

Navigation d'un avion miniature de surveillance aérienne en présence de vent

Cornel Alexandru Brezoescu

Directeurs de thèse : Rogelio LOZANO et Pedro CASTILLO

Contenu

1. Problématique
2. La dynamique du vol
3. Calcul du vent pour le suivi d'une trajectoire rectiligne
4. Identification du vent pour la navigation autonome d'un avion
5. Plateforme expérimentale
6. Conclusions

1 Problématique

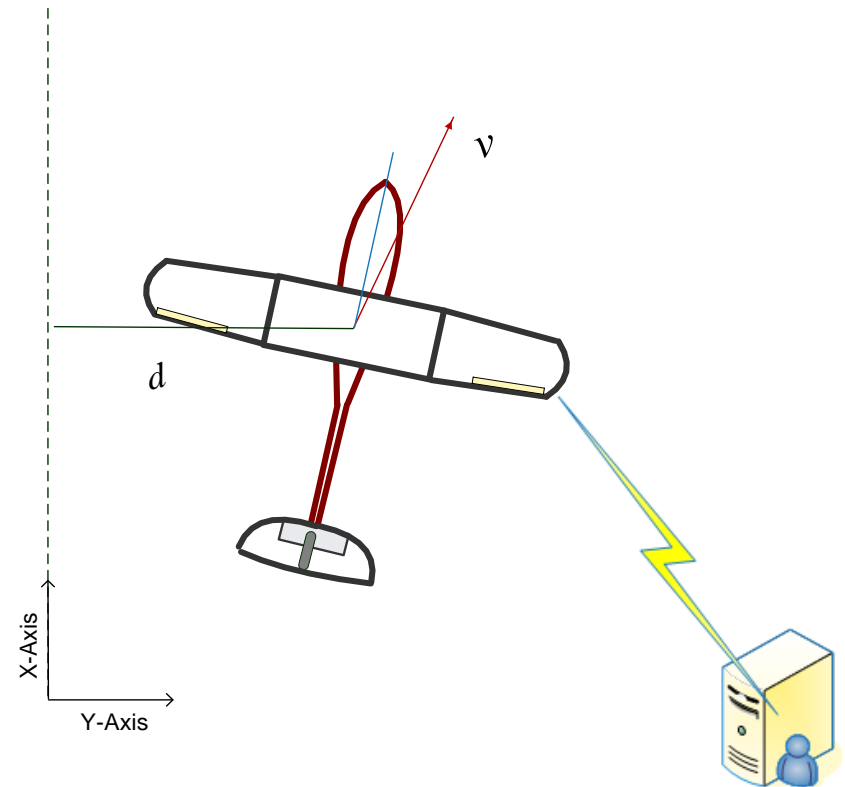
- Développer une stratégie de navigation pour un avion miniature pour accomplir une mission en présence de vent.

✓ Missions

- Minimiser le temps de vol
- La consommation d'énergie
- L'écart par rapport à une trajectoire prédéfinie
- Les efforts sur la structure de l'appareil.

