

Performances de détection et de localisation des terminaux SAR dans le contexte de transition MEOSAR

Victor Bissoli Nicolau

Jean-Yves Tourneret - Martial Coulon - INP-ENSEEIH/IRIT
Yoan Grégoire - Michel Sarthou - Lionel Ries - CNES
Thibaud Calmettes - Michel Monnerat - TAS

27 janvier 2014



1 Introduction

- Recherche et sauvetage par satellite
- Bilan de liaison
- Simulateur Cospas-Sarsat
- Objectifs de la thèse

2 Performances optimales du système

- Modèle de signal Cospas-Sarsat
- Performances d'estimation des paramètres
- Performances de localisation

3 Études complémentaires

- Utilisation d'information a priori
- Ajout de bruit de phase
- Localisation avec signaux multiples

4 Application aux signaux à spectre étalé

5 Conclusions et perspectives

Recherche et sauvetage par satellite

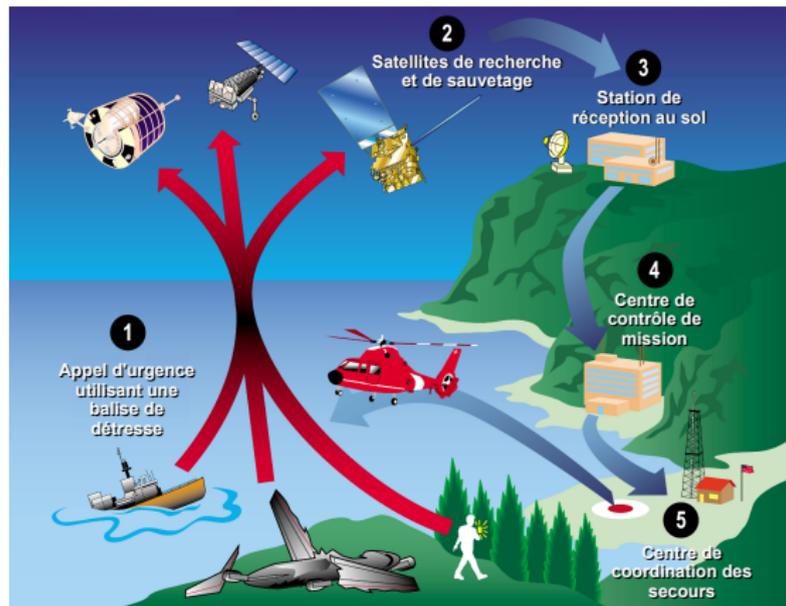


FIGURE 1: Balises de détresse et fonctionnement du système Cospas-Sarsat.

Recherche et sauvetage par satellite

- 1985 - Système LEOSAR : satellites en orbite basse (à 850 km d'altitude)
 - Utilise l'effet Doppler pour la localisation
 - Couverture non-continue de la Terre
- 1998 - Système GEOSAR : satellites géostationnaires (à 35800 km d'altitude)
 - Réduit le retard du système LEOSAR
 - Problèmes d'obstructions et de signaux plus faibles

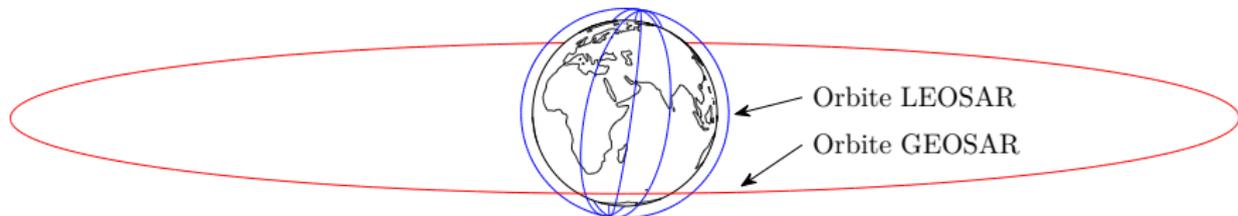


FIGURE 2: Orbites des systèmes LEOSAR et GEOSAR.

Recherche et sauvetage par satellite

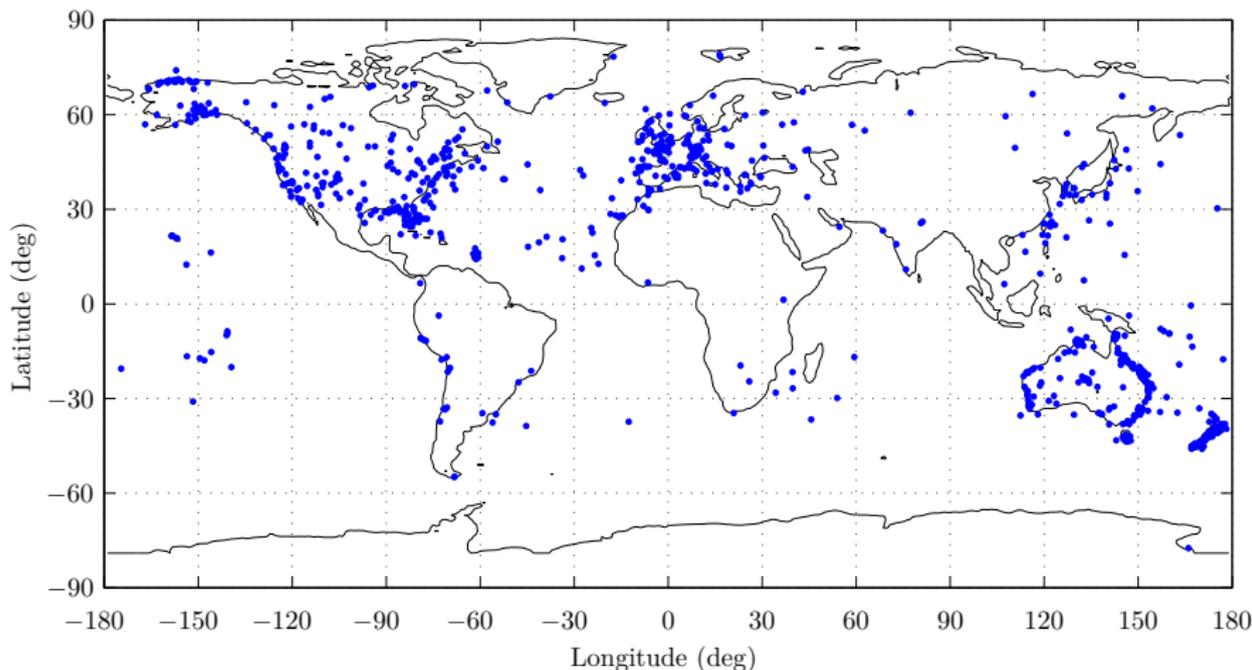


FIGURE 3: 644 événements de recherche et sauvetage en 2011 avec 2313 personnes sauvées.

Dans 35% des cas, Cospas-Sarsat a fourni la seule alerte.

Recherche et sauvetage par satellite

- Système MEOSAR : satellites de navigation en orbite moyenne (à 23600 km)
 - Satellites américains (GPS), russes (GLONASS) et européens (Galileo)
 - Disponibilité élevée des satellites et robustesse face aux obstacles

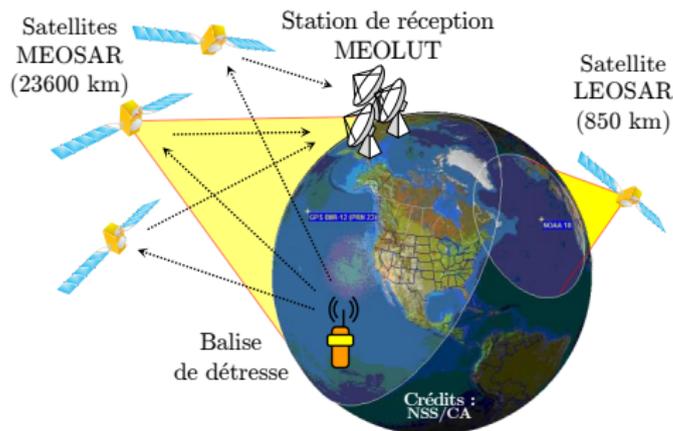


FIGURE 4: Zones de couverture des satellites LEOSAR et MEOSAR.

Bilan de liaison

- Étude de la qualité des liaisons montante et descendante

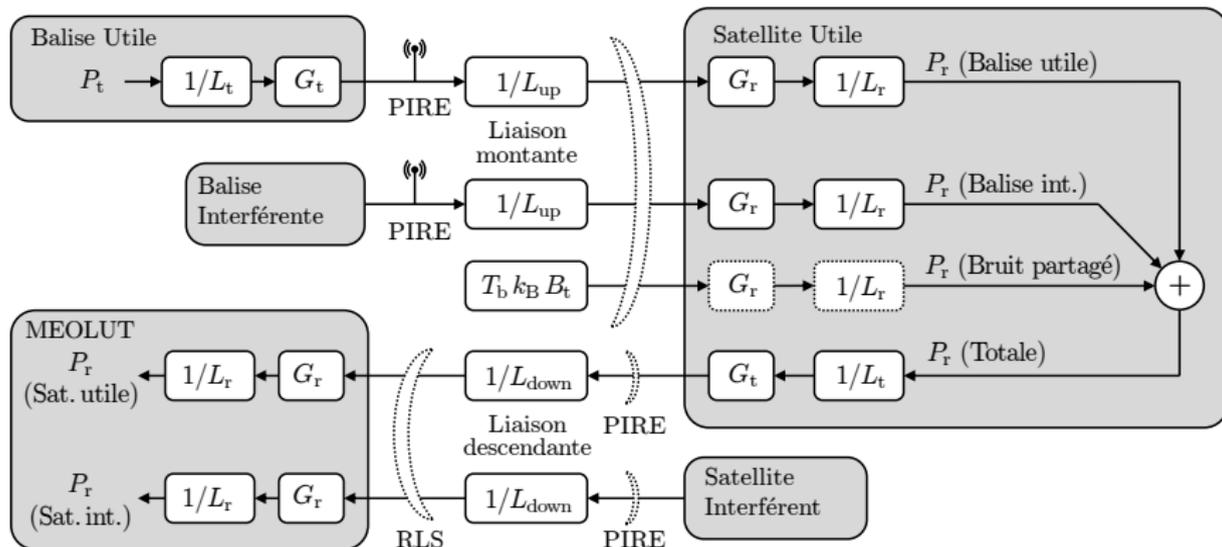


FIGURE 5: Bilan de liaison pour le système MEOSAR.

