

Supervision Aérienne Coordonnée Fiable et Sécurisée

José Alfredo Guerrero Mata

Heudiasyc Lab., Université de Technologie de Compiègne

Objectives

- **Développer une architecture de supervision aérienne d'espaces géographiques larges.**
- **Développement d'une infrastructure de communication inter-drones fiable et sécurisée.**
- **Cette architecture est basée sur un ensemble de drones organisé en formation synchronisé horizontale qui parcourt une zone déterminée pour relever des informations comme la détection d'incendies, recherches d'individus, etc.**
- **Ces informations sont transmises à une plate-forme de supervision et de prévention afin de déclencher les actions nécessaires (appel de pompiers, agents de sécurité, etc.).**
- **L'infrastructure de communication permettra la synchronisation de vols en formation horizontale en vue d'optimiser la couverture de la zone supervisée, éviter les collisions inter-drone, détecter leurs pannes et s'auto-organiser, ...**

Plan

- **Introduction**
- **Modèle Dynamique**
- **Graphe d'Information**
- **Commande Vol en Formation**
- **Résultats de Simulation**
- **Résultats Experimentales**
- **Conclusions & Perspectives**

Applications du Vol en Formation

➤ Le problème du vol en formation est présent dans de nombreuses applications.

➤ **Civil:**

- Sécurité dans des frontières.
- Transportation de charges lourds.
- Réseaux de communication, etc.

➤ **Militaire:**

- Recherche des planètes habitables ou semblables à la Terre.
- Ravitaillement en vol.



Projet Helistat



Projet Skyhook



Ravitaillement en Vol



Vol en Formation Patrouille de France



Elements d'un Système Multi-Véhicule

- Dynamique du véhicule

$$\dot{x}_i = f(x_i, u_i)$$

$$y_i = h(x_i)$$

- « Rôle » du véhicule

$\alpha \in A$ est la relation entre l'état interne et la tâche du véhicule

- Graphe d'échange d'information

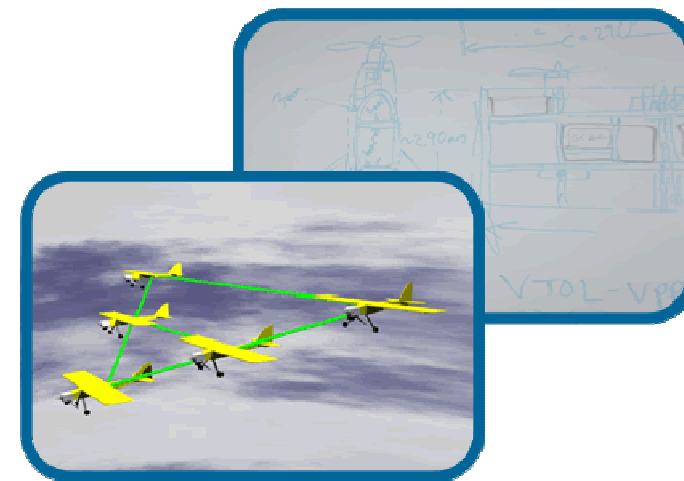
Permet la modélisation de l'échange d'information inter-véhicule

- Canal de Communication

Perte de données, des retards, etc.

- Stratégie de Commande Individuelle

- Stratégie de Commande Collective



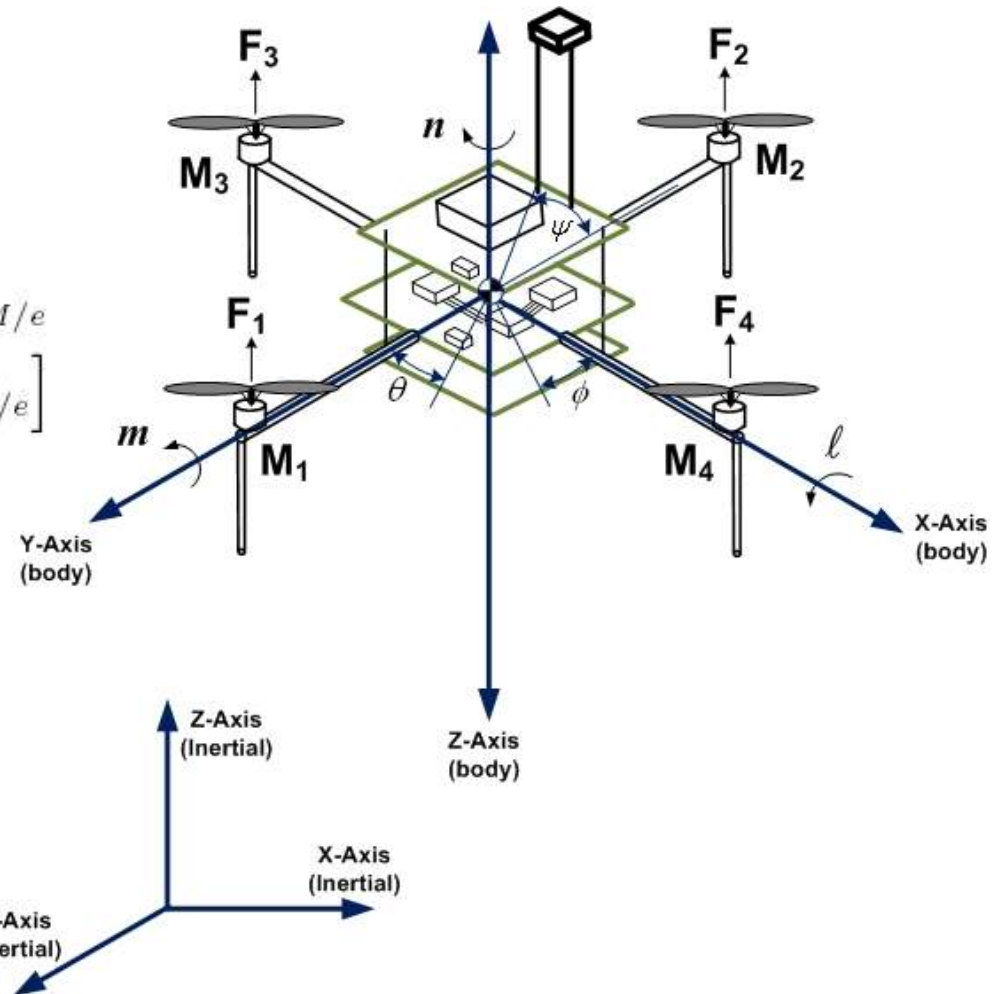
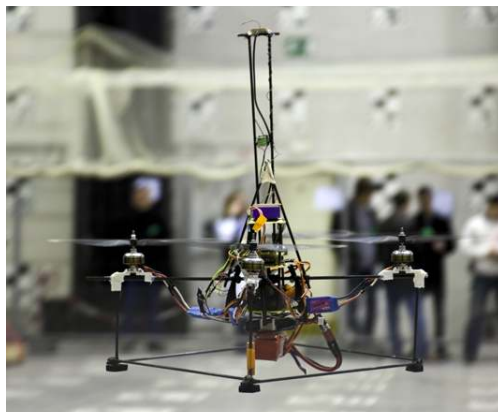
Modèle Dynamique

$${}^e \dot{\mathbf{P}}_{CM/T} = C_{n/b} \mathbf{v}_{CM/e}^b$$

$$\dot{\Phi} = H(\Phi) \omega_{b/e}^b$$

$${}^b \dot{\mathbf{v}}_{CM/e}^b = \frac{\mathbf{F}_{A,T}^b}{m} + C_{b/n} \mathbf{g}^n - \Omega_{b/e}^b \mathbf{v}_{CM/e}^b$$

$${}^b \dot{\omega}_{b/e}^b = (J^b)^{-1} [\mathbf{M}_{A/T}^b - \Omega_{b/e}^b J^b \omega_{b/e}^b]$$



