

Contexte

Introduction

Présentation du  
concept GLMAV

Modélisation

Commande

Commande en  
cascade

Commande par  
backstepping

Commande par  
backstepping  
approché

Conclusion &  
Perspectives

# COMMANDE NON LINEAIRE POUR LA POURSUITE DE TRAJECTOIRES DE DRONES PROJECTILES MINIATURES

**Adrien DROUOT**, Edouard RICHARD, Mohamed BOUTAYEB

GDR MACS - GT UAV - 10 novembre 2011



Nancy-Université  
*Université  
Henri Poincaré*

Contexte

Introduction

Présentation du  
concept GLMAV

Modélisation

Commande

Commande en  
cascade

Commande par  
backstepping

Commande par  
backstepping  
approché

Conclusion &  
Perspectives

- 1 Contexte
- 2 Introduction
- 3 Présentation du concept GLMAV
- 4 Modélisation
- 5 Commande
  - Commande en cascade
  - Commande par backstepping
  - Commande par backstepping approché
- 6 Conclusion & Perspectives

## Contexte

Introduction

Présentation du  
concept GLMAV

Modélisation

Commande

Commande en  
cascade

Commande par  
backstepping

Commande par  
backstepping  
approché

Conclusion &  
Perspectives

## 1 Contexte

## 2 Introduction

## 3 Présentation du concept GLMAV

## 4 Modélisation

## 5 Commande

Commande en cascade

Commande par backstepping

Commande par backstepping approché

## 6 Conclusion & Perspectives

# DEMONSTRATEUR GUN LAUNCHED MICRO AERIAL VEHICLE

Contexte

Introduction

Présentation du  
concept GLMAV

Modélisation

Commande

Commande en  
cascade

Commande par  
backstepping

Commande par  
backstepping  
approché

Conclusion &  
Perspectives

Projet ANR - Concepts, Systèmes et Outils pour la Sécurité Globale

Coordinateur du projet : Patrick GNEMMI (ISL)



S. CHANGEY



M. BOUTAYEB



R. LOZANO



R. SYRIANI

Contexte

**Introduction**

Présentation du  
concept GLMAV

Modélisation

Commande

Commande en  
cascade

Commande par  
backstepping

Commande par  
backstepping  
approché

Conclusion &  
Perspectives

- 1 Contexte
- 2 Introduction**
- 3 Présentation du concept GLMAV
- 4 Modélisation
- 5 Commande
  - Commande en cascade
  - Commande par backstepping
  - Commande par backstepping approché
- 6 Conclusion & Perspectives

## Les drones

- Intérêt mondial grandissant
- Interventions en milieux sensibles ou hostiles
- Nombreuses stratégies de navigation

## Les types de drones

- Drones à voilure fixe ou tournante
- Drones à ailes battantes ou vibrantes
- Drones convertibles : voilure fixe  $\longleftrightarrow$  voilure tournante

