

# Développement d'une stratégie MPC pour le guidage coopératif

Y. Rochefort<sup>12</sup>   H. Piet-Lahanier<sup>1</sup>   S. Bertrand<sup>1</sup>  
D. Dumur<sup>2</sup>   D. Beauvois<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ONERA

<sup>2</sup>SUPELEC

GT CPNL, ESIGELEC

14 juin 2012

# Contexte

## Utilisations de drones

- Civile : recherche de victimes, surveillance anti-incendie, exploration
- Militaire : reconnaissance, surveillance d'une cible/frontière, missions de combats

## Avantages des drones autonomes

- Missions "Dull Dirty Dangerous"
  - Pas de pilote à préserver
- ⇒ Gains en manœuvrabilité et en coûts
- Pas de téléguidage
- ⇒ Gains en discrétion, efficacité

Quelle loi de commande employer?

# Problématique

Recherche d'une loi de guidage pour un groupe de véhicules cherchant à coopérer,

- permettant d'accomplir une mission composée de plusieurs tâches
- sans planification préalable ni supervision
- permettant d'éviter les collisions
- incitant les véhicules à voyager en groupe<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Véhicules se déplaçant à la même vitesse, dans la même direction, sans provoquer de collision, en évitant qu'un ou plusieurs ne soient isolés des autres (ex : oiseaux ou poissons)

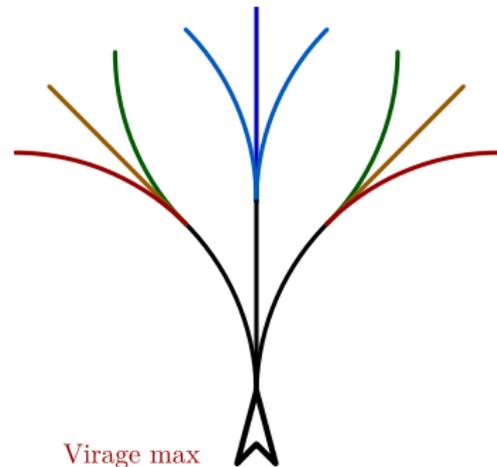
# Plusieurs approches possibles

- Imiter le comportement d'animaux : oiseaux/fourmis/abeilles
- Utiliser des fonctions de potentiel pour gérer les interactions entre véhicules
- Utiliser la théorie des jeux pour déterminer la répartition optimale des tâches
- Utiliser la commande prédictive non linéaire
  - Obtention d'une commande localement optimale
  - Prise en compte des contraintes
  - Prise en compte des comportements non-linéaires des véhicules
  - Prise en compte des positions prédites des autres véhicules (leurs intentions)
  - Le critère d'optimisation peut être utilisé pour de multiples tâches

# Point de départ de cette étude

"RHC Using Random Search for UAV Navigation with Passive, Non Cooperative Sensing", Frew, E.W., Tech Report of the University of Colorado at Boulder, 2006.

- Commande prédictive d'un véhicule se déplaçant à vitesse constante
- Commande de la vitesse de rotation du vecteur vitesse
- Recherche de la meilleure séquence de commandes parmi un jeu composé de
  - $N$  vitesses de rotations tirées au hasard (typ. 500)
  - plusieurs séquences de commandes particulières (figure) (typ. 10)
- Coût: somme de plusieurs fonctions (par ex. énergie, point de passage, collision ...)



Virage max

Virage max puis ligne droite

Manœuvre en S

Ligne droite puis virage max

Ligne droite

# Autres approches de MPC

- Dunbar, W. and Murray, R., 43rd Conference On Decision and Control, 2004.  
(Prouve la stabilité d'une MPC distribuée entre plusieurs véhicules)
- Müller, M.A., et al, 18th IFAC World Congress, 2011.  
(Étudie la stabilisation, le consensus, la synchronisation d'une flotte de véhicules commandés par une MPC)
- Wang, X. et al, IEEE Transaction On Control Systems Technology, 2007.  
(Vol d'une flotte de véhicules en formation utilisant une MPC. Une trajectoire de référence pour l'ensemble de la formation est fournie.)