✓ Paramètres du vent

- Station au sol
- Estimateur en ligne



1 Problématique

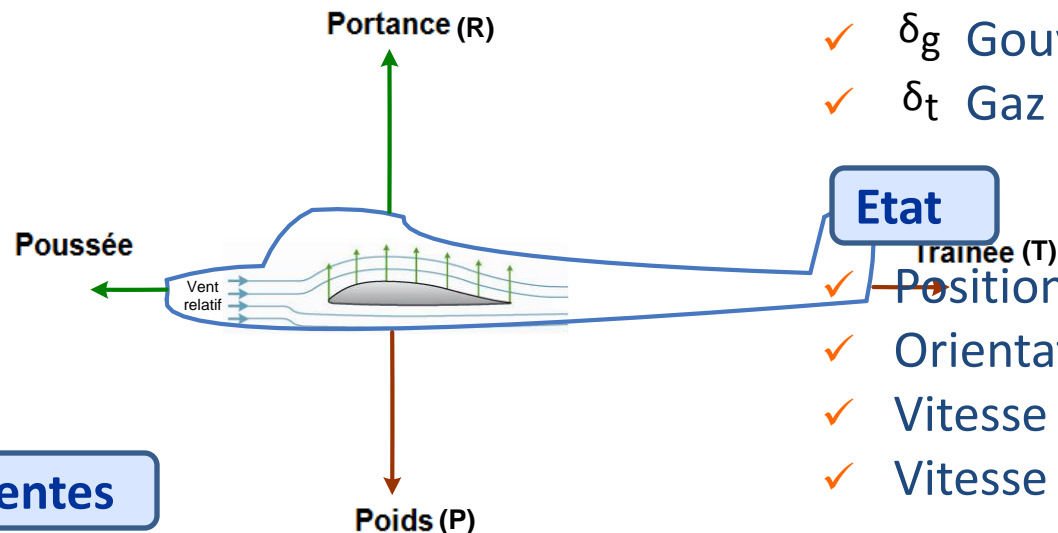
1.1 Démonstrations



Photos: <http://www.hds.utc.fr/uav-horus>

2 Dynamique du vol

2.1 Forces Aérodynamiques



Commande

- ✓ δ_a Aileron
- ✓ δ_p Profondeur
- ✓ δ_g Gouverne
- ✓ δ_t Gaz

Etat

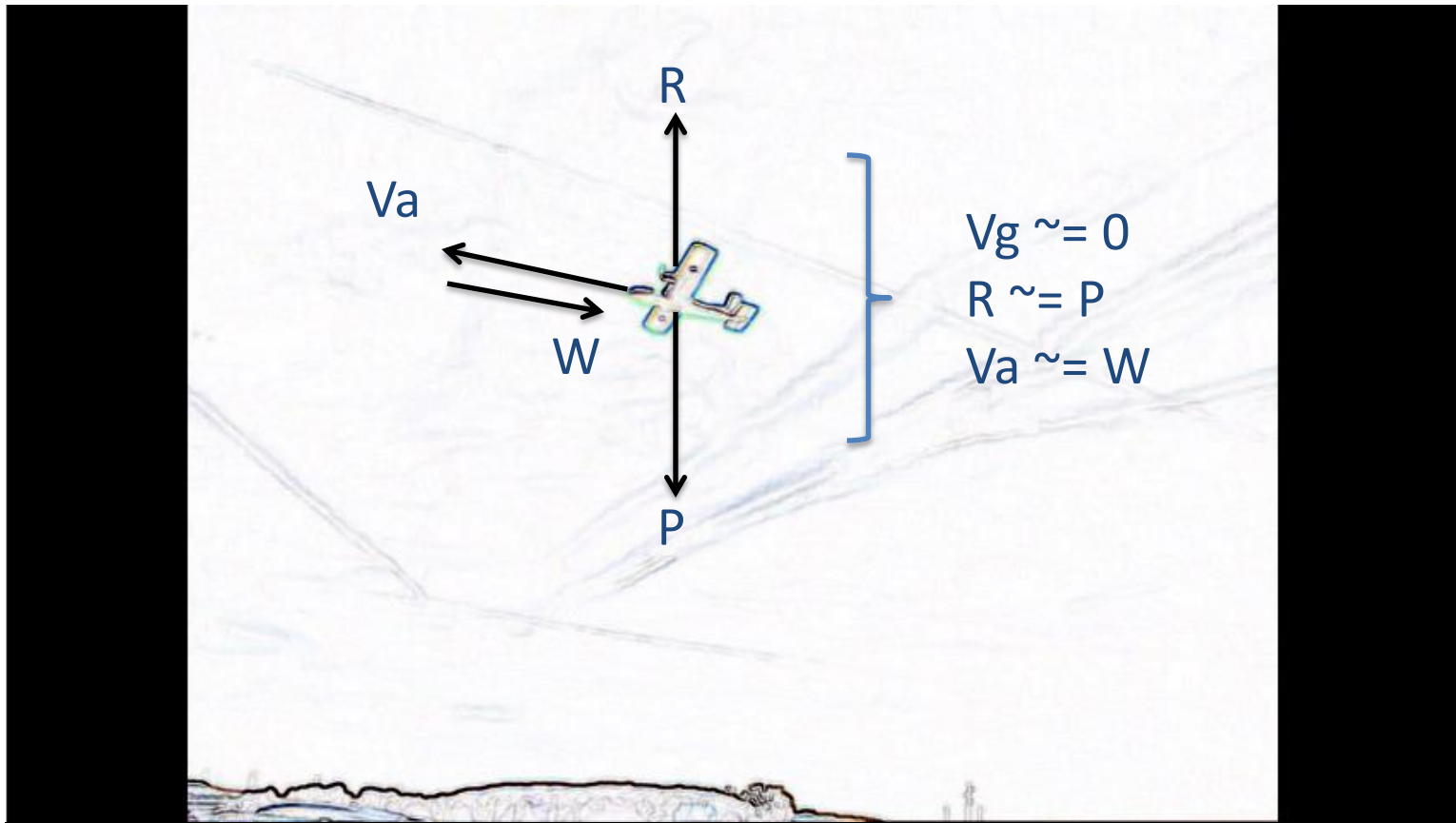
- ✓ Position inertielle
- ✓ Orientation
- ✓ Vitesse de translation
- ✓ Vitesse de rotation

Difficultés inhérentes

- ✓ Dynamique non-linéaire complexe : 12 variables interdépendantes
- ✓ Système sous-actionné (4 actionneurs, 6 DDL)
- ✓ Forces aérodynamiques incertaines, perturbations externes : vent