## Le concept GLMAV

- Drone convertible : projectile  $\longrightarrow$  drone à voilure tournante

Contexte

Introduction

**Présentation du  
concept GLMAV**

Modélisation

Commande

Commande en  
cascade

Commande par  
backstepping

Commande par  
backstepping  
approché

Conclusion &  
Perspectives

1 Contexte

2 Introduction

**3 Présentation du concept GLMAV**

4 Modélisation

5 Commande

Commande en cascade

Commande par backstepping

Commande par backstepping approché

6 Conclusion & Perspectives

# LE CONCEPT GLMAV

Contexte

Introduction

Présentation du  
concept GLMAV

Modélisation

Commande

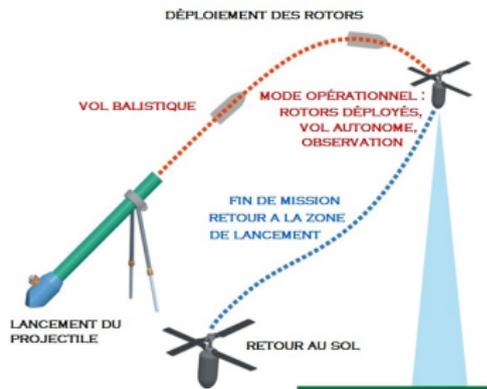
Commande en  
cascade

Commande par  
backstepping

Commande par  
backstepping  
approché

Conclusion &  
Perspectives

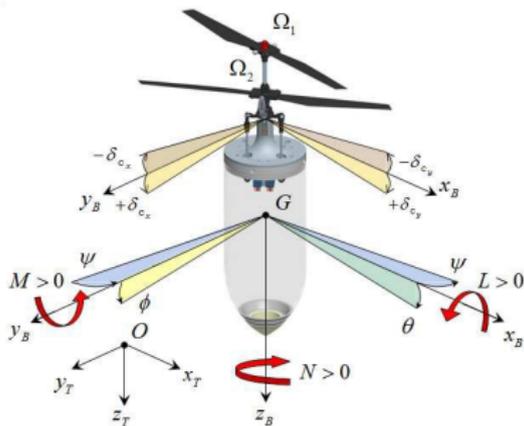
## Phases de vol du GLMAV



## Données de vol du GLMAV

- Hauteur d'observation : 100 m
- Portée de communication : 500 m
- Autonomie : 20 min

## Représentation du GLMAV



## Caractéristiques du GLMAV

- Masse : 800 g
- Diamètre du corps : 80 mm
- Diamètre des rotors : 250 mm

Contexte

Introduction

Présentation du  
concept GLMAV

**Modélisation**

Commande

Commande en  
cascade

Commande par  
backstepping

Commande par  
backstepping  
approché

Conclusion &  
Perspectives

1 Contexte

2 Introduction

3 Présentation du concept GLMAV

**4 Modélisation**

5 Commande

Commande en cascade

Commande par backstepping

Commande par backstepping approché

6 Conclusion & Perspectives

## Modèle non linéaire du GLMAV

$$\dot{p} = v$$

$$\dot{v} = a$$

$$ma = RT + mgz_T$$

$$J\dot{\Omega} = -\Omega \wedge J\Omega + \tau$$

## Variables

- $m$  la masse du GLMAV
- $p$  le vecteur position du GLMAV dans le repère terrestre
- $v$  le vecteur vitesse du GLMAV dans le repère terrestre
- $a$  le vecteur accélération du GLMAV dans le repère terrestre
- $T$  la force totale générée par les rotors coaxiaux
- $g$  l'accélération de la gravité
- $J$  la matrice d'inertie associée au centre de gravité
- $\Omega$  la vitesse angulaire du GLMAV dans le repère du GLMAV
- $\tau$  le couple total généré par les rotors coaxiaux

# LES FORCES ET LES COUPLES

Contexte

Introduction

Présentation du  
concept GLMAV

Modélisation

Commande

Commande en  
cascade

Commande par  
backstepping

Commande par  
backstepping  
approché

Conclusion &  
Perspectives

## Force totale générée par les rotors coaxiaux

$$T = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta \cos \delta_{c_x} \sin \delta_{c_y} \Omega_2^2 \\ \beta \sin \delta_{c_x} \Omega_2^2 \\ \sigma \alpha \Omega_1^2 + \sigma \beta \cos \delta_{c_x} \cos \delta_{c_y} \Omega_2^2 \end{bmatrix}$$

## Couple total généré par les rotors coaxiaux

$$\tau = \begin{bmatrix} L \\ M \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -d\beta \sin \delta_{c_x} \Omega_2^2 \\ d\beta \cos \delta_{c_x} \sin \delta_{c_y} \Omega_2^2 \\ \gamma_1 \Omega_1^2 + \gamma_2 \Omega_2^2 \end{bmatrix}$$

## Variables

- $d$  la distance  $GO_2$
- $\alpha, \beta$  les coefficients aérodynamiques de poussée
- $\delta_{c_x}, \delta_{c_y}$  les angles d'incidence du plateau cyclique
- $\Omega_1, \Omega_2$  les vitesses de rotation des rotors supérieur et inférieur
- $\gamma_1, \gamma_2$  les paramètres aérodynamiques relatifs au lacet
- $\sigma$  le coefficient de perte d'efficacité aérodynamique avec  $0.8 \leq \sigma \leq 1$

