

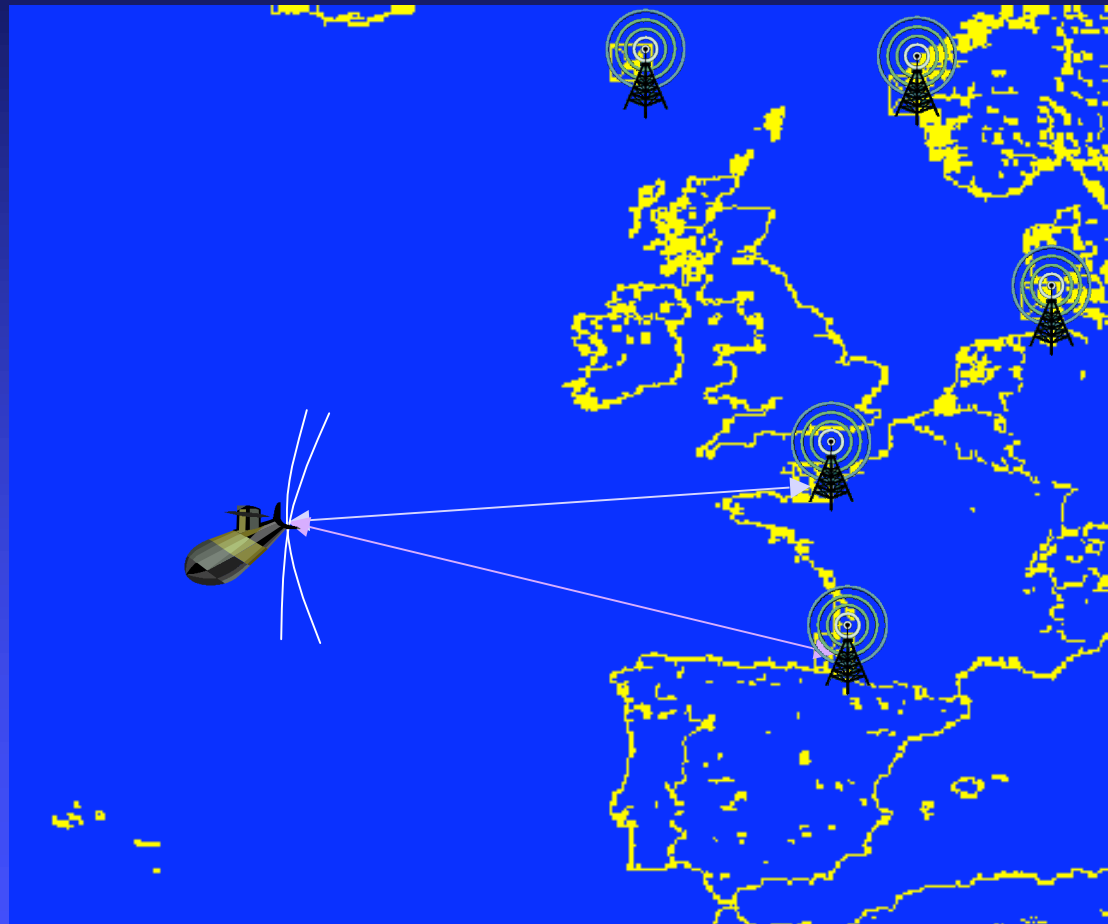
# Traitement Optimal du Signal LORAN-C

André Monin / LAAS-CNRS

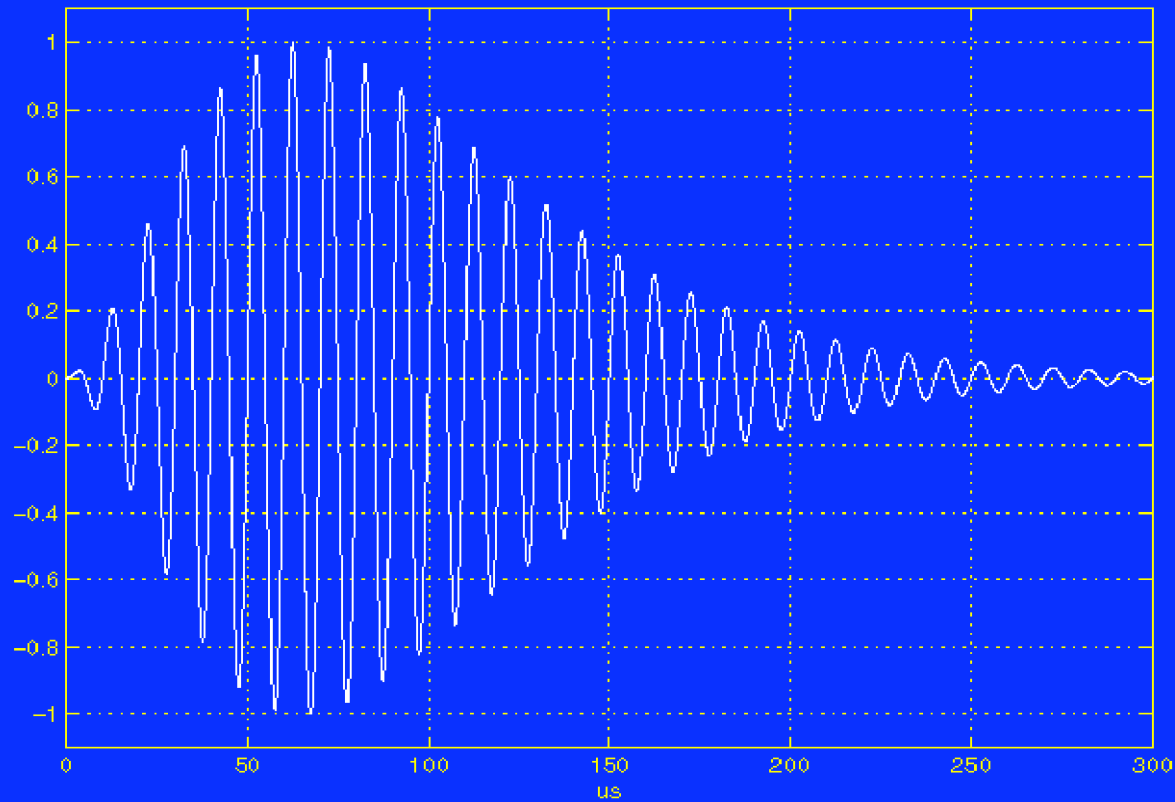
Gilles Rigal / DIGINEXT

# Traitement du Signal LORAN-C

## Principe de positionnement – mode circulaire



# Forme d'onde



$$s(t) = (t/t_0)^2 \exp(-2(t - t_0)/t_0) \sin(2\pi f_0 t)$$

# Phases de l'étude

- Modélisation et étude de faisabilité en simulation
- Validation sur données réelles à quai (Brest)
- Préparation de la campagne de mesures Langevin
- Validation sur données réelles en mer (Atlantique Nord)
- Modélisation de l'antenne filaire et validation

# Principales difficultés

- Très faibles rapports signal/bruit ( $< -30\text{dB}$ )
  - ➔ intégration longue du signal
- Onde ciel arrive  $\cong 30\mu\text{s}$  après l'onde de sol (3 pseudo-périodes)
- Onde de ciel beaucoup plus puissante que l'onde de sol
  - ➔ risque d'accrocher l'onde de ciel
  - ➔ tenir compte du rapport de puissance onde de sol/onde de ciel
- Fortes déformations du signal sur antenne filaire
  - ➔ nécessité de modéliser précisément l'antenne
- Travailler sur données réelles
  - ➔ résoudre tous les problèmes conjointement