Bilan de liaison

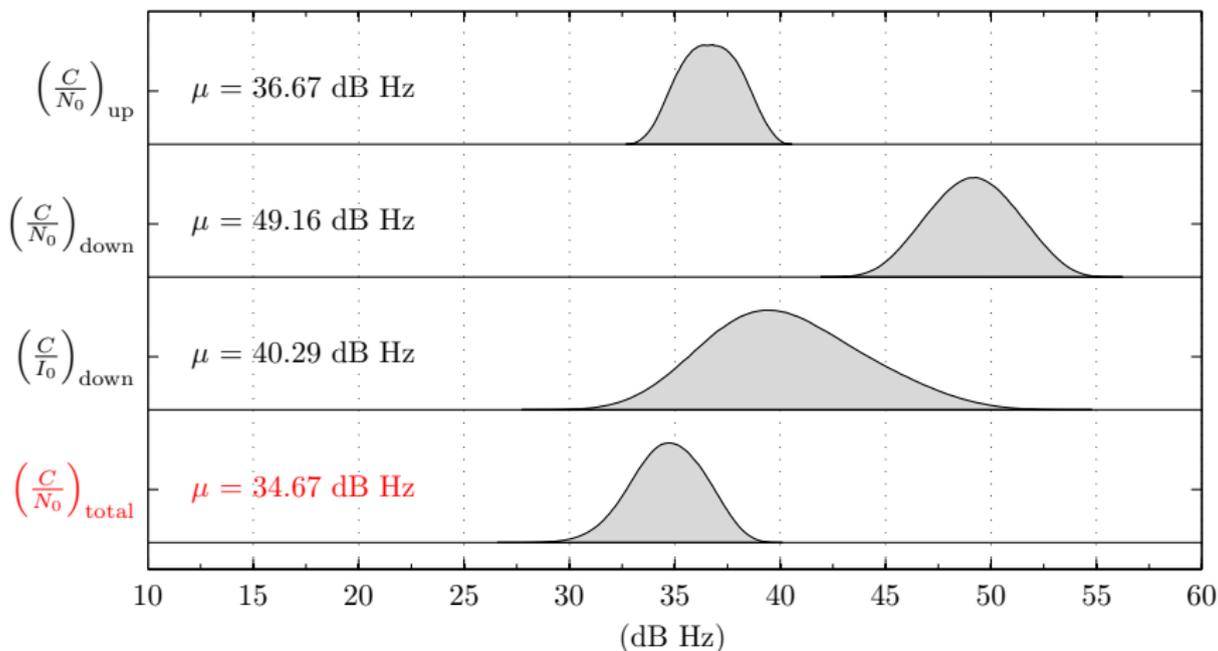


FIGURE 6: Rapports C/N_0 et C/I_0 du bilan de liaison pour le système MEOSAR.

Simulateur Cospas-Sarsat

- Étude des performances de démodulation du message de détresse

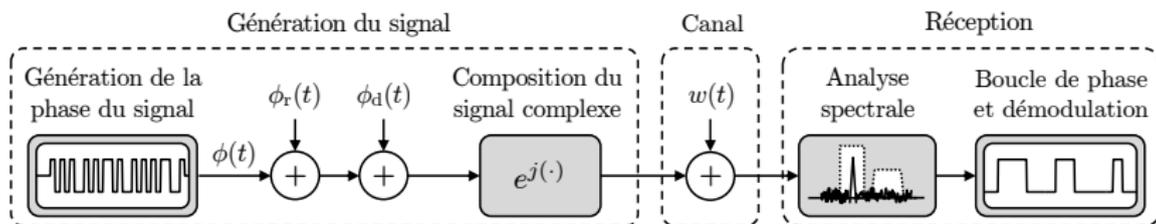


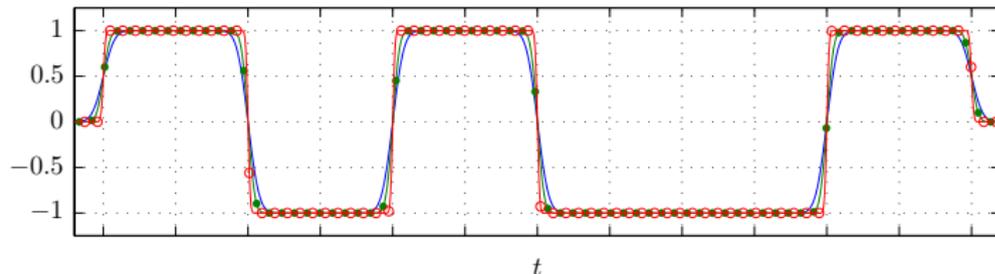
FIGURE 7: Organisation des traitements du simulateur Cospas-Sarsat.

- Deux paramètres importants ont été identifiés :
 - Temps de montée du signal (T_r)
 - Rythme symbole ($R_s = 1/T$)

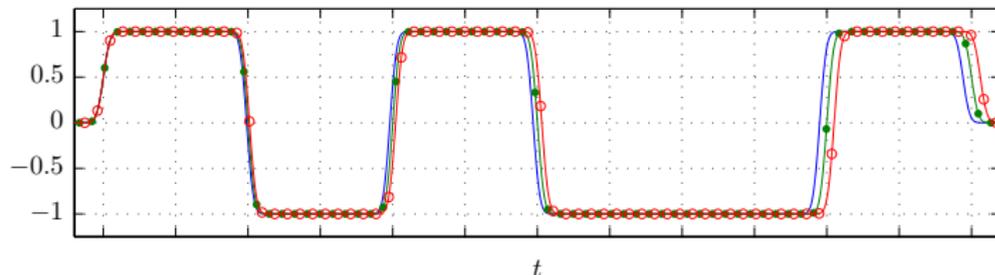
Objectifs de la thèse

- Étudier la localisation du système MEOSAR
- Étudier l'influence de T_r et de T sur les mesures de TOA

T_r :



T :



Objectifs de la thèse

- Étudier la localisation du système MEOSAR
- Étudier l'influence de T_r et de T sur les mesures de TOA
- Étudier l'influence du bruit de phase sur les mesures de FOA

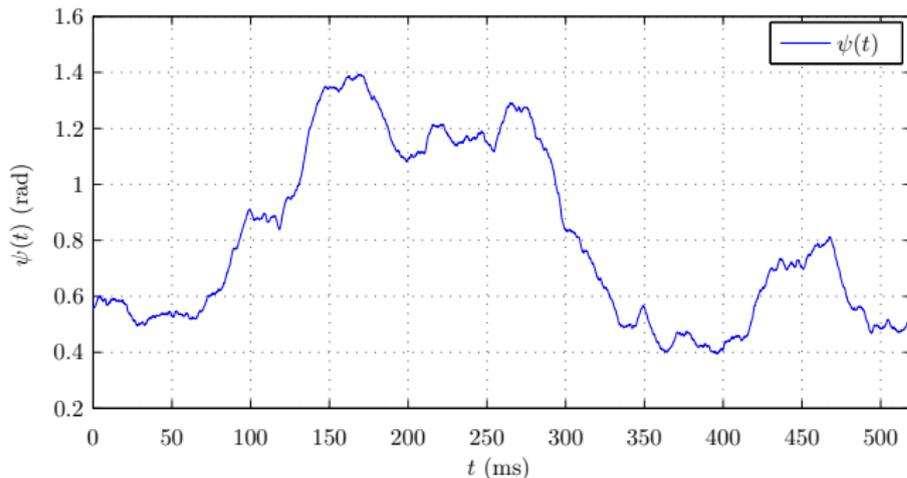


FIGURE 8: Une réalisation de bruit de phase $\psi(t)$.

1 Introduction

- Recherche et sauvetage par satellite
- Bilan de liaison
- Simulateur Cospas-Sarsat
- Objectifs de la thèse

2 Performances optimales du système

- Modèle de signal Cospas-Sarsat
- Performances d'estimation des paramètres
- Performances de localisation

3 Études complémentaires

- Utilisation d'information a priori
- Ajout de bruit de phase
- Localisation avec signaux multiples

4 Application aux signaux à spectre étalé

5 Conclusions et perspectives

Modèle de signal Cospas-Sarsat

- Modulation de phase avec mise en forme de Manchester

$$r(t) = s(t) + w(t)$$

$$s(t) = A \exp \left\{ j \left[2\pi\nu t + \beta \sum_{n=0}^{N-1} b_n g(t - nT - \tau) + \phi_0 \right] \right\}$$

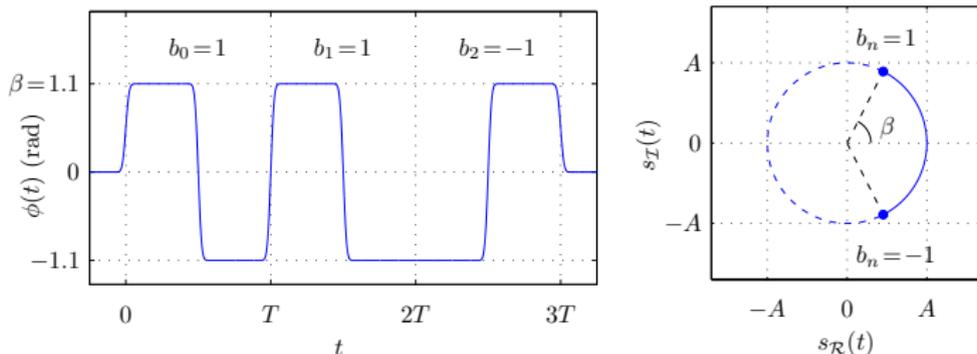


FIGURE 9: Phase et plan complexe de $s(t)$ pour $\mathbf{b} = (1, 1, -1)$.