# LES FORCES ET LES COUPLES

Contexte

Introduction

Présentation du  
concept GLMAV

Modélisation

Commande

Commande en  
cascade

Commande par  
backstepping

Commande par  
backstepping  
approché

Conclusion &  
Perspectives

## Paramètres

---

$$m = 255 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

$$I_{xx} = 1.383 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$$

$$I_{zz} = 2.72 \times 10^{-4} \text{ kg.m}^2$$

$$\alpha = -3.6835257 \times 10^{-5}$$

$$\gamma_1 = 1.4764849 \times 10^{-6}$$

$$\sigma = 1$$

$$g = 9.81 \text{ m.s}^{-2}$$

$$I_{yy} = 1.383 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$$

$$J = \text{diag} [I_{xx} \quad I_{yy} \quad I_{zz}] \text{ kg.m}^2$$

$$\beta = -3.7760276 \times 10^{-5}$$

$$\gamma_2 = -1.3265536 \times 10^{-6}$$

$$d = 6.76 \times 10^{-2} \text{ m}$$

---

## Référence

- A. Koehl, H. Rafaralahy, M. Boutayeb et B. Martinez - Modeling and Identification of a Launched Micro Air Vehicle : Design and Experimental Results - Proceedings of the AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit - 2010

Contexte

Introduction

Présentation du  
concept GLMAV

Modélisation

**Commande**

Commande en  
cascade

Commande par  
backstepping

Commande par  
backstepping  
approché

Conclusion &  
Perspectives

- 1 Contexte
- 2 Introduction
- 3 Présentation du concept GLMAV
- 4 Modélisation
- 5 **Commande**
  - Commande en cascade
  - Commande par backstepping
  - Commande par backstepping approché
- 6 Conclusion & Perspectives

## Objectif

Concevoir une loi de commande dans le but de poursuivre les références longitudinale, latérale, verticale et d'orientation, en tenant compte de la complexité du modèle

## Mesures à disposition

- Système GPS
- Centrale inertielle
- Connaissance du modèle et des coefficients aérodynamiques du GLMAV (thèse d'Arnaud KOEHL)

## Méthodes utilisées

- Commande en cascade avec deux boucles de contrôle
- Commande par backstepping
- Commande par backstepping approché

# LISTE DES VARIABLES

Contexte

Introduction

Présentation du  
concept GLMAV

Modélisation

Commande

Commande en  
cascade

Commande par  
backstepping

Commande par  
backstepping  
approché

Conclusion &  
Perspectives

## Variables d'état mesurées par GPS et IMU

- la position du centre de gravité dans le repère inertiel  $\rightarrow x, y$  et  $z$
- la vitesse du centre de gravité dans le repère inertiel  $\rightarrow \dot{x}, \dot{y}$  et  $\dot{z}$
- les angles d'attitude  $\rightarrow \phi, \theta$  et  $\psi$
- la vitesse angulaire du GLMAV par rapport au repère inertiel exprimée dans celui du GLMAV  $\rightarrow \dot{\phi}, \dot{\theta}$  et  $\dot{\psi}$

## Variables à réguler

- la position du drone dans le repère inertiel  $\rightarrow x, y$  et  $z$
- l'angle de lacet  $\rightarrow \psi$
- la stabilisation de  $x$  et de  $y$  entraîne celle de  $\phi$  et de  $\theta$

## Entrées de commande

- les vitesses de rotation des rotors supérieur et inférieur  $\rightarrow \Omega_1$  et  $\Omega_2$
- les angles d'incidence du plateau cyclique  $\rightarrow \delta_{c_x}$  et  $\delta_{c_y}$

# SIMPLIFICATION DU MODELE

Contexte

Introduction

Présentation du  
concept GLMAV

Modélisation

**Commande**

Commande en  
cascade

Commande par  
backstepping

Commande par  
backstepping  
approché

Conclusion &  
Perspectives

## Simplification de la force totale générée par les rotors coaxiaux

$$T = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \sigma\alpha\Omega_1^2 + \sigma\beta \cos \delta_{c_x} \cos \delta_{c_y} \Omega_2^2 \end{bmatrix}$$