# Modèle

- Modèle du porteur :

$$x_{t+\Delta t} = x_t + V_t \sin(K_t) \Delta t + \sin(K_t) \delta V_t + V_t \cos(K_t) \delta K_t$$

$$y_{t+\Delta t} = y_t + V_t \cos(K_t) \Delta t + \cos(K_t) \delta V_t - V_t \sin(K_t) \delta K_t$$

$V_t \pm \delta V_t$   $\implies$  Mesure de vitesse

$K_t \pm \delta K_t$   $\implies$  Mesure de cap

■ Modèle d'observation :

$$z_t = \sum_{k=1}^{N_s} (a_t^k s_k(t - r(D_t^k))) + \sum_{l=1}^M A_t^{k,l} s_k(t - r(D_t^k) - \tau_t^{k,l}) + v_t$$

$a_t^k$



Amplitudes de l'onde de sol

$A_t^{k,l}$

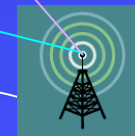


Amplitudes de l'onde de ciel

$\tau_t^{k,l}$



Retards onde de ciel



# Analyse du modèle

Etat du système :  $[a_t^k, A_t^{k,l}, \tau_t^{k,l}, x_t, y_t]$

Modèle linéaire en  $a_t^k$  et  $A_t^{k,l}$

Modèle localement linéaire en  $x_t, y_t$  et  $\tau^{k,l}$

Amplitudes  $a_t^k$  prévisibles par modèle ( $a_t^k > 0$ )

Bruits dynamiques “faibles”

Incertitude initiale “grande”

Approximation par somme de gaussienne “tronquées”



# Approximation en somme de gaussiennes (Sorenson-1972)

$$p(X_t | Z_0^t) \cong \sum_{i=1}^N \rho_t^i G(X_t; \hat{X}_{t|t}^i, P_{t|t}^i)$$

