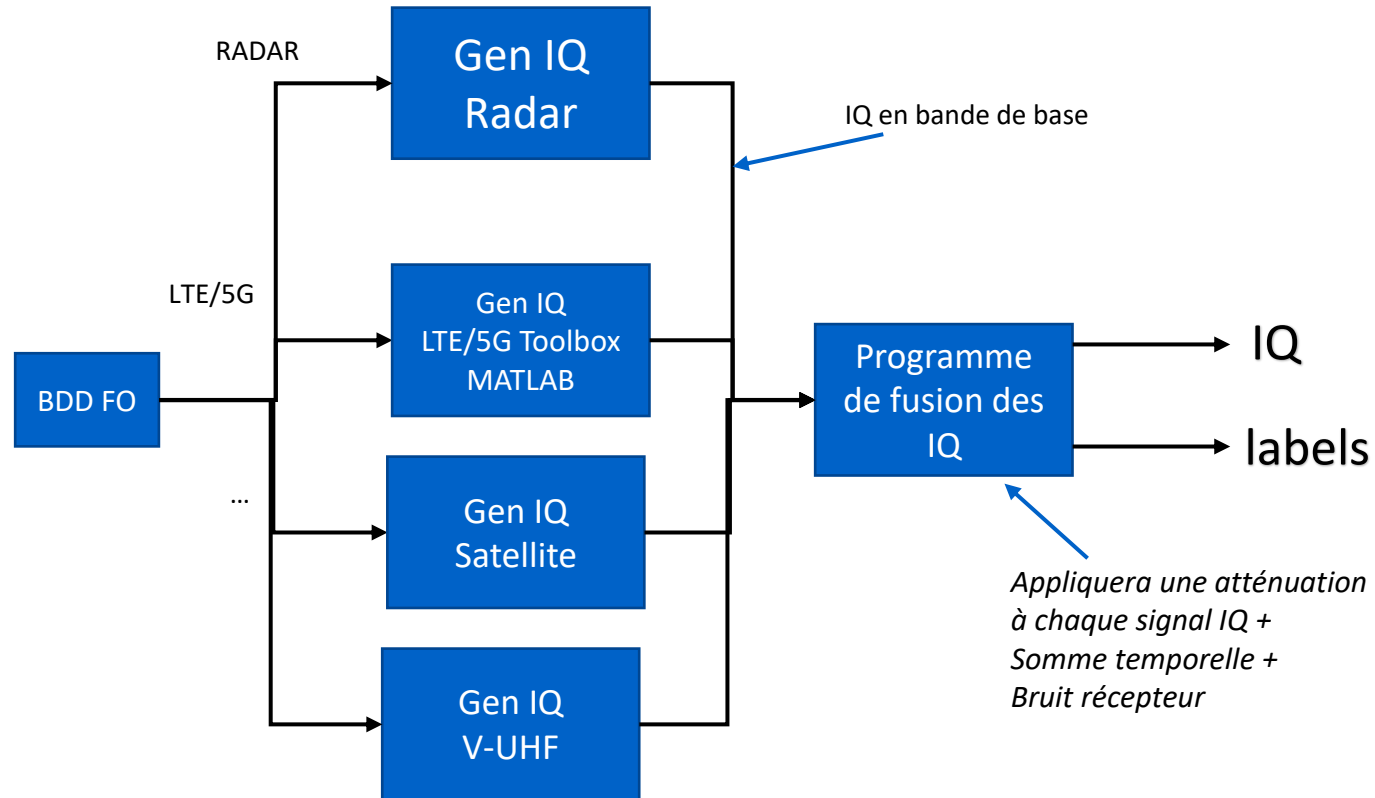
```
import pickle
from iq_sigint_simulator import iq_sigint_simulator

sig_types=['cellular', 'radar']
iq_rec, labels = iq_sigint_simulator(fc_rec, fs_rec, dt_rec, sig_types=
sig_types)

pickle.dump((record, labels), open('record.pkl', 'wb'))
```

- `fc_rec` : Fréquence centrale d'écoute
- `fs_rec` : Fréquence d'échantillonnage de la bande d'écoute
- `dt_rec` : Durée en secondes de l'écoute
- `sig_types` : Familles des formes d'ondes à simuler

Architecture du programme

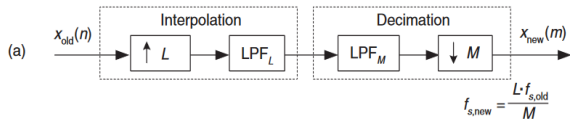


Programme de fusion des IQ : `iq_sigint_simulator`

1. Sélectionne les FO éligibles dans la bande d'écoute
2. Appelle les simulateurs des différents types de signaux à simuler jusqu'à atteindre un seuil
3. Rééchantillonne chaque signal dans la bande d'écoute
4. Applique une atténuation à chaque signal correspondant au SNR qui lui a été choisi aléatoirement
5. Ajoute un fond de bruit gaussien
6. Générer les labels de chaque signal

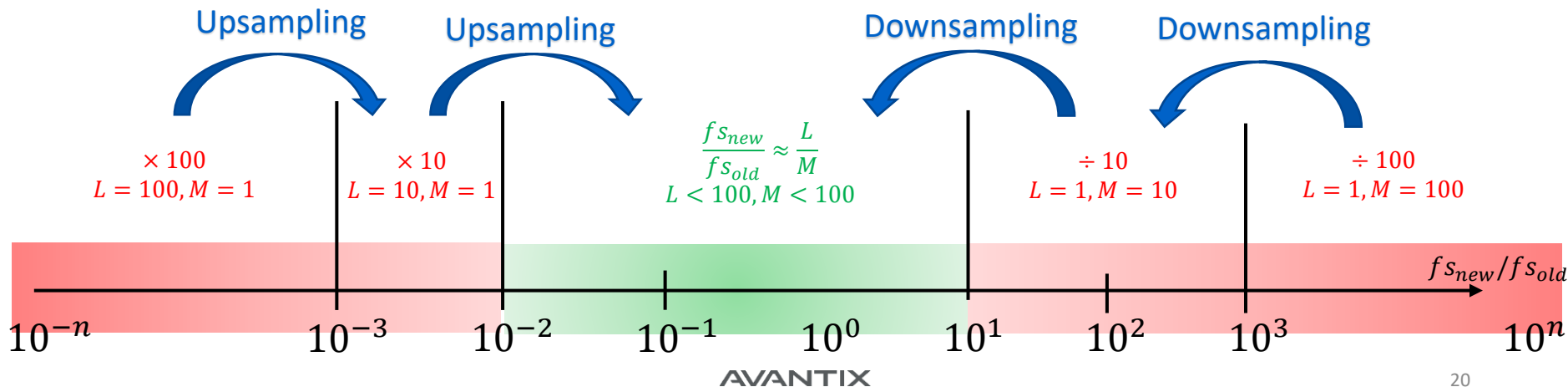
Algorithme de rééchantillonnage

Réaliser une cascade de upsampling/downsampling afin d'obtenir le rapport de conversion souhaité. La cascade se fait par ratio de 100 ou 10 de sur ou sous-échantillonnage sauf la dernière qui impose un rapport L/M avec L et M inférieur à 100.

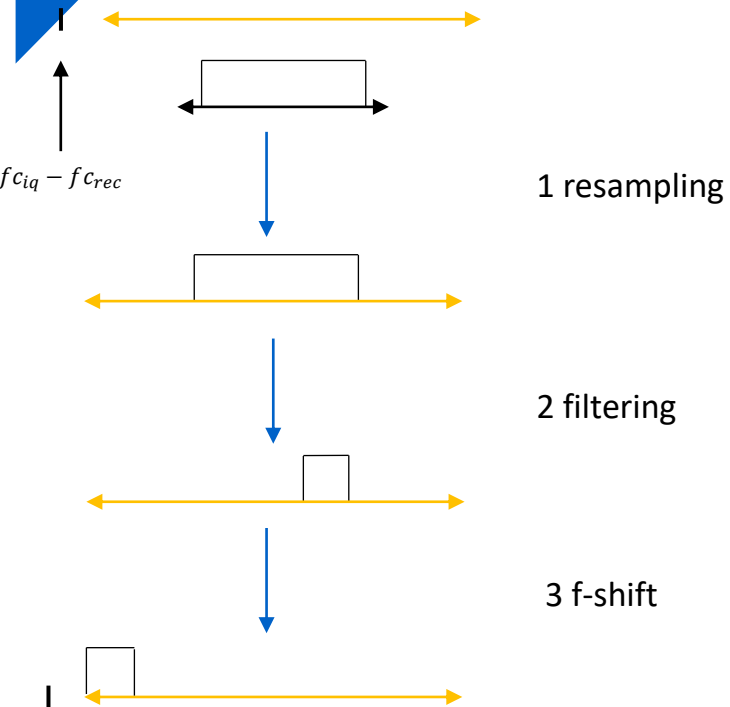


Objectif : $\frac{f_{s,new}}{f_{s,old}} \approx \frac{L}{M} \times (10^2)^{n_2} \times (10^1)^{n_1} \times (10^{-1})^{n_{-1}} \times (10^{-2})^{n_{-2}}$

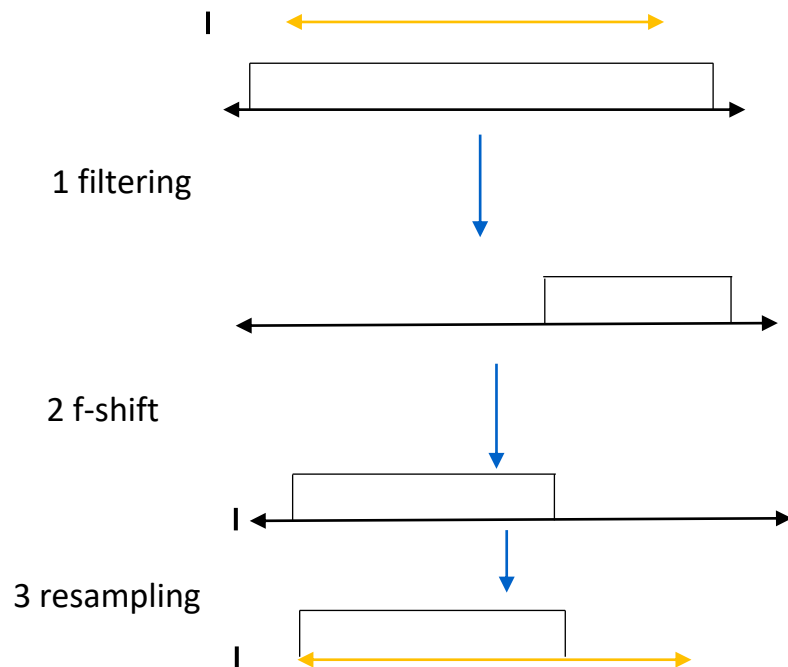
Avec $L < 100$ et $M < 100 \rightarrow$ Garantie une erreur < 1%



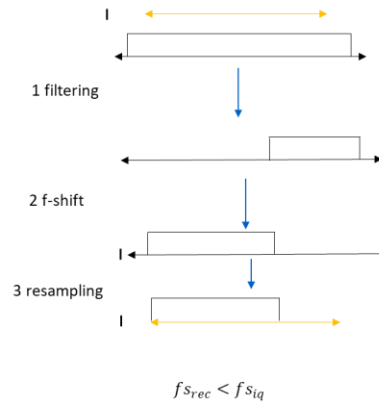
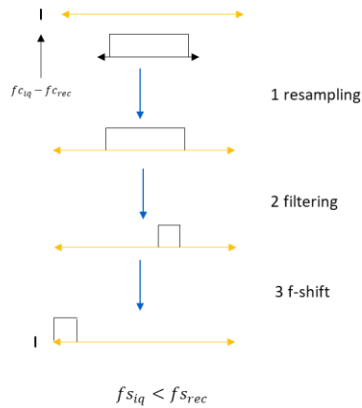
Algorithme de rééchantillonnage



$$f_{Si q} < f_{S_{rec}}$$



$$f_{S_{rec}} < f_{Si q}$$



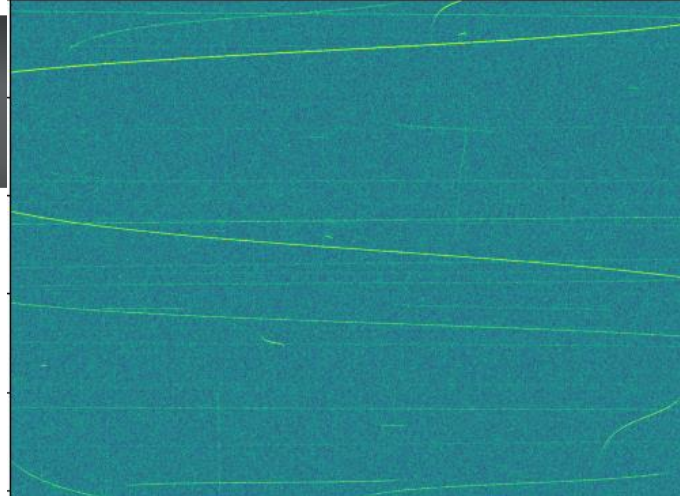
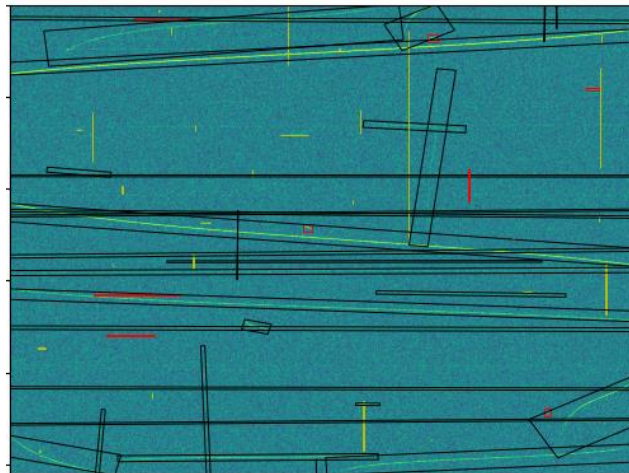
- On voulait simuler des signaux qui peuvent sortir partiellement de la bande
- On s'en sort avec un seul rééchantillonnage
- On peut choisir f_{siq} tel que