2 Dynamique du vol

2.2 Influence du vent – Vitesse aérodynamique vs. vitesse au sol



2 Dynamique du vol

2.2 Influence du vent – Angle de cap vs. angle de route



2 Dynamique du vol

2.2 Correction du vent pendant la phase finale



«Crab»



«Sideslip»

Photos: <http://www.ailestourangelles.fr/>

2 Dynamique du vol

2.3 Modèle

Identifier des modèles non-linéaires de complexité réduite :

- ✓ plus faciles à analyser
- ✓ plus adaptés à la conception de stratégies de commande autonome

Décomposer la dynamique du système en une partie externe et une partie interne :

- ✓ boucle externe : exige une attitude et une vitesse désirées
- ✓ boucle interne : fournit la stabilisation de l'attitude et la vitesse commandées

Boucle de commande interne :

- ✓ contrôleur de vitesse aérodynamique : $V_a = k_{V_a}(V_a^C - V_a)$
- ✓ contrôleur d'angle de roulis : $\dot{\phi} = k_{\phi}(\phi^C - \phi)$
- ✓ contrôleur d'angle de trajectoire de vol : $\dot{\gamma} = k_{\gamma}(\gamma^C - \gamma)$
- ✓ contrôleur d'altitude : $\dot{p}_h = k_{p_h}(p_h^C - p_h)$

2 Dynamique du vol

2.3 Modèle

Position de l'avion dans le système inertiel : p_n, p_e, p_h

$$\dot{p} = R_b^e \bar{V}_B \Rightarrow \begin{bmatrix} \dot{p}_n \\ \dot{p}_e \\ \dot{p}_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a \cos \psi \cos \gamma \\ V_a \sin \psi \cos \gamma \\ V_a \sin \gamma \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_N \\ W_E \\ W_D \end{bmatrix}$$

Supposons

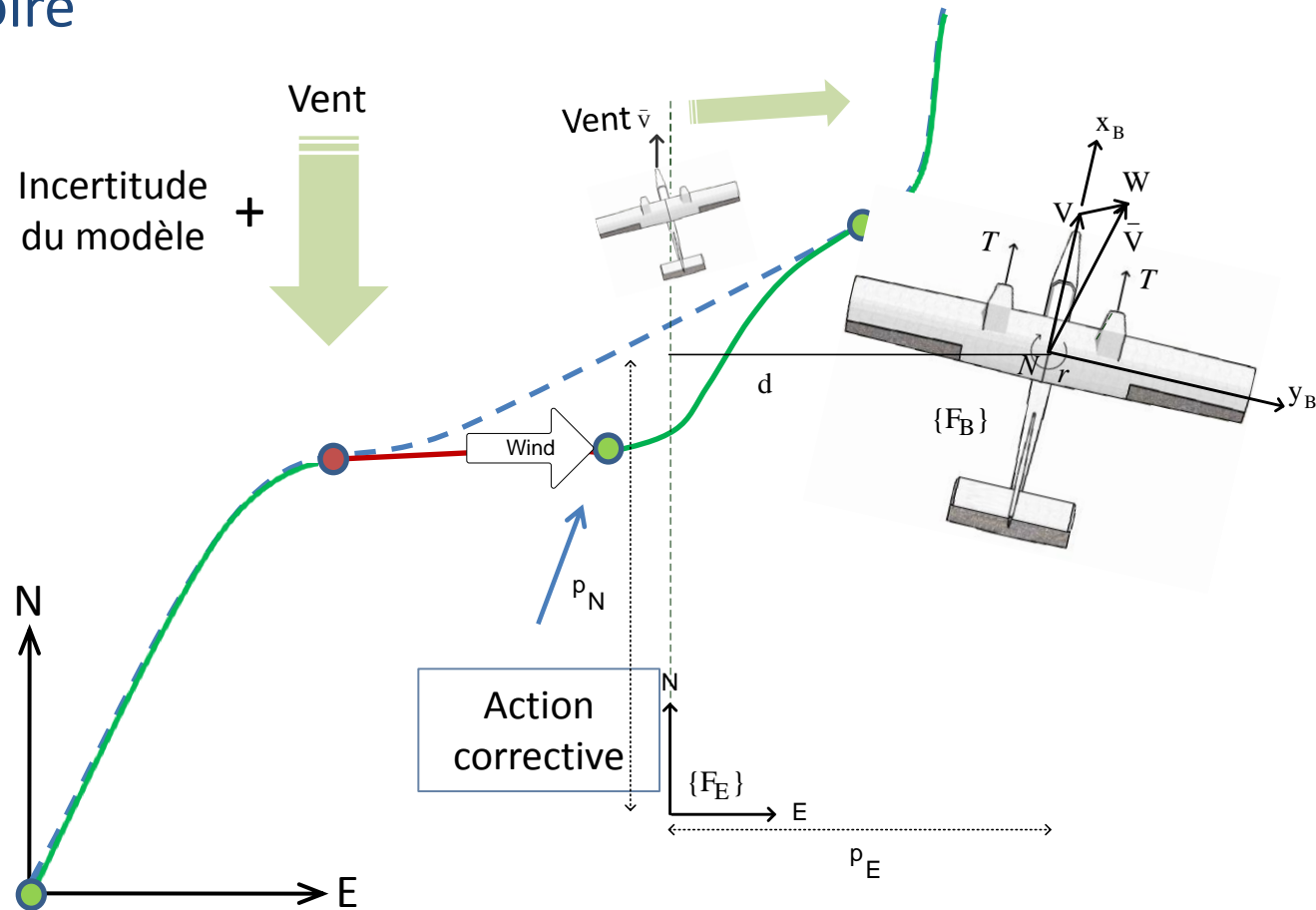
- ✓ Vol en palier: $\gamma^c = 0, p_h^c = ct,$
 - ✓ Vitesse stabilisée: $V_a^c = ct$
- $$\Rightarrow \begin{cases} \dot{p}_n = V \cos \psi + W_N \\ \dot{p}_e = V \sin \psi + W_E \end{cases}$$