- 1 Formalisation du problème
- 2 Définition de la fonction objectif
- 3 Recherche de la meilleure séquence de commandes
- 4 Simulation
- 5 Conclusion et perspectives

# Sommaire

- 1 Formalisation du problème
- 2 Définition de la fonction objectif
- 3 Recherche de la meilleure séquence de commandes
- 4 Simulation
- 5 Conclusion et perspectives

# Formalisation du problème (1)

## Stratégie de commande envisagée

- Calcul distribué : chaque véhicule calcule sa commande d'après les informations dont il dispose
- Coopération : les véhicules partagent leurs positions actuelles et futures

## Modélisation de la mission

- Utilisation de points de passage
- Trajectoires optimales inconnues entre ces points

# Formalisation du problème (2)

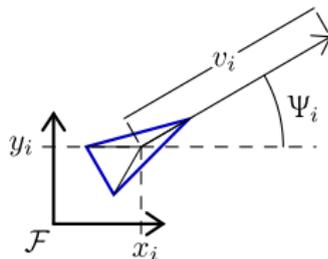
## Hypothèses

- Pas de formation spécifique désirée, mais :
  - distance souhaitée entre deux véhicules proches  $\simeq d_{des}$
  - périmètre de sécurité autour de chaque véhicule  $d_{saf}$
  - les véhicules plus éloignés que  $d_{ign}$  sont ignorés
  - la vitesse des véhicules doit être proche d'une vitesse nominale  $v_{nom}$

# Formalisation du problème (3)

$N$  véhicules

- représentés par des points
- se déplaçant dans un plan
- suivant le modèle cinématique :



$$x_i(k+1) = x_i(k) + \Delta t \cdot v_i(k) \cdot \cos(\Psi_i(k))$$

$$y_i(k+1) = y_i(k) + \Delta t \cdot v_i(k) \cdot \sin(\Psi_i(k))$$

$$\Psi_i(k+1) = \Psi_i(k) + \Delta t \cdot \omega_i(k)$$

$$v_i(k+1) = v_i(k) + \Delta t \cdot \Delta v_i(k)$$

$$\omega_i(k+1) = \omega_i(k) + \Delta t \cdot \Delta \omega_i(k)$$

Commandes

$\Delta t$  : durée entre deux itérations

# Formalisation du problème (4)

## Notations

- $H_c, H_p$  : Horizon de contrôle, horizon de prédiction
- $\hat{\mathbf{X}}_i = [\hat{p}_i \hat{v}_i \hat{\Psi}_i \hat{\omega}_i]^T$  : État prédit du véhicule  $i$
- $\hat{\mathbf{p}}_{i_{k+1}}^{k+H_p}$  : Positions prédites du véhicule  $i$  depuis  $k+1$  jusqu'à  $k+H_p$
- $\hat{\mathbf{p}}_{-i_k}^{k+H_p-1}$  : Positions prédites des autres véhicules depuis  $k$  jusqu'à  $k+H_p-1$
- $\mathbf{u}_i = [\Delta v_i \Delta \omega_i]^T$  : Entrées de commandes du véhicule  $i$
- $\mathbf{u}_{i_k}^{*k+H_c-1}$  : Séquence optimale de commandes depuis  $k$  jusqu'à  $k+H_c-1$

## Objectif de chaque véhicule

Pour chaque véhicule  $i$ ,

Trouver  $\mathbf{u}_{i_k}^{*k+H_c-1}$  qui minimise  $J_i^{rhc} \left( k, \hat{\mathbf{X}}_{i_{k+1}}^{k+H_p}, \hat{\mathbf{p}}_{-i_{k+1}}^{k+H_p-1} \right)$

t.q.  $\hat{\mathbf{X}}_i(n+1) = f \left( \mathbf{u}_i(n), \hat{\mathbf{X}}_i(n) \right)$  avec  $\mathbf{u}_i \in \mathbb{U}$  et  $\hat{\mathbf{X}}_i \in \mathbb{X}$  pour  $n = \overline{k, k+H_p-1}$ .

# Sommaire

- 1 Formalisation du problème
- 2 Définition de la fonction objectif**
- 3 Recherche de la meilleure séquence de commandes
- 4 Simulation
- 5 Conclusion et perspectives

# Définition de la fonction objectif

## La fonction objectif

- Mesure l'avancement de la mission
- Pondération  $W^\bullet$  : importance relative des composantes

$$\begin{aligned} J_i^{rhc}(k) = & W^{\Delta v} \cdot J_i^{\Delta v}(k) && \text{minimiser la} \\ & + W^{\Delta \omega} \cdot J_i^{\Delta \omega}(k) && \text{consommation d'énergie} \\ & + W^{mv} \cdot J_i^{mv}(k) && \text{avancer à vitesse nominale} \\ & + W^{m\omega} \cdot J_i^{m\omega}(k) && \text{en ligne droite} \\ & + W^{mf} \cdot J_i^{mf}(k) && \text{avancer vers le prochain} \\ & + W^{mt} \cdot J_i^{mt}(k) && \text{point de passage} \\ & + W^{co} \cdot J_i^{co}(k) && \text{éviter les} \\ & + W^{ca} \cdot J_i^{ca}(k) && \text{collisions} \\ & + W^{cf} \cdot J_i^{cf}(k) && \text{rester groupés} \end{aligned}$$

