

# ONERA

THE FRENCH AEROSPACE LAB

retour sur innovation

[www.onera.fr](http://www.onera.fr)

# Évaluation de situation dynamique multicible par fusion de données spatio-temporelles

Evangeline POLLARD  
encadrée par

Michèle ROMBAUT et Benjamin PANNETIER

*15 Octobre 2010*



**gipsa-lab**



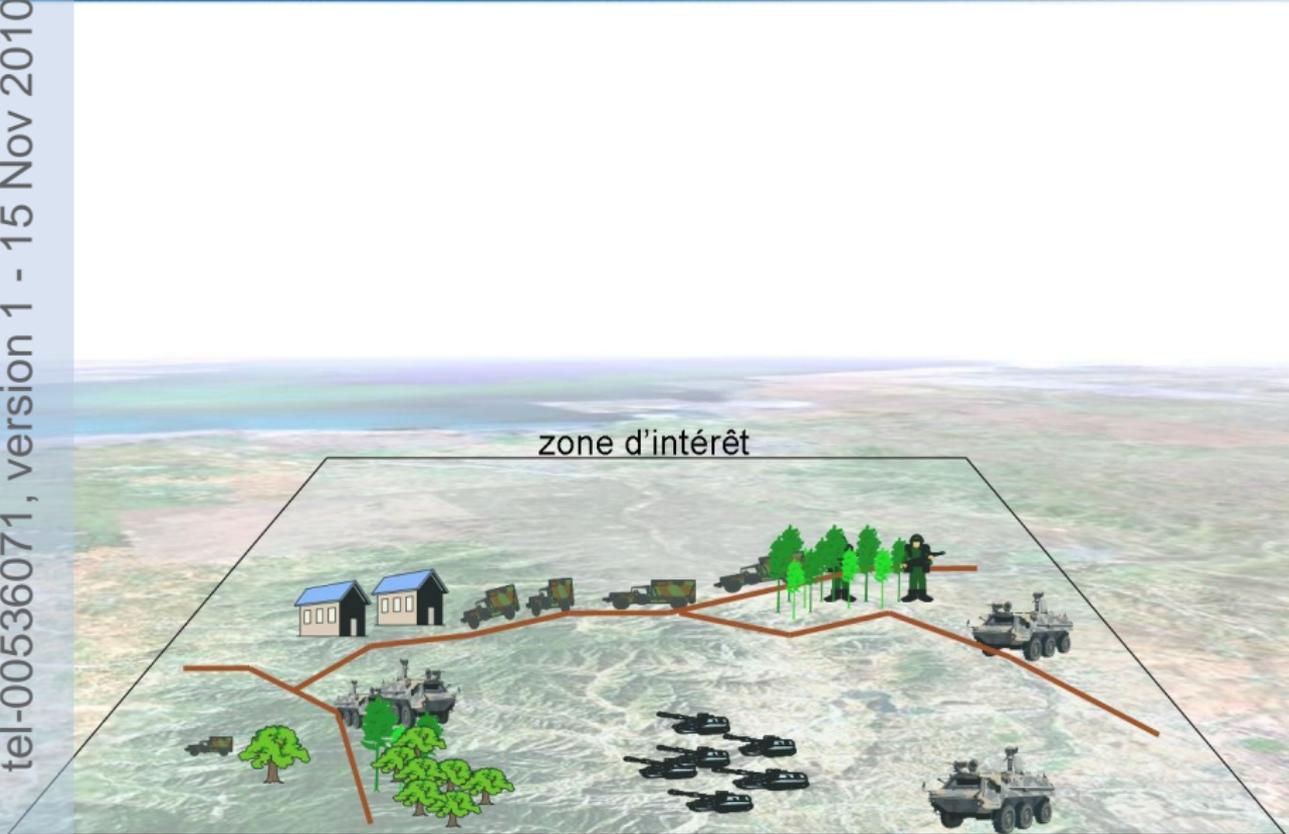
# Surveillance du champ de bataille

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



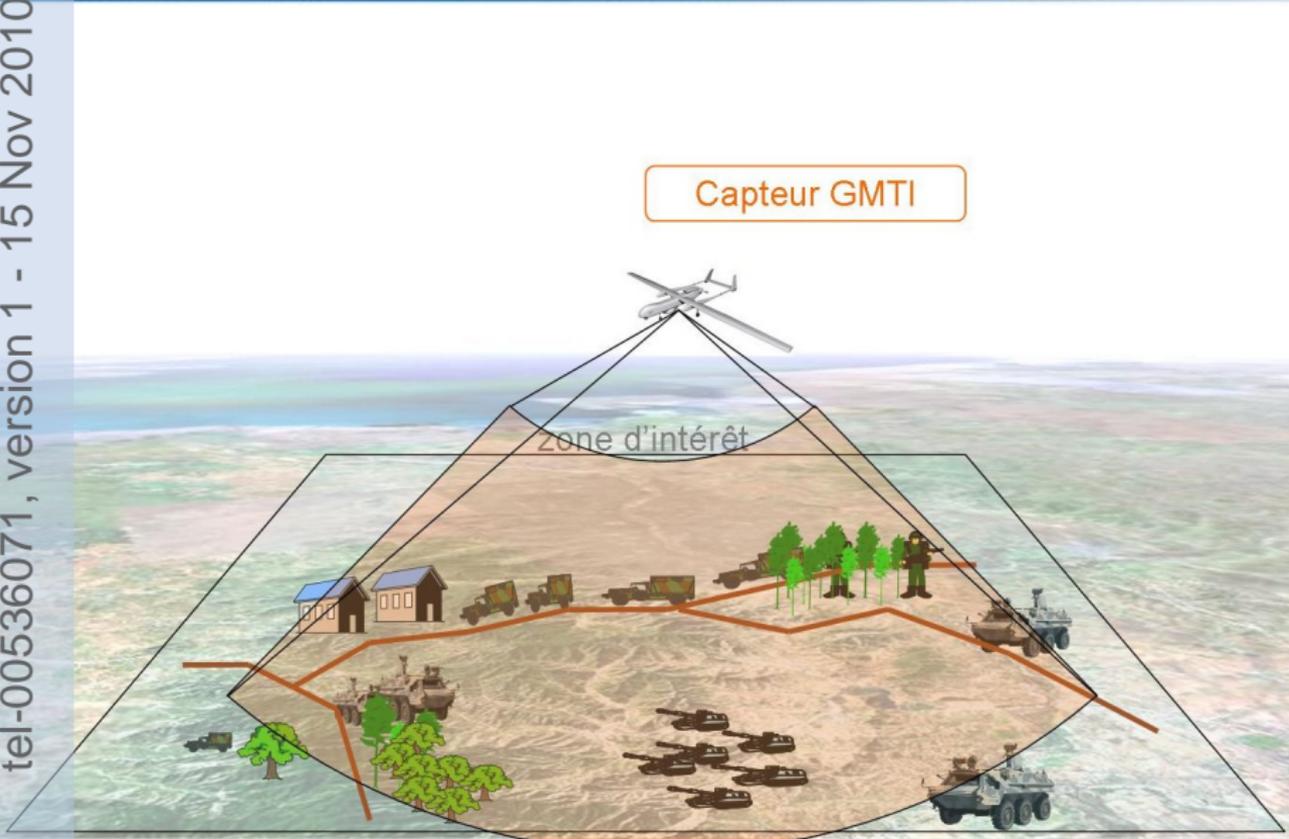
# Surveillance du champ de bataille

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



# Surveillance du champ de bataille

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

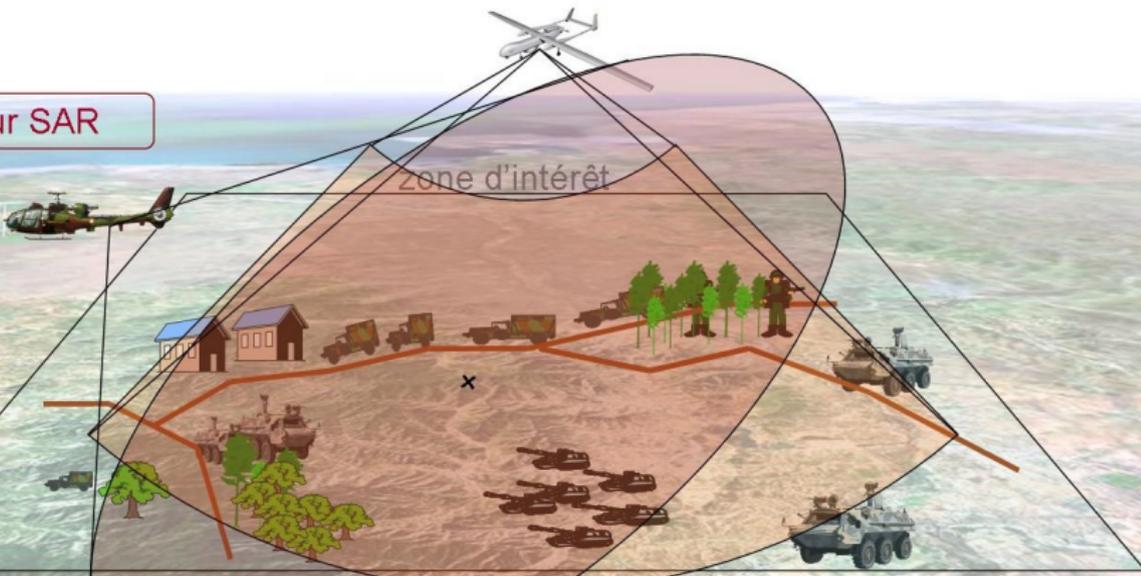


# Surveillance du champ de bataille

tel-0053607 version 1 - 15 Nov 2010

Capteur GMTI

Imageur SAR



# Surveillance du champ de bataille

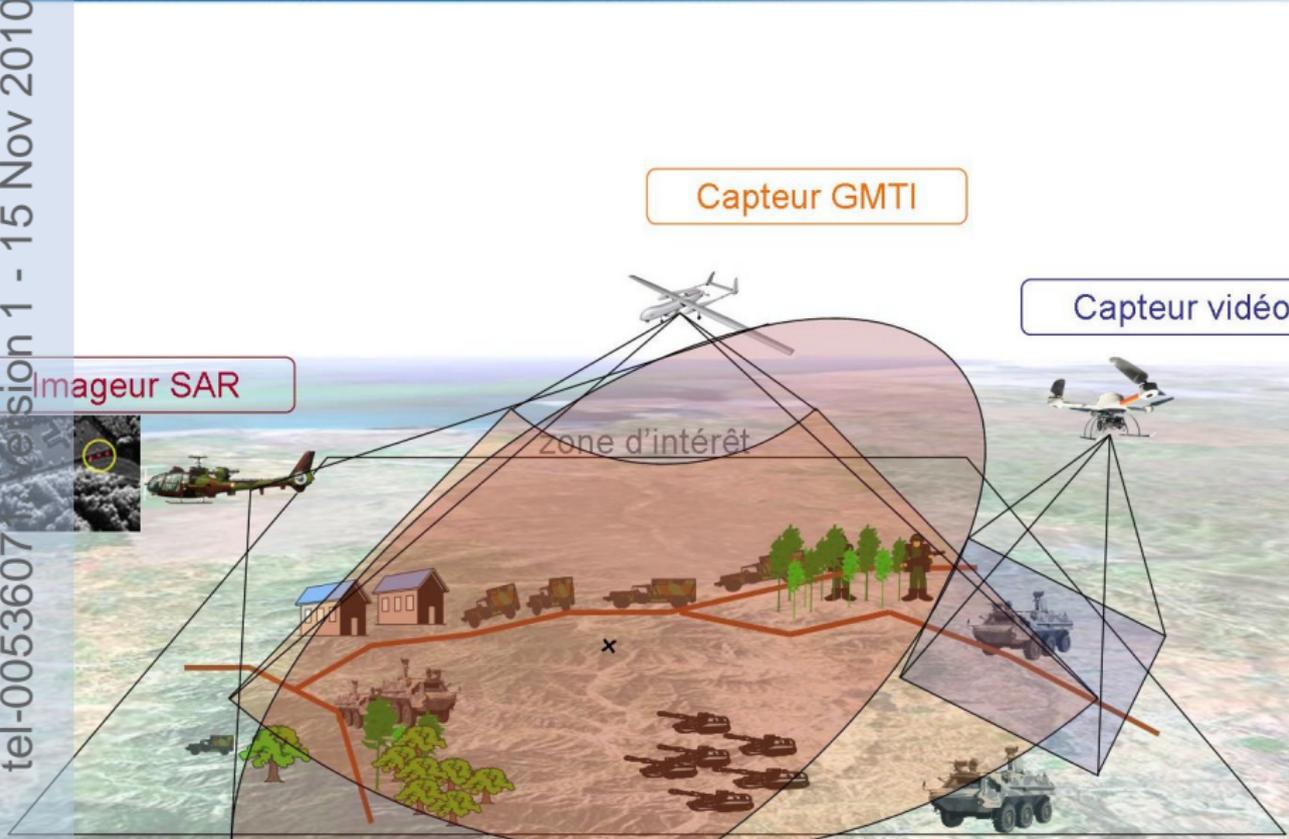
version 1 - 15 Nov 2010  
tel-0053607

Imageur SAR



Capteur GMTI

Capteur vidéo



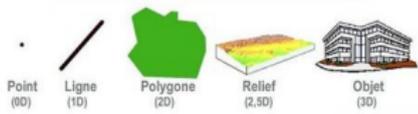
# Surveillance du champ de bataille

version 1 - 15 Nov 2010  
tel-0053607

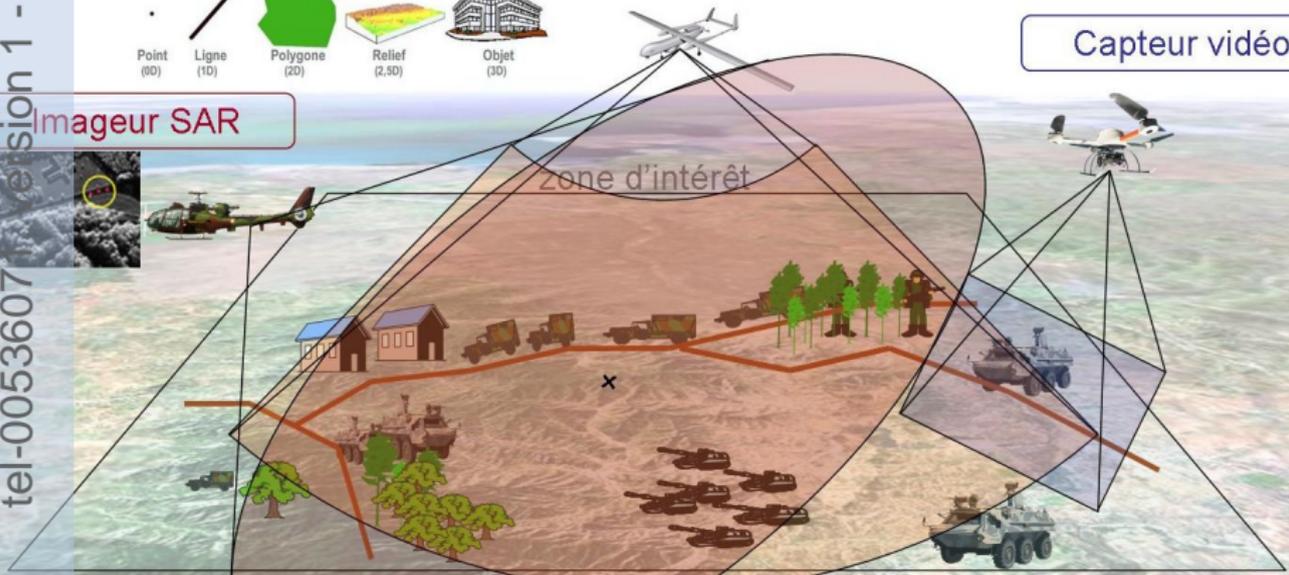
SIG

Capteur GMTI

Capteur vidéo



Imageur SAR



# Détection d'objets d'intérêt

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

## Évaluation des objets d'intérêt

### Étude des critères

- de positionnement géographique
- de type
- comportement collectif

# Détection d'objets d'intérêt

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

## Évaluation des objets d'intérêt

### Étude des critères

- de positionnement géographique
- de type
- comportement collectif



## Quelques exemples

- Véhicule sur crête

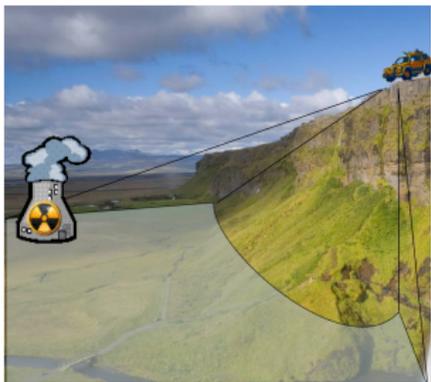
# Détection d'objets d'intérêt

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

## Évaluation des objets d'intérêt

### Étude des critères

- de positionnement géographique
- de type
- comportement collectif



## Quelques exemples

- Véhicule sur crête
- Véhicule à proximité d'un site sensible

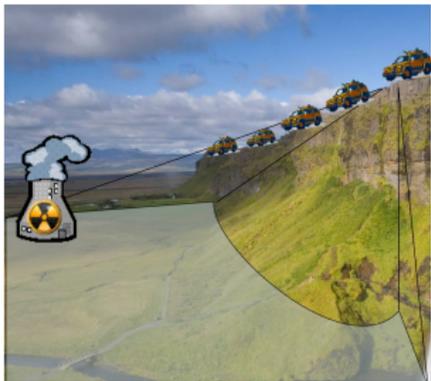
# Détection d'objets d'intérêt

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

## Évaluation des objets d'intérêt

### Étude des critères

- de positionnement géographique
- de type
- comportement collectif



## Quelques exemples

- Véhicule sur crête
- Véhicule à proximité d'un site sensible
- Convoi

# Détection d'objets d'intérêt

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

## Évaluation des objets d'intérêt

### Étude des critères

- de positionnement géographique
- de type
- comportement collectif

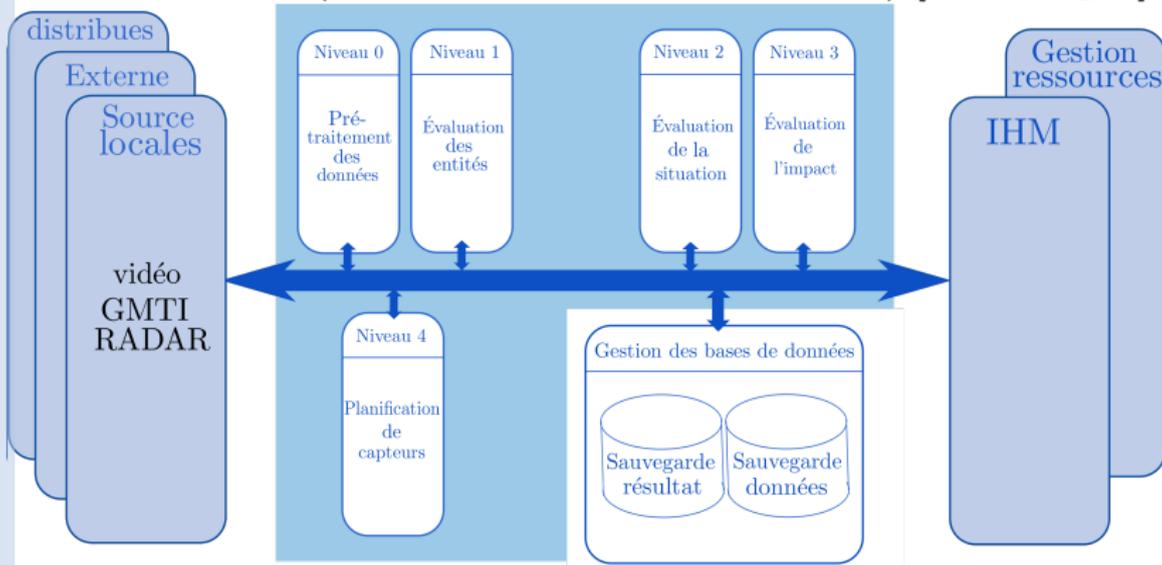
## Quelques exemples

- Véhicule sur crête
- Véhicule à proximité d'un site sensible
- **Convoi**

# Hierarchisation des niveaux de fusion de données

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

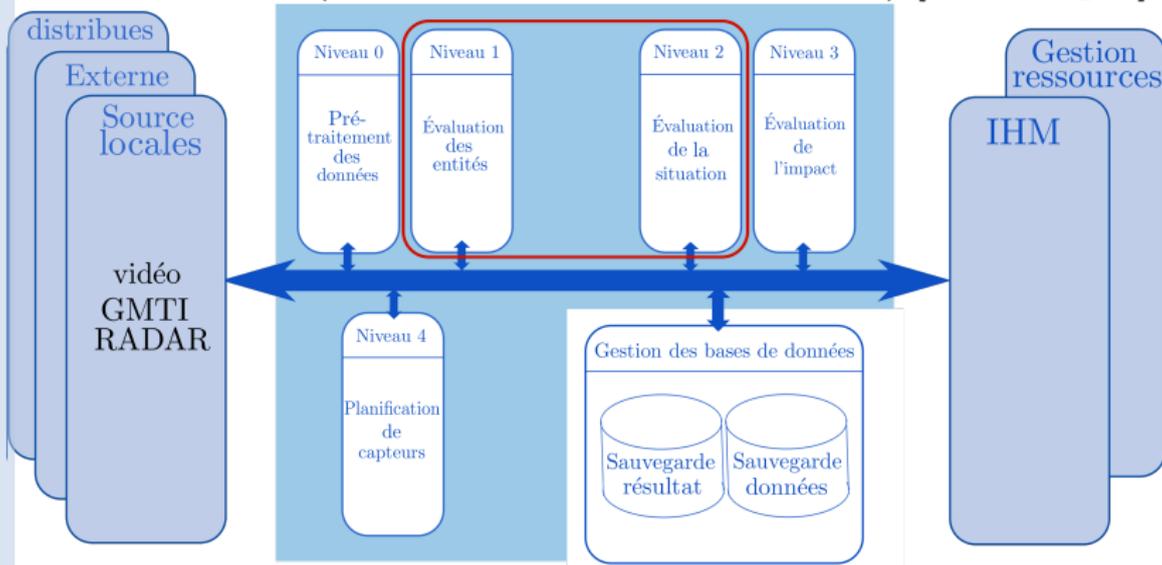
Le modèle JDL (Joint Directors of Laboratories) [Steinberg04]



# Hierarchisation des niveaux de fusion de données

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

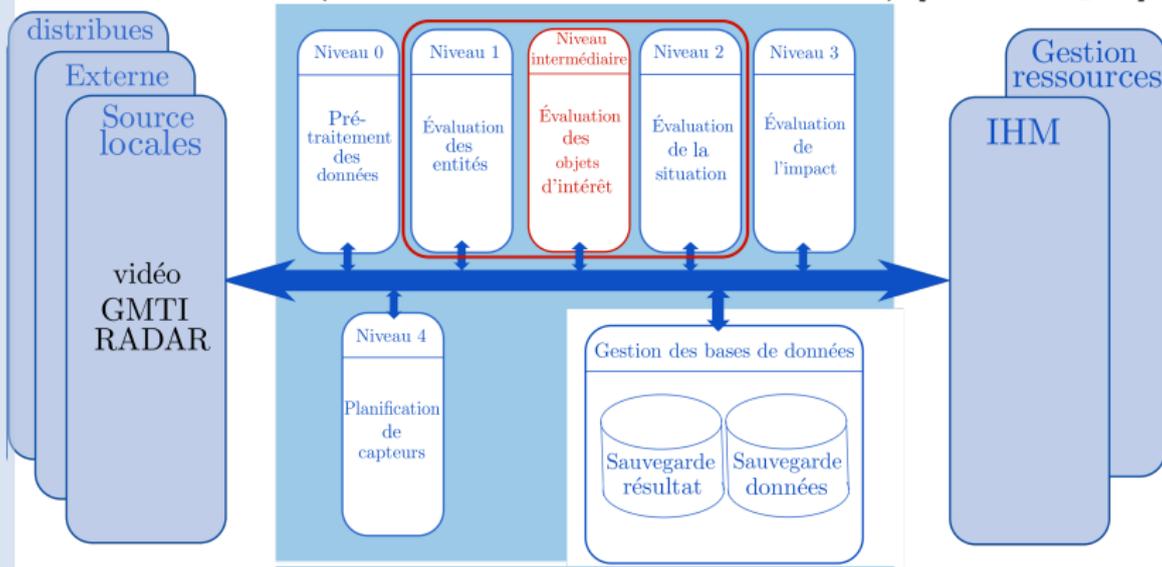
Le modèle JDL (Joint Directors of Laboratories) [Steinberg04]



# Hierarchisation des niveaux de fusion de données

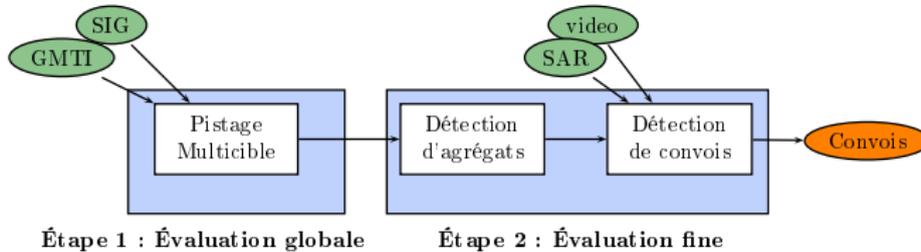
tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

Le modèle JDL (Joint Directors of Laboratories) [Steinberg04]



