



$\partial_t \psi + \frac{M}{\epsilon} \int_{\Omega} \frac{\Delta \psi}{2} - \mu \Delta \psi + \int_{\Omega} \nabla p = 0, \nabla \psi = \frac{1}{2} \omega(r, 0) = \psi_0(r)$

Estimation à erreurs bornées et guidage-pilotage des aéronefs autonomes en milieu perturbé

Julien Marzat

Hélène Piet-Lahanier, Houria Siguerdidjane (Supélec)

GT MEA - Journée "calcul ensembliste pour la navigation et la localisation"
ENSTA-Paristech, France, 2 février 2012



retour sur innovation

Estimation à erreurs bornées et guidage-pilotage des aéronefs autonomes en milieu perturbé

- Estimation et guidage pour les aéronefs autonomes
- Incertitude sur les paramètres et les mesures, généralement bornée
- Propagation de ces incertitudes pour l'estimation d'état ou de paramètres
- Utilisation de ces informations pour l'adaptation de lois de guidage
- Contraintes : modèles dynamiques non linéaires, paramètres mal connus, perturbations ou entrées inconnues

Deux applications présentées

- Navigation d'un mini-drone en présence de vent
- Localisation de cible manœuvrante pour l'interception

Navigation d'un mini-drone en présence de vent

- Détection et estimation des perturbations aérologiques

- Guidage robuste à la perturbation

Localisation de cible manœuvrante pour l'interception

- Localisation de la cible

- Loi de guidage

Conclusions et perspectives

Navigation d'un mini-drone en présence de vent

Détection et estimation des perturbations aérologiques

Guidage robuste à la perturbation

Localisation de cible manœuvrante pour l'interception

Localisation de la cible

Loi de guidage

Conclusions et perspectives

Navigation d'un mini-drone en présence de vent

Thèse de Walid Achour (ONERA DCPS/Supélec), soutenue en juin 2011

Problématique :

- Mini-drone équipé de capteurs bas-coût (centrale inertielle, GPS)
- Charge utile faible, gestion de l'énergie primordiale
- Environnement urbain, perturbations aérologiques
- Guidage robuste nécessaire pour s'accomoder des perturbations

Méthodologie :

- Détection et estimation de la perturbation
- Loi de guidage adaptative utilisant ces informations



- Variables d'état : position, vitesse, angles d'Euler, vitesse angulaire
- Capteurs : GPS (position), centrale inertielle (accélération et vitesse angulaire)
- Actionneurs : servomoteurs pour la commande de l'orientation (roulis, tangage et lacet) et l'altitude (poussée)

Modèle dynamique de l'hélicoptère miniature

$$\begin{cases} \dot{\zeta} = v \\ m\dot{v} = \mathcal{F} + \mathcal{F}_{wind} \\ \dot{\mathcal{R}} = \mathcal{R}\Omega_x \\ I\dot{\Omega} = -\Omega \wedge I\Omega + \mathcal{M} + \mathcal{M}_{wind} \end{cases}$$

Forces et moments agissant sur le système

- \mathcal{F} et \mathcal{M} : Force et moment résultants en absence des perturbations atmosphériques (poids, poussées et couples du rotor principal et du rotor de queue, fuselage, élasticité des pales...)
- \mathcal{F}_{wind} et \mathcal{M}_{wind} : Force et moment résultants dus à la présence des perturbations atmosphériques

Modèle discrétisé du système :

$$\begin{cases} X_k = \varphi_k(X_{k-1}, U_{k-1}) + w_k \\ Z_k = g_k(X_k, U_k) + v_k \\ k = 1, \dots, N \end{cases}$$

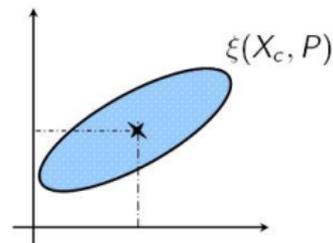
- φ_k : fonction d'état (linéaire ou non linéaire)
- X_k et Z_k : vecteurs d'état et de sortie
- U_k : vecteur d'entrée
- w_k et v_k : vecteurs de perturbation dynamique et de sortie
- k : indice de temps

Objectif : détecter le mode (avec/sans vent) et estimer l'état à partir des mesures, compte tenu des niveaux d'incertitude sur les mesures et le modèle

Caractérisation géométrique approchée par ellipsoïdes

$$\xi(X_c, P) = \{X \in \mathbb{R}^n / (X - X_c)P^{-1}(X - X_c)^t \leq 1\}$$

X_c centre de l'ellipsoïde, P matrice caractéristique



Caractérisation ensembliste

- Ensembles d'appartenance des bruits :

$$w_k \in \mathcal{W}_k = \xi_k(w_k, W_k), v_k \in \mathcal{V}_k = \xi_k(v_k, V_k)$$

- Ensemble d'appartenance de l'état :

$$X_k \in \xi_k(\hat{X}_k, P_k)$$

construction et minimisation de $\xi_k(\hat{X}_k, P_k)$ intersectant un ensemble donné