$$\exists p, q \in \mathbb{N} \text{ t. q. } f_{srec} = \frac{p}{q} f_{siq}$$

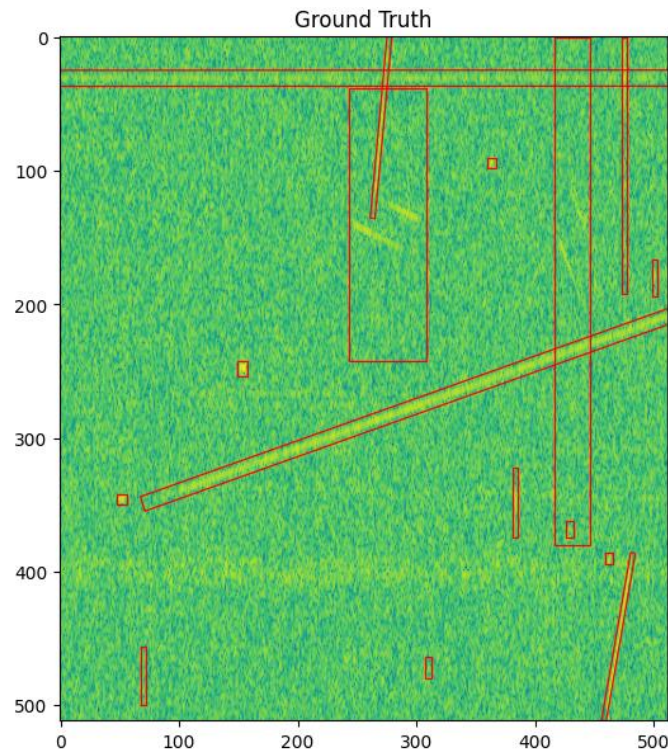
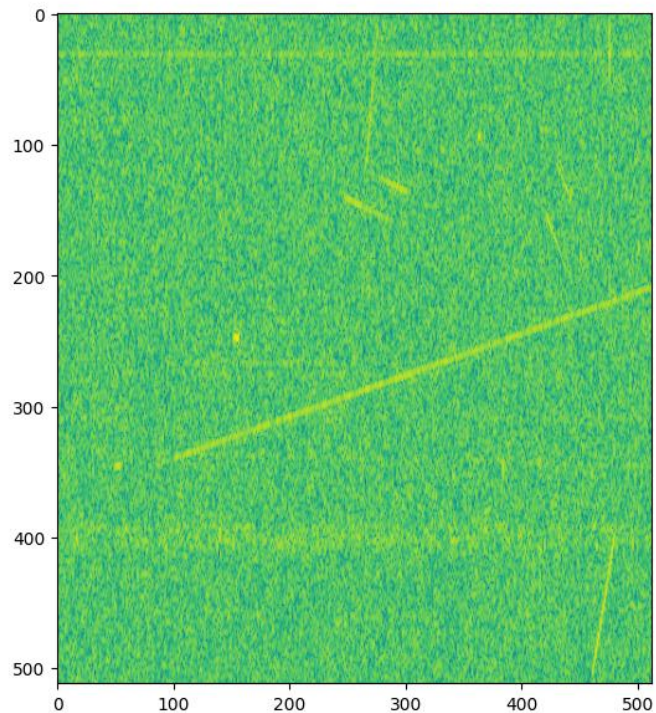
Etiquetage des spectrogrammes

- Entrée: spectrogramme+liste des pdw
- Sortie: spectrogramme étiqueté
- Indispensable pour l'apprentissage
- Rien de révolutionnaire, mais bcp de travail

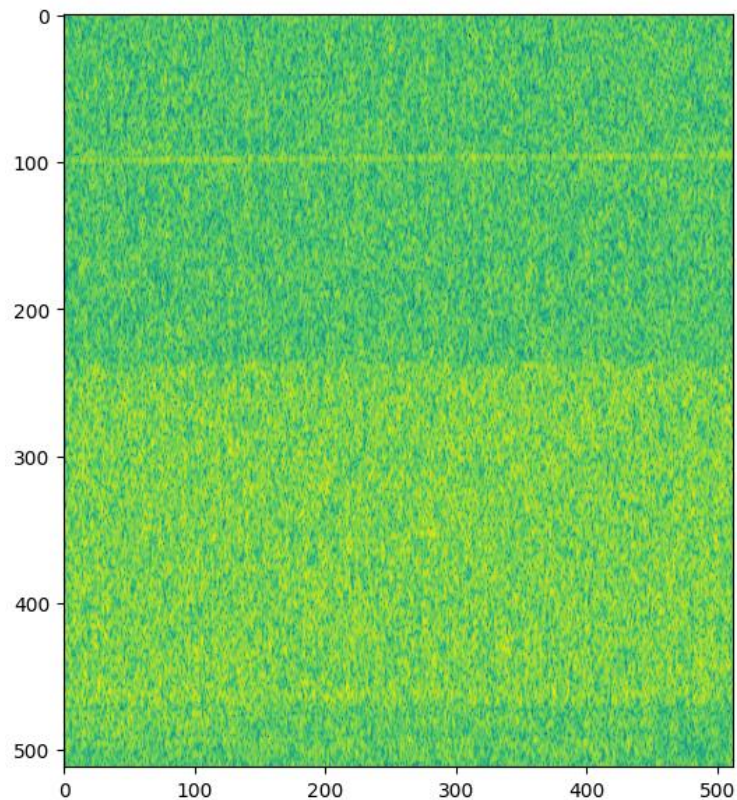
-chirp {...}
-chirp {...}
-pmod{...}
⋮



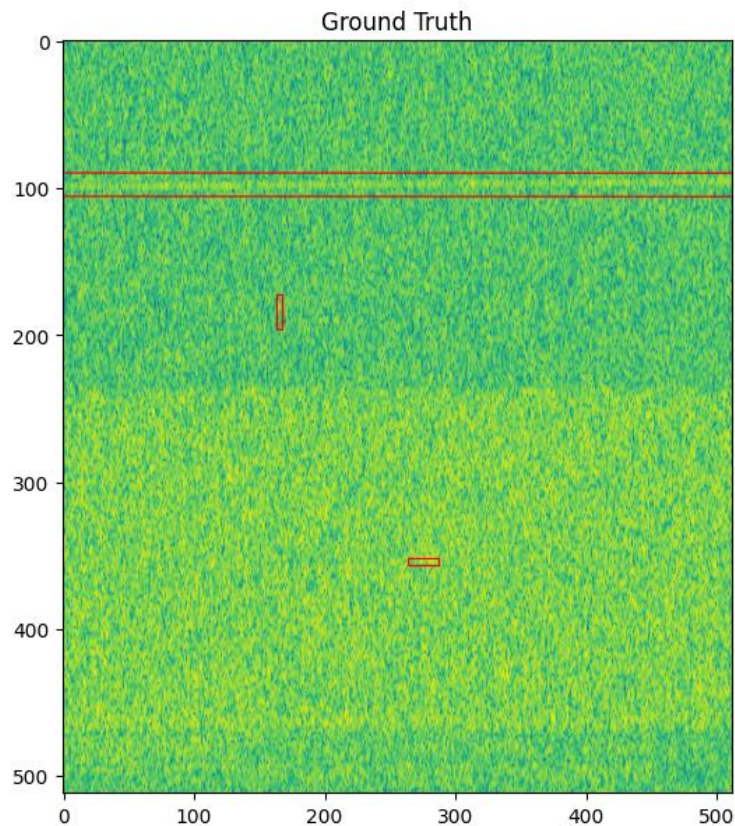
Exemple enregistrement simulateur de données



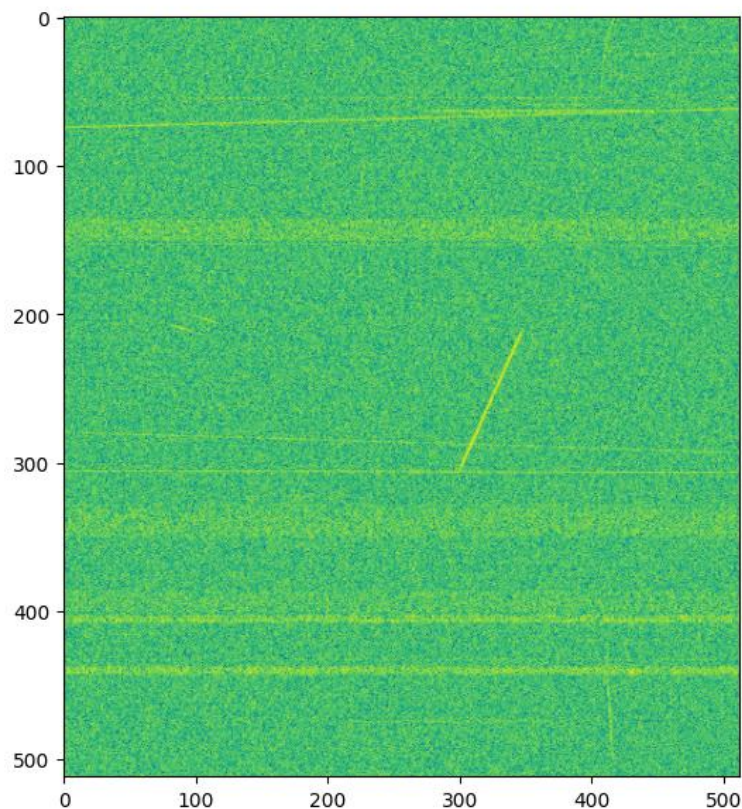
Exemple enregistrement simulateur de données



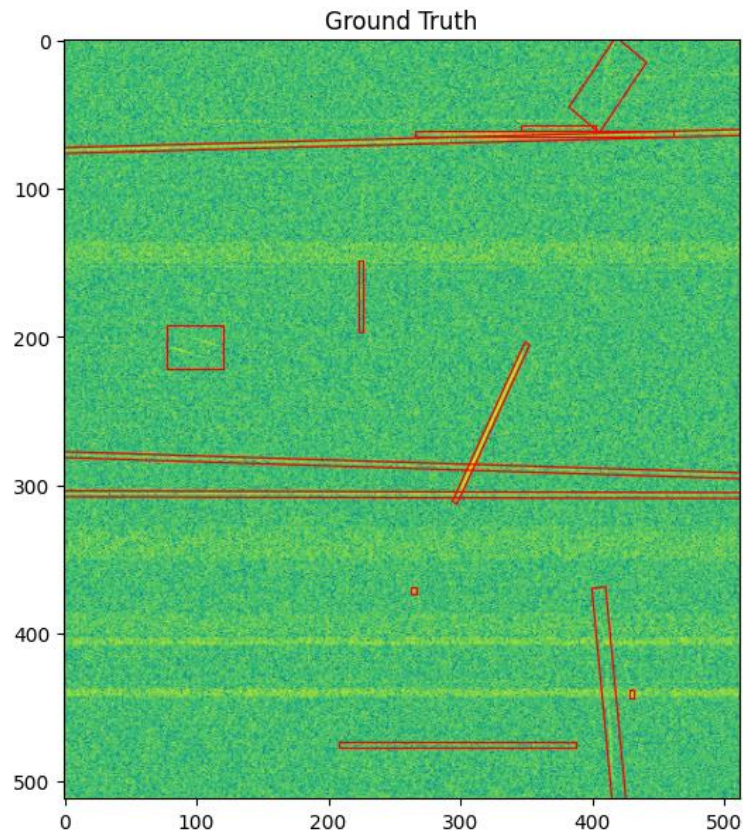
AVANTIX



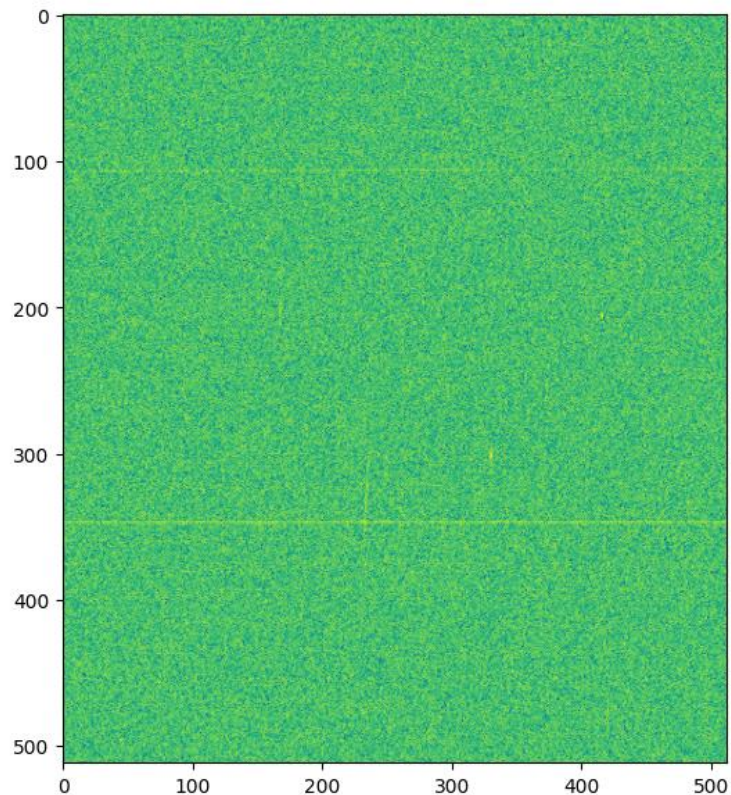
Exemple enregistrement simulateur de données