# Enjeux et problématiques

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

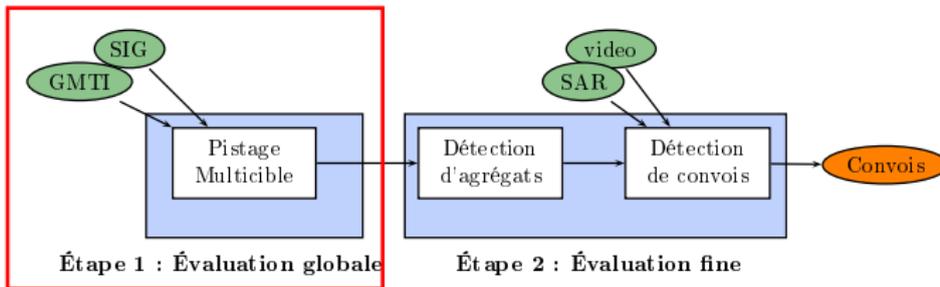


Étape 1 : Évaluation globale

Étape 2 : Évaluation fine

# Enjeux et problématiques

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

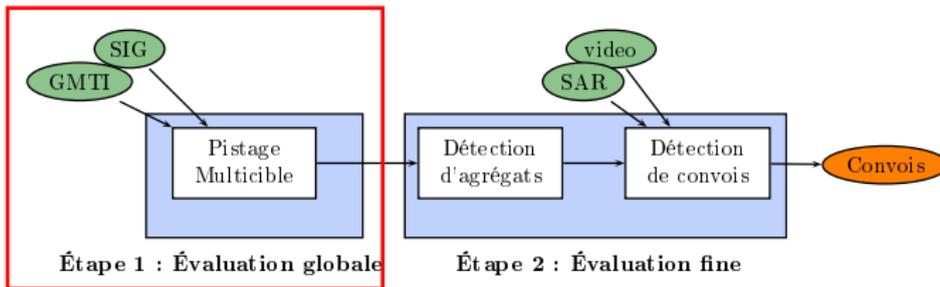


# Enjeux et problématiques

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

## Difficultés

- Algorithme de pistage adapté au contexte
- Faiblesse des algorithmes de pistage lorsque les cibles sont proches

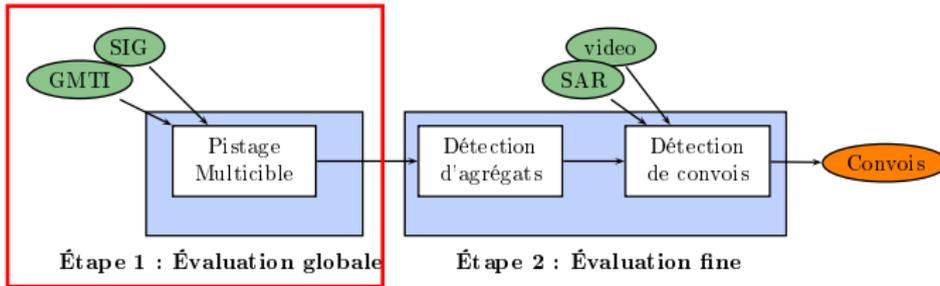


# Enjeux et problématiques

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

## Difficultés

- Algorithme de pistage adapté au contexte
- Faiblesse des algorithmes de pistage lorsque les cibles sont proches



## Solutions

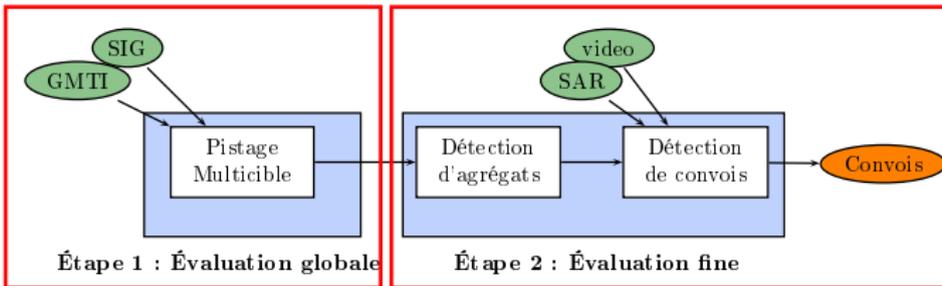
- Filtre PHD (problématique de cibles proches)

# Enjeux et problématiques

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

## Difficultés

- Algorithme de pistage adapté au contexte
- Faiblesse des algorithmes de pistage lorsque les cibles sont proches



## Solutions

- Filtre PHD (problématique de cibles proches)

# Enjeux et problématiques

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



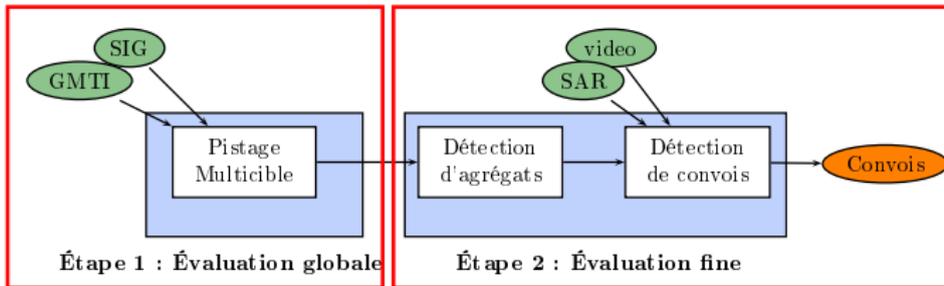
## Difficultés

- Algorithme de pistage adapté au contexte
- Faiblesse des algorithmes de pistage lorsque les cibles sont proches



## Difficultés

- Combiner les données issues des différents capteurs
- Méthode de modélisation pour le convoi
- Représentation de l'information



## Solutions

- Filtre PHD (problématique de cibles proches)

# Enjeux et problématiques

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



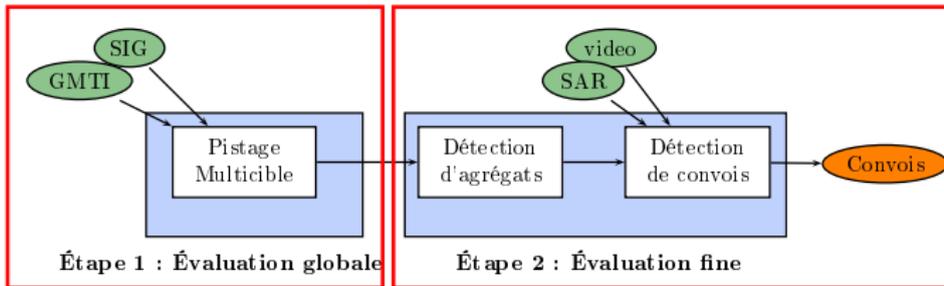
## Difficultés

- Algorithme de pistage adapté au contexte
- Faiblesse des algorithmes de pistage lorsque les cibles sont proches



## Difficultés

- Combiner les données issues des différents capteurs
- Méthode de modélisation pour le convoi
- Représentation de l'information



## Solutions

- Filtre PHD (problématique de cibles proches)



## Solutions

- Réseaux Bayésiens (RB)
- Réseaux crédibilistes

# Plan

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

- 1 Pistage multicible adapté au pistage de cibles proches
- 2 Fusion de données pour la détection d'objets d'intérêts
- 3 Simulations et résultats

# Sommaire

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

- 1 Pistage multicible adapté au pistage de cibles proches
  - Problématique GMTI
  - Problématique de pistage
  - L'algorithme MHT
  - Le filtre CPHD
  - Labellisation du filtre GM-CPHD
  - Création d'un algorithme hybride
- 2 Fusion de données pour la détection d'objets d'intérêts
- 3 Simulations et résultats

# Données GMTI : Ground Moving Target Indicator

- Cibles terrestres fortement manœuvrantes
- Environnement terrestre complexe
- Limitation du capteur : bruit sur les mesures, biais spatio-temporel
- Fausses alarmes, probabilité de détection ( $P_d < 1$ ), cibles non-résolues



tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

# Données GMTI : Ground Moving Target Indicator

- Cibles terrestres fortement manœuvrantes
- Environnement terrestre complexe
- Limitation du capteur : bruit sur les mesures, biais spatio-temporel
- Fausses alarmes, probabilité de détection ( $P_d < 1$ ), cibles non-résolues



tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

# Données GMTI : Ground Moving Target Indicator

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

- Cibles terrestres fortement manoeuvrantes
- Environnement terrestre complexe
- Limitation du capteur : bruit sur les mesures, biais spatio-temporel
- Fausses alarmes, probabilité de détection ( $P_d < 1$ ), cibles non-résolues



# Données GMTI : Ground Moving Target Indicator

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

- Cibles terrestres fortement manoeuvrantes
- Environnement terrestre complexe
- Limitation du capteur : bruit sur les mesures, biais spatio-temporel
- Fausses alarmes, probabilité de détection ( $P_d < 1$ ), cibles non-résolues



## Notations

Ensemble des plots :  
 $Z_k = \{z_{k,1}, \dots, z_{k,m_k}\}$

Format des plots :  
 $z_{k,i} = [\tilde{x}, \tilde{y}]^T$

# Données GMTI : Ground Moving Target Indicator

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

- Cibles terrestres fortement manœuvrantes
- Environnement terrestre complexe
- Limitation du capteur : bruit sur les mesures, biais spatio-temporel
- Fausses alarmes, probabilité de détection ( $P_d < 1$ ), cibles non-résolues



## Notations

Ensemble des plots :  
 $Z_k = \{z_{k,1}, \dots, z_{k,m_k}\}$

Format des plots :  
 $z_{k,i} = [\tilde{x}, \tilde{y}]^T$

# Pistage : cas monocible

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

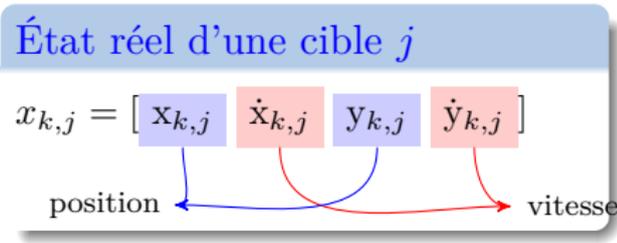


$x_{k,j}$



# Pistage : cas monocible

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



# Pistage : cas monocible

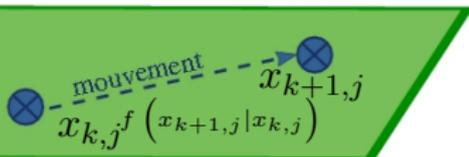
tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

État réel d'une cible  $j$   
 $x_{k,j} = [x_{k,j} \dot{x}_{k,j} y_{k,j} \dot{y}_{k,j}]$



# Pistage : cas monocible

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



## État réel d'une cible $j$

$$x_{k,j} = [x_{k,j} \dot{x}_{k,j} y_{k,j} \dot{y}_{k,j}]$$

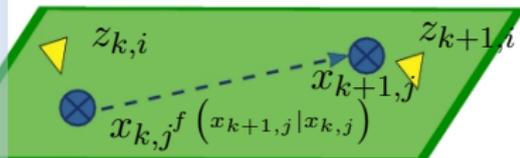
## Modélisation

équation de mouvement :  
$$x_{k+1,j} = f(x_{k,j}, \Gamma_k \cdot \nu_{k,j})$$

équation d'observation :  
$$z_{k,i} = h(x_{k,j}, b_k)$$

## Pistage : cas monocible

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

État réel d'une cible  $j$ 

$$x_{k,j} = [x_{k,j} \dot{x}_{k,j} y_{k,j} \dot{y}_{k,j}]$$

## Modélisation

équation de mouvement :

$$x_{k+1,j} = f(x_{k,j}, \Gamma_k \nu_{k,j})$$

équation d'observation :

$$z_{k,i} = h(x_{k,j}, b_k)$$

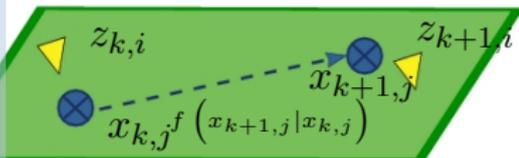
Objectif : trouver un estimateur

$$\hat{x}_{k|k,j} = \mathbb{E} [x_{k,j} | \mathbf{Z}^k]$$

$$P_{k|k,j} = \mathbb{E} \left[ (x_{k,j} - \hat{x}_{k|k,j}) (x_{k,j} - \hat{x}_{k|k,j})^T | \mathbf{Z}^k \right]$$

# Pistage : cas monocible

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



**État réel d'une cible  $j$**

$$x_{k,j} = [x_{k,j} \dot{x}_{k,j} y_{k,j} \dot{y}_{k,j}]$$

**Modélisation**

équation de mouvement :

$$x_{k+1,j} = F_k \cdot x_{k,j} + \Gamma_k \cdot \nu_{k,j}$$

équation d'observation :

$$z_{k,i} = H \cdot x_{k,j} + b_k$$

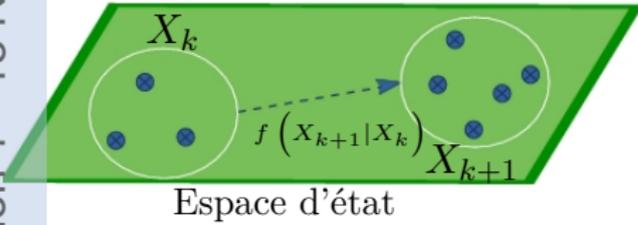
**Objectif : trouver un estimateur**

$$\hat{x}_{k|k,j} = E [x_{k,j} | \mathbf{Z}^k] \quad \Rightarrow \text{Résolu par le filtre de Kalman (cas linéaire)}$$

$$P_{k|k,j} = E \left[ (x_{k,j} - \hat{x}_{k|k,j}) (x_{k,j} - \hat{x}_{k|k,j})^T | \mathbf{Z}^k \right]$$

# Pistage : cas multicible

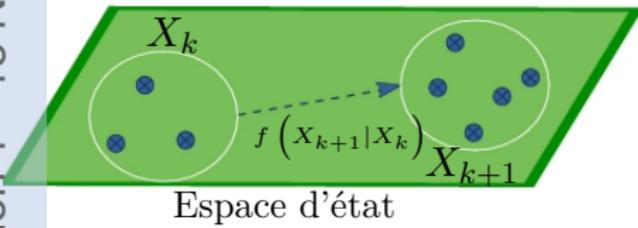
tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



# Pistage : cas multicible

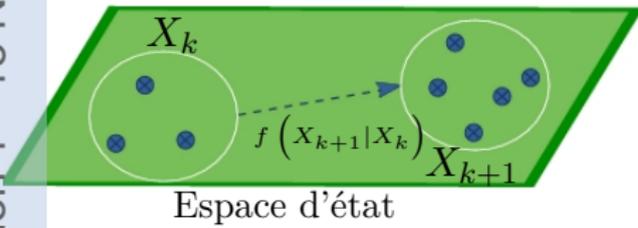
tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

- Nombre de cibles variable



# Pistage : cas multicible

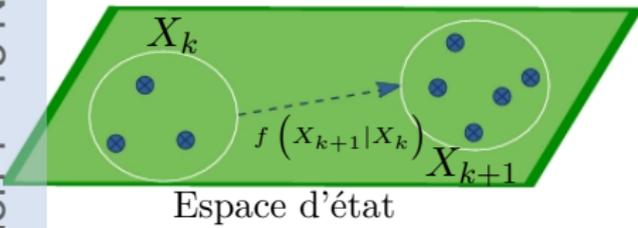
tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



- Nombre de cibles variable
  - Cibles naissantes

# Pistage : cas multicible

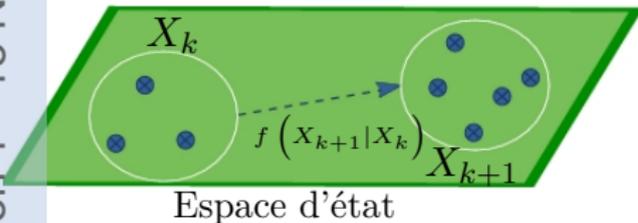
tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



- Nombre de cibles variable
  - Cibles naissantes
  - Cibles à l'arrêt

# Pistage : cas multicible

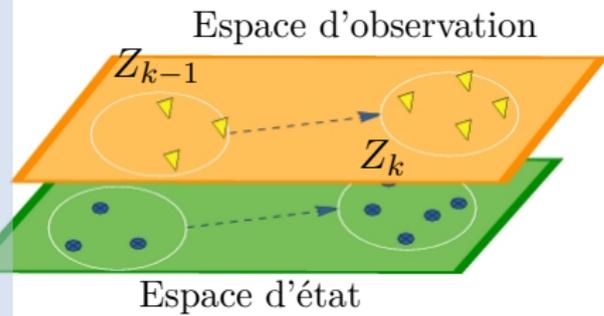
tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



- Nombre de cibles variable
  - Cibles naissantes
  - Cibles à l'arrêt
  - Sorties de la zone d'observation

# Pistage : cas multicible

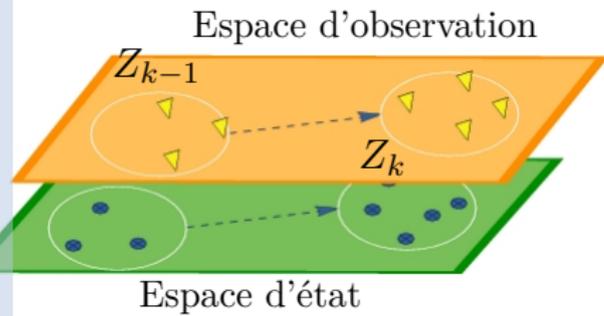
tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



- Nombre de cibles variable
  - Cibles naissantes
  - Cibles à l'arrêt
  - Sorties de la zone d'observation

# Pistage : cas multicible

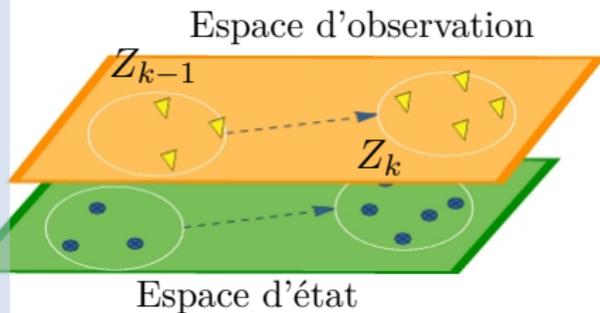
tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



- Nombre de cibles variable
  - Cibles naissantes
  - Cibles à l'arrêt
  - Sorties de la zone d'observation
- Fausses alarmes

# Pistage : cas multicible

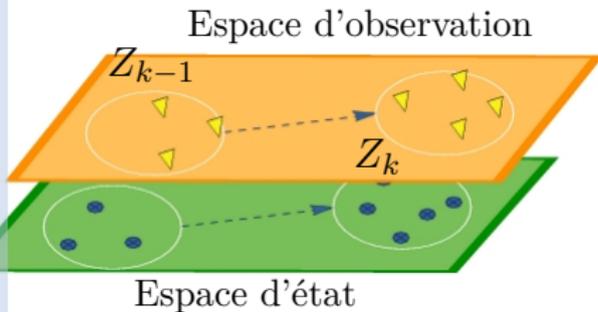
tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



- Nombre de cibles variable
  - Cibles naissantes
  - Cibles à l'arrêt
  - Sorties de la zone d'observation
- Fausses alarmes
- Non-détections

# Pistage : cas multicible

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



- Nombre de cibles variable
  - Cibles naissantes
  - Cibles à l'arrêt
  - Sorties de la zone d'observation
- Fausses alarmes
- Non-détections

Objectif : trouver des estimateurs de

État des cibles :  $\hat{X}_{k|k} = \{ \hat{x}_{k|k,1}, \dots, \hat{x}_{k|k,\hat{N}_k} \}$

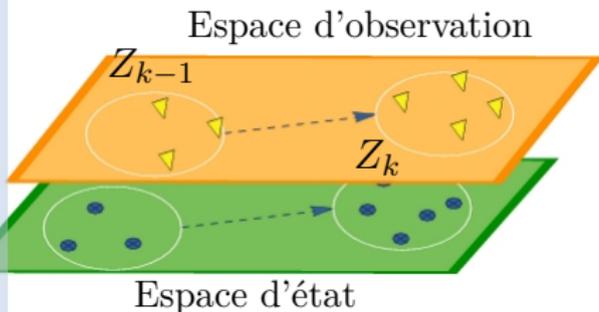
Covariance :  $\{ P_{k|k,j} \}_{j=1}^{\hat{N}_k}$

Nombre de cibles :  $\hat{N}_k$

Labellisation :  $\mathcal{T}_{k,j} = \{ \hat{x}_{k,j}, P_{k,j}, s_{k,j} \}$

# Pistage : cas multicible

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



- Nombre de cibles variable
  - Cibles naissantes
  - Cibles à l'arrêt
  - Sorties de la zone d'observation
- Fausses alarmes
- Non-détections

## Objectif : trouver des estimateurs de

État des cibles :  $\hat{X}_{k|k} = \{ \hat{x}_{k|k,1}, \dots, \hat{x}_{k|k, \hat{N}_k} \}$

Covariance :  $\{ P_{k|k,j} \}_{j=1}^{\hat{N}_k}$

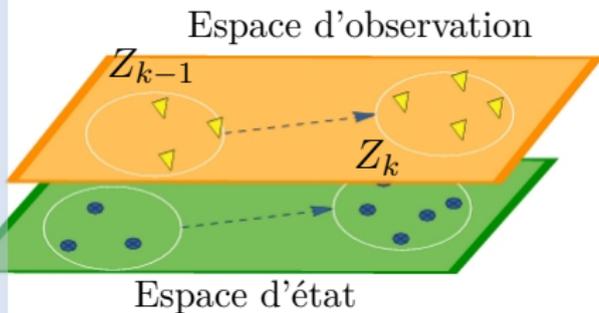
Nombre de cibles :  $\hat{N}_k$

Labellisation :  $\mathcal{T}_{k,j} = \{ \hat{x}_{k,j}, P_{k,j}, s_{k,j} \}$

- MHT , JPDAF, ...
- ⇒ ● Filtre particulaire
- CPHD

# Pistage : cas multicible

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



- Nombre de cibles variable
  - Cibles naissantes
  - Cibles à l'arrêt
  - Sorties de la zone d'observation
- Fausses alarmes
- Non-détections

## Objectif : trouver des estimateurs de

État des cibles :  $\hat{X}_{k|k} = \{ \hat{x}_{k|k,1}, \dots, \hat{x}_{k|k, \hat{N}_k} \}$

Covariance :  $\{ P_{k|k,j} \}_{j=1}^{\hat{N}_k}$

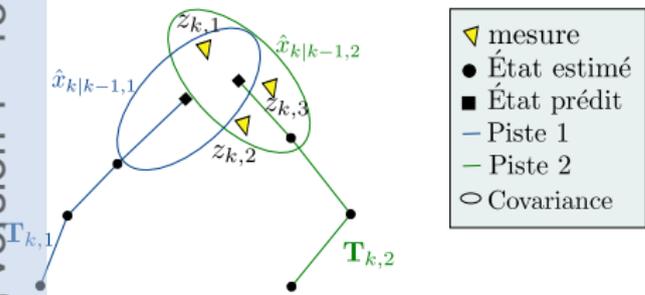
Nombre de cibles :  $\hat{N}_k$

Labellisation :  $\mathcal{T}_{k,j} = \{ \hat{x}_{k,j}, P_{k,j}, s_{k,j} \}$

- **MHT** , JPDAF, ...
- ⇒
- Filtre particulaire
- **CPHD**

# Construction de l'arbre d'hypothèses

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

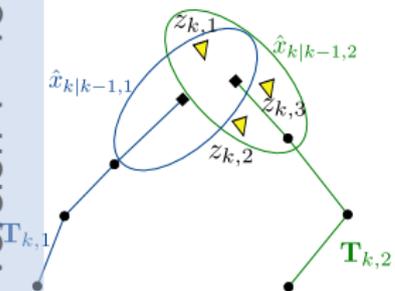


- ▼ mesure
- État estimé
- État prédit
- Piste 1
- Piste 2
- Covariance

- 3 mesures
- 2 pistes existantes

# Construction de l'arbre d'hypothèses

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



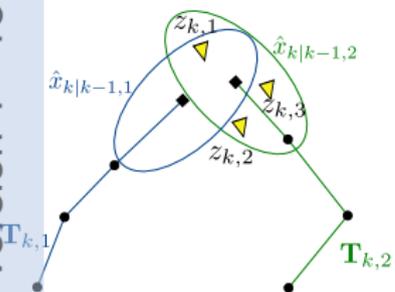
- ▼ mesure
- État estimé
- État prédit
- Piste 1
- Piste 2
- Covariance



- 3 mesures
- 2 pistes existantes

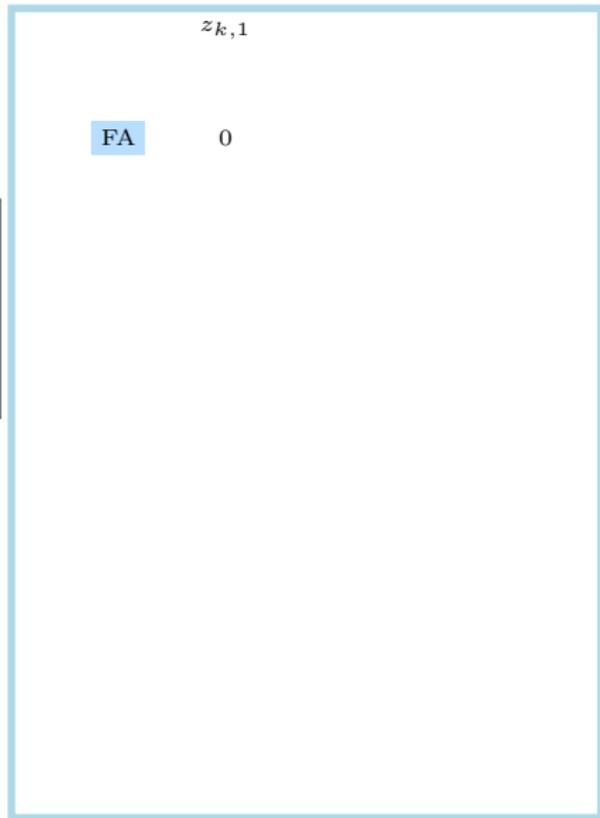
# Construction de l'arbre d'hypothèses

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



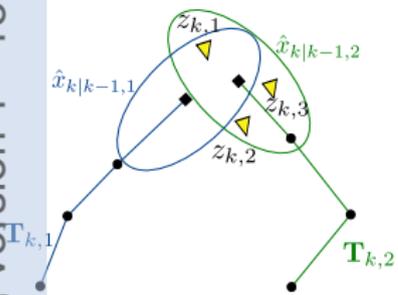
- ▼ mesure
- État estimé
- État prédit
- Piste 1
- Piste 2
- Covariance