Algorithmes de prédiction-corrrection

- Phase de prédiction : construction de

$$\xi_{k/k-1}(\hat{X}_{k/k-1}, P_{k/k-1})$$

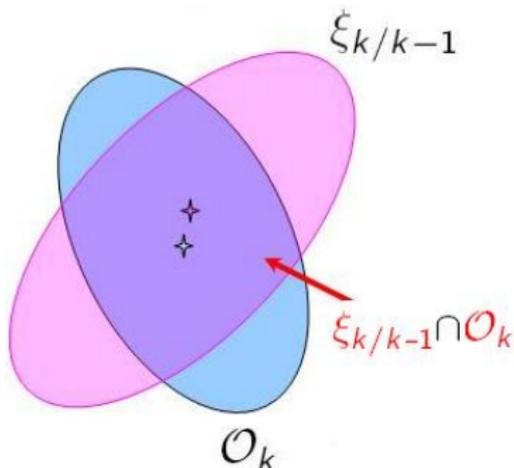
- Phase de correction : construction de $\xi_k(\hat{X}_k, P_k)$ de taille minimale, tel que

$$Z_k \in \mathcal{O}_k$$

$\mathcal{O}_k = \{(Z_k - C_k X_k)^T V_k^{-1} (Z_k - C_k X_k) \leq 1\}$
ensemble ellipsoïdal d'observation

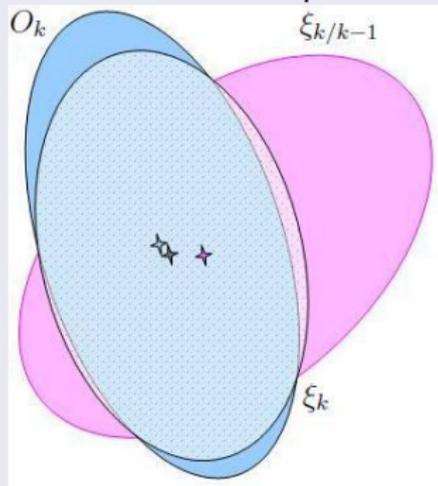
- Construction de l'ellipsoïde

$$\xi_k \supset \xi_{k/k-1} \cap \mathcal{O}_k$$



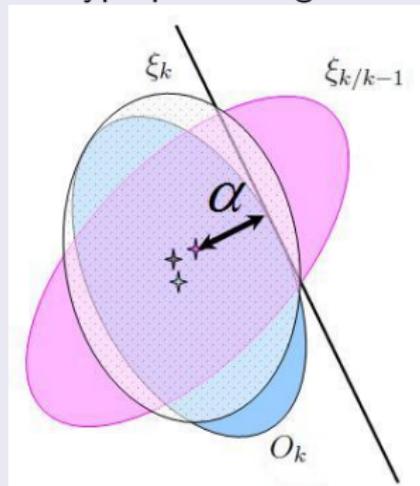
Catégorie 1 : critère de trace

Intersection d'ellipsoïdes



Catégorie 2 : critère de déterminant

Hyperplans tangents



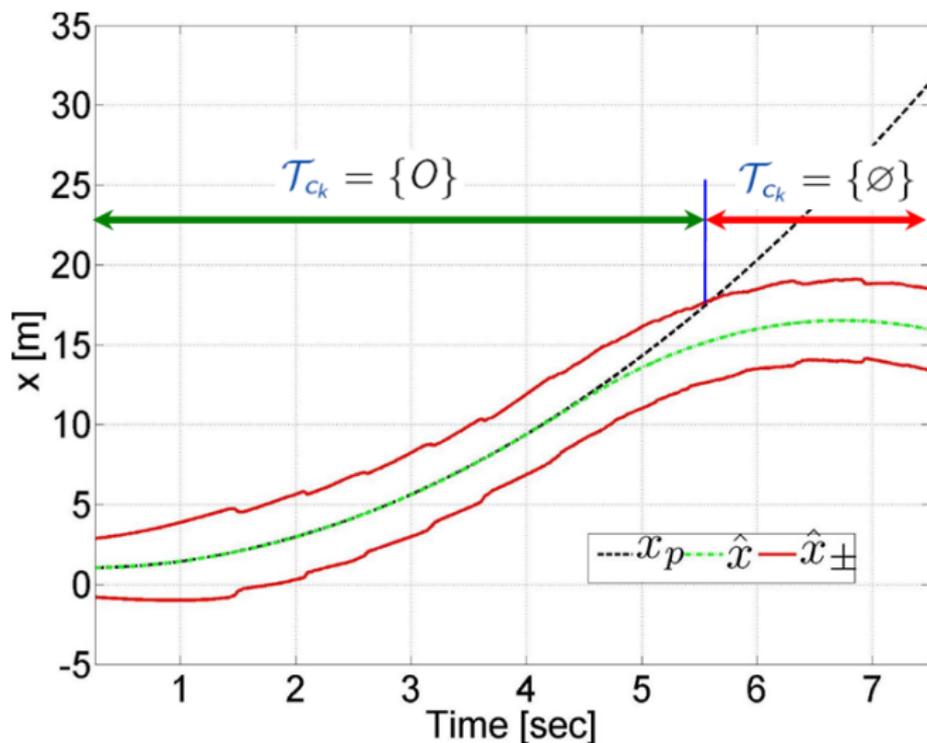
Méthode retenue :
critère de trace, propagation avec le modèle linéarisé