Modèle Dynamique (Hélicoptère à quatre rotors)

➤ Modèle dynamique

$$m \ddot{x} = -T \sin \theta$$

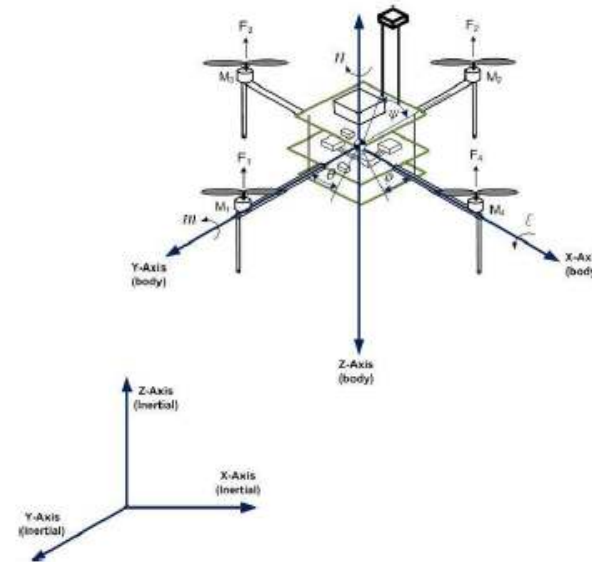
$$m \ddot{y} = T \cos \theta \sin \phi$$

$$m \ddot{z} = T \cos \theta \cos \theta - mg$$

$$\ddot{\phi} = \tilde{\tau}_\phi$$

$$\ddot{\theta} = \tilde{\tau}_\theta$$

$$\ddot{\psi} = \tilde{\tau}_\psi$$



➤ Lois de Commande

$$T = \frac{-a_1 \dot{z} - a_2 (z - z^d) + g}{\cos \phi \cos \theta}$$

$$\tilde{\tau}_\psi = -a_3 \dot{\psi} - a_4 (\psi - \psi^d)$$

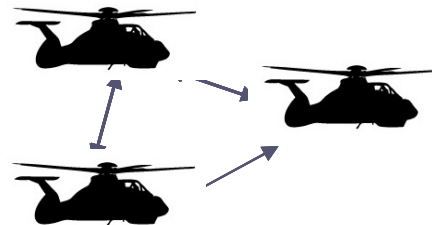
$$\tilde{\tau}_\theta = -\sigma_1 (\dot{\theta} - \sigma_2 (\dot{\theta} + \theta - \sigma_3 (\dot{\theta} + 2\theta - \dot{x} - \sigma_4 (\dot{\theta} + 3\theta - 3\dot{x} - x))))$$

$$\tilde{\tau}_\phi = -\sigma_1 (\dot{\phi} - \sigma_2 (\dot{\phi} + \phi - \sigma_3 (\dot{\phi} + 2\phi + \dot{y} - \sigma_4 (\dot{\phi} + 3\phi + 3\dot{y} + y))))$$

Du Comportement Individuelle au Comportement Colective

- Considère un système multi-véhicule avec topologie d'échange d'information inter-véhicule

Topologie en boucle



- **Modèle Dynamique**

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{11} \\ x_{22} \\ x_{33} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_{11}$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}$$

$$\left. \begin{array}{l} \dot{x} = -Lx + Bu \\ y = Cx \end{array} \right\} (1)$$

Propriétés des Systèmes Multi-agent

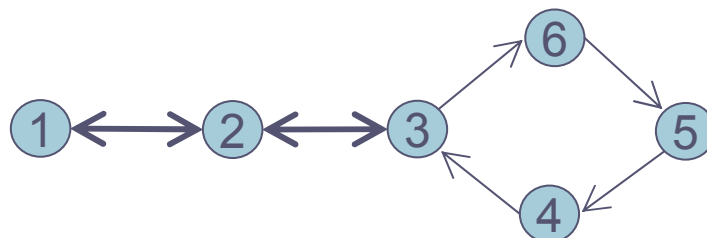
- **Observabilité** : Le système (1) n'est pas observable si $c^T \omega_i = 0$ pour certain vecteur propre de L , ω_i .
Si $c^T \omega_i = 0$ pour certain $i=2, \dots, n$, le système a des modes non observables, mais ces modes sont stables asymptotiquement.
- **Contrôlabilité** : Le système (1) n'est pas contrôlable si $v_i^T b = 0$ pour certain vecteur propre de L^T , v_i .
Si $v_i^T b = 0$ pour certain $i=2, \dots, n$, le système a des modes non contrôlables, mais ces modes sont stables asymptotiquement.
- **Lemme 1** : Le centre de masse du système multi-agent (1) correspond à des modes qui sont contrôlables et observables.

- **Loi de commande**

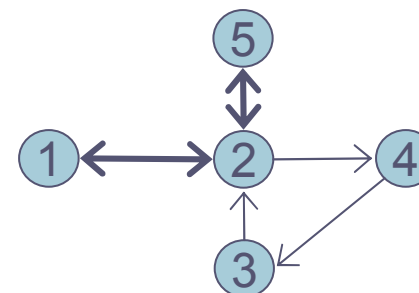
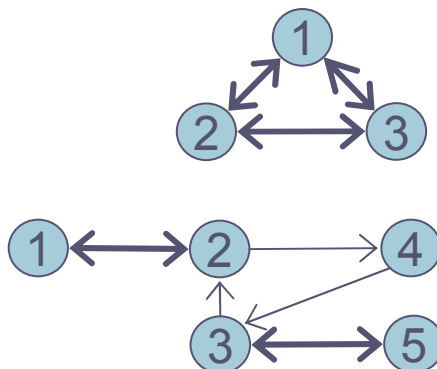
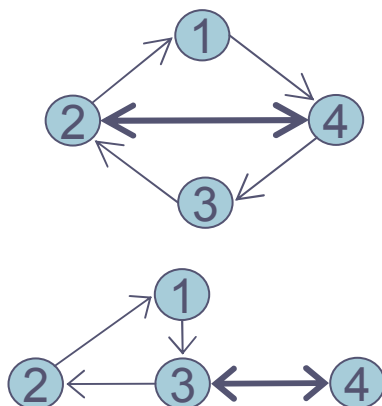
$$u = Nksat \left\{ \dot{x}_{CM} - \dot{x}_{CM}^d \right\} \quad (2)$$

Combinations de Topologies Boucle et Chaîne

- Des réseaux des agents qui sont contrôlables et observables peuvent être obtenus à partir de la combinaison des topologies chaîne et boucle.
- Des combinaisons de topologies chaîne et boucle sont contrôlables et observables



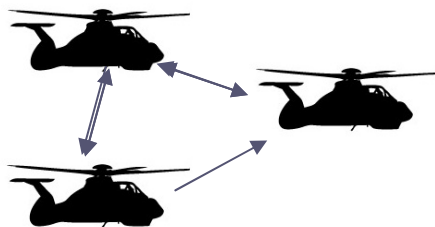
- Les configurations ci-dessous ne sont pas contrôlables et/ou observables.