- 3 mesures
- 2 pistes existantes



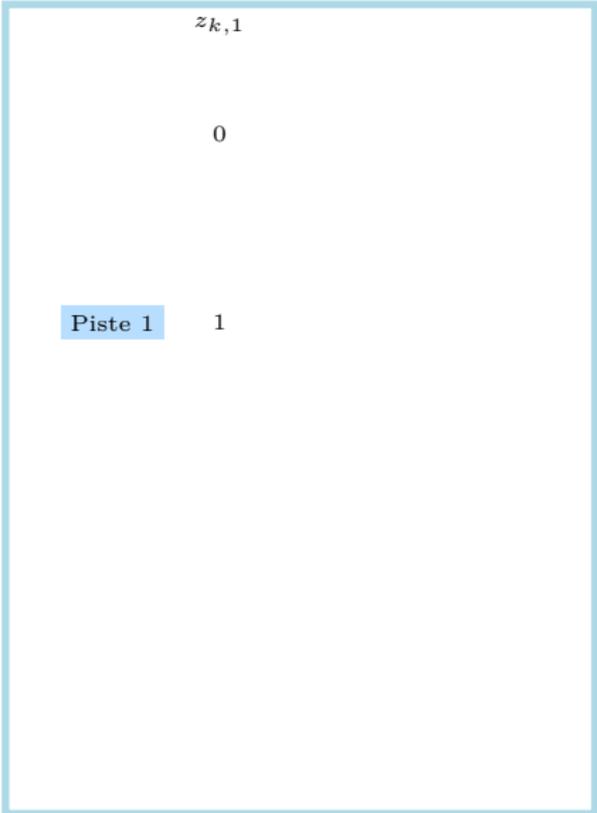
# Construction de l'arbre d'hypothèses

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



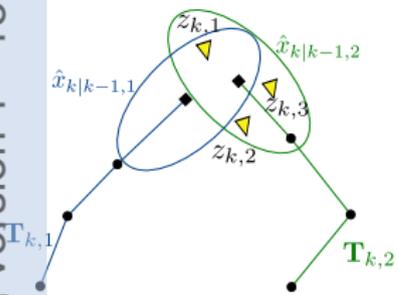
- ▼ mesure
- État estimé
- État prédit
- Piste 1
- Piste 2
- Covariance

- 3 mesures
- 2 pistes existantes



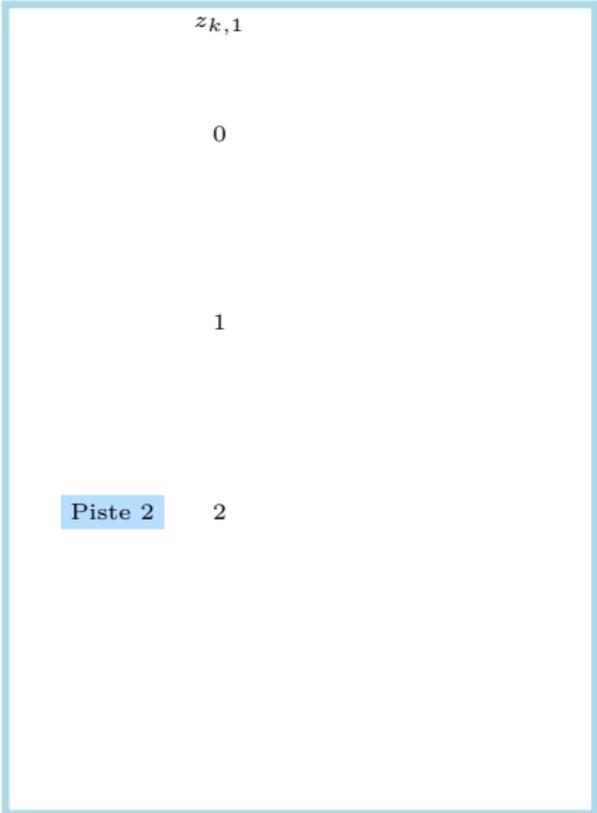
# Construction de l'arbre d'hypothèses

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



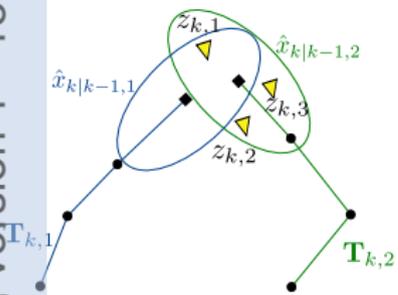
- ▼ mesure
- État estimé
- État prédit
- Piste 1
- Piste 2
- Covariance

- 3 mesures
- 2 pistes existantes



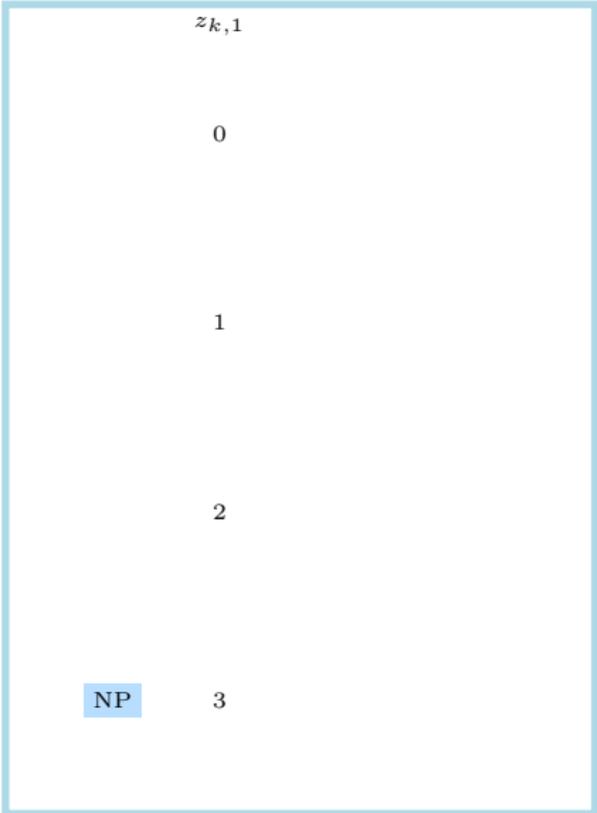
# Construction de l'arbre d'hypothèses

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



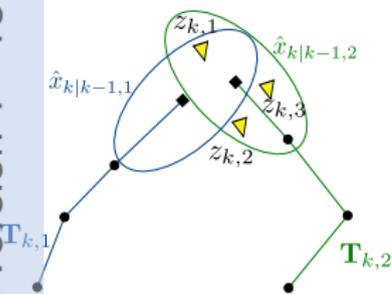
- ▼ mesure
- État estimé
- État prédit
- Piste 1
- Piste 2
- Covariance

- 3 mesures
- 2 pistes existantes



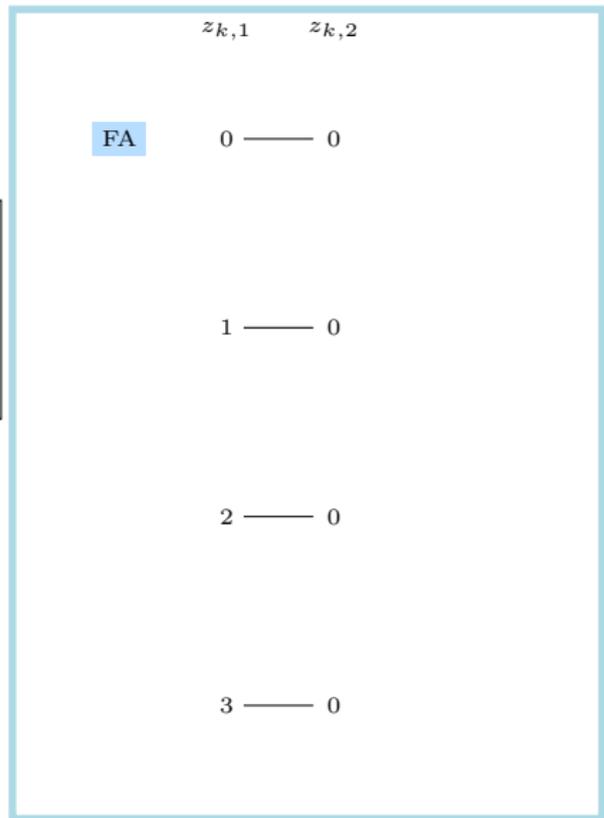
# Construction de l'arbre d'hypothèses

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



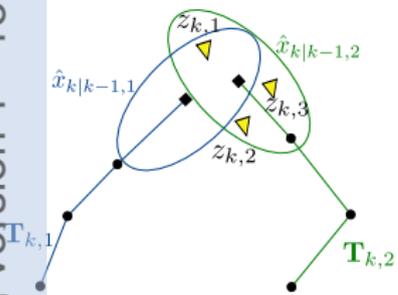
- ▼ mesure
- État estimé
- État prédit
- Piste 1
- Piste 2
- Covariance

- 3 mesures
- 2 pistes existantes



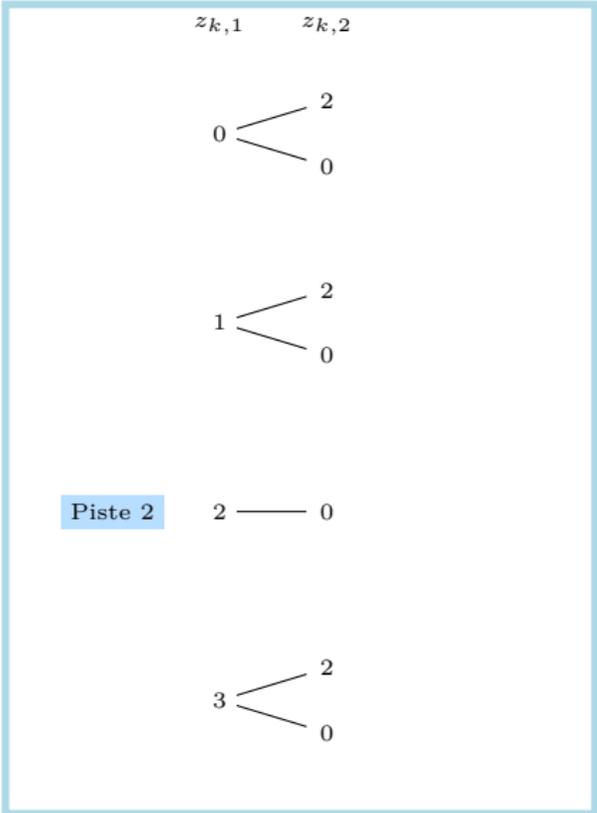
# Construction de l'arbre d'hypothèses

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



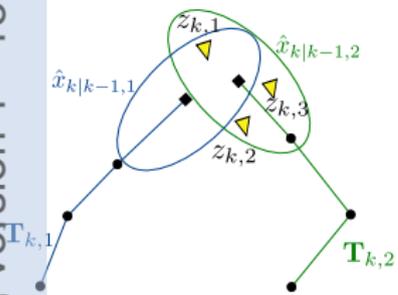
- ▼ mesure
- État estimé
- État prédit
- Piste 1
- Piste 2
- Covariance

- 3 mesures
- 2 pistes existantes



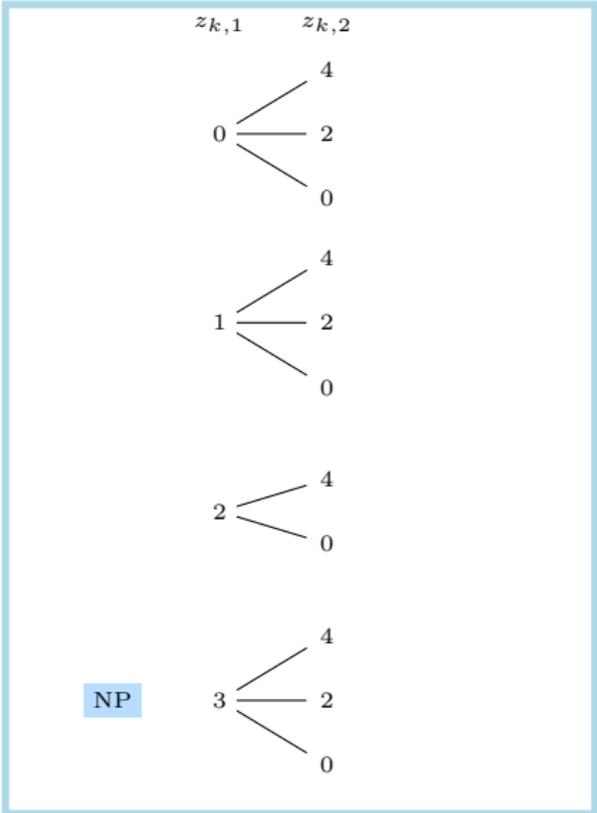
# Construction de l'arbre d'hypothèses

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



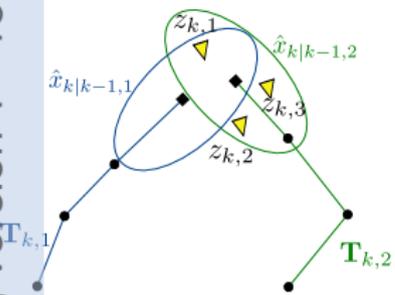
- ▼ mesure
- État estimé
- État prédit
- Piste 1
- Piste 2
- Covariance

- 3 mesures
- 2 pistes existantes



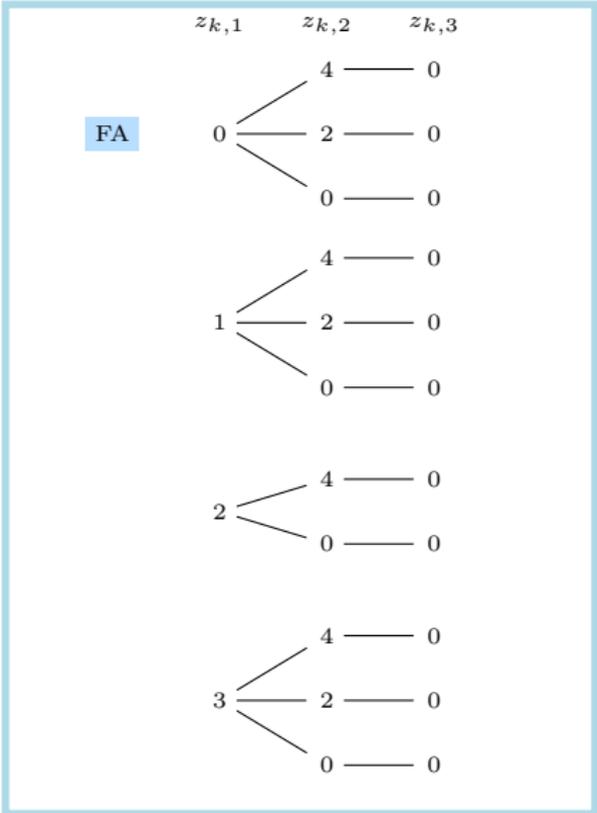
# Construction de l'arbre d'hypothèses

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



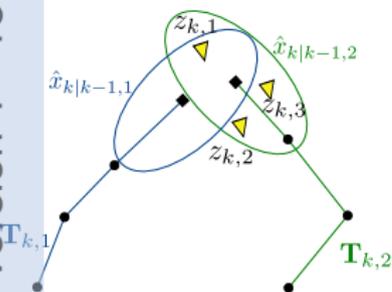
- ▼ mesure
- État estimé
- État prédit
- Piste 1
- Piste 2
- Covariance

- 3 mesures
- 2 pistes existantes



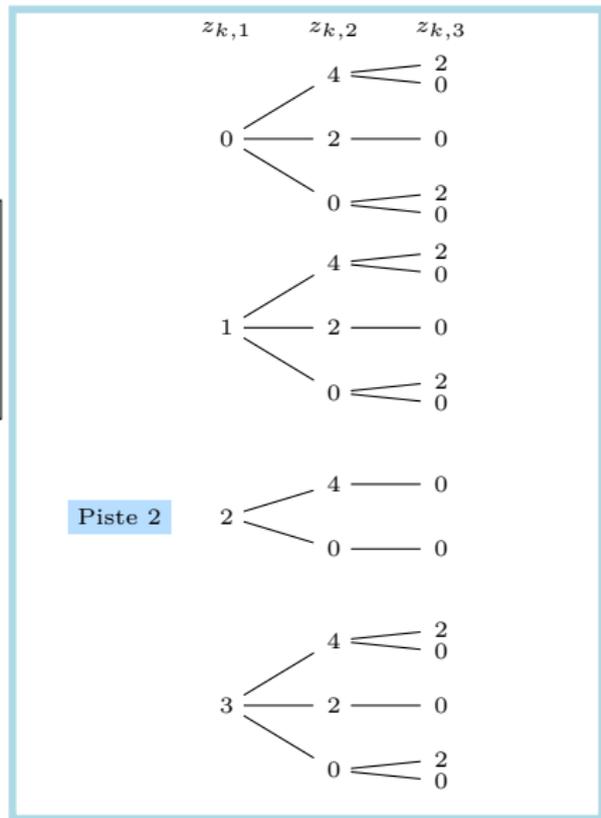
# Construction de l'arbre d'hypothèses

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



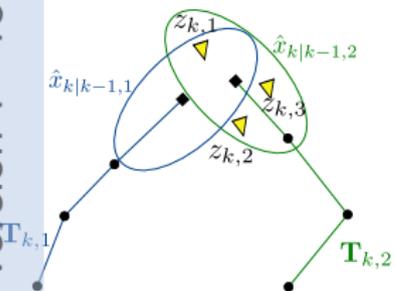
- ▼ mesure
- État estimé
- État prédit
- Piste 1
- Piste 2
- Covariance

- 3 mesures
- 2 pistes existantes



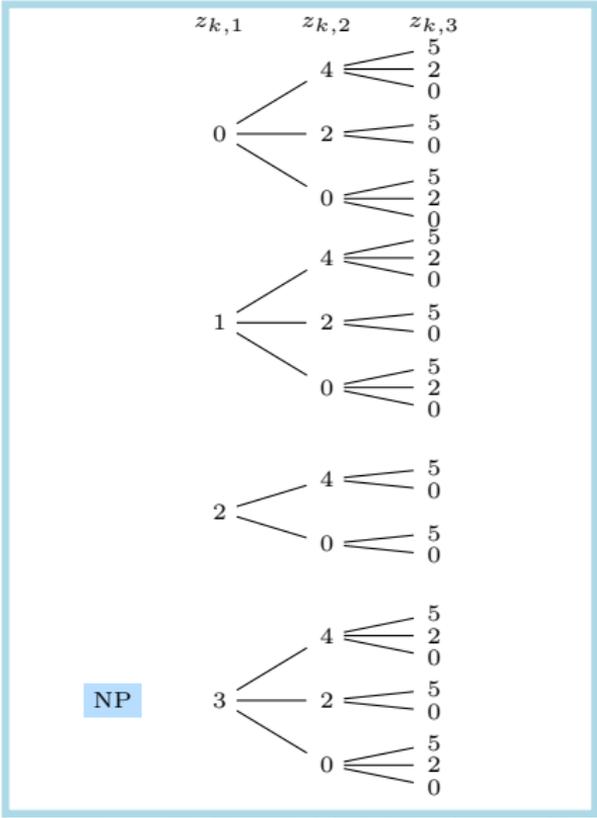
# Construction de l'arbre d'hypothèses

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



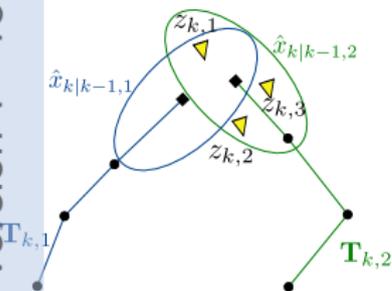
- ▼ mesure
- État estimé
- État prédit
- Piste 1
- Piste 2
- Covariance

- 3 mesures
- 2 pistes existantes



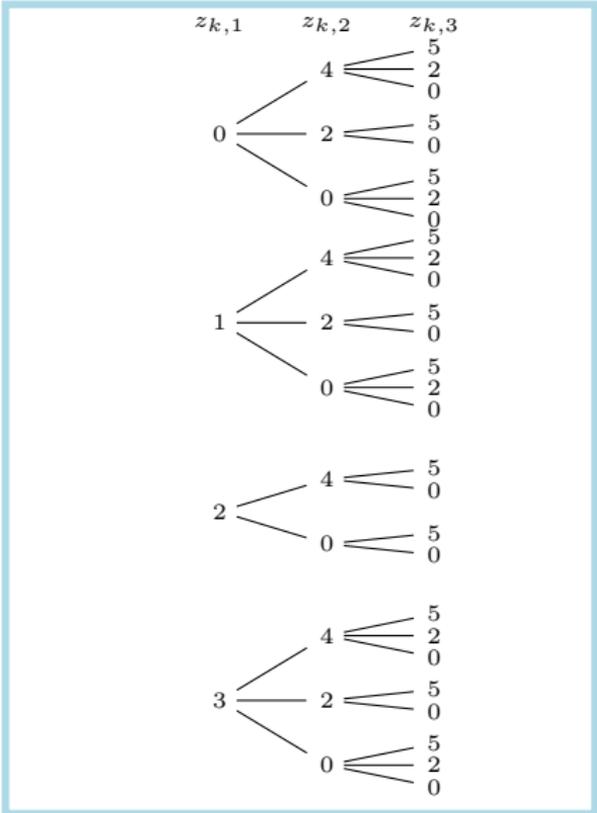
# Construction de l'arbre d'hypothèses

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



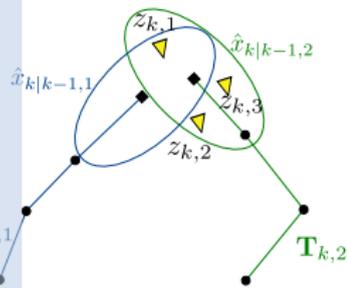
- ▼ mesure
- État estimé
- État prédit
- Piste 1
- Piste 2
- Covariance

- 3 mesures
- 2 pistes existantes
- 28 hypothèses d'association



# Difficultés liées au pistage de cibles proches

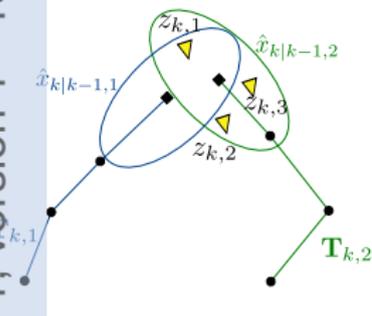
tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



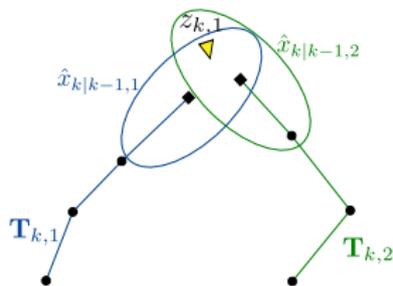
Association des  
mesures aux pistes

# Difficultés liées au pistage de cibles proches

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



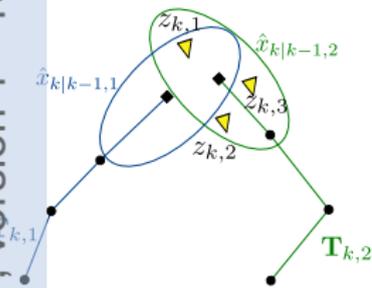
Association des  
mesures aux pistes



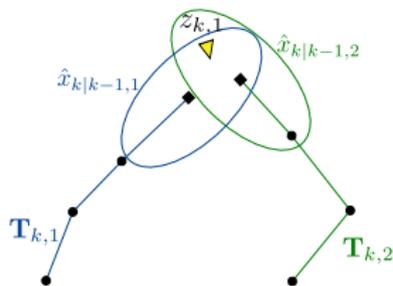
Cibles non-résolues

# Difficultés liées au pistage de cibles proches

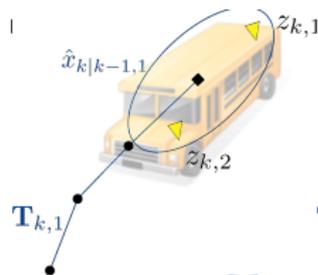
tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



Association des  
mesures aux pistes



Cibles non-résolues



Cibles étendues

# Analyse du MHT

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

# Analyse du MHT

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

## Avantages

- Initialisation des pistes
- Fin de pistes
- Possibilité de l'utiliser conjointement avec une approche multi-modèle : IMM-MHT
- Possibilité de projection sur le réseau routier [Pannetier06] : VS-IMMC-MHT
- Grande précision de l'estimation de l'état des cibles

# Analyse du MHT

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

## Avantages

- Initialisation des pistes
- Fin de pistes
- Possibilité de l'utiliser conjointement avec une approche multi-modèle : [IMM-MHT](#)
- Possibilité de projection sur le réseau routier [Pannetier06] : [VS-IMMC-MHT](#)
- Grande précision de l'estimation de l'état des cibles

## Difficultés

- Complexité
- Pistage de cibles proches
- Gestion de l'arbre d'hypothèses : beaucoup de paramètres
- Nombre de cibles = nombre de pistes confirmées

# Analyse du MHT

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

## Avantages

- Initialisation des pistes
- Fin de pistes
- Possibilité de l'utiliser conjointement avec une approche multi-modèle : [IMM-MHT](#)
- Possibilité de projection sur le réseau routier [Pannetier06] : [VS-IMMC-MHT](#)
- Grande précision de l'estimation de l'état des cibles

## Difficultés

- Complexité
- **Pistage de cibles proches**
- Gestion de l'arbre d'hypothèses : beaucoup de paramètres
- Nombre de cibles = nombre de pistes confirmées

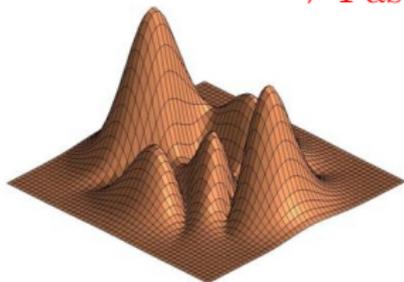
# Principe du filtre PHD (Probability Hypothesis Density)

- Extension du filtre Bayésien optimal au cas multicible

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

# Principe du filtre PHD (Probability Hypothesis Density)

- Extension du filtre Bayésien optimal au cas multicible
- Pas de discrétisation de l'ensemble des cibles [Mahler01].
  - ⇒ Étude de la ddpj de  $\pi_{k+1}(X_{k+1}|\mathbf{Z}^{k+1})$
  - ⇒ Pas d'association des mesures aux cibles



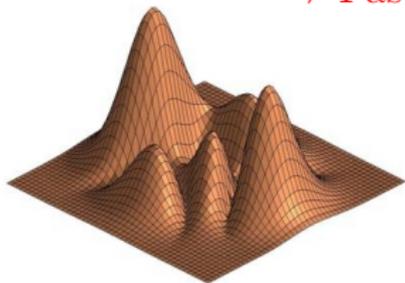
$$\mathbb{E}[|X_k \cap V|] = \int_V v_k(x) dx$$

