

Encadrement

E. Itcia: Rockwell-Collins

J.-Y. Tourneret: IRIT/N7

F. Vincent: ISAE

**Rockwell
Collins**

Philippe Goy

Détection d'obstacles et de cibles de collision par un radar FMCW aéroporté



18/12/2012

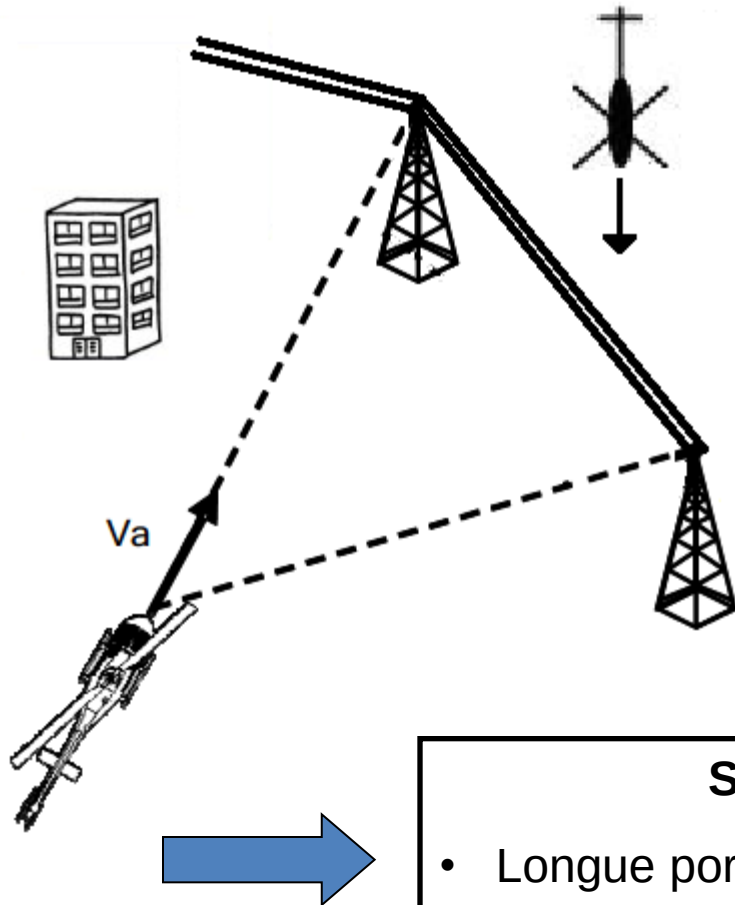
IRIT CNRS
INPT
UPS
UT1
Institut de Recherche en Informatique de Toulouse

Isae
Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace

Contexte applicatif



La problématique industrielle



Besoin

- Système aéroporté,
- Besoin croissant de sécurité,
- Aide à la navigation,
- Détection d'obstacles, anticollision.

Système de détection RADAR

- Longue portée de détection
- Opérationnel tout temps (météo et luminosité)

Radar FMCW: Avantages et Applications



Avantages

- Faible puissance émission,
- Bas-coût,
- Faible consommation,
- Excellentes résolutions

Applications (courte portée)

- Applications automobiles,
- **Anticollision,**
- Détection d'intrus,
- Surveillance côtière,

Extension aux applications aéroportées

- Imagerie du sol, suivi de terrain, aide à la navigation,
- **Détection d'obstacles, anticollision**
- Altimétrie,
- Météorologie, ...

Contexte applicatif



La problématique industrielle



Choix industriel

Radar FMCW aéroporté pour détection d'obstacles

Objectif industriel de la thèse

Augmentation de la portée du système: courte → moyenne

Sous contraintes

- Forme d'onde FMCW linéaire,
- Nombre d'antennes fixé en émission et réception,
- Prétraitements des données,
- Bande et fréquences émises, ...

Problématique



Augmentation de portée



Solution classique : augmenter la puissance émission

Non-applicable pour notre application

Fuite émission

- FMCW:
émission et réception simultanée
➡ Brouillage réception

Présence du sol

- Détection = contraste entre
une cible et son environnement

Augmentation de portée



Solution / Objectif scientifique

Développer des méthodes de traitement pour améliorer

- ***les capacités de détection,***
= portée du système.

Plan de la présentation

I. Les traitements existants

II. Réjection du fouillis et détection

III. Reconnaissance de cibles de collision

IV. Détection structurée dans le fouillis

I. Les Traitements existants

FMCW: Frequency Modulated Continuous Wave

Un Système FMCW linéaire

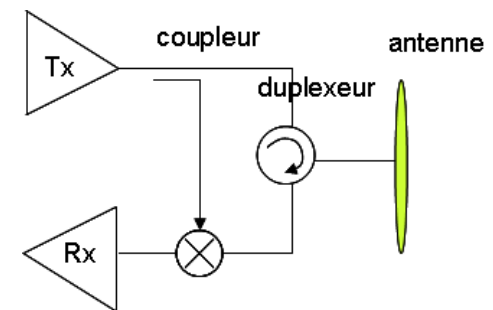
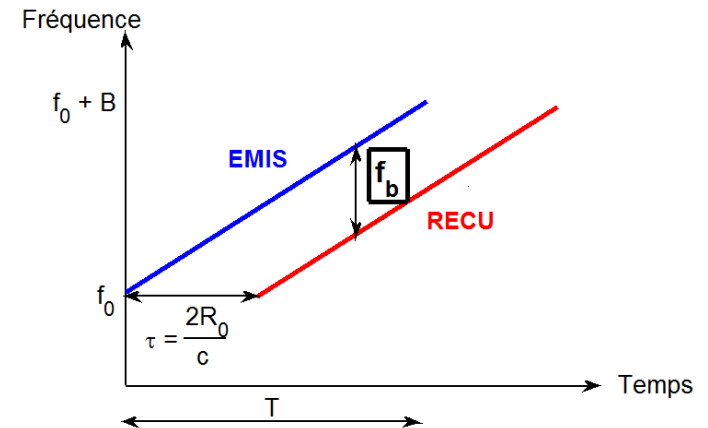
- émet et reçoit en continu et en simultané
- une onde modulée linéairement en fréquence
- appelée « chirp »

Mixage/déramping

- du signal reçu par réplique du signal émis

Signal de battement

- de fréquence proportionnelle à la distance



$$f_b = \frac{B}{T} \tau = \frac{2BR_0}{cT}$$

I. Les Traitements existants



Signal de battement



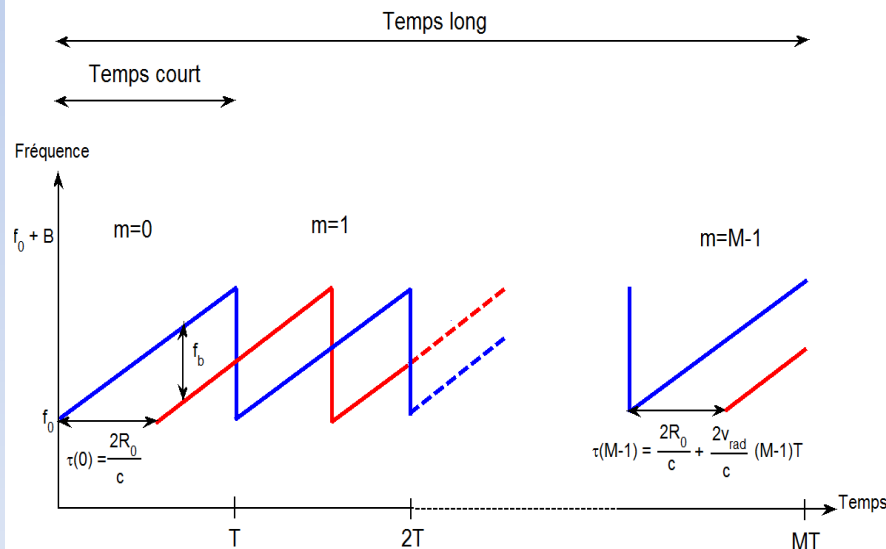
Répétition de l'onde FMCW

- évolution de la distance et du retard

$$\tau(t) = \frac{2R(t)}{c} = \frac{2R_0}{c} + \frac{2v_{rad}}{c}(t_c + mT)$$

Signal en deux dimensions

- Temps court durant un chirp t_c
- Temps long de chirp en chirp mT



I. Les Traitements existants



Signal de battement



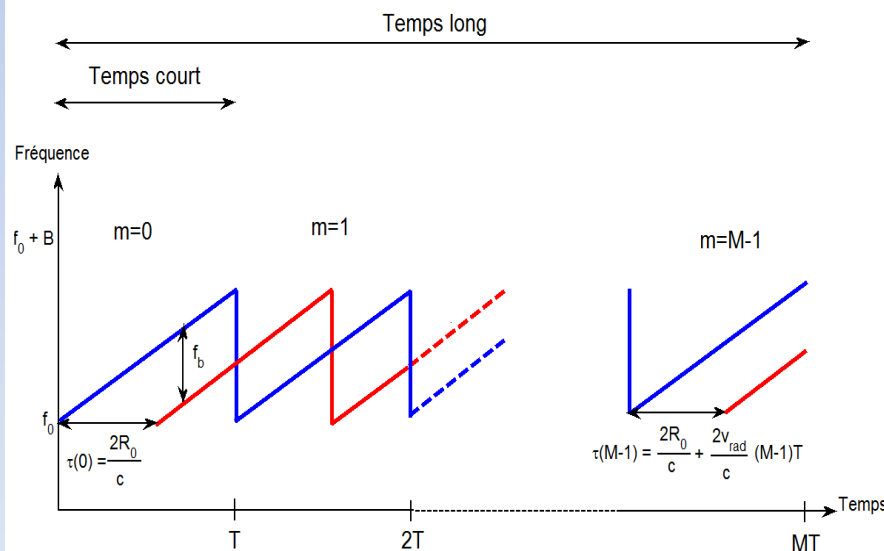
Répétition de l'onde FMCW

- évolution de la distance et du retard

$$\tau(t) = \frac{2R(t)}{c} = \frac{2R_0}{c} + \frac{2v_{rad}}{c}(t_c + mT)$$

Signal en deux dimensions

- Temps court durant un chirp t_c
- Temps long de chirp en chirp mT



$$s_b(t_c, m) \sim \boxed{e^{j2\pi f_b t_c}} \boxed{e^{j2\pi f_D mT}}$$

Mesure de
distance

Mesure de
fréquence
Doppler

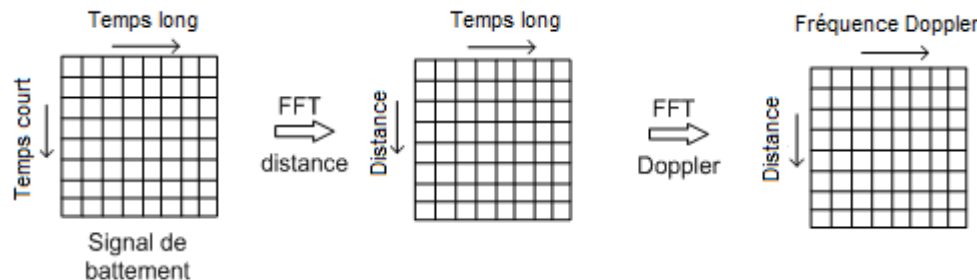
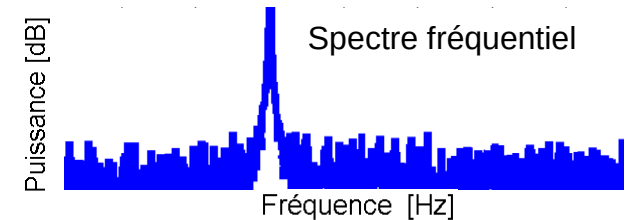
I. Les Traitements existants

Carte distance-Doppler

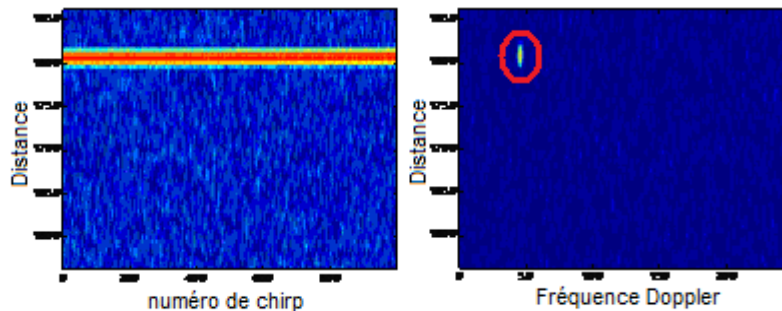
Mesure de fréquences = Transformée de Fourier

Signal temporel

$$e^{j2\pi f t}$$



La cible est vue sur la même case distance durant le temps d'intégration.



Deux FFTs successives

- sur t_c = DISTANCE
- sur mT = DOPPLER
- Localisation sur une carte distance-Doppler

I. Les Traitements existants



Compensation de migration



Migration en distance des cibles

- forte vitesse ou temps d'intégration élevé

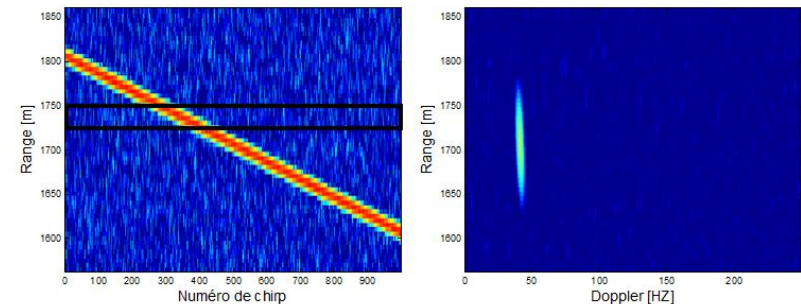
$$Mv_{rad}T > \Delta R$$

- couplage temps court/temps long

$$s_b(t_c, m) \sim e^{j2\pi f_b t_c} e^{j2\pi f_D m T} e^{j\frac{4\pi B v_{rad}}{c} m t_c}$$

à éliminer par hypothèse de vitesse

Avant compensation



I. Les Traitements existants

Migration et compensation

Migration en distance des cibles

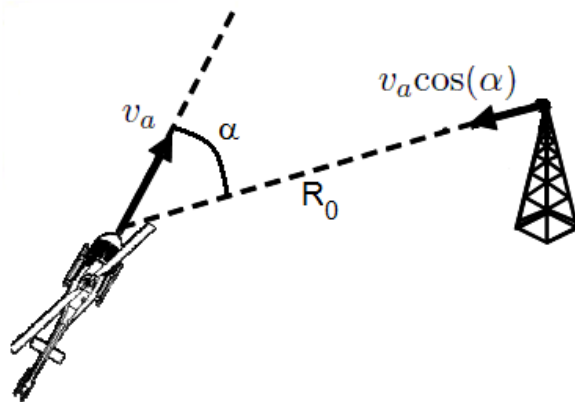
- forte vitesse ou temps d'intégration élevé

$$Mv_{rad}T > \Delta R$$

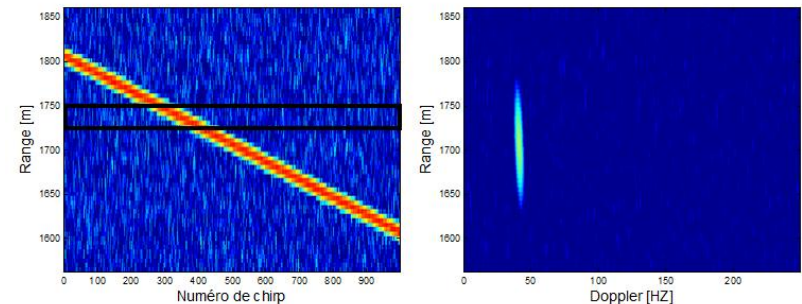
- couplage temps court/temps long

$$s_b(t_c, m) \sim e^{j2\pi f_b t_c} e^{j2\pi f_D m T} e^{j\frac{4\pi B v_{rad}}{c} m t_c}$$