Conception d'un Observateur d'état

- En raison de la nature de l'échange d'information entre les drones; généralement, l'état n'est pas accessible pour le leader.
- Comme la loi de commande est basée sur le centre de masse du système multi-agent, l'état doit être estimé.
- Nous proposons d'utiliser l'observateur d'état

Topologie en triangle

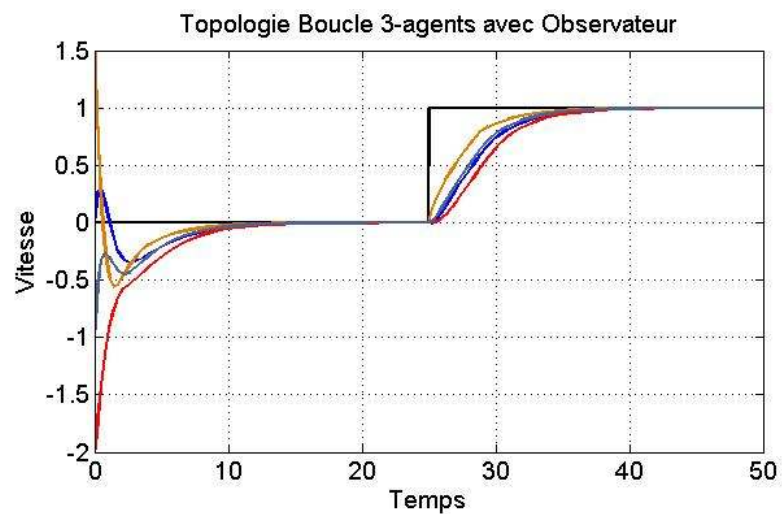
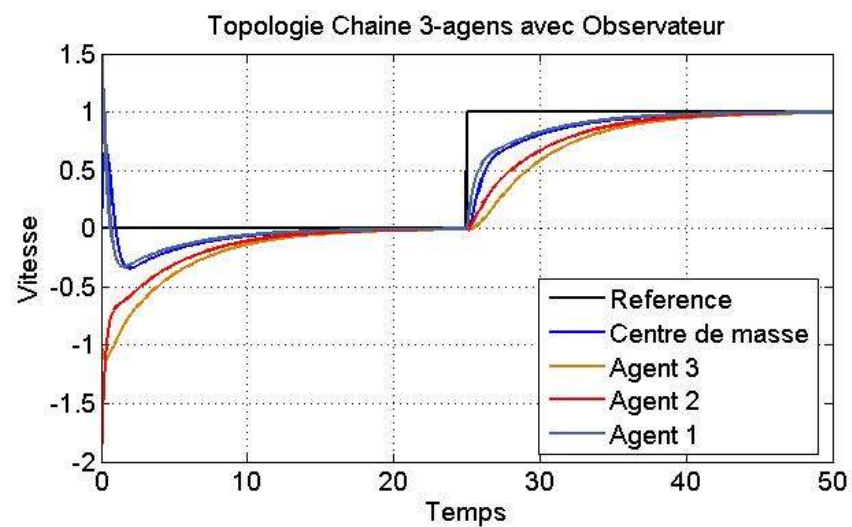
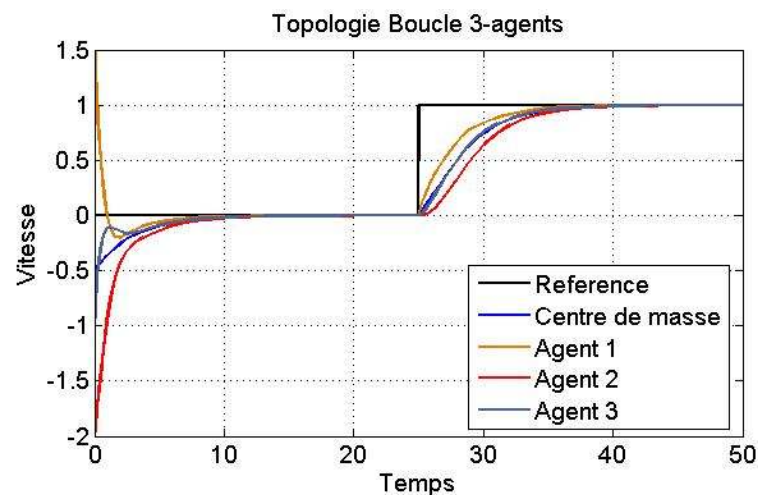
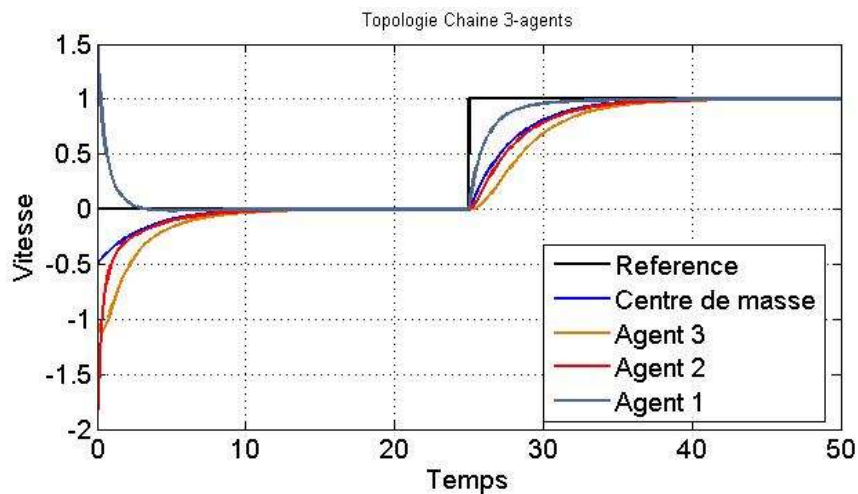


$$\dot{x} = Ax + Bu(x)$$

$$\dot{\hat{x}} = \bar{L}Cx + (A - \bar{L}C)\hat{x} - u(\hat{x})$$

$$y = Cx$$

Résultats de Simulations



Commande Robuste en considérant de l'Incertitude Paramétrique

- Nous considérons le système suivant.

$$\Sigma_{un} \triangleq \begin{cases} \dot{\eta} = A(q^-)\eta + Bu + B\Gamma(r)\eta \\ y = C\eta \end{cases}$$

- Si la incertitude n'est pas trop large par rapport à l'entrée.