# Détails des composantes (1)

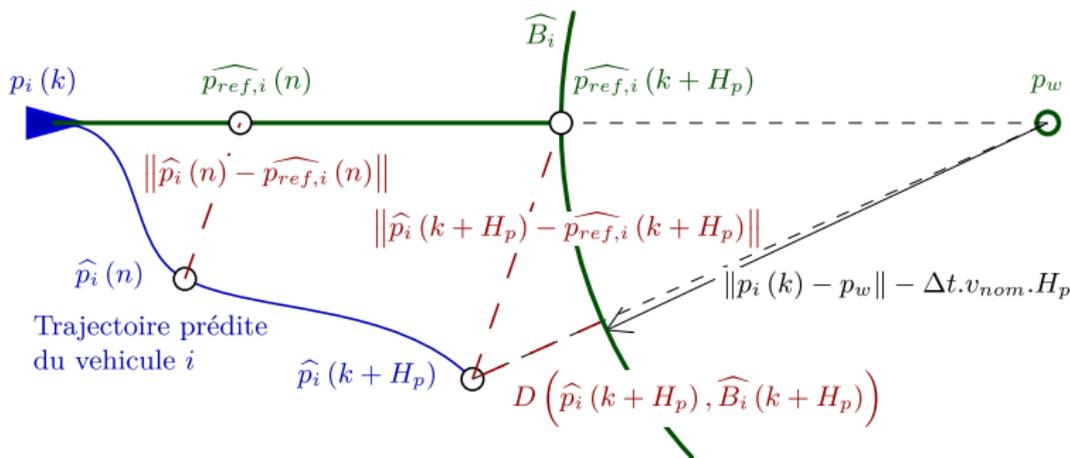
Avancer vers le prochain point de passage,  $J_i^{mf}$ ,  $J_i^{mt}$

- Amplitude de valeurs possibles : supérieure aux autres composantes du coût
- Normalisation seule : variation du coût dû à un même déplacement dépend de la distance
- Tenir compte des positions atteignables par le véhicule

## Détails des composantes (2)

$$J_i^{mf}(k) = k^{mf} \cdot \left( D \left( \widehat{p}_i(k + H_p), \widehat{B}_i(k + H_p) \right) \right)^2$$

$$J_i^{mt}(k) = k^{mt} \cdot \sum_{n=k+1}^{k+H_p} \left\| \widehat{p}_i(n) - \widehat{p}_{ref,i}(n) \right\|^2$$



## Détails des composantes (3)

Éviter les collisions,  $J_i^{co}$ ,  $J_i^{ca}$

- Fonction monotone
- Nulle au delà d'une zone de danger
- Variation nette entre zone de danger et collision
- Solution possible simple : tangente hyperbolique

$$J_i^{ca}(k) = k^{ca} \cdot \sum_{j=1}^N \sum_{n=k+1}^{k+H_p-1} \frac{1 - \tanh\left(\left(\widehat{d}_{ij}(n) - \beta_a\right) \cdot \alpha_a\right)}{2}$$

$$\alpha_a = 6 \cdot (d_{des} - d_{saf})^{-1}$$

$$\beta_a = 1/2 \cdot (d_{des} + d_{saf})$$

## Détails des composantes (4)

Regrouper les véhicules,  $J_i^{cf}$

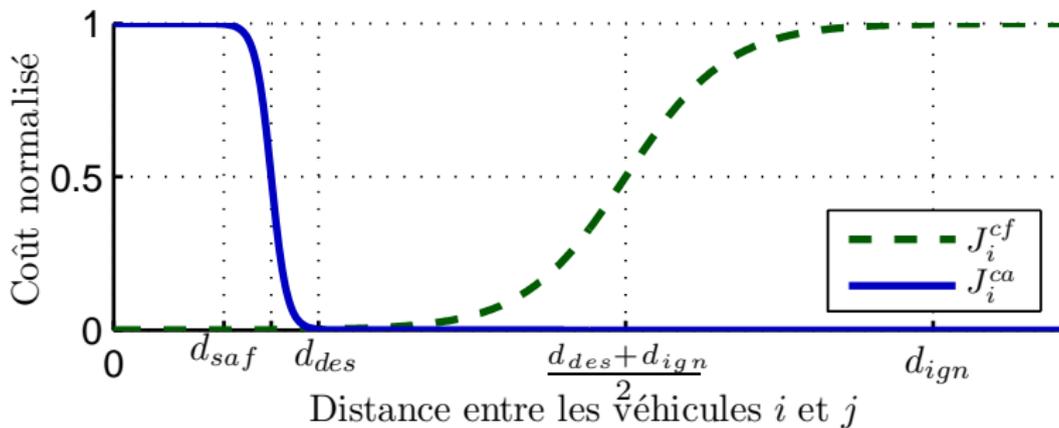
Problème miroir de l'évitement de collision