Détection de perturbation atmosphérique

- Hypothèse : le mini drone est en bon état de fonctionnement (pas de défaut actionneur ou capteur)
- Première étape : simple détection de la perturbation atmosphérique
- **Modèle perturbé** :
$$\begin{cases} X_k = \varphi(X_{k-1}, U_{k-1}, V_w) + w_k \\ Z_k = C_k X_k + v_k \end{cases}$$

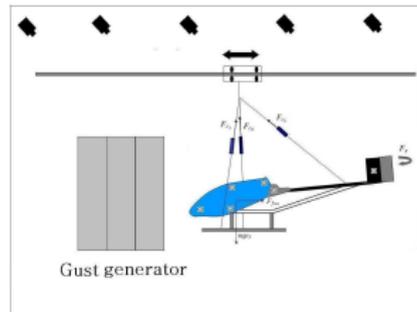
 V_w : vitesse de la perturbation atmosphérique
- **Prédiction de l'état** : $X_{k/k-1} = \varphi(X_{k-1}, U_{k-1}, 0) |_{X_{k-1} = \hat{X}_{k-1}}$
- **Test de cohérence** : $\mathcal{T}_{c_k} = \{X_{k/k-1} \cap \xi_k(\hat{X}_k, P_k)\}$ et calcul du volume de \mathcal{T}_{c_k}
- **Décision** :
 - Si $\mathcal{T}_{c_k} = \{\emptyset\} \implies$ présence de perturbation atmosphérique
 - Si $\mathcal{T}_{c_k} = \{O\}$
 - si $\mathcal{V}(\mathcal{T}_{c_k})$ décroissant \implies début de perturbation détecté
 - sinon \implies perturbation atmosphérique non détectée

Application au mini drone



Expérimentation dans générateur de rafale (ONERA B20)

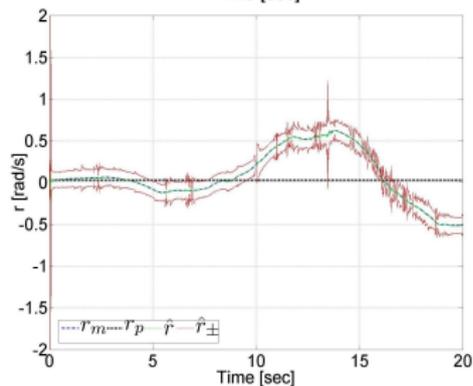
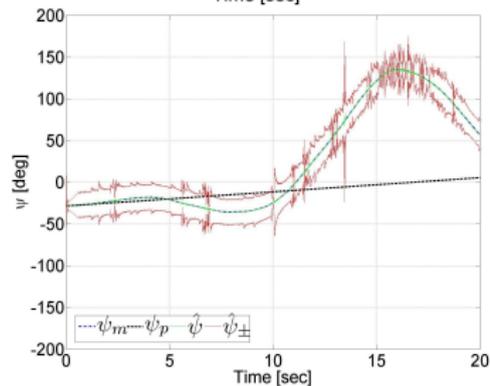
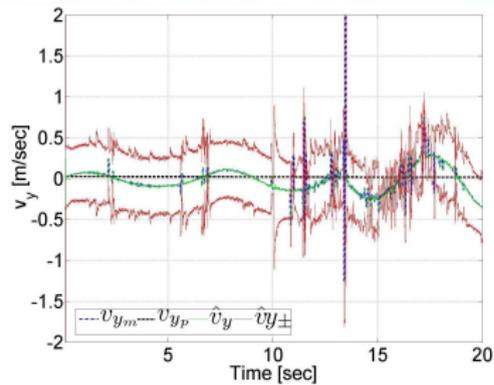
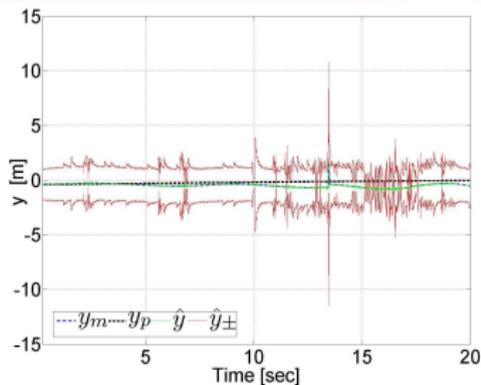
Largeur 6m, vitesse pont roulant \rightarrow 5 m/s, rafale \rightarrow 5 m/s



Balances de mesure des tensions de câbles,
centrale inertielle, trajectographie optique

$$\text{Modèle simplifié : } \begin{cases} \dot{\zeta} = v \\ m_c \dot{v} = m g e_3 + \mathcal{R}(F_c + F_{fus} + F_r) \\ \dot{\mathcal{R}} = \mathcal{R} \Omega_{\times} \\ I_c \dot{\Omega} = -\Omega \wedge I \Omega + b_{tr} \wedge F_r \end{cases}$$