Modèle de signal Cospas-Sarsat

- Modélisation du temps de montée avec la fonction d'erreur

$$f_{\alpha}(t) = \operatorname{erf}(\alpha t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\alpha t} e^{-x^2} dx$$

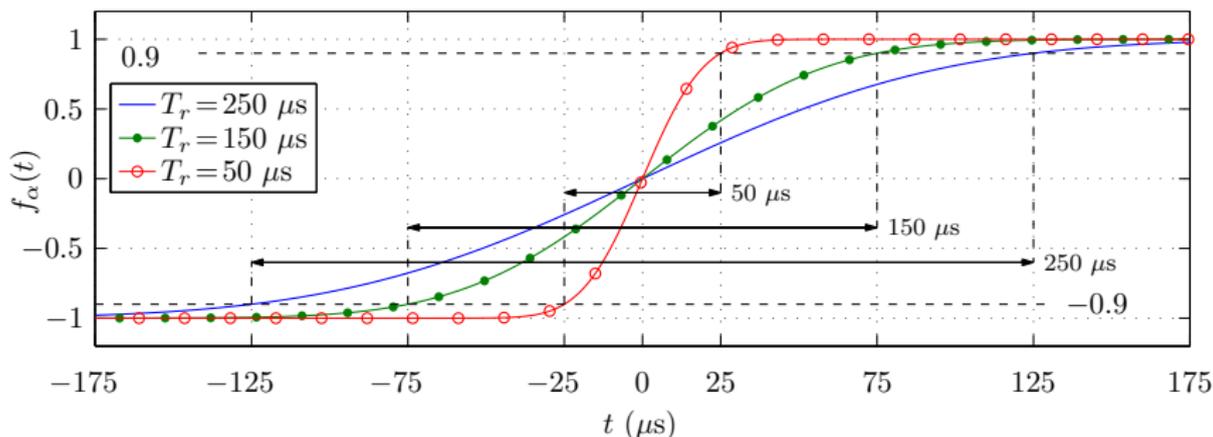


FIGURE 10: Fonction sigmoïde $f_{\alpha}(t)$ pour différents temps de montée T_r .

Modèle de signal Cospas-Sarsat

- Modélisation du temps de montée avec la fonction d'erreur

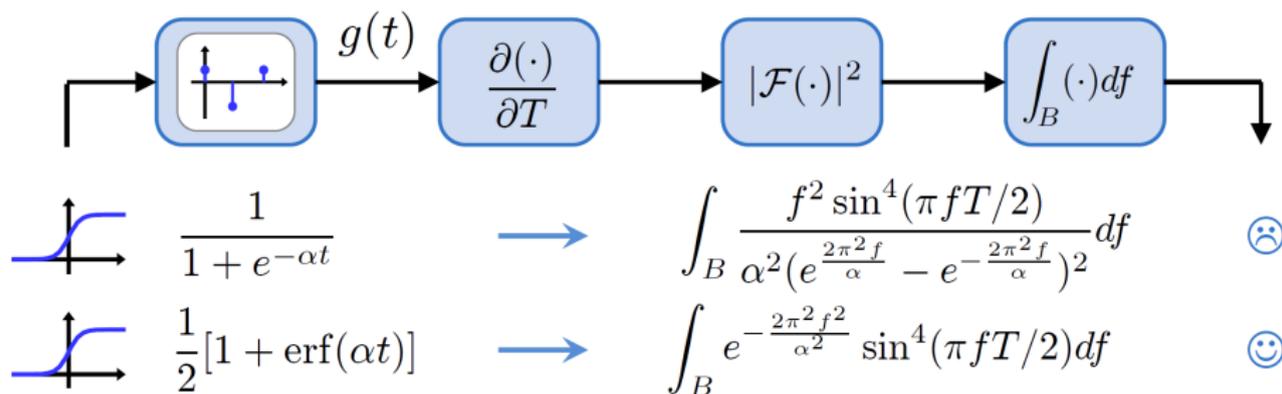


FIGURE 11: Chaîne de calcul pour les bornes de performance.

Performances d'estimation des paramètres

- Borne de Cramér-Rao

$$\text{BCR}(\lambda) = \frac{1}{\mathbb{E}_{\mathbf{r}} \left[\left(\frac{\partial \ln p(\mathbf{r}|\lambda)}{\partial \lambda} \right)^2 \right]}$$

- Borne de Cramér-Rao modifiée

$$\text{BCRM}(\lambda) = \frac{1}{\mathbb{E}_{\mathbf{r}, \mathbf{u}} \left[\left(\frac{\partial \ln p(\mathbf{r}|\mathbf{u}, \lambda)}{\partial \lambda} \right)^2 \right]}$$

$$\mathbf{u} = (A, \mathbf{b}, \dots)^T$$

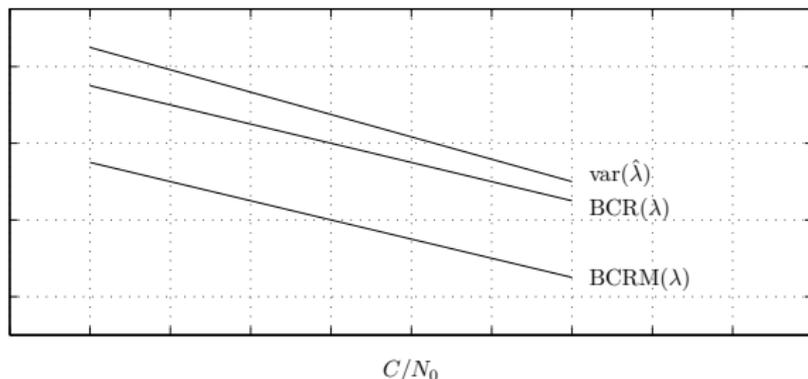


FIGURE 12: Variance de λ , $\text{BCR}(\lambda)$ et $\text{BCRM}(\lambda)$.

Performances d'estimation des paramètres

- BCRM pour l'estimation conjointe de $\lambda = (T, \tau, \nu)^T$

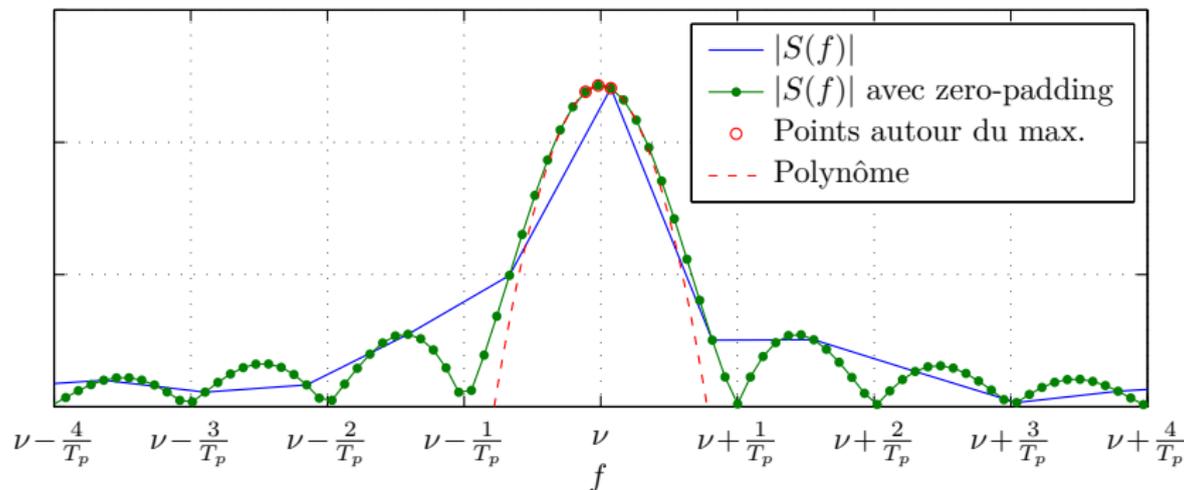
Durée du symbole :
$$\text{BCRM}_c(T) = 4\sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\alpha\beta^2 \left(\frac{C}{N_0}\right) N^3}$$

TOA :
$$\text{BCRM}_c(\tau) = \frac{4}{3}\sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\alpha\beta^2 \left(\frac{C}{N_0}\right) N}$$

FOA :
$$\text{BCRM}_c(\nu) = \frac{1}{\pi^2 \frac{T_0^3}{3} \frac{C}{N_0}}$$

Performances d'estimation des paramètres

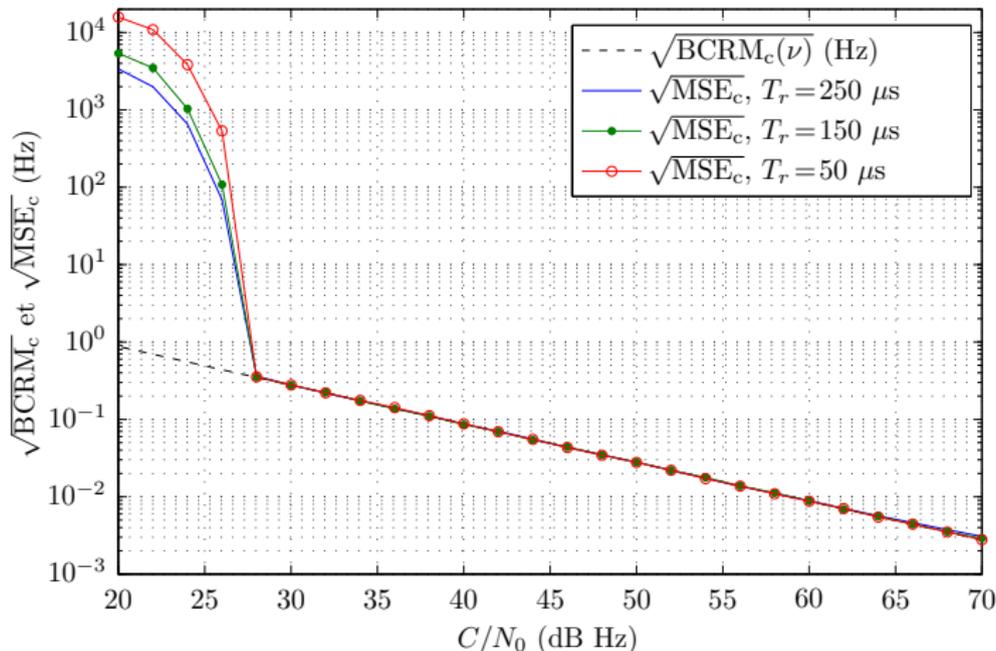
- Estimation de ν : méthode de transformée de Fourier [RB74]



[RB74] D. Rife and R. R. Boorstyn. Single tone parameter estimation from discrete-time observations. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 20(5) :591-598, Sept. 1974.

