



Electronique

Energie Electrique

Automatique

Master 2 3EA, EC35 - Parcours RoVA



Systemes Robotiques Hétérogènes et Coopératifs

UPJV, Département EEA

Fabio MORBIDI

Laboratoire MIS

Équipe Perception Robotique

E-mail : fabio.morbidi@u-picardie.fr

CM, TD: Lundi et Mercredi 13h30-16h30, salle CURI 305

TP: Mercredi 13h30-16h30, salle TP204

Plan du cours

1. Systèmes multi-agents: introduction
2. Théorie des graphes
3. Systèmes dynamiques connectés en réseaux: protocole de consensus
4. Problèmes en robotique mobile coopérative

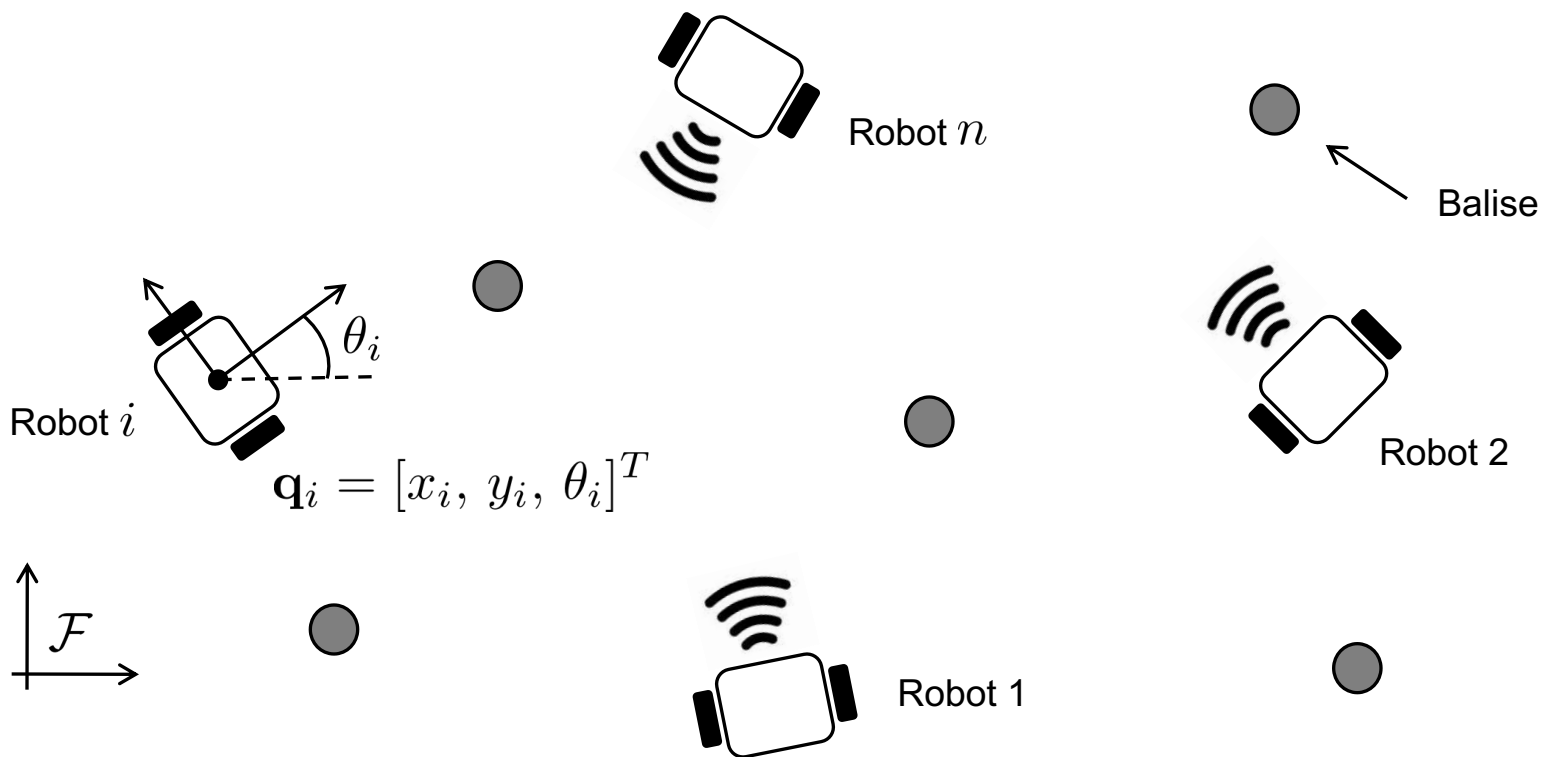


Localisation multi-robots



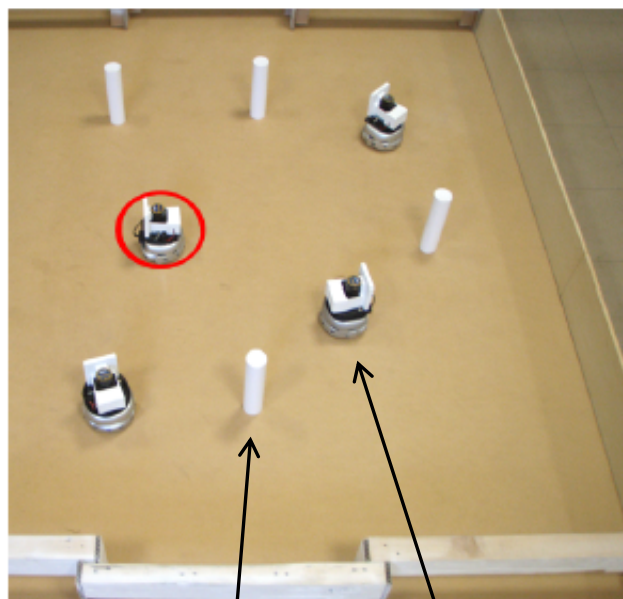
Formulation générale du problème

- Localisation multi-robots:** estimation de la *pose* (la position $[x_i, y_i]^T$ et l'orientation $\theta_i, i \in \{1, \dots, n\}$) d'une équipe de robots mobiles par rapport à un repère commun \mathcal{F} , en utilisant les mesures *proprioceptives* et *extéroceptives*