La dynamique de l'angle de lacet:

- ✓ En fonction de moment de lacet : $\ddot{\psi} = cN$
- ✓ En fonction de l'angle de roulis : $\dot{\psi} = \frac{g}{V_a} \tan \phi$

3 Calcul du vent pour le suivi de trajectoire

3.1 Suivi de trajectoire



3 Calcul du vent pour le suivi de trajectoire

3.2 Calcul du vent

1. A partir de la réponse de l'avion, en comparant :
 - ✓ la position inertielle du véhicule donnée par les mesures GPS
 - ✓ des prédictions de la position obtenues du modèle dynamique

$$p_{E_k} = p_{E_{k-1}} + \Delta T [V_a \sin(\psi_{k-1}) + W_{E_{k-1}}] \Rightarrow W_{E_{k-1}} = \frac{1}{\Delta T} (p_{E_k} - p_{E_{k-1}}) - V_a \sin(\psi_{k-1})$$

2. A partir de la vitesse GPS, vitesse tube Pitot et l'attitude du véhicule :

$$\begin{bmatrix} W_N \\ W_E \\ W_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{p}_n \\ \dot{p}_e \\ \dot{p}_h \end{bmatrix}_{\text{GPS}} - R_b^e \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}$$

3 Calcul du vent pour le suivi de trajectoire

3.3 Stratégie de commande

$$\begin{cases} \dot{p}_n = V \cos \psi + W_N \\ \dot{p}_e = V \sin \psi + W_E \\ \dot{\psi} = r \\ \dot{r} = c\tau_\psi \end{cases} \Rightarrow c\tau_\psi = -L_1 r + \tan \psi (r^2 - L_2) - \frac{L_3 p_e + L_2 W_E}{V_a \cos \psi}$$

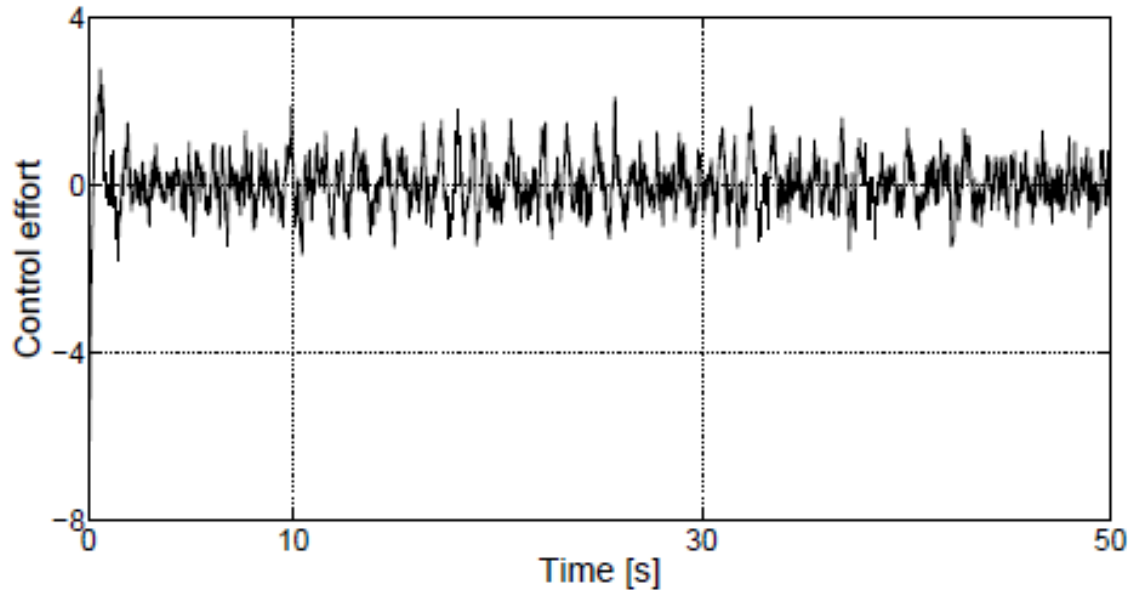
$$M = \{(d, \psi, r) \in \mathbb{R}^3 \mid (d, \psi, r) = (0, \arcsin(-\frac{W_E}{V_a}), 0) \text{ est GAS}\}$$