Performances d'estimation des paramètres

● Estimation de ν



Performances d'estimation des paramètres

- Estimation de T et τ : méthode de rééchantillonnage adaptée de [HCL03]

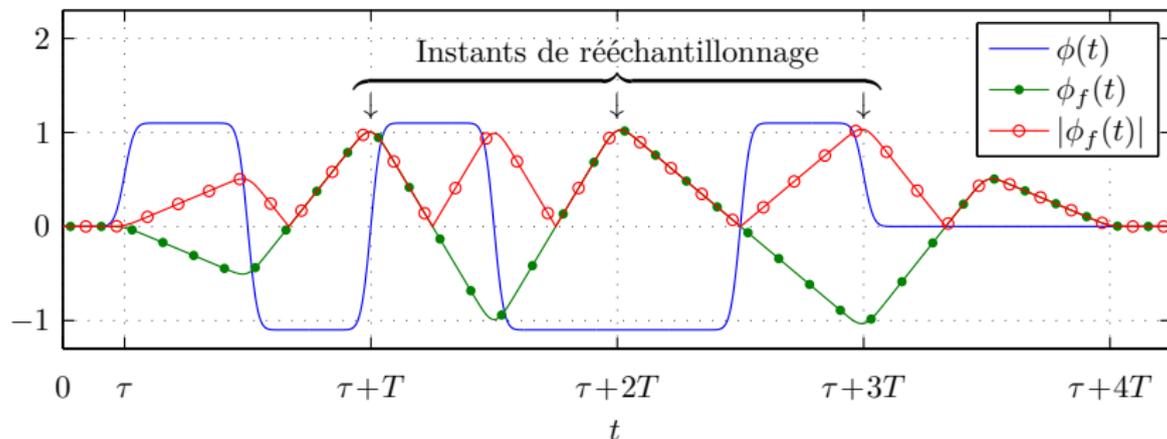
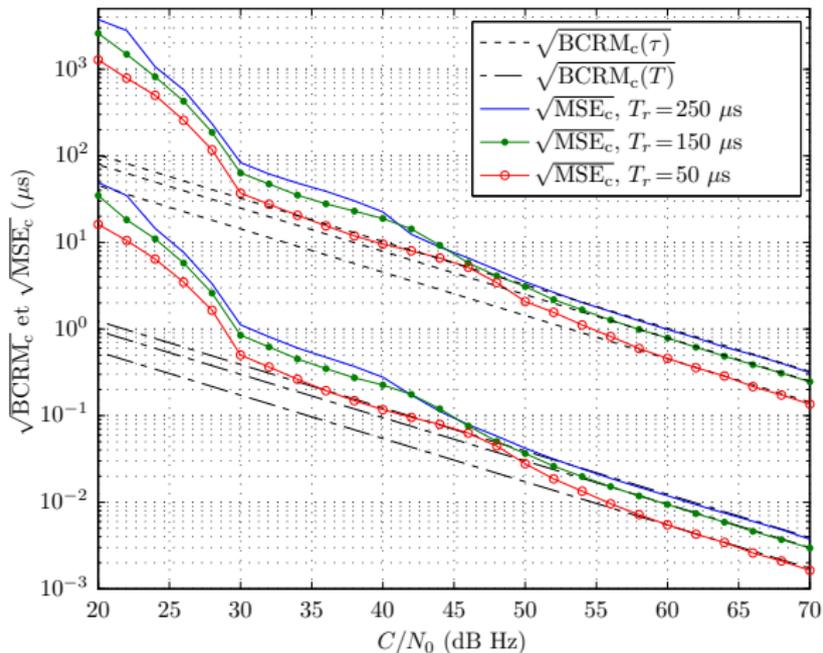


FIGURE 14: Filtrage adapté et rééchantillonnage de $\phi(t)$ pour $\mathbf{b} = (1, 1, -1)$.

[HCL03] S. Houcke, A. Chevreuril, P. Loubaton. Blind equalization - Case of an Unknown Symbol Period. *IEEE Trans. Signal Process.*, 51(3) :781-793, March 2003.

Performances d'estimation des paramètres

- Estimation de T et τ



Performances de localisation

- Estimation de position $\mathbf{p} = (x, y, z)^T$ à partir de mesures de TOA et de FOA
 - En considérant la balise statique et la voie descendante connue

$$\tau_i = \tau_0 + \frac{\rho_i}{c} + \epsilon_i, \quad \nu_i = \delta_f + f_0 \frac{v_i}{c} + \epsilon_{\nu_i}, \quad i = 1, \dots, M$$

- La BCRM de la position est obtenue par une transformation de paramètres

$$\text{BCRM}(p_i) = [(\mathbf{G}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{G})^{-1}]_{ii}, \quad i = 1, \dots, 3$$

- \mathbf{C} : précision des mesures de TOA et FOA
- \mathbf{G} : géométrie de la constellation

Performances de localisation

- Indicateurs de la géométrie des satellites :
 - GDOP : dispersion des satellites
 - $GDOP_f$: dispersion des vecteurs vitesses des satellites

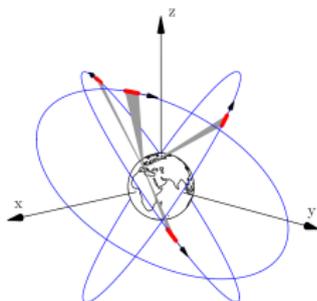


FIGURE 16: Géométrie favorable.

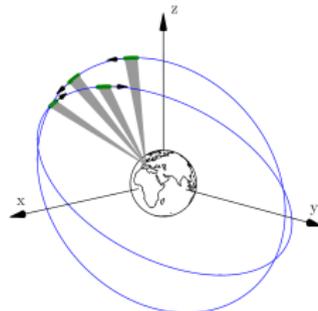


FIGURE 17: Géométrie défavorable.

- Estimation de la position : algorithme itératif
 - Position initiale : moyenne des vecteurs position des satellites

Performances de localisation

- Simulations $M = 4$ satellites, $\sigma_p^2 = \text{var}(\hat{x}) + \text{var}(\hat{y}) + \text{var}(\hat{z})$

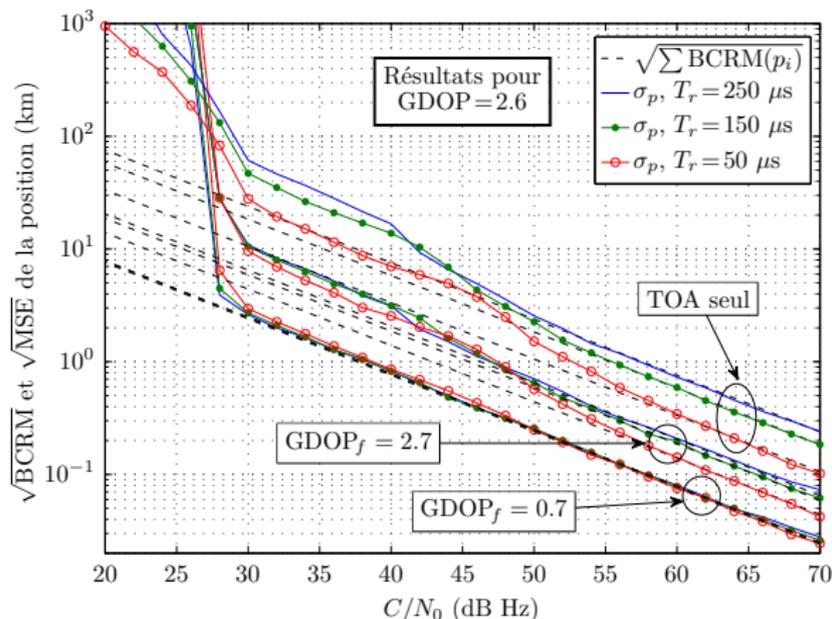


FIGURE 18: Estimation de la position de la balise pour des géométries favorables.