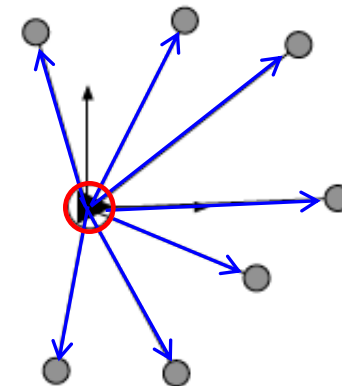
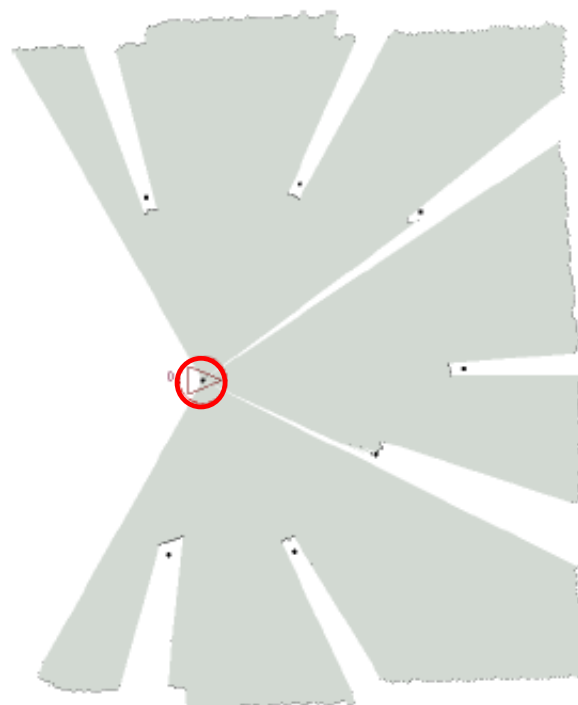
Environnement perçu par un robot ...

- Le robot encerclé en rouge a un **télémètre laser 2D** embarqué
- Perception de ce robot du milieu environnant: zone grisée



Balise

Autre robot

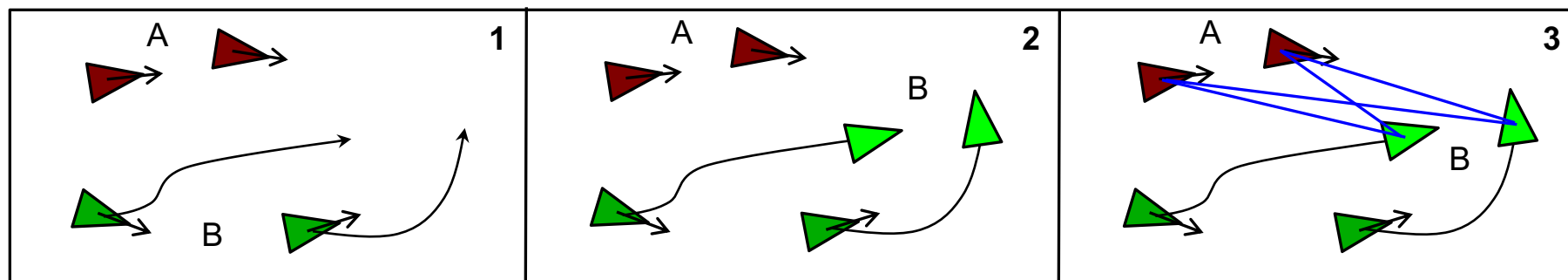


Positionnement coopératif

- **Idée:** utiliser les autres robots dans la cohorte comme *balises mobiles*

Les robots sont répartis en deux groupes, A et B. Les groupes effectuent des actions de *stop & move* à tour de rôle:

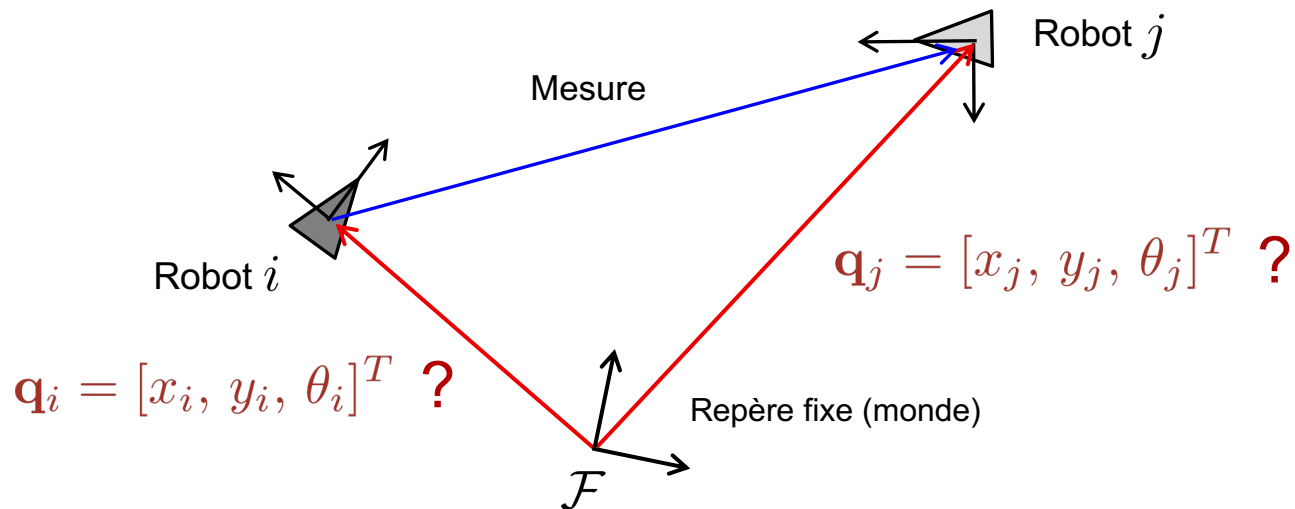
1. Le groupe A reste immobile à une *position connue*. On fait déplacer le groupe B et on le fait positionner par rapport au groupe A en utilisant l'information qui vient des *capteurs proprioceptifs*
2. On arrête le groupe B après avoir parcouru une distance appropriée, et on mesure avec précision sa position par rapport aux robots du groupe A
3. On échange le rôle des groupes A et B, et on répète les pas 1 et 2
4. On répète cette même procédure jusqu'à atteindre les *poses désirées*