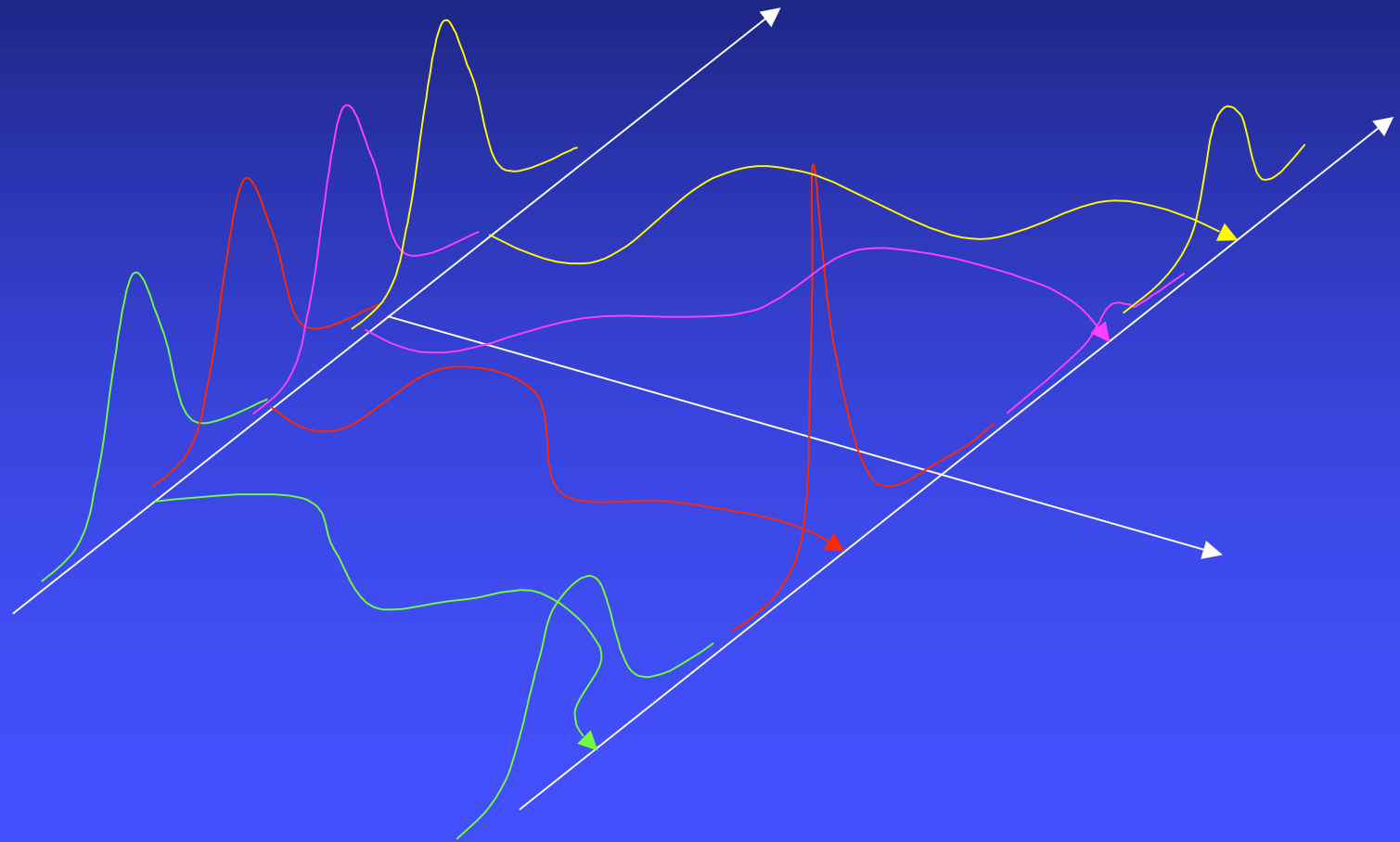
## ■ Prédiction

$$\begin{aligned} p(X_{t+1} | Z_0^t) &\cong \sum_{i=1}^N \rho_t^i \int p(X_{t+1} | X_t) G(X_t; \hat{X}_{t|t}^i, P_{t|t}^i) dX_t \\ &\cong \sum_{i=1}^N \rho_t^i G(X_{t+1}; \hat{X}_{t+1|t}^i, P_{t+1|t}^i) \end{aligned}$$

## ■ Correction

$$\begin{aligned} p(X_{t+1} | Z_0^{t+1}) &\propto \sum_{i=1}^N \rho_t^i G(X_{t+1}; \hat{X}_{t+1|t}^i, P_{t+1|t}^i) G(Z_{t+1}; h(X_{t+1}), R) \\ &\cong \sum_{i=1}^N \rho_{t+1}^i G(X_{t+1}; \hat{X}_{t+1|t+1}^i, P_{t+1|t+1}^i) \end{aligned}$$