- $V$  : espace d'observation
- $v_k(x)$  : fonction d'intensité en un point  $x$

# Principe du filtre PHD (Probability Hypothesis Density)

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

- Extension du filtre Bayésien optimal au cas multicible
- Pas de discrétisation de l'ensemble des cibles [Mahler01].  
⇒ Étude de la ddpj de  $\pi_{k+1}(X_{k+1}|\mathbf{Z}^{k+1})$   
⇒ Pas d'association des mesures aux cibles



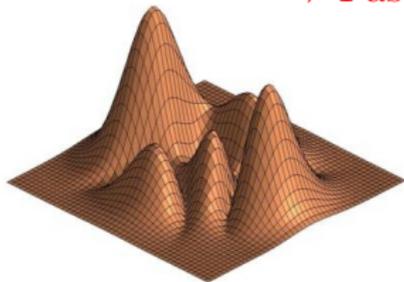
$$\mathbb{E}[|X_k \cap V|] = \int_V v_k(x) dx$$

- $V$  : espace d'observation
  - $v_k(x)$  : fonction d'intensité en un point  $x$
- Représentation de la fonction d'intensité :

## Principe du filtre PHD (Probability Hypothesis Density)

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

- Extension du filtre Bayésien optimal au cas multicible
- Pas de discrétisation de l'ensemble des cibles [Mahler01].  
 ⇒ Étude de la ddpj de  $\pi_{k+1}(X_{k+1}|\mathbf{Z}^{k+1})$   
 ⇒ Pas d'association des mesures aux cibles

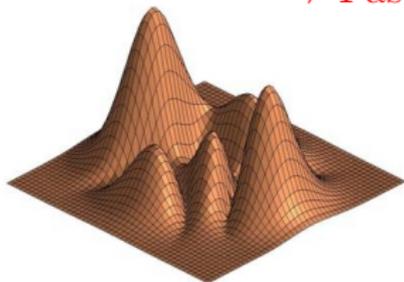


$$\mathbb{E}[|X_k \cap V|] = \int_V v_k(x) dx$$

- $V$  : espace d'observation
- $v_k(x)$  : fonction d'intensité en un point  $x$
- Représentation de la fonction d'intensité :
  - avec des nuages de particules (P-PHD)

## Principe du filtre PHD (Probability Hypothesis Density)

- Extension du filtre Bayésien optimal au cas multicible
- Pas de discrétisation de l'ensemble des cibles [Mahler01].  
⇒ Étude de la ddpj de  $\pi_{k+1}(X_{k+1}|\mathbf{Z}^{k+1})$   
⇒ Pas d'association des mesures aux cibles



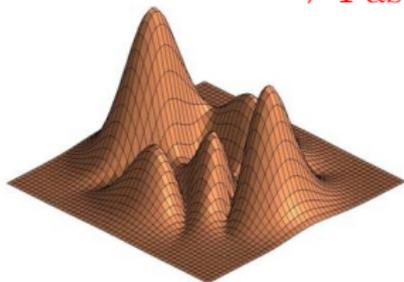
$$\mathbb{E}[|X_k \cap V|] = \int_V v_k(x) dx$$

- $V$  : espace d'observation
- $v_k(x)$  : fonction d'intensité en un point  $x$
- Représentation de la fonction d'intensité :
  - avec des nuages de particules (P-PHD)
  - par mélange de gaussiennes (GM-PHD)

# Principe du filtre PHD (Probability Hypothesis Density)

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

- Extension du filtre Bayésien optimal au cas multicible
- Pas de discrétisation de l'ensemble des cibles [Mahler01].  
⇒ Étude de la ddpj de  $\pi_{k+1}(X_{k+1}|\mathbf{Z}^{k+1})$   
⇒ Pas d'association des mesures aux cibles



$$\mathbb{E}[|X_k \cap V|] = \int_V v_k(x) dx$$

- $V$  : espace d'observation
- $v_k(x)$  : fonction d'intensité en un point  $x$
- Représentation de la fonction d'intensité :
  - avec des nuages de particules (P-PHD)
  - par mélange de gaussiennes (GM-PHD)
- Estimation du nombre de cibles [Mahler03] : GM-CPHD

# Principe de la labellisation 1/2

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

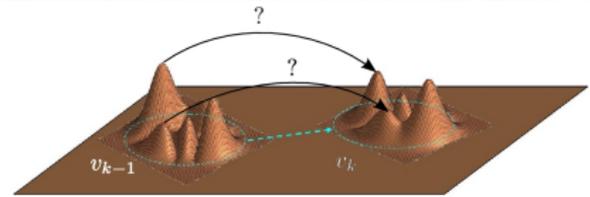
## Sorties du filtre

- La fonction d'intensité  $v_k$

$$v_k(x) = \sum_{i=1}^{N_k^G} w_{k,i} \cdot \mathcal{N}(x; m_{k,i}, P_{k,i})$$

défini par leur poids, moyenne, covariance, et la cardinalité

- Le nombre estimé de cibles  $\hat{N}_{k|k}$ .



# Principe de la labellisation 1/2

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

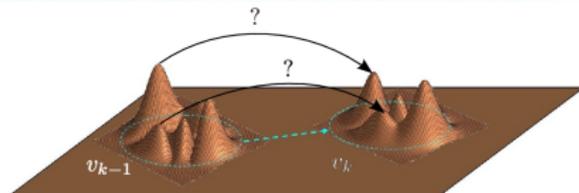
## Sorties du filtre

- La fonction d'intensité  $v_k$

$$v_k(x) = \sum_{i=1}^{N_k^{\mathcal{G}}} w_{k,i} \cdot \mathcal{N}(x; m_{k,i}, P_{k,i})$$

défini par leur poids, moyenne, covariance, et la cardinalité

- Le nombre estimé de cibles  $\hat{N}_{k|k}$ .



# Principe de la labellisation 1/2

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

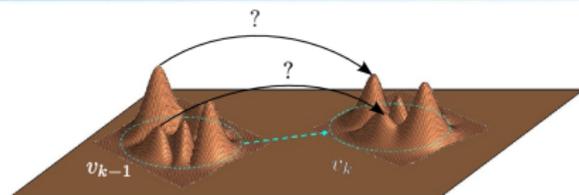
## Sorties du filtre

- La fonction d'intensité  $v_k$

$$v_k(x) = \sum_{i=1}^{N_k^G} w_{k,i} \cdot \mathcal{N}(x; m_{k,i}, P_{k,i})$$

défini par leur poids, moyenne, covariance, et la cardinalité

- Le nombre estimé de cibles  $\hat{N}_{k|k}$ .



# Principe de la labellisation 1/2

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

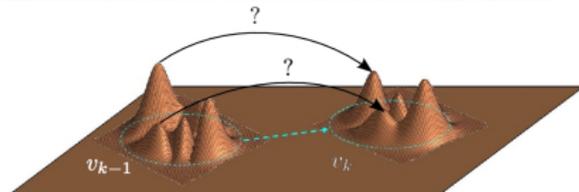
## Sorties du filtre

- La fonction d'intensité  $v_k$

$$v_k(x) = \sum_{i=1}^{N_k^G} w_{k,i} \cdot \mathcal{N}(x; m_{k,i}, P_{k,i})$$

défini par leur poids, **moyenne**,  
 covariance, et la cardinalité

- Le nombre estimé de cibles  $\hat{N}_{k|k}$ .



# Principe de la labellisation 1/2

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

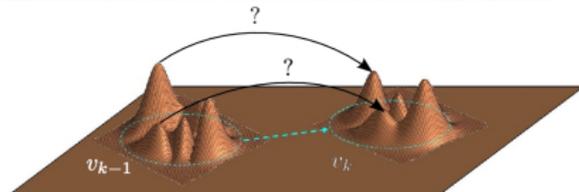
## Sorties du filtre

- La fonction d'intensité  $v_k$

$$v_k(x) = \sum_{i=1}^{N_k^G} w_{k,i} \cdot \mathcal{N}(x; m_{k,i}, P_{k,i})$$

défini par leur poids, moyenne, covariance, et la cardinalité

- Le nombre estimé de cibles  $\hat{N}_{k|k}$ .



# Principe de la labellisation 1/2

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

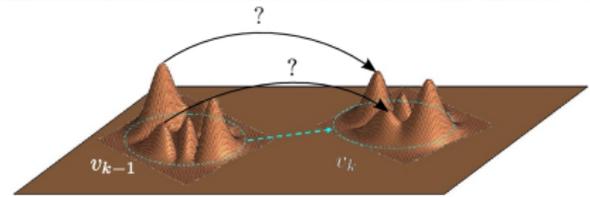
## Sorties du filtre

- La fonction d'intensité  $v_k$

$$v_k(x) = \sum_{i=1}^{N_k^G} w_{k,i} \cdot \mathcal{N}(x; m_{k,i}, P_{k,i})$$

défini par leur poids, moyenne, covariance, et la cardinalité

- Le nombre estimé de cibles  $\hat{N}_{k|k}$ .



# Principe de la labellisation 1/2

tel-00536071 version 1 - 15 Nov 2010

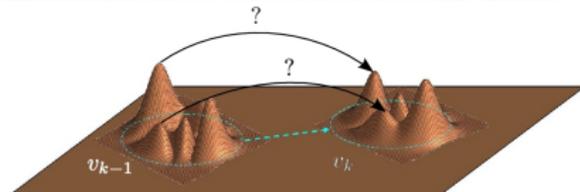
## Sorties du filtre

- La fonction d'intensité  $v_k$

$$v_k(x) = \sum_{i=1}^{N_k^G} w_{k,i} \cdot \mathcal{N}(x; m_{k,i}, P_{k,i})$$

défini par leur poids, moyenne, covariance, et la cardinalité

- Le nombre estimé de cibles  $\hat{N}_{k|k}$ .



## Ce qu'on veut...

Un ensemble de  $\hat{N}_{k|k}$  pistes décrivant le comportement des cibles :

$$\mathcal{T}_{k,j} = \{ \hat{x}_{k,j}, P_{k,j}, s_{k,j} \}$$

caractérisé par un état, une covariance et un score

# Principe de la labellisation 1/2

tel-00536071 version 1 - 15 Nov 2010

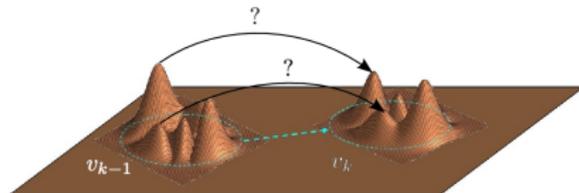
## Sorties du filtre

- La fonction d'intensité  $v_k$

$$v_k(x) = \sum_{i=1}^{N_k^G} w_{k,i} \cdot \mathcal{N}(x; m_{k,i}, P_{k,i})$$

défini par leur poids, moyenne, covariance, et la cardinalité

- Le nombre estimé de cibles  $\hat{N}_{k|k}$ .



## Ce qu'on veut...

Un ensemble de  $\hat{N}_{k|k}$  pistes décrivant le comportement des cibles :

$$\mathcal{T}_{k,j} = \left\{ \hat{x}_{k,j}, P_{k,j}, s_{k,j} \right\}$$

caractérisé par un état, une covariance et un score

# Principe de la labellisation 1/2

tel-00536071 version 1 - 15 Nov 2010

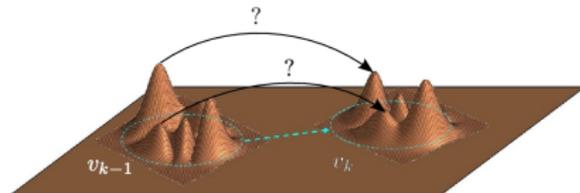
## Sorties du filtre

- La fonction d'intensité  $v_k$

$$v_k(x) = \sum_{i=1}^{N_k^G} w_{k,i} \cdot \mathcal{N}(x; m_{k,i}, P_{k,i})$$

défini par leur poids, moyenne, covariance, et la cardinalité

- Le nombre estimé de cibles  $\hat{N}_{k|k}$ .



## Ce qu'on veut...

Un ensemble de  $\hat{N}_{k|k}$  pistes décrivant le comportement des cibles :

$$\mathcal{T}_{k,j} = \left\{ \hat{x}_{k,j}, P_{k,j}, s_{k,j} \right\}$$

caractérisé par un état, une covariance et un score

# Principe de la labellisation 1/2

tel-00536071 version 1 - 15 Nov 2010

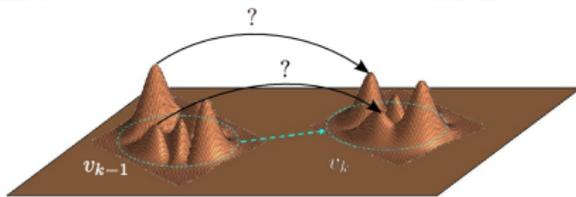
## Sorties du filtre

- La fonction d'intensité  $v_k$

$$v_k(x) = \sum_{i=1}^{N_k^G} w_{k,i} \cdot \mathcal{N}(x; m_{k,i}, P_{k,i})$$

défini par leur poids, moyenne, covariance, et la cardinalité

- Le nombre estimé de cibles  $\hat{N}_{k|k}$ .



## Ce qu'on veut...

Un ensemble de  $\hat{N}_{k|k}$  pistes décrivant le comportement des cibles :

$$\mathcal{T}_{k,j} = \left\{ \hat{x}_{k,j}, P_{k,j}, s_{k,j} \right\}$$

caractérisé par un état, une covariance et un score

## Principe de la labellisation 1/2

tel-00536071 version 1 - 15 Nov 2010

## Sorties du filtre

- La fonction d'intensité  $v_k$

$$v_k(x) = \sum_{i=1}^{N_k^G} w_{k,i} \cdot \mathcal{N}(x; m_{k,i}, P_{k,i})$$

défini par leur poids, moyenne, covariance, et la cardinalité

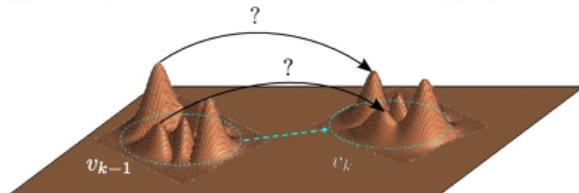
- Le nombre estimé de cibles  $\hat{N}_{k|k}$ .

## Ce qu'on veut...

Un ensemble de  $\hat{N}_{k|k}$  pistes décrivant le comportement des cibles :

$$\mathcal{T}_{k,j} = \{\hat{x}_{k,j}, P_{k,j}, s_{k,j}\}$$

caractérisé par un état, une covariance et un score



## Énoncé du problème

Comment trouver la matrice  $\mathbf{A}_k$  d'association ?

$$\{\mathcal{G}_{k,j}\}_{j=1}^{N_k^G} \xleftrightarrow{\mathbf{A}_k} \{\mathcal{T}_{k,j}\}_{j=1}^{\hat{N}_{k|k}}$$

# Principe de la labellisation 1/2

tel-00536071 version 1 - 15 Nov 2010

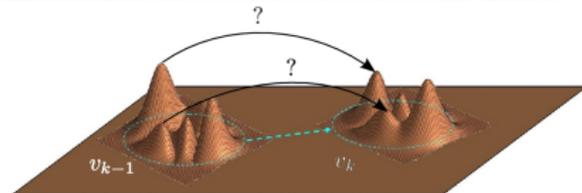
## Sorties du filtre

- La fonction d'intensité  $v_k$

$$v_k(x) = \sum_{i=1}^{N_k^{\mathcal{G}}} w_{k,i} \cdot \mathcal{N}(x; m_{k,i}, P_{k,i})$$

défini par leur poids, moyenne, covariance, et la cardinalité

- Le nombre estimé de cibles  $\hat{N}_{k|k}$ .



## Énoncé du problème

Comment trouver la matrice  $\mathbf{A}_k$  d'association ?

$$\{\mathcal{G}_{k,j}\}_{j=1}^{N_k^{\mathcal{G}}} \xleftrightarrow{\mathbf{A}_k} \{\mathcal{T}_{k,j}\}_{j=1}^{\hat{N}_{k|k}}$$

$\mathbf{A}_k$  est de taille  $\hat{N}_{k|k} \times N_k^{\mathcal{G}}$  telle que :

$$\mathbf{A}_k(m, n) = \begin{cases} 1 & \text{si } \mathcal{G}_{k,n} \text{ est as. à } \mathcal{T}_{k,m} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

## Ce qu'on veut...

Un ensemble de  $\hat{N}_{k|k}$  pistes décrivant le comportement des cibles :

$$\mathcal{T}_{k,j} = \{\hat{x}_{k,j}, P_{k,j}, s_{k,j}\}$$

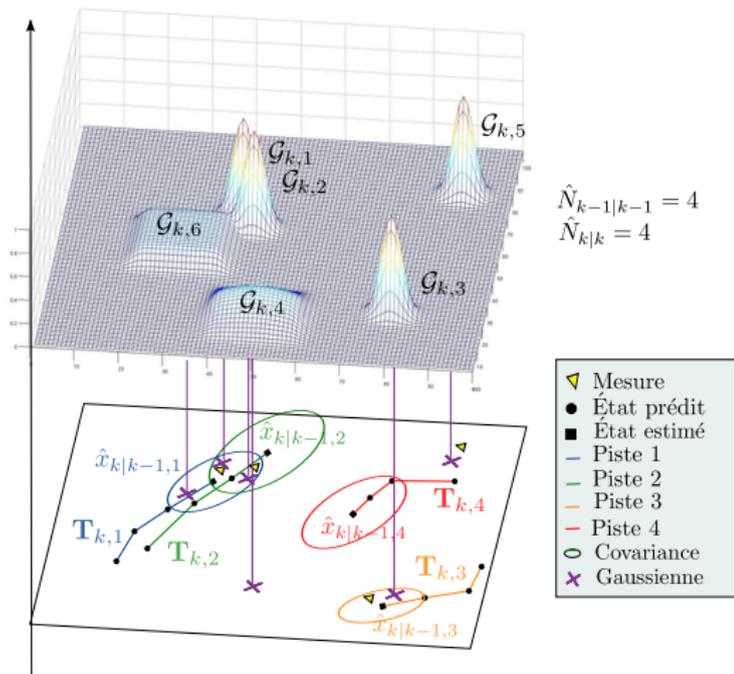
caractérisé par un état, une covariance et un score

# Principe de la labellisation 2/2

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

## Utilisation de deux critères

- Maximisation du poids
- Minimisation du coût d'association piste/gaussienne



# Analyse du filtre CPHD

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

## Avantages

- Estimation du nombre de cibles
- Gestion de cibles proches
- Processus d'initialisation et de fin de pistes très réactif
- Faible complexité algorithmique

# Analyse du filtre CPHD

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

## Avantages

- Estimation du nombre de cibles
- Gestion de cibles proches
- Processus d'initialisation et de fin de pistes très réactif
- Faible complexité algorithmique

## Faiblesses

- Estimation de la vitesse des cibles
- Nécessité de bien connaître  $P_d$  et  $\beta_{fa}$

# Comparaison des algorithmes MHT et du filtre PHD

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

Estimation de la position

Estimation de la vitesse

Estimation du nombre de cibles

Initialisation et fin de pistes

Performances avec cibles proches

# Comparaison des algorithmes MHT et du filtre PHD

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

	MHT
Estimation de la position	++
Estimation de la vitesse	++
Estimation du nombre de cibles	-
Initialisation et fin de pistes	+
Performances avec cibles proches	-

# Comparaison des algorithmes MHT et du filtre PHD

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

	MHT	PHD
Estimation de la position	++	+
Estimation de la vitesse	++	-
Estimation du nombre de cibles	-	++
Initialisation et fin de pistes	+	++
Performances avec cibles proches	-	+

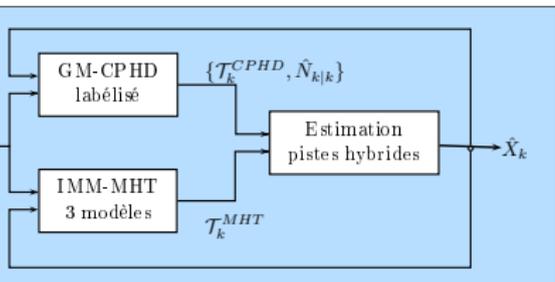
# Comparaison des algorithmes MHT et du filtre PHD

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

	MHT	PHD	Hybride
Estimation de la position	++	+	++
Estimation de la vitesse	++	-	++
Estimation du nombre de cibles	-	++	++
Initialisation et fin de pistes	+	++	++
Performances avec cibles proches	-	+	+

# Algorithme hybride 1 : IMM-MHT

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



## Interacting Multiple Model (IMM)

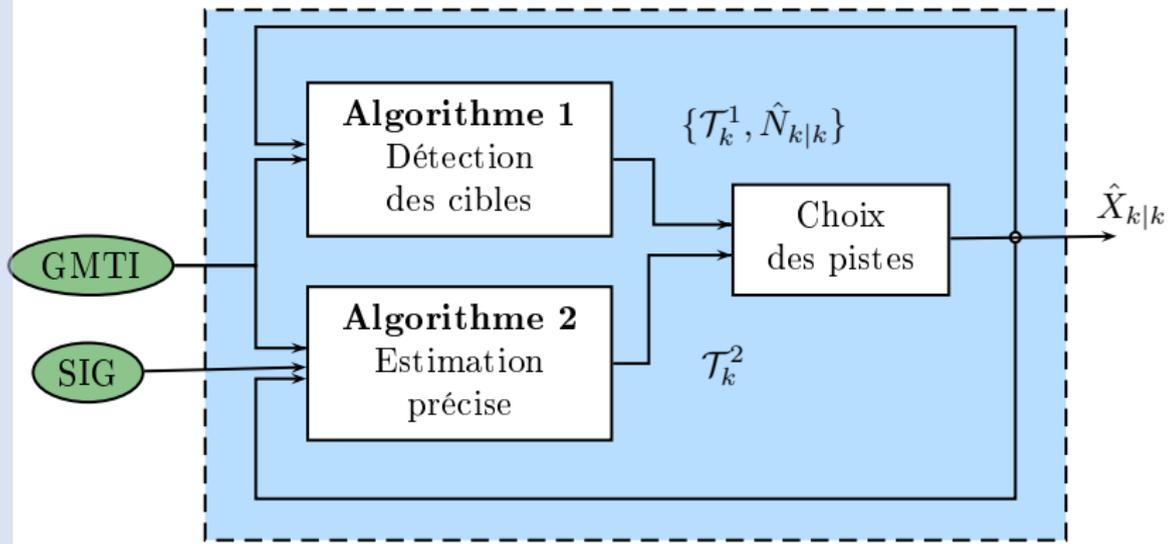
- Considérer plusieurs modèles de mouvement pour chaque cible
- Estimer conjointement l'état d'une cible avec ce modèle
- Pondérer l'estimation globale par la probabilité d'appartenance à un modèle

## Implémentation avec 3 modèles

- Un modèle CV (Constant Velocity) avec un faible bruit de modèle  $\Rightarrow$  grande précision dans l'estimation,
- Un modèle CV (Constant Velocity) avec un fort bruit de modèle  $\Rightarrow$  pistage de cibles manœuvrantes
- Un modèle Stop

# Algorithme hybride : synoptique général

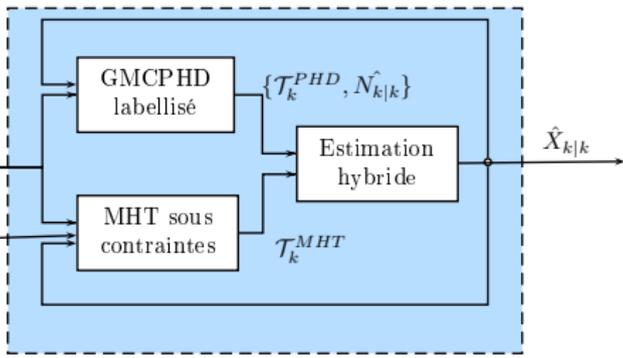
tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



# Algorithme hybride 2 : VS-IMMC-MHT

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

GMTI  
SIG



Hybridation du MHT et du GMCPHD

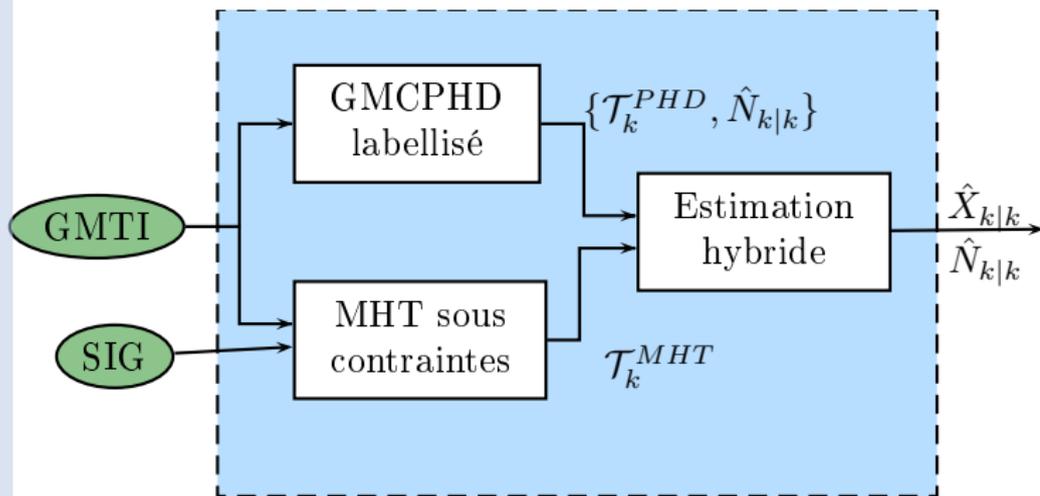
## IMM-MHT sous contraintes

Utilisation du VS-IMMC-MHT [Pannetier06]

- Projection des états prédits et estimés sur le réseau routier,
- Prise de décision différée en présence d'intersection,
- Modèle « On-Road » et « Off-Road »