- “Cooperative positioning with multiple robots”, R. Kurazume, S. Nagata, S. Hirose, in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, vol. 2, pp. 1250-1257, 1994

Localisation coopérative

- **Localisation coopérative:** estimer la pose d'un groupe de robots dans un repère fixe commun \mathcal{F} en utilisant les *mesures relatives* entre les robots
 - En général, la capacité de se percevoir mutuellement *améliore* la localisation du système complète obtenue par simple odométrie
 - La *fusion* de l'information proprioceptive et extéroceptive qui vient des capteurs est réalisée typiquement par un *filtre de Kalman étendu* (EKF) ou par un *filtre particulaire*



Localisation coopérative: équation de mesure

- Supposons que à l'instant de temps k le robot i observe le robot j en utilisant son *capteur extéroceptif*. L'équation de mesure est alors:

$$\mathbf{z}_{ij}(k) = \mathbf{h}(\mathbf{q}_i(k), \mathbf{q}_j(k)) + \mathbf{r}_{ij}(k),$$

où $\mathbf{r}_{ij} \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{R}_{ij})$ est un bruit blanc gaussien à moyenne zéro avec matrice de covariance \mathbf{R}_{ij} et $\mathbf{q}_i = [x_i, y_i, \theta_i]^T$.



Localisation coopérative: équation de mesure

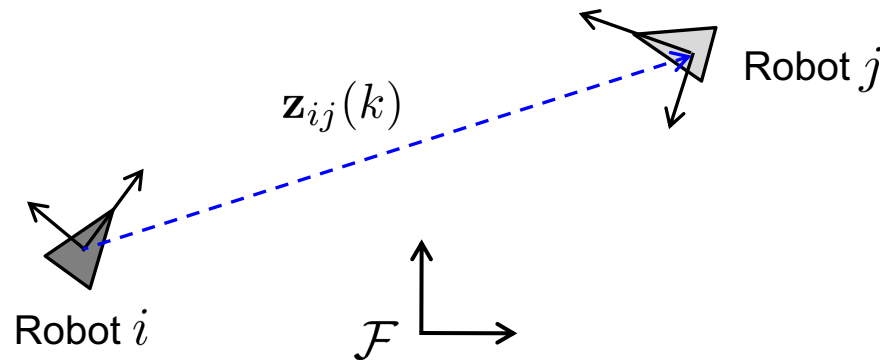
- Supposons que à l'instant de temps k le robot i observe le robot j en utilisant son *capteur extéroceptif*. L'équation de mesure est alors:

$$\mathbf{z}_{ij}(k) = \mathbf{h}(\mathbf{q}_i(k), \mathbf{q}_j(k)) + \mathbf{r}_{ij}(k),$$

où $\mathbf{r}_{ij} \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{R}_{ij})$ est un bruit blanc gaussien à moyenne zéro avec matrice de covariance \mathbf{R}_{ij} et $\mathbf{q}_i = [x_i, y_i, \theta_i]^T$.

- Pour implémenter le pas de correction de l'EKF pour résoudre le problème de localisation coopérative, il faut calculer les deux matrices jacobiennes (de taille 1×3):

$$\mathbf{H}_i = \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{q}_i, \mathbf{q}_j)}{\partial \mathbf{q}_i}, \quad \mathbf{H}_j = \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{q}_i, \mathbf{q}_j)}{\partial \mathbf{q}_j}$$

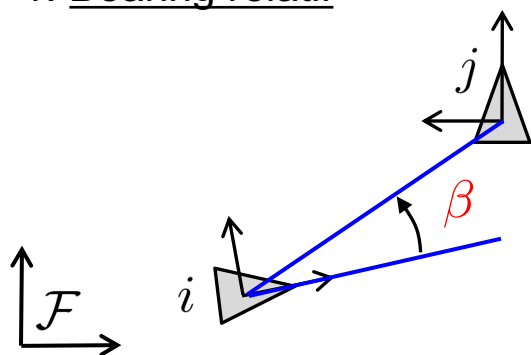


Localisation coopérative: équation de mesure

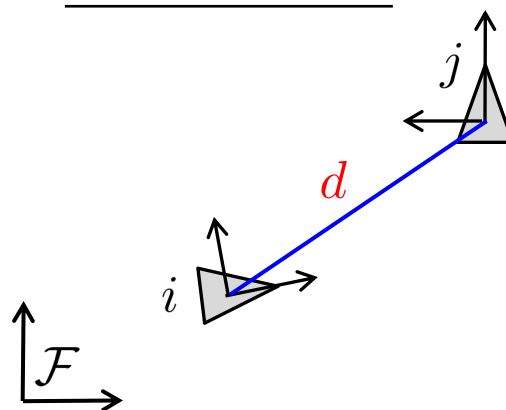
- Dans un espace 2D, il y a trois types possibles de *mesures relatives*:
 1. *Bearing relatif* β
 2. *Distance relative* d
 3. *Orientation relative* ψ

On peut aussi considérer d'autres types de mesures en combinant les trois précédentes (par ex. *position relative* = bearing relatif + distance relative)

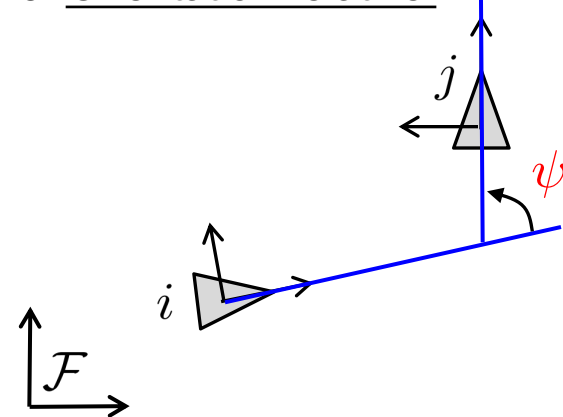
1. Bearing relatif



2. Distance relative



3. Orientation relative



Localisation coopérative: équation de mesure

Soit $\Delta x(k) = x_j(k) - x_i(k)$ et $\Delta y(k) = y_j(k) - y_i(k)$.