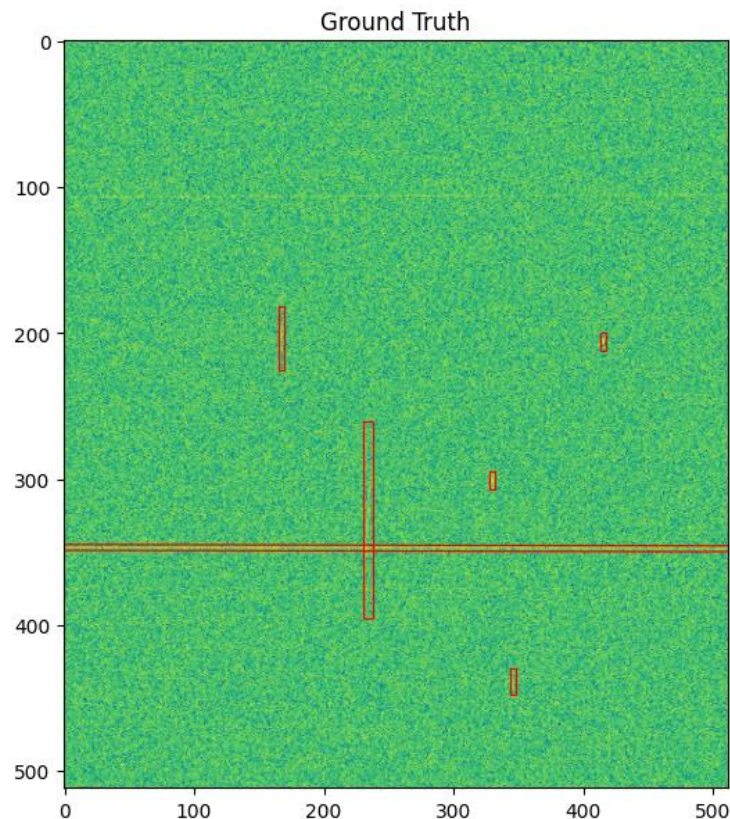
AVANTIX



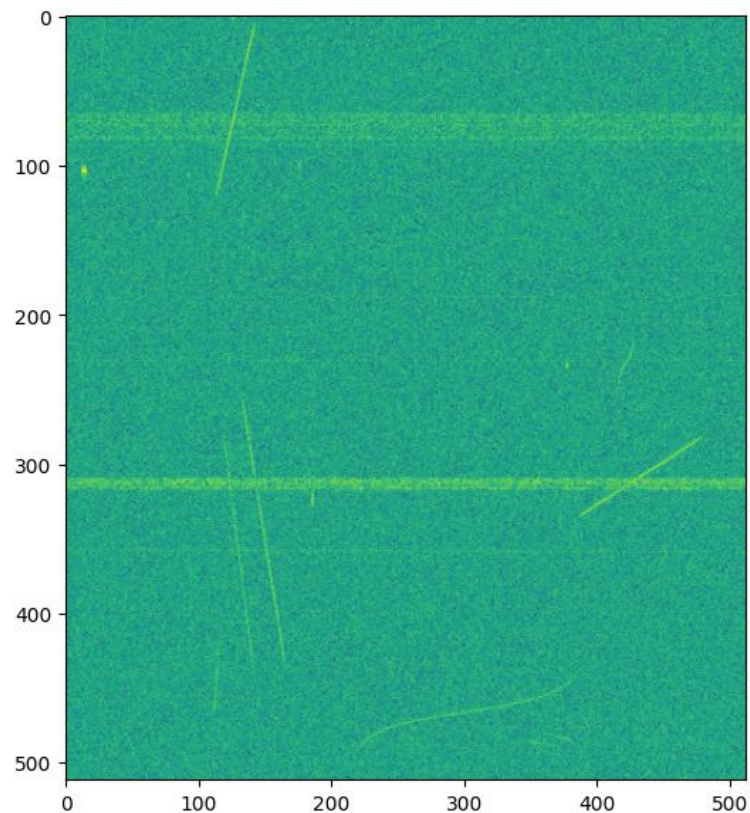
Exemple enregistrement simulateur de données



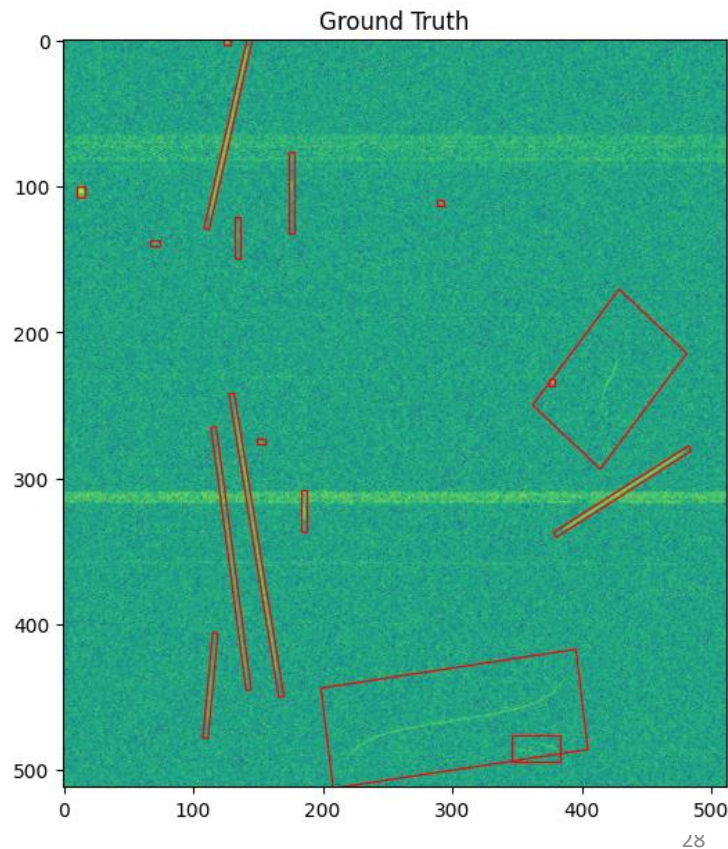
AVANTIX



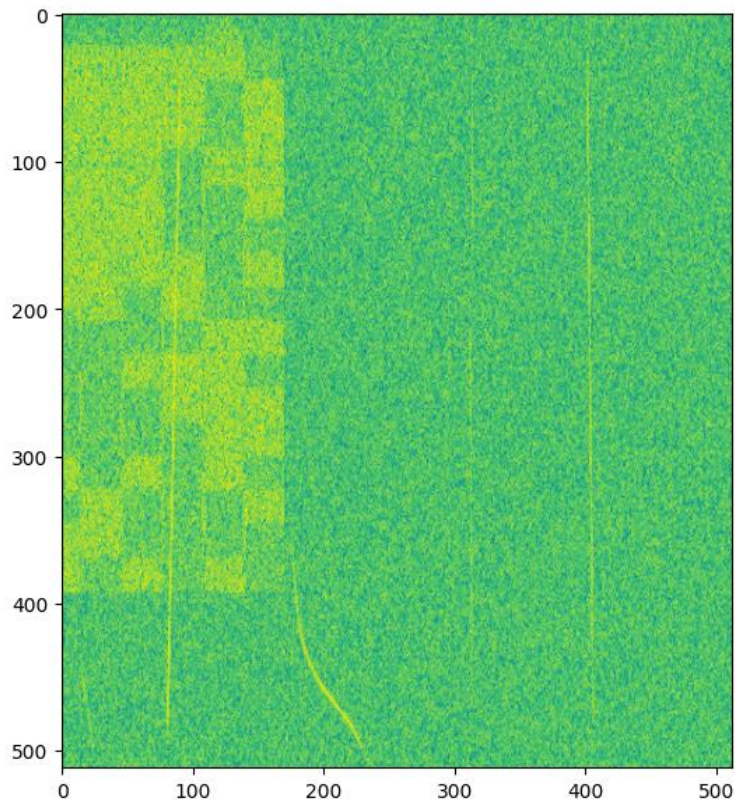
Exemple enregistrement simulateur de données