Expérimentation : résultats



Etat à estimer (19 variables)

$$X_k = (\zeta_k, v_k, \Theta_k, \Omega_k, \omega_{r_k}, V_{w_k})^T$$

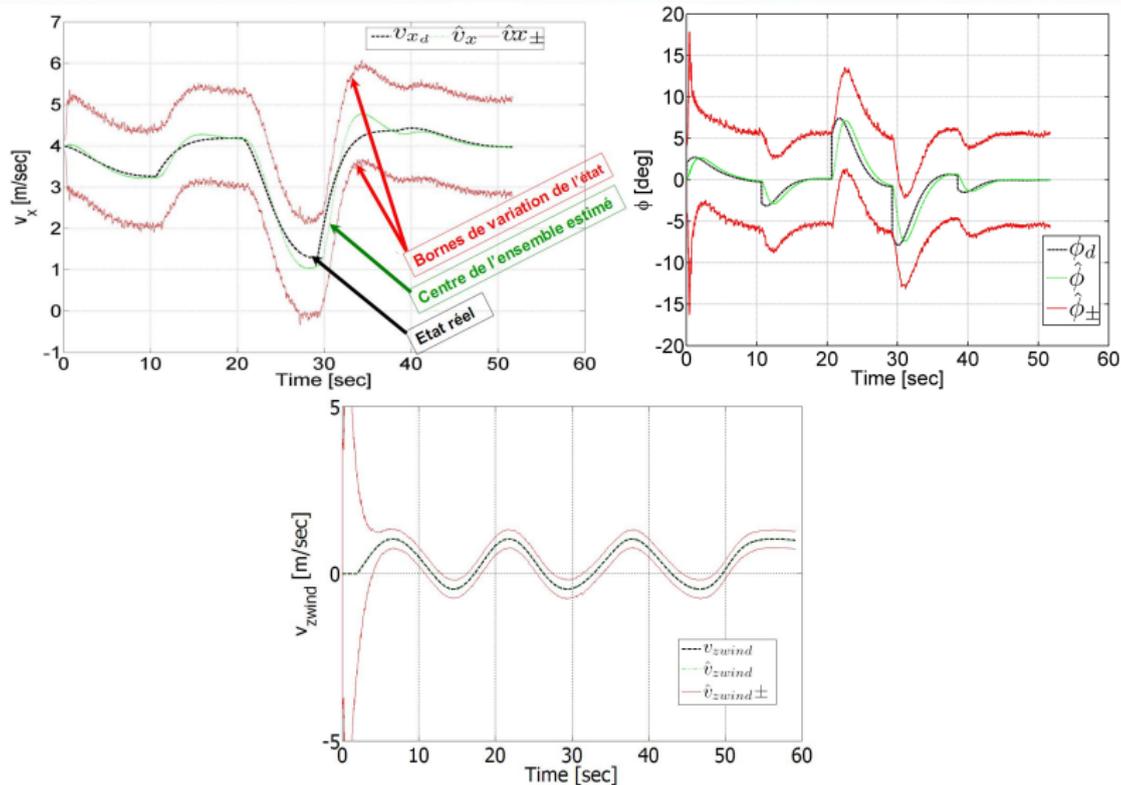
- ζ_k, v_k : position et vitesse du véhicule ($\zeta_k \in \mathbb{R}^3; v_k \in \mathbb{R}^3$)
- Θ_k, Ω_k : angles d'Euler et vitesse angulaire ($\Theta_k \in \mathbb{R}^3; \Omega_k \in \mathbb{R}^3$)
- ω_{r_k} : paramètres battement vertical et barre de Bell stabilisante ($\omega_{r_k} \in \mathbb{R}^4$)
- V_{w_k} : évolution réelle de la vitesse de la perturbation ($V_{w_k} \in \mathbb{R}^3$)

Mesures (12 variables)

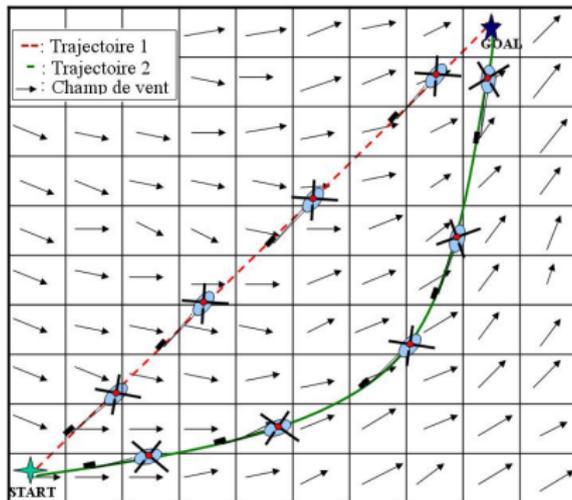
$$Z_k = (\zeta_k, v_k, \Theta_k, \Omega_k)^t + v_k$$

- simulation des mesures à partir du modèle perturbé du mini drone

Estimation : résultats de simulation



Guidage adapté à la perturbation : cas test



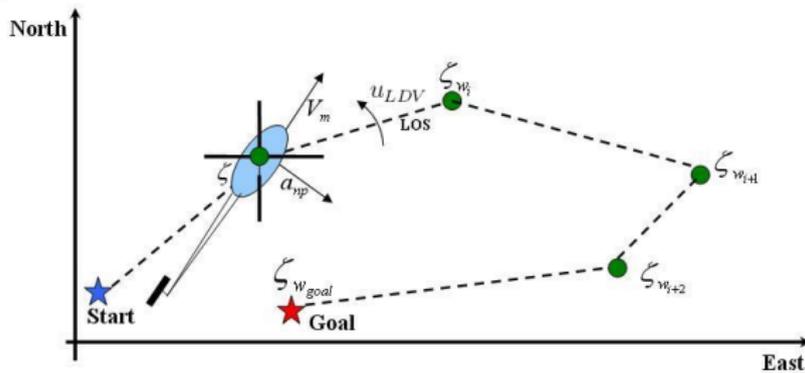
Trajectoire 1

- chemin dangereux (vent traversier)
- saturation des actionneurs : forte consommation d'énergie