# Bilan

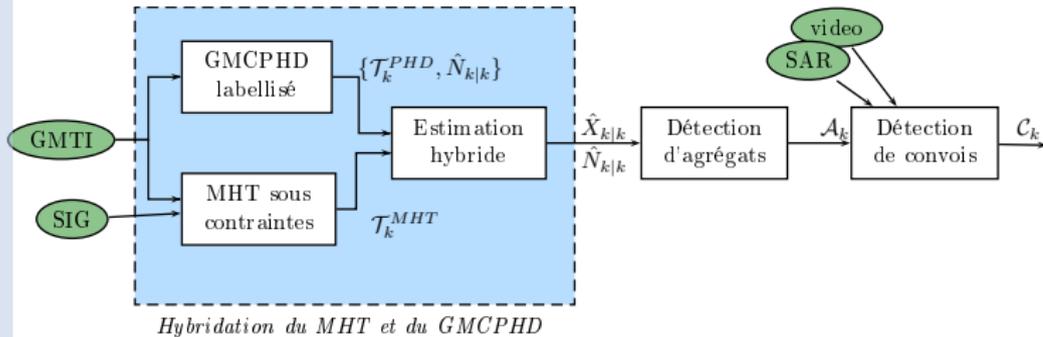
tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



*Hybridation du MHT et du GMCPHD*

# Bilan

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



# Sommaire

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

- 1 Pistage multicible adapté au pistage de cibles proches
- 2 Fusion de données pour la détection d'objets d'intérêts
  - Définition d'un convoi
  - Mise en œuvre des réseaux Bayésiens
  - Détection et caractérisation d'un agrégat
  - Mise en œuvre des réseaux crédibilistes
- 3 Simulations et résultats

# Analyse du système « convoi »

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

# Analyse du système « convoi »

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

## Caractéristiques du convoi

- Cardinalité élevée ( $> 2$ )
- Sur la route
- Vitesse faible et constante
- Distance constante entre les véhicules
- véhicule de type militaire

# Analyse du système « convoi »

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

## Caractéristiques du convoi

- Cardinalité élevée ( $> 2$ )
- Sur la route
- Vitesse faible et constante
- Distance constante entre les véhicules
- véhicule de type militaire



### Contraintes

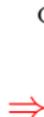
- Spatiale
- Temporelle
- Cinématique
- Numéraire
- Contextuelle

# Analyse du système « convoi »

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

## Caractéristiques du convoi

- Cardinalité élevée ( $> 2$ )
- Sur la route
- Vitesse faible et constante
- Distance constante entre les véhicules
- véhicule de type militaire



### Contraintes

- Spatiale
- Temporelle
- Cinématique
- Numéraire
- Contextuelle

## Analyse du système

- Variables aléatoires
- Évolution temporelle
- Multi-contraintes
- Données  
d'observation
  - hétérogènes
  - asynchrones
  - incomplètes

# Analyse du système « convoi »

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

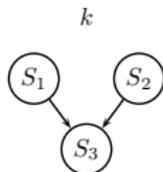
## Caractéristiques du convoi

- |                                                                                                                                                                                                                                  |   |                                                                                                                                                                     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"><li>● Cardinalité élevée (&gt; 2)</li><li>● Sur la route</li><li>● Vitesse faible et constante</li><li>● Distance constante entre les véhicules</li><li>● véhicule de type militaire</li></ul> | ⇒ | <p>Contraintes</p> <ul style="list-style-type: none"><li>● Spatiale</li><li>● Temporelle</li><li>● Cinématique</li><li>● Numéraire</li><li>● Contextuelle</li></ul> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

## Analyse du système

- Variables aléatoires
- Évolution temporelle
- Multi-contraintes
  
- Données d'observation
  - hétérogènes
  - asynchrones
  - incomplètes

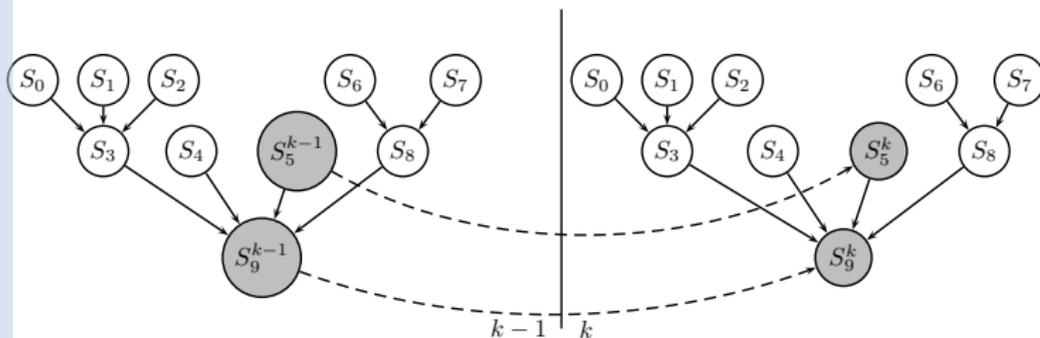
## Réseaux Bayésiens Dynamiques (RBD)



$$P \{s_1, s_2, s_3\} = \prod_{i=1}^3 P \{s_i | Pa(s_i)\}$$

# Le modèle convoi

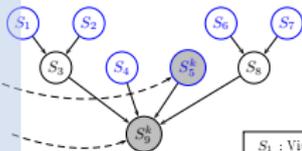
tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



- $S_0$  : Évolution dans le même sens {oui, non}
- $S_1$  : Vitesse < 80 km.h<sup>-1</sup> {oui, non}
- $S_2$  : Vitesse constante {oui, non}
- $S_3$  : Critère vitesse {oui, non}
- $S_4$  : Sur la route {oui, non}
- $S_5$  : Véhicule militaire {oui, non}
- $S_6$  : Distance constante entre les véhicules {oui, non}
- $S_7$  : Distance constante au cours du temps {oui, non}
- $S_8$  : Critère distance {oui, non}
- $S_9$  : Convoi {oui, non}

# Transformation des données en probabilités

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

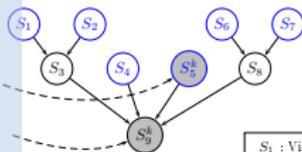


- $S_1$  : Vitesse  $< 80 \text{ km.h}^{-1}$  {oui, non}
- $S_2$  : Vitesse constante {oui, non}
- $S_3$  : Critère vitesse {oui, non}
- $S_4$  : Sur la route {oui, non}
- $S_5$  : Véhicule militaire {oui, non}
- $S_6$  : Distance constante entre les véhicules {oui, non}
- $S_7$  : Distance constante au cours du temps {oui, non}
- $S_8$  : Critère distance {oui, non}
- $S_9$  : Convoi {oui, non}

- $S_1$  : distribution de Rayleigh
- $S_2$  : transformation floue linéaire
- $S_4$  : appartenance à la route
- $S_6$  : loi exponentielle décroissante
- $S_7$  : transformation floue linéaire

# Transformation des données en probabilités

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

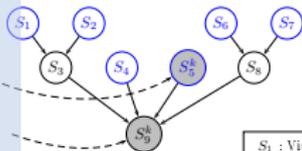


- $S_1$  : Vitesse  $< 80 \text{ km.h}^{-1}$  {oui, non}
- $S_2$  : Vitesse constante {oui, non}
- $S_3$  : Critère vitesse {oui, non}
- $S_4$  : Sur la route {oui, non}
- $S_5$  : Véhicule militaire {oui, non}
- $S_6$  : Distance constante entre les véhicules {oui, non}
- $S_7$  : Distance constante au cours du temps {oui, non}
- $S_8$  : Critère distance {oui, non}
- $S_9$  : Convoi {oui, non}

- $S_1$  : distribution de Rayleigh
- $S_2$  : transformation floue linéaire
- $S_4$  : appartenance à la route
- $S_6$  : loi exponentielle décroissante
- $S_7$  : transformation floue linéaire

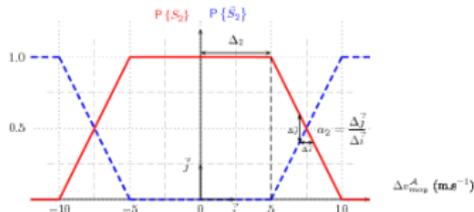
# Transformation des données en probabilités

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



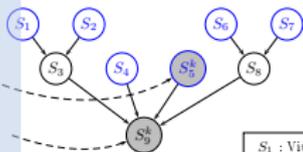
- $S_1$  : Vitesse  $< 80 \text{ km.h}^{-1}$  {oui, non}
- $S_2$  : Vitesse constante {oui, non}
- $S_3$  : Critère vitesse {oui, non}
- $S_4$  : Sur la route {oui, non}
- $S_5$  : Véhicule militaire {oui, non}
- $S_6$  : Distance constante entre les véhicules {oui, non}
- $S_7$  : Distance constante au cours du temps {oui, non}
- $S_8$  : Critère distance {oui, non}
- $S_9$  : Convoi {oui, non}

- $S_1$  : distribution de Rayleigh
- $S_2$  : transformation floue linéaire
- $S_4$  : appartenance à la route
- $S_6$  : loi exponentielle décroissante
- $S_7$  : transformation floue linéaire



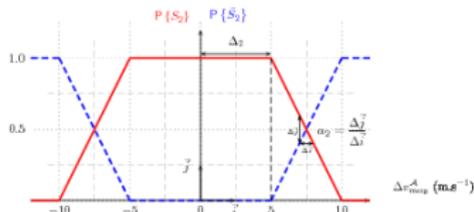
# Transformation des données en probabilités

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



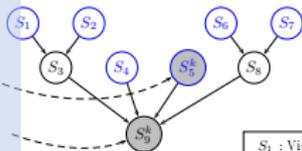
- $S_1$  : Vitesse  $< 80 \text{ km.h}^{-1}$  {oui, non}
- $S_2$  : Vitesse constante {oui, non}
- $S_3$  : Critère vitesse {oui, non}
- $S_4$  : Sur la route {oui, non}
- $S_5$  : Véhicule militaire {oui, non}
- $S_6$  : Distance constante entre les véhicules {oui, non}
- $S_7$  : Distance constante au cours du temps {oui, non}
- $S_8$  : Critère distance {oui, non}
- $S_9$  : Convoi {oui, non}

- $S_1$  : distribution de Rayleigh
- $S_2$  : transformation floue linéaire
- $S_4$  : appartenance à la route
- $S_6$  : loi exponentielle décroissante
- $S_7$  : transformation floue linéaire



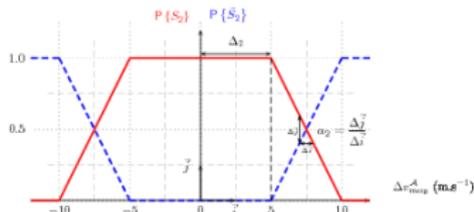
# Transformation des données en probabilités

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



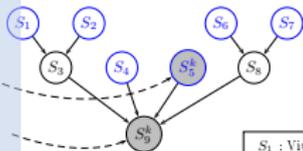
- $S_1$  : Vitesse  $< 80 \text{ km.h}^{-1}$  {oui, non}
- $S_2$  : Vitesse constante {oui, non}
- $S_3$  : Critère vitesse {oui, non}
- $S_4$  : Sur la route {oui, non}
- $S_5$  : Véhicule militaire {oui, non}
- $S_6$  : Distance constante entre les véhicules {oui, non}
- $S_7$  : Distance constante au cours du temps {oui, non}
- $S_8$  : Critère distance {oui, non}
- $S_9$  : Convoi {oui, non}

- $S_1$  : distribution de Rayleigh
- $S_2$  : transformation floue linéaire
- $S_4$  : appartenance à la route
- $S_6$  : loi exponentielle décroissante
- $S_7$  : transformation floue linéaire



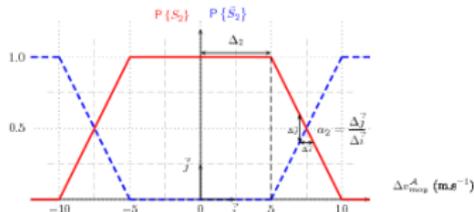
# Transformation des données en probabilités

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



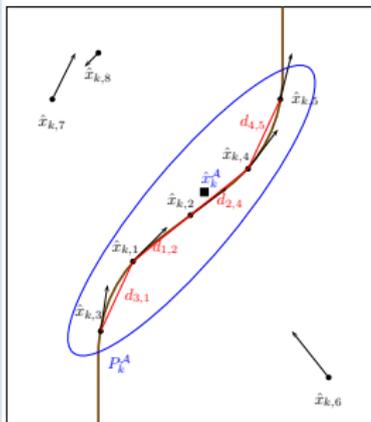
- $S_1$  : Vitesse  $< 80 \text{ km.h}^{-1}$  {oui, non}
- $S_2$  : Vitesse constante {oui, non}
- $S_3$  : Critère vitesse {oui, non}
- $S_4$  : Sur la route {oui, non}
- $S_5$  : Véhicule militaire {oui, non}
- $S_6$  : Distance constante entre les véhicules {oui, non}
- $S_7$  : Distance constante au cours du temps {oui, non}
- $S_8$  : Critère distance {oui, non}
- $S_9$  : Convoi {oui, non}

- $S_1$  : distribution de Rayleigh
- $S_2$  : transformation floue linéaire
- $S_4$  : appartenance à la route
- $S_6$  : loi exponentielle décroissante
- $S_7$  : transformation floue linéaire



# Processus de gestion des agrégats

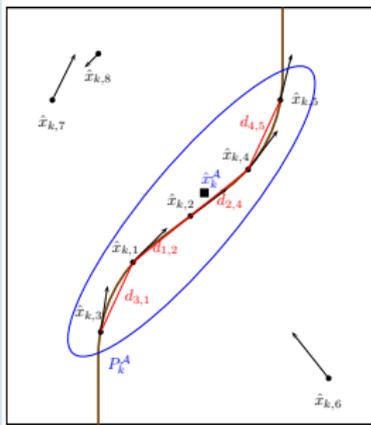
tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



- 1 Détection des agrégats,
- 2 Calcul de leurs caractéristiques,
- 3 Mise en correspondance avec les agrégats détectés à l'itération précédente,
- 4 Calcul de la probabilité d'être un convoi,
- 5 Calcul de la probabilité d'avoir un convoi de  $N_i^C$  cibles.

# Processus de gestion des agrégats

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



- ① Détection des agrégats,
- ② Calcul de leurs caractéristiques,
- ③ Mise en correspondance avec les agrégats détectés à l'itération précédente,
- ④ Calcul de la probabilité d'être un convoi,
- ⑤ Calcul de la probabilité d'avoir un convoi de  $N_i^C$  cibles.

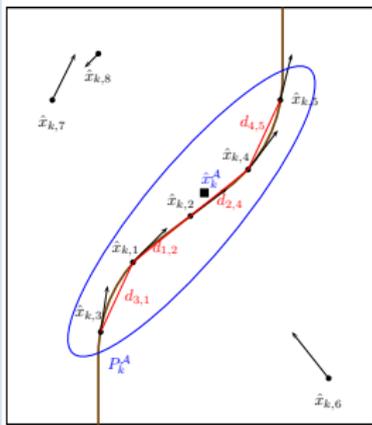
Calcul la matrice de proximité  $\mathbf{P}\mathbf{x} =$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \text{ avec,}$$

$$\mathbf{P}\mathbf{x}(m, n) = \begin{cases} 1 & \text{si } d(x_{k,m}, x_{k,n}) < \alpha^A \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

# Processus de gestion des agrégats

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



- ① Détection des agrégats,
- ② Calcul de leurs caractéristiques,
- ③ Mise en correspondance avec les agrégats détectés à l'itération précédente,
- ④ Calcul de la probabilité d'être un convoi,
- ⑤ Calcul de la probabilité d'avoir un convoi de  $N_i^C$  cibles.

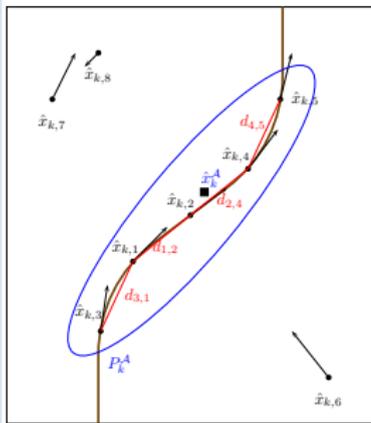
Calcul la matrice de proximité  $\mathbf{P}_x =$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \text{ avec,}$$

$$\mathbf{P}_x(m, n) = \begin{cases} 1 & \text{si } d(x_{k,m}, x_{k,n}) < \alpha^A \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \Rightarrow \alpha^A = 300 \text{ m}$$

# Processus de gestion des agrégats

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

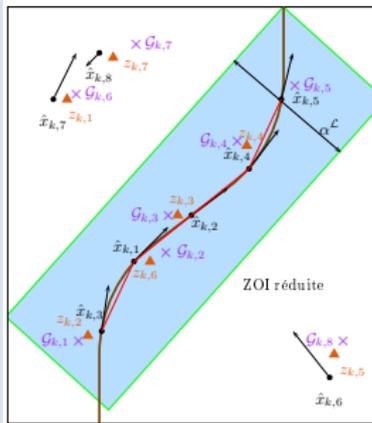


- ① Détection des agrégats,
- ② Calcul de leurs caractéristiques,
- ③ Mise en correspondance avec les agrégats détectés à l'itération précédente,
- ④ Calcul de la probabilité d'être un convoi,
- ⑤ Calcul de la probabilité d'avoir un convoi de  $N_i^C$  cibles.

- Une position :  $\hat{x}_k^A$
- Une vitesse :  $\hat{\dot{x}}_k^A$
- Une covariance :  $P_k^A$
- Une liste ordonnée des indices des cibles :  $\mathcal{I}^A = [3, 1, 2, 4, 5]$
- Une longueur :  $\mathcal{L}^A d_{31} + d_{12} + d_{24} + d_{45}$

# Processus de gestion des agrégats

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

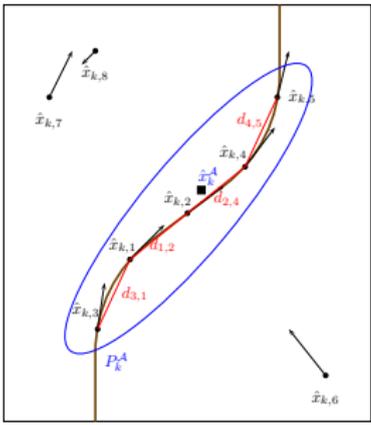


- ① Détection des agrégats,
- ② Calcul de leurs caractéristiques,
- ③ Mise en correspondance avec les agrégats détectés à l'itération précédente,
- ④ Calcul de la probabilité d'être un convoi,
- ⑤ Calcul de la probabilité d'avoir un convoi de  $N_i^C$  cibles.

- Une position :  $\hat{x}_k^A$
- Une vitesse :  $\hat{\dot{x}}_k^A$
- Une covariance :  $P_k^A$
- Une liste ordonnée des indices des cibles :  $\mathcal{I}^A = [3, 1, 2, 4, 5]$
- Une longueur :  $\mathcal{L}^A d_{31} + d_{12} + d_{24} + d_{45}$
- Une estimation du nombre de cibles :  $\hat{N}_k^A \in \mathbb{R}^+$

# Processus de gestion des agrégats

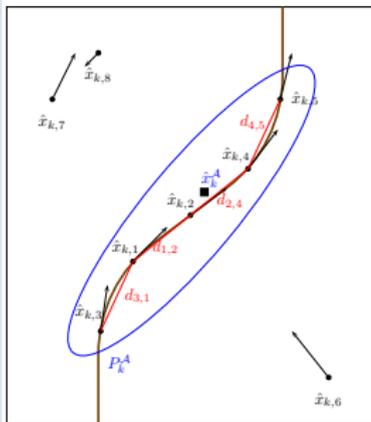
tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



- 1 Détection des agrégats,
- 2 Calcul de leurs caractéristiques,
- 3 Mise en correspondance avec les agrégats détectés à l'itération précédente,
- 4 Calcul de la probabilité d'être un convoi,
- 5 Calcul de la probabilité d'avoir un convoi de  $N_i^C$  cibles.

# Processus de gestion des agrégats

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

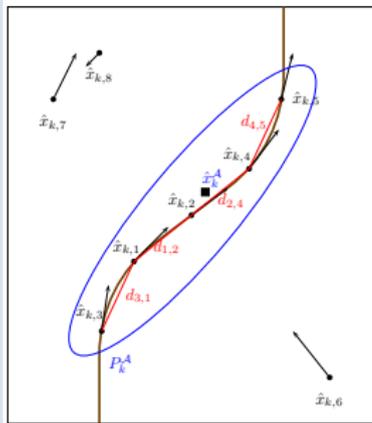


- 1 Détection des agrégats,
- 2 Calcul de leurs caractéristiques,
- 3 Mise en correspondance avec les agrégats détectés à l'itération précédente,
- 4 Calcul de la probabilité d'être un convoi,
- 5 Calcul de la probabilité d'avoir un convoi de  $N_i^C$  cibles.

$$P \{ S_9^k | N^{\mathcal{A}_k} \}$$

# Processus de gestion des agrégats

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



- ① Détection des agrégats,
- ② Calcul de leurs caractéristiques,
- ③ Mise en correspondance avec les agrégats détectés à l'itération précédente,
- ④ Calcul de la probabilité d'être un convoi,
- ⑤ Calcul de la probabilité d'avoir un convoi de  $N_i^C$  cibles.

$$P \left\{ S_9^k \mid N_{k_0:k}^A, N_i^C \right\}$$

$$P \left\{ N_i^C \mid S_9^k, N_{k_0:k}^A, \hat{N}_k^A \right\}$$

# Bilan et voies d'amélioration

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

## Probabilité conditionnelles

Déterminées par expertise car :

- Peu ou pas de données réelles,
- Vérité terrain peu fiable,
- Peu ou pas d'avis d'expert.

## Modélisation information

Modélisation du doute et du conflit entre les sources

⇒ Utilisation du modèle des croyances transférables (MCT)

Probabilités

$$\begin{cases} P\{S_i\} \\ P\{\bar{S}_i\} \end{cases}$$

Masses de croyances

$$\begin{cases} m(\phi) & \rightarrow \text{conflit} \\ m(S_i) \\ m(\bar{S}_i) \\ m(\Omega_i) = m(S_i \cup \bar{S}_i) & \rightarrow \text{doute} \end{cases}$$

# Bilan et voies d'amélioration

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

## Probabilité conditionnelles

Déterminées par expertise car :

- Peu ou pas de données réelles,
- Vérité terrain peu fiable,
- Peu ou pas d'avis d'expert.

## Modélisation information

Modélisation du doute et du conflit entre les sources

⇒ Utilisation du modèle des croyances transférables (MCT)

Probabilités

$$\begin{cases} P\{S_i\} \\ P\{\bar{S}_i\} \end{cases}$$

Masses de croyances

$$\begin{cases} m(\phi) & \rightarrow \text{conflit} \\ m(S_i) \\ m(\bar{S}_i) \\ m(\Omega_i) = m(S_i \cup \bar{S}_i) & \rightarrow \text{doute} \end{cases}$$

# Bilan et voies d'amélioration

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

## Probabilité conditionnelles

Déterminées par expertise car :

- Peu ou pas de données réelles,
- Vérité terrain peu fiable,
- Peu ou pas d'avis d'expert.

## Modélisation information

Modélisation du doute et du conflit entre les sources

⇒ Utilisation du modèle des croyances transférables (MCT)

Probabilités

$$\begin{cases} P\{S_i\} \\ P\{\bar{S}_i\} \end{cases}$$

Masses de croyances

$$\begin{cases} m(\phi) & \rightarrow \text{conflit} \\ m(S_i) \\ m(\bar{S}_i) \\ m(\Omega_i) = m(S_i \cup \bar{S}_i) & \rightarrow \text{doute} \end{cases}$$

# Avantage de l'utilisation des masses de croyance

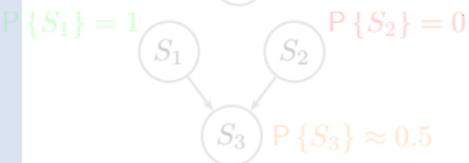
tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

Les nœuds du RB peuvent être vues comme différentes sources d'information qui peuvent être :

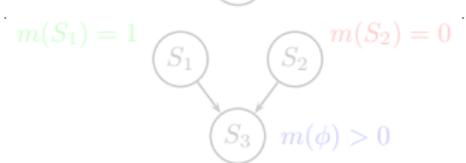
- Conflictuelles :



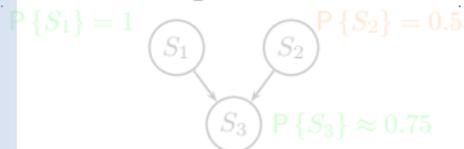
≠



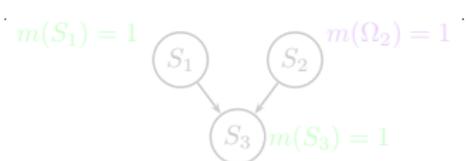
≠



- Incomplètes :



vs.

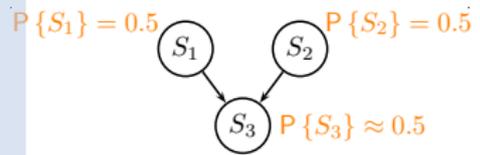


# Avantage de l'utilisation des masses de croyance

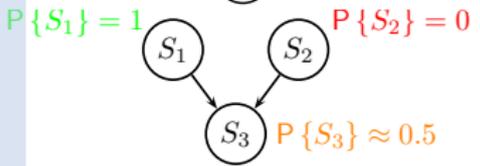
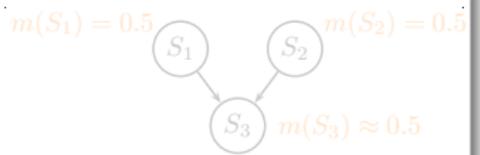
tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

Les nœuds du RB peuvent être vues comme différentes sources d'information qui peuvent être :

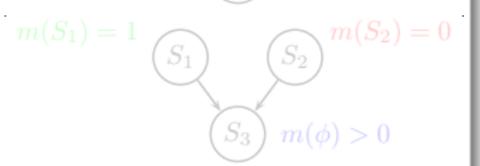
- Conflictuelles :



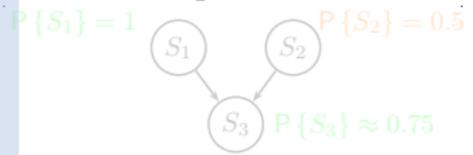
≠



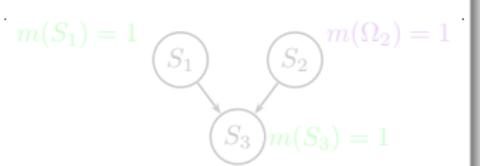
≠



- Incomplètes :



vs.