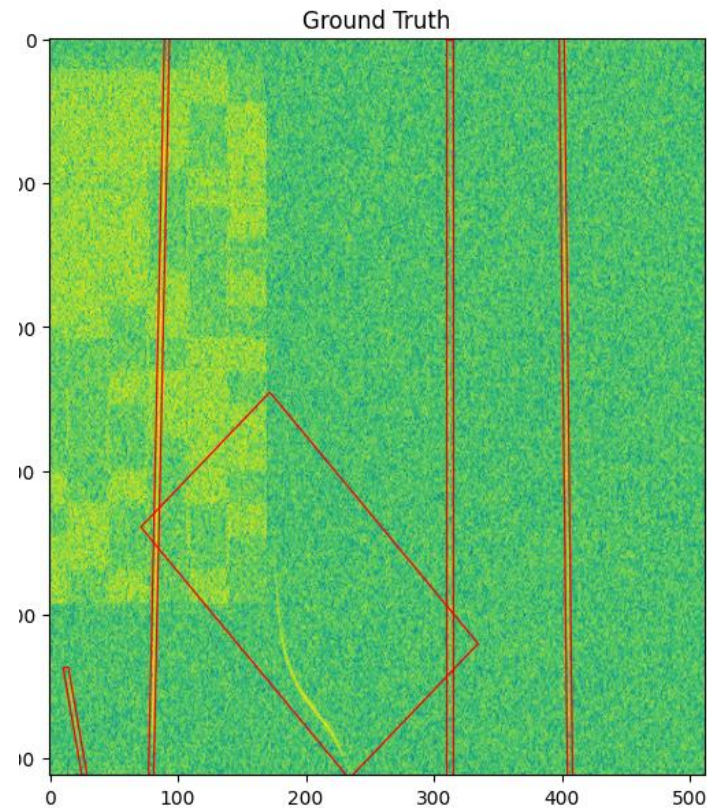
AVANTIX



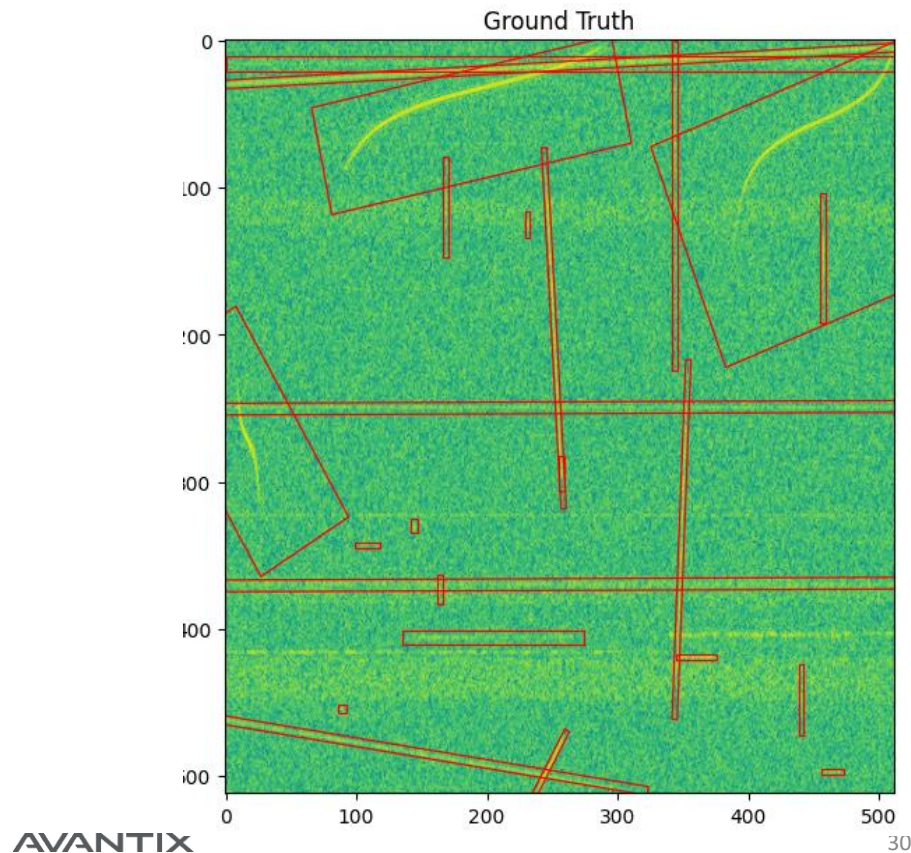
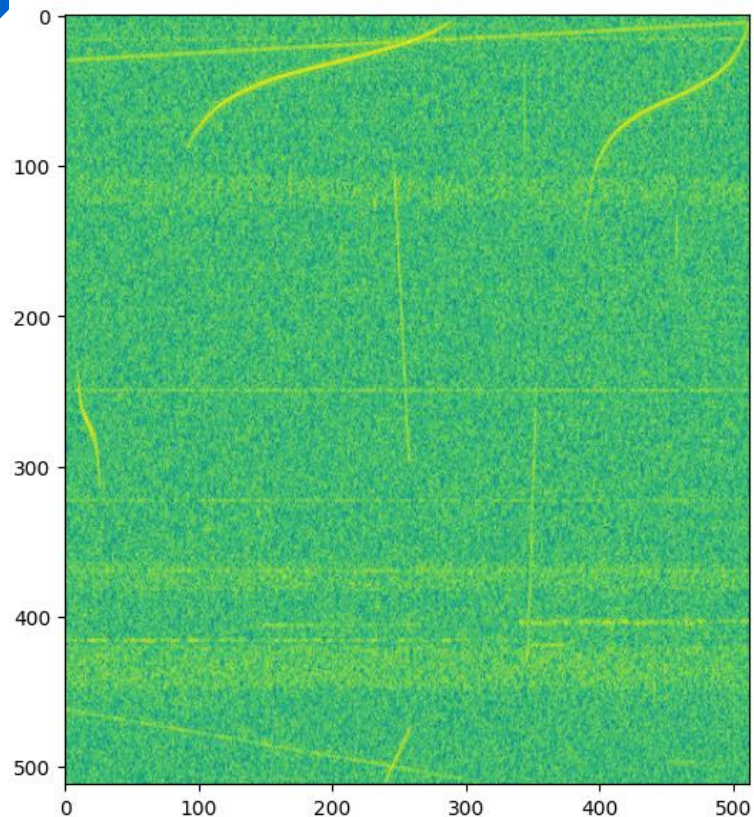
Exemple enregistrement simulateur de données



AVANTIX

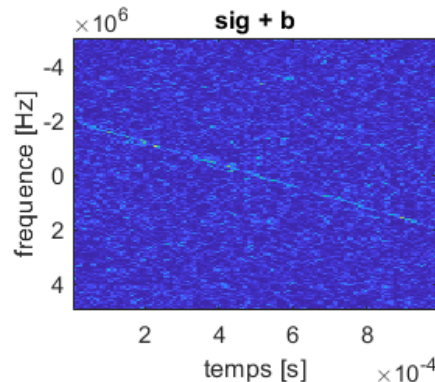
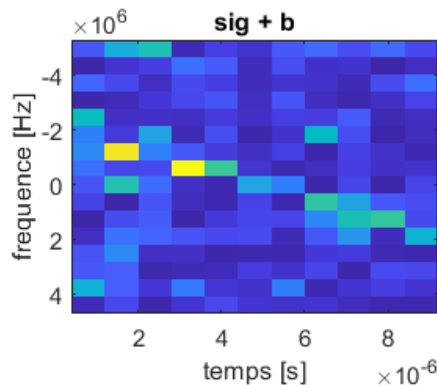
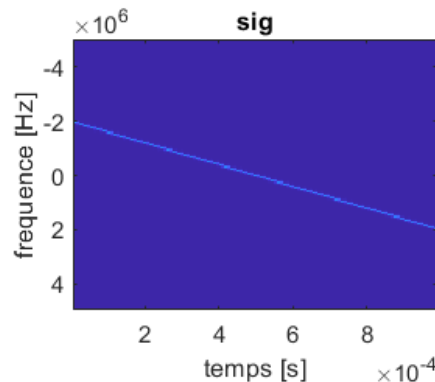
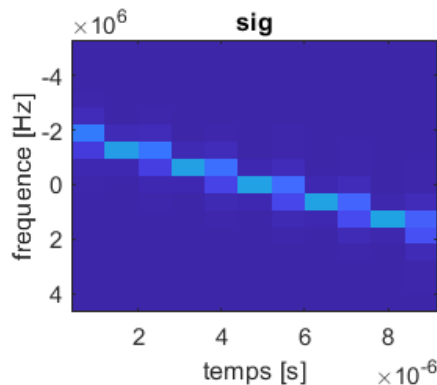


Exemple enregistrement simulateur de données



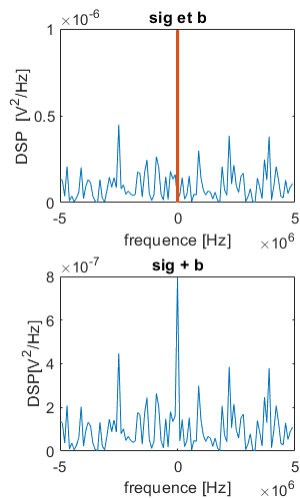
A partir de quel niveau de bruit on n'étiquette plus

- Pas d'étiquetage pour les impulsions noyées dans le bruit
- On veut définir un SNR adapté et seuiller
- Le SNR doit correspondre à ce que l'on voit sur le spectrogramme
- Regarder le pixel le plus brillant ne suffit pas
- Notre définition: $SNR_{sig} = 0dB$ si *sig* dépasse le bruit sur au moins une colonne avec $p = 0,5$

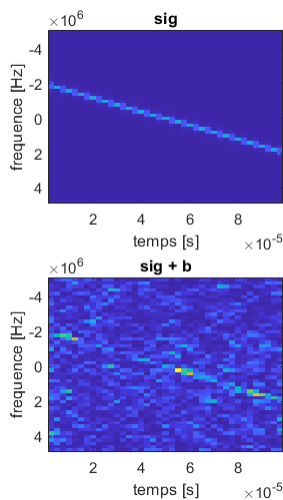


Différentes impulsions à 3dB

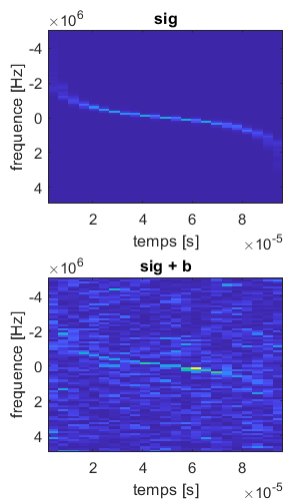
No mod
(une colonne)



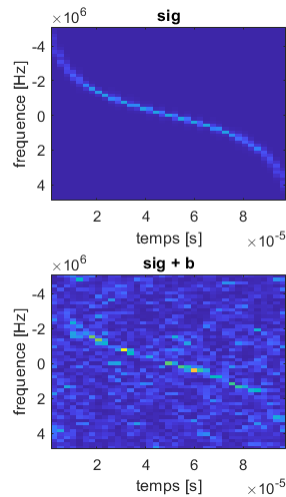
Chirp lin



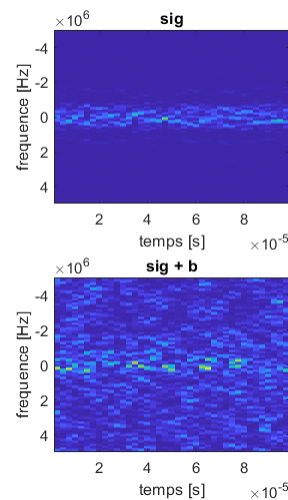
Chirp s



Chirp s



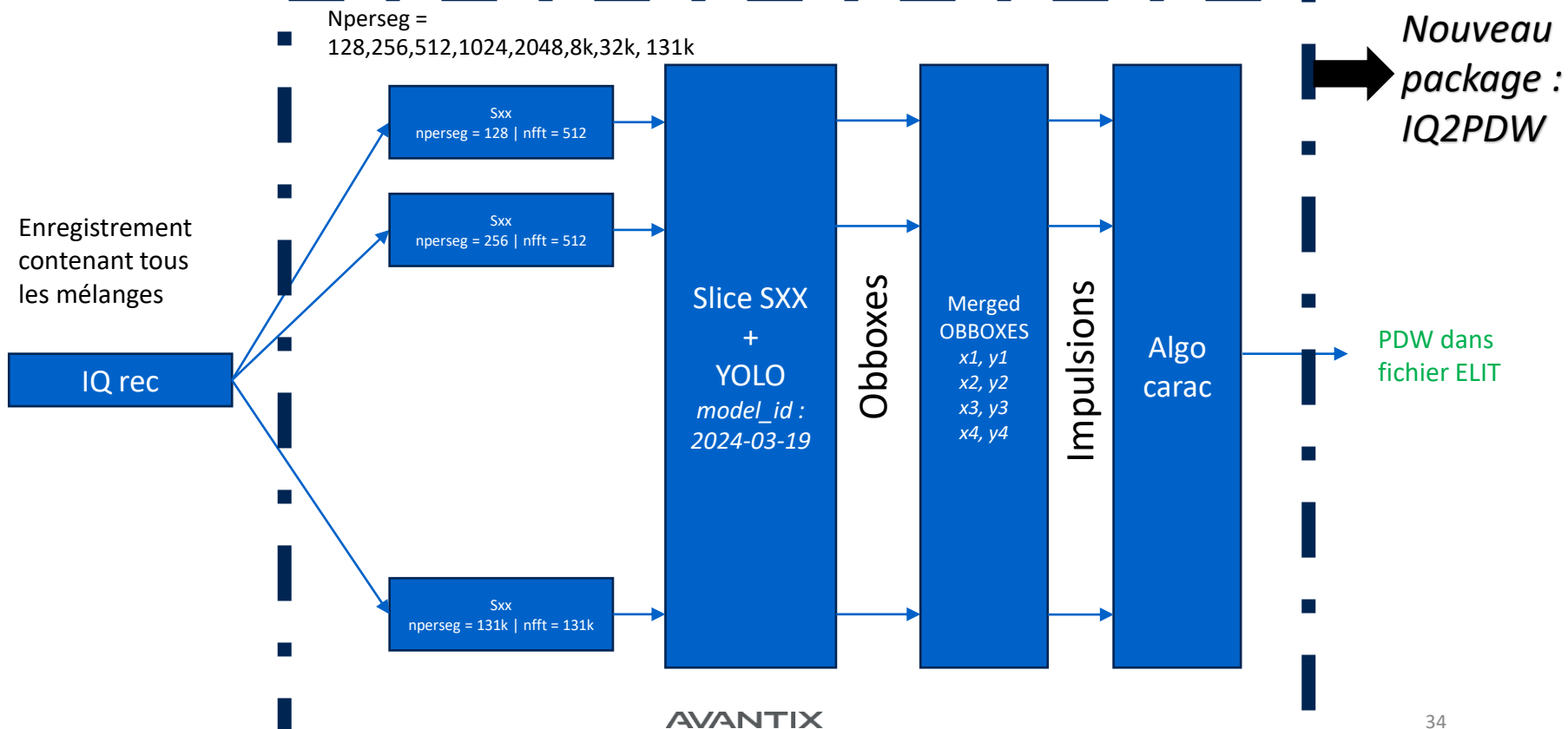
p mod



AVANTIX

Chaine de traitement

Chaine de traitement IQ bout-en-bout



Chaine de traitement IQ bout-en-bout

1. L'enregistrement va être prétraité à différentes échelles de STFT afin de garantir que chaque forme d'onde radar soit soumise à son échelle de FFT optimale
2. Chaque spectrogramme va traverser un modèle YOLOv8 afin détecter et pré-classer les types de formes d'ondes radar
3. Une seule des détections issues d'échelles de STFT différentes et quadrillant la même zone temps-fréquence est conservée
4. L'enregistrement est filtré en temps et en fréquence pour chaque détection réalisée
5. Un algorithme de caractérisation permettra d'obtenir les PDW de chaque détection