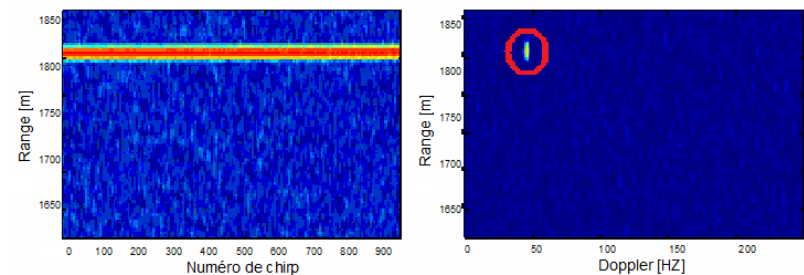
à éliminer par hypothèse de vitesse



Avant compensation



Après compensation



I. Les Traitements existants

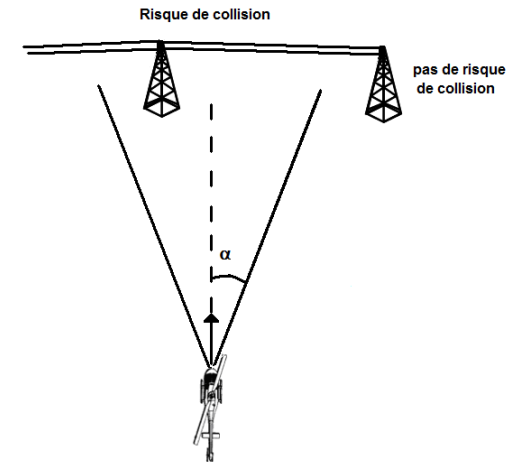


Localisation angulaire



Besoins opérationnels

Localisation des cibles en angle



I. Les Traitements existants

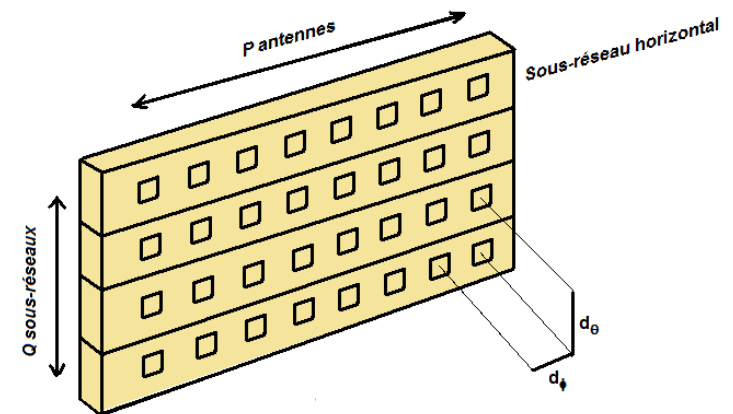
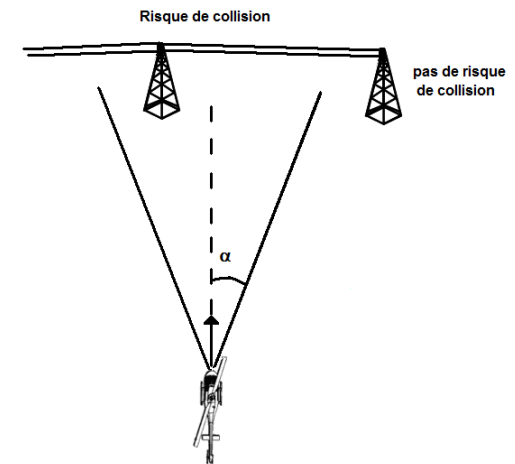
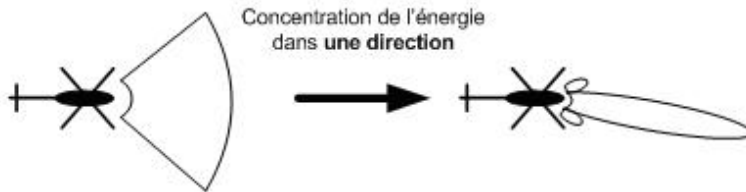
Localisation angulaire

Besoins opérationnels

Localisation des cibles en angle

Réseau d'antennes en réception

- Formation de faisceaux: localisation angulaire
- Gain de traitement spatial



I. Les Traitements existants



Formation de faisceaux conventionnelle

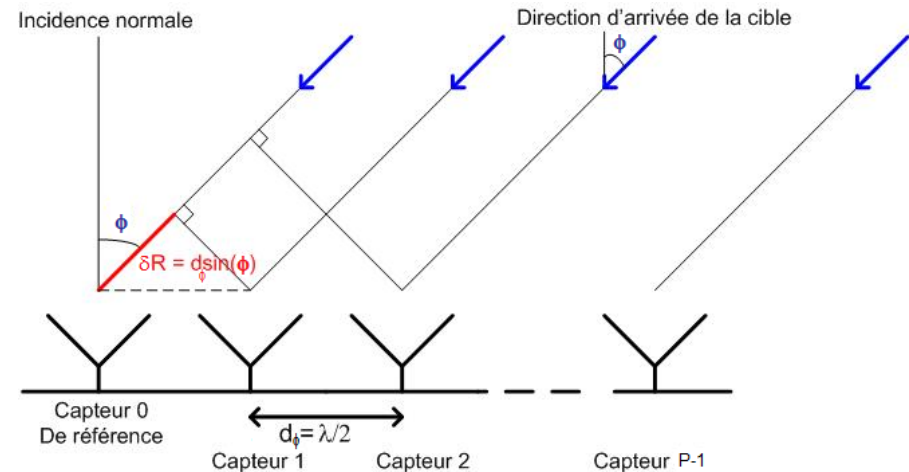


Principe

- Différence de retard entre capteurs qui dépend de l'angle d'arrivée

$$\frac{2\pi}{\lambda} p d_{\phi} \sin(\phi)$$

- Remise en phase et sommation pour une direction donnée



I. Traitements existants



Formation de faisceaux conventionnelle

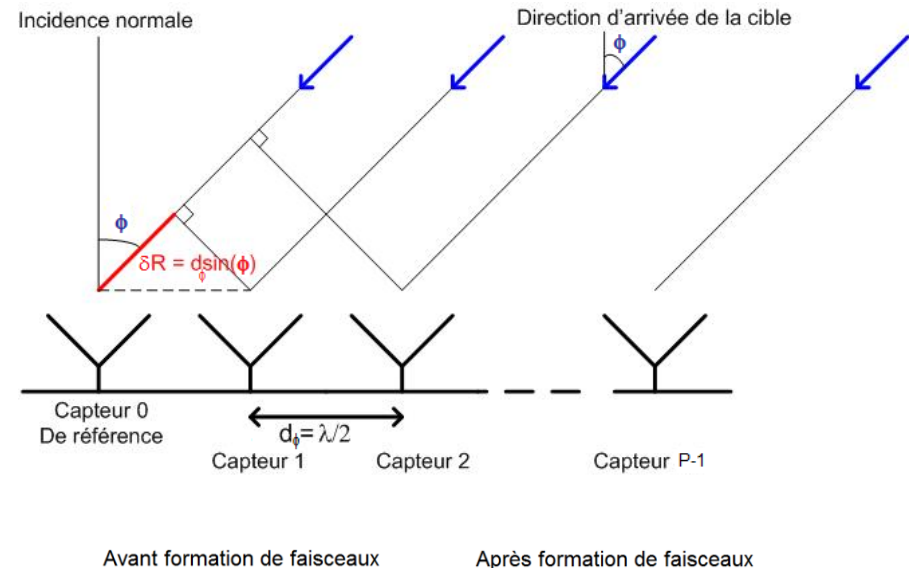


Principe

- Différence de retard entre capteurs qui dépend de l'angle d'arrivée

$$\frac{2\pi}{\lambda} p d_{\phi} \sin(\phi)$$

- Remise en phase et sommation pour une direction donnée



- Traitement le plus simple,
- Balayage par hypothèses dans le plan horizontal

I. Les Traitements existants



Détection par contraste de puissance

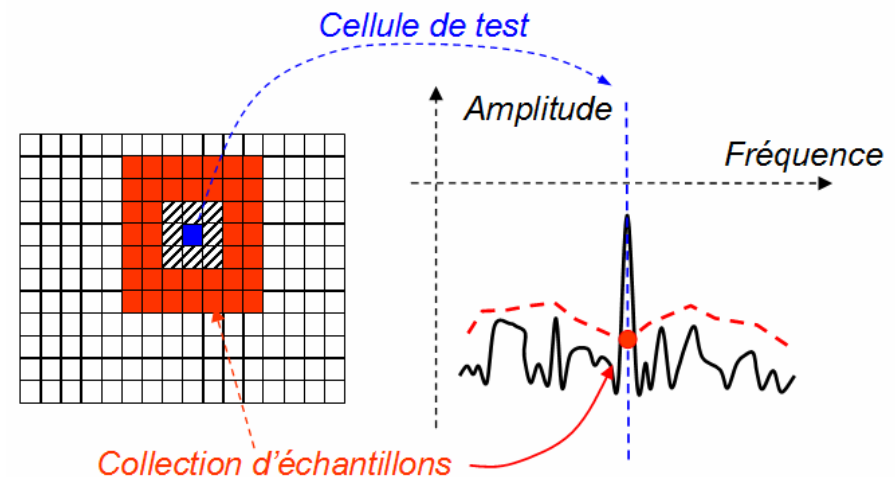


Détection = Décision de présence de cibles

- Calcul du niveau de bruit ambiant autour de la case sous test
- Rapport Signal à Bruit (RSB)
- Comparaison RSB avec un seuil de détection

Fausse alarme

= Seuil dépassé par bruit seul



I. Les Traitements existants



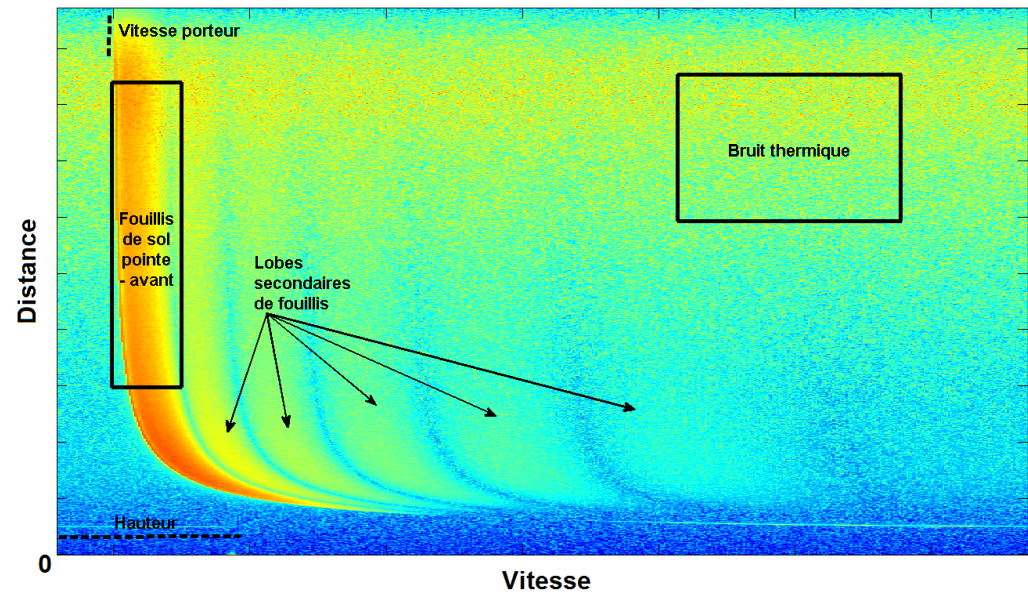
Le fouillis de sol perturbe la détection des obstacles



Fouillis de sol = échos de tous les réflecteurs au sol

- présent à toutes les distances (>hauteur), et à tous les angles
- Les obstacles à détecter tombent dans les zones de fouillis

- Diminution du RSB dans les zones de fouillis
- Nécessité de prendre en compte le fouillis dans l'étage de détection



I. Les Traitements existants



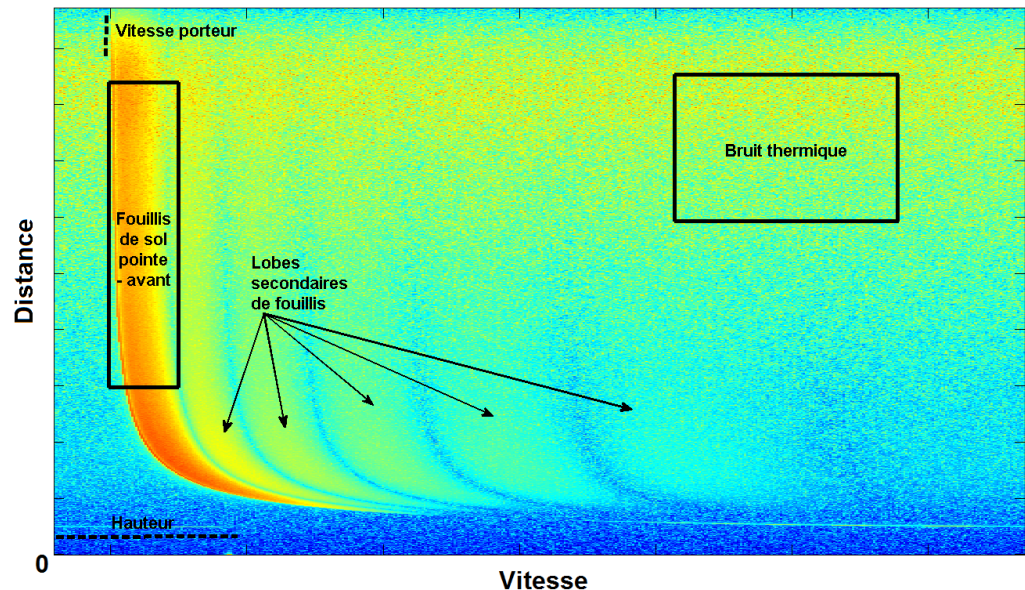
Le fouillis de sol perturbe la détection des obstacles



Fouillis de sol = échos de tous les réflecteurs au sol

- présent à toutes les distances (>hauteur), et à tous les angles.
- Les obstacles à détecter tombent dans les zones de fouillis

- Diminution du RSB dans les zones de fouillis
- Nécessité de prendre en compte le fouillis dans l'étage de détection



Objectif: améliorer les performances de détection
dans les zones de fouillis

Plan de la présentation

I. Les traitements existants

II. Réjection du fouillis et détection

III. Reconnaissance de cibles de collision

IV. Détection structurée dans le fouillis

II. Réjection de fouillis

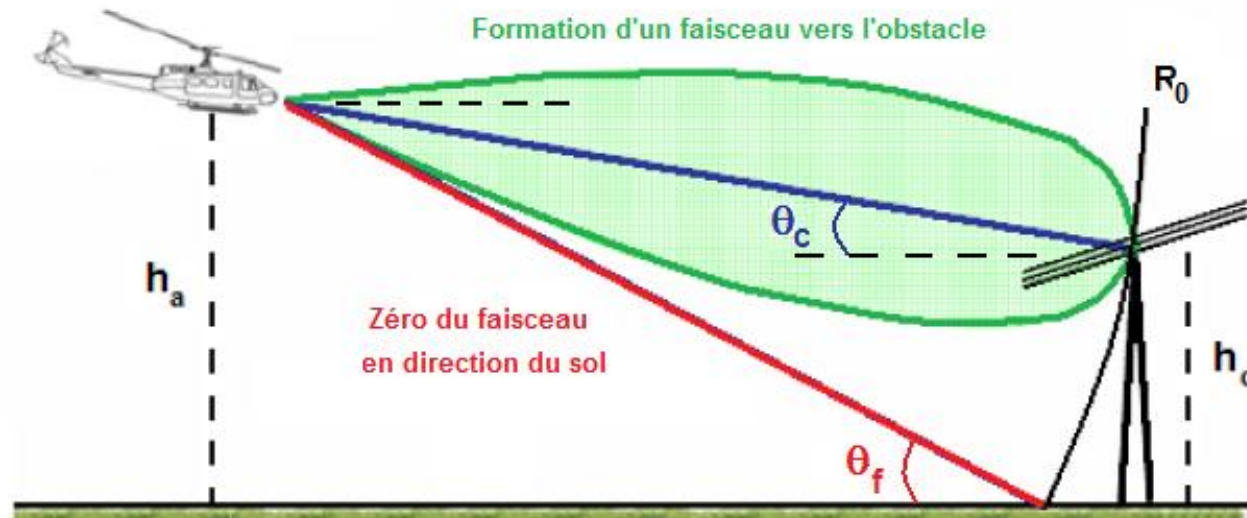


Traitement d'antennes en élévation



Principe général

- Exploiter la différence de hauteur (élévation) entre le sol et l'obstacle,
- Utilisation du réseau vertical d'antennes en réception,
- Rejeter le fouillis de sol et détecter l'obstacle.



II. Réjection de fouillis

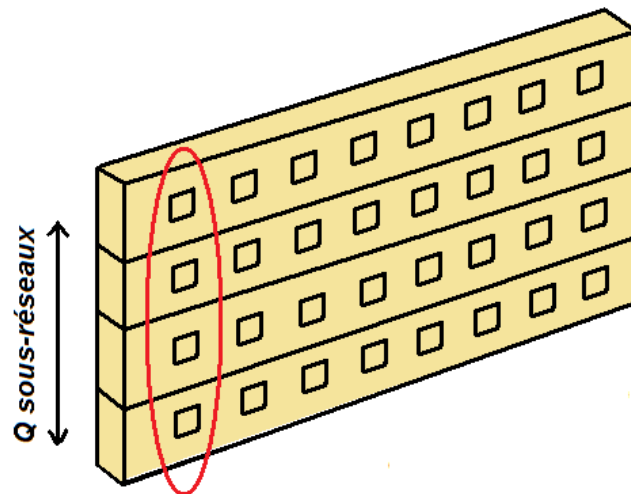


Traitement d'antennes en élévation



Principe général

- Exploiter la différence de hauteur (élévation) entre le sol et l'obstacle,
- Utilisation du réseau vertical d'antennes en réception,
- Rejeter le fouillis de sol et détecter l'obstacle.