## Expressions des entrées de commande

$$\begin{aligned} \Omega_1^2 &= \frac{T_z - \sigma\beta\Omega_2^2}{\sigma\alpha} & \delta_{c_x} &= -\frac{L}{d\beta\Omega_2^2} \\ \Omega_2^2 &= \frac{\sigma\alpha N - \gamma_1 T_z}{\sigma\alpha\gamma_2 - \sigma\beta\gamma_1} & \delta_{c_y} &= \frac{M}{d\beta\Omega_2^2} \end{aligned}$$

## Objectif

Déterminer la force de poussée  $T_z$  ainsi que les couples  $L$ ,  $M$  et  $N$

# COMMANDE EN CASCADE

Contexte

Introduction

Présentation du concept GLMAV

Modélisation

Commande

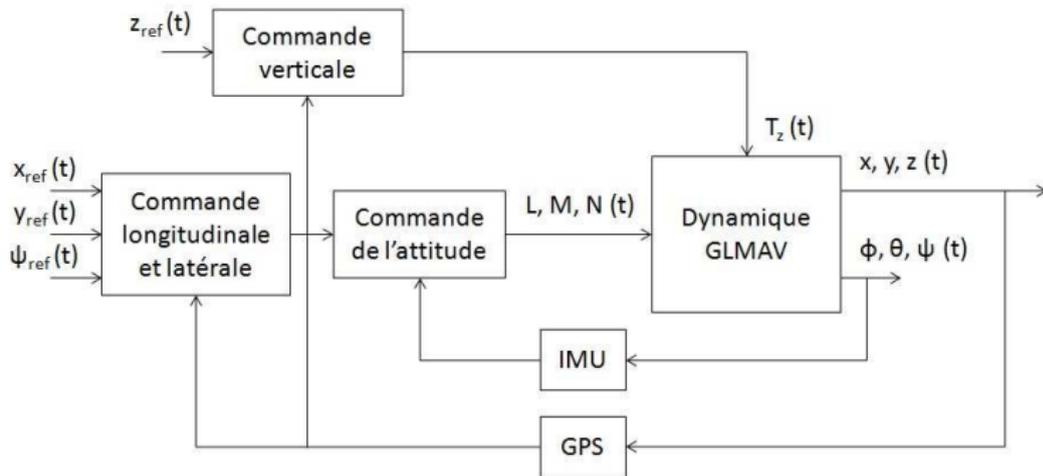
**Commande en cascade**

Commande par backstepping

Commande par backstepping approché

Conclusion & Perspectives

## Schéma de commande



## Dynamique verticale du GLMAV

$$m\ddot{z} = (1 - 2q_1^2 - 2q_2^2) T_z + mg$$

## Commande verticale $T_z$

$$T_z = \frac{T'_z - mg}{1 - \text{sat}_c(2q_1^2 + 2q_2^2)}$$

## Commande verticale auxiliaire $T'_z$

$$T'_z = -k_P (e_z + k_D \dot{e}_z + k_I \xi)$$
$$\dot{\xi} = e_z$$

## Commande de l'attitude

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ N \end{bmatrix} = K_P \tilde{q}^* - K_P \tilde{q} - K_P K_D \Omega$$

## Commande longitudinale et latérale

$$\begin{aligned} \tilde{q}^* &= -P_2 \lambda_3 \sigma \left( \frac{K_3}{\lambda_3} \xi_3 \right) \\ \xi_3 &= [\dot{e}_y \quad \dot{e}_x \quad \eta_{\tilde{q}}]^T + P_1 \lambda_2 \sigma \left( \frac{K_2}{\lambda_2} \xi_2 \right) \\ \xi_2 &= [e_y \quad e_x]^T + \lambda_1 \sigma \left( \frac{K_1}{\lambda_1} \xi_1 \right) \\ \xi_1 &= [\eta_y \quad \eta_x]^T \end{aligned}$$