Performances de localisation

- Simulations $M = 4$ satellites, $\sigma_p^2 = \text{var}(\hat{x}) + \text{var}(\hat{y}) + \text{var}(\hat{z})$

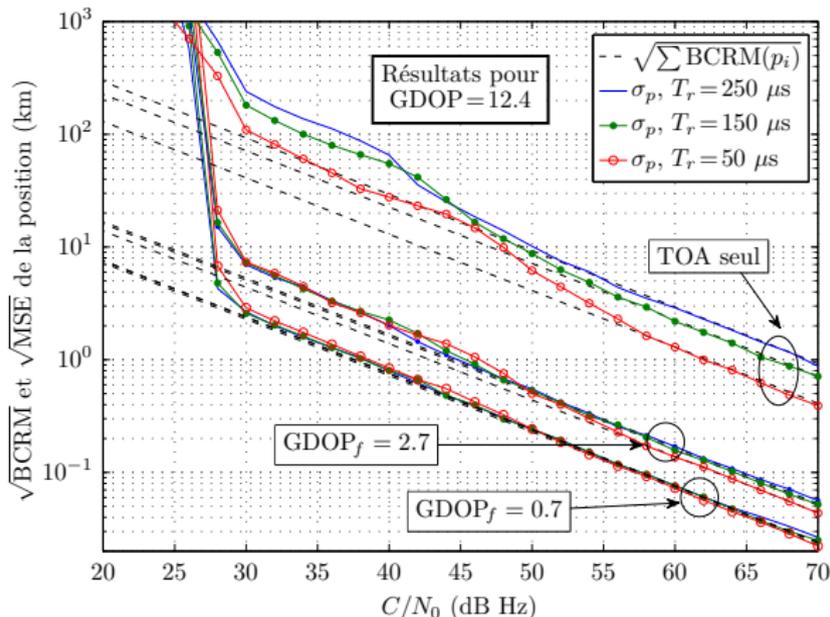


FIGURE 19: Estimation de la position de la balise pour des géométries défavorables.

1 Introduction

- Recherche et sauvetage par satellite
- Bilan de liaison
- Simulateur Cospas-Sarsat
- Objectifs de la thèse

2 Performances optimales du système

- Modèle de signal Cospas-Sarsat
- Performances d'estimation des paramètres
- Performances de localisation

3 Études complémentaires

- Utilisation d'information a priori
- Ajout de bruit de phase
- Localisation avec signaux multiples

4 Application aux signaux à spectre étalé

5 Conclusions et perspectives

Utilisation d'information a priori

- Exploiter les tolérances sur le rythme symbole et le temps de montée
 - $R_s = 400 \pm 4$ symboles/s
 - $T_r = 150 \pm 100 \mu s$
- Estimation Bayésienne
 - Borne de Cramér-Rao Bayésienne modifiée

$$\text{BCRBM} = \frac{1}{\text{BCRM}^{-1} + \mathbf{I}_P(\boldsymbol{\lambda})}$$

- Contribution de l'information a priori

$$[\mathbf{I}_P(\boldsymbol{\lambda})]_{ij} = \mathbb{E}_{\boldsymbol{\lambda}} \left[\frac{\partial \ln p(\boldsymbol{\lambda})}{\partial \lambda_i} \frac{\partial \ln p(\boldsymbol{\lambda})}{\partial \lambda_j} \right]$$

Utilisation d'information a priori

- Utilisation d'information a priori sur la période symbole : $p(T) \sim \mathcal{N}(\mu_T, \sigma_T^2)$
 - μ_T : valeur nominale de T
 - σ_T^2 : précision avec laquelle on connaît T

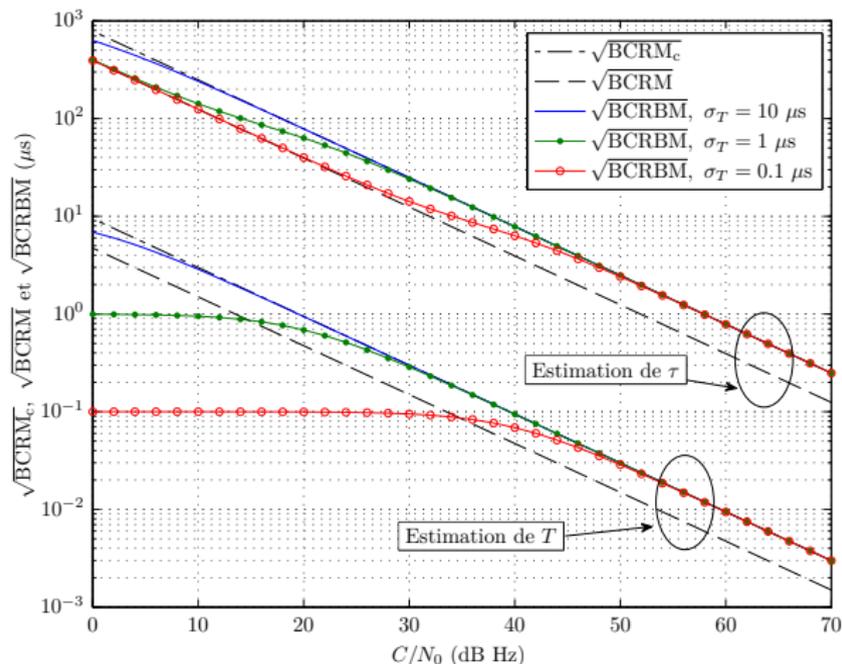
$$\text{BCRBM}_c(\tau) = \text{BCRM}(\tau) \frac{3\alpha\beta^2 \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\frac{C}{N_0}\right) \frac{N^3}{3} + \frac{1}{\sigma_T^2}}{3\alpha\beta^2 \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\frac{C}{N_0}\right) \frac{N^3}{12} + \frac{1}{\sigma_T^2}}$$

- Information très précise : $\lim_{\sigma_T^2 \rightarrow 0} \text{BCRBM}_c(\tau) = \text{BCRM}(\tau)$
- Information n'est pas utile : $\lim_{\sigma_T^2 \rightarrow \infty} \text{BCRBM}_c(\tau) = \text{BCRM}_c(\tau)$

$$\text{BCRM}_c(\tau) = 4 \text{BCRM}(\tau)$$

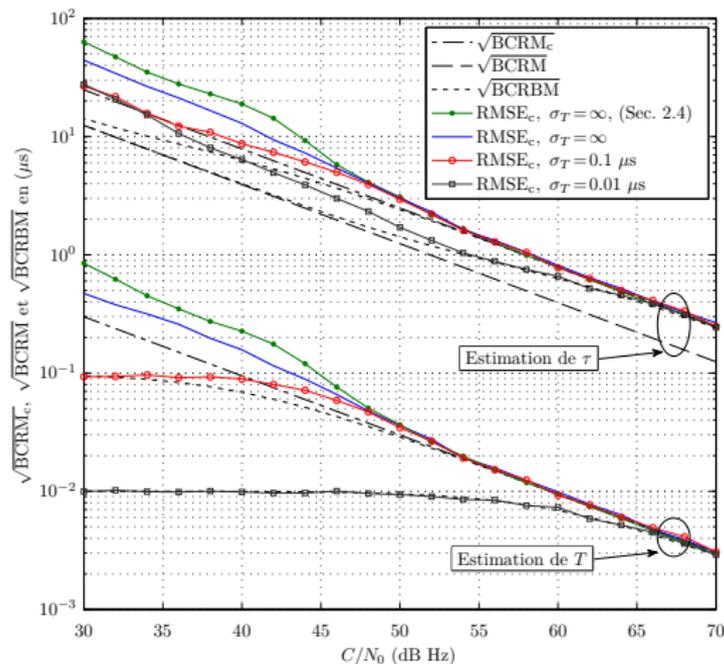
Utilisation d'information a priori

- Utilisation d'information a priori sur la période symbole



Utilisation d'information a priori

- Simulations - Estimation de (T, τ) avec une méthode de corrélation classique



Utilisation d'information a priori

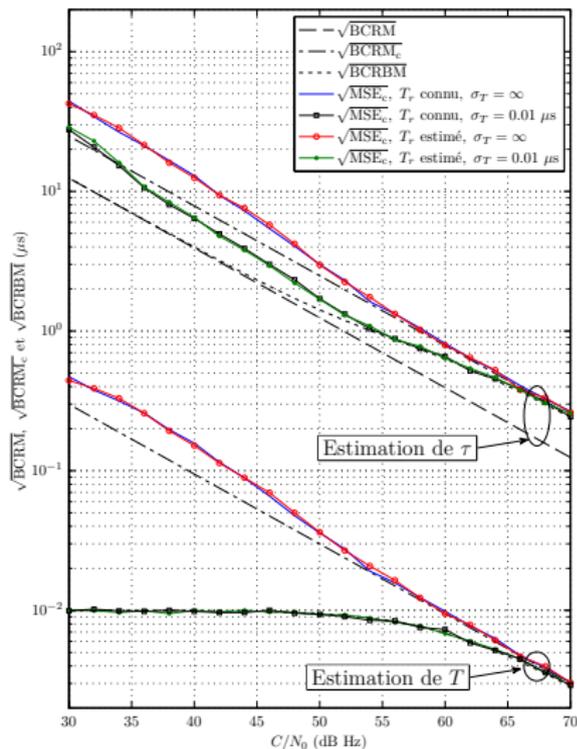
- Utilisation d'information a priori sur le temps de montée (T_r)
 - Estimation de T_r

$$\text{BCRM}(T_r) = \frac{8 \operatorname{erf}^{-1}(0.9)}{3} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{T_r}{\beta^2 \left(\frac{C}{N_0}\right) N}$$

- L'estimation de T_r est découplée de l'estimation de (ν, T, τ)
- Un a priori sur T_r est sans intérêt pour l'estimation des autres paramètres