# Evolution de la densité de probabilité



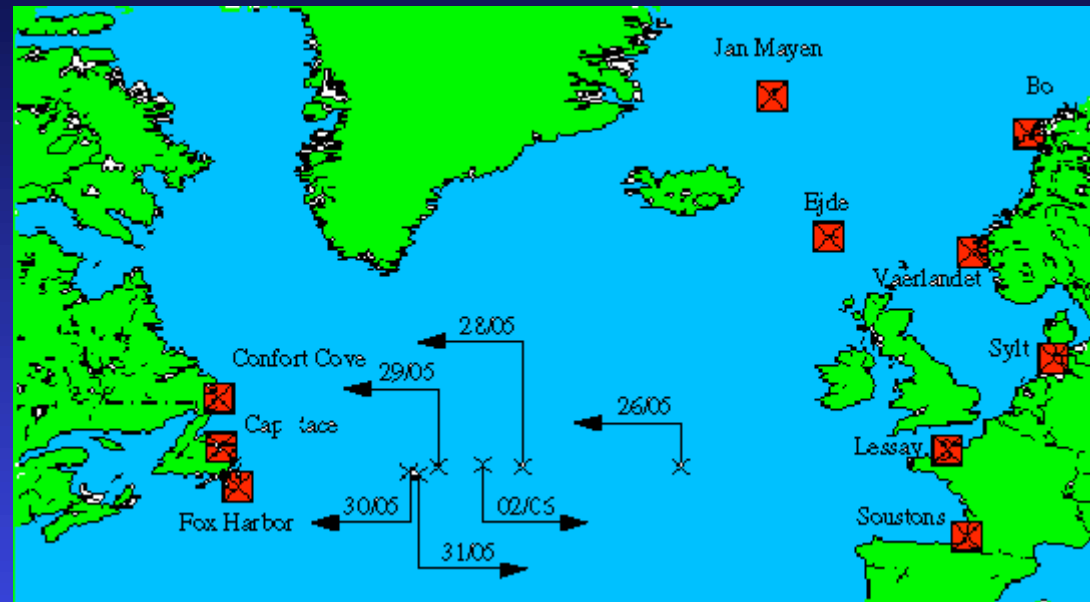
# Algorithme

## ■ Distribution initiale

- ◆ Amplitudes (onde de sol + onde ciel) : gaussiennes
- ◆ Retards onde de ciel/onde de sol : gaussiennes locales
  - ◆ Uniformément répartis sur l'intervalle d'incertitude
  - ◆ Ecart type  $< \_$  de longueur d'onde (2,5  $\_s$ )
- ◆ Position du récepteur : gaussiennes locales
  - ◆ Uniformément réparties sur le domaine d'incertitude
  - ◆ Ecart type  $< \_$  de longueur d'onde (750m)

- Prétraitement du signal
  - ◆ Sommation du signal sur 5s
  - ◆ Filtrage passe-bande [50kHz,150kHz]
  - ◆ Extraction des impulsions
- Calcul de la vraisemblance de chaque gaussienne
  - ◆ Filtre de Kalman sur les amplitudes
  - ◆ Filtres de Kalman étendus sur positions et retards
- Evaluation des poids des gaussiennes
- Calcul de l'estimateur :
  - ◆ Moyenne pondérée des distributions gaussiennes

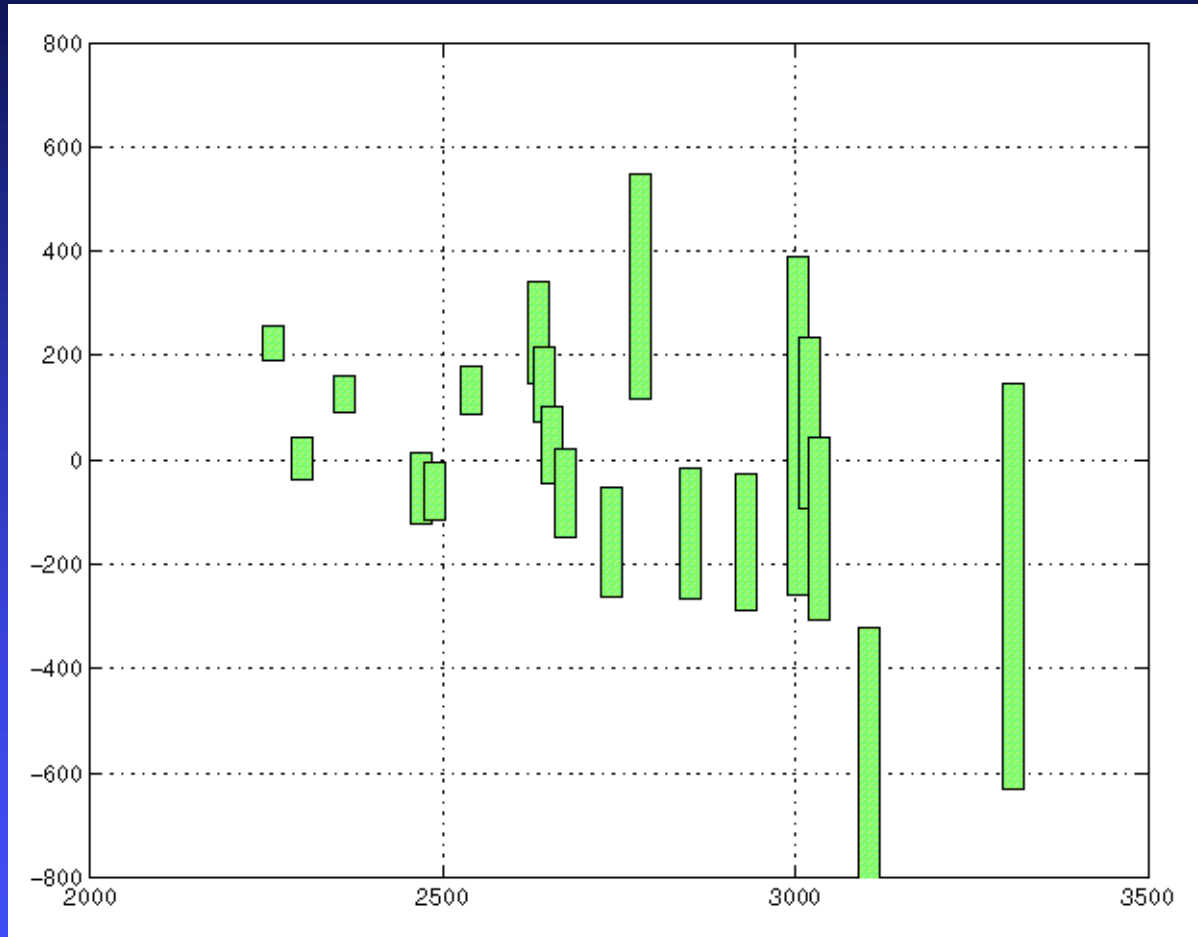
# Contexte des Enregistrements



- Enregistrements de 10 mn
- Echantillonnage à 400 kHz
- Datation par horloge Césium