Signal spatial

= même case distance-vitesse vue
par les Q antennes verticales

Déphasage caractéristique de
l'élévation de la cible

$$\frac{2\pi}{\lambda} d_{\theta} \sin(\theta)$$

II. Réjection de fouillis



État de l'art / Solution classique



$$y = \boxed{a_c A_c} + \boxed{a_f A_f + b}$$

cible Fouillis + bruit
Gaussiens

Matrice de covariance des perturbations

$$C = \sigma_f^2 a_f a_f^H + \sigma^2 I$$

Recherche du filtre spatial w qui maximise

$$RSB = \frac{|A_c w^H a_c|^2}{w^H C w}$$

$$\begin{array}{c} \min w^H C w \\ \longrightarrow \\ w^H a_c = 1 \end{array}$$

$$\boxed{w_{MVDR} = \frac{C^{-1} a_c}{a_c^H C^{-1} a_c}}$$

Formateur optimum

II. Réjection de fouillis



État de l'art / Solution classique



$$y = \boxed{a_c A_c} + \boxed{a_f A_f + b}$$

cible Fouillis + bruit
Gaussiens

Matrice de covariance des perturbations

$$C = \sigma_f^2 a_f a_f^H + \sigma^2 I$$

Recherche du filtre spatial w qui maximise

$$RSB = \frac{|A_c w^H a_c|^2}{w^H C w}$$

$$\begin{array}{c} \min w^H C w \\ \text{--->} \\ w^H a_c = 1 \end{array}$$

$$w_{MVDR} = \frac{C^{-1} a_c}{a_c^H C^{-1} a_c}$$

Formateur optimum

MAIS nécessite la connaissance de

- la matrice de covariance C ,
- le vecteur directionnel a_c ,

 inconnus a priori.

On doit les estimer sur données secondaires

II. Réjection de fouillis



Estimation locale de C et a_c

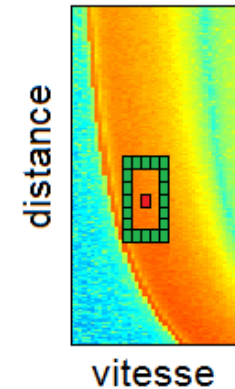


Domaine d'entraînement

- cases autour de la case testée,
- absence de signal cible,
- même matrice de covariance C



- **Matrice de covariance empirique**



$$\hat{C}_{SCM} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K y_k y_k^H$$

II. Réjection de fouillis



Estimation locale de C et $\hat{a}_c$



Domaine d'entraînement

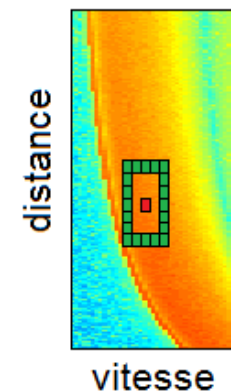
- cases autour de la case testée,
- absence de signal cible
- même matrice de covariance C



Matrice de covariance empirique



- Estimation de direction du fouillis
- Hypothèse de direction de la cible



$$\hat{C}_{SCM} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K y_k y_k^H$$

Filtre adaptatif

$$w_a = \frac{\hat{C}^{-1} \hat{a}_c}{\hat{a}_c^H \hat{C}^{-1} \hat{a}_c}$$

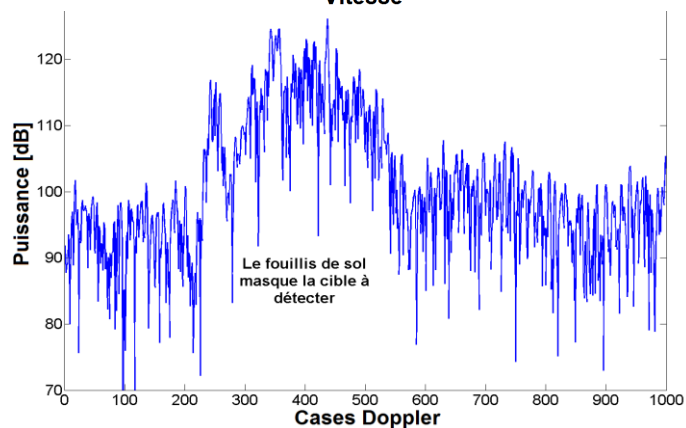
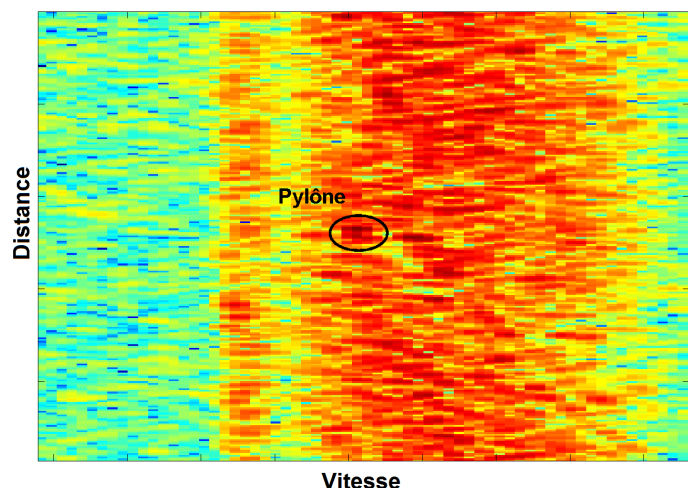
II. Réjection de fouillis



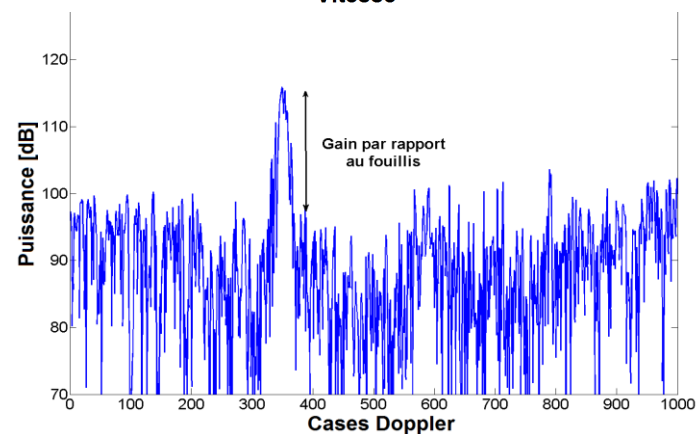
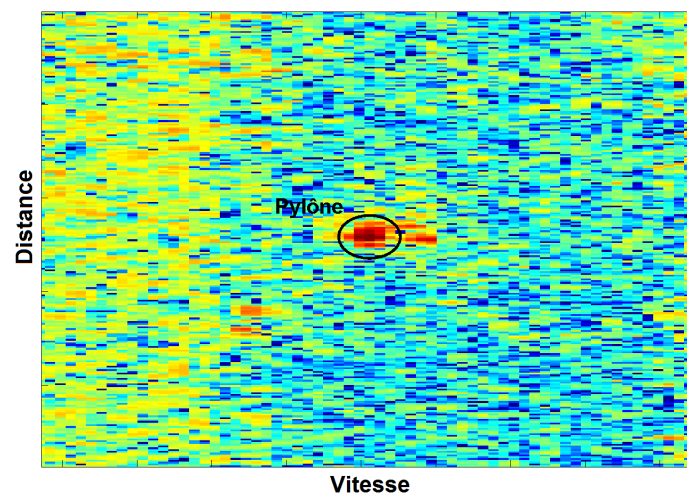
Tests sur données expérimentales



Avant filtrage spatial



Après filtrage spatial



II. Détection dans le fouillis



Généralités



Principe général de la détection

- Décider si une cible est présente dans le jeu de données

$$H_0 : \mathbf{y} = \mathbf{c}$$

$$H_1 : \mathbf{y} = \mathbf{a}_c A_c + \mathbf{c}$$

- Choisir l'hypothèse H_0 ou H_1 la plus vraisemblable

$$P_d = Pr(\text{décider } H_1 \text{ alors que } H_1 \text{ est vraie})$$

$$P_{fa} = Pr(\text{décider } H_1 \text{ alors que } H_0 \text{ est vraie})$$

- Modélisation statistique du jeu de données sous H_0 et H_1



Vraisemblance

$$p(\mathbf{y}|H_0)$$

$$p(\mathbf{y}|H_1)$$

II. Détection dans le fouillis



Rapport de vraisemblance



Test de détection

- Rapport des vraisemblances
critère de Neyman-Pearson
- dépend de paramètres inconnus θ
Amplitude, distance, Doppler, puissance du bruit, ...

$$\Lambda(\mathbf{y}) = \frac{p(\mathbf{y}|H_1)}{p(\mathbf{y}|H_0)} \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}} \eta$$

$$p(\mathbf{y}|\theta, H_i) ?$$

II. Détection dans le fouillis



Rapport de vraisemblance



Test de détection

- Rapport des vraisemblances
critère de Neyman-Pearson
- dépend de paramètres inconnus θ
Amplitude, distance, Doppler, puissance du bruit, ...

Solution

- Estimateurs classiques
Maximum de Vraisemblance (MV)
- Procédure GLRT
Generalized Likelihood Ratio Test

$$\Lambda(\mathbf{y}) = \frac{p(\mathbf{y}|H_1)}{p(\mathbf{y}|H_0)} \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}} \eta$$

$$p(\mathbf{y}|\theta, H_i) ?$$



$$\hat{\theta}_i = \arg \max_{\theta} p(\mathbf{y}|\theta, H_i)$$

$$\Lambda(\mathbf{y}) = \frac{p(\mathbf{y}|\hat{\theta}_1, H_1)}{p(\mathbf{y}|\hat{\theta}_0, H_0)} \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}} \eta$$

II. Détection dans le fouillis



Détection en fouillis gaussien

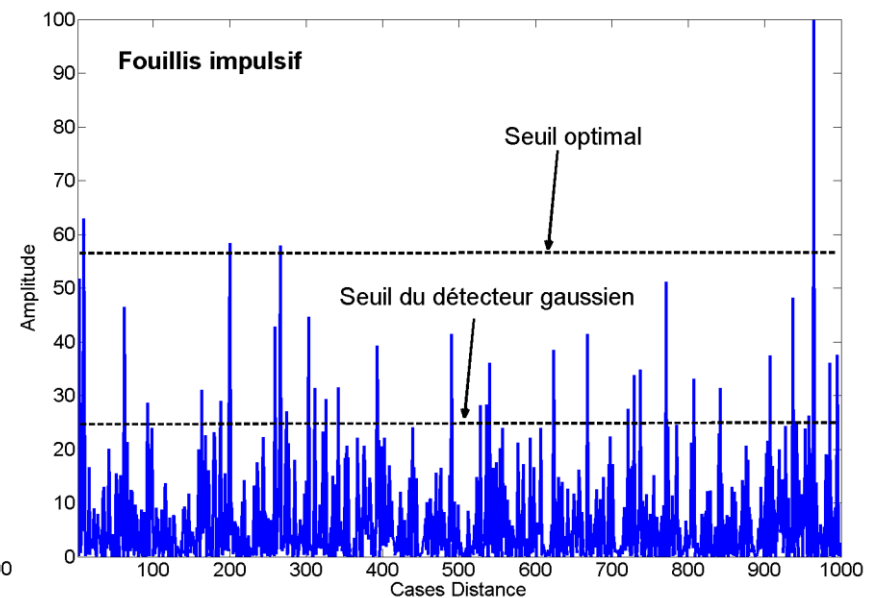
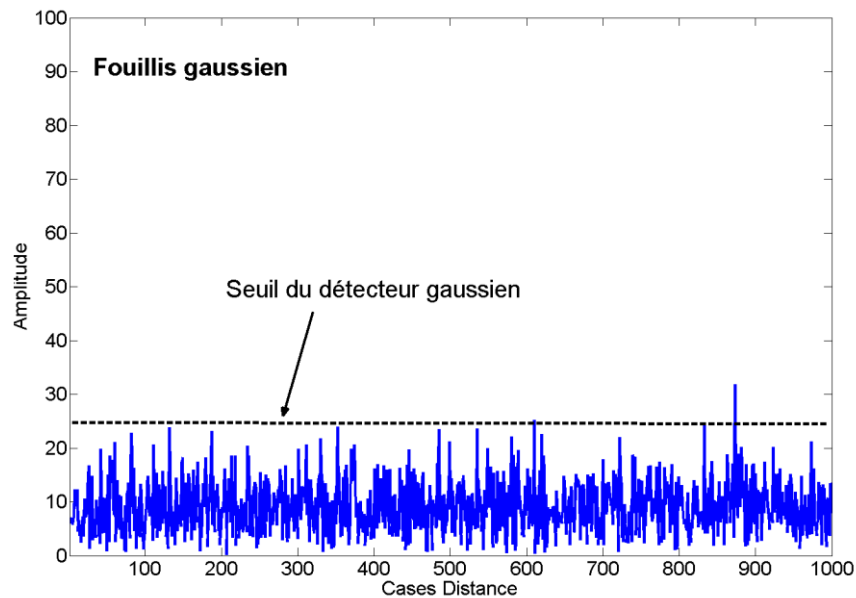


Fouillis de sol gaussien $\mathbf{c} \sim \mathcal{CN}(0, \mathbf{C})$	Vraisemblance des données $p(\mathbf{y} H_0) = \frac{1}{\pi^Q \mathbf{C} } e^{-\mathbf{y}^H \mathbf{C}^{-1} \mathbf{y}}$
Amplitude estimée $\hat{A}_c = \frac{\mathbf{a}_c^H \mathbf{C}^{-1} \mathbf{y}}{\mathbf{a}_c^H \mathbf{C}^{-1} \mathbf{a}_c} = \mathbf{w}_{\text{MVDR}}^H \mathbf{y}$	$p(\mathbf{y} H_1) = \frac{1}{\pi^Q \mathbf{C} } e^{-(\mathbf{y} - \mathbf{a}_c A_c)^H \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{a}_c A_c)}$
Adaptive Matched Filter (AMF) $\frac{ \mathbf{a}_c^H \hat{\mathbf{C}}_{SCM}^{-1} \mathbf{y} ^2}{\mathbf{a}_c^H \hat{\mathbf{C}}_{SCM}^{-1} \mathbf{a}_c} \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}} \eta_{\text{AMF}}$	Matrice de covariance empirique $\hat{\mathbf{C}}_{SCM} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{y}_k \mathbf{y}_k^H$

II. Détection dans le fouillis



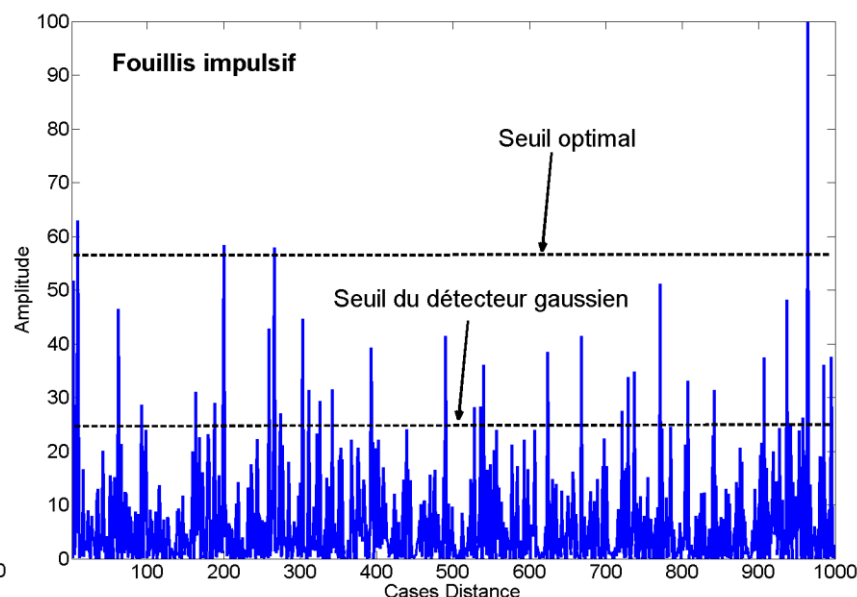
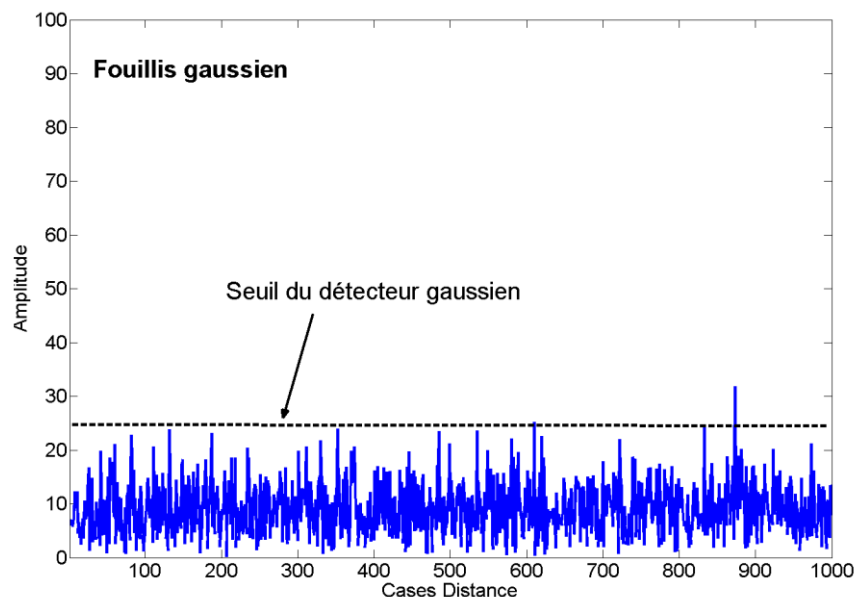
Fouillis non-gaussien



II. Détection dans le fouillis



Fouillis non-gaussien



En Cause

- incidence rasante ou radar HR
- variation du nb de réflecteurs
orientation/nature/réfectivité

En Conséquence

- **fouillis + impulsif**
 - nombreuses fausses alarmes
-  dégradations détection