Utilisation d'information a priori

- Simulations
 - Estimation de (T, τ)
 - Méthode de corrélation



Ajout de bruit de phase

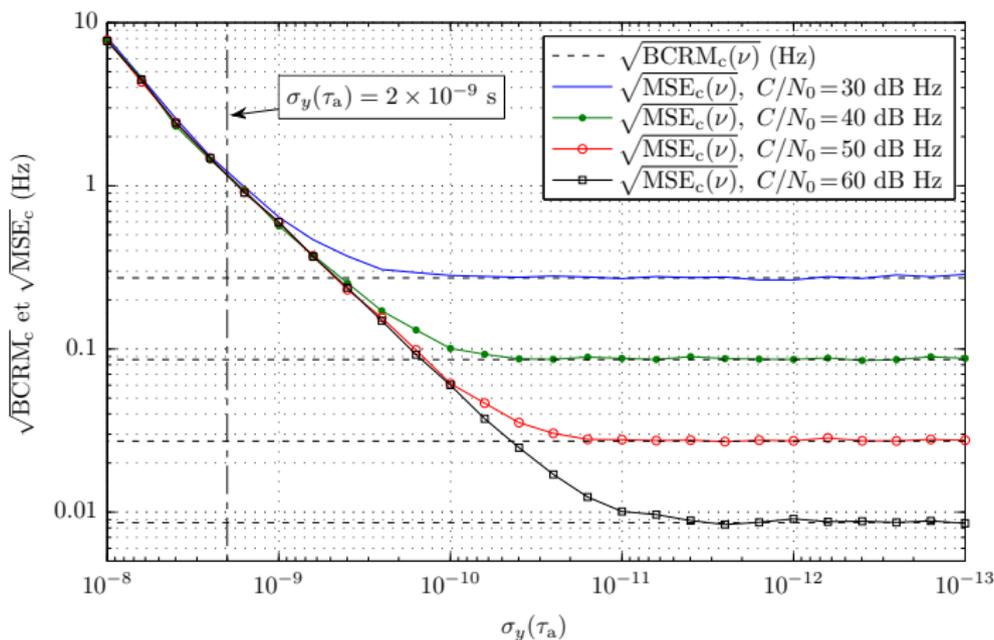
- Étude de l'instabilité de l'oscillateur de la balise
 - Paramètre clé pour l'estimation du FOA
 - Modélisation du bruit de phase

$$\Psi(t) = 2\pi f_0 t + \underbrace{\sum_{k=2}^K \frac{\Omega_{k-1}}{k!} t^k}_{\text{dérive de phase à long terme}} + \underbrace{[\psi(t) - \psi(0)]}_{\text{instabilité de phase à court terme}} + \Psi(0)$$

- Bruit de scintillation de fréquence (réaliste pour les balises)
 - Densité spectrale : $S_\psi(f) = f_0^2 \frac{\sigma_y^2(\tau_a)}{2 \ln(2)} f^{-3}$

Ajout de bruit de phase

- Simulations - estimation du décalage Doppler (ν) - méthode de FFT



Localisation avec signaux multiples

- Objectif : exploiter plusieurs mesures pour améliorer la localisation ($T_e = 50$ s)
- Un signal émis par la balise : $\text{BCRM}(p_i) = [(\mathbf{G}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{G})^{-1}]_{ii}$
- L signaux émis par la balise

$$\text{BCRM}(p_i) = \left[\left(\sum_{n=1}^L \mathbf{G}_n^T \mathbf{C}_n^{-1} \mathbf{G}_n \right)^{-1} \right]_{ii}, \quad i = 1, \dots, 3$$

- \mathbf{C}_n : précision des mesures de TOA et FOA
- \mathbf{G}_n : géométrie de la constellation
- En considérant \mathbf{C}_n et \mathbf{G}_n constantes :

$$\text{BCRM}(p_i) = \frac{1}{L} [(\mathbf{G}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{G})^{-1}]_{ii}, \quad i = 1, \dots, 3$$

Localisation avec signaux multiples

- Estimation de position - algorithme itératif
 - $L = 18$ émissions (15 minutes)

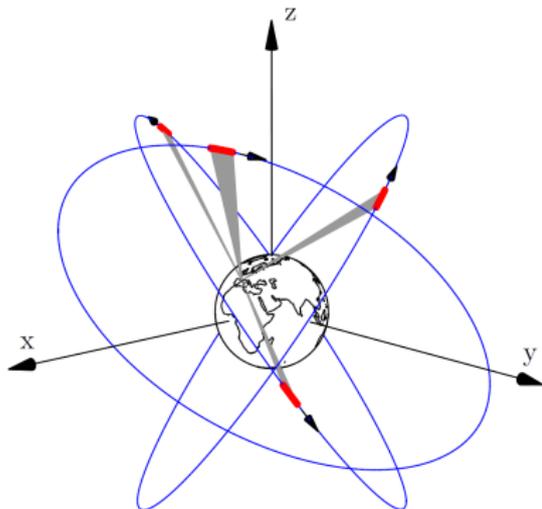


FIGURE 20: Géométrie favorable.

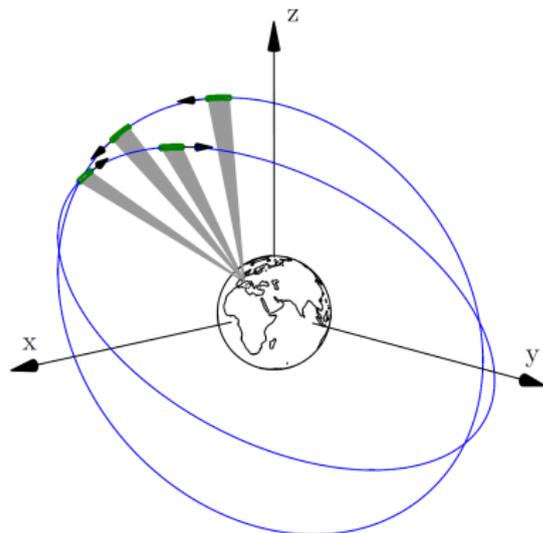


FIGURE 21: Géométrie défavorable.

Localisation avec signaux multiples

- Estimation de position

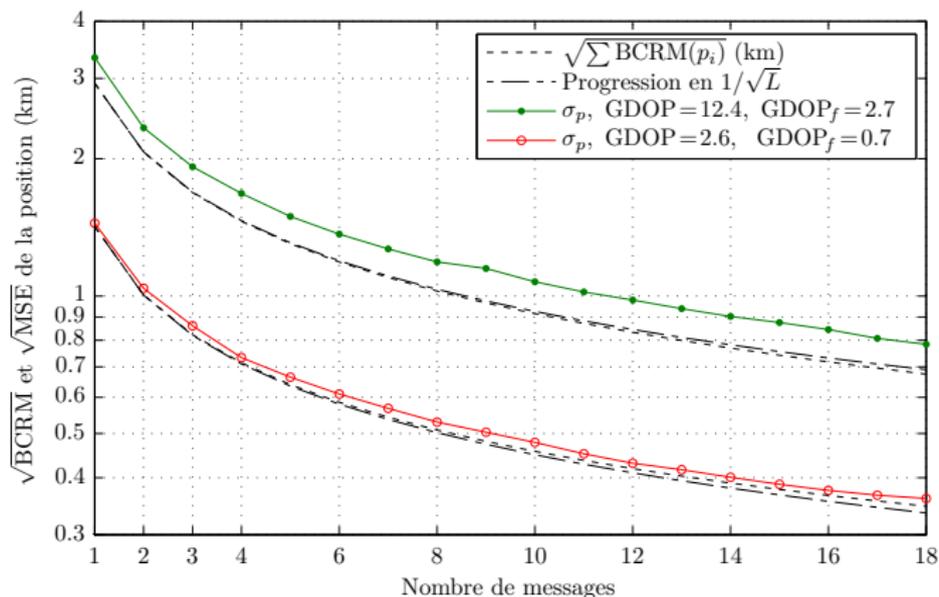


FIGURE 22: Estimation de position pour de multiples signaux reçus et $C/N_0 = 34.8$ dB Hz.

Localisation avec signaux multiples

● Estimation de position

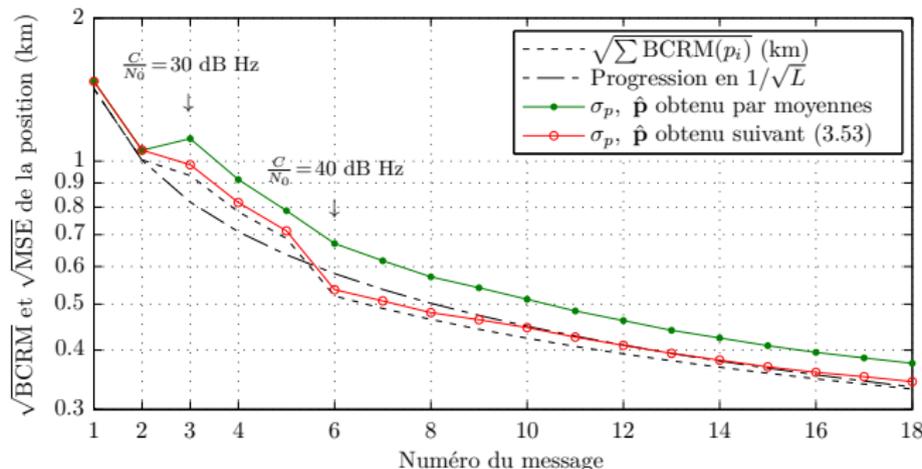


FIGURE 23: Comparaison de la méthode d'estimation de \mathbf{p} avec la moyenne des positions.

$$\hat{\mathbf{p}}_{k+1} = \mathbf{p}_k + \left(\sum_{n=1}^L \mathbf{G}_{k,n}^T \mathbf{C}_n^{-1} \mathbf{G}_{k,n} \right)^{-1} \times \sum_{n=1}^L [\mathbf{G}_{k,n}^T \mathbf{C}_n^{-1} \mathbf{y}_{k,n}] \quad (3.53)$$

1 Introduction

- Recherche et sauvetage par satellite
- Bilan de liaison
- Simulateur Cospas-Sarsat
- Objectifs de la thèse

2 Performances optimales du système

- Modèle de signal Cospas-Sarsat
- Performances d'estimation des paramètres
- Performances de localisation