$$\Sigma_{nom} \triangleq \begin{cases} \dot{\eta} = A(q^-)\eta + Bu \\ y = C\eta \end{cases}$$

- La loi de commande suivante permet que le système soit robustement stable.

$$u = -B^T S \eta$$

Analyse de la Stabilité en Considérant des Retards

- Nous considérons des systèmes dans la forme

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -Lx + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad \longrightarrow \quad \dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -q_0 & -q_1 & \dots & -q_{n-1} \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ r_0 \end{bmatrix} u(t - \tau)$$

- Avec équation caractéristique

$$p(s, \mathbf{q}, \mathbf{r}, e^{-\tau s}) = s^n + [q_{n-1}^-, q_{n-1}^+]s^{n-1} + \dots + [q^-, q^+]s + [q_0^-, q_0^+] + (k_{n-1}s^{n-1} + \dots + k_1s + k_0)e^{-[0, \tau_{\max}]s} \quad \longrightarrow \quad P_\tau \triangleq \left\{ \begin{array}{l} p(s, \mathbf{q}, \mathbf{r}, e^{-\tau s}) : \mathbf{q} \in Q; \\ \mathbf{r} \in R; \tau \in [0, \tau_{\max}] \end{array} \right\}$$

- Pour P_τ , le « value set » est défini comme

$$V_\tau(\omega) \triangleq \left\{ \begin{array}{l} p(s, \mathbf{q}, \mathbf{r}, e^{-j\omega\tau}) : \mathbf{q} \in Q; \\ \mathbf{r} \in R; \tau \in [0, \tau_{\max}]; \omega \in \mathbb{R} \end{array} \right\}$$