Trajectoire 2

- chemin plus sécurisé et plus rapide
- sollicitation réduite des actionneurs : faible consommation

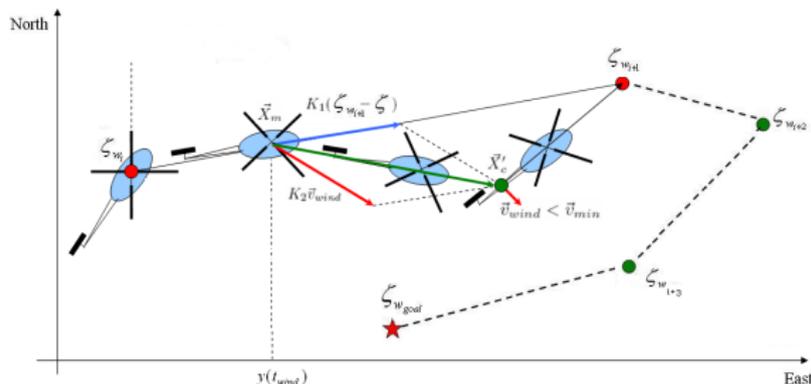
Guidage classique : loi de Navigation Proportionnelle (NP)



- Ligne de vue $\vec{u} = \frac{1}{D} (\vec{\zeta}_{w_i} - \vec{\zeta})$
- Annulation du taux de rotation de la ligne de vue ($\vec{u} \wedge \dot{\vec{u}}$)
- Accélération NP : $\vec{a}_{np} = N_p \frac{1}{D} \vec{v} \wedge \vec{V}_1$
 - v : vitesse du véhicule
 - N_p : gain de navigation
 - $V_1 : \frac{1}{D} \vec{v} \wedge \vec{u}$

Loi de guidage proposée (PND)

- On favorise l'évolution dans une direction qui est un compromis entre celle du point de passage et celle de la perturbation

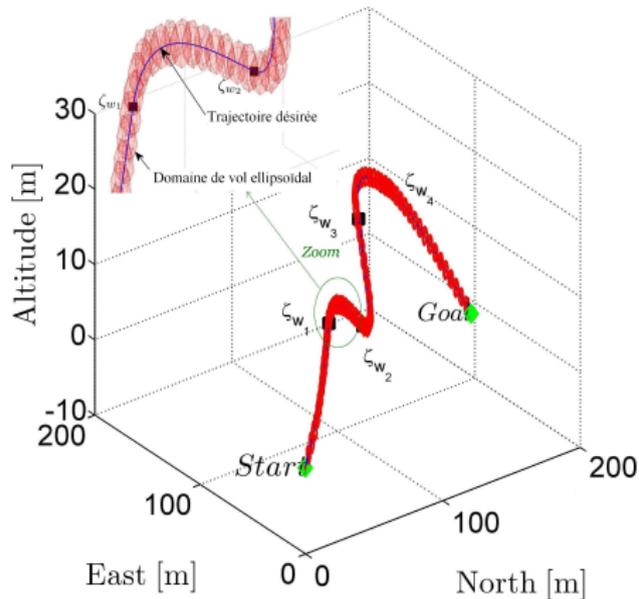
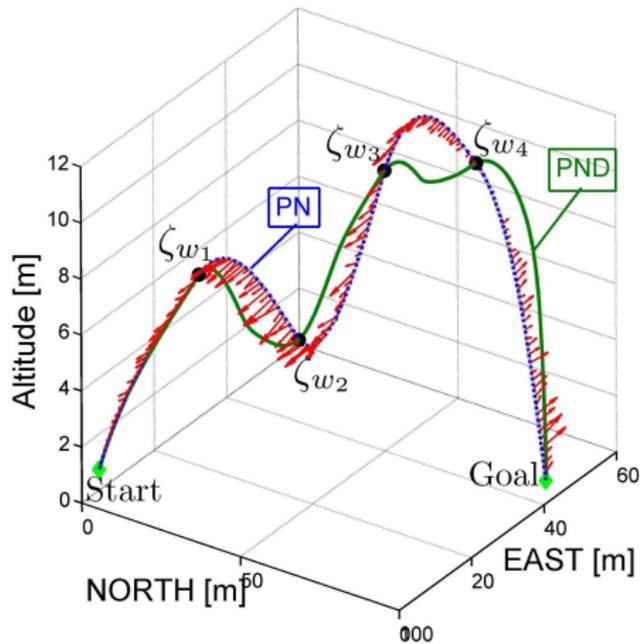