3 Études complémentaires

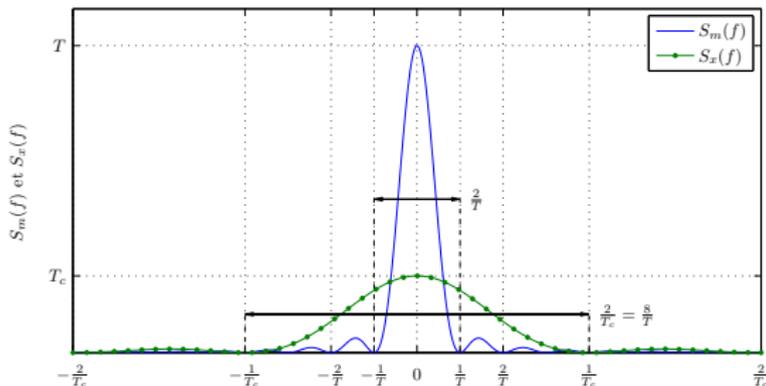
- Utilisation d'information a priori
- Ajout de bruit de phase
- Localisation avec signaux multiples

4 Application aux signaux à spectre étalé

5 Conclusions et perspectives

Application aux signaux à spectre étalé

- Contexte : LEO/GEOSAR → MEOSAR (répéteurs transparents)
- Signaux CDMA
 - Plus grande précision de mesure de TOA
 - Robustesse face aux interférences
 - Technique de codage par l'accès multiple : $x(t) = m(t)c(t)$



Application aux signaux à spectre étalé

- Modulation OQPSK (*Offset* QPSK)
 - Deux voies en quadrature avec décalage d'un demi symbole
 - Réduit les changements abrupts du signal modulé
 - Moins sensible au bruit des amplificateurs

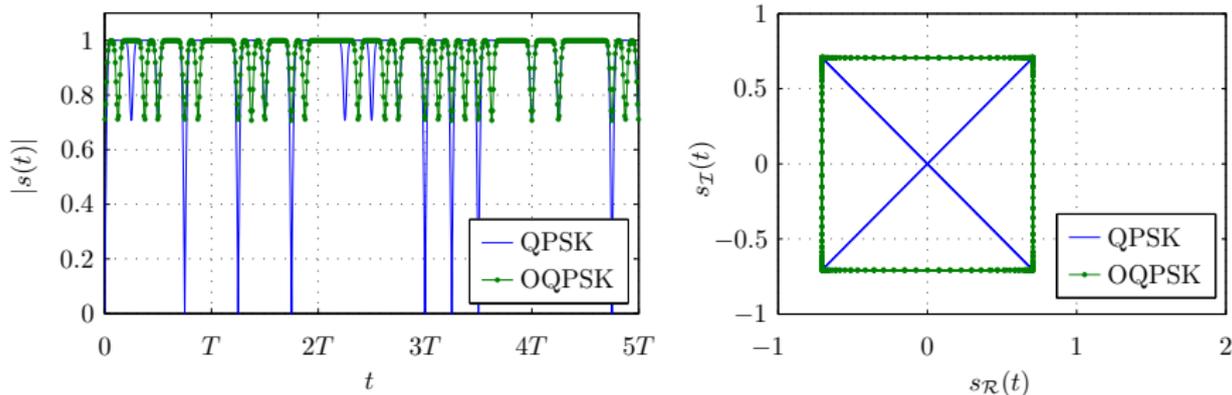


FIGURE 24: Comparaison des modulations QPSK et OQPSK.

Application aux signaux à spectre étalé

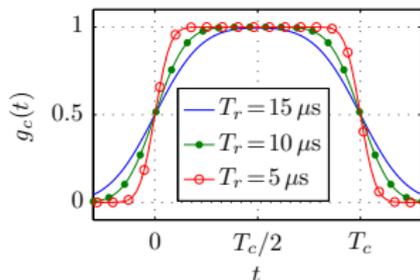
- Modèle de signal CDMA MEOSAR

$$s_{\mathcal{R}}(t) = \frac{A}{\sqrt{2}} \sum_{n=0}^{N_c-1} b_{\mathcal{R}_{\lfloor n/\kappa \rfloor}} c_{\mathcal{R}_n} g_c(t - nT_c - \tau)$$

$$s_{\mathcal{I}}(t) = \frac{A}{\sqrt{2}} \sum_{n=0}^{N_c-1} b_{\mathcal{I}_{\lfloor n/\kappa \rfloor}} c_{\mathcal{I}_n} g_c(t - nT_c - T_c/2 - \tau)$$

- Modèle pour l'impulsion $g_c(t)$ avec des fonctions sigmoïdes - *chip*

$$g_c(t) = \frac{1}{2} \operatorname{erf}(\alpha t) - \frac{1}{2} \operatorname{erf}[\alpha(t - T_c)]$$



Performances d'estimation des paramètres

● Signal actuel

$$\text{BCRM}_c(\nu) = \frac{1}{\pi^2 \frac{T_p^3}{3} \frac{C}{N_0}}$$

$$\text{BCRM}_c(\tau) = \frac{4}{3} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\alpha \beta^2 \left(\frac{C}{N_0}\right) N}$$

- $T_p = 160$ ms
- Nombre de symboles $N = 144$
- $\alpha = 1.5 \times 10^4$
- Indice de modulation $\beta = 1.1$

● Signal CDMA

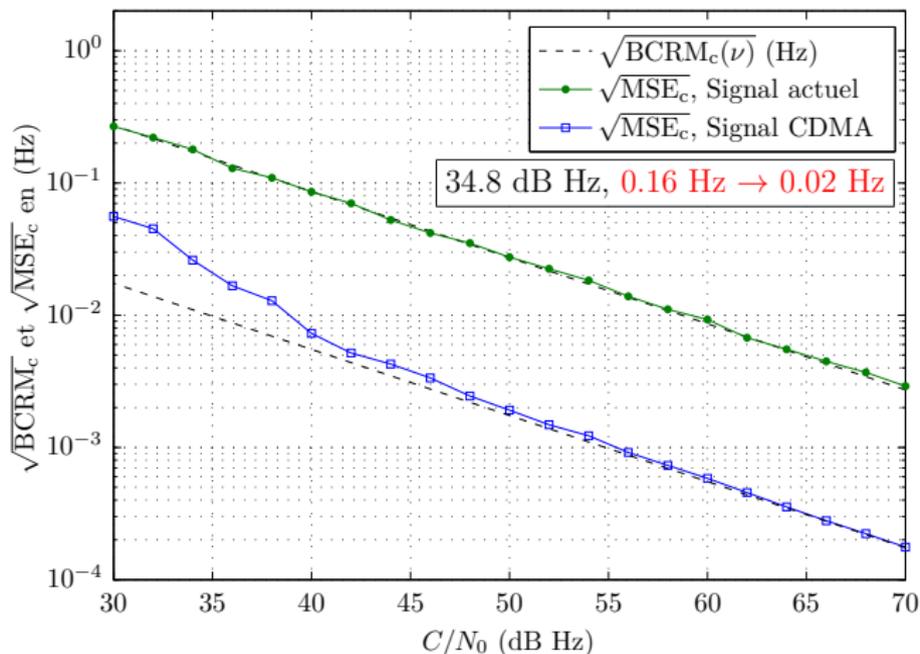
$$\text{BCRM}_c(\nu) = \frac{1}{\pi^2 \frac{T_0^3}{3} \frac{C}{N_0}}$$

$$\text{BCRM}_c(\tau) = 4 \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\alpha \left(\frac{C}{N_0}\right) N_c}$$

- $T_0 = 1$ s
- Nombre de *chips* $N_c = 38400$
- $\alpha = 1.5 \times 10^5$

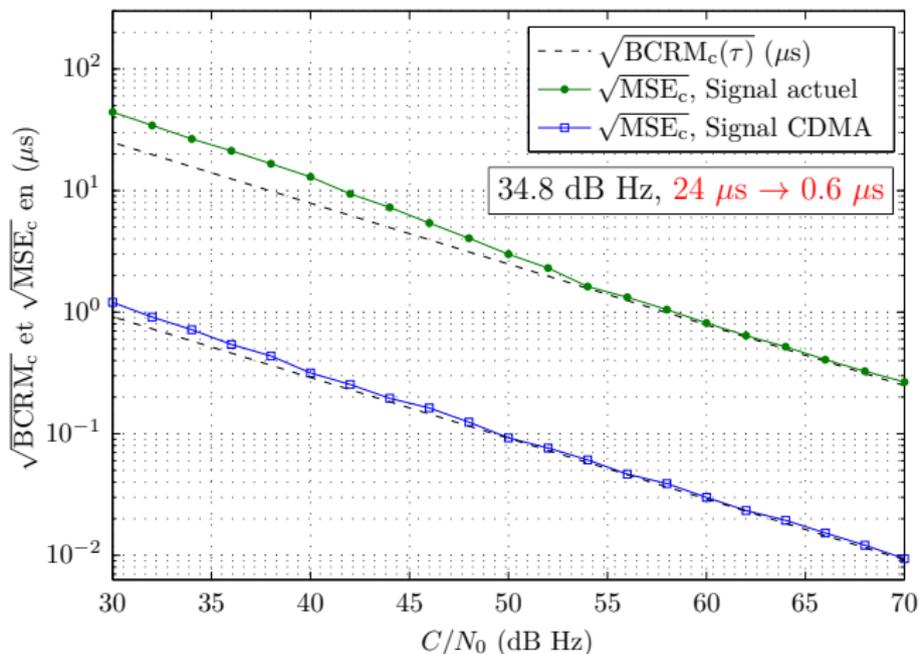
Performances d'estimation des paramètres

- Estimation de l'effet Doppler ν



Performances d'estimation des paramètres

- Estimation du temps d'arrivée τ



Performances de localisation

- Estimation de position

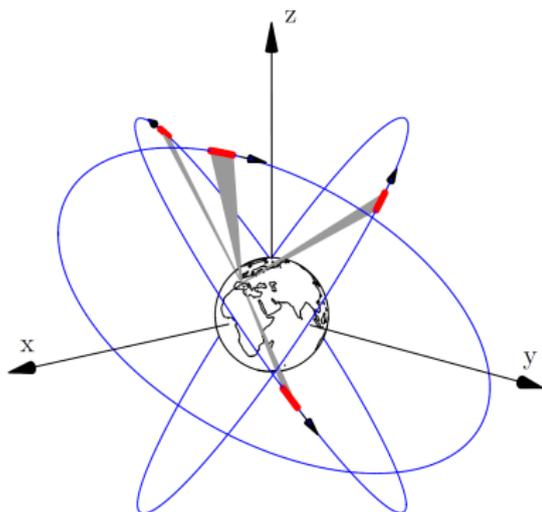


FIGURE 27: Géométrie favorable.