- Le système est robustement stable si

$$0 \notin V_\tau(\omega) \quad \forall \omega \geq 0$$

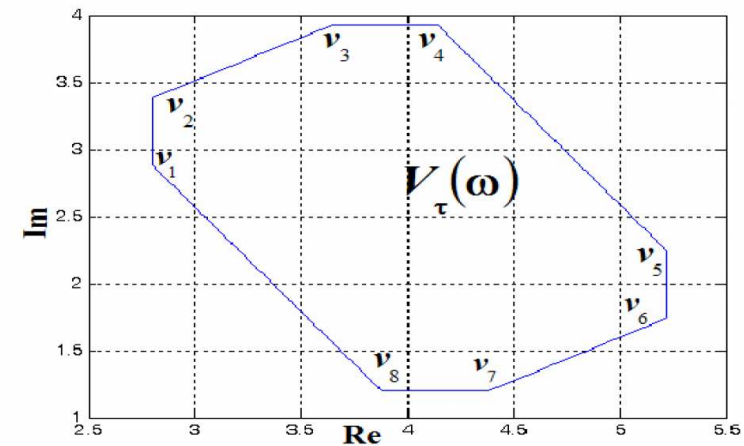
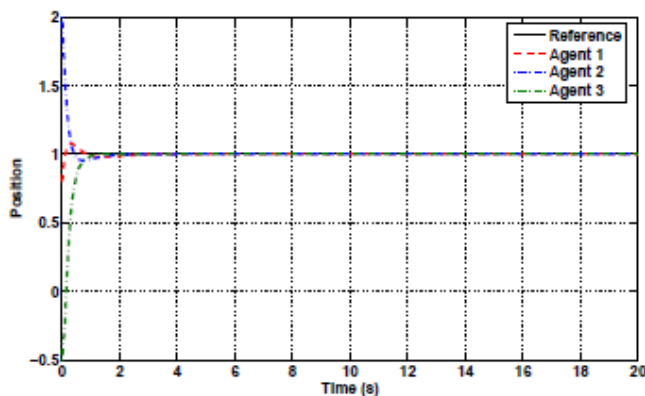
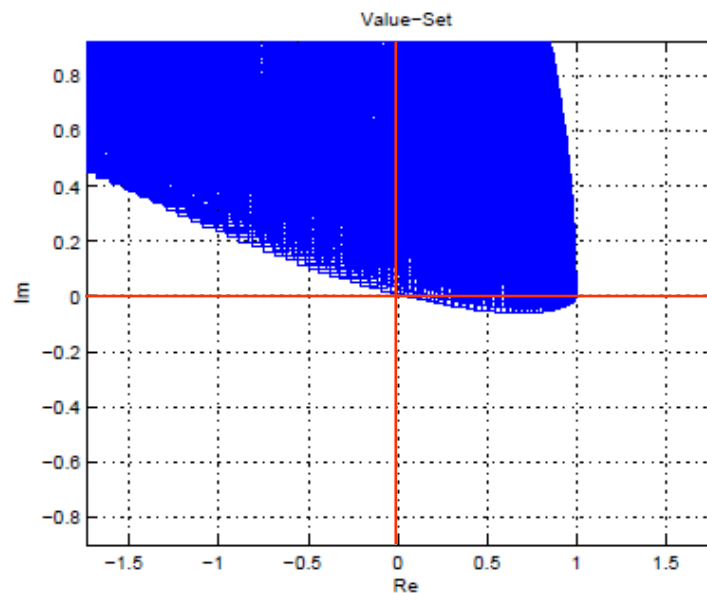
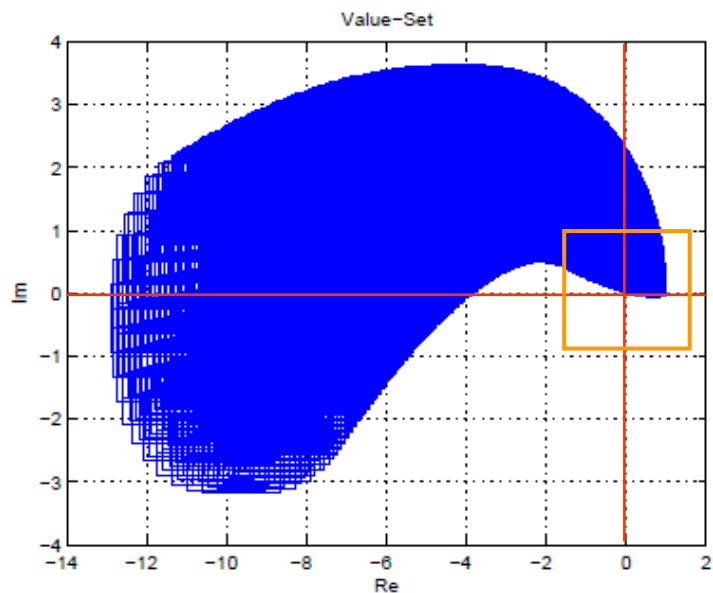
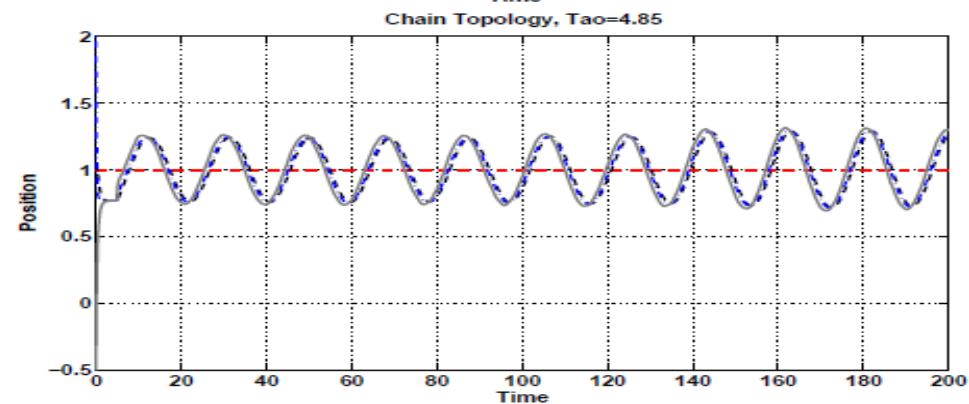
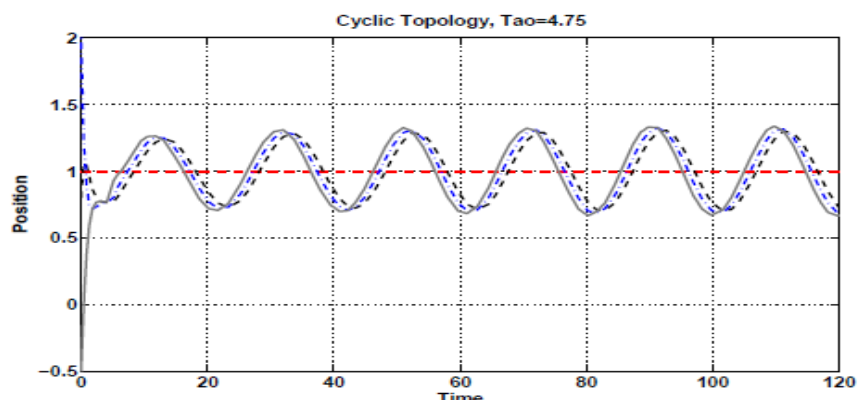
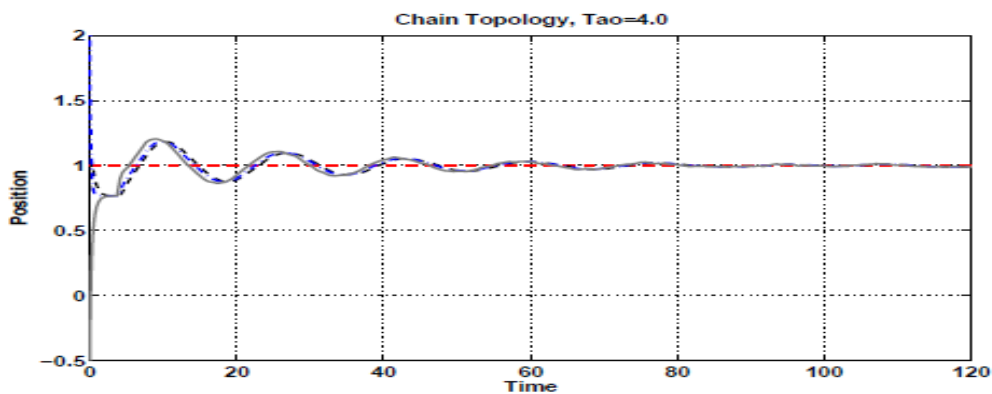
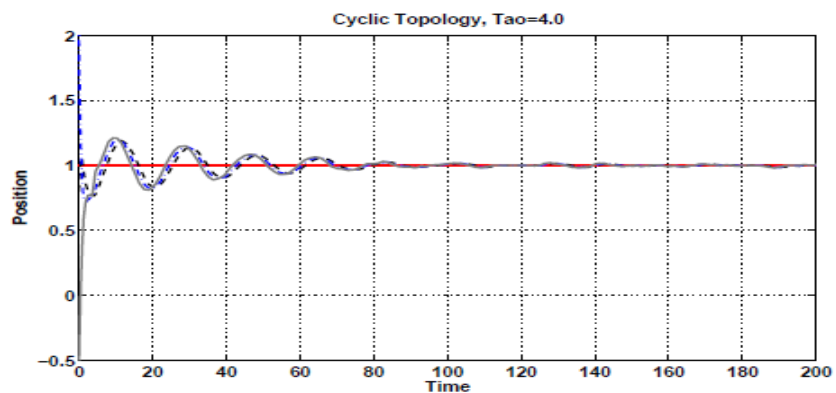
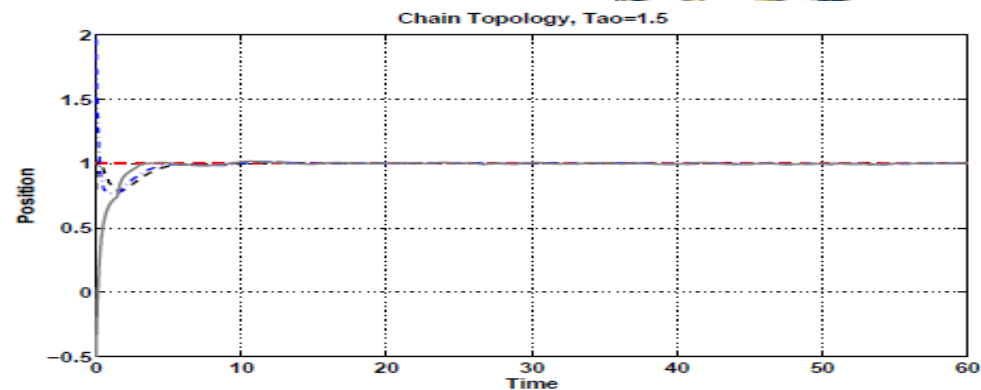
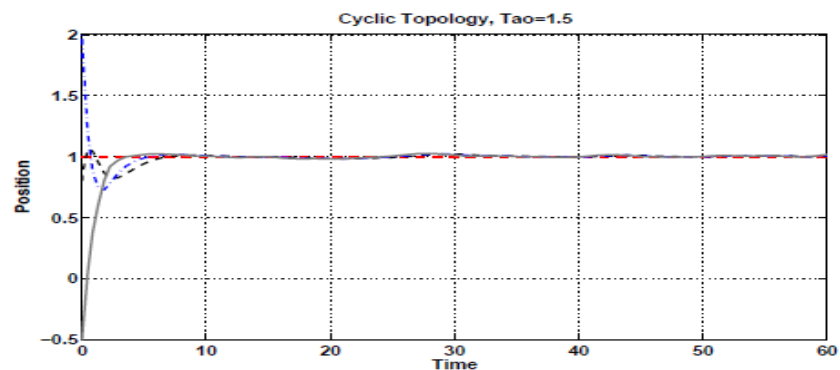


FIGURE 2. Value set for fixed ω and τ .