- **Bearing relatif:**

$$\mathbf{h}(\mathbf{q}_i(k), \mathbf{q}_j(k)) = \arctan \left(\frac{-\sin \theta_i(k) \Delta x(k) + \cos \theta_i(k) \Delta y(k)}{\cos \theta_i(k) \Delta x(k) + \sin \theta_i(k) \Delta y(k)} \right),$$

$$\mathbf{H}_i = \left[\frac{\Delta y}{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}, \frac{-\Delta x}{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}, -1 \right], \quad \mathbf{H}_j = \left[\frac{-\Delta y}{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}, \frac{-\Delta x}{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}, 0 \right].$$

- **Distance relative:**

$$\mathbf{h}(\mathbf{q}_i(k), \mathbf{q}_j(k)) = \sqrt{(\Delta x(k))^2 + (\Delta y(k))^2},$$

$$\mathbf{H}_i = \left[\frac{-\Delta x}{\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}}, \frac{-\Delta y}{\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}}, 0 \right], \quad \mathbf{H}_j = \left[\frac{\Delta x}{\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}}, \frac{\Delta y}{\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}}, 0 \right].$$

- **Orientation relative (équation linéaire) :**

$$\mathbf{h}(\mathbf{q}_i(k), \mathbf{q}_j(k)) = \theta_j(k) - \theta_i(k),$$

$$\mathbf{H}_i = [0, 0, -1], \quad \mathbf{H}_j = [0, 0, 1].$$



Localisation coopérative: observabilité

- S'il n'y a pas de robots avec une **capacité de localisation absolue**, le système multi-robots est **non observable**, c'est-à-dire l'erreur augmentera indéfiniment et l'estimation des poses $\mathbf{q}_1, \dots, \mathbf{q}_n$ en \mathcal{F} finira par diverger
- Toutefois, même si l'équipe est complètement perdue en \mathcal{F} , l'erreur sur les **poses relatives** des robots $\mathbf{e}_{ij} - \hat{\mathbf{e}}_{ij} \triangleq (\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j) - (\hat{\mathbf{q}}_i - \hat{\mathbf{q}}_j)$, $\forall i \neq j$, tendra vers zéro
- Si **au moins un robot** a une capacité de localisation absolue (par ex. car équipé de GPS ou capable de détecter une balise de position *connue*), le système multi-robots devient **observable**, et l'erreur sur l'estimation de la pose converge vers zéro
 - Cela se produit car le robot est capable d'estimer sa pose en \mathcal{F} et les autres robots sont capables de se localiser par rapport à lui

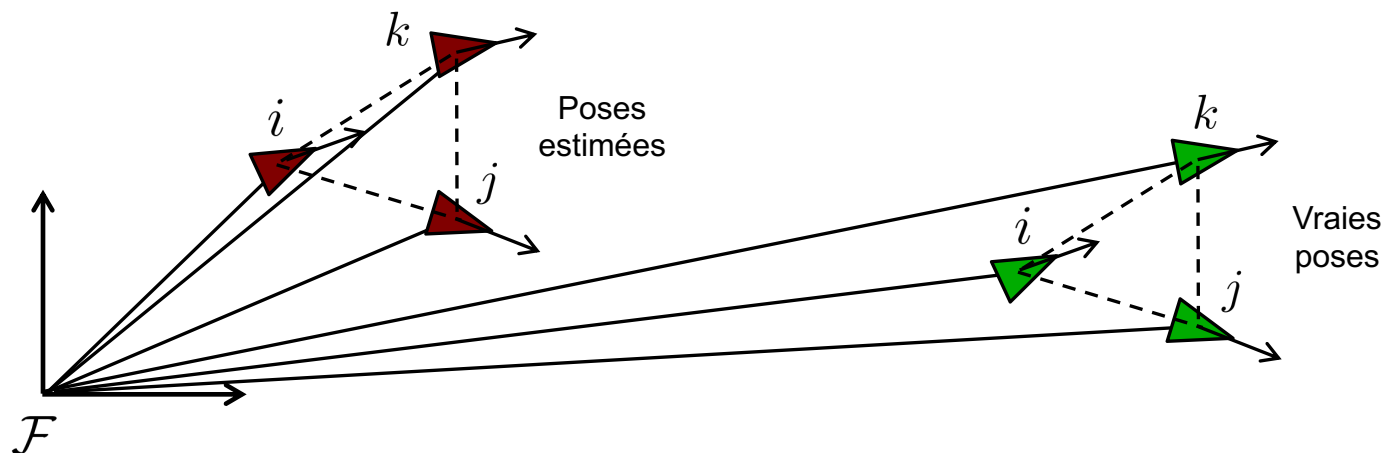
Pour plus de détails, voir les articles:

- “*Observability Analysis for Mobile Robot Localization*”, A. Martinelli, R. Siegwart, in Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, pp. 1471-1476, 2005
- “*Distributed Multirobot Localization*”, S.I. Roumeliotis, G.A. Bekey, IEEE Trans. Robotics and Automation, vol. 18, n. 5, pp. 781-795, 2002