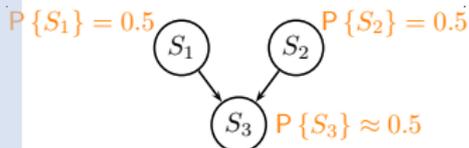


# Avantage de l'utilisation des masses de croyance

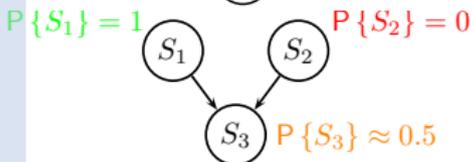
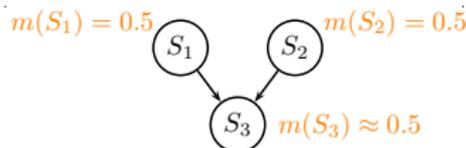
tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

Les nœuds du RB peuvent être vues comme différentes sources d'information qui peuvent être :

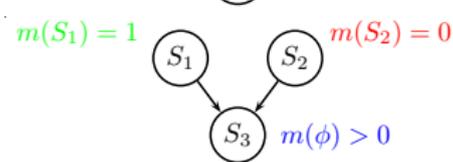
- Conflictuelles :



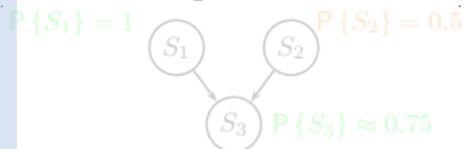
≠



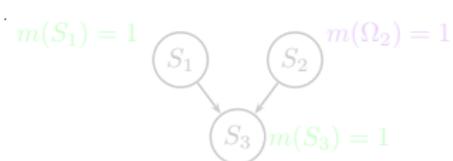
≠



- Incomplètes :



vs.

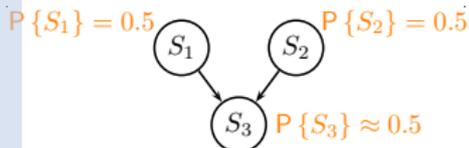


# Avantage de l'utilisation des masses de croyance

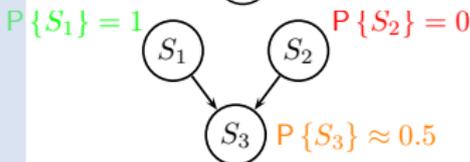
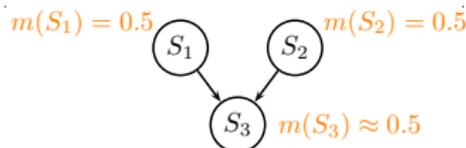
tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

Les nœuds du RB peuvent être vues comme différentes sources d'information qui peuvent être :

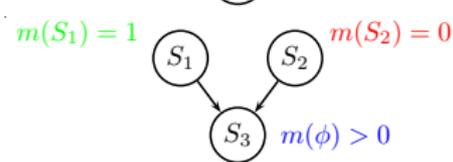
- Conflictuelles :



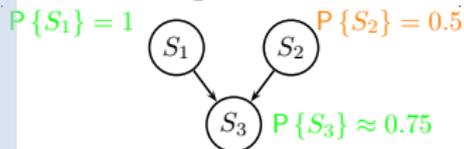
≠



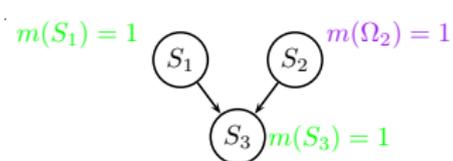
≠



- Incomplètes :



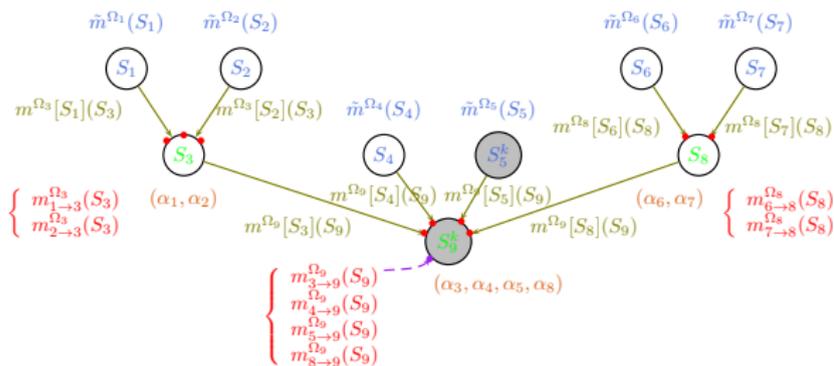
vs.



# Mécanisme d'inférence sur un réseau simple

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

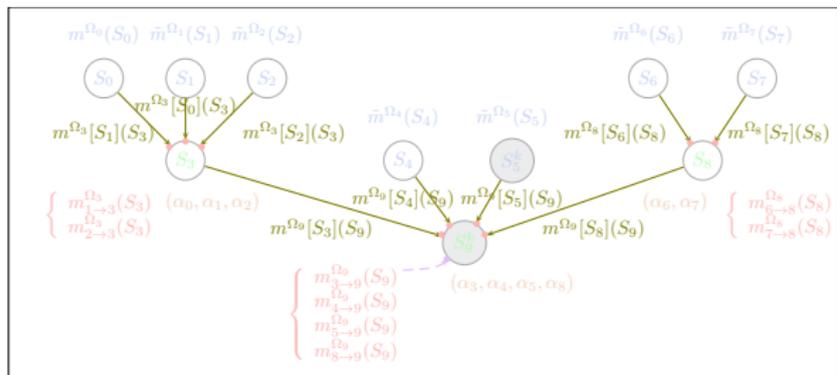
- 1 Masses de croyances conditionnelles
- 2 Coefficient d'affaiblissement
- 3 Transformation des données en probabilités
- 4 Affaiblissement
- 5 Combinaison des masses affaiblies
- 6 Évolution temporelle



# Mécanisme d'inférence sur un réseau simple

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

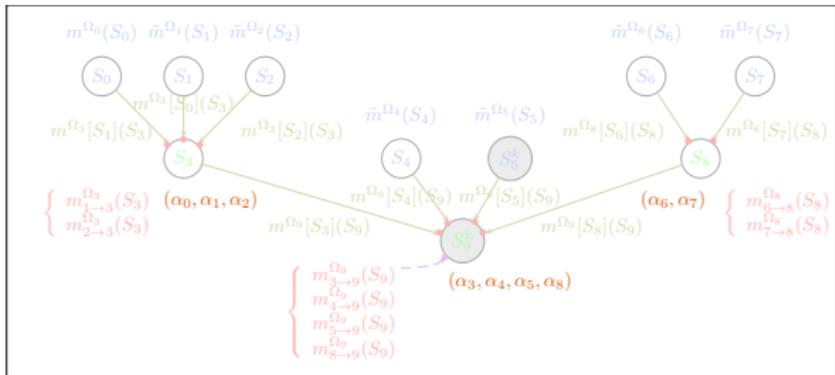
- 1 Masses de croyances conditionnelles
- 2 Coefficient d'affaiblissement
- 3 Transformation des données en probabilités
- 4 Affaiblissement
- 5 Combinaison des masses affaiblies
- 6 Évolution temporelle



# Mécanisme d'inférence sur un réseau simple

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

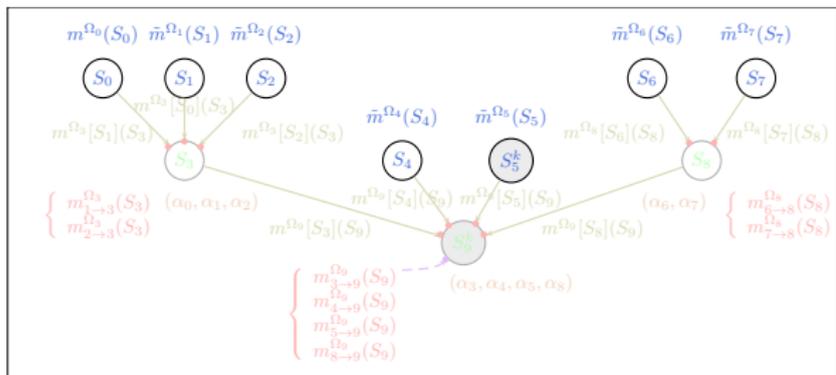
- 1 Masses de croyances conditionnelles
- 2 Coefficient d'affaiblissement
- 3 Transformation des données en probabilités
- 4 Affaiblissement
- 5 Combinaison des masses affaiblies
- 6 Évolution temporelle



# Mécanisme d'inférence sur un réseau simple

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

- 1 Masses de croyances conditionnelles
- 2 Coefficient d'affaiblissement
- 3 Transformation des données en probabilités
- 4 Affaiblissement
- 5 Combinaison des masses affaiblies
- 6 Évolution temporelle

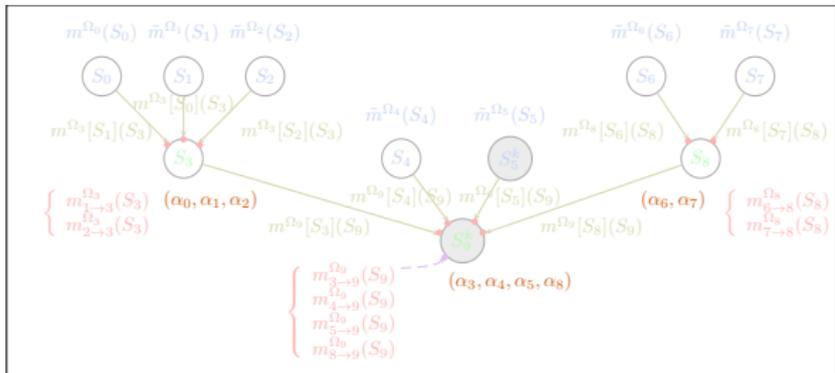


$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{m}^{\Omega_i}(\phi) = 0 \\ \tilde{m}^{\Omega_i}(S_i) = \begin{cases} P\{S_i\} & \text{si } P\{S_i\} \geq 0.5 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \\ \tilde{m}^{\Omega_i}(\bar{S}_i) = \begin{cases} P\{\bar{S}_i\} & \text{si } P\{\bar{S}_i\} > 0.5 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \\ \tilde{m}^{\Omega_i}(\Omega_i) = \begin{cases} 1 - P\{S_i\} & \text{si } P\{S_i\} \geq 0.5 \\ 1 - P\{\bar{S}_i\} & \text{sinon} \end{cases} \end{array} \right.$$

# Mécanisme d'inférence sur un réseau simple

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

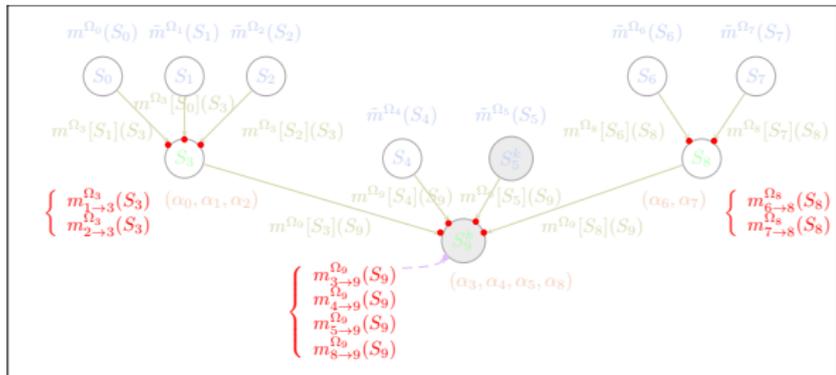
- 1 Masses de croyances conditionnelles
- 2 Coefficient d'affaiblissement
- 3 Transformation des données en probabilités
- 4 **Affaiblissement**
- 5 Combinaison des masses affaiblies
- 6 Évolution temporelle



# Mécanisme d'inférence sur un réseau simple

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

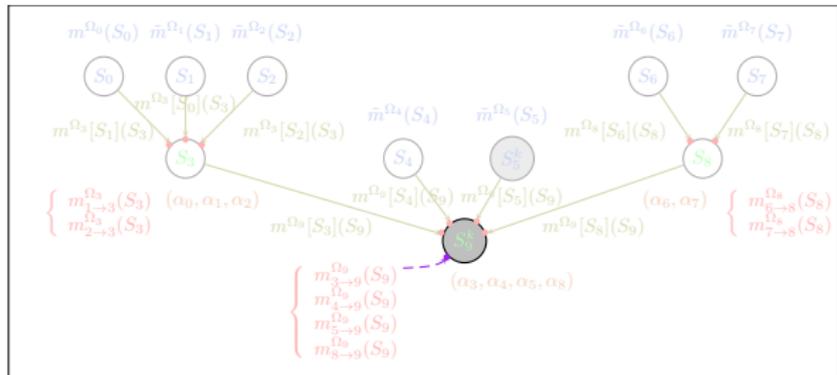
- 1 Masses de croyances conditionnelles
- 2 Coefficient d'affaiblissement
- 3 Transformation des données en probabilités
- 4 Affaiblissement
- 5 Combinaison des masses affaiblies
- 6 Évolution temporelle



# Mécanisme d'inférence sur un réseau simple

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

- 1 Masses de croyances conditionnelles
- 2 Coefficient d'affaiblissement
- 3 Transformation des données en probabilités
- 4 Affaiblissement
- 5 Combinaison des masses affaiblies
- 6 **Évolution temporelle**



# Filtre temporel crédibiliste

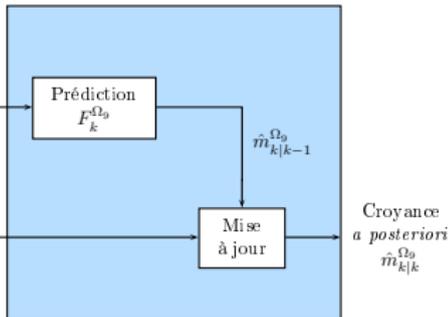
tel-00536071 version 1 - 15 Nov 2010

## Prédiction

$$\hat{m}_{k|k-1}^{\Omega_9} = F_k^{\Omega_9} \cdot \hat{m}_{k-1|k-1}^{\Omega_9}$$

avec

$$F_k^{\Omega_9} = \begin{matrix} F_k^{\Omega_9}(\phi) & F_k^{\Omega_9}(S_9) & F_k^{\Omega_9}(\bar{S}_9) & F_k^{\Omega_9}(\Omega_9) \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_{\mathcal{T}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{\mathcal{F}} & 0 \\ 0 & 1 - \alpha_{\mathcal{T}} & 1 - \alpha_{\mathcal{F}} & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

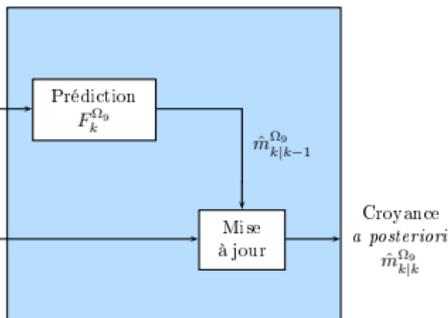


# Filtre temporel crédibiliste

tel-00536071 version 1 - 15 Nov 2010

## Prédiction

$$\hat{m}_{k|k-1}^{\Omega_9} = F_k^{\Omega_9} \cdot \hat{m}_{k-1|k-1}^{\Omega_9}$$



avec

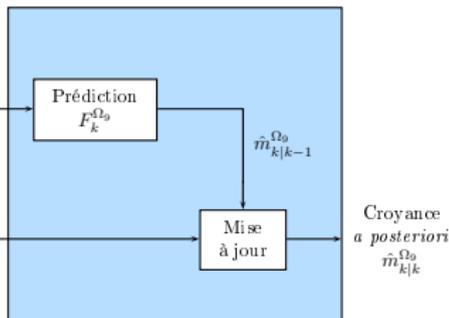
$$F_k^{\Omega_9} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0.5 & 1 \end{bmatrix}$$

# Filtre temporel crédibiliste

tel-00536071 version 1 - 15 Nov 2010

## Prédiction

$$\hat{m}_{k|k-1}^{\Omega_9} = F_k^{\Omega_9} \cdot \hat{m}_{k-1|k-1}^{\Omega_9}$$



avec

$$F_k^{\Omega_9} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0.5 & 1 \end{bmatrix}$$

## Mise à jour avec la CRC

$$\hat{m}_{k|k}^{\Omega_9} = \tilde{m}_k^{\Omega_9} \odot \hat{m}_{k|k-1}^{\Omega_9}$$

# Sommaire

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

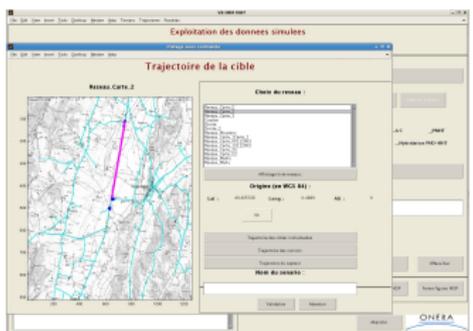
- 1 Pistage multicible adapté au pistage de cibles proches
- 2 Fusion de données pour la détection d'objets d'intérêts
- 3 Simulations et résultats**
  - Mesures de performances
  - Scénario 1 : convoi de 6 cibles doublé
  - Scénario 2 : ralentissement et convoi

# Résultats

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

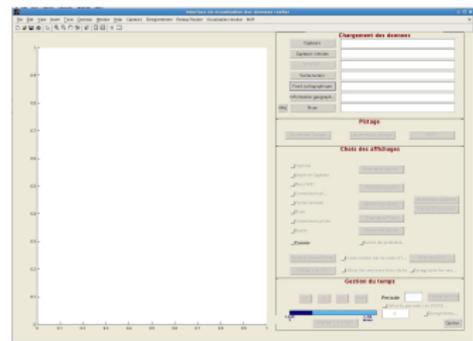
## Données simulées

### Simulateur matlab



## Données réelles

### Développement d'un outil de lecture des données réelles



# Mesures de performances

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

## Mesures globales

- Complétude
- Cardinalité
- Ratio de fausses pistes
- Ratio de pistes redondantes

## Mesures locales pour une cible

- RMSE en position
- RMSE en vitesse
- Continuité du pistage
- Changement de piste

# Mesures de performances

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

## Mesures globales

- Complétude
- Cardinalité
- Ratio de fausses pistes
- Ratio de pistes redondantes

## Mesures locales pour une cible

- RMSE en position
- RMSE en vitesse
- Continuité du pistage
- Changement de piste

## Nouvelles métriques (globalo-locales)

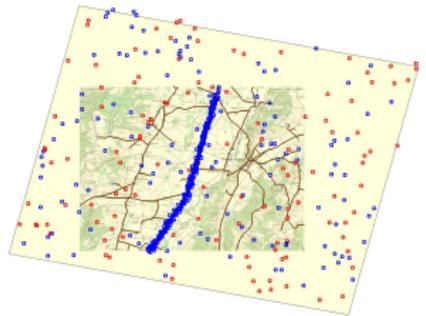
Distance OSPA de paramètres  $(c, p)$  entre  $\mathbf{x}$  et  $\mathbf{y}$  de taille  $m$  et  $n$

$$\bar{d}_p^{(c)}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \begin{cases} \left( \frac{1}{n} \left( \min_{\pi \in \Pi_n} \sum_{i=1}^m d^{(c)}(x_i, y_{\pi(i)})^p + c^p(n-m) \right) \right)^{\frac{1}{p}} & \text{si } m \leq n \\ \bar{d}_p^{(c)}(\mathbf{y}, \mathbf{x}) & \text{si } m > n \end{cases}$$

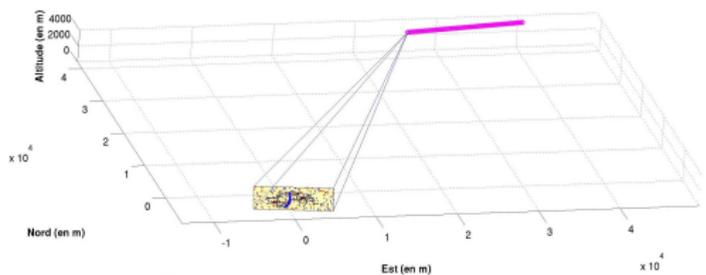
où  $d^{(c)}(x, y) = \min(c, |x - y|)$

# Description du scénario 1 : convoi de 6 cibles doublé

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



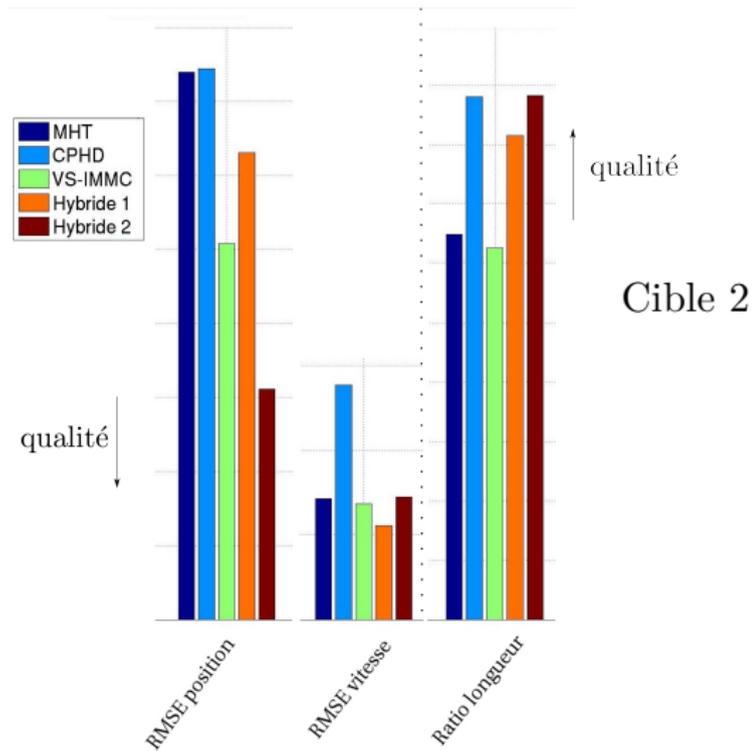
Cumul des plots GMTI



Trajectoire du porteur

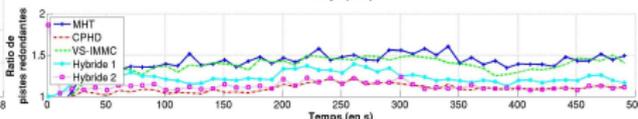
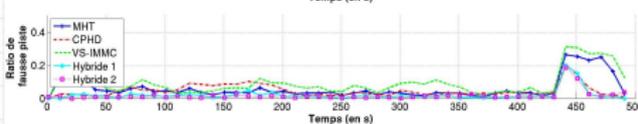
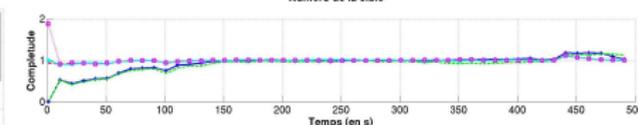
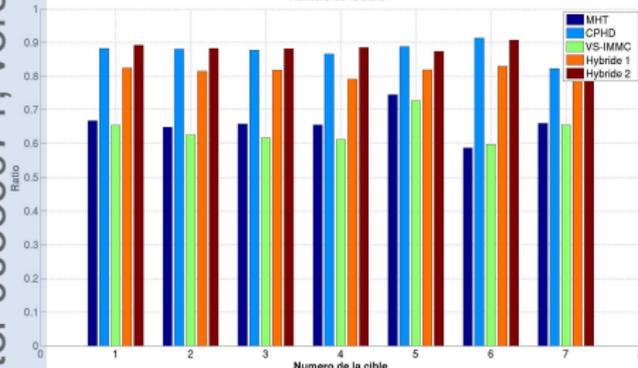
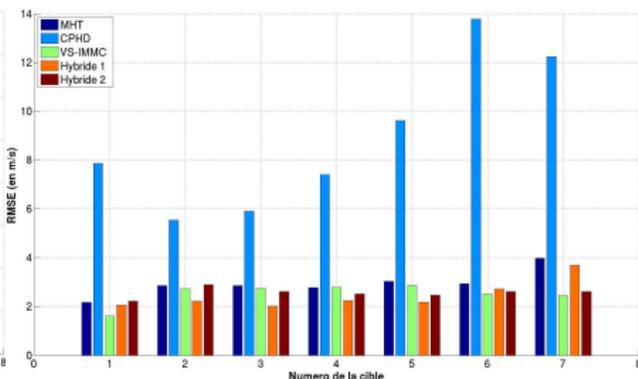
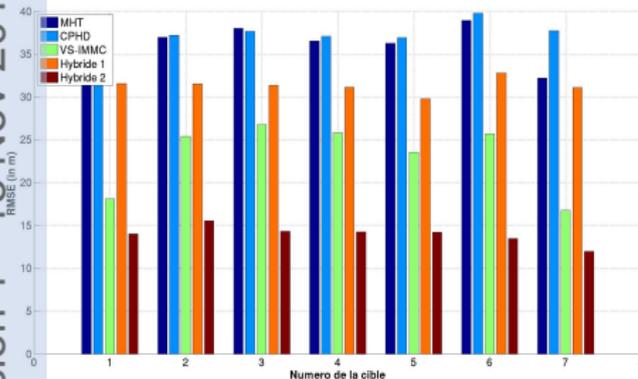
# Scénario 1 : performances globales