# COMMANDE EN CASCADE

Contexte

Introduction

Présentation du concept GLMAV

Modélisation

Commande

Commande en cascade

Commande par backstepping

Commande par backstepping approché

Conclusion & Perspectives

## Paramètres

Commande verticale

$$k_P = 1$$

$$k_D = 1$$

$$k_I = 0.1$$

Commande de l'attitude

$$K_P = 1$$

$$K_D = 0.4$$

Commande latérale et longitudinale

$$K_1 = 0.4$$

$$K_2 = 0.4$$

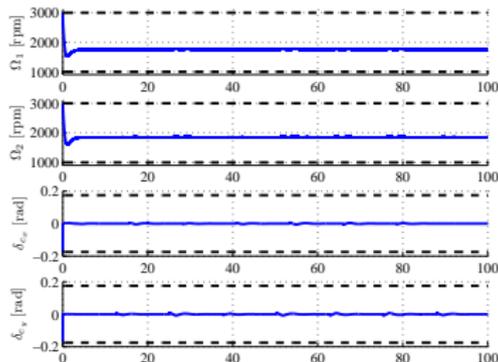
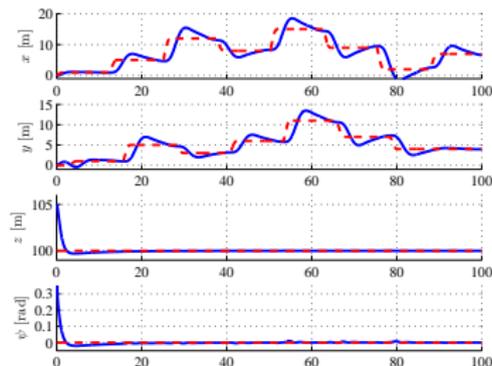
$$K_3 = 0.09$$

$$\lambda_1 = 200$$

$$\lambda_2 = 20$$

$$\lambda_3 = 0.5$$

## Résultats de simulation



## Références

- A. Isidori, L. Marconi et A. Serrani - Robust Autonomous Guidance : An Internal Model Approach - Springer - 2003
- R. Naldi, L. Gentili, L. Marconi et A. Sala - Design and Experimental Validation of a Nonlinear Control Law for a Ducted-Fan Miniature Aerial Vehicle - Control Engineering Practice, Volume 18, Issue 7, Pages 747-760, Special Issue on Aerial Robotics - 2010
- L. Marconi et R. Naldi - Robust Full Degree-of-Freedom Tracking Control of an Helicopter - Automatica, Volume 43, Issue 11 - 2007

# COMMANDE PAR BACKSTEPPING

Contexte

Introduction

Présentation du  
concept GLMAV

Modélisation

Commande

Commande en  
cascade

Commande par  
backstepping

Commande par  
backstepping  
approché

Conclusion &  
Perspectives

## Principe

- Définition d'une variable d'erreur
- Définition d'une fonction de Lyapunov à partir de cette erreur
- Dérivation de la fonction de Lyapunov
- Détermination d'une variable de commande "virtuelle"
- Remonter d'un intégrateur
  
- Poursuivre jusqu'à l'apparition des variables de commande réelle

## Remarques

- Commande basée sur la théorie de Lyapunov
- Souvent utilisée en robotique
- Analyse de la stabilité rendue simple par l'utilisation de fonctions de Lyapunov

## Caractéristiques

- Extension dynamique de la poussée  $T_z$
- La poussée  $T_z$  et sa dérivée  $\dot{T}_z$  deviennent des variable internes du contrôleur
- Une variable d'erreur est ajoutée pour assurer la poursuite de trajectoire autour du lacet

## Références

- R. Wood, R. Mahony et B. Cazzolato - High performance control for trajectory tracking of symmetric VTOL vehicles with significant aerodynamic effects - Proceedings of the European Control Conference - 2007
- R. Mahony et T. Hamel - Robust trajectory tracking for a scale model autonomous helicopter - International Journal of Robust and Nonlinear Control, Volume 14, Issue 12, Pages 1035-1059 - 2004

# COMMANDE PAR BACKSTEPPING

Contexte

Introduction

Présentation du  
concept GLMAV

Modélisation

Commande

Commande en  
cascade

Commande par  
backstepping

Commande par  
backstepping  
approché

Conclusion &  
Perspectives

## Expression de la commande

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ N \\ \ddot{\bar{T}}_z \end{bmatrix} = H^{-1} \left( \dot{j}_{ref} - \delta_3 - k_4 \delta_4 - \frac{2}{m} R_{\eta} \tilde{\Omega} \bar{T}_z z_B \right. \\ \left. - \frac{1}{m} R_{\eta} \tilde{\Omega}^2 T_z z_B + \frac{1}{m} R_{\eta} \left( \frac{\partial (\tilde{\Omega} z_B)}{\partial \Omega} \right)^T J^{-1} (\Omega \wedge J \Omega) T_z \right)$$

avec

$$H = \begin{bmatrix} \frac{1}{m} R_{\eta} \left( \frac{\partial (\tilde{\Omega} z_B)}{\partial \Omega} \right)^T J^{-1} T_z & \frac{1}{m} R_{\eta} z_B \end{bmatrix}$$