- Vecteur ligne de vue virtuelle \vec{u}_r :

$$\vec{u}_r = \frac{1}{D_r} (\alpha_1 \vec{u} + \alpha_2 \vec{v}_{wind})$$

- appartient au plan formé par \vec{u} et le gradient de la perturbation
- pondérations variables selon la distance au prochain point de passage

Exemple de mission - caractérisation de domaine de vol



Navigation d'un mini-drone en présence de vent

Détection et estimation des perturbations aérologiques

Guidage robuste à la perturbation

Localisation de cible manœuvrante pour l'interception

Localisation de la cible

Loi de guidage

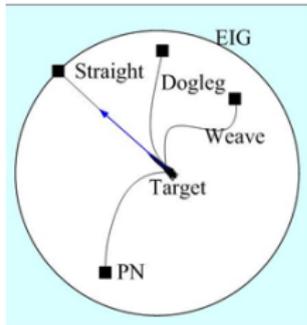
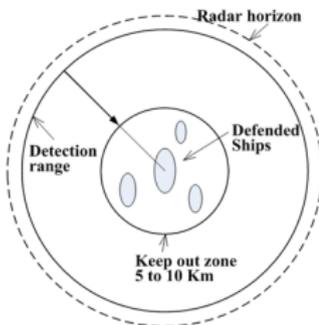
Conclusions et perspectives

Localisation de cible manœuvrante pour l'interception

Coopération ONERA - Cranfield University - MBDA (F et UK)

Problématique :

- Missile(s) intercepteur(s), pour la protection aérienne d'une zone
- Guidage missile mi-course, avant l'accrochage sur la cible
- Point crucial : prédiction de la trajectoire de cibles manœuvrantes
 - cadence faible et irrégulière de mesures incertaines
 - changements de trajectoires non prévisibles



Estimation et prédiction de la localisation de la cible

- Incertitude sur l'état et l'évolution future de la cible
- Connaissance grossière de bornes de l'espace d'état, car :
 - niveau de bruit
 - hypothèses sur l'accélération maximale réalisable
 - objectifs visés
- Estimation/prédiction ellipsoïdale à partir des mesures
- Information restituée : points caractéristiques de l'ensemble obtenu

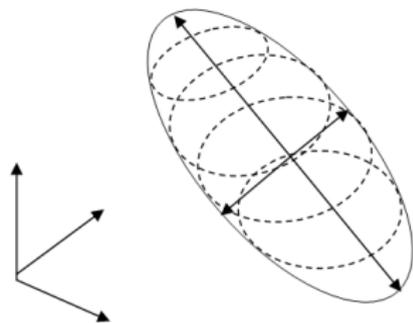
Synthèse de loi de guidage

- Exploitation des résultats de l'estimation
- Géométrie de l'interception
- Loi de guidage classique et commande optimale

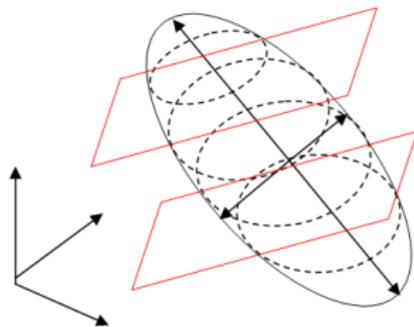
Estimation de l'état de la cible : approche à erreurs bornées

- Modèle dynamique en cartésien (position, vitesse, accélération)
- Mesures radar
 - coordonnées sphériques \implies estimée de la position relative
 - ligne de vue, vitesse de rotation de la ligne de vue, vitesse de rapprochement
 - estimation de la vitesse relative
- Bornes sur le niveau de bruit : compromis entre confiance dans la mesure et possibilité de manœuvre
- Ellipsoïde estimé de l'état de la cible : $(x_{k-1/k-1}, P_{k-1/k-1})$

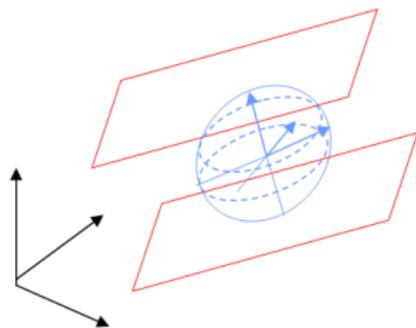
Localisation de cible manœuvrante : étape d'estimation



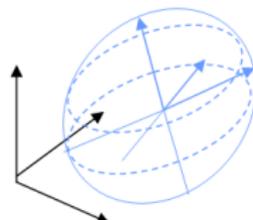
Initial Ellipsoid



Ellipsoid cut by measurement bound surfaces



Resulting cut ellipsoid

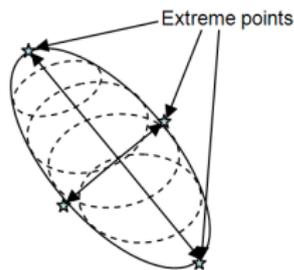


Propagation with model dynamics and bounds

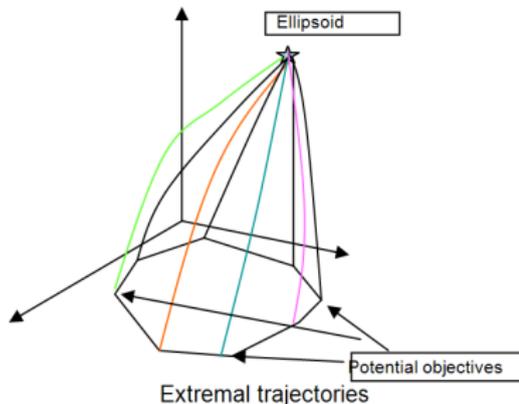
Localisation de cible manœuvrante : étape de prédiction