II. Détection dans le fouillis



Modélisation SIRV (Jay/Ovarlez 2002)



Modèle statistique	Interprétation
SIRV (Spherically Invariant Random Vector) $\mathbf{c} = \sqrt{\tau} \mathbf{x}$ $p_{\mathbf{c}}(\mathbf{c}) = \int_0^{+\infty} \frac{1}{(\pi\tau)^Q \mathbf{M} } \exp\left(-\frac{\mathbf{c}^H \mathbf{M}^{-1} \mathbf{c}}{\tau}\right) p_{\tau}(\tau) d\tau$	- Fouillis localement gaussien $\mathbf{x} \sim \mathcal{CN}(0, \mathbf{M})$ - Puissance aléatoire suivant la loi $p_{\tau}(\tau)$

II. Détection dans le fouillis



Modélisation SIRV (Jay/Ovarlez 2002)



Modèle statistique	Interprétation
SIRV (Spherically Invariant Random Vector) $\mathbf{c} = \sqrt{\tau} \mathbf{x}$ $p_{\mathbf{c}}(\mathbf{c}) = \int_0^{+\infty} \frac{1}{(\pi\tau)^Q \mathbf{M} } \exp\left(-\frac{\mathbf{c}^H \mathbf{M}^{-1} \mathbf{c}}{\tau}\right) p_{\tau}(\tau) d\tau$	- Fouillis localement gaussien $\mathbf{x} \sim \mathcal{CN}(0, \mathbf{M})$ - Puissance aléatoire suivant la loi $p_{\tau}(\tau)$

Procédure GLRT	Pascal <i>et al</i> (2006)
Adaptive Normalized Matched Filter (ANMF): Indépendant de la puissance τ $\frac{ \mathbf{a}_c^H \hat{\mathbf{M}}^{-1} \mathbf{y} ^2}{\left(\mathbf{a}_c^H \hat{\mathbf{M}}^{-1} \mathbf{a}_c\right) \left(\mathbf{y}^H \hat{\mathbf{M}}^{-1} \mathbf{y}\right)} \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}} \eta_{\text{ANMF}}$	Estimateur robuste du point fixe (PF) calculé itérativement $\hat{\mathbf{M}} = \frac{Q}{K} \sum_{k=1}^K \frac{\mathbf{c}_k \mathbf{c}_k^H}{\mathbf{c}_k^H \hat{\mathbf{M}}^{-1} \mathbf{c}_k}$

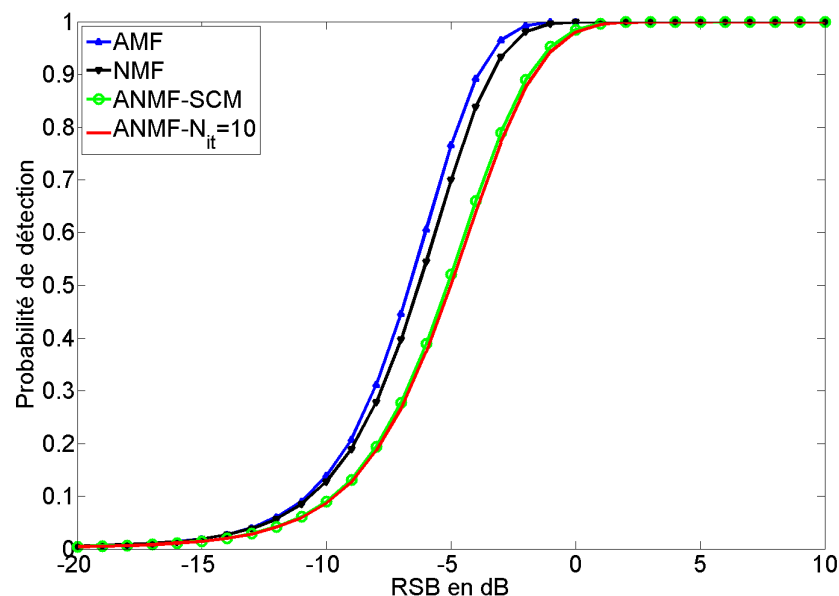
II. Détection dans le fouillis



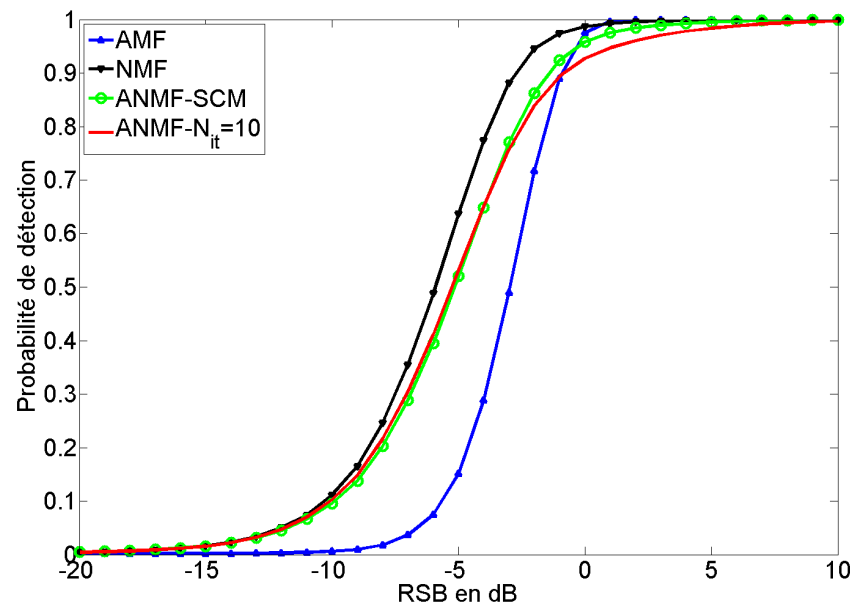
Comparaison des performances



Fouillis gaussien



Fouillis non-gaussien



**Fortes dégradations de performances de l'AMF
en fouillis non-gaussien**

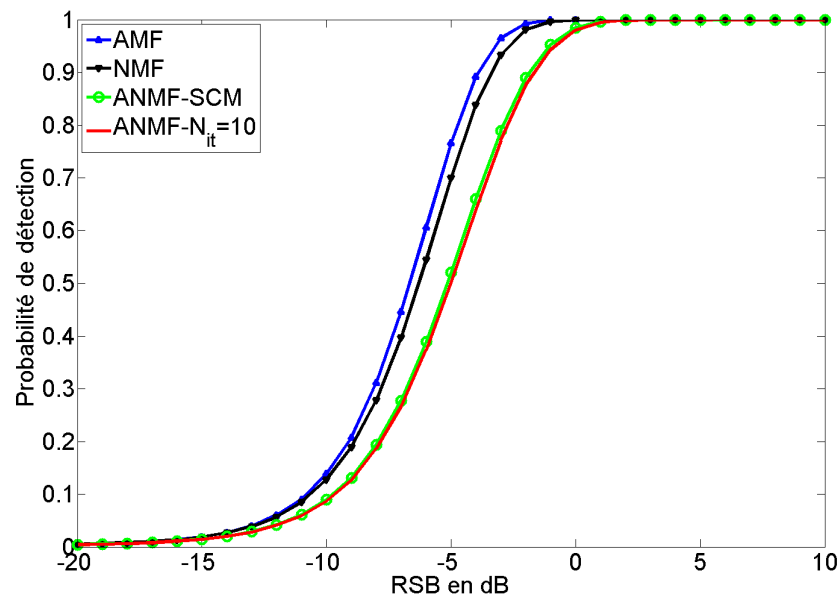
II. Détection dans le fouillis



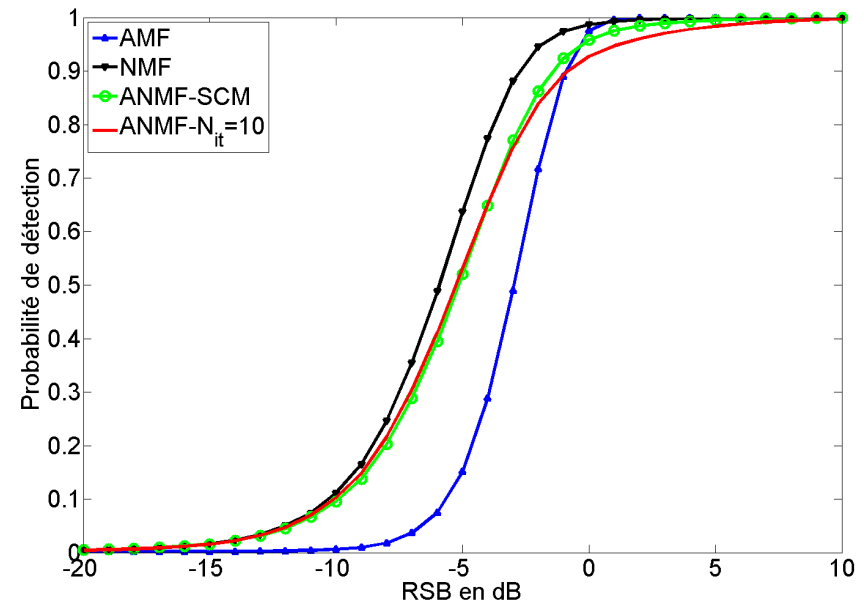
Comparaison des performances



Fouillis gaussien



Fouillis non-gaussien



Détecteur AMF adapté

- au fouillis gaussien,
- simple d'implémentation,
- **conservé pour l'application**

Détecteur ANMF-PF adapté

- au fouillis non-gaussien,
- à la contamination des données secondaires (Mahot 2010)

Plan de la présentation

I. Les traitements existants

II. Réjection du fouillis et détection

III. Reconnaissance de cibles de collision

IV. Détection structurée dans le fouillis

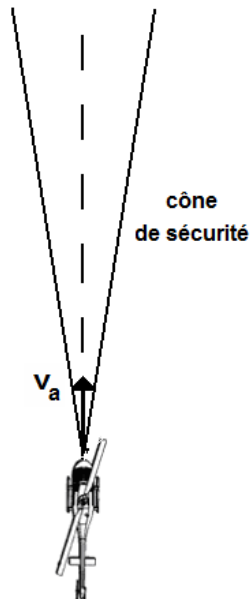
III. Reconnaissance de collision



Localisation d'obstacles fixes



Aucun
risque



Aucun
risque



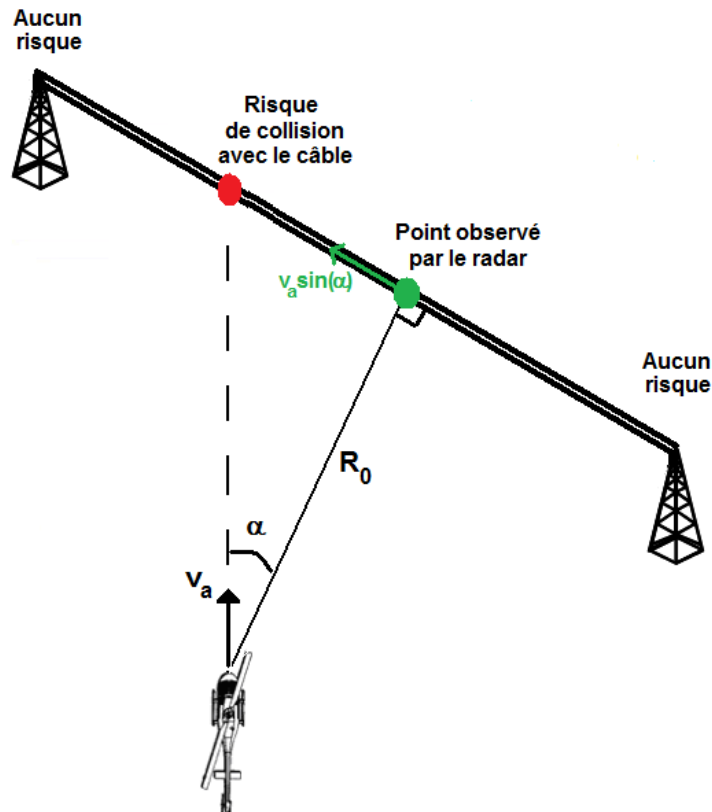
Détection

- Cibles localisées en
distance, vitesse, angle
- Risque de collision avec pylône
si dans le cône de sécurité

III. Reconnaissance de collision



Localisation d'obstacles fixes



Détection

- Cibles localisées en distance, vitesse, angle
- Risque de collision avec pylône si dans le cône de sécurité

Problème du câble

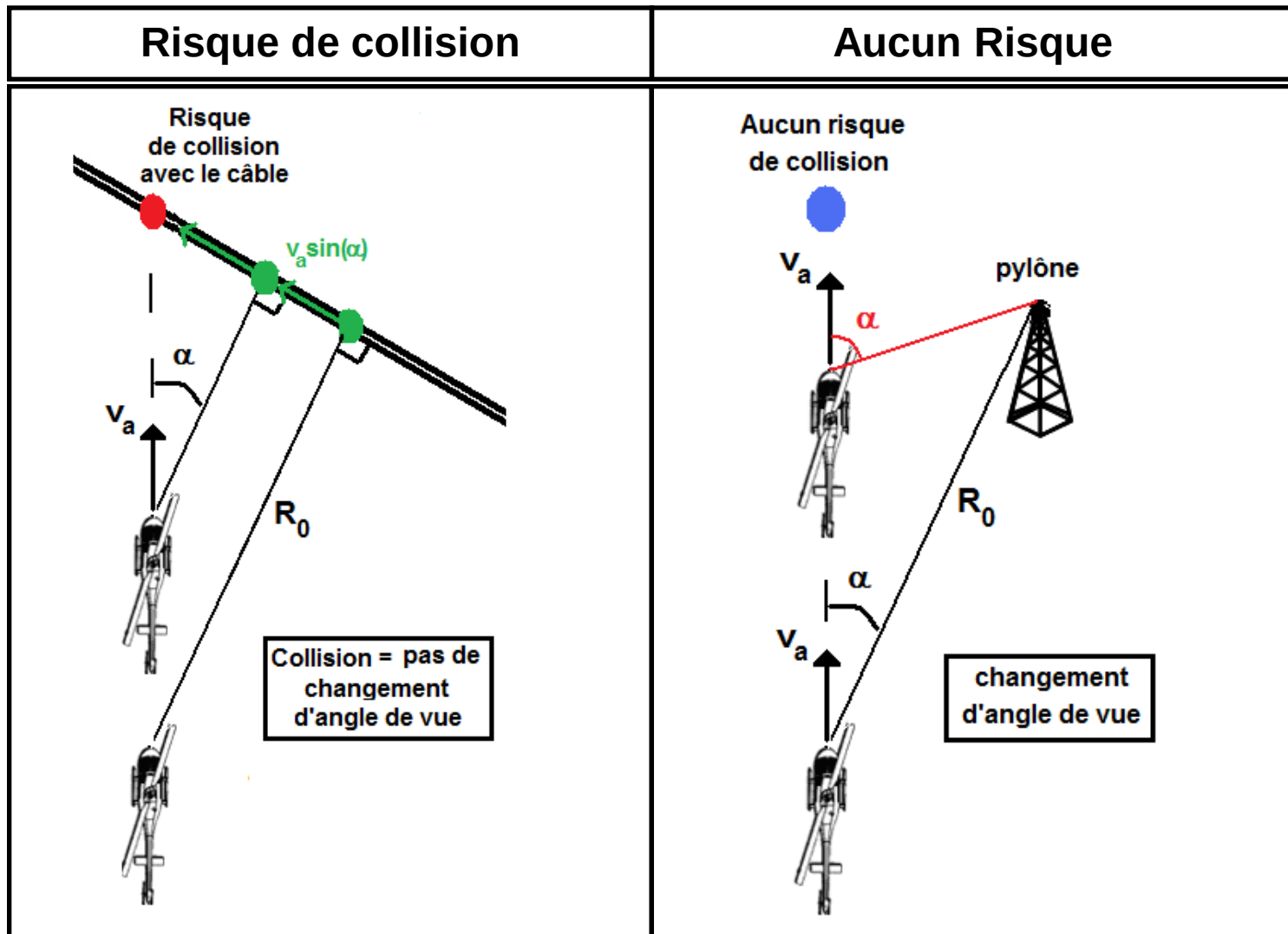
- Point du câble observé
 - = le plus proche du porteur
 - = déplacement virtuel
 - = risque de collision