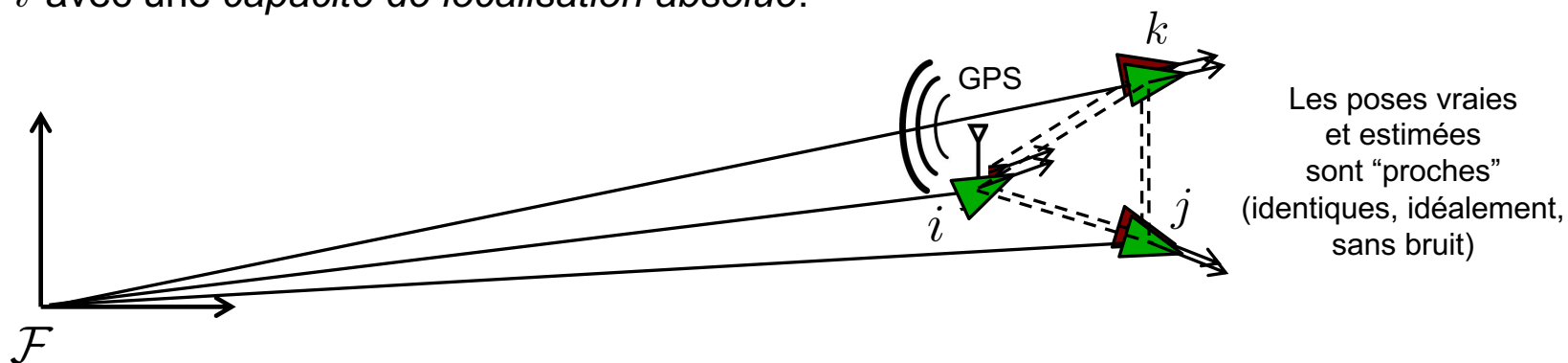


Localisation coopérative: observabilité

- Aucun robot avec une *capacité de localisation absolue*:



- Robot i avec une *capacité de localisation absolue*:



Localisation Mutuelle Relative

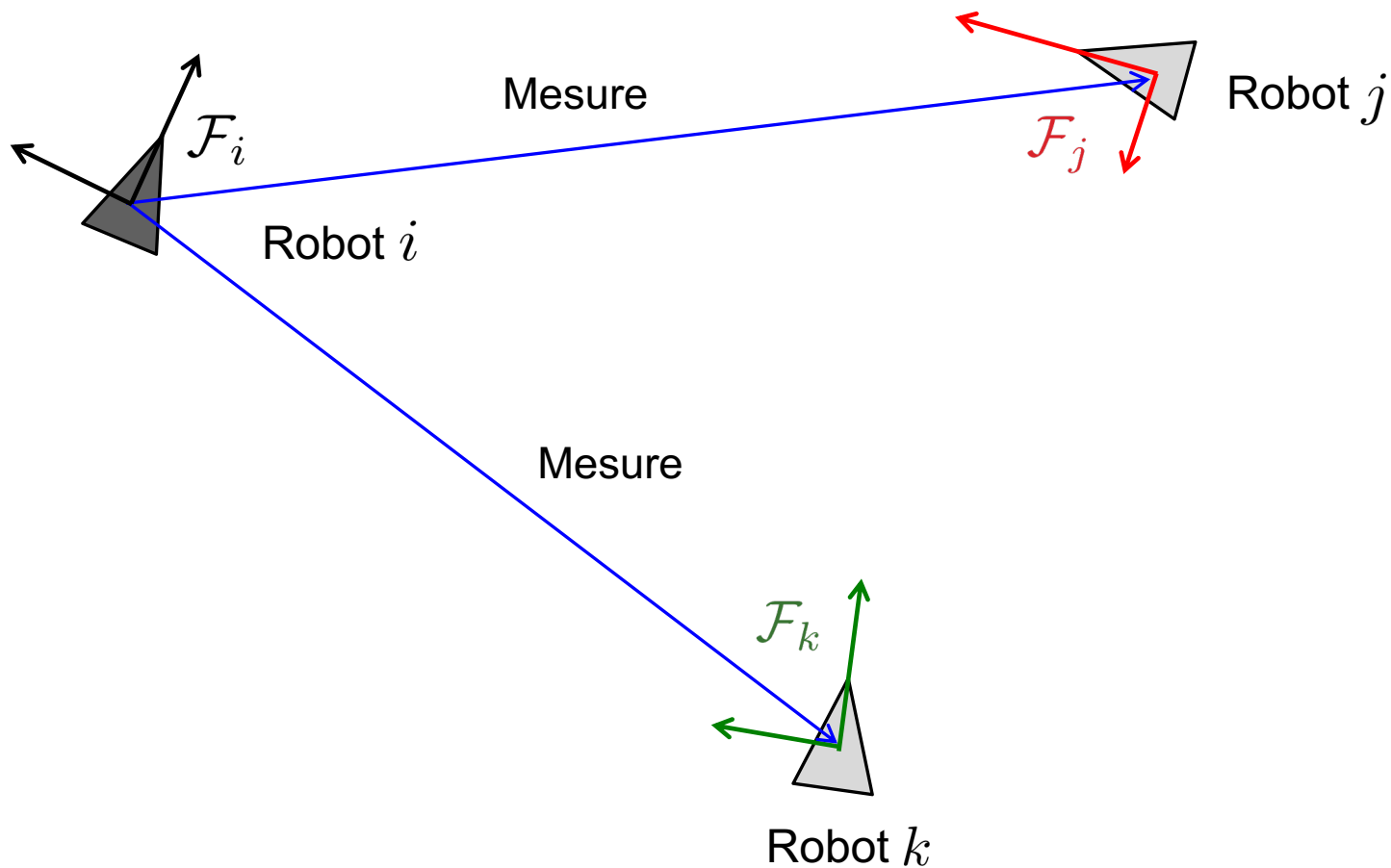
- Comment éviter le **problème de l'observabilité** dans la Localisation Cooperative ?
 - On peut fournir à chaque robot un repère dans lequel il ne peut pas se perdre
- Soit \mathcal{F}_i le **repère mobile** attaché au robot i
- **Localisation Mutuelle Relative (RML)**: c'est le problème d'estimer les poses relatives entre les repères mobiles des robots
- Chaque robot calcule un estimé de la pose de ses coéquipiers dans son repère. Chaque robot se considère toujours dans l'origine (en $[0, 0, 0]^T$)
- Cette approche est dite **robot-centrique** ou **égocentrique**