## Contrainte sur le lacet

$$N = \left( \Omega \wedge J \Omega + J Q_{\eta}^{-1} \left( \frac{d(Q_{\eta} \Omega_{ref})}{dt} - \dot{Q}_{\eta} \Omega - \varepsilon_3 - \hat{k}_4 \varepsilon_4 \right) \right) z_B$$

# COMMANDE PAR BACKSTEPPING

Contexte

Introduction

Présentation du concept GLMAV

Modélisation

Commande

Commande en cascade

Commande par backstepping

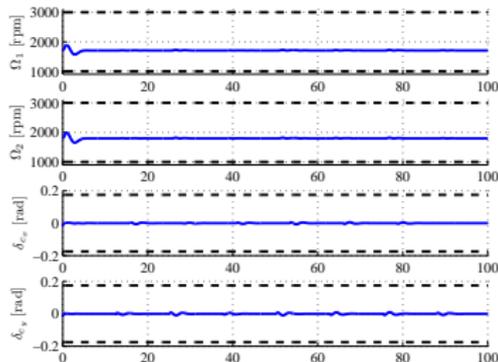
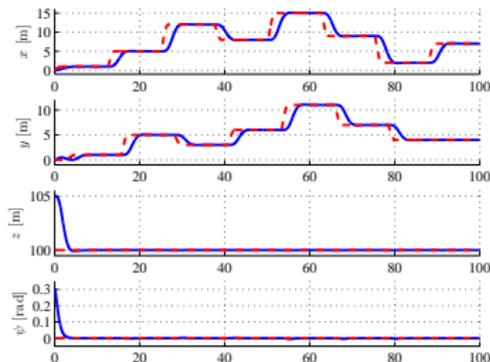
Commande par backstepping approché

Conclusion & Perspectives

## Paramètres

$$k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = \hat{k}_3 = \hat{k}_4 = 1$$

## Résultats de simulation



# COMMANDE PAR BACKSTEPPING APPROCHE

Contexte

Introduction

Présentation du  
concept GLMAV

Modélisation

Commande

Commande en  
cascade

Commande par  
backstepping

Commande par  
backstepping  
approché

Conclusion &  
Perspectives

## Principe

- Processus identique au backstepping pour les deux premières intégrations
- Utilisation d'une variable d'erreur en orientation plutôt qu'en accélération

## Procédure de backstepping

$$\delta_3 = \frac{1}{m} (R_{\eta} T_Z - R_{\eta_{ref}} T_{Z_{ref}}) z_B$$

## Procédure de backstepping approché

$$\hat{\delta}_3 = \eta - \eta_{ref}$$

## Apparition du terme croisé $\delta_2^T \delta_3$

$$\hat{\delta}_3 \rightarrow 0 \quad \Rightarrow \quad \delta_3 \rightarrow 0 \quad \text{en posant} \quad T_Z = T_{Z_{ref}}$$

# COMMANDE PAR BACKSTEPPING APPROCHE

Contexte

Introduction

Présentation du  
concept GLMAV

Modélisation

Commande

Commande en  
cascade

Commande par  
backstepping

Commande par  
backstepping  
approché

Conclusion &  
Perspectives

Expression de  $T_{z_{ref}}$ ,  $\phi_{ref}$  et  $\theta_{ref}$

$$\frac{1}{m} R_{\eta_{ref}} T_{z_{ref}} z_B + g z_T = \dot{v}_{ref} - \delta_1 - k_2 \delta_2 = a_{ref}$$

$$T_{z_{ref}} = \mp m \sqrt{a_{x_{ref}}^2 + a_{y_{ref}}^2 + (a_{z_{ref}} - g)^2}$$

$$\phi_{ref} = \text{atan2} \left( \mp a_{y_{ref}}, \sqrt{a_{x_{ref}}^2 + (a_{z_{ref}} - g)^2} \right)$$