Résultats de Simulations



Topologie Boucle. $Tao_max=4.2$
Topologie Chaîne. $Tao_max=4.3$



Vol en Formation

Lois de Commande

$$T = \frac{-a_1 \dot{z} - a_2 (z - z^d) + g}{\cos \phi \cos \theta} \quad \tilde{\tau}_\psi = -a_3 \dot{\psi} - a_4 (\psi - \psi^d)$$

$$\tilde{\tau}_\theta = -\sigma_1 (\dot{\theta} - \sigma_2 (\dot{\theta} + \theta - \sigma_3 (\dot{\theta} + 2\theta - \dot{x} - \sigma_4 (\dot{\theta} + 3\theta - 3\dot{x} - x))))$$

$$\tilde{\tau}_\phi = -\sigma_1 (\dot{\phi} - \sigma_2 (\dot{\phi} + \phi - \sigma_3 (\dot{\phi} + 2\phi + \dot{y} - \sigma_4 (\dot{\phi} + 3\phi + 3\dot{y} + y))))$$

$$\dot{x} = -Lx + Bu \quad \equiv \quad \dot{x}_i = -\sum_{j \in N_i} (x_j - x_i) + b_i u_i$$

$$x \equiv \sum_{j \in N_i} (x_j - x_i) \quad \longrightarrow \quad (x_j - x_i) \rightarrow 0$$

$$\tilde{\tau}_{\theta_i} = -\sigma_4 \left(\dot{\theta} + \sigma_3 \left(\dot{\theta} + \theta + \sigma_2 \left(\dot{\theta} + 2\theta - \dot{x} + \sigma_1 \left(\dot{\theta} + 3\theta - 3\dot{x} - \sum_{j \in N_i} (x_j - x_i) - x_i^d \right) \right) \right) \right)$$

$$\tilde{\tau}_{\phi_i} = -\sigma_4 \left(\dot{\phi} + \sigma_3 \left(\dot{\phi} + \phi + \sigma_2 \left(\dot{\phi} + 2\phi + \dot{y} + \sigma_1 \left(\dot{\phi} + 3\phi + 3\dot{y} - \sum_{j \in N_i} (y_j - y_i) - y_i^d \right) \right) \right) \right)$$

Vol en Formation

➤ Équations dynamiques du Vol en Formation:

$$T_i = \frac{-a_1 \dot{z} - a_2 (z - z^d) + g}{\cos \phi \cos \theta}$$

$$\tau_{\psi_i} = \sum_{j \in N_i} [(\dot{\psi}_i - \dot{\psi}_j) + (\psi_i - \psi_j)] - \lambda \psi_i$$

$$\tilde{\tau}_{\theta_i} = -\sigma_4 \left(\dot{\theta} + \sigma_3 \left(\dot{\theta} + \theta + \sigma_2 \left(\dot{\theta} + 2\theta - \dot{x} + \sigma_1 \left(\dot{\theta} + 3\theta - 3\dot{x} - \sum_{j \in N_i} (x_j - x_i) - x_i^d \right) \right) \right) \right)$$

$$\tilde{\tau}_{\phi_i} = -\sigma_4 \left(\dot{\phi} + \sigma_3 \left(\dot{\phi} + \phi + \sigma_2 \left(\dot{\phi} + 2\phi + \dot{y} + \sigma_1 \left(\dot{\phi} + 3\phi + 3\dot{y} - \sum_{j \in N_i} (y_j - y_i) - y_i^d \right) \right) \right) \right)$$

$$\tilde{\tau}_{\theta_i} = -\sigma_4 \left(\dot{\theta} + \sigma_3 \left(\dot{\theta} + \theta + \sigma_2 \left(\dot{\theta} + 2\theta - \dot{x} + \sigma_1 \left(\dot{\theta} + 3\theta - 3\dot{x} - \sum_{j \in N_i} (x_j - x_i) - x_i^d - u_{CM}(x) \right) \right) \right) \right)$$

$$\tilde{\tau}_{\phi_i} = -\sigma_4 \left(\dot{\phi} + \sigma_3 \left(\dot{\phi} + \phi + \sigma_2 \left(\dot{\phi} + 2\phi + \dot{y} + \sigma_1 \left(\dot{\phi} + 3\phi + 3\dot{y} - \sum_{j \in N_i} (y_j - y_i) - y_i^d - u_{CM}(y) \right) \right) \right) \right)$$