Pour plus de détails, voir l'article:

- "*Robot-to-robot relative pose estimation from range measurements*", X.S. Zhou, S.I. Roumeliotis, IEEE Trans. Robotics, vol. 24, n. 6, pp. 1379-1393, 2008

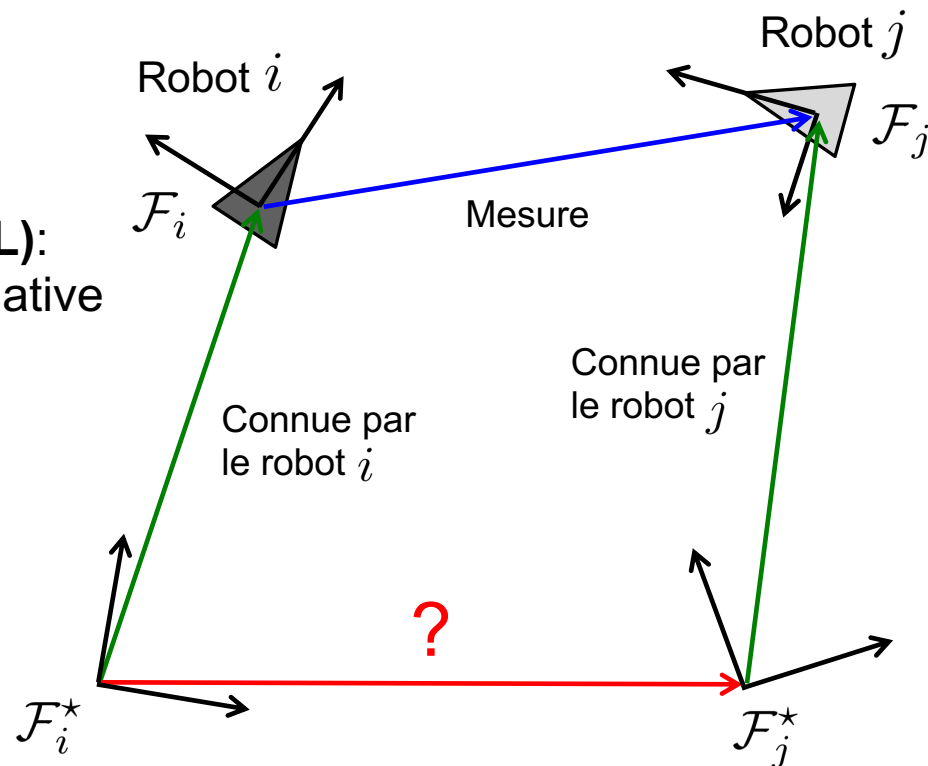


Localisation Mutuelle Relative



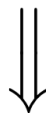
Localisation Mutuelle Absolue

- Le robot i possède:
 - Un repère fixe \mathcal{F}_i^*
 - Un repère mobile local \mathcal{F}_i
- **Localisation Mutuelle Absolue (AML):**
c'est le problème d'estimer la pose relative entre les *repères fixes* en utilisant les mesures relatives entre les robots
- Applications:
 - Fusion de cartes
 - Exploration coopérative
- Le problème AML est résolu si le problème RML est résolu et les robots sont localisés dans leurs repères fixes



Localisation multi-robots: sommaire

- **Positionnement coopératif:** deux groupes de robots A et B sont utilisés à tour de rôle comme des *balises mobiles*
- **Localisation coopérative:** les robots estiment leurs poses dans un *repère fixe commun* en utilisant les mesures relatives
- **Localisation Mutuelle Relative (RML):** les robots estiment les changements de coordonnées entre les *repères mobiles* en utilisant les mesures relatives (localisation d'un **réseau de capteurs**: cas spécial de RML où les agents ou robots sont *statiques*)



- **Localisation Mutuelle Absolue (AML):** les robots estiment les changements de coordonnées entre les *repères fixes* en utilisant les mesures relatives