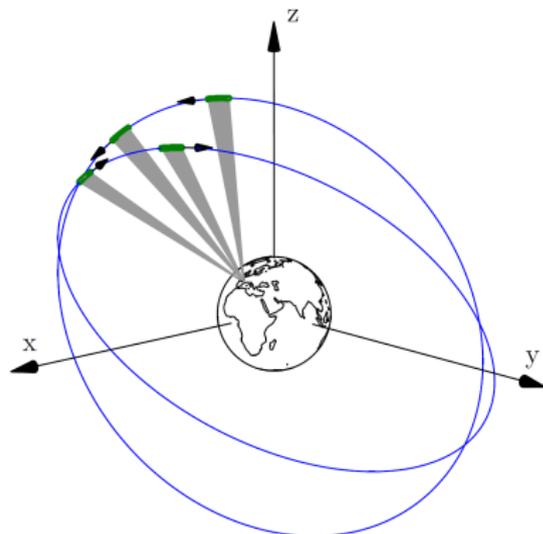
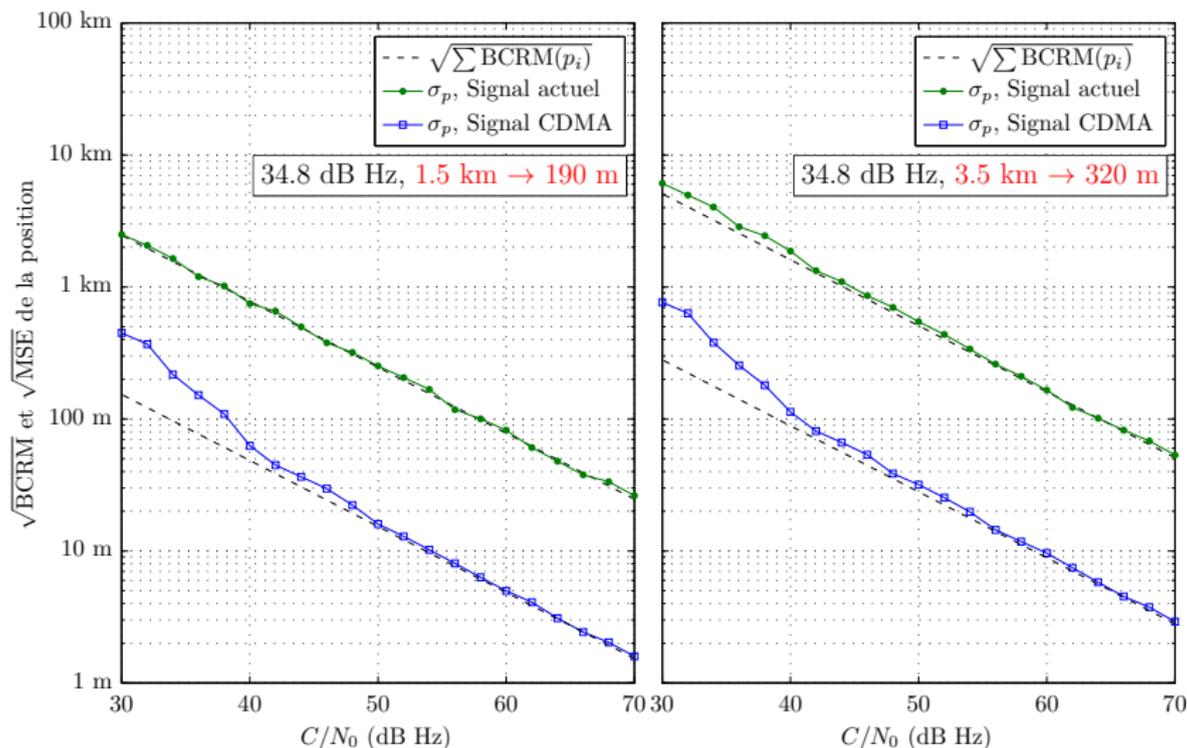


FIGURE 28: Géométrie défavorable.

Performances de localisation



1 Introduction

- Recherche et sauvetage par satellite
- Bilan de liaison
- Simulateur Cospas-Sarsat
- Objectifs de la thèse

2 Performances optimales du système

- Modèle de signal Cospas-Sarsat
- Performances d'estimation des paramètres
- Performances de localisation

3 Études complémentaires

- Utilisation d'information a priori
- Ajout de bruit de phase
- Localisation avec signaux multiples

4 Application aux signaux à spectre étalé

5 Conclusions et perspectives

Conclusions

- Bilan de liaison pour le système MEOSAR
- Modèle de signal de détresse à l'aide de fonctions sigmoïdes
 - Performances d'estimation des paramètres
 - Performances de localisation
 - Obtention de BCRM faciles à interpréter
- Localisation avec information a priori, bruit de phase et signaux multiples
- Application aux signaux CDMA

Recommandations

- Ajout de contraintes sur le bruit de phase de la balise
- L'ajout de contraintes sur T n'est pas dans le domaine technologique des balises
 - Durcissement facteur 250 par rapport à l'exigence actuelle
 - Contraintes de coût/performance pour les balises
- Utilisation du GDOP et du $GDOP_f$ lors du calcul de position
- Utilisation de signaux CDMA : localisation 10 fois plus précise

Perspectives

- Estimation de la vitesse de la balise
- Développement de méthodes d'estimation moins coûteuses
 - Pour l'estimation des paramètres
 - Pour l'estimation de position dans le cas de multiples émissions
- Étudier la coopération entre les stations de réception pour le suivi des satellites

Victor Bissoli Nicolau
victor.bissoli@tesa.prd.fr

GDOP et GDOPf

$$\text{GDOP} = \sqrt{\text{Tr} [(\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1}]} \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1(\mathbf{p}) & \mathbf{u}_2(\mathbf{p}) & \cdots & \mathbf{u}_M(\mathbf{p}) \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}^T$$

$$\text{GDOP}_f = \sqrt{\text{Tr} [(\mathbf{H}_f^T \mathbf{H}_f)^{-1}]} \quad \mathbf{H}_f = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\chi}_1(\mathbf{p}) & \boldsymbol{\chi}_2(\mathbf{p}) & \cdots & \boldsymbol{\chi}_M(\mathbf{p}) \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}^T$$

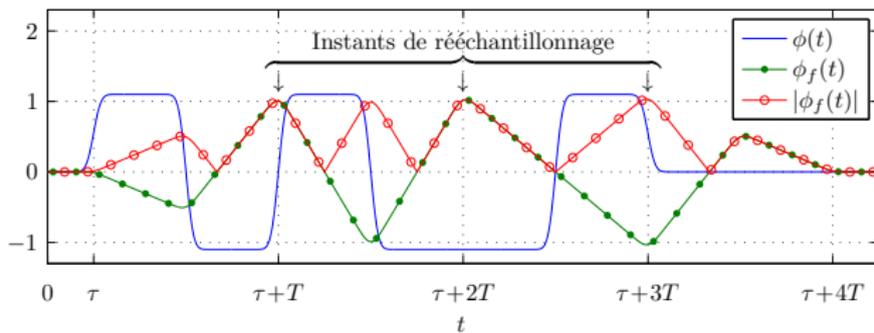
$$\frac{\partial \tau_{1i}}{\partial \mathbf{p}} = \frac{1}{c} [\mathbf{u}_i(\mathbf{p}) - \mathbf{u}_1(\mathbf{p})]^T, \quad i = 2, \dots, M,$$

$$\frac{\partial \nu_{1i}}{\partial \mathbf{p}} = \frac{1}{c} [\boldsymbol{\chi}_i(\mathbf{p}) - \boldsymbol{\chi}_1(\mathbf{p})]^T, \quad i = 2, \dots, M,$$

$$\boldsymbol{\chi}_i(\mathbf{p}) = f_0 \frac{\mathbf{u}_i(\mathbf{p}) \mathbf{u}_i^T(\mathbf{p}) - \mathbf{I}}{\rho_i} \mathbf{v}_i, \quad i = 2, \dots, M.$$

Méthode de rééchantillonnage

- Le filtrage adapté produit une somme de fonctions triangulaires à $T, 2T, \dots, NT$
- La valeur absolue du signal est rééchantillonnée selon une grille pré-spécifiée
- Maximisation de la somme du signal rééchantillonné (*fonction de contraste*)
- Obtention des estimateurs \hat{T} et $\hat{\tau}$



Méthode de corrélation

- Signaux actuels
 - Estimation de ν : méthode de FFT sur la porteuse pure
 - Compensation de l'effet Doppler
 - Estimation du message à l'aide d'un filtrage adapté
 - Estimation de (T, τ) : corrélation avec la réplique du signal
- Signaux CDMA
 - Estimation de (ν, T_c, τ) : corrélation avec le préambule (1/6 s)
 - Compensation de l'effet Doppler
 - Dé-étalement du signal avec le code connu
 - Estimation du message à l'aide d'un filtrage adapté
 - Estimation de (ν, T_c, τ) : corrélation avec la réplique du signal (1 s)