Objectif: reconnaître un câble d'un pylône = risque de collision

III. Reconnaissance de collision



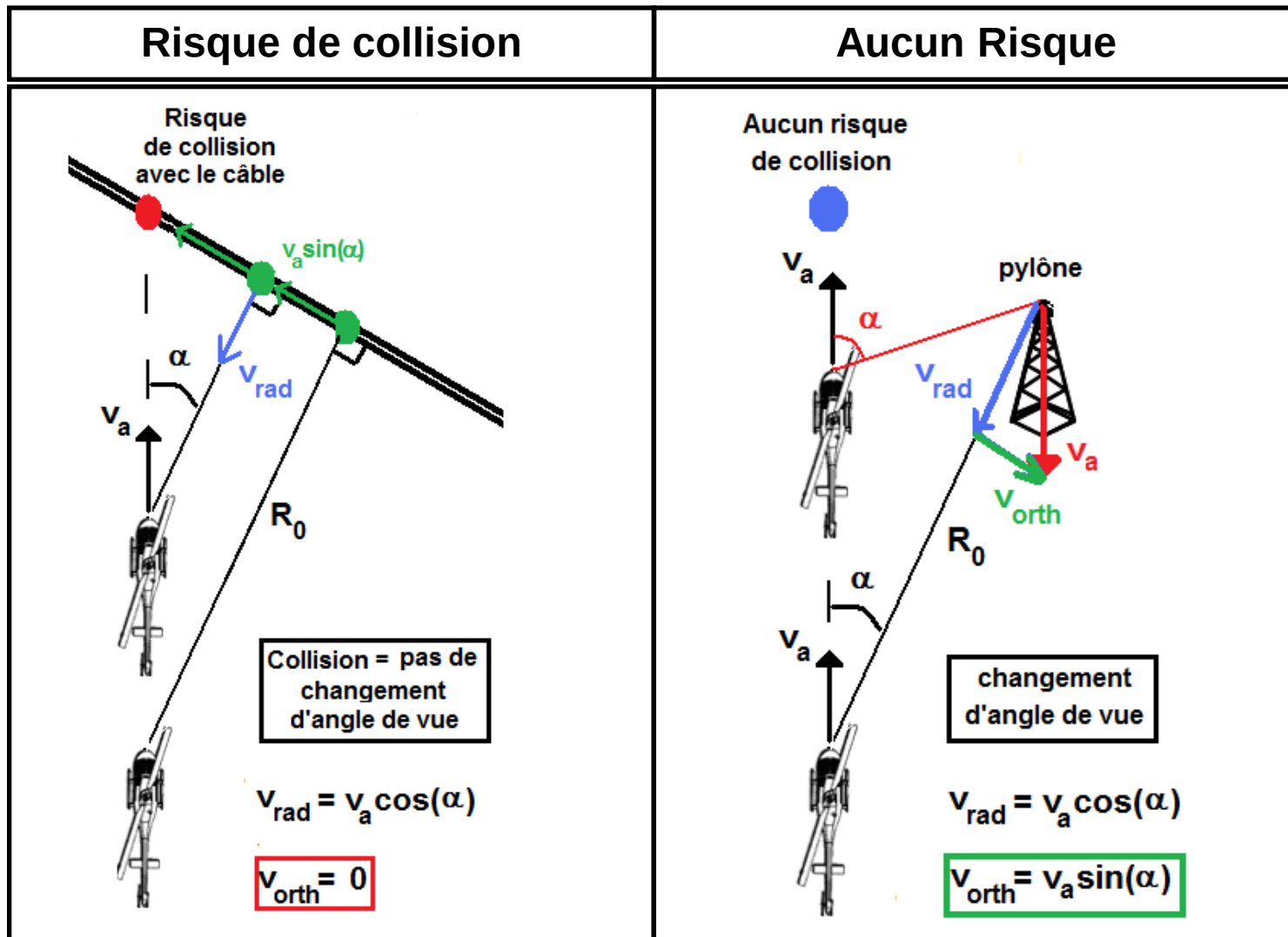
Signature des cibles de collision



III. Reconnaissance de collision



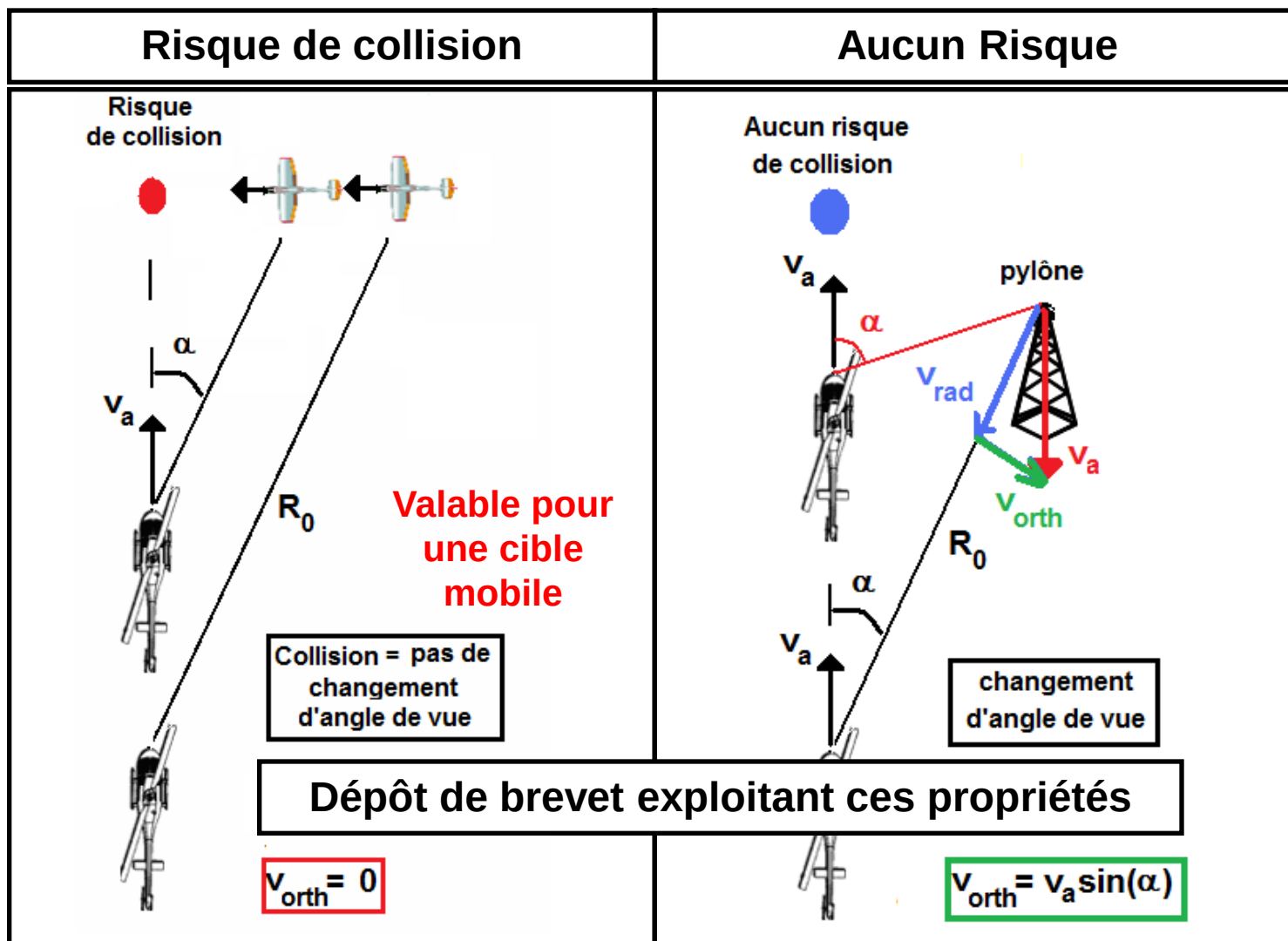
Signature des cibles de collision



III. Reconnaissance de collision



Signature des cibles de collision



III. Reconnaissance de collision



Exploiter la vitesse ortho = Temps d'intégration long



Modélisation du signal avec accélération

DL ordre 2 de la distance

$$R(t) = R_0 + v_{\text{rad}}t + \frac{1}{2} \left(\cancel{a_{\text{rad}}} + \frac{\|\vec{v}_{\text{orth}}\|^2}{R_0} \right) t^2$$

Vitesses constantes

Signal de battement

$$s_b(t_c, m) = e^{j2\pi f_b t_c} e^{j2\pi \left(f_D mT + \frac{1}{2} \dot{f}_D m^2 T^2 \right)}$$

$$f_D = \frac{2v_{\text{rad}}}{\lambda}$$

$$\dot{f}_D = \frac{2 \|\vec{v}_{\text{orth}}\|^2}{\lambda R_0}$$

III. Reconnaissance de collision



Exploiter la vitesse ortho = Temps d'intégration long



Modélisation du signal avec accélération

DL ordre 2 de la distance

$$R(t) = R_0 + v_{\text{rad}}t + \frac{1}{2} \left(\cancel{a_{\text{rad}}} + \frac{\|\vec{v}_{\text{orth}}\|^2}{R_0} \right) t^2$$

Vitesses constantes

Signal de battement

$$s_b(t_c, m) = e^{j2\pi f_b t_c} e^{j2\pi \left(f_D mT + \frac{1}{2} \dot{f}_D m^2 T^2 \right)}$$

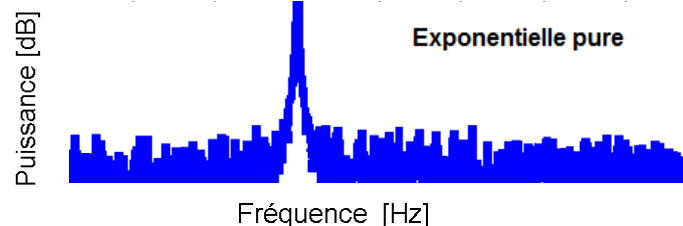
$$f_D = \frac{2v_{\text{rad}}}{\lambda}$$

$$\dot{f}_D = \frac{2 \|\vec{v}_{\text{orth}}\|^2}{\lambda R_0}$$

Après traitement distance

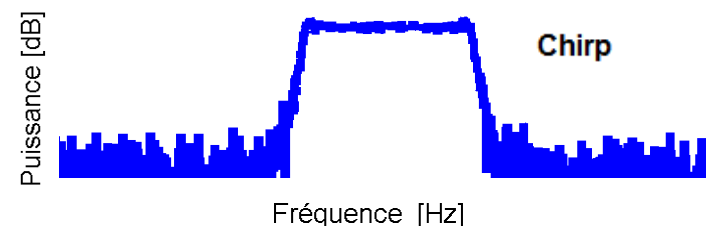
Cibles de collision

$$\exp[j2\pi f_D mT]$$



Cibles fixes

$$\exp\left[j2\pi \left(f_D mT + \frac{1}{2} \dot{f}_D m^2 T^2 \right)\right]$$



III. Reconnaissance de collision



Recherche de la variation de fréquence Doppler



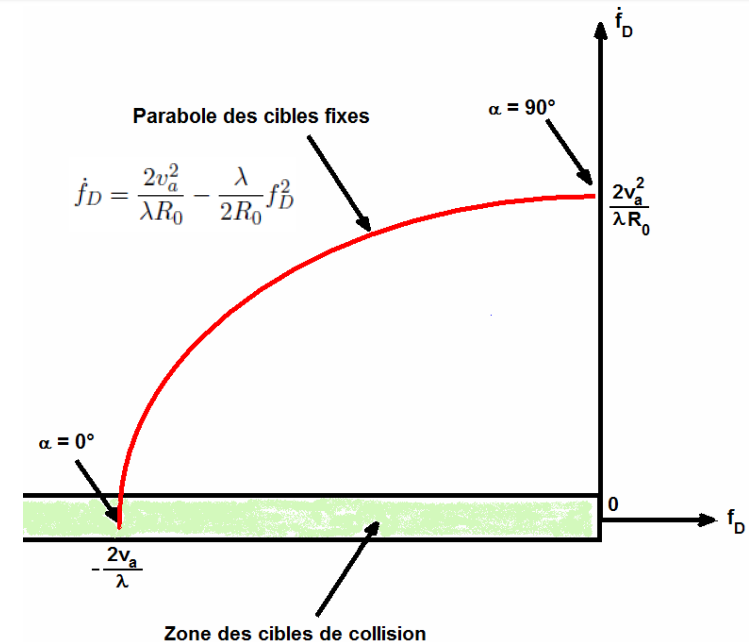
Cibles fixes

$$\exp\left[j2\pi\left(f_D mT + \frac{1}{2}\dot{f}_D m^2 T^2\right)\right]$$

$\frac{2v_a \cos \alpha}{\lambda}$ $\frac{2v_a^2 \sin^2 \alpha}{\lambda R_0}$

Cibles de collision

$$\dot{f}_D = 0$$



III. Reconnaissance de collision



Recherche de la variation de fréquence Doppler



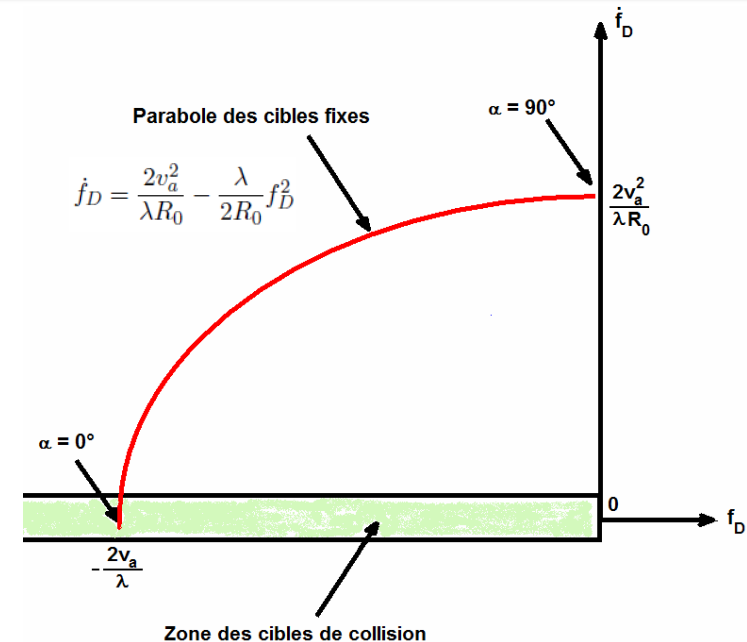
Cibles fixes

$$\exp\left[j2\pi\left(f_D mT + \frac{1}{2}\dot{f}_D m^2 T^2\right)\right]$$

$\frac{2v_a \cos \alpha}{\lambda}$ $\frac{2v_a^2 \sin^2 \alpha}{\lambda R_0}$

Cibles de collision

$$\dot{f}_D = 0$$



Deux solutions pour la reconnaissance de cibles

Recherche directe dans le plan $(f_D, \dot{f}_D)$



Transformée en chirplets

Calcul de la variation de fréquence $\dot{f}_D$



Transformée HAF

III. Reconnaissance de collision



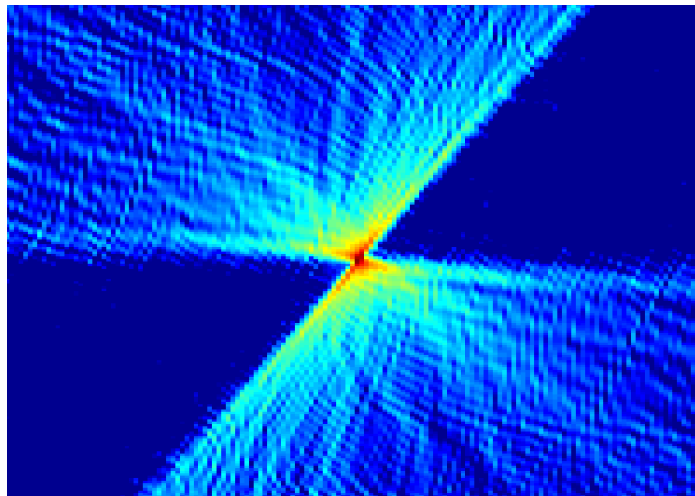
Recherche de la variation de fréquence Doppler



Transformée en chirplets

Corrélation du signal avec une base de chirps

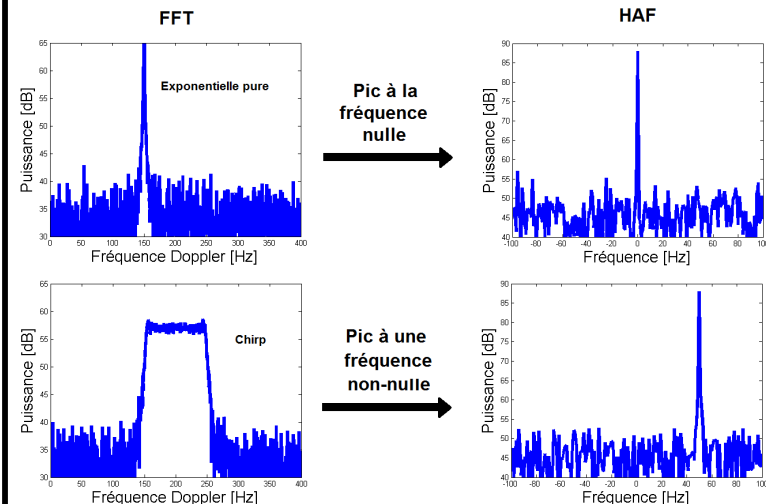
$$\frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{m=0}^{M-1} y(m) \exp \left[-j2\pi \left(f_D mT + \frac{1}{2} \dot{f}_D m^2 T^2 \right) \right]$$



Transformée HAF

Corrélation du signal + FFT

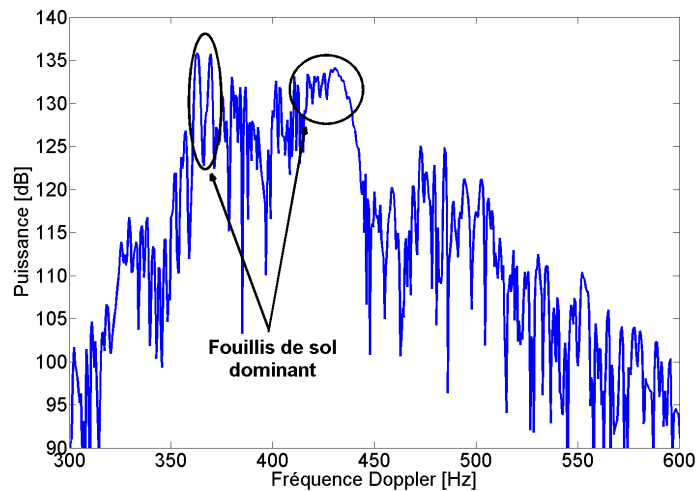
$$\begin{aligned} \text{HAF}(y)(k) &= \sum_{m=0}^{M-1} y \left(m + \frac{M}{2} \right) y^* \left(m - \frac{M}{2} \right) e^{-j2\pi km} \\ &\equiv \sum_{m=0}^{M-1} e^{jMT\dot{f}_D m} e^{-j2\pi km} \end{aligned}$$