$$\theta_{ref} = \text{atan2} (\pm a_{x_{ref}}, \pm (a_{z_{ref}} - g))$$

Expression de  $a_{ref}$

$$a_{ref} = -(k_1 k_2 + 1) x + (k_1 + k_2) v$$

# COMMANDE PAR BACKSTEPPING APPROCHE

Contexte

Introduction

Présentation du  
concept GLMAV

Modélisation

Commande

Commande en  
cascade

Commande par  
backstepping

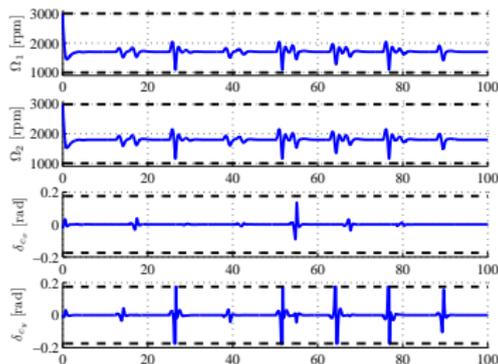
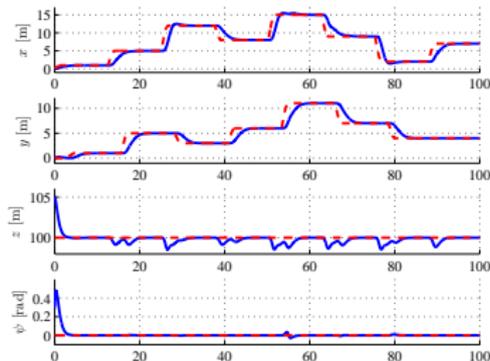
Commande par  
backstepping  
approché

Conclusion &  
Perspectives

## Expression de la commande

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ N \end{bmatrix} = \Omega \wedge J\Omega + JQ_{\eta}^{-1} \left( \frac{d(Q_{\eta}\Omega_{ref})}{dt} - \dot{Q}_{\eta}\Omega - \hat{\delta}_3 - k_4\delta_4 \right)$$

## Résultats de simulation



# COMMANDE PAR BACKSTEPPING APPROCHE

Contexte

Introduction

Présentation du  
concept GLMAV

Modélisation

Commande

Commande en  
cascade

Commande par  
backstepping

Commande par  
backstepping  
approché

Conclusion &  
Perspectives

## Avantages

- Structure en cascade
- Simplification de l'expression de la loi de commande
- Pas de matrice à inverser

## Inconvénients

- Calcul des angles  $\phi_{ref}$  et  $\theta_{ref}$
- Apparition d'une singularité

$$\frac{1}{m} R_{\eta_{ref}} T_{z_{ref}} z_B + g z_T = a_{ref}$$

- Résolution de la singularité entraîne une perte d'agressivité du contrôleur

Contexte

Introduction

Présentation du  
concept GLMAV

Modélisation

Commande

Commande en  
cascade

Commande par  
backstepping

Commande par  
backstepping  
approché

Conclusion &  
Perspectives

- 1 Contexte
- 2 Introduction
- 3 Présentation du concept GLMAV
- 4 Modélisation
- 5 Commande
  - Commande en cascade
  - Commande par backstepping
  - Commande par backstepping approché
- 6 Conclusion & Perspectives

# CONCLUSION & PERSPECTIVES

Contexte

Introduction

Présentation du  
concept GLMAV

Modélisation

Commande

Commande en  
cascade

Commande par  
backstepping

Commande par  
backstepping  
approché

Conclusion &  
Perspectives

## Conclusion

- Essai de différentes lois de commande
- Résultats de simulation satisfaisants
- Implantation sur le GLMAV encourageante

## Perspectives

- Essai avec d'autres lois de commande
- Prise en compte des comportements indésirables relatifs aux effets aérodynamiques
- Implantation des lois de commande sur le GLMAV avec les contraintes liées aux systèmes embarqués

Contexte

Introduction

Présentation du  
concept GLMAV

Modélisation

Commande

Commande en  
cascade

Commande par  
backstepping

Commande par  
backstepping  
approché

Conclusion &  
Perspectives

MERCI POUR  
VOTRE ATTENTION