Détection : Object detection

YOLOv8



Classification



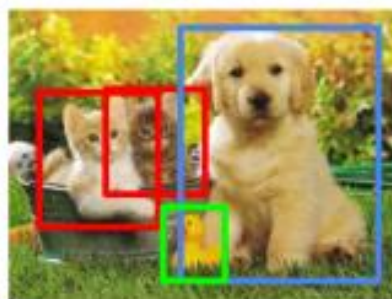
CAT

Classification
+ Localization



CAT

Object Detection



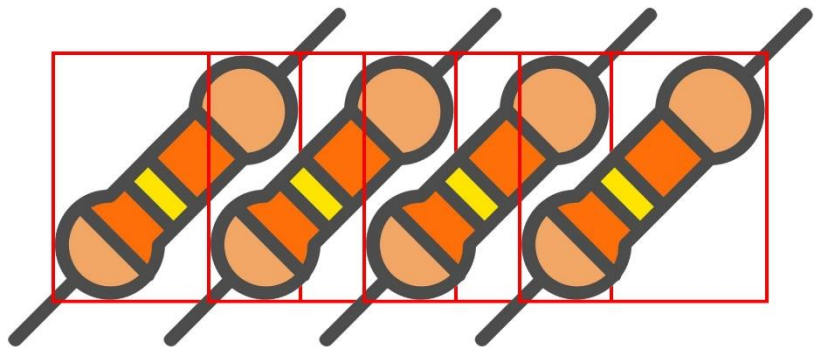
CAT, DOG, DUCK

Instance
Segmentation

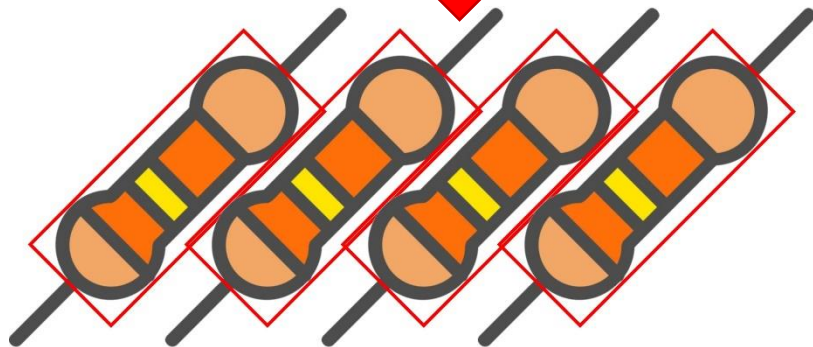


CAT, DOG, DUCK

Détection : Oriented Bounding Box

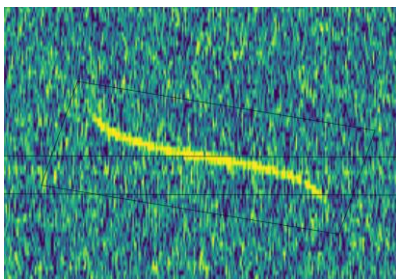


YOLOv8 OBB

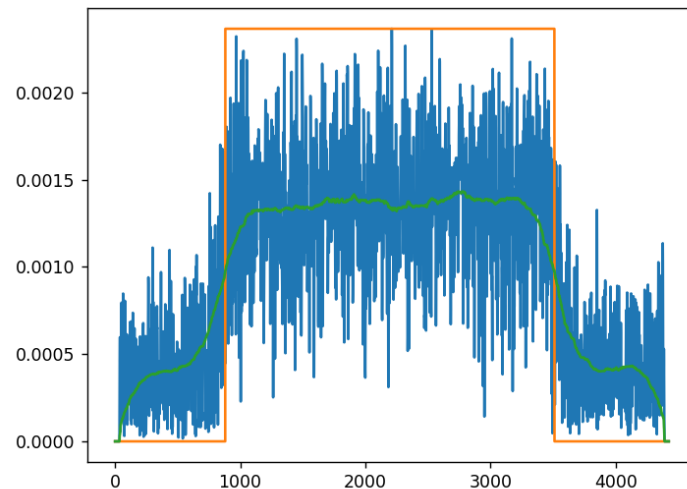


Caractérisation

1. On extrait le signal: selection des samples, déchirpage, filtrage, déchirpage
2. On cherche le début et la fin
3. On extrait des stats
4. On détermine la classe
5. On extrait les caractéristiques

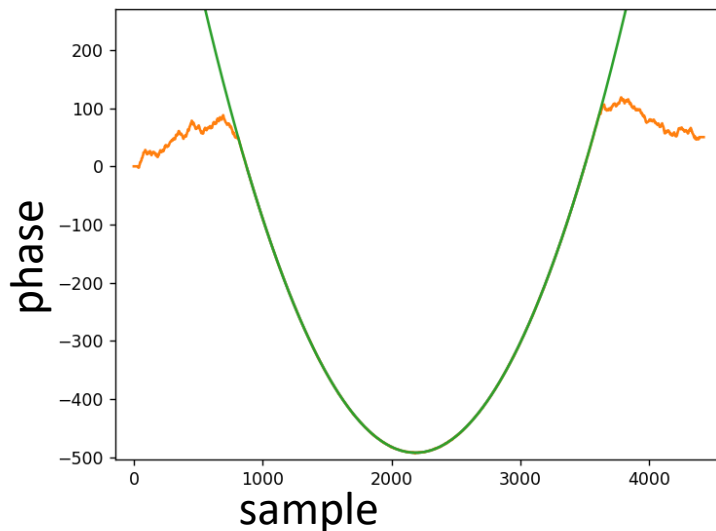


Module du signal filtré isolé
Filtre médian 512 samples
Résultat du seuillage

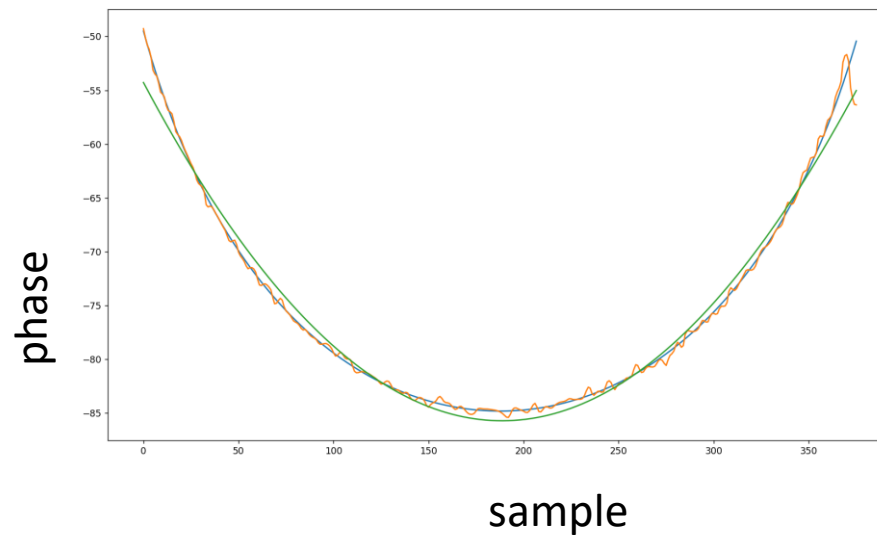


Suivi de la phase

Chirp linéaire



Chirp s-law



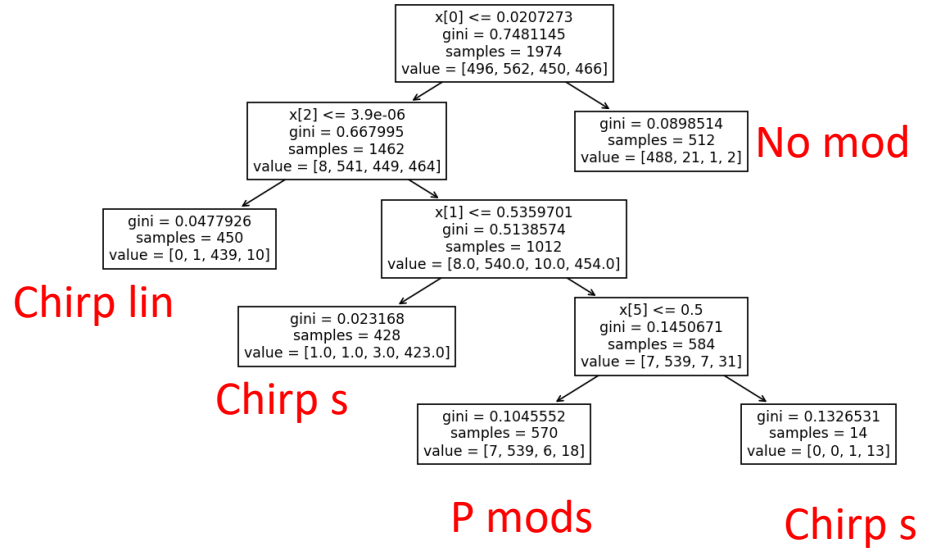
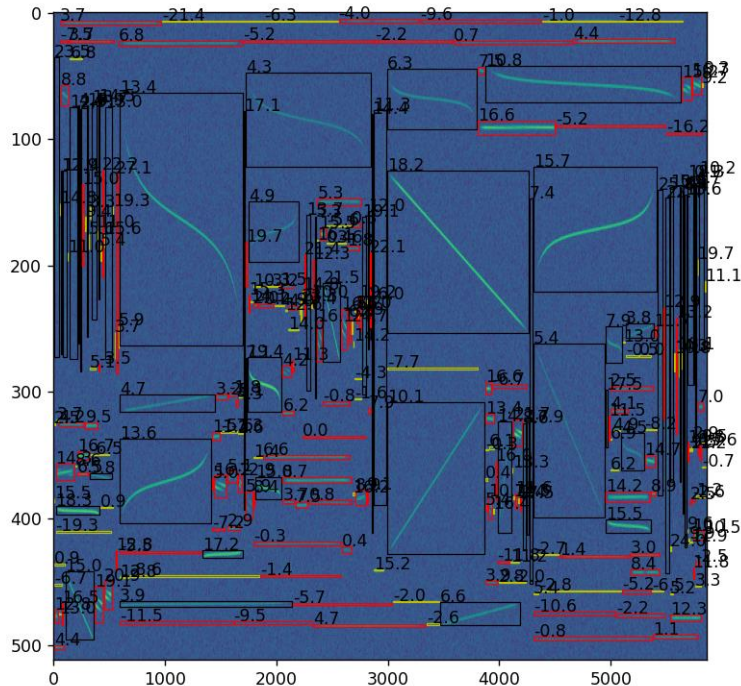
Phase modèle s-law