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



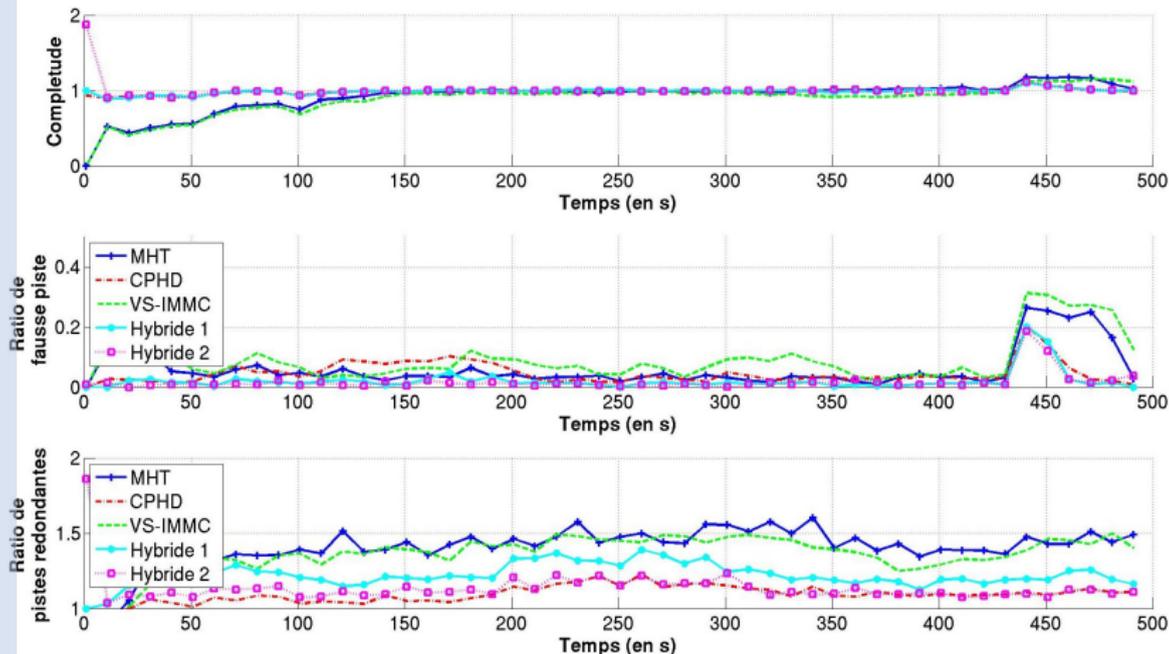
# Scénario 1 : performances globales

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



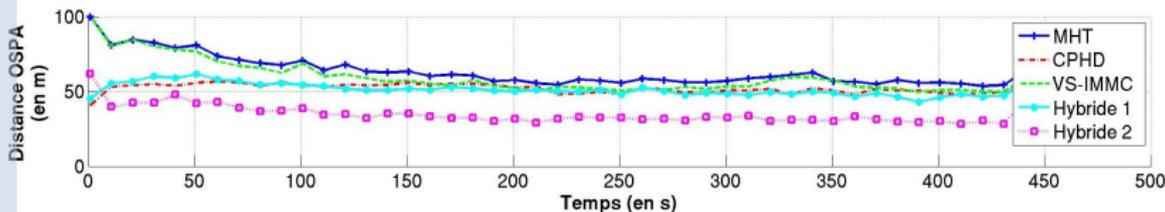
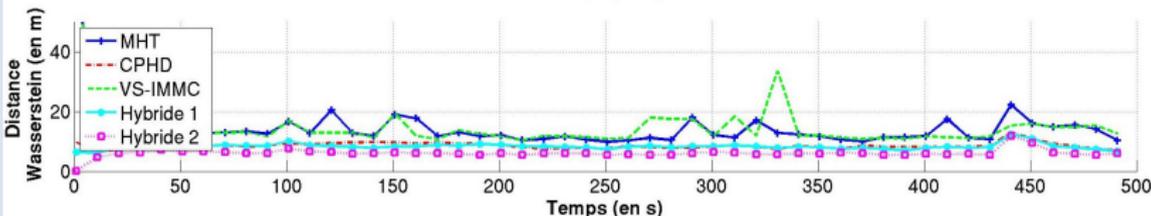
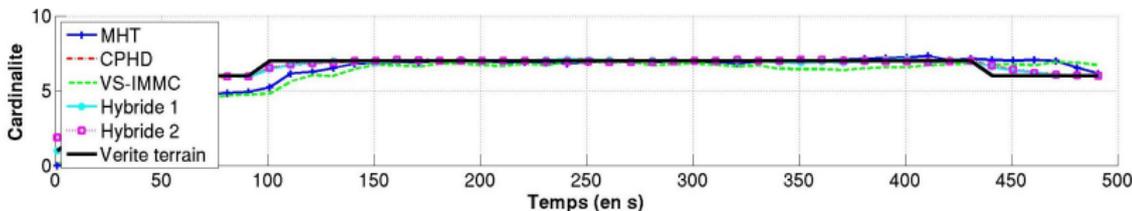
# Scénario 1 : performances globales

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



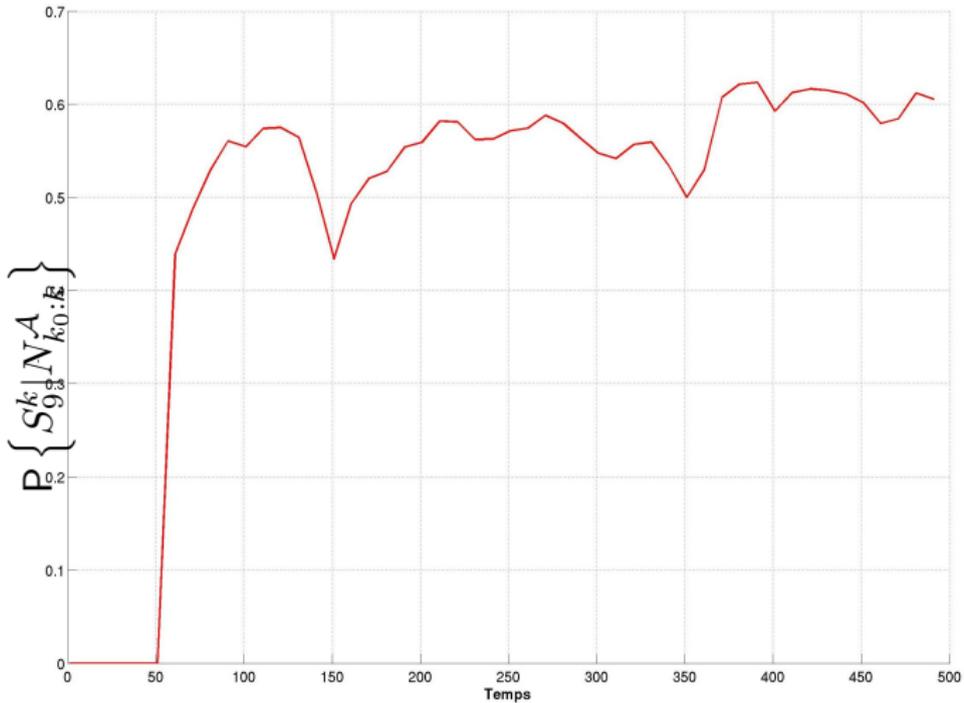
# Scénario 1 : distance de Wasserstein et OSPA

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



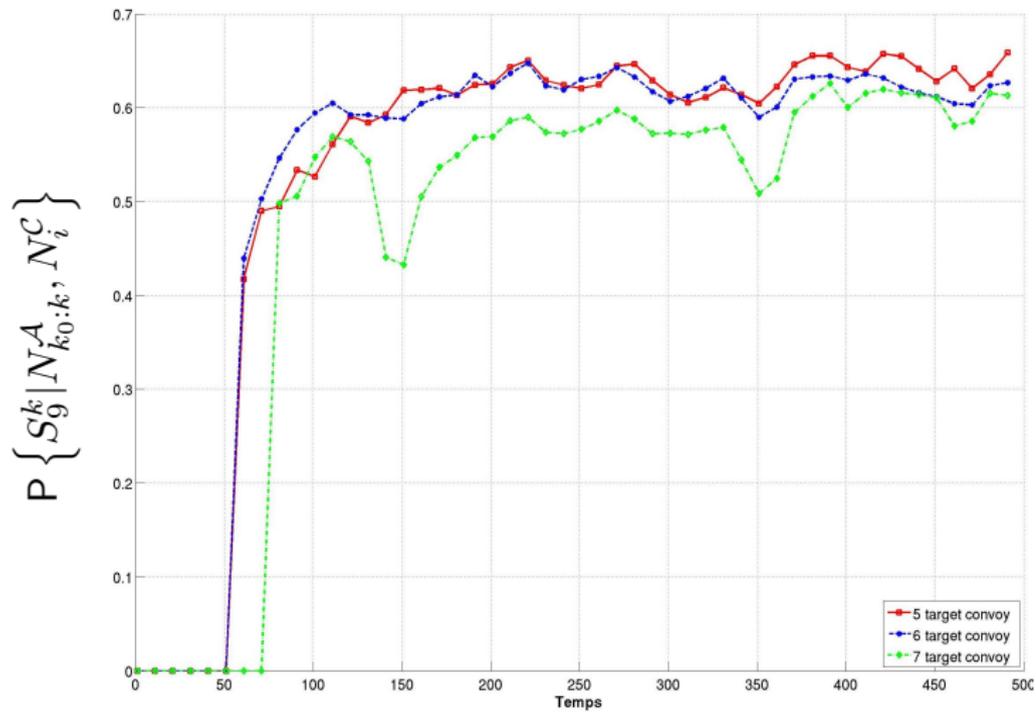
# Scénario 1 : détection de convoi

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



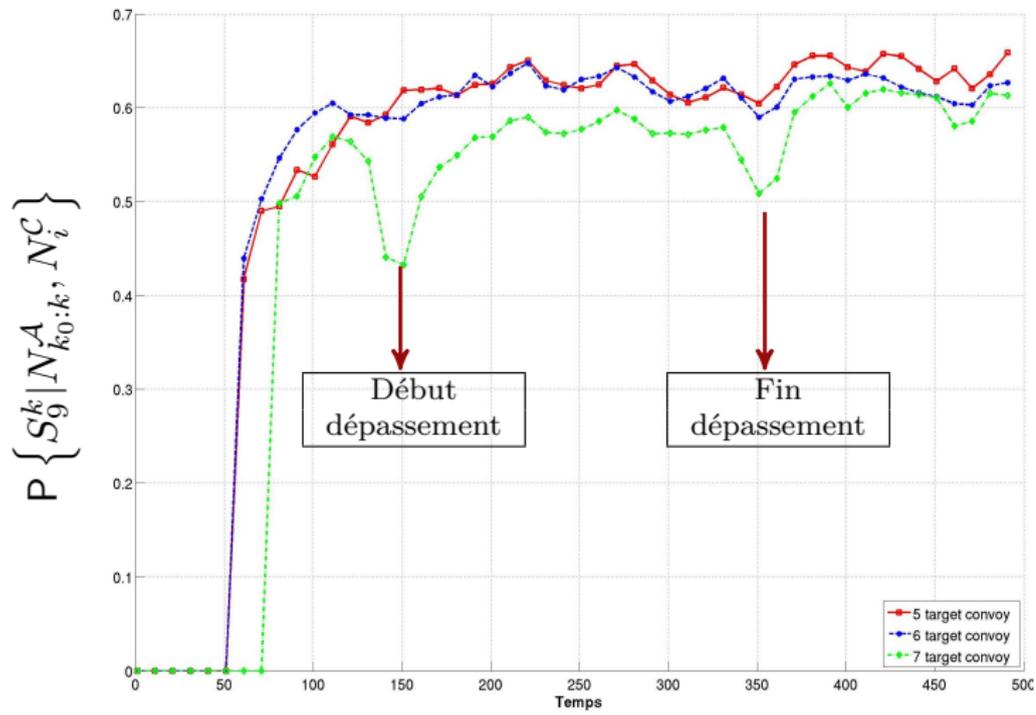
# Scénario 1 : détection de convoi connaissant le nombre

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



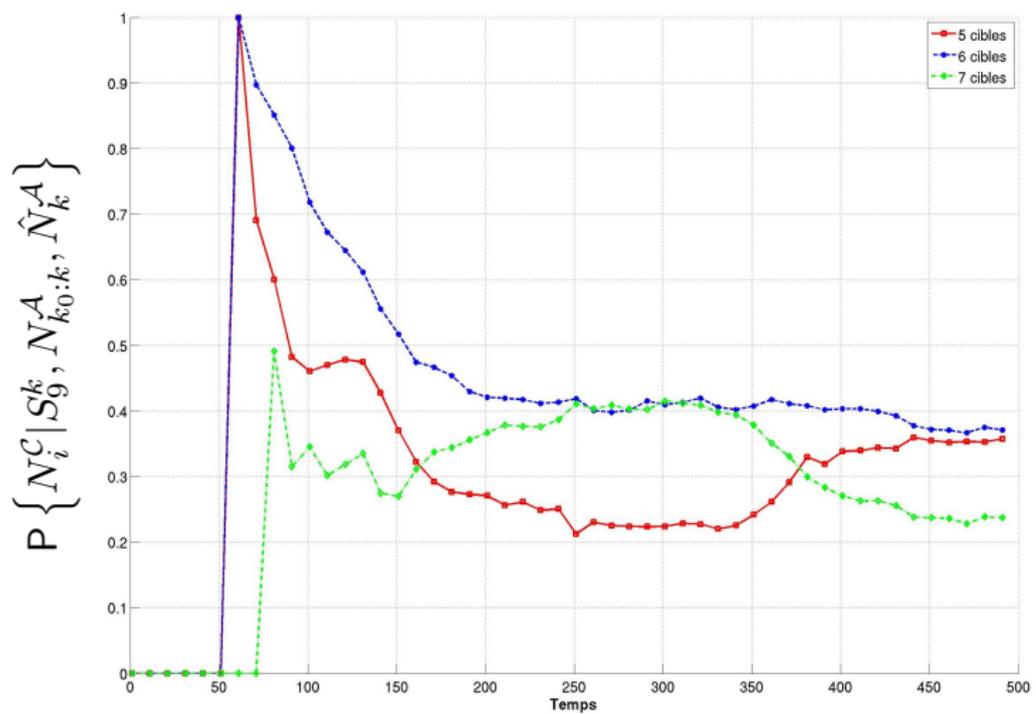
# Scénario 1 : détection de convoi connaissant le nombre

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



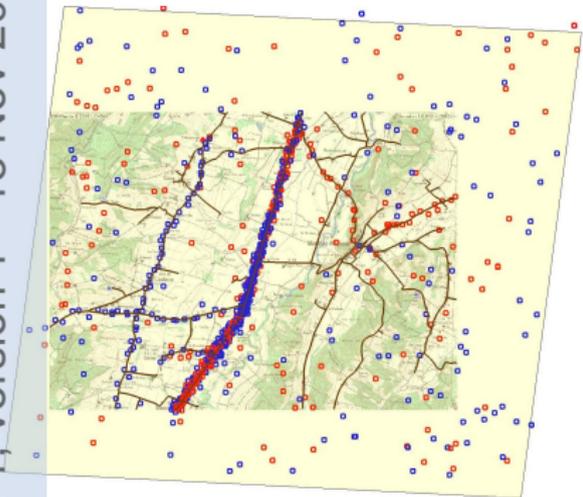
# Scénario 1 : estimation du nombre de cibles

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

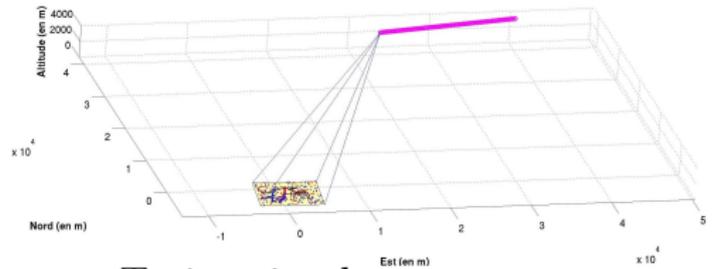


# Description du scénario 2 : ralentissement et convoi

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



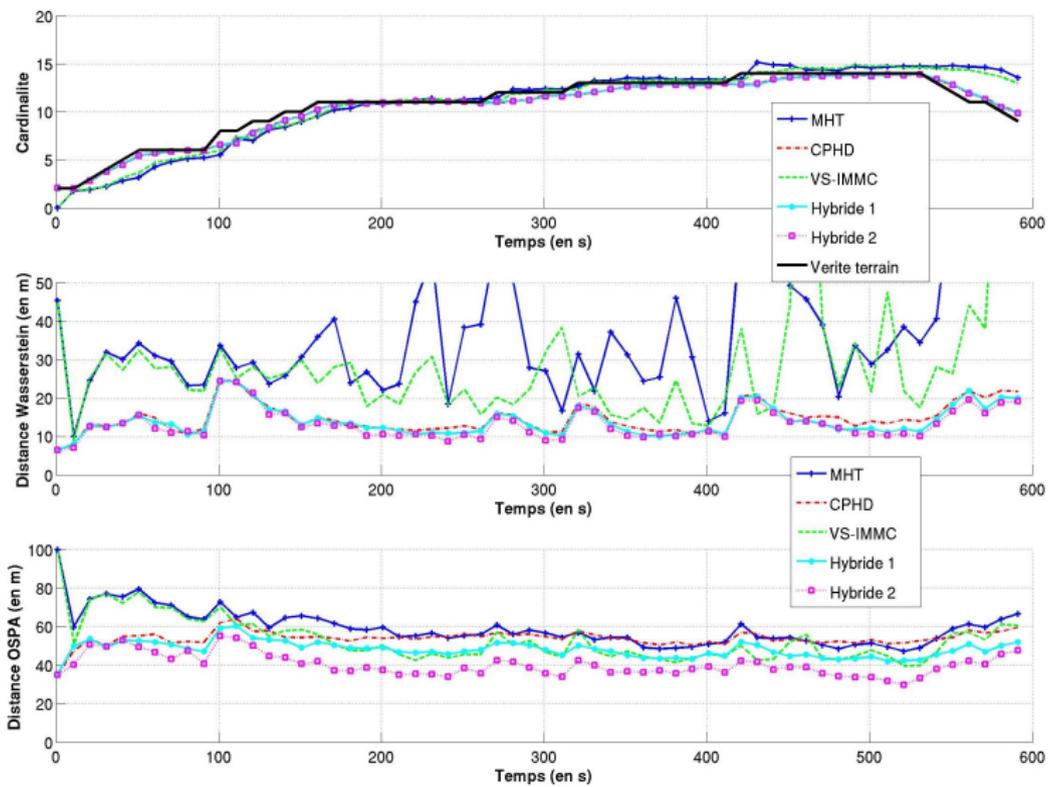
Cumul des plots GMTI



Trajectoire du porteur

# Scénario 2 : distance de Wasserstein et OSPA

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010



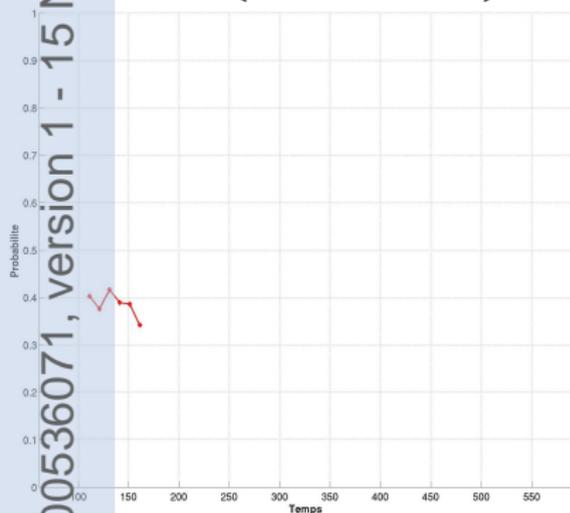
## Scénario 2 : Détection d'agrégat

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

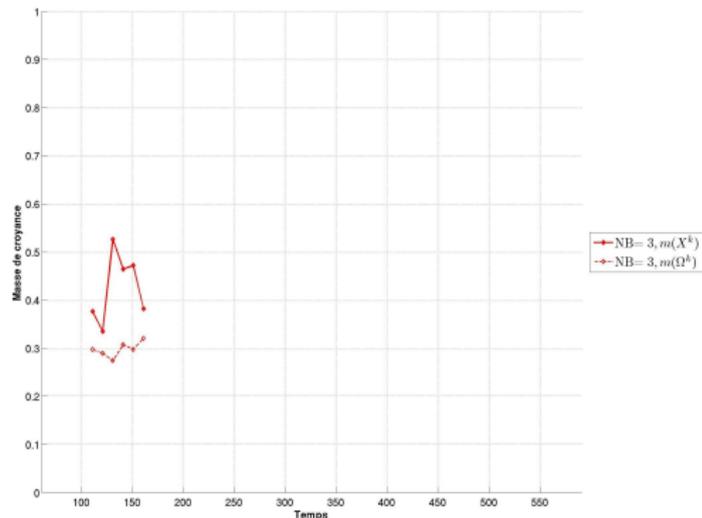
# Scénario 2 : Agrégat 2

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

$$P \left\{ S_9^k \mid N_{k_0:k}^A, N_i^C \right\}$$



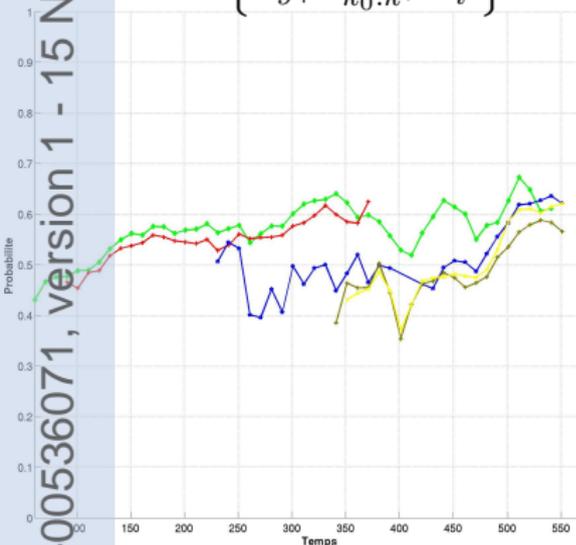
$$\hat{m}_k^{\Omega_9} [N_{k_0:k}^A, N_i^C]$$



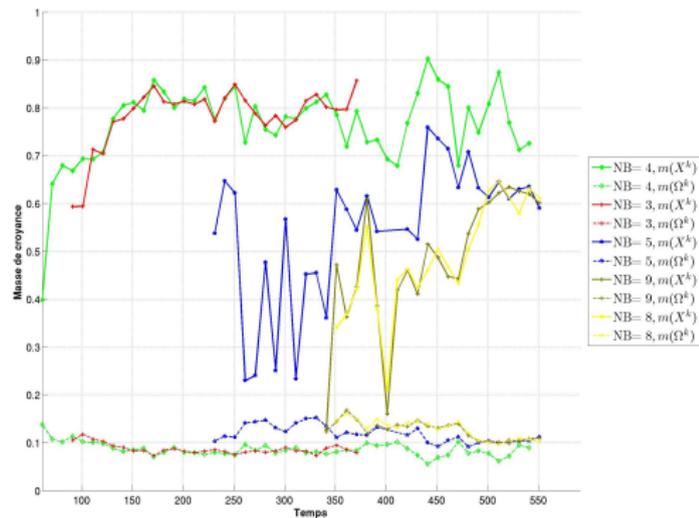
# Scénario 2 : Agrégat 1 (vrai convoi)

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

$$P \left\{ S_9^k \mid N_{k_0:k}^A, N_i^C \right\}$$



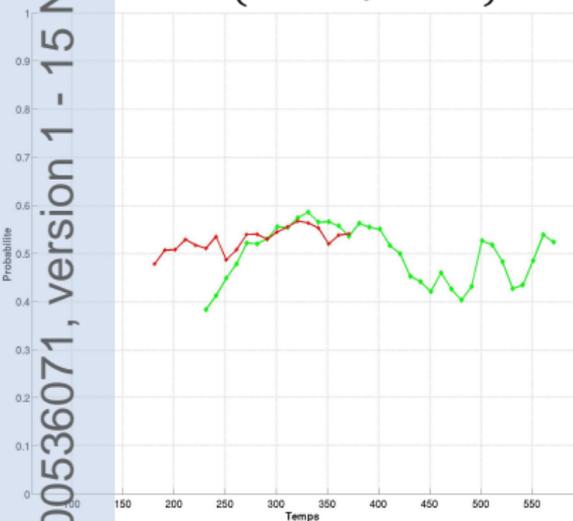
$$\hat{m}_k^{\Omega_9} [N_{k_0:k}^A, N_i^C]$$



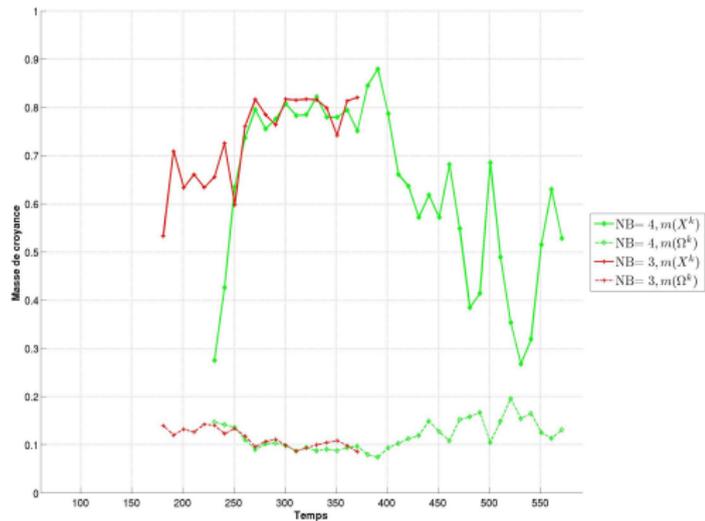
# Scénario 2 : Agrégat 3 (ralentissement)

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

$$P \left\{ S_9^k \mid N_{k_0:k}^A, N_i^C \right\}$$



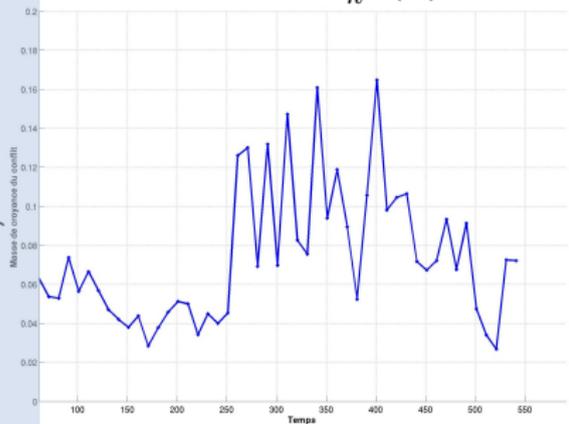
$$\hat{m}_k^{\Omega_9} [N_{k_0:k}^A, N_i^C]$$



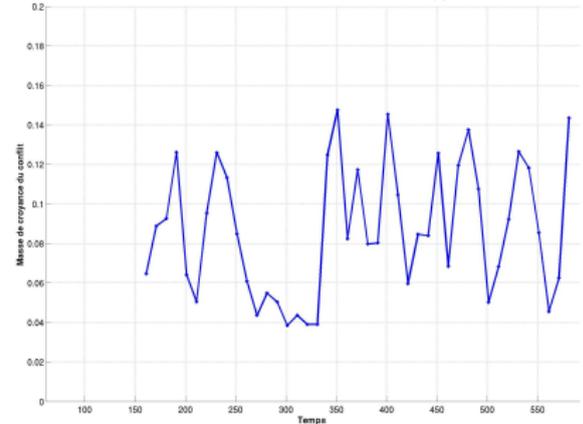
# Scénario 2 : Apport du conflit

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

Convoi :  $\hat{m}_k^{\Omega_9}(\phi)$



Ralentissement :  $\hat{m}_k^{\Omega_9}(\phi)$



## Contributions théoriques

### Pistage

- Nouvel algorithme hybride
- Labellisation du GM-CPHD

### Modèles graphiques

- Formalisation du mécanisme d'inférence pour les RC
- Utilisation d'un filtre temporel crédibiliste pour les RCD
- Comparaison RC - RB

## Contributions pratiques

- Création du modèle convoi
- Mise en œuvre du processus de détection de convoi
- Évaluation des performances sur scénarios complexes
- Mise en œuvre de paramètres d'évaluation évolués

## Perspectives à court terme

### Pistage multicible

- Amélioration du filtre GM-CPHD
  - Application d'un filtre de Kalman *a posteriori*
  - Ajout des contraintes routières à la manière du VS-IMMC-MHT
- Utilisation de la vitesse radiale
- Adaptation au cas multicapteur

### Détection de convois

- Intégration d'autres types de données
- Amélioration du processus de transformation des données en probabilités

## Perspectives à long terme

- Généralisation de la méthode de détection à n'importe quel type d'objet d'intérêt
- Intégration de l'avis des experts

## Perspectives théoriques

- Adapter le mécanisme d'inférence JLO aux réseaux crédibilistes
- Développement théorique du GM-CPHD dans le cas où  $P_d$  et  $P_s$  sont non-constantes,
- Application à d'autres domaines d'applications
  - Traitement du signal biomédical avec le filtre PHD
  - ...