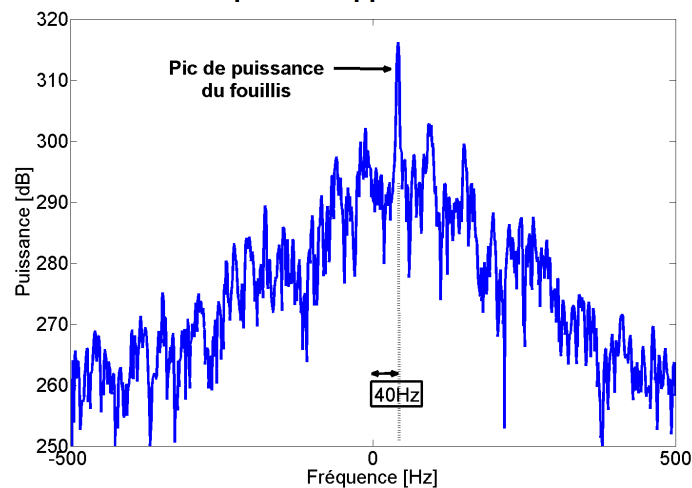
III. Reconnaissance de collision



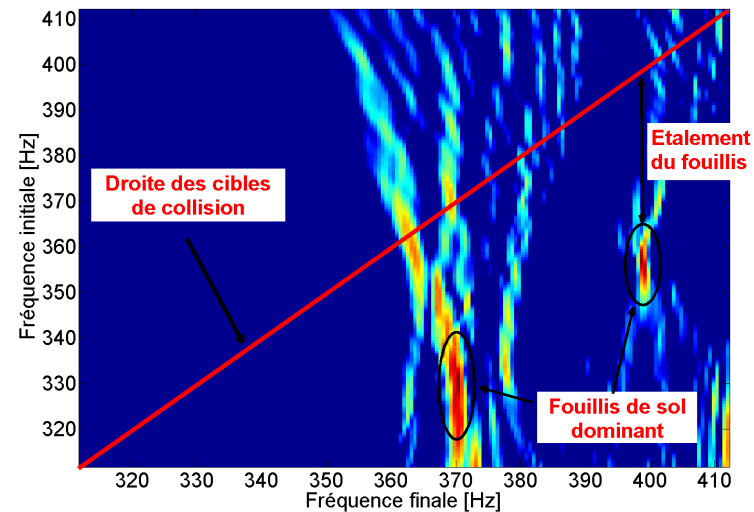
Tests sur données expérimentales



Spectre Doppler FFT



Transformée PHAF



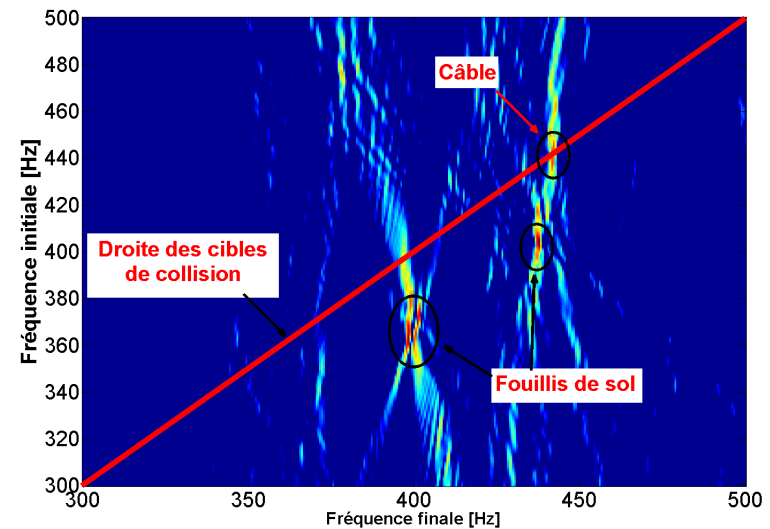
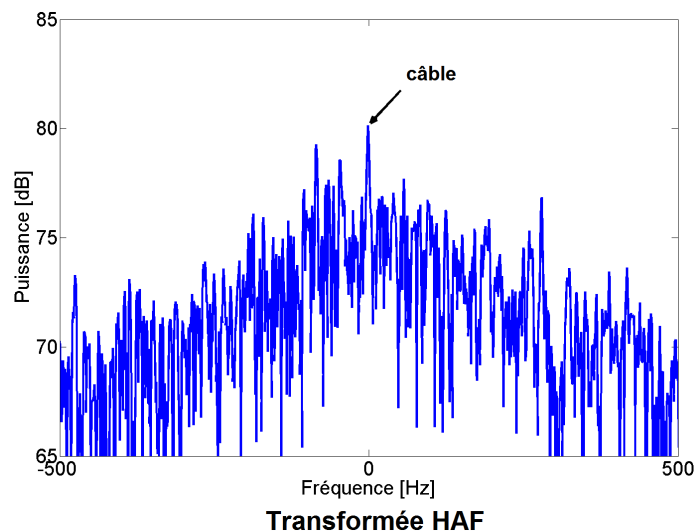
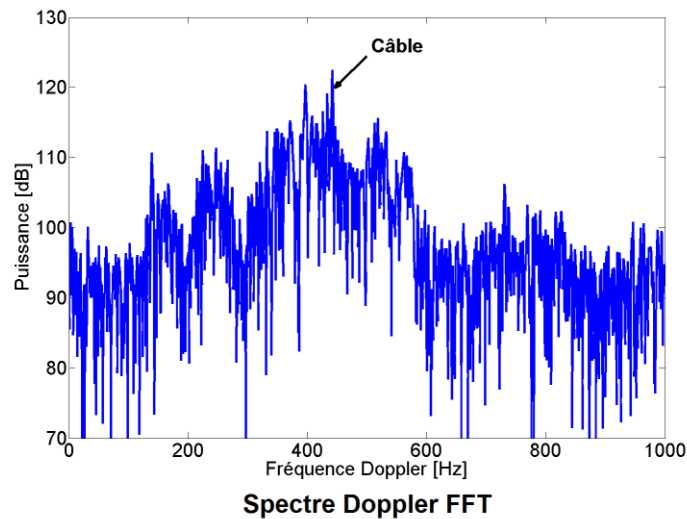
Transformée en chirplets

Mise en évidence du terme
d'accélération des cibles fixes
(fouillis de sol)

III. Reconnaissance de collision



Tests sur données expérimentales



Transformée en chirplets

Mise en évidence des propriétés du
câble = cible de collision

Défaut de ces deux méthodes

- Nécessite un fort RSB,
- détection difficile dans le fouillis de sol.

Plan de la présentation

I. Les traitements existants

II. Réjection du fouillis et détection

III. Reconnaissance de cibles de collision

IV. Détection structurée dans le fouillis

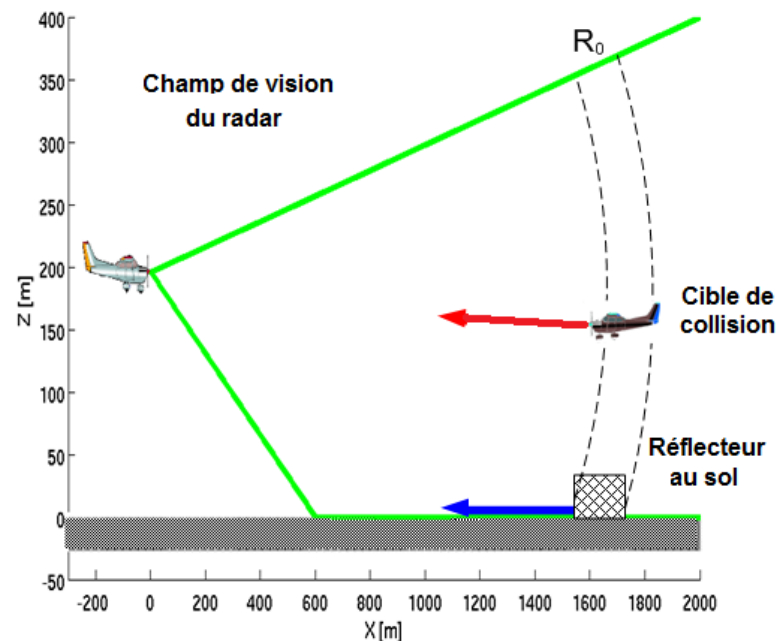
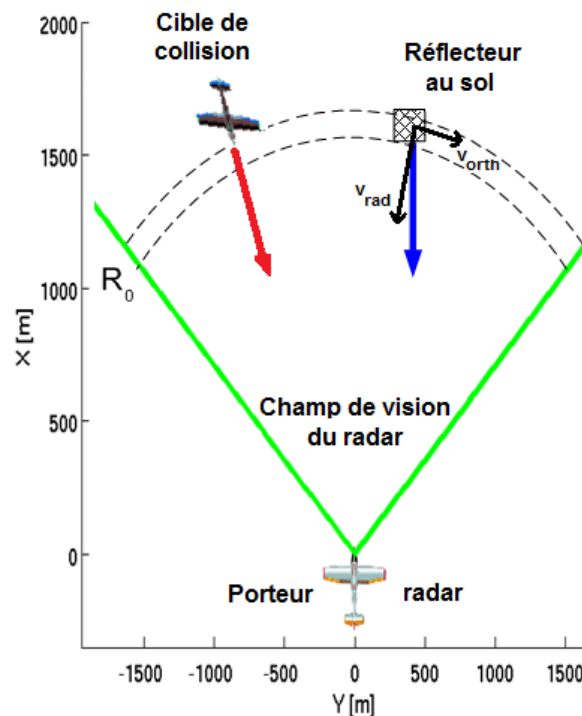
IV. Détection structurée



Détection des cibles de collision dans le fouillis



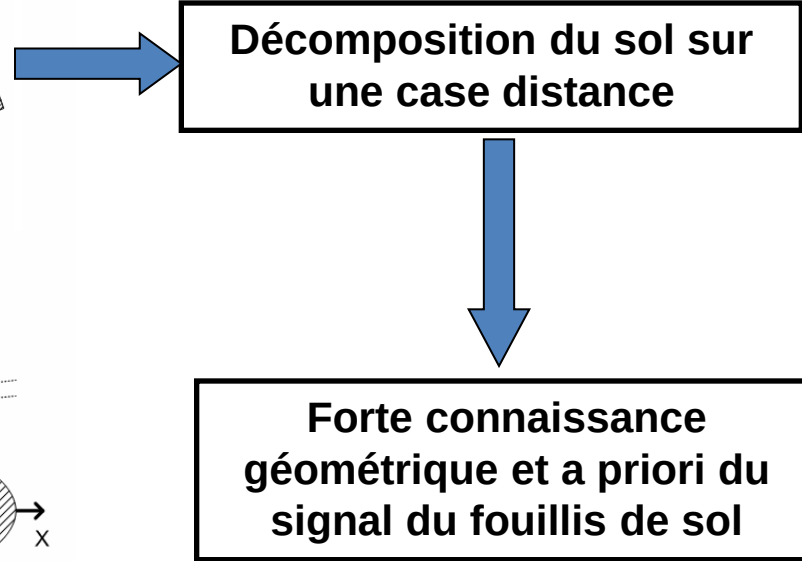
Cas général d'une **cible mobile** présentant une trajectoire de collision



Objectif: rejeter le fouillis de sol à l'aide de sa variation de fréquence pour détecter la cible de collision



Décomposition du sol en N_a réflecteurs élémentaires ou en cases distance-vitesse



Forte connaissance géométrique et a priori du signal du fouillis de sol

IV. Détection structurée



Modélisation du signal d'une case distance



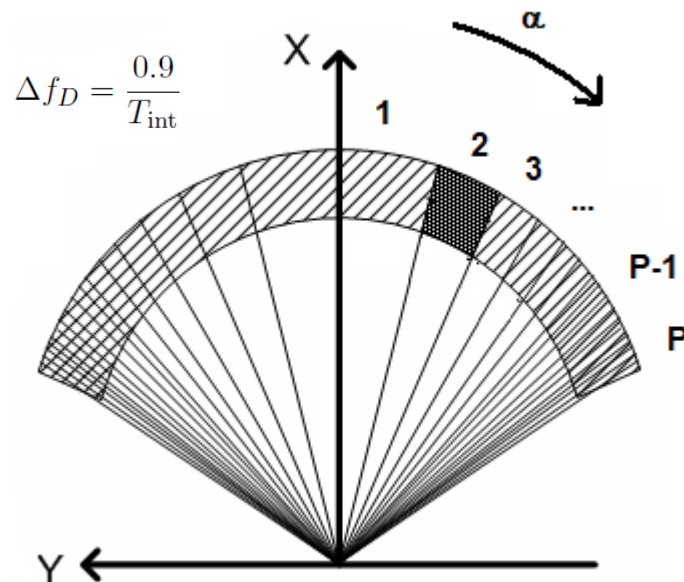
$$z = \boxed{hA} + \boxed{SB} + \boxed{n}$$

cible Fouillis Bruit

Cible de collision

$$h(f_D) = \begin{bmatrix} 1 & e^{j2\pi f_D T} & \dots & e^{j2\pi f_D (M-1)T} \end{bmatrix}^T$$

Modélisation du fouillis: Somme de P contributeurs



$$c = \sum_{p=1}^P c_p = \sum_{p=1}^P s_p B_p = SB$$

$$\exp \left[j2\pi \left(f_D m T + \frac{1}{2} f_D m^2 T^2 \right) \right]$$

$\swarrow$ $\searrow$
 $\frac{2v_a \cos \alpha}{\lambda}$ $\frac{2v_a^2 \sin^2 \alpha}{\lambda R_0}$

IV. Détection structurée



Modèle déterministe et sous-espaces



$$z = \boxed{hA} + \boxed{SB} + \boxed{n}$$

cible Fouillis Bruit

**Comment éliminer le fouillis sur
ce signal linéaire?**

(Scharf 1994)

IV. Détection structurée



Modèle déterministe et sous-espaces



$$z = \boxed{hA} + \boxed{SB} + \boxed{n}$$

cible Fouillis Bruit

Comment éliminer le fouillis sur
ce signal linéaire?