Phase modèle linéaire

Phase mesurée

Classification

Simulation adaptée à la classification

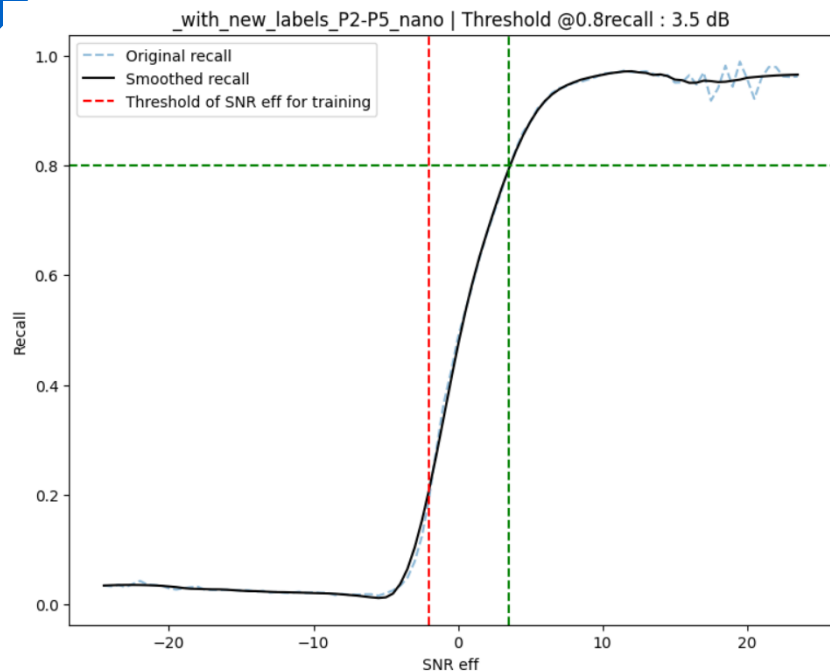


Une fois que l'on connaît la classe, on a fait le plus dur

AVANTIX

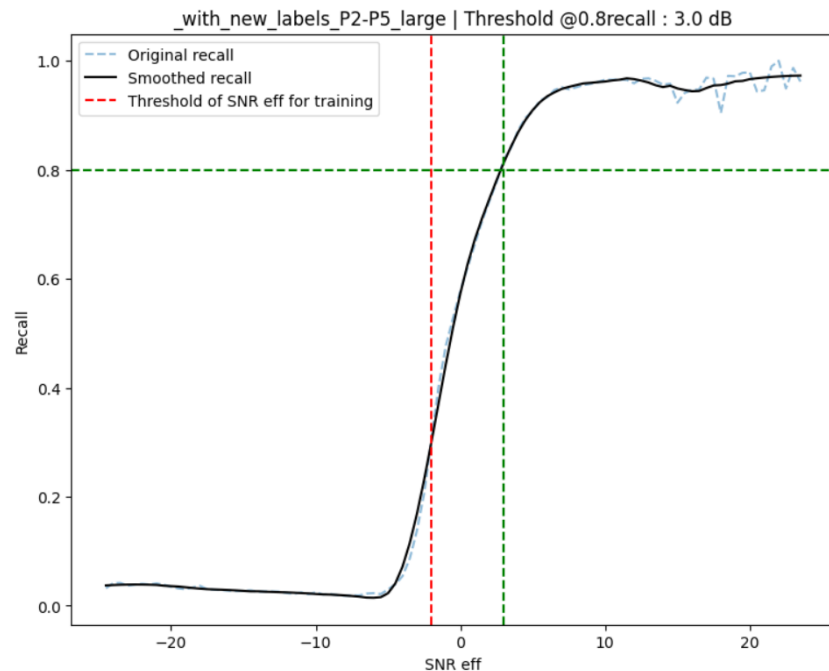
Résultats

Résultats BT102 : Stats sur train



Agg result

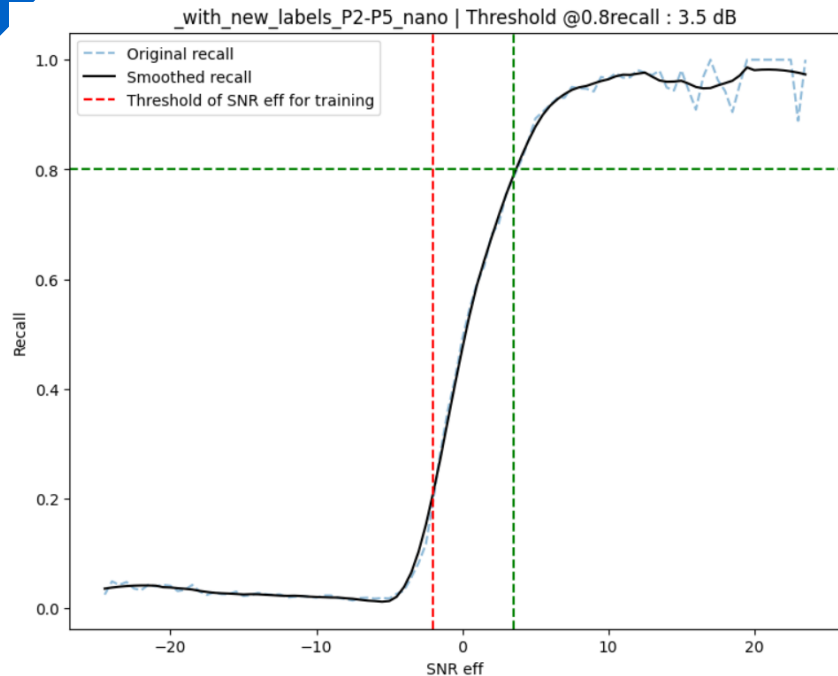
recall = 31.04% | precision = 91.75% | multidetection ratio = 2.79%



Agg result

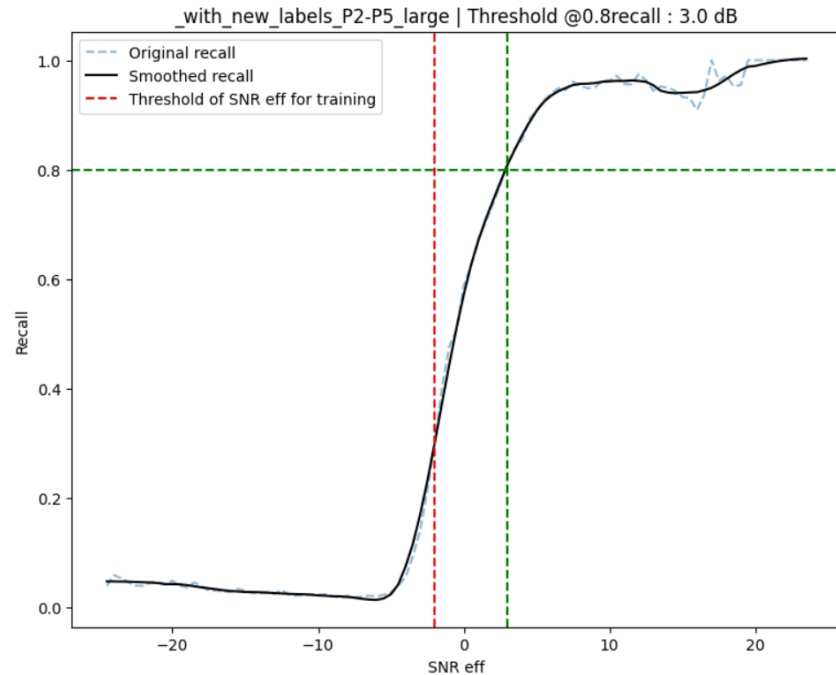
recall = 33.86% | precision = 91.54% | multidetection ratio = 3.13%

Résultats BT102 : Stats sur test



Agg result

recall = 30.82% | precision = 91.50% | multidetection ratio = 2.86%

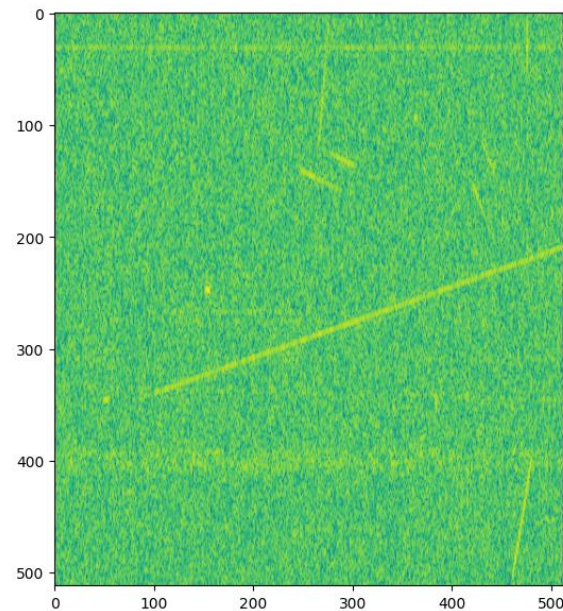
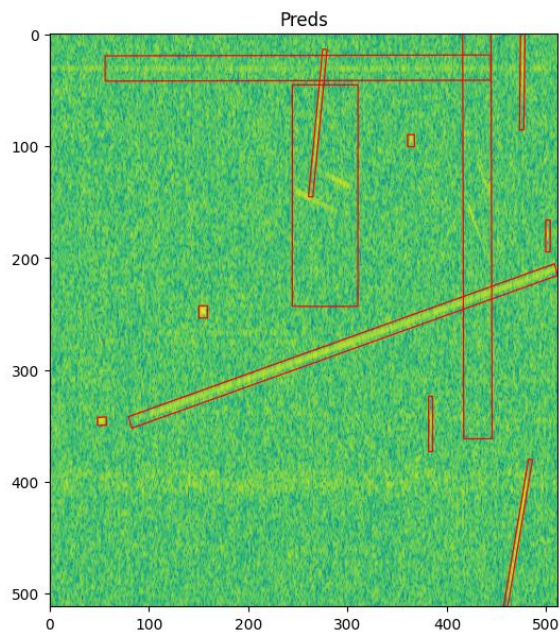
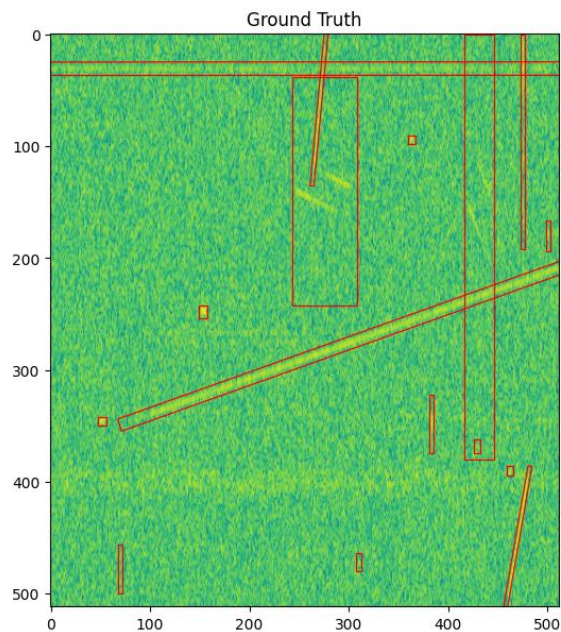


Agg result

recall = 33.59% | precision = 91.43% | multidetection ratio = 3.15%

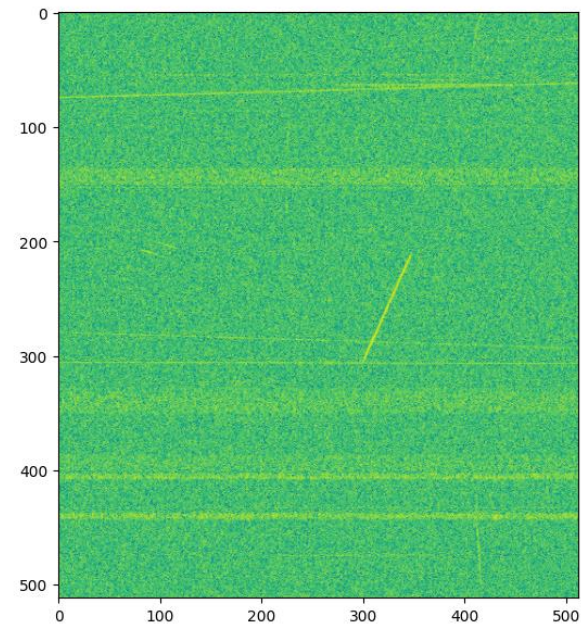
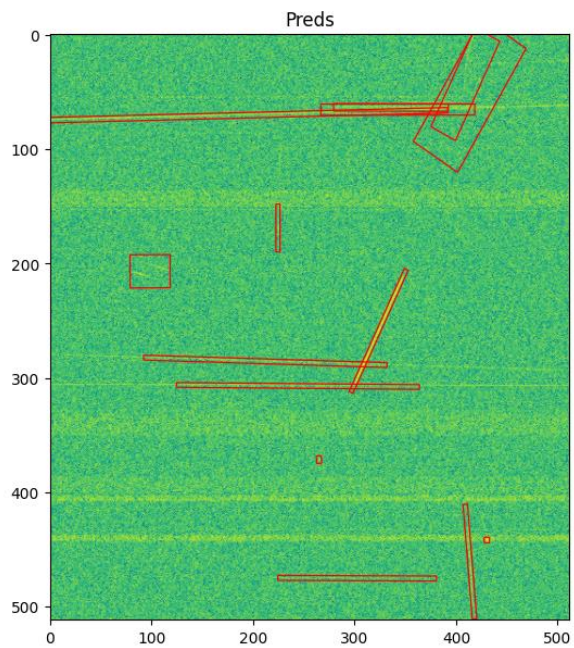
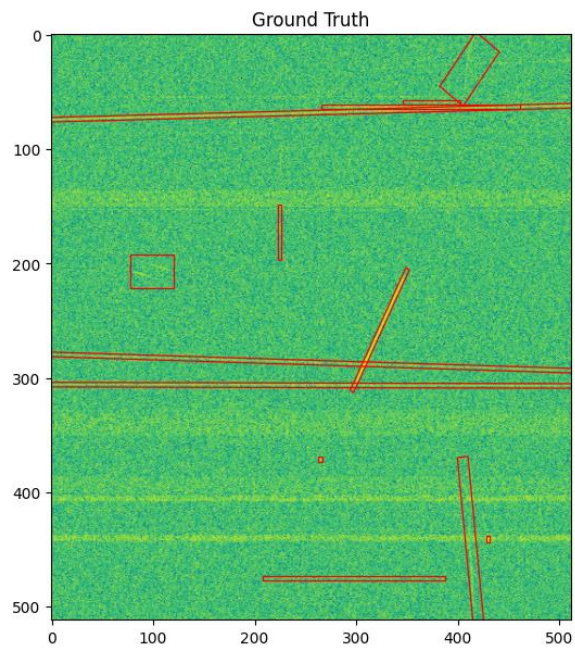
Résultats BT102 : ND peu énergétique