Fonction de Lyapunov :

$$\begin{cases} \dot{V}_L = \frac{1}{2} \varepsilon^T I \varepsilon \\ \dot{V}_L = -\varepsilon^T I_c \varepsilon \end{cases} \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d \\ V \sin \psi + c_1 e_1 + W_E \\ r V \cos \psi + (c_1 + c_2) e_2 + (1 - c_1^2) e_1 \end{bmatrix}$$

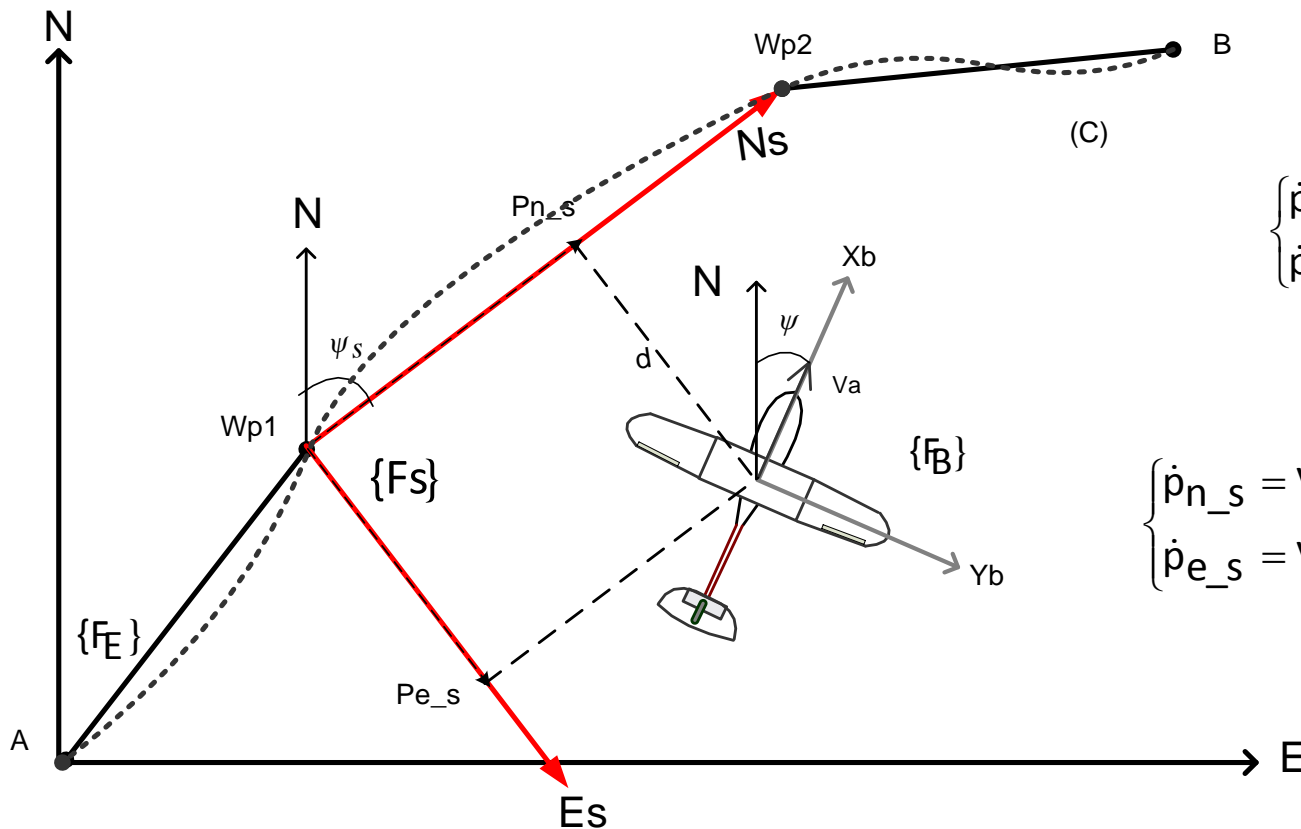
3 Calcul du vent pour le suivi de trajectoire