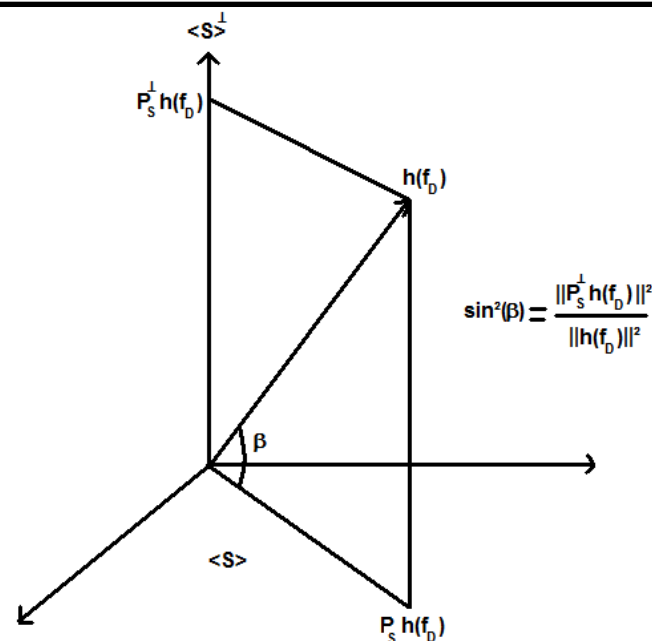
(Scharf 1994)

Interprétation géométrique

- Cible = sous-espace engendré par h
- Fouillis = bruit structuré par la matrice S connue,
- supprimée par projection,

$$P_S^\perp = I - S (S^H S)^{-1} S^H$$

 $P_S^\perp S = 0$



IV. Détection structurée



Modèle déterministe et sous-espaces



Filtre adapté

$$\hat{A} = \frac{\mathbf{h}^H \mathbf{P}_S^\perp \mathbf{z}}{\mathbf{h}^H \mathbf{P}_S^\perp \mathbf{h}}$$

Angle sous-espace

$$\mathbf{h}^H \mathbf{P}_S^\perp \mathbf{h} = \|\mathbf{P}_S^\perp \mathbf{h}\|^2 = M \sin^2 \beta$$

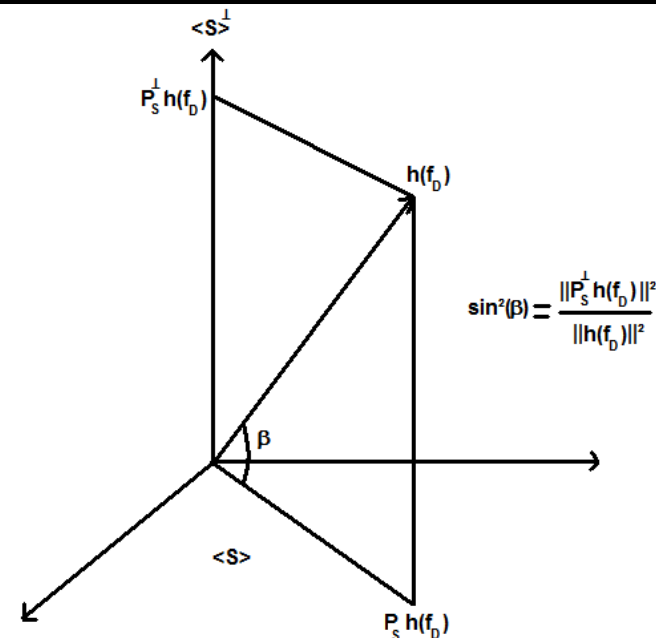
Interprétation géométrique

- Lorsque β tend vers zéro, la cible est éliminée par la projection



$$\mathbf{P}_S^\perp \mathbf{h} = 0$$

- Importance du choix de $\mathbf{S}$



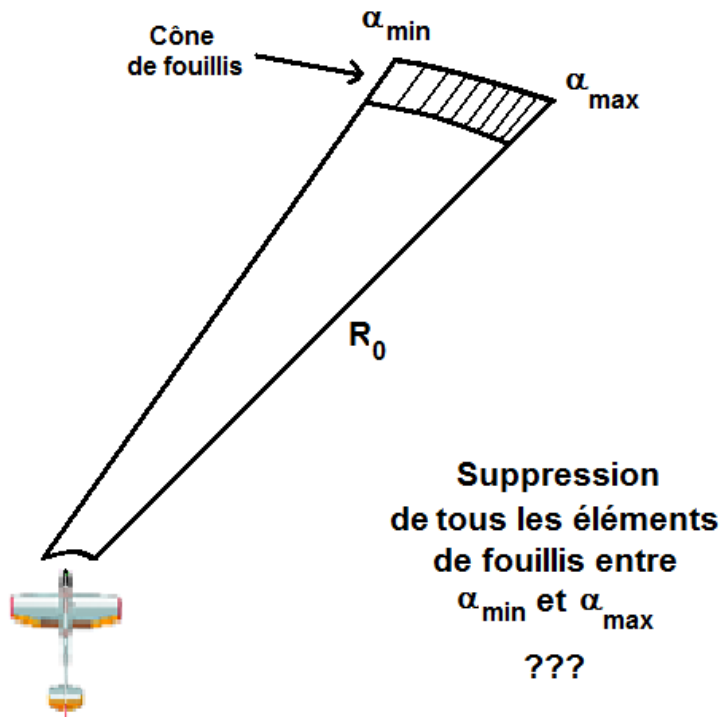
IV. Détection structurée



Comment choisir **S** ?



Largeur du cône de suppression de fouillis de sol



Étalement physique
en Doppler

$$f_{\min} = -\frac{2v_a \cos \alpha_{\min}}{\lambda}$$

$$f_{\max} = -\frac{2v_a \cos \alpha_{\max}}{\lambda}$$

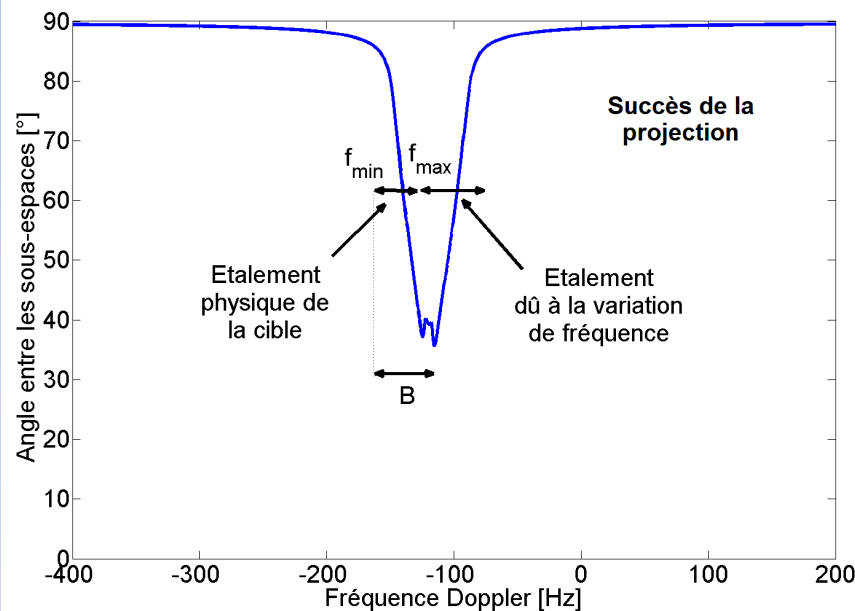
Étalement dû au
changement d'angle

$$B = \frac{2v_a^2 \sin^2 \alpha_{\min}}{\lambda R_0} T_{\text{int}}$$

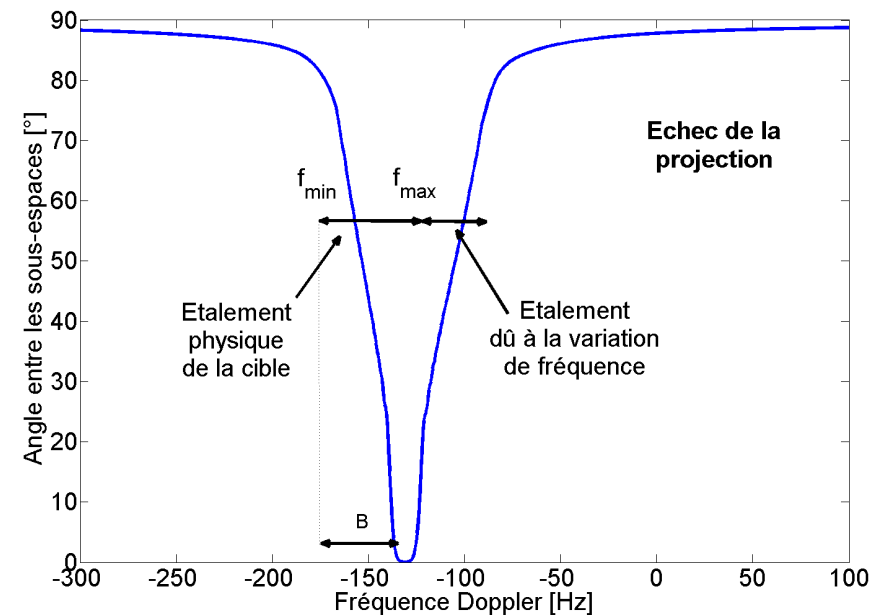
IV. Détection structurée

Comment choisir S ?

Largeur du cône de suppression de fouillis de sol



$$|f_{\min} - f_{\max}| < B$$



$$|f_{\min} - f_{\max}| > B$$

On doit choisir les angles α / éléments de S
à supprimer du signal

IV. Détection structurée



Détection en fouillis gaussien



$$H_0 : \mathbf{z} = \mathbf{S}\mathbf{B} + \mathbf{n}$$

$$H_1 : \mathbf{z} = \mathbf{h}A + \mathbf{S}\mathbf{B} + \mathbf{n}$$

Fouillis + bruit gaussiens

Matrice de covariance des perturbations

$$\mathbf{C} = \sigma^2 \mathbf{I} + \mathbf{S}\mathbf{\Lambda}\mathbf{S}^H = \sigma^2 \mathbf{I} + \mathbf{S} \begin{pmatrix} \Lambda_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \Lambda_r \end{pmatrix} \mathbf{S}^H$$

Fort lien avec matrice de projection

$$\mathbf{C}^{-1} = \frac{1}{\sigma^2} \left[\mathbf{I} - \mathbf{S} (\sigma^2 \mathbf{\Lambda}^{-1} + \mathbf{S}^H \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S} \right] \approx \frac{1}{\sigma^2} \mathbf{P}_S^\perp$$

IV. Détection structurée



Détection en fouillis gaussien



$$H_0 : \mathbf{z} = \mathbf{S}\mathbf{B} + \mathbf{n}$$

$$H_1 : \mathbf{z} = \mathbf{h}A + \mathbf{S}\mathbf{B} + \mathbf{n}$$

Fouillis + bruit gaussiens

Matrice de covariance des perturbations

$$\mathbf{C} = \sigma^2 \mathbf{I} + \mathbf{S}\mathbf{\Lambda}\mathbf{S}^H = \sigma^2 \mathbf{I} + \mathbf{S} \begin{pmatrix} \Lambda_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \Lambda_r \end{pmatrix} \mathbf{S}^H$$

Estimateur MV

$$\hat{A} = \frac{\mathbf{h}^H \mathbf{C}^{-1} \mathbf{z}}{\mathbf{h}^H \mathbf{C}^{-1} \mathbf{h}} \equiv \frac{\mathbf{h}^H \mathbf{P}_{\mathbf{S}}^{\perp} \mathbf{z}}{\mathbf{h}^H \mathbf{P}_{\mathbf{S}}^{\perp} \mathbf{h}}$$

Facteur de blanchiment

Angle entre sous-espace

On doit choisir les angles α / éléments de $\mathbf{S}$ à supprimer du signal

Fort lien avec matrice de projection

$$\mathbf{C}^{-1} = \frac{1}{\sigma^2} \left[\mathbf{I} - \mathbf{S} (\sigma^2 \mathbf{\Lambda}^{-1} + \mathbf{S}^H \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S} \right] \approx \frac{1}{\sigma^2} \mathbf{P}_{\mathbf{S}}^{\perp}$$

IV. Détection structurée



Détection en fouillis gaussien



$$H_0 : \mathbf{z} = \mathbf{S}\mathbf{B} + \mathbf{n}$$

$$H_1 : \mathbf{z} = \mathbf{h}\mathbf{A} + \mathbf{S}\mathbf{B} + \mathbf{n}$$

Fouillis + bruit gaussiens

Matrice de covariance des perturbations

$$\mathbf{C} = \sigma^2 \mathbf{I} + \mathbf{S}\mathbf{\Lambda}\mathbf{S}^H = \sigma^2 \mathbf{I} + \mathbf{S} \begin{pmatrix} \Lambda_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \Lambda_r \end{pmatrix} \mathbf{S}^H$$

Estimateur MV

$$\hat{\mathbf{A}} = \frac{\mathbf{h}^H \mathbf{C}^{-1} \mathbf{z}}{\mathbf{h}^H \mathbf{C}^{-1} \mathbf{h}} \equiv \frac{\mathbf{h}^H \mathbf{P}_{\mathbf{S}}^{\perp} \mathbf{z}}{\mathbf{h}^H \mathbf{P}_{\mathbf{S}}^{\perp} \mathbf{h}}$$

Facteur de blanchiment

Angle entre sous-espace

On doit choisir les angles α / éléments de $\mathbf{S}$ à supprimer du signal

Fort lien avec matrice de projection

$$\mathbf{C}^{-1} = \frac{1}{\sigma^2} \left[\mathbf{I} - \mathbf{S} (\sigma^2 \mathbf{\Lambda}^{-1} + \mathbf{S}^H \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S} \right] \approx \frac{1}{\sigma^2} \mathbf{P}_{\mathbf{S}}^{\perp}$$

Détecteur GLRT adapté

$$\Lambda_{ANMF} = \frac{|\mathbf{h}^H \hat{\mathbf{C}}^{-1} \mathbf{z}|^2}{(\mathbf{h}^H \hat{\mathbf{C}}^{-1} \mathbf{h}) (\mathbf{z}^H \hat{\mathbf{C}}^{-1} \mathbf{z})} \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}} \eta_{ANMF}$$

Estimer $\mathbf{C}$?

IV. Détection structurée



Estimation de C^{-1} **sans données secondaires**



Estimation à partir de la structure de la matrice de covariance

- Construction sous-espace $\mathbf{S}$
- Projection sur le sous-espace fouillis

$$\hat{\mathbf{B}} = \left(\mathbf{S}^H \mathbf{P}_h^\perp \mathbf{S} \right)^{-1} \mathbf{S}^H \mathbf{P}_h^\perp \mathbf{z}$$

- Calcul de puissance du fouillis

$$\hat{\mathbf{\Lambda}} = \begin{pmatrix} |\hat{B}_1|^2 & & \\ & \ddots & \\ & & |\hat{B}_r|^2 \end{pmatrix}$$

- **Construction de $\mathbf{C}^{-1}$**

$$\hat{\mathbf{C}}^{-1} = \frac{1}{\hat{\mathbf{\Lambda}}_m} \left[\mathbf{I} - \mathbf{S} \left(\hat{\mathbf{\Lambda}}_m \hat{\mathbf{\Lambda}}^{-1} + \mathbf{S}^H \mathbf{S} \right)^{-1} \mathbf{S}^H \right]$$

IV. Détection structurée



Estimation de C^{-1} **sans données secondaires**



Estimation à partir de la structure de la matrice de covariance

- Construction sous-espace **S**
- Projection sur le sous-espace fouillis

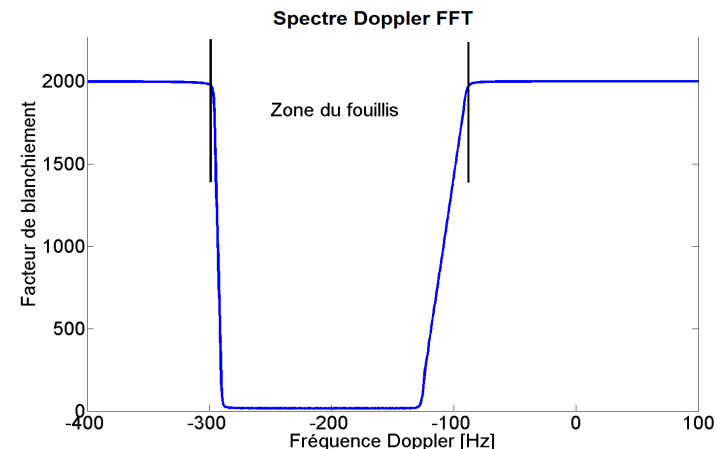
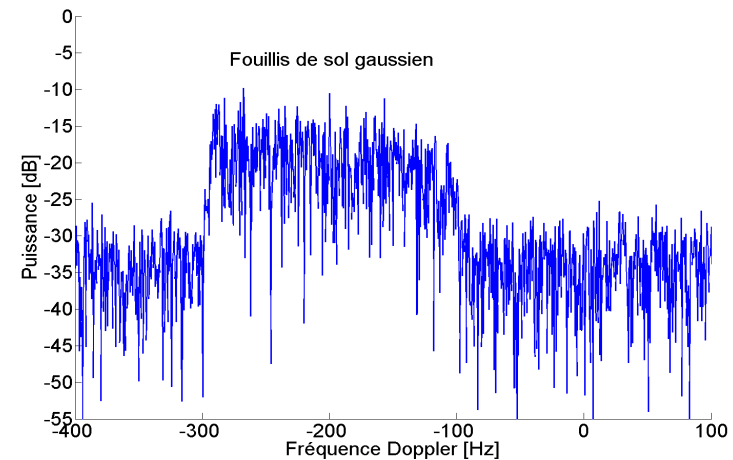
$$\hat{B} = (S^H P_h^\perp S)^{-1} S^H P_h^\perp z$$

- Calcul de puissance du fouillis

$$\hat{\Lambda} = \begin{pmatrix} |\hat{B}_1|^2 & & \\ & \ddots & \\ & & |\hat{B}_r|^2 \end{pmatrix}$$

- **Construction de C^{-1}**

$$\hat{C}^{-1} = \frac{1}{\hat{\Lambda}_m} \left[I - S \left(\hat{\Lambda}_m \hat{\Lambda}^{-1} + S^H S \right)^{-1} S^H \right]$$



Sélection

Facteur de blanchiment
en tenant compte de tout le fouillis

IV. Détection structurée



Sélection et réduction de rang

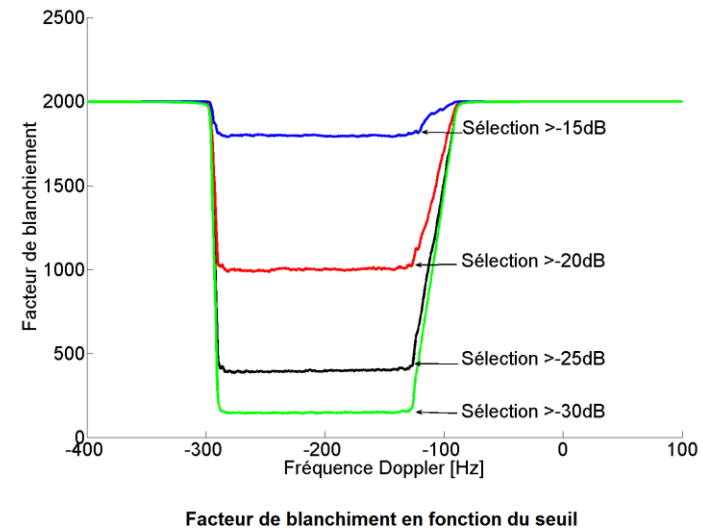
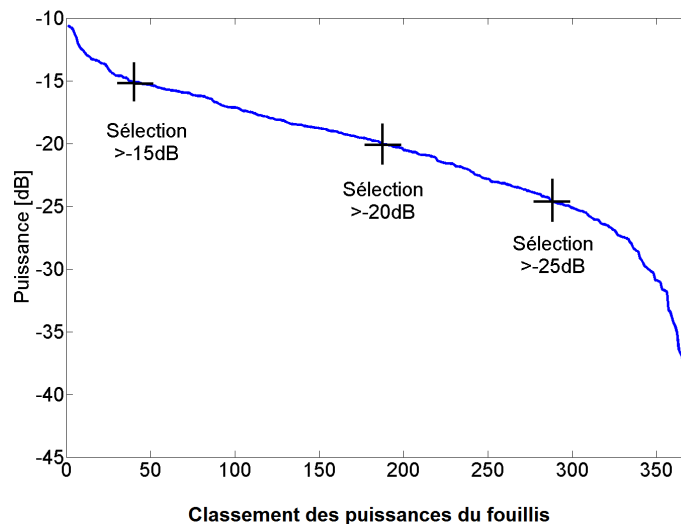