$$x_1 - x_2 = r \cos(\pi / 6)$$

$$x_3 - x_1 = -r \sin(\pi / 6)$$

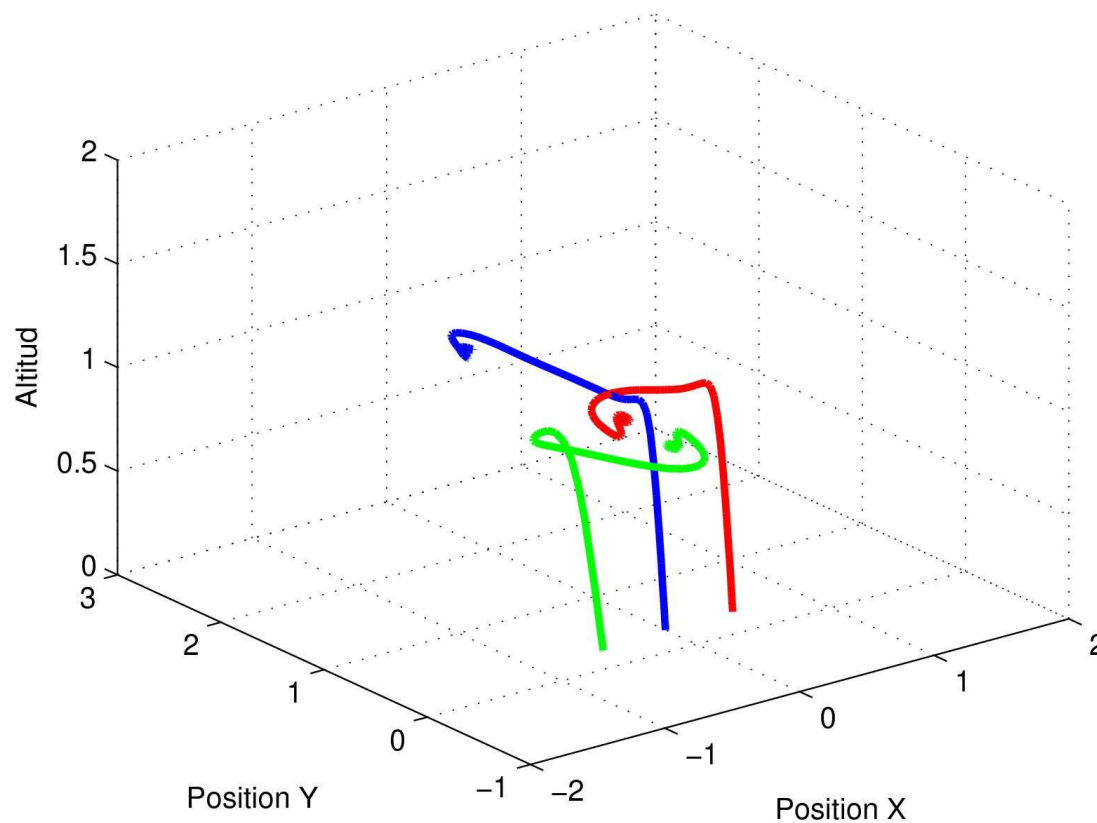
$$x_2 - x_3 = r \sin(\pi / 2)$$

$$y_1 - y_2 = r \sin(\pi / 6)$$

$$y_3 - y_1 = -r \cos(\pi / 6)$$

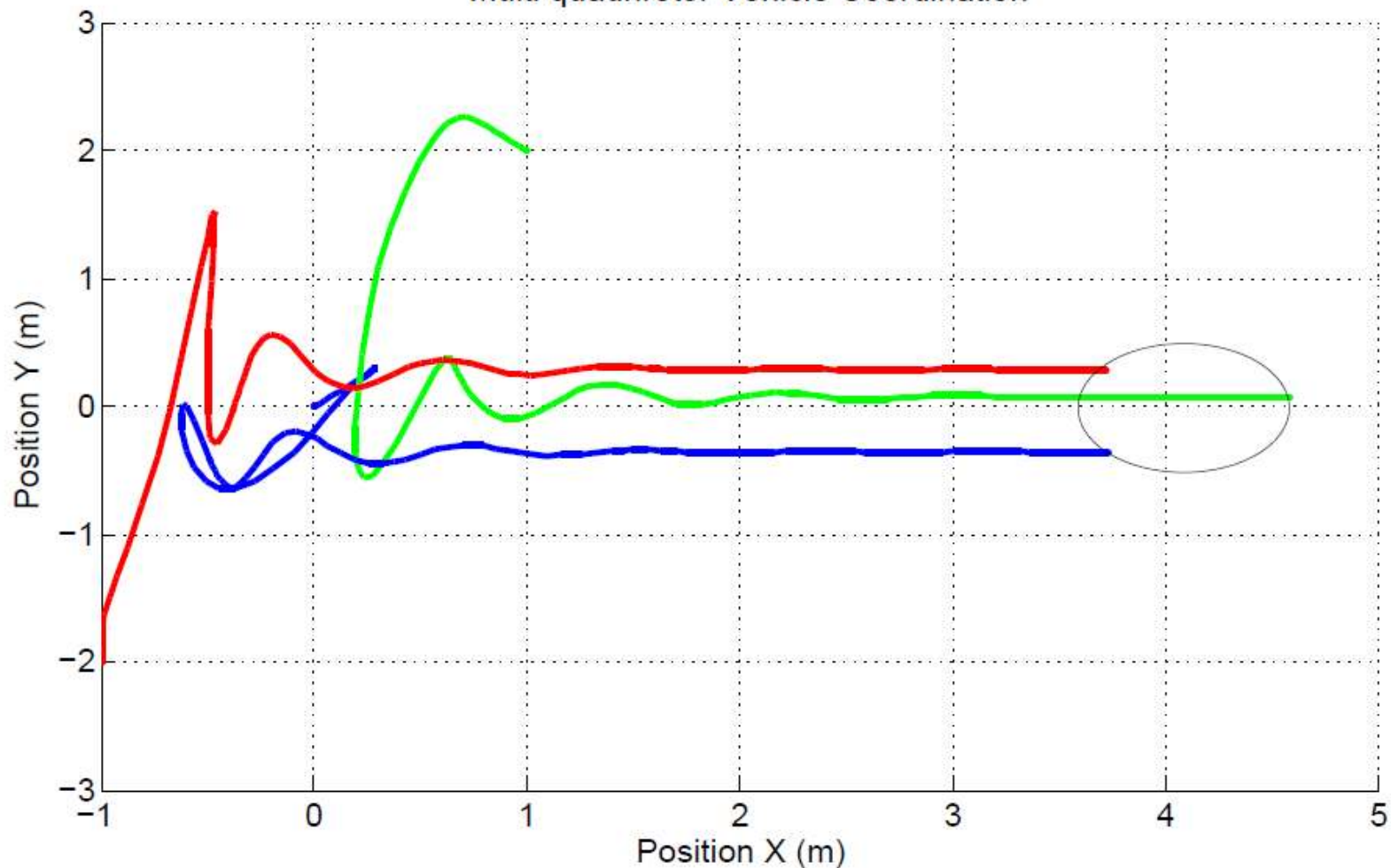
$$y_2 - y_3 = 2r \cos(\pi / 6)$$

Résultats de Simulations



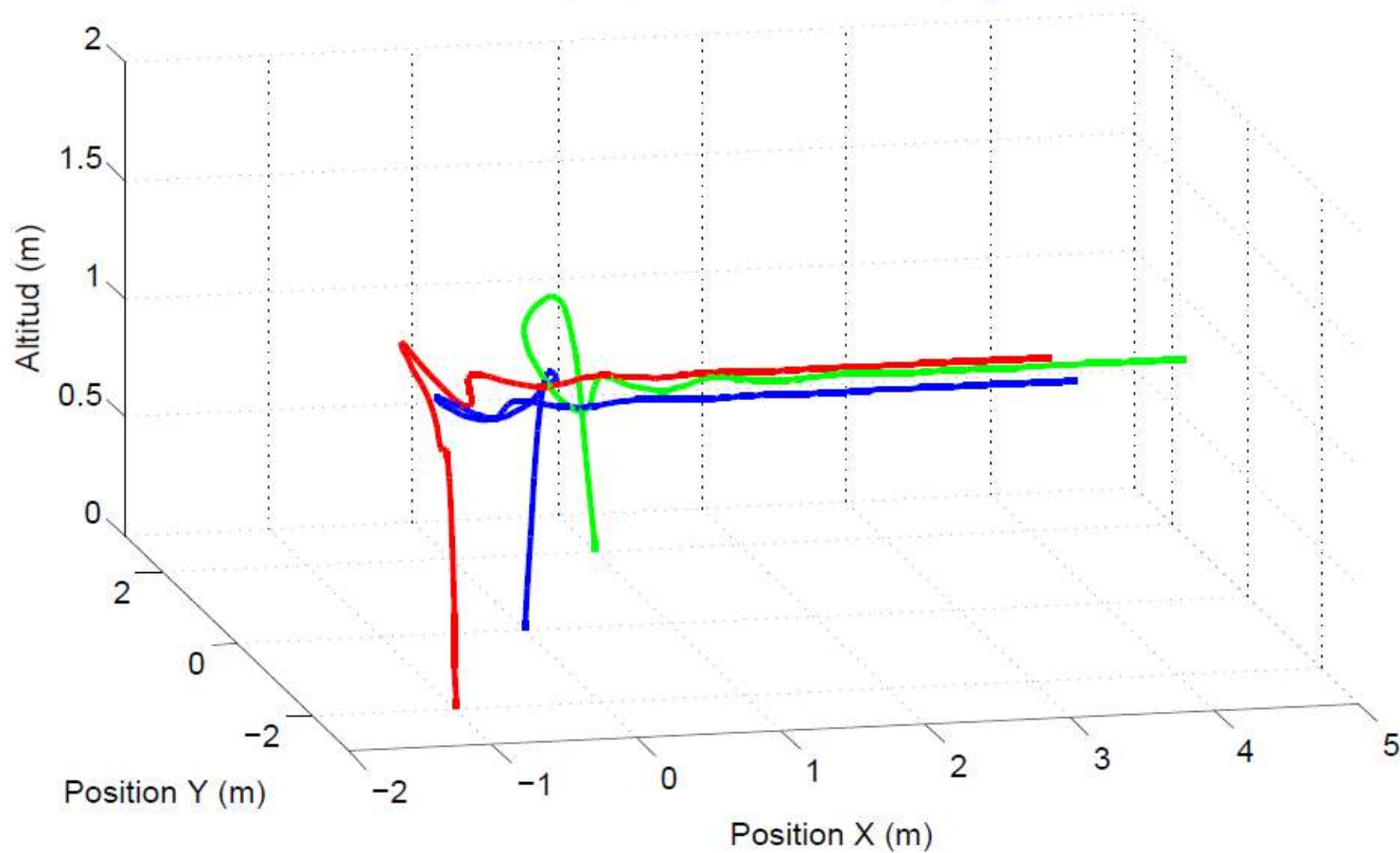
Résultats de Simulations

Multi quadrirotor Vehicle Coordination



Résultats de Simulations

Multiple quadrirotor formation flying



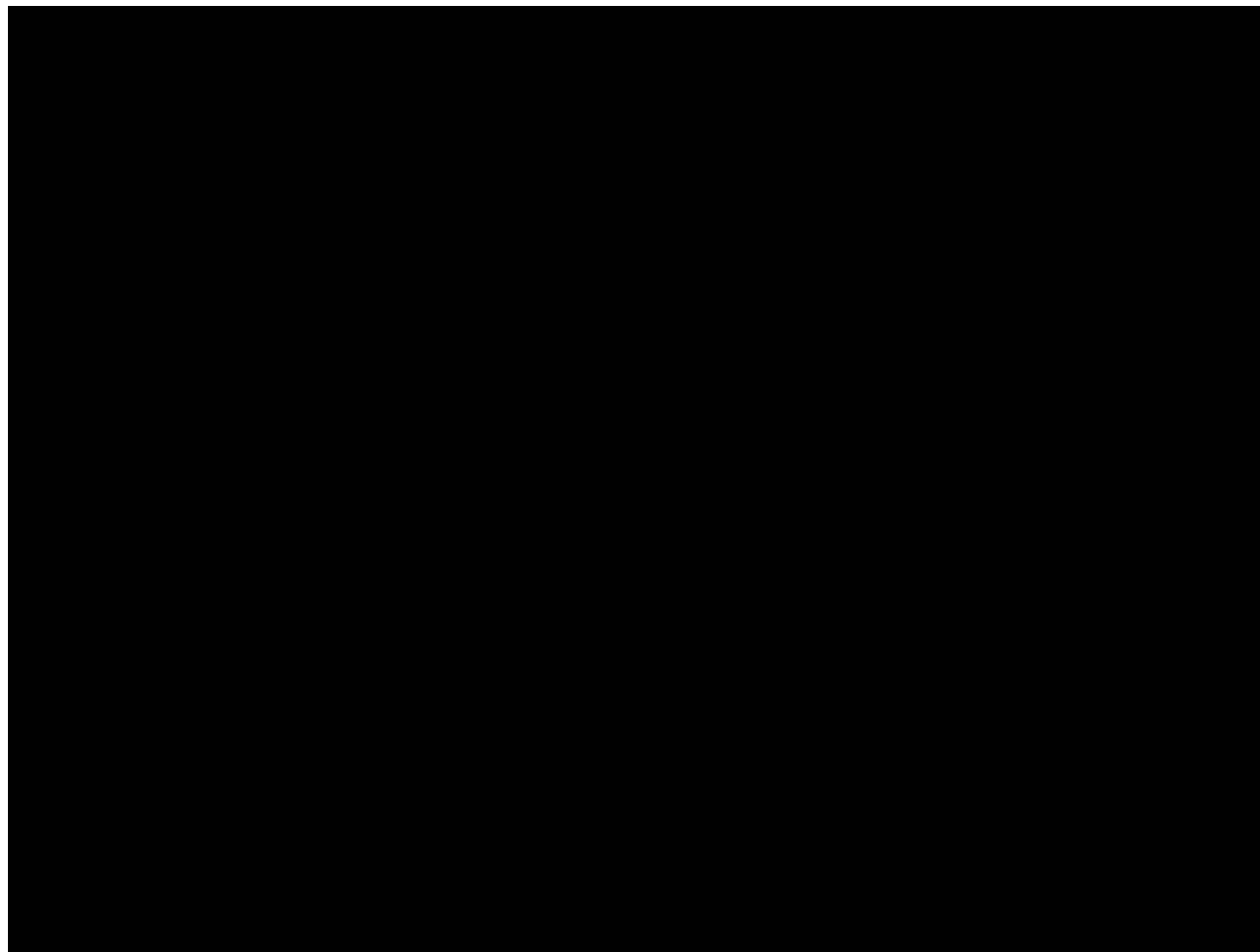
Synchronisation de Roulis et Tangage + Vitesse GPS



Coordination du Lacet



Coordination d'Attitude



Conclusions

- L'observabilité and la contrôlabilité pour des systèmes multi-véhicule ont été étudiées.
- Suivi d'une trajectoire constant en utilisant le centre de masse du système multi-véhicule.
- Pour estimer l'état a partir de l'entre et la sortie du leader, un observateur d'état a été développé.
- Développement des lois de commande robustes pour des systèmes multi-véhicule en considérant incertitude paramétrique.
- Analyse de la stabilité en considérant des retards.
- Développement des lois de commande pour le vol en formation de multiples véhicules autonomes
- Plates-formes en temps réel et communication entre le PC hôte et le véhicule autonome.

Perpectives