Simulations



3 Calcul du vent pour le suivi de trajectoire

3.3 La position de l'avion par rapport a une trajectoire désirée

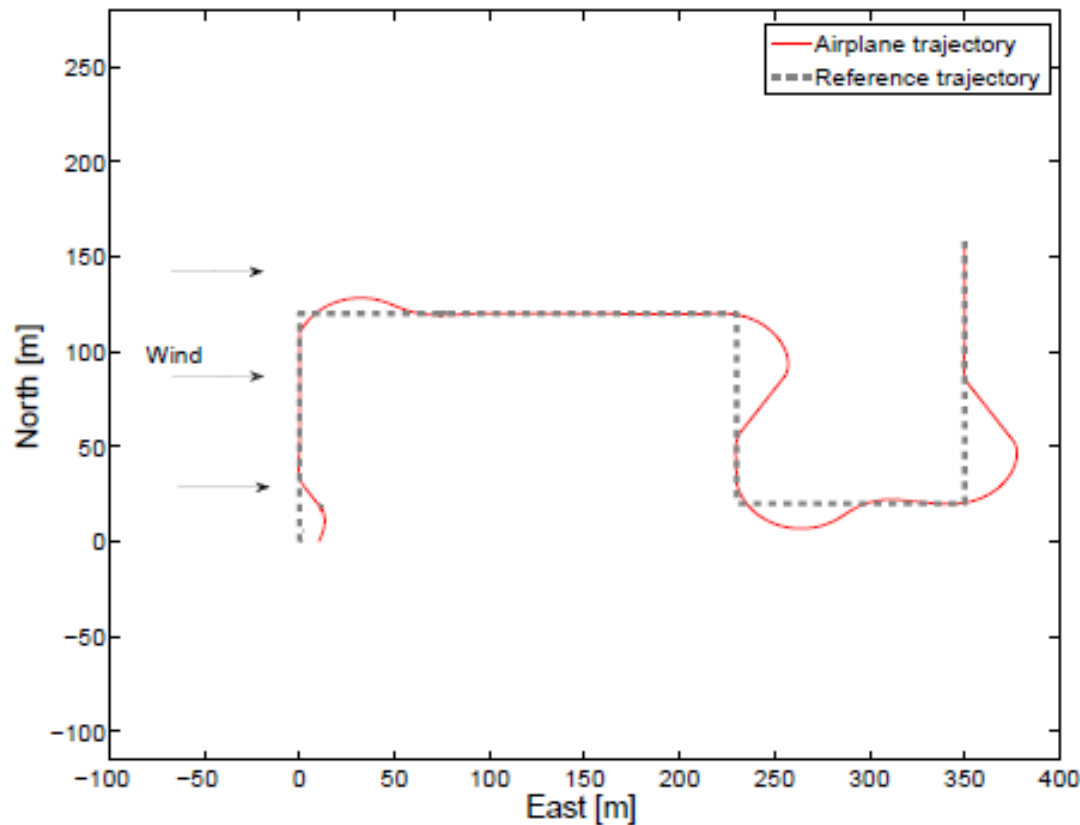


$$\begin{cases} \dot{p}_n = V \cos \psi + W_N \\ \dot{p}_e = V \sin \psi + W_E \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{p}_{n_s} = V \cos(\psi - \psi_d) + \omega \cos(\psi_\omega - \psi_d) \\ \dot{p}_{e_s} = V \sin(\psi - \psi_d) + \omega \sin(\psi_\omega - \psi_d) \end{cases}$$

3 Calcul du vent pour le suivi de trajectoire

Simulations



4 Identification du vent

Système

$$\begin{cases} \dot{\rho}_{n_s} = V \cos(\psi - \psi_d) + \underline{W} \cos(\underline{\psi}_\omega - \psi_d) \\ \dot{\rho}_{e_s} = V \sin(\psi - \psi_d) + \underline{W} \sin(\underline{\psi}_\omega - \psi_d) \\ \dot{\psi} = \frac{g}{V_a} \tan \phi \\ \dot{\phi} = k_\phi (\underline{\phi}^c - \phi) \end{cases}$$



Le paramètre incertain est éloigné de l'entrée de commande par deux intégrateurs

1. La perturbation ne peut pas être directement annulé par l'entrée de commande
2. Cela nécessite de prendre en compte l'incertitude lors de la construction de la fonction Lyapunov

4 Identification du vent

4.1 Backstepping adaptative

$$\phi^c = \arctan \left[- \frac{\bar{L}_1 e_1 + \bar{L}_2 e_2 + \bar{c}_1 (\hat{k} \omega_2 - \hat{k} \omega_1)}{g \cos(\psi - \psi_d)} \right]$$

$$\begin{cases} \dot{\hat{k}}_{\omega_1} = \gamma_1 e_1 \\ \dot{\hat{k}}_{\omega_2} = \gamma_2 c_1 e_2 \end{cases}$$

$$V_L = \frac{1}{2} \left(e_1^2 + \frac{1}{\gamma_1} \tilde{k}_{\omega_1}^2 + e_2^2 + \frac{1}{\gamma_2} \tilde{k}_{\omega_2}^2 \right)$$

$$\dot{V}_L = -\bar{c}_1 e_1^2 - \bar{c}_2 e_2^2$$

4 Identification du vent

4.2 Fonctions de réglage

$$\phi^c = \arctan \left[\frac{\underline{L}_1 d + \underline{L}_2 V_a \sin(\psi - \psi_d) + \underline{L}_2 \hat{k}_\omega}{g \cos(\psi - \psi_d)} \right]$$