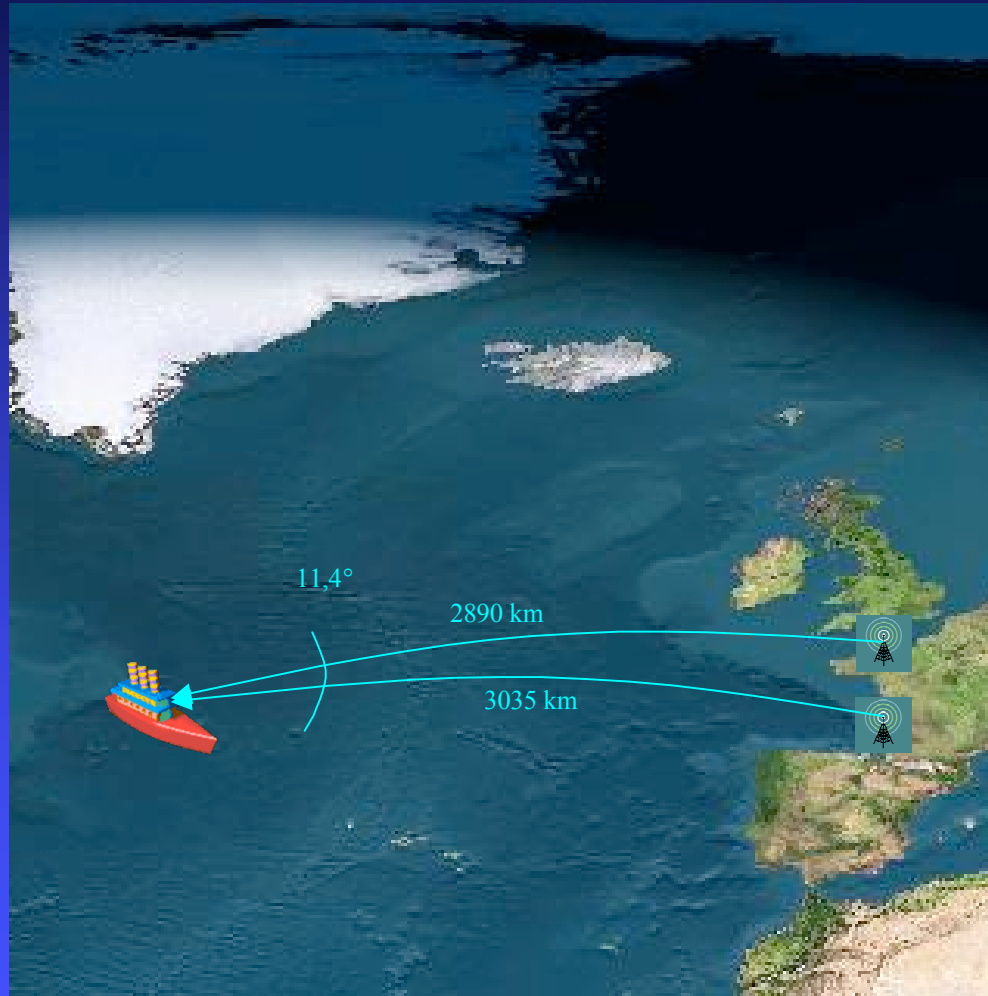
# Résultats : Estimation 1D

Erreur /. GPS (m)