Merci pour votre attention

## Principe du MHT (Multiple Hypothesis Tracker) [Reid79]

- Construction d'un arbre d'hypothèses en considérant toutes les hypothèses pour les mesures d'être issues :
  - soit d'une fausse alarme,
  - soit d'une cible existante,
  - soit d'une nouvelle cible.
- Estimation de l'état des cibles par l'utilisation du filtre de Kalman.
- Calculer la vraisemblance des hypothèses d'association et le score des pistes.
- Utilisation d'heuristiques pour limiter la combinatoire.

## Modélisation de l'ensemble des cibles

$$X_k = \left[ \bigcup_{\zeta \in X_{k-1}} S_{k|k-1}(\zeta) \right] \cup \left[ \bigcup_{\zeta \in X_{k-1}} B_{k|k-1}(\zeta) \right] \cup \sigma_k$$

- $S_{k|k-1}(\zeta)$  : cibles survivantes
- $B_{k|k-1}(\zeta)$  : cibles non-résolues
- $\sigma_k$  : cibles naissantes

## Modélisation de l'ensemble des cibles

$$X_k = \left[ \bigcup_{\zeta \in X_{k-1}} S_{k|k-1}(\zeta) \right] \cup \left[ \bigcup_{\zeta \in X_{k-1}} B_{k|k-1}(\zeta) \right] \cup \sigma_k$$

- $S_{k|k-1}(\zeta)$  : cibles survivantes
- $B_{k|k-1}(\zeta)$  : cibles non-résolues
- $\sigma_k$  : cibles naissantes

## Modélisation de l'ensemble des mesures

$$Z_k = \left[ \bigcup_{x \in X_k} \Theta_k(x) \right] \cup \kappa_k$$

- $\Theta_k$  : mesures issues de cibles réelles
- $\kappa_k$  : fausses alarmes

# Propagation de la fonction d'intensité $v_k$

## Prédiction

$$v_{k|k-1}(x) = \left( \int P_s(\zeta) \cdot f_{k|k-1}(x|\zeta) \cdot v_{k-1}(\zeta) d\zeta \right) + \gamma_k(x)$$

- $P_s(\zeta)$  : probabilité de survie d'une cible ayant l'état précédent  $\zeta$
- $f_{k|k-1}(\cdot|\zeta)$  : fonction de transition d'une cible connaissant son état précédent  $\zeta$
- $\gamma_k(x)$  : fonction d'intensité de naissance des nouvelles cibles

## Mise à jour

$$v_{k|k}(x) = (1 - P_d)v_{k|k-1}(x) + \sum_{z \in Z_k} \frac{P_d \cdot g(z|x)v_{k|k-1}(x)}{\kappa_k(z) + \int P_d \cdot g(z|\zeta)v_{k|k-1}(\zeta)d\zeta}$$

- $g(z|x)$  : vraisemblance d'une mesure  $z$  connaissant l'état d'une cible  $x$
- $\kappa_k(z)$  : fonction d'intensité du bruit (loi de Poisson)

# Propagation de la fonction d'intensité $v_k$

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

## Prédiction

$$v_{k|k-1}(x) = \left( \int P_s(\zeta) \cdot f_{k|k-1}(x|\zeta) \cdot v_{k-1}(\zeta) d\zeta \right) + \gamma_k(x)$$

- $P_s(\zeta)$  : probabilité de survie d'une cible ayant l'état précédent  $\zeta$
- $f_{k|k-1}(\cdot|\zeta)$  : fonction de transition d'une cible connaissant son état précédent  $\zeta$
- $\gamma_k(x)$  : fonction d'intensité de naissance des nouvelles cibles

## Mise à jour

$$v_{k|k}(x) = (1 - P_d)v_{k|k-1}(x) + \sum_{z \in Z_k} \frac{P_d \cdot g(z|x)v_{k|k-1}(x)}{\kappa_k(z) + \int P_d \cdot g(z|\zeta)v_{k|k-1}(\zeta) d\zeta}$$

- $g(z|x)$  : vraisemblance d'une mesure  $z$  connaissant l'état d'une cible  $x$
- $\kappa_k(z)$  : fonction d'intensité du bruit (loi de Poisson)

# Version cardinalisée du filtre PHD (CPHD)

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

## Principe

- Considérer le nombre de cibles comme une variable aléatoire.
- Propager conjointement à la fonction d'intensité la distribution de probabilités du nombre de cibles :

## Principe

- Considérer le nombre de cibles comme une variable aléatoire.
- Propager conjointement à la fonction d'intensité la distribution de probabilités du nombre de cibles :
  - Prédiction

$$p_{k|k-1}(n) = \sum_{j=0}^n P_{\Gamma}(n-j) \sum_{l=j}^{\infty} C_j^l \frac{\langle P_s, v_{k-1} \rangle^j \langle 1 - P_s, v_{k-1} \rangle^{l-j}}{\langle 1, v_{k-1} \rangle^l} p_{k-1}(l)$$

## Principe

- Considérer le nombre de cibles comme une variable aléatoire.
- Propager conjointement à la fonction d'intensité la distribution de probabilités du nombre de cibles :

- Prédiction

$$p_{k|k-1}(n) = \sum_{j=0}^n P_{\Gamma}(n-j) \sum_{l=j}^{\infty} C_j^l \frac{\langle P_s, v_{k-1} \rangle^j \langle 1 - P_s, v_{k-1} \rangle^{l-j}}{\langle 1, v_{k-1} \rangle^l} p_{k-1}(l)$$

- Mise à jour

$$p_{k|k}(n) = \frac{\mathcal{L}(Z_k | n)}{\mathcal{L}(Z_k)} p_{k|k-1}(n)$$

## Principe

- Considérer le nombre de cibles comme une variable aléatoire.
- Propager conjointement à la fonction d'intensité la distribution de probabilités du nombre de cibles :
  - Prédiction

$$p_{k|k-1}(n) = \sum_{j=0}^n P_{\Gamma}(n-j) \sum_{l=j}^{\infty} C_j^l \frac{\langle P_s, v_{k-1} \rangle^j \langle 1 - P_s, v_{k-1} \rangle^{l-j}}{\langle 1, v_{k-1} \rangle^l} p_{k-1}(l)$$

- Mise à jour

$$p_{k|k}(n) = \frac{\mathcal{L}(Z_k|n)}{\mathcal{L}(Z_k)} p_{k|k-1}(n)$$

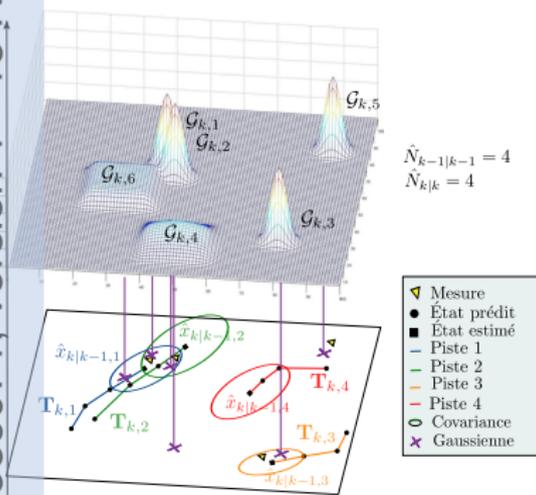
- Estimateur

$$\hat{N}_k = \arg \max_{n \in \{1, \dots, N_{max}\}} p_k(n)$$

# Exemple sur un cas simple

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

## 1. Fenêtrage statistique autour des positions prédites des pistes



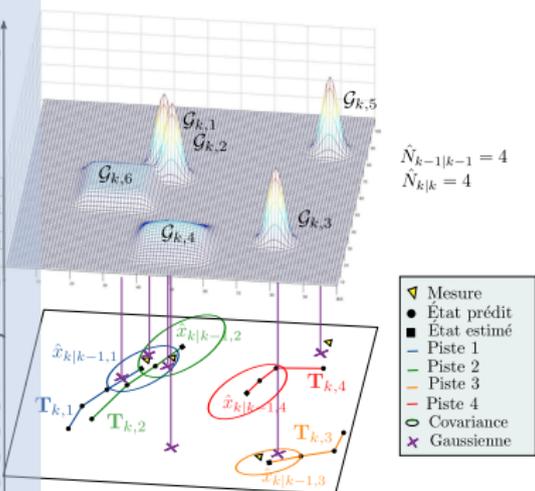
Matrice d'association globale  $\tilde{A}_k$

$$\tilde{A}_k = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\text{gaussiennes}} \left. \vphantom{\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}} \right\} \text{ pistes}$$

# Exemple sur un cas simple

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

## 2. Suppression des pistes finies et initialisation de nouvelles pistes



Toutes les gaussiennes sont alors des pistes naissantes potentielles

$$\tilde{A}_k = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \color{red}{1} & \color{red}{1} & \color{red}{1} & \color{red}{1} & \color{red}{1} & \color{red}{1} \end{bmatrix}}_{\text{gaussiennes}} \left. \vphantom{\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \color{red}{1} & \color{red}{1} & \color{red}{1} & \color{red}{1} & \color{red}{1} & \color{red}{1} \end{bmatrix}} \right\} \text{ pistes}$$

# Exemple sur un cas simple

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

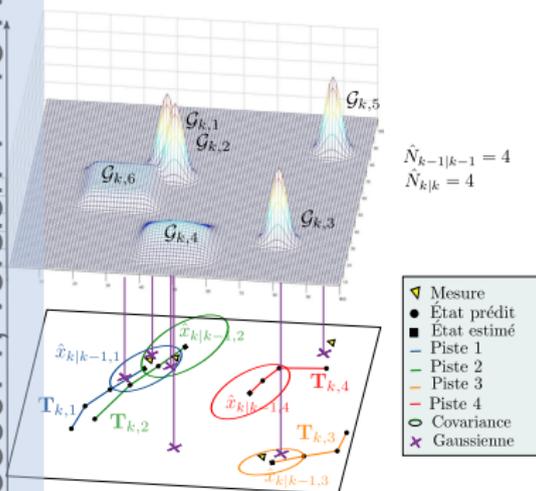
3. Calcul des combinaisons d'associations possibles  $\left\{ A_{k,a}^{\mathcal{G}} \right\}_{a=1}^9$

Une piste est associée à au plus  
une gaussienne :

$$A_{k,1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

⋮

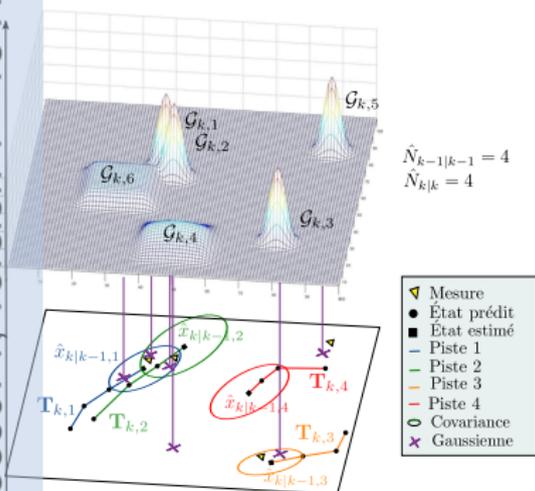
$$A_{k,9} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$



# Exemple sur un cas simple

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

## 4. Calcul du poids global des associations $\left\{ W_{k,a}^{\mathcal{G}} \right\}_{a=1}^9$



Connaissant la matrice de poids :

$$W_k = \begin{bmatrix} 0.92 & 0.89 & 0.95 & 0.12 & 0.96 & 0.02 \\ 0.92 & 0.89 & 0.95 & 0.12 & 0.96 & 0.02 \\ 0.92 & 0.89 & 0.95 & 0.12 & 0.96 & 0.02 \\ 0.92 & 0.89 & 0.95 & 0.12 & 0.96 & 0.02 \end{bmatrix}$$

et sachant que :

$$W_{k,a}^{\mathcal{G}} = \sum_{m=1}^{\hat{N}_k} \sum_{n=1}^{N_k^{\mathcal{G}}} A_{k,a}(m,n) \cdot W_k(m,n)$$

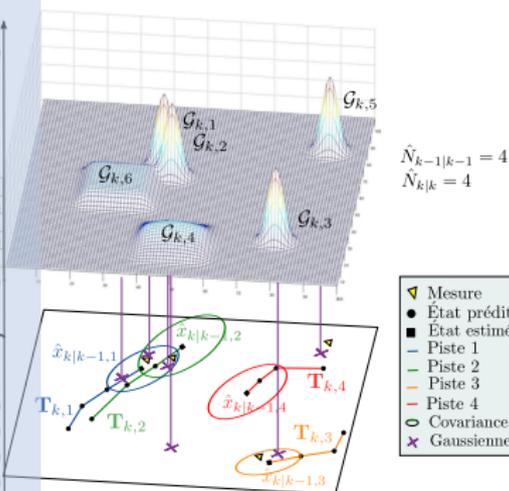
$$W_{k,1}^{\mathcal{G}} = 2.88, \quad W_{k,2}^{\mathcal{G}} = 3.72, \quad W_{k,3}^{\mathcal{G}} = 2.78, \quad W_{k,4}^{\mathcal{G}} = 2.88, \quad W_{k,5}^{\mathcal{G}} = 3.72,$$

$$W_{k,6}^{\mathcal{G}} = 2.78, \quad W_{k,7}^{\mathcal{G}} = 1.98, \quad W_{k,8}^{\mathcal{G}} = 1.98, \quad W_{k,9}^{\mathcal{G}} = 2.78$$

# Exemple sur un cas simple

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

## 4. Calcul du poids global des associations $\left\{ W_{k,a}^{\mathcal{G}} \right\}_{a=1}^9$



$$W_{k,\cdot} * A_{k,2} = \begin{bmatrix} 0.92 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.89 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.95 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.96 & 0 \end{bmatrix}$$

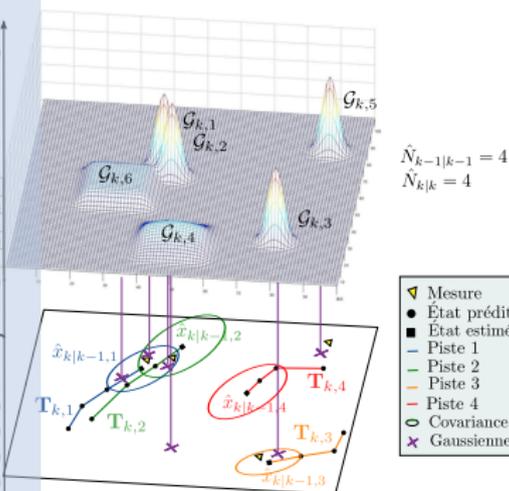
$$W_{k,\cdot} * A_{k,5} = \begin{bmatrix} 0 & 0.89 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.92 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.95 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.96 & 0 \end{bmatrix}$$

$$W_{k,1}^{\mathcal{G}} = 2.88, \quad W_{k,2}^{\mathcal{G}} = 3.72, \quad W_{k,3}^{\mathcal{G}} = 2.78, \quad W_{k,4}^{\mathcal{G}} = 2.88, \quad W_{k,5}^{\mathcal{G}} = 3.72, \\ W_{k,6}^{\mathcal{G}} = 2.78, \quad W_{k,7}^{\mathcal{G}} = 1.98, \quad W_{k,8}^{\mathcal{G}} = 1.98, \quad W_{k,9}^{\mathcal{G}} = 2.78$$

# Exemple sur un cas simple

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

5. Calcul du coût global des associations  $\left\{ C_{k,a}^{\mathcal{G}} \right\}_{a=1}^9$



Soit  $c(m, n)$  le coût d'association de la piste prédite  $m$  et la gaussienne  $n$

$$c(m, n) = f \left( d \left( \hat{x}_{k|k-1, m}, \mathcal{G}_{k, n} \right) \right)$$

$$C_k = \begin{bmatrix} c(1, 1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c(2, 2) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c(3, 3) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c(4, 5) & 0 \end{bmatrix}$$

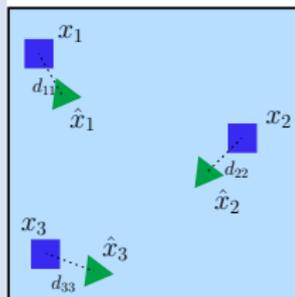
# Distance de Wasserstein entre $\mathbf{x}$ et $\mathbf{y}$

$$d_p^W(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \arg \min_{\mathcal{U}} \left( \sum_{i=1}^{|\mathbf{x}|} \sum_{j=1}^{|\mathbf{y}|} U_{i,j} \|x_i - y_j\| \right)$$

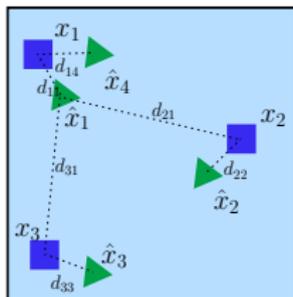
avec  $U$  la matrice de transfert de l'ensemble  $\mathbf{x}$  à l'ensemble  $\mathbf{y}$ , de taille  $|\mathbf{x}| \times |\mathbf{y}|$ , telle que

$$U = \begin{bmatrix} \frac{1}{|\mathbf{y}|} & 0 & \dots & 0 & \frac{1}{|\mathbf{y}| \times |\mathbf{x}|} & \dots & \frac{1}{|\mathbf{y}| \times |\mathbf{x}|} \\ 0 & \frac{1}{|\mathbf{y}|} & \ddots & \vdots & \frac{1}{|\mathbf{y}| \times |\mathbf{x}|} & \dots & \frac{1}{|\mathbf{y}| \times |\mathbf{x}|} \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 & \dots & \dots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \frac{1}{|\mathbf{y}|} & \frac{1}{|\mathbf{y}| \times |\mathbf{x}|} & \dots & \frac{1}{|\mathbf{y}| \times |\mathbf{x}|} \end{bmatrix}$$

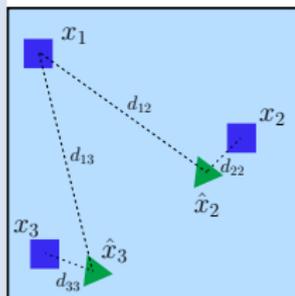
# Calcul de la matrice de transfert



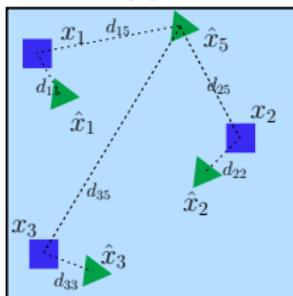
(a)



(b)



(c)



(d)

Cas (a) : 
$$U = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{3} \end{bmatrix}$$

Cas (b) :

$$U = \begin{bmatrix} 1/4 & 0 & 0 & 1/12 \\ 0 & 1/4 & 0 & 1/12 \\ 0 & 0 & 1/4 & 1/12 \end{bmatrix}$$

Cas (c) : 
$$U = \begin{bmatrix} 1/3 & 0 \\ 0 & 1/3 \\ 1/6 & 1/6 \end{bmatrix}$$

Cas (d) : 
$$U = \begin{bmatrix} 1/3 & 0 \\ 0 & 1/3 \\ 1/6 & 1/6 \end{bmatrix}$$





# Distance Optimal SubPattern Assignment (OSPA)

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

$$\bar{d}_p^{(c)}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \begin{cases} \bar{d}_p^{(c)}(\mathbf{y}, \mathbf{x}) & \text{si } m > n \\ \left( \frac{1}{n} \left( \min_{\pi \in \Pi_n} \sum_{i=1}^m d^{(c)}(x_i, y_{\pi(i)})^p + c^p(n-m) \right) \right)^{\frac{1}{p}} & \text{si } m \leq n \end{cases}$$

# Distance Optimal SubPattern Assignment (OSPA)

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

$$\bar{d}_p^{(c)}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \begin{cases} \bar{d}_p^{(c)}(\mathbf{y}, \mathbf{x}) & \text{si } m > n \\ \left( \frac{1}{n} \left( \min_{\pi \in \Pi_n} \sum_{i=1}^m d^{(c)}(x_i, y_{\pi(i)})^p + c^p(n-m) \right) \right)^{\frac{1}{p}} & \text{si } m \leq n \end{cases}$$

- **Terme pénalisant l'erreur d'estimation** ↘

avec  $\Pi$  la matrice d'association des éléments de  $\mathbf{x}$  vers  $\mathbf{y}$  qui minimise la somme des distances entre les éléments associés et

$$d^{(c)}(x_i, y_j) = \min(c, |x_i - y_j|)$$

# Distance Optimal SubPattern Assignment (OSPA)

tel-00536071, version 1 - 15 Nov 2010

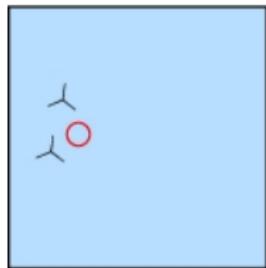
$$\bar{d}_p^{(c)}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \begin{cases} \bar{d}_p^{(c)}(\mathbf{y}, \mathbf{x}) & \text{si } m > n \\ \left( \frac{1}{n} \left( \min_{\pi \in \Pi_n} \sum_{i=1}^m d^{(c)}(x_i, y_{\pi(i)})^p + c^p(n-m) \right) \right)^{\frac{1}{p}} & \text{si } m \leq n \end{cases}$$

- Terme pénalisant l'erreur d'estimation ↗

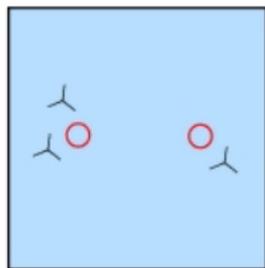
avec  $\Pi$  la matrice d'association des éléments de  $\mathbf{x}$  vers  $\mathbf{y}$  qui minimise la somme des distances entre les éléments associés et

$$d^{(c)}(x_i, y_j) = \min(c, |x_i - y_j|)$$

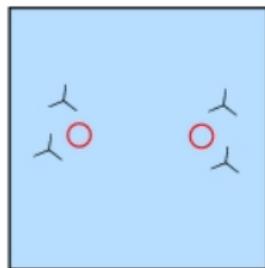
- Terme pénalisant l'erreur de cardinalité ↖



(a)



(b)



(c)



(a)

Cas (a) : un seul objet possède deux états estimés. La distance de Wasserstein ne pénalise pas la redondance, puisque la matrice de transfert est la suivante :

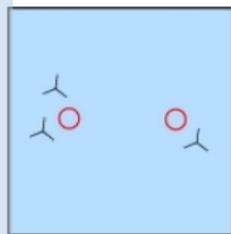
$$U^{(a)} = [1/2 \quad 1/2] \quad (1)$$

Et ainsi, on obtient :

$$d^W(\mathbf{x}, \mathbf{y})^{(a)} = 1 \quad (2)$$

Tandis que la distance OSPA est égale à  $\bar{d}(\mathbf{x}, \mathbf{y})^{(a)} = 101$ .

Cas (b) : on a deux objets bien détectés et une piste redondante. La distance de Wasserstein est plus grande pour le cas (a) que pour le cas (b). Elle se calcule grâce à la matrice de transfert suivante :



(b)

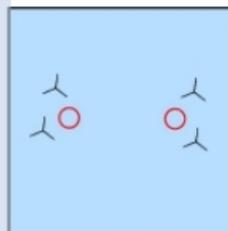
$$U^{(b)} = \begin{bmatrix} 1/3 & 0 & 1/6 \\ 0 & 1/3 & 1/6 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Et finalement, on obtient :

$$d^W(\mathbf{x}, \mathbf{y})^{(b)} = \frac{1}{3} \cdot 1 + \frac{1}{3} \cdot 1 + \frac{1}{6} \cdot 1 + \frac{1}{6} \cdot 200 = 67 \quad (4)$$

Tandis que la distance OSPA est la suivante :

$$\bar{d}(\mathbf{x}, \mathbf{y})^{(b)} = \frac{1}{3} \cdot ((1 + 1) + 200) = 67 \quad (5)$$



(c)

Cas (c) : On a deux objets bien détectés et chaque objet a une piste redondante. Le calcul de la distance de Wasserstein est le suivant :

$$U(\mathbf{c}) = \begin{bmatrix} 1/4 & 0 & 1/4 & 0 \\ 0 & 1/4 & 0 & 1/4 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Et finalement :

$$d^W(\mathbf{x}, \mathbf{y})^{(\mathbf{b})} = \frac{1}{4} \cdot 1 + \frac{1}{4} \cdot 1 + \frac{1}{4} \cdot 1 + \frac{1}{4} \cdot 1 = 1 \quad (7)$$

Tandis que la distance OSPA est elle plus grande pour le cas (c) que pour le cas (b) avec :

$$\bar{d}(\mathbf{x}, \mathbf{y})^{(\mathbf{c})} = \frac{1}{4} \cdot ((1 + 1) + 2 \cdot 200) = 101 \quad (8)$$