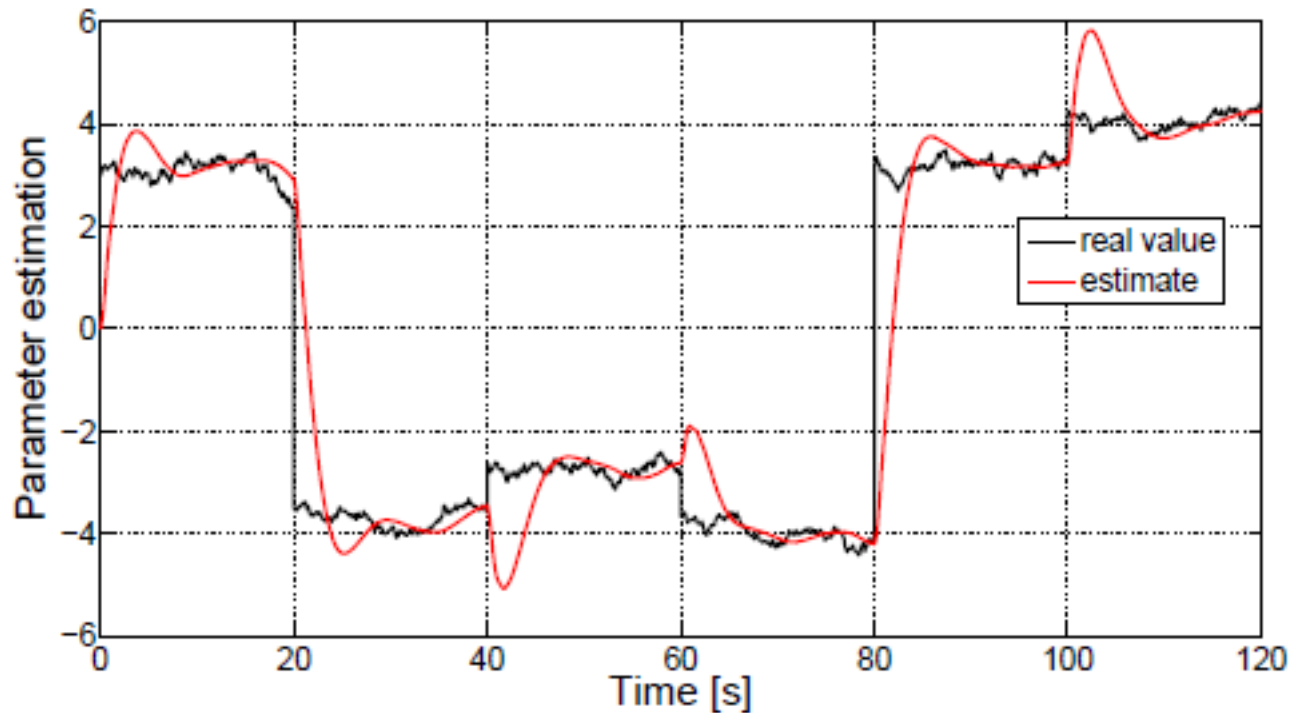
$$\dot{\hat{k}}_\omega = \underline{L}_3 d + \gamma \underline{c}_1 V \sin(\psi - \psi_d) + \gamma \underline{c}_1 \hat{k}_\omega$$

$$v_L = \frac{1}{2} \left(e_1^2 + \frac{1}{\gamma} \tilde{k}_\omega^2 + e_2^2 \right)$$