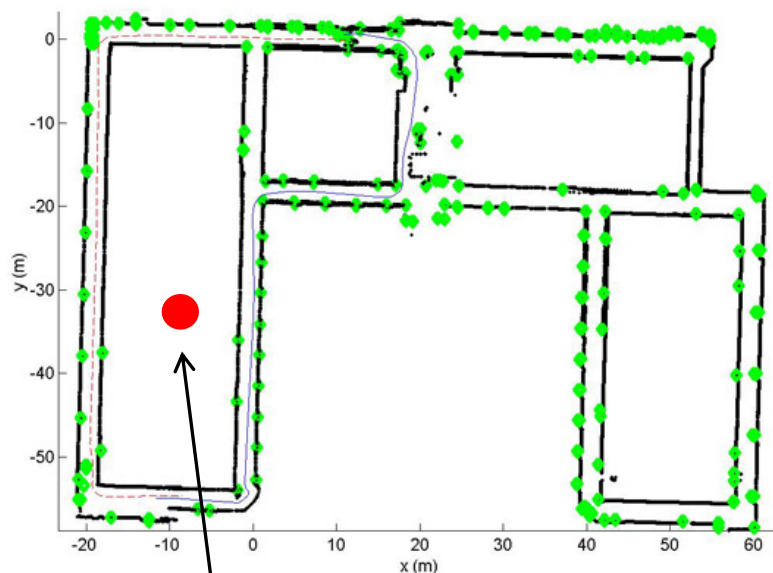
SLAM multi-robots



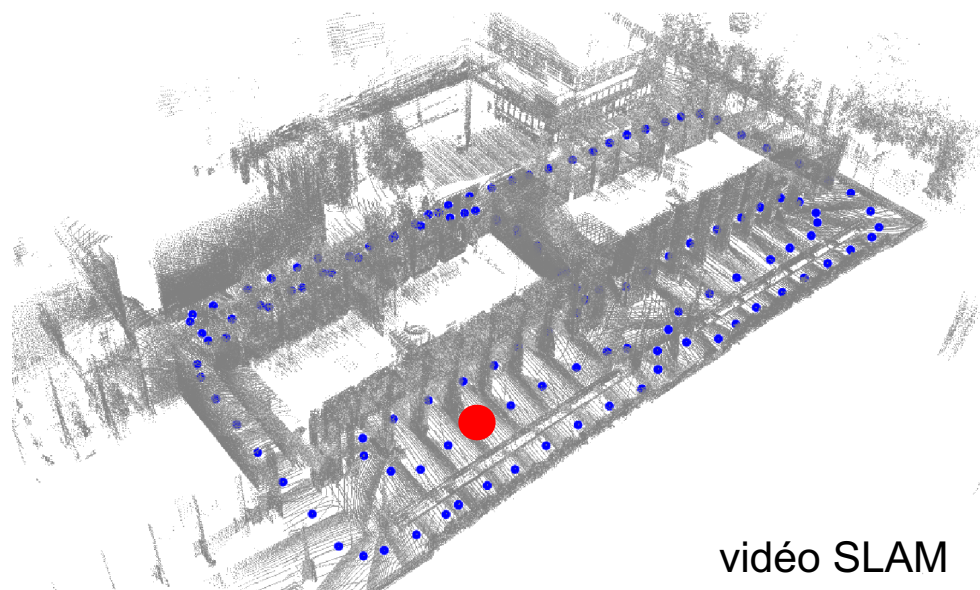
Problème SLAM

Problème SLAM (“*Simultaneous Localization And Map Building*”):

Un robot mobile est placé dans un **environnement inconnu** à une **position inconnue**, et il doit construire de façon incrémentale une *carte consistante* de l’environnement et déterminer en même temps sa position dans cette carte



Robot

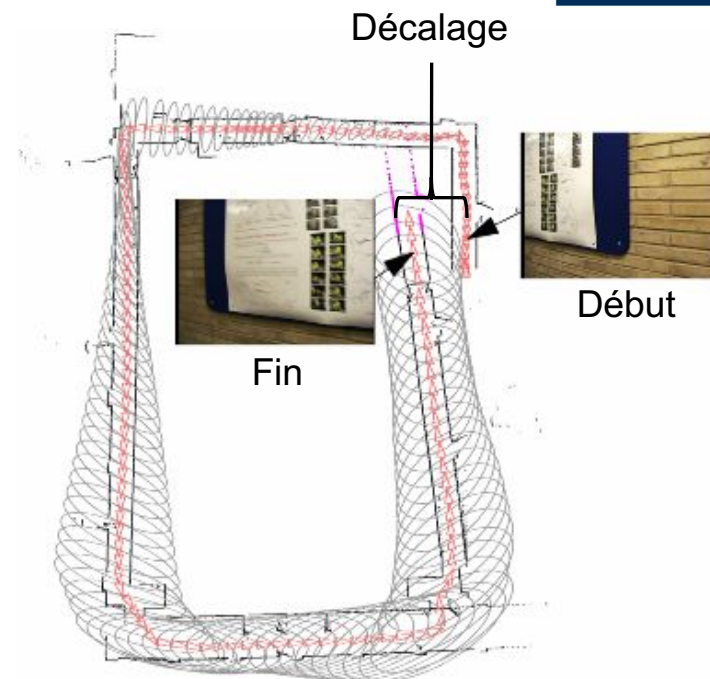
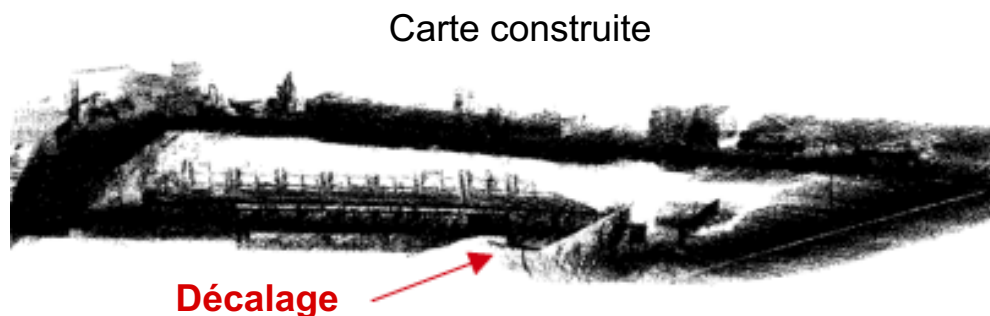


vidéo SLAM
DARPA SubT



Problème SLAM

- Problème critique dans le SLAM
 - Fermeture de boucle (“loop-closure”)



Pour plus de détails sur le SLAM, voir les articles survey:

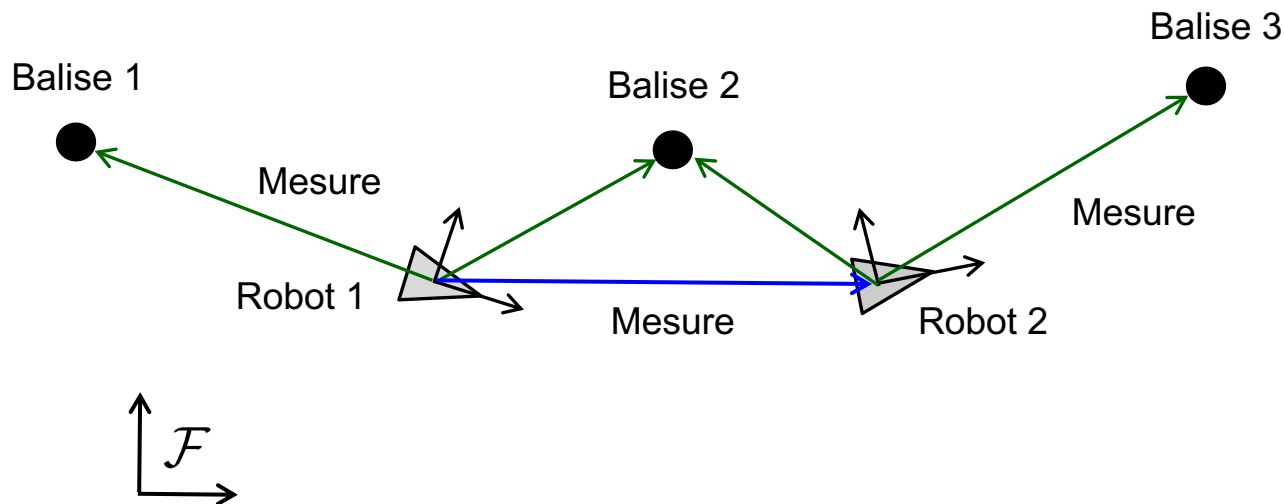
- “*Simultaneous localization and mapping: part I*”, H.H. Durrant-Whyte, T. Bailey, in *IEEE Robot. Autom. Mag.*, vol. 13, n. 2, pp. 99-110, 2006
- “*Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: Toward the robust-perception age*”, C. Cadena, L. Carlone, H. Carrillo, Y. Latif, D. Scaramuzza, J. Neira, I. Reid, J.J. Leonard, *IEEE Trans. Robotics* vol. 32, n. 6, pp. 1309-1332, 2016

vidéo SLAM
Loop closure



SLAM coopératif (C-SLAM)

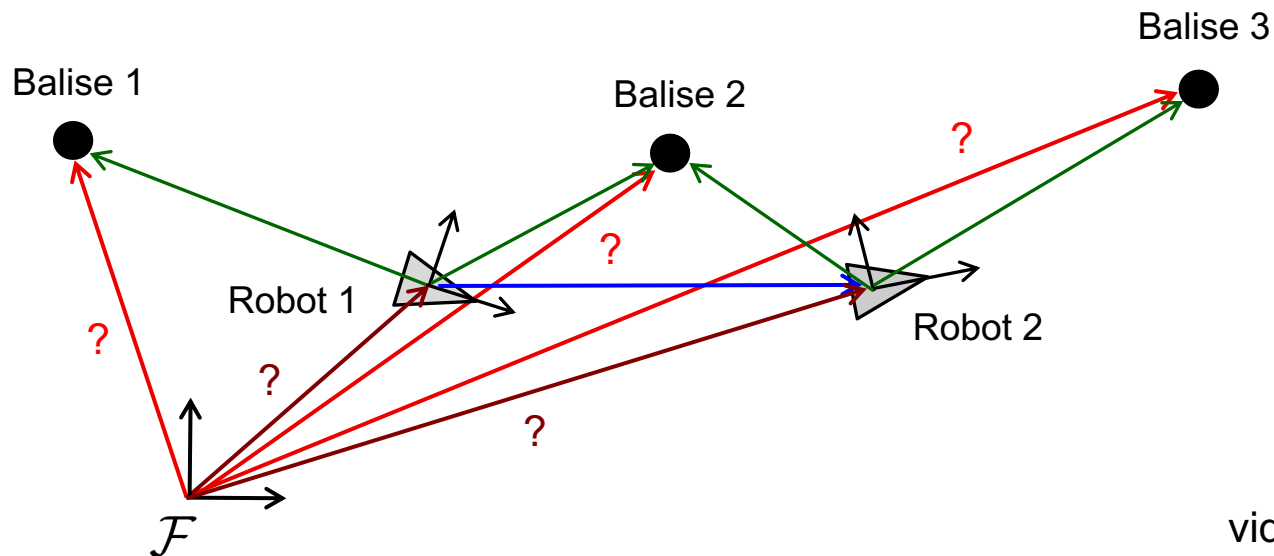
- Dans un problème C-SLAM standard, une chorte de robots mobiles se déplace de façon *continue* et *aléatoire* dans un environnement, tout en enregistrant les mesures relatives (de distance et/ou de bearing) par rapport aux autres robots et aux balises (ponctuelles) présentes dans l'environnement



- “*Estimating uncertain spatial relationships in robotics*”, R.C. Smith, M. Self, P. Cheeseman, in *Autonomous Robot Vehicles* (Éditeurs: I. Cox et G. Wilfong), Springer, pp. 167-193, 1990



- Les robots utilisent les *mesures proprioceptives* pour propager leurs estimés de position et sont équipés de *capteurs extéroceptifs* (par ex. télémètres lasers) qui permettent de mesurer leur position relative par rapport aux autres robots et aux balises
- Un *filtre de Kalman étendu* est souvent utilisé pour fusionner les mesures et générer des estimations sur la position des robots et des balises dans le repère \mathcal{F}



vidéo C-SLAM



C-SLAM: variations et extensions

- C-SLAM avec une approche ensembliste (*set-membership*)

“*Simultaneous localization and map building for a team of cooperating robots: a set membership approach*”, M. Di Marco, A. Garulli, A. Giannitrapani, A. Vicino, IEEE Trans. Robotics and Automation, vol. 19, n. 2, pp. 238-249, 2003

- C-SLAM par filtre particulaire

“*Multi-robot simultaneous localization and mapping using particle filters*“, A. Howard, Int. J. Robotics Research, vol. 25, n. 12, pp. 1243-1256, 2006

- Dérivation de bornes explicites sur l’incertitude de positionnement dans le C-SLAM, par rapport au nombre de balises et de robots, la précision des capteurs embarqués sur les robots et la topologie du *Graphe de Mesure des Positions Relatives* \mathcal{G}_m

“*Predicting the performance of cooperative simultaneous localization and mapping (C-SLAM)*“, A.I. Mourikis, S.I. Roumeliotis, Int. J. Robotics Research, vol. 25, n. 12, pp. 1273-1286, 2006