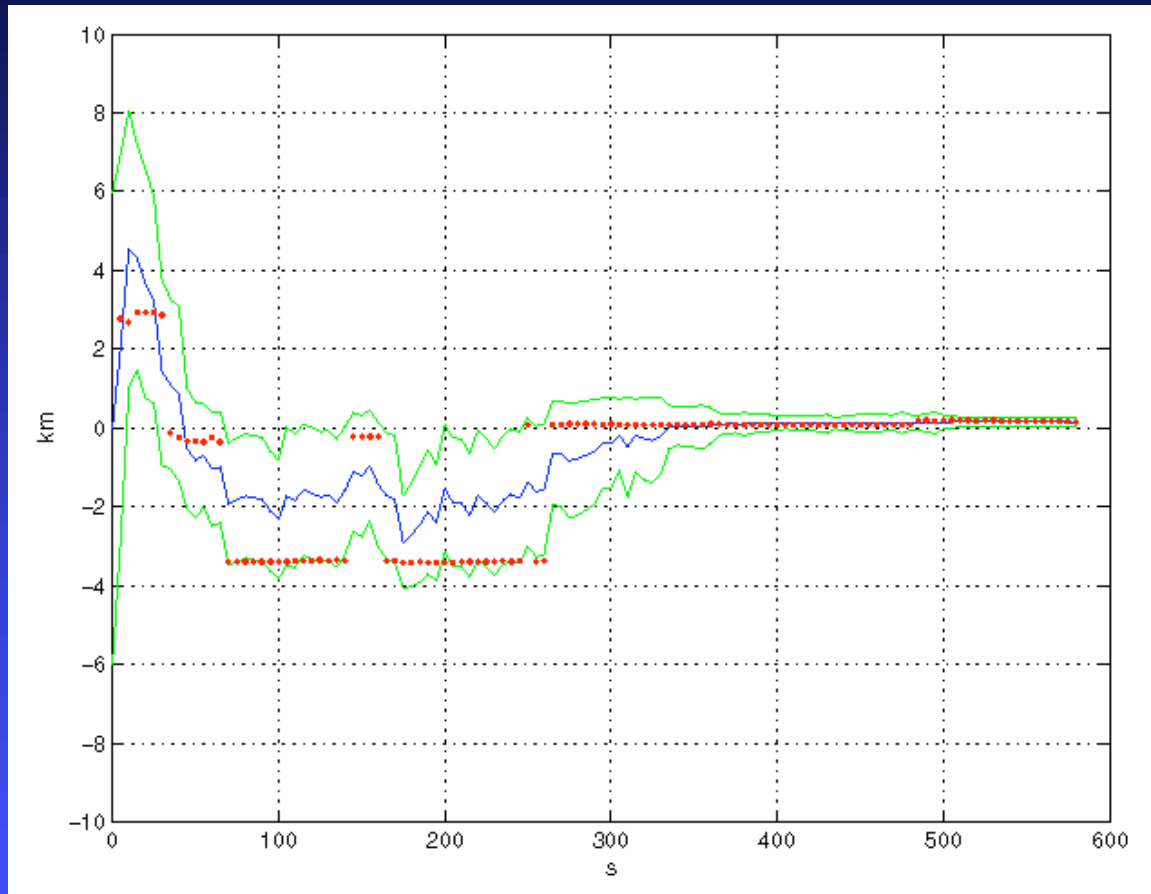


Distance (km)