- Développement des lois de commande pour le suivi de trajectoire non linéaire.
- Analyse de la stabilité du système multi-véhicule en considérant la perte de données et en utilisant des différents protocoles de communication. Analyse de la stabilité locale et collective
- Analyse des retards en utilisant des protocoles de communication standard (a/ Yacine)
- Développement de la plate-forme expérimental pour la validation des résultats théoriques. Opération à l'extérieur en utilisant des récepteurs GPS.

Références

- [1] R. Lozano, Mark W. Spong, **J.A. Guerrero**, N. Chopra, « Trajectory Tracking of Multiple Agent Systems », in *IEEE Conference on Decision and Control (CDC 2008)*, Cancun, México, 2008.
- [2] **J.A. Guerrero**, I. Fantoni, S. Salazar, R. Lozano, « Flight Formation of Multiple Rotorcrafts », in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2010)*, Alaska, 2010.
- [3] **J.A. Guerrero**, G. Romero, R. Lozano, "Robust Consensus Tracking of Leader-Based Multi-Agent System ", in *IEEE American Control Conference (ACC 2010)*, Baltimore, 2010.
- [4] **J.A. Guerrero**, R. Lozano, "Flight Formation of Multiple Mini Rotorcraft based on Nested Saturations", in *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2010)*, Taiwan, 2010.

Merci de votre attention

Questions?