- Propagation ellipsoïdale des bornes par le modèle dynamique
- Prédiction des trajectoires extrêmes à partir des bornes de l'ellipsoïde vers la zone défendue
- Entrée de commande inconnue, mais bornée (accélération maximale)

- Mise à jour itérative :
$$\begin{cases} x_{k/k-1} = A_{k-1}x_{k-1/k-1} + H_{k-1}u_{k-1} \\ P_{k/k-1} = A_{k-1}P_{k-1}A_{k-1}^T \end{cases}$$



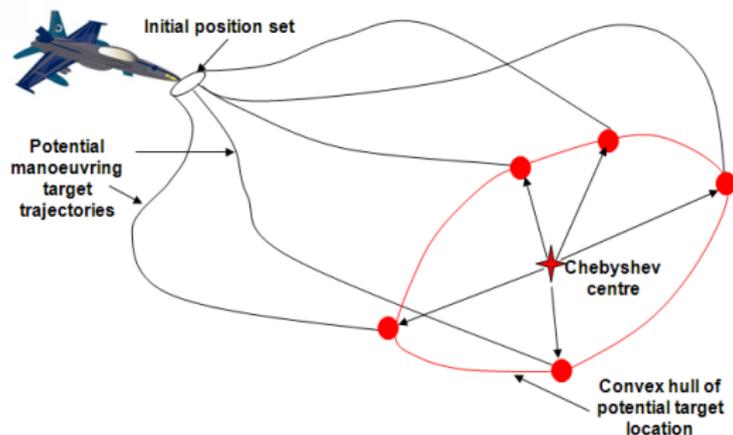
Extreme points

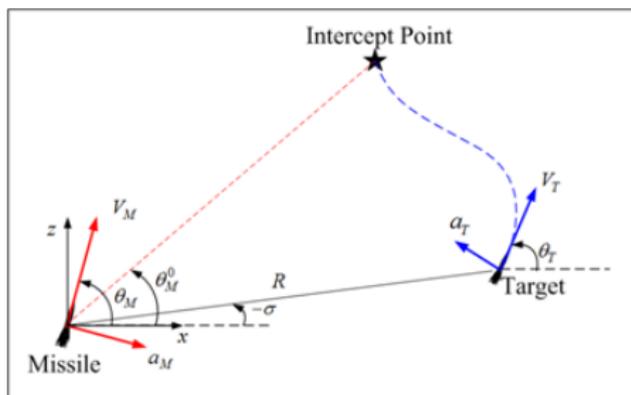


Extremal trajectories

Localisation de cible manœuvrante : étape de prédiction

- Calcul de l'enveloppe convexe et détermination du centre de Chebyshev (minimisation de la distance maximale)
- Estimée minimax \rightarrow limitation de l'accélération requise pour l'interception
- Possibilité de limiter le volume atteignable (rejet des points les plus éloignés)



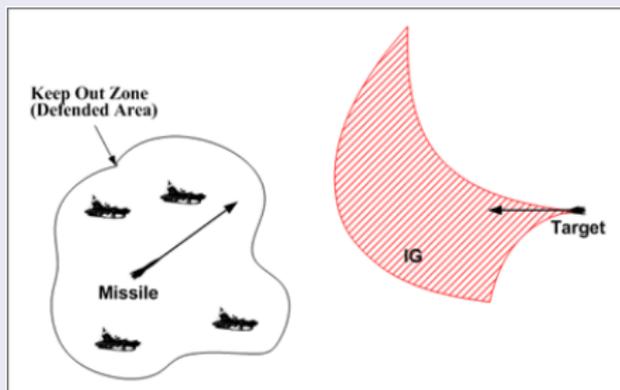


- Point d'interception (centre de Chebyshev prédit) à rejoindre, plutôt que la cible elle-même
- Lois considérées
 - loi de navigation proportionnelle classique
 - commande optimale (minimisation énergie, angle d'impact)

Stratégie de guidage

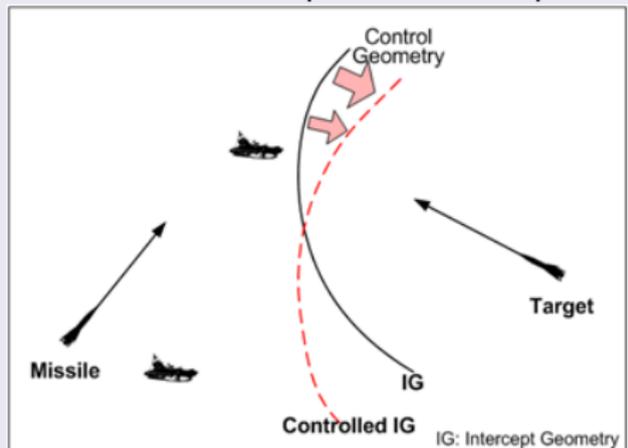
Cas n°1

Positions défendues en dehors de l'espace atteignable de la cible \Rightarrow se diriger vers le centre de Chebyshev