rec_59082_fs_500.0MSps_nperseg_128.png | Seed: 0



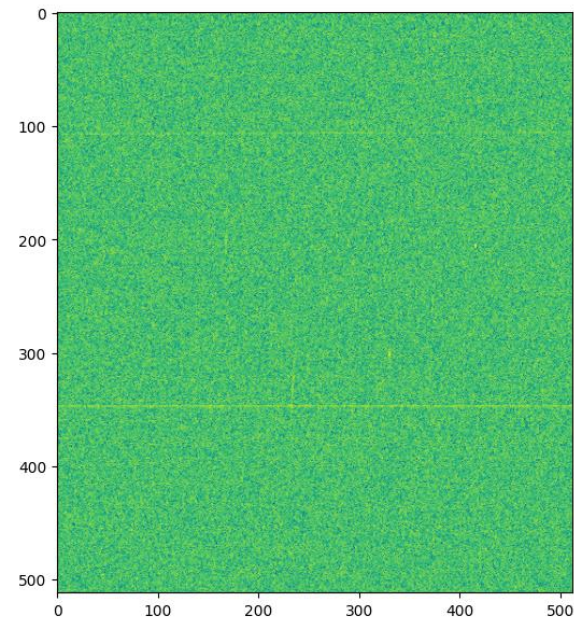
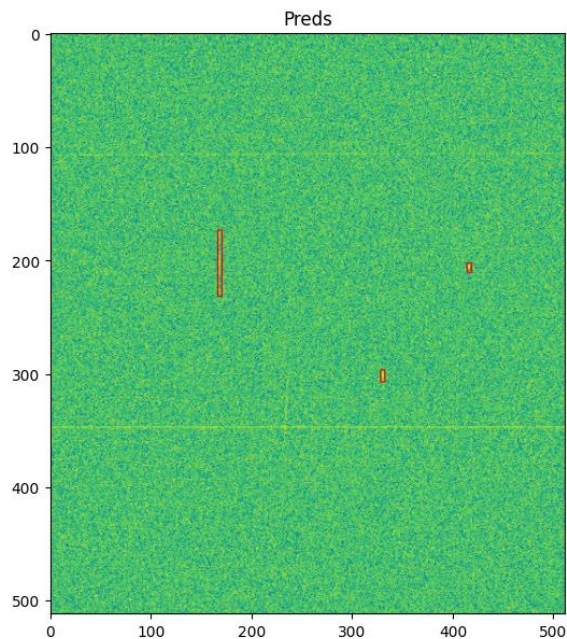
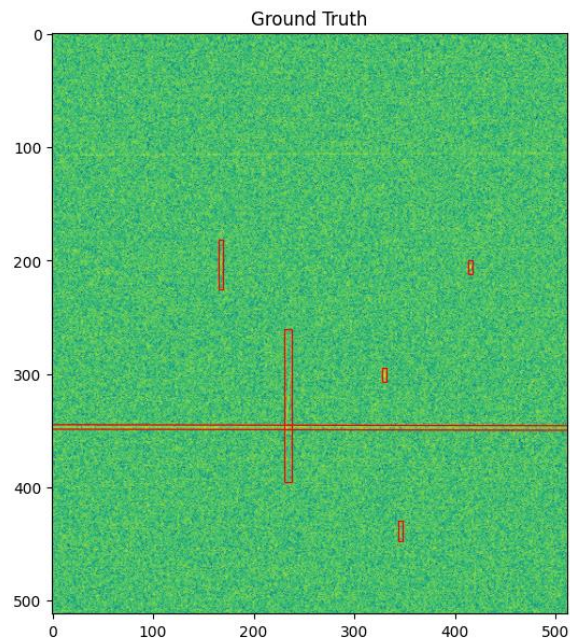
Résultats BT102 : multi-détection

rec_84355_fs_500.0MSps_nperseg_512.png | Seed: 2



Résultats BT102 : ND CW + impulsion

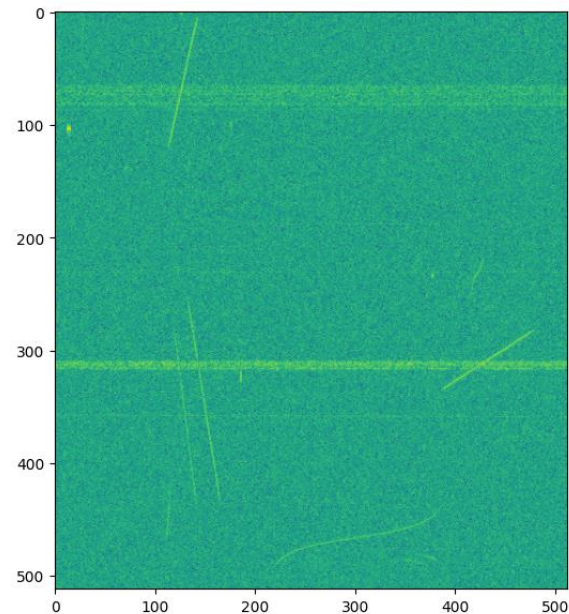
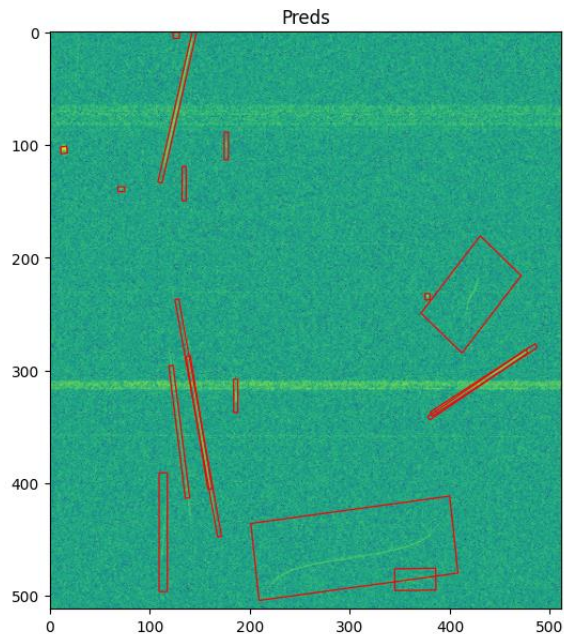
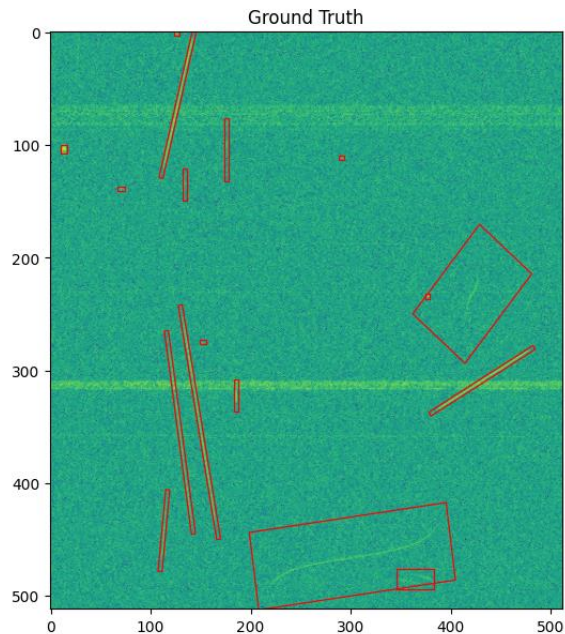
rec_45393_fs_500.0MSps_nperseg_512.png | Seed: 3



Lorsqu'une impulsion traverse un CW, le CW est souvent ND

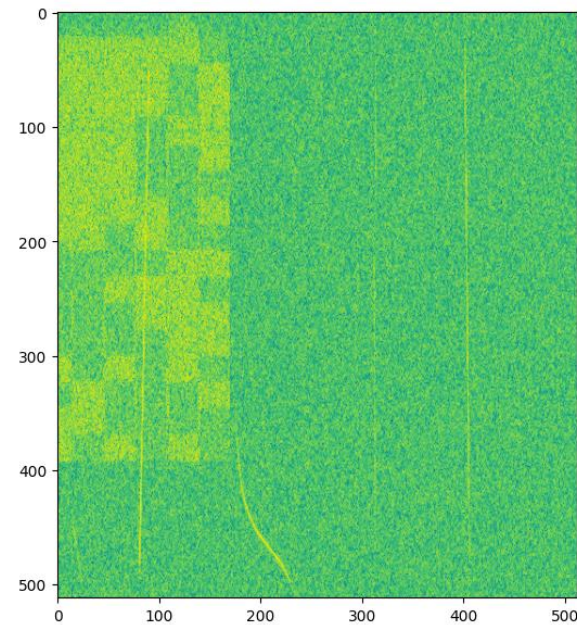
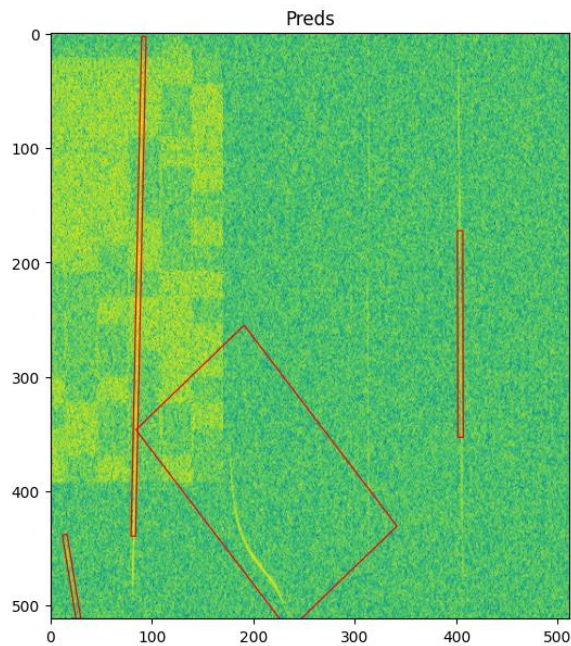
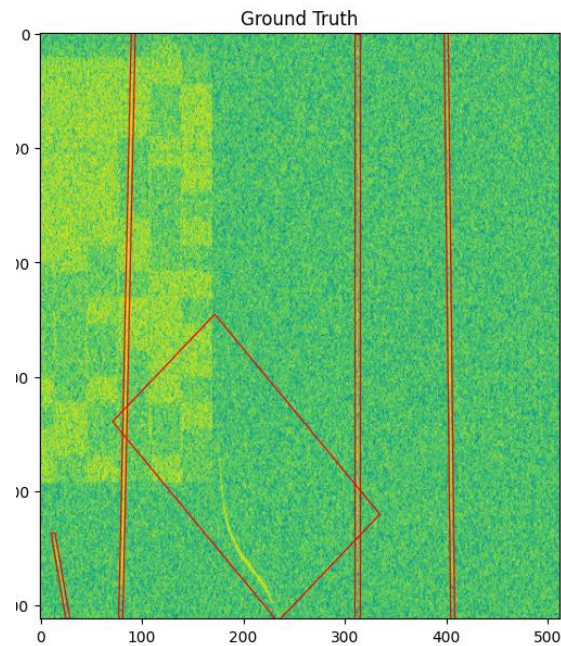
Résultats BT102 : Chirp angle erroné + multi détection

rec_38203_fs_1000.0MSps_nperseg_512.png | Seed: 4



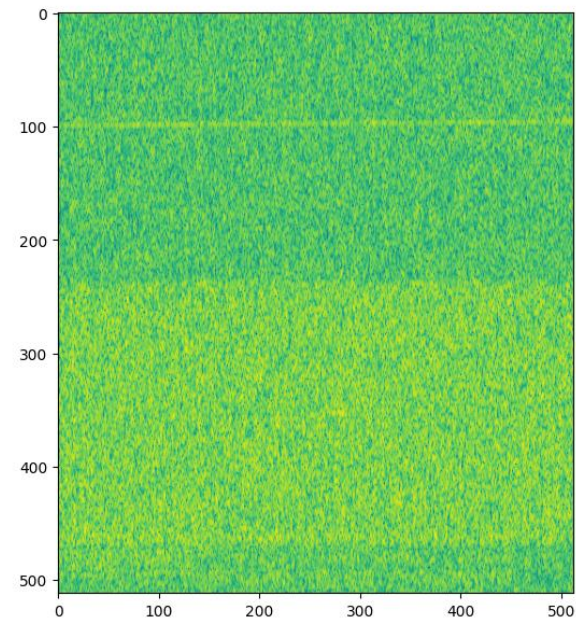
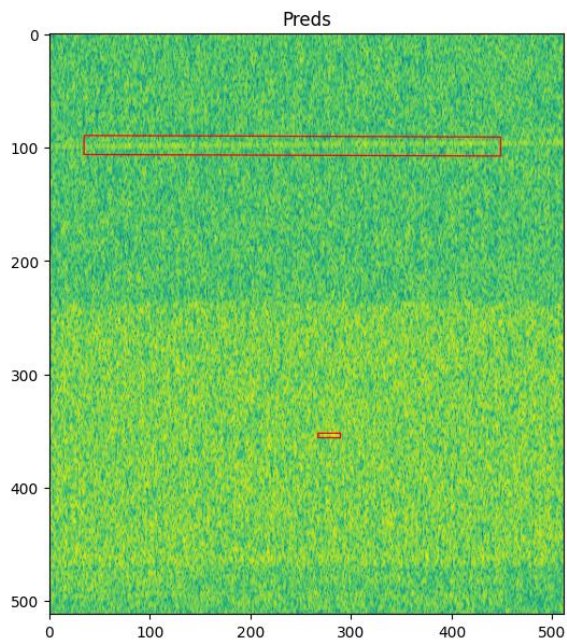
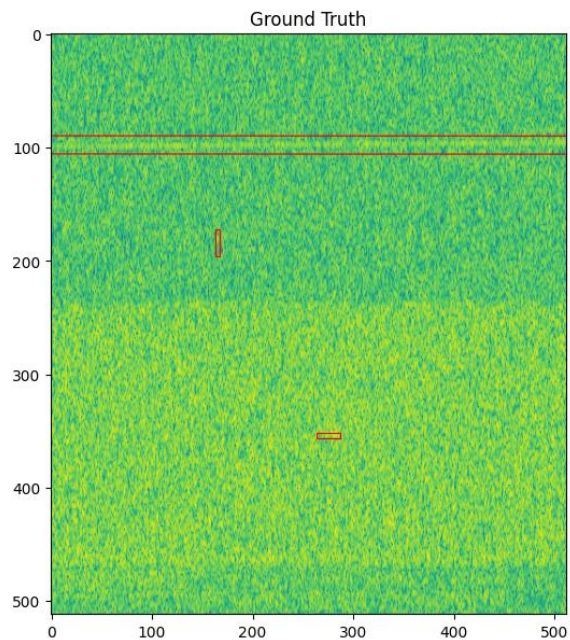
Résultats BT102 : FMCW ND