# Résultats : Estimation 2D



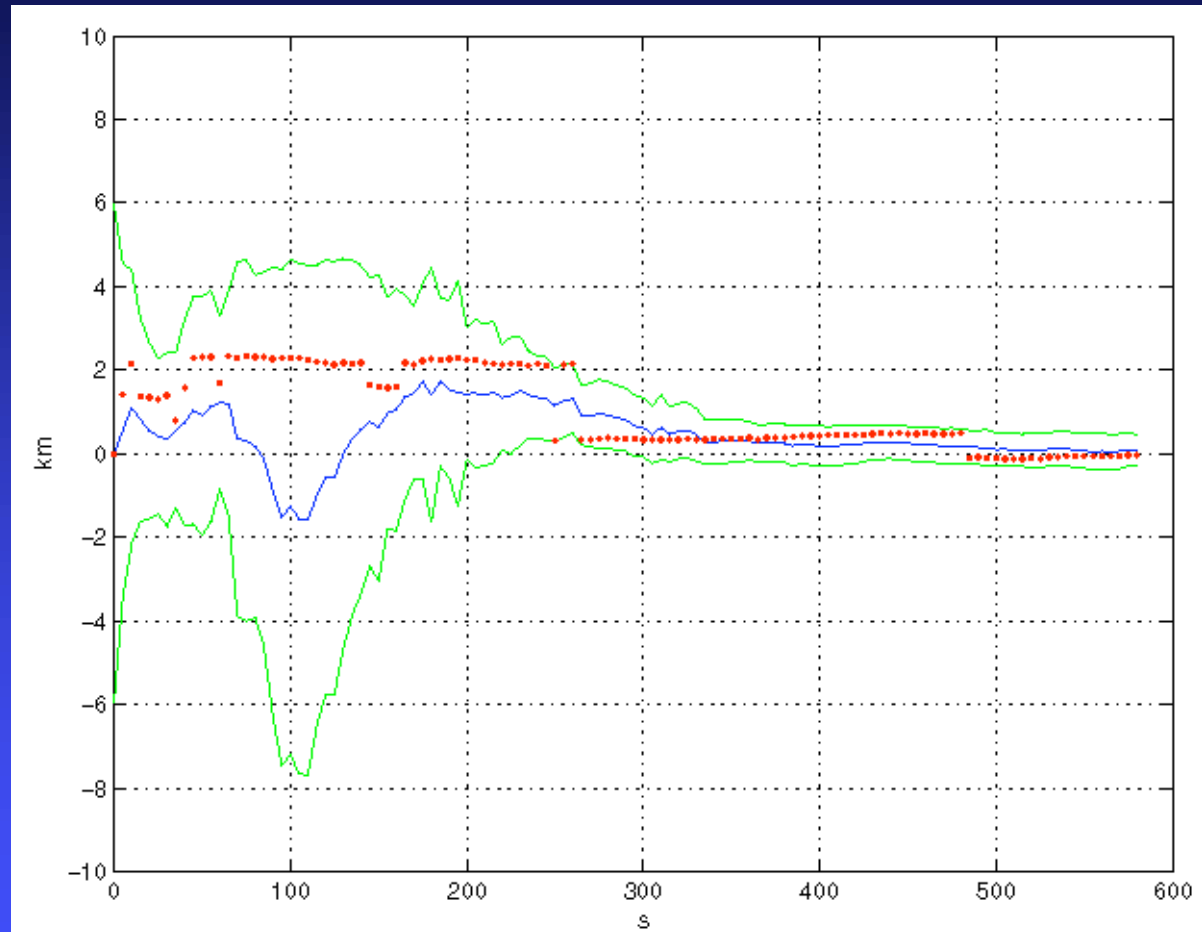
# Erreur d'estimation en longitude



143m  $\pm$  100m

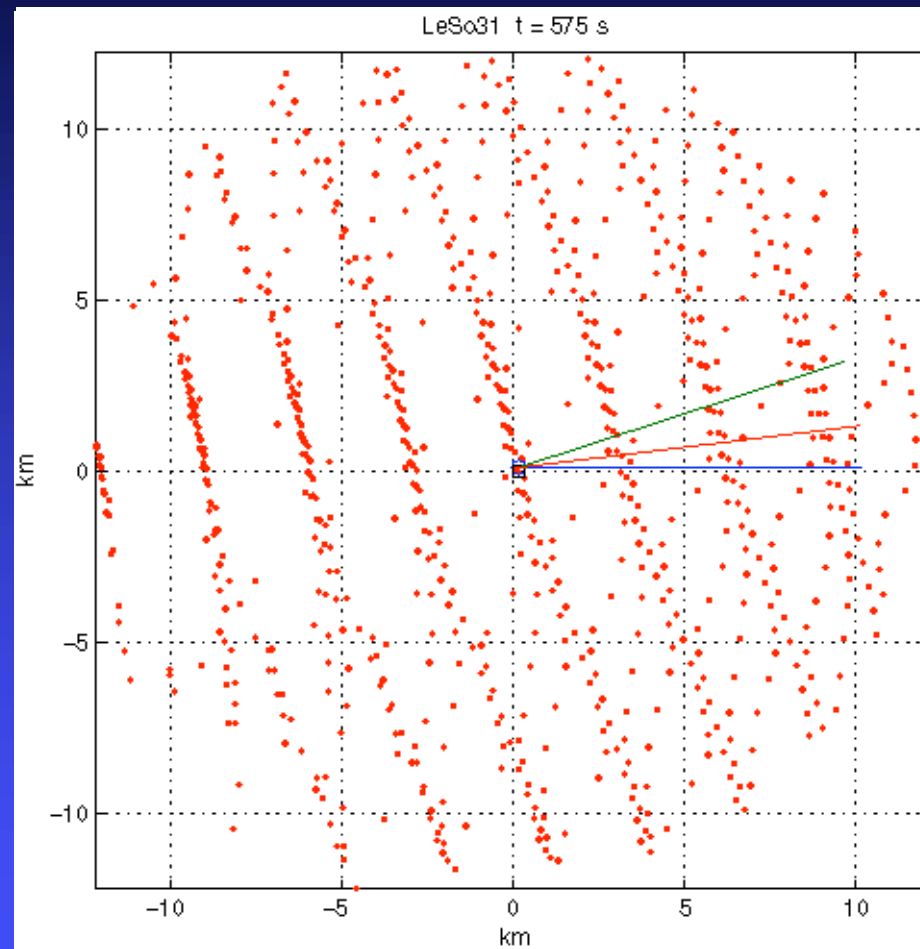


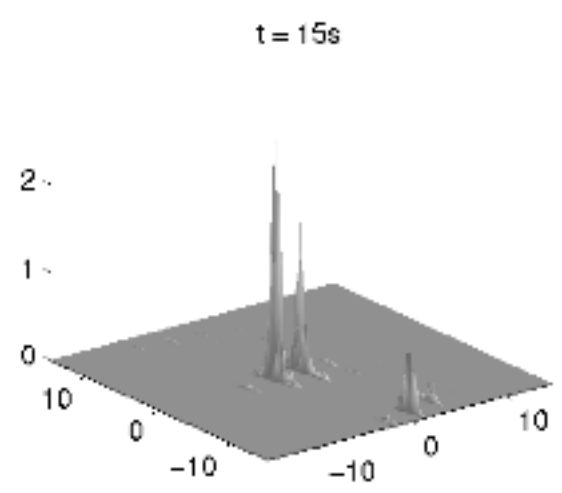
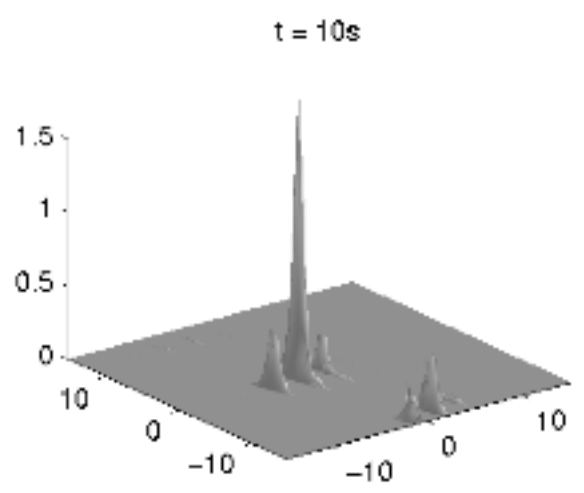
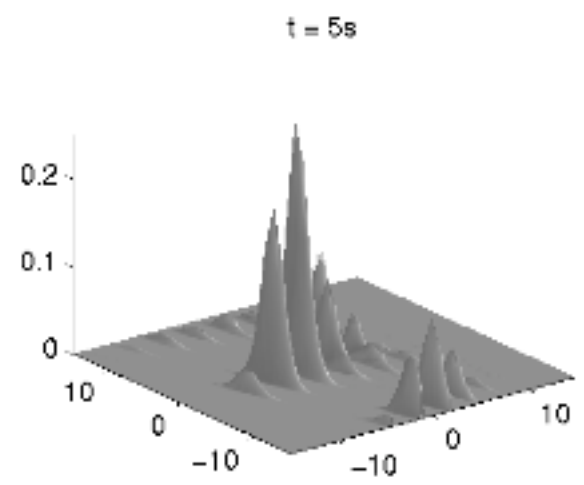
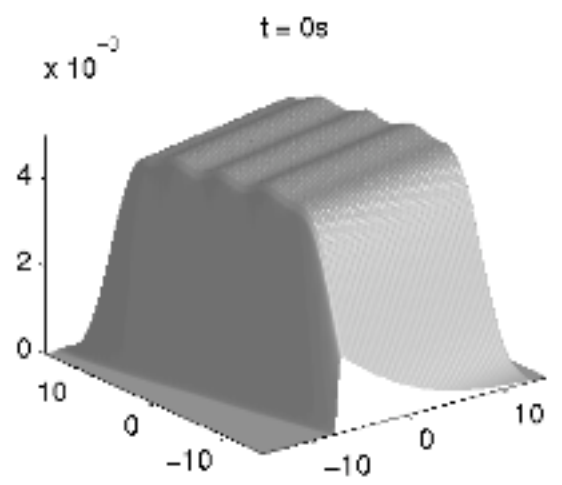
# Erreur d'estimation en latitude



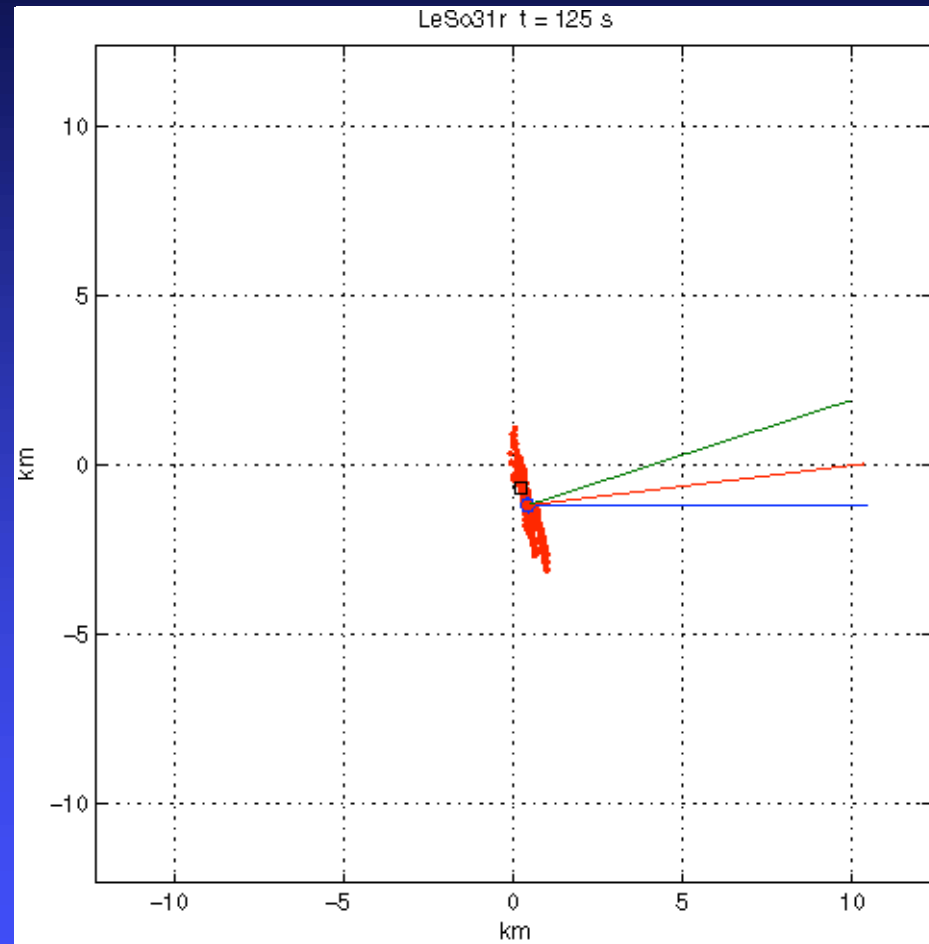
$78\text{m} \pm 385\text{m}$

# Evolution des particules





# Evolution des particules avec redistributions



# Conclusion

- Traitement « tout numérique »
- Modélisation globale
- Méthodes avancées de traitement du signal
  - validées sur données réelles
  - opérationnelles sur système embarqué

Limite de portée du système passe de  
1800km à 3000km