Sélection des éléments les plus puissants

- maintenir un facteur de blanchiment >0 ,
- laisser passer le signal cible + éliminer le fouillis le plus gênant

Choix du seuil de sélection

Meilleurs résultats entre 40 et 70% des éléments du fouillis



IV. Détection structurée



Conditions réelles: étalement des cibles

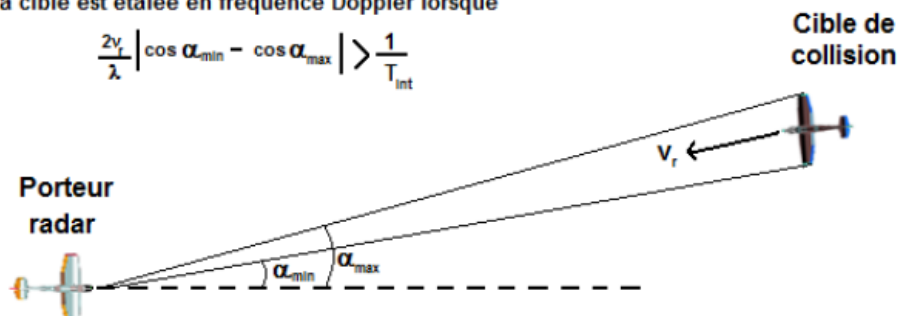


Observation sur signaux réels de l'étalement des cibles

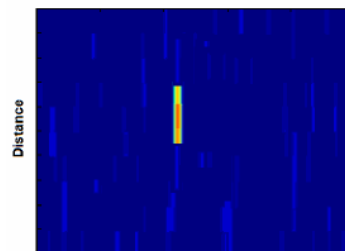
Étalement physique
(angulaire) en fréquence
Doppler

La cible est étalée en fréquence Doppler lorsque

$$\frac{2v_r}{\lambda} |\cos \alpha_{\min} - \cos \alpha_{\max}| > \frac{1}{T_{\text{int}}}$$

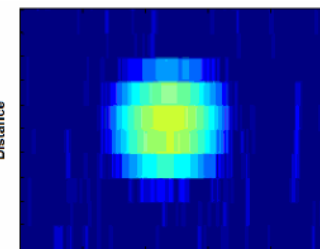


Étalement en distance dû
à la migration et au temps
d'intégration long



Doppler

Cible ponctuelle



Doppler

Cible étalée
en distance et Doppler



Étalement de la puissance de la cible sur
plusieurs cases distance-vitesse

IV. Détection structurée



Prise en compte de l'étalement des cibles



Modèle de signal avec étalement des cibles

Cible étalée en Doppler $\mathbf{x} = \sum_{p=1}^P \mathbf{h}_p A_p = \mathbf{H} \mathbf{A}$	Cible étalée en distance Présence de la cible sur L cases distance
Test de détection $H_0 : \mathbf{z}_r = \mathbf{c}_r$ $H_1 : \mathbf{z}_r = \mathbf{H} \mathbf{A}_r + \mathbf{c}_r, \quad 1 \leq r \leq L$	Fouillis localement gaussien $\mathbf{c}_r = \sigma_r \mathbf{s}_r \longrightarrow \mathbf{s}_r \sim \mathcal{CN}(0, \mathbf{M}_r)$

IV. Détection structurée



Prise en compte de l'étalement des cibles



Modèle de signal avec étalement des cibles

Cible étalée en Doppler

$$\mathbf{x} = \sum_{p=1}^P \mathbf{h}_p A_p = \mathbf{H} \mathbf{A}$$

Cible étalée en distance

Présence de la cible sur L cases distance

Test de détection

$$H_0 : \mathbf{z}_r = \mathbf{c}_r$$

$$H_1 : \mathbf{z}_r = \mathbf{H} \mathbf{A}_r + \mathbf{c}_r, \quad 1 \leq r \leq L$$

Fouillis localement gaussien

$$\mathbf{c}_r = \sigma_r \mathbf{s}_r \longrightarrow \mathbf{s}_r \sim \mathcal{CN}(0, \mathbf{M}_r)$$

Détecteur GLRT Multi-Range Multi-Doppler (MRMD)

Blanchiment

$$\bar{\mathbf{H}} = \mathbf{M}_r^{-1/2} \mathbf{H} \quad \bar{\mathbf{z}}_r = \mathbf{M}_r^{-1/2} \mathbf{z}_r$$

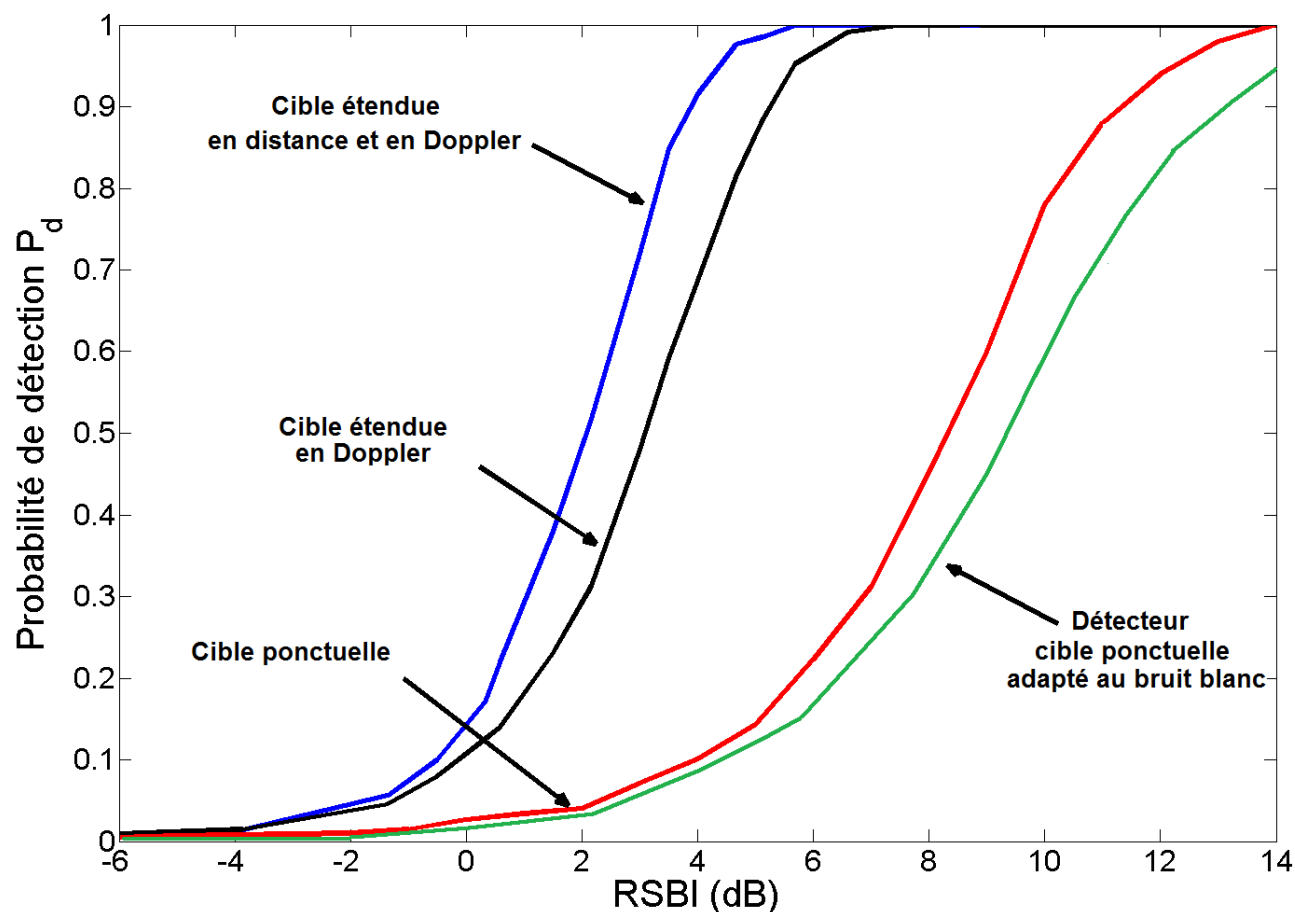
$$\ln \Lambda_{\text{MRMD}} = M \sum_{r=1}^L \ln \left[1 + \frac{\bar{\mathbf{z}}_r^H \mathbf{P}_{\bar{\mathbf{H}}} \bar{\mathbf{z}}_r}{\bar{\mathbf{z}}_r^H \mathbf{P}_{\bar{\mathbf{H}}}^\perp \bar{\mathbf{z}}_r} \right]$$

P. Goy, F. Vincent, and J.-Y. Tournet. An adaptive detection of spread targets in locally Gaussian clutter using a long integration time. In *IET Radar Conf. 2012*, oct. 2012.

IV. Détection structurée



Amélioration des performances

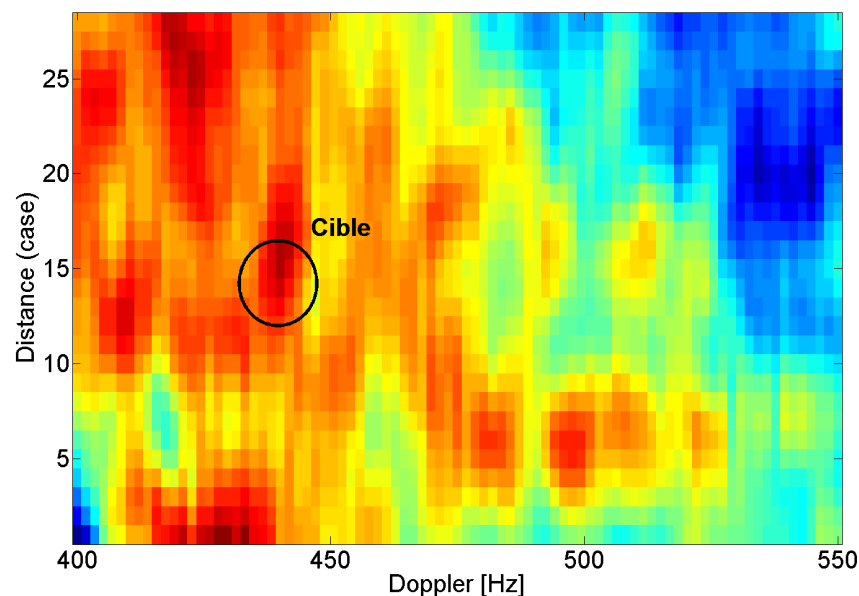


Le détecteur MRMD compense les pertes liées à l'étalement de la cible

IV. Détection structurée

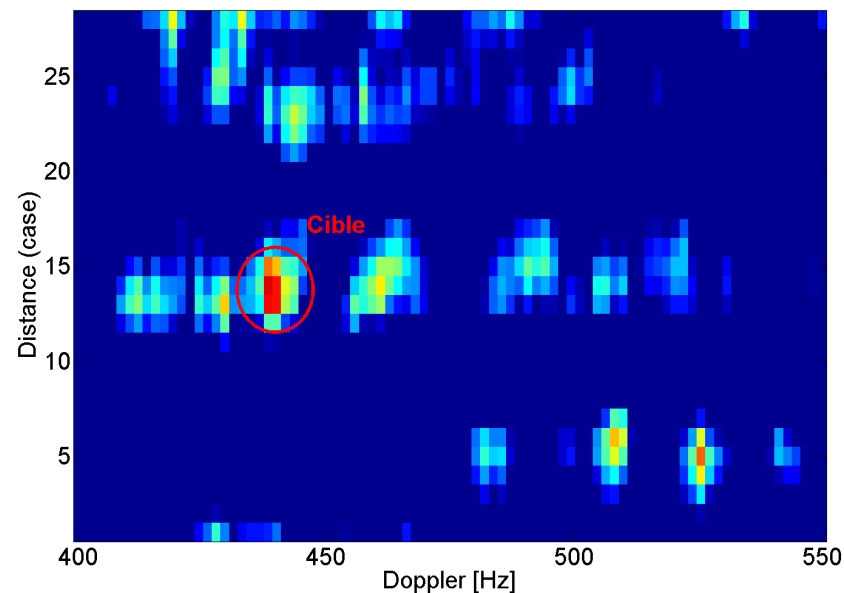


Test du MRMD sur données expérimentales



MRMD adapté au bruit blanc

**Matrices de covariance
considérées identité**



MRMD adapté au fouillis

**Estimation et sélection des
matrices de covariance du fouillis**

Très nette amélioration du contraste entre la cible et son environnement

Conclusion

Augmentation de portée?

Les contributions de ma thèse

Signature temporelle

- des câbles,
- des cibles mobiles de collision
- des cibles fixes + fouillis

Reconnaissance de cibles par variation de fréquence Doppler

- Fonctionnent avec un fort RSB,
- validation accélération cibles fixes

Détection dans le fouillis structuré par sa variation de fréquence

- Pas de données secondaires,
- adapté aux cibles de collision.

Détection pour cibles étalées

- Nette amélioration des performances sur bruit thermique et sur fouillis de sol

Conclusion

Augmentation de portée?

Les contributions de ma thèse

Signature temporelle

- des câbles,
- des cibles mobiles de collision
- des cibles fixes + fouillis

Reconnaissance de cibles par variation de fréquence Doppler

- Fonctionnent avec un fort RSB,
- validation accélération cibles fixes

Détection dans le fouillis structuré par sa variation de fréquence

- Pas de données secondaires,
- adapté aux cibles de collision.

Détection pour cibles étalées

- Nette amélioration des performances sur bruit thermique et sur fouillis de sol



Les deux dernières approches répondent à la problématique posée

Conclusion

Augmentation de portée estimée

Sur bruit thermique

Sur fouillis de sol

Augmentation
de 8 à 12 dB

+>75%

Augmentation
de 6-7 dB

+50%

Perspectives

De recherche

Prise en compte de l'accélération radiale

- Impact sur les traitements proposés,
- traitement adapté à cette accélération radiale

Modèle de signal spatio-temporel

- Prise en compte de la variation d'angle sur le modèle spatial,
- comment exploiter le lien variation d'angle/de Doppler dans un contexte spatio-temporel et temps d'intégration long?

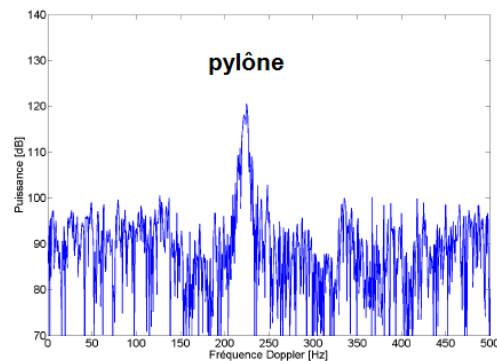
Fin de la présentation

**MERCI DE VOTRE
ATTENTION**

III. Reconnaissance de collision

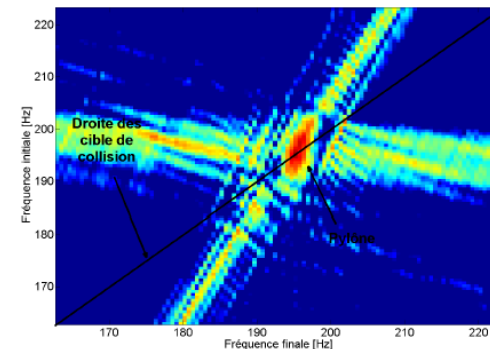
Tests de réjection de fouillis

Filtrage du fouillis par traitement d'antennes en élévation



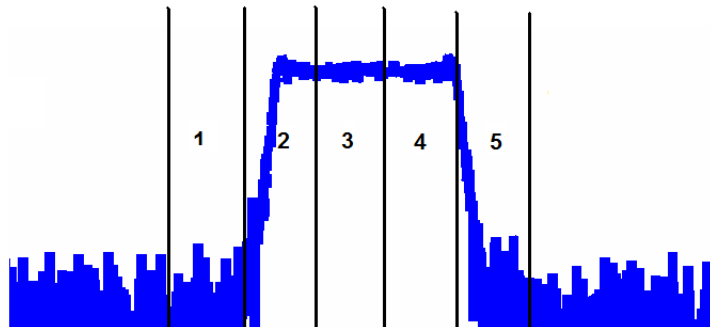
Spectre FFT Doppler

+ FFT
inverse



Transformée en chirplets

Le support fréquentiel du chirp est filtré
par différentes matrices de covariance spatiale



**Le traitement d'antennes casse la
signature temporelle du pylône**



**Autre traitement pour
détecter la cible de
collision dans le fouillis**