rec_16429_fs_4.0MSps_nperseg_256.png | Seed: 6



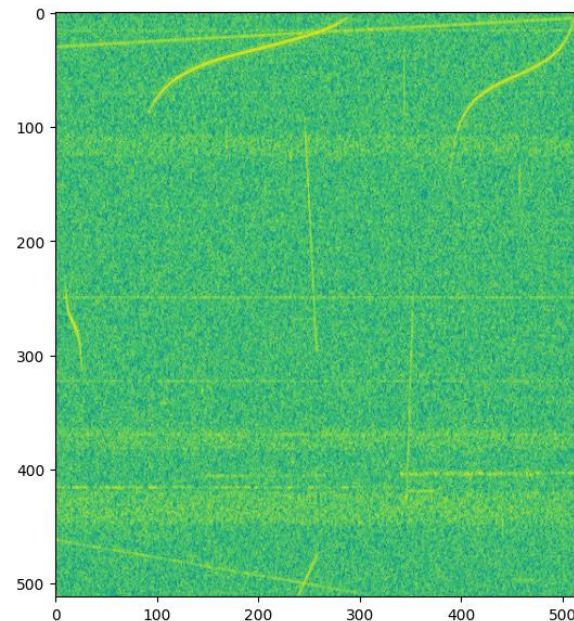
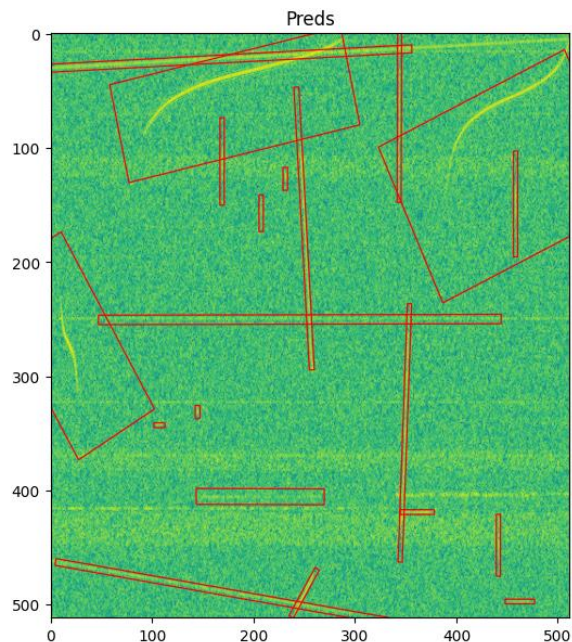
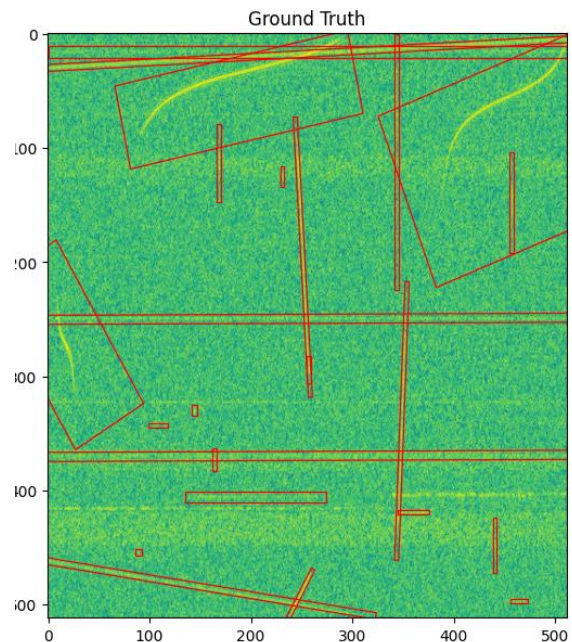
Résultats BT102 : interférence COM

rec_69569_fs_20.0MSps_nperseg_128.png | Seed: 1



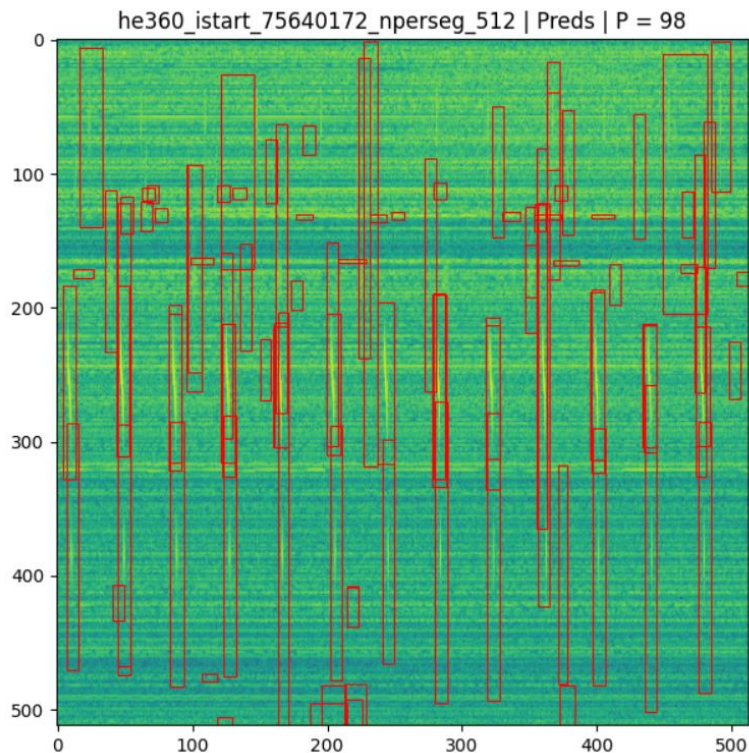
Résultats BT102 : Cas complexe quasi parfait

rec_58236_fs_500.0MSps_nperseg_256.png | Seed: 12

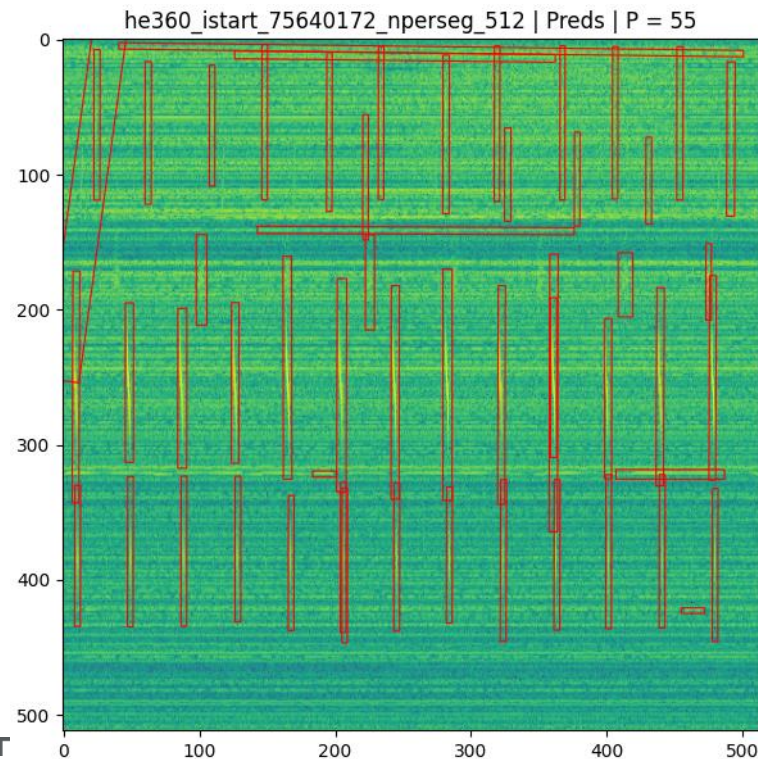


Importance d'une base de données représentative

BDD sans interférences

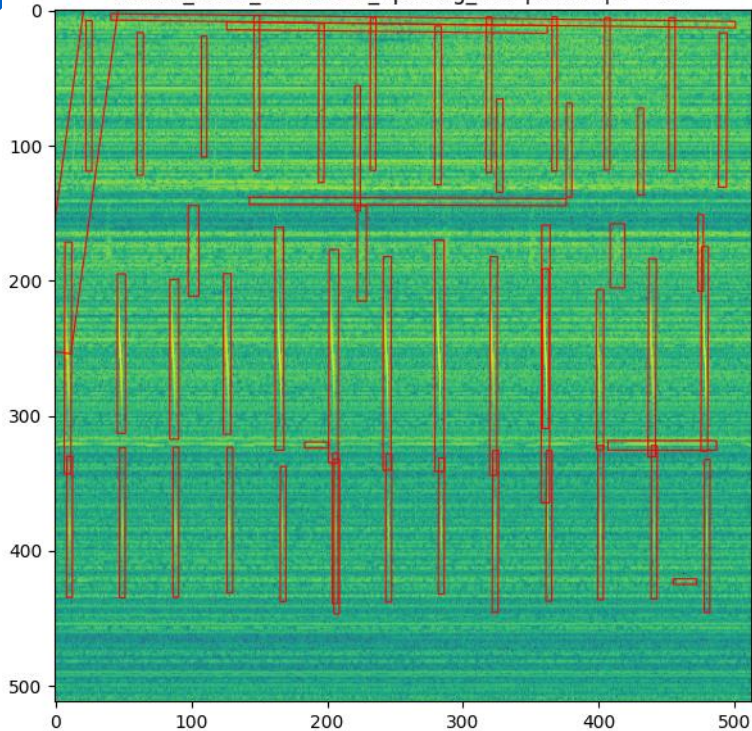


BDD avec interférences LTE/5G

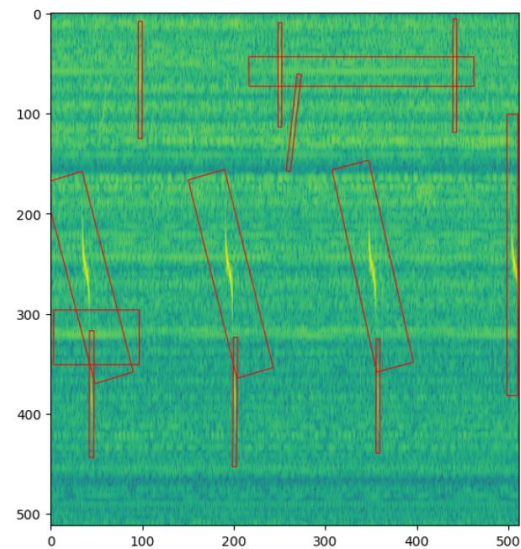
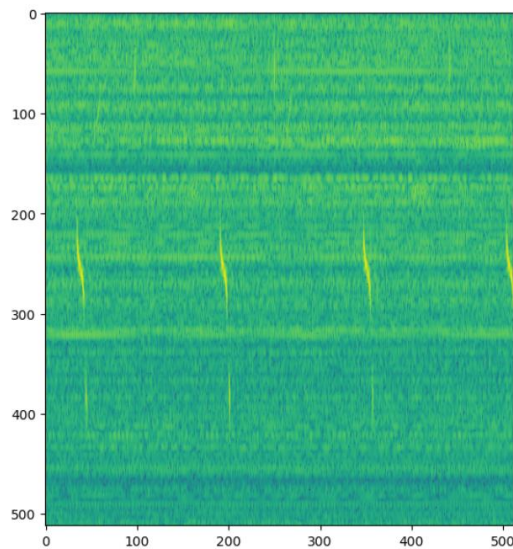


Résultats sur données réelles du YOLOv8-0BB nano

he360_istart_75640172_nperseg_512 | Preds | P = 55



he360_istart_75640172_nperseg_128 | Preds | P = 13



AVANTIX

Tâches à venir

TODO

- Ajouter d'autres types d'interférences et de signaux RADAR (polytimes, barker polyphasiques) et avoir une base de données ayant des exemples plus variés
- Améliorer/Adapter notre modèle d'IA à notre contexte métier
- Ajouter la phase de la STFT en plus du spectrogramme
- **Passage du temps différé au temps contraint**

AVANTIX

MERCI

BT1.0.2

Paramètres :

nperseg = [128, 256, 512]

noverlap = nperseg / 2

nfft = 512

fc_rec = 2.5 GHz

fs_rec = [4, 20, 100, 500, 1e3, 4e3] MS/s

dt_rec = 513 * nperseg / (2*fs_rec)

sigma_noise = 1mV

sig_types = [['radar'], ['radar', 'cellular']]

snr_db_opt_radar : friend / no friend

snr_db_opt_com = 35 dB

snr_db_eff = -2 dB

>100k enregistrements

DI (ns)	Sans Modulation	Modulations de Fréquence (MHz/μs)		Modulations de Phase Phase / Nombre de moments	
10-100	Oui	-	-	-	
100-1_000	Oui	-	-	-	
1_000-10_000	Oui	20	100	180°	7, 8
10_000-100_000	Oui	2	10	180°	7, 8, 13, 25, 33, 39
				60°	25, 30
				45°	8, 35, 70
100_000-1_000_000	Oui	10 ⁻³	1	180°	7, 8, 13, 25, 33, 39
				60°	25, 30
				45°	8, 35, 70
1_000_000-10_000_000	Non	0,001	0,1	-	
10_000_000-100_000_000	Non	0,0001	0,01	-	
100_000_000-inf	Non	0,00001	0,001	-	
CW	Oui	-	-	-	