$$\dot{v}_L = -\underline{c}_1 e_1^2 - \underline{c}_2 e_2^2$$

4 Identification du vent

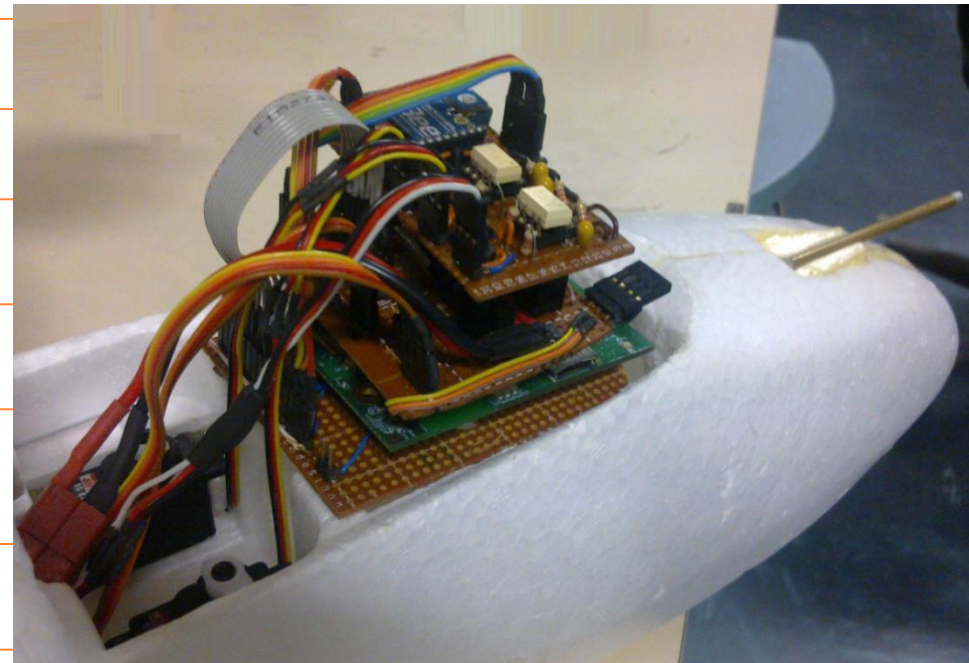
4.3 Simulations



5 Plateforme expérimentale

5.1 Prototype d'avion miniature

Avion	Multiplex TwinStar II
CPU	RabbitCore RCM4300
IMU	Microstrain 3DM-GX3-45
Capteur de vitesse	Eagle Tree MicroSensor V3
Récepteur de signaux	Futaba
Modem sans fil	Module RF XBee-PRO



5 Plateforme expérimentale

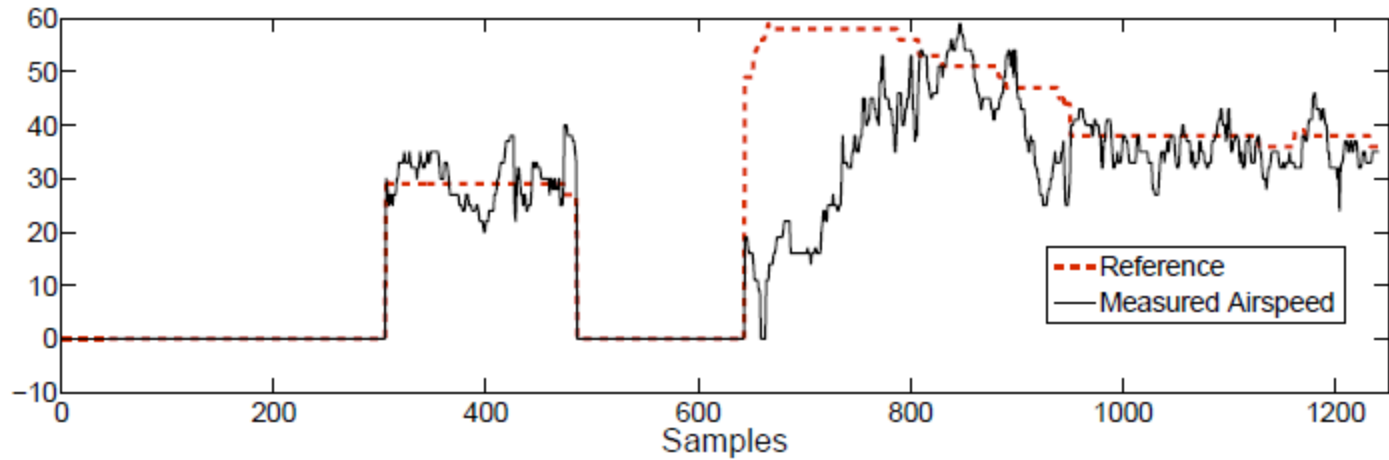
5.2 Station au sol

Unregistered HyperCam 2

The screenshot displays a flight simulator interface. On the left, there are four instrument gauges: a heading indicator (4), a heading scale (88), an airspeed indicator (3.04), and a heading scale (112.42). Below these gauges, there are four numerical readouts: GyroX: 0.695, GyroY: 0.629, GyroZ: -0.445, Speed Nord: -2.2, Speed Est: 10.1, and Speed Down: 0.9. On the right, a video feed shows an aircraft in flight against a blue sky. A small window in the bottom right corner of the video feed shows 'HyperCam - Enregistrement' with buttons for 'Zone écran', 'Raccourcis', and 'Filtre'.

5 Plateforme expérimentale

5.3 Tests



6 Conclusions

- L'influence du vent sur la navigation d'un avion
- Décomposition de la dynamique de l'avion et l'obtention un modèle simplifié
- Méthodes de calcul du vent
- Suivi d'une trajectoire rectiligne composée en utilisant le vent calculé
- Estimation en temps réel du vent
- Développement d'un prototype d'avion miniature et d'une station sol
- Tests en temps réel

Questions

Merci pour votre
attention!