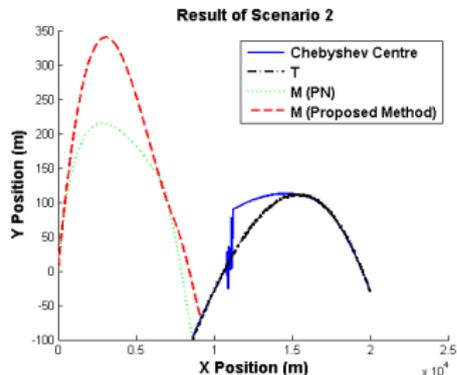
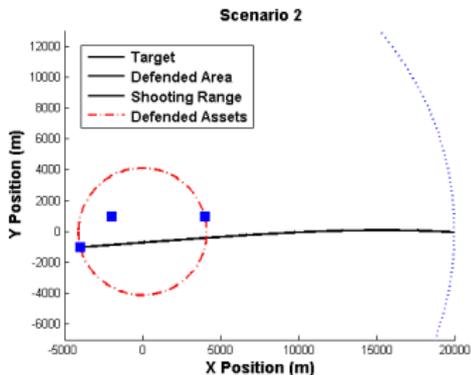
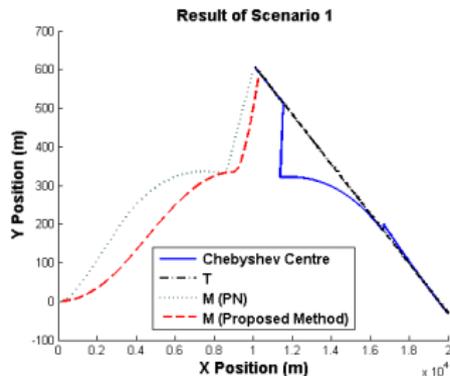
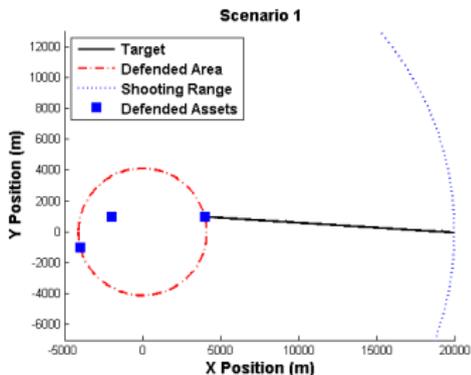


Cas n°2

Au moins une position défendue est dans l'espace atteignable de la cible \Rightarrow rallier ce point d'interception



Loi de guidage : résultats



Navigation d'un mini-drone en présence de vent

Détection et estimation des perturbations aérologiques

Guidage robuste à la perturbation

Localisation de cible manœuvrante pour l'interception

Localisation de la cible

Loi de guidage

Conclusions et perspectives

Navigation d'un mini-drone en présence de vent

- Guidage d'un mini-drone en environnement urbain
- Estimation ensembliste de l'état du drone et des perturbations aérologiques
- Expérimentation concluante pour la détection de rafales
- Loi de guidage utilisant ces informations → navigation améliorée

Localisation de cible manœuvrante pour l'interception

- Prédiction ensembliste de la localisation d'une cible manœuvrante
- Caractérisation ellipsoïdale, prédiction de trajectoires extrêmes
- Détermination d'un point d'interception à rallier
- Adaptation de la loi de guidage → meilleures conditions d'interception

Futures applications des approches ensemblistes

- Diagnostic de défauts
- Guidage coopératif

Navigation d'un mini-drone en présence de vent

- Achour, W. *Estimation a erreurs bornées et guidage pilotage des aéronefs autonomes en milieu perturbé*. Thèse de doctorat de l'Université Paris-Sud XI, 2011
- Achour, W., Piet-Lahanier, H. et Siguerdidjane, H. *Wind field bounded error identification and robust guidance law design for a small-scaled helicopter*. IFAC Symposium on Automatic Control in aerospace, ACA'10, Nara, Japon, 2010
- Achour, W., Piet-Lahanier, H. et Siguerdidjane, H. *Estimation ensembliste des perturbations aérologiques agissant sur un hélicoptère miniature*. CIFA'2010. Nancy, France. 2010.
- Achour, W., Piet-Lahanier, H. et Siguerdidjane, H. *Bounded error detection of the wind gusts effect on a small-scaled helicopter*. IFAC Workshop AGNFCS'09, Samara, Russie, 2009.

Localisation de cible manœuvrante pour l'interception

- Shin, H-S., Piet-Lahanier, H., Tsourdos, A., Le Menec, S., Markham, K. et White, B. A. *Membership Set-Based Mid Course Guidance : Application to manoeuvring Target Interception*. IFAC World Congress, Milan, Italie, 2011

Références utilisées dans ces travaux

- Maksarov, D. G. and Norton, J. P. *Computationally efficient algorithms for state estimation with ellipsoidal approximations*. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, pp. 411-434, 2002.
- Botkin, N. and Turova-Botkina, V. *An algorithm for finding the Chebyshev center of a convex polyhedron*, Applied Math. And Optim., 29 (2), pp. 211-222, 1994.