$$J_i^{cf}(k) = k^{cf} \cdot \sum_{j=1}^N \sum_{n=k+1}^{k+H_p-1} \frac{1 + \tanh\left(\left(\widehat{d}_{ij}(n) - \beta_f\right) \cdot \alpha_f\right)}{2}$$

$$\alpha_f = 6 \cdot (d_{ign} - d_{des})^{-1}$$

$$\beta_f = 1/2 \cdot (d_{ign} + d_{des})$$

# Détails des composantes (5)



# Sommaire

- 1 Formalisation du problème
- 2 Définition de la fonction objectif
- 3 Recherche de la meilleure séquence de commandes**
- 4 Simulation
- 5 Conclusion et perspectives

# Recherche de la meilleure séquence de commandes (1)

## Recherche systématique

- Séquence de commandes :  $\Delta v_i$  et  $\Delta \omega_i$  constants pendant  $H_c$  puis nuls
- Quadrillage de l'espace de commande
- Prédiction de la trajectoire produite pour chaque nœud
- Calcul du coût pour chaque nœud
- Sélection de la séquence produisant le coût le plus faible

## Avantages

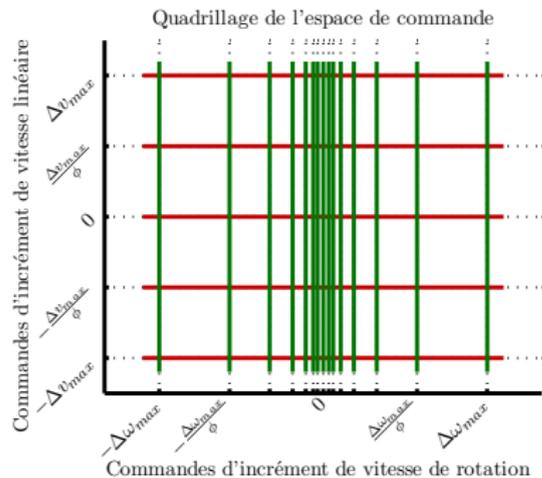
- Durée de calcul constante quelle que soit la situation
- Durée de calcul dépend uniquement de la précision désirée
- Insensible aux problèmes d'initialisation ou de minima locaux

# Recherche de la meilleure séquence de commandes (2)

## Quadrillage particulier

Insiste sur les commandes de faibles amplitudes

Inutile d'être précis au début de manœuvres de grande amplitude (urgence, demi tour ... )



# Recherche de la meilleure séquence de commandes (3)

Évolution des  
trajectoires  
candidates (à  
vitesse constante)

# Sommaire

- 1 Formalisation du problème
- 2 Définition de la fonction objectif
- 3 Recherche de la meilleure séquence de commandes
- 4 Simulation**
- 5 Conclusion et perspectives

# Simulation

$$d_{saf} = 50m$$

$$d_{des} = 100m$$

$$d_{ign} = 500m$$

$$v_{min} = 10m/s$$

$$v_{nom} = 20m/s$$

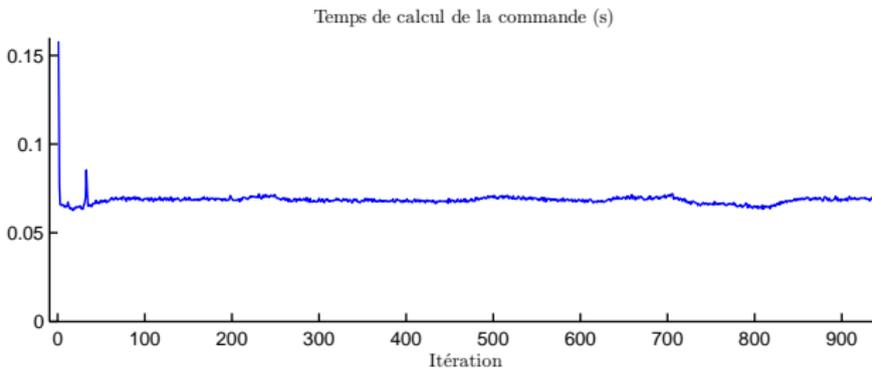
$$v_{max} = 30m/s$$

$$\omega_{max} = 0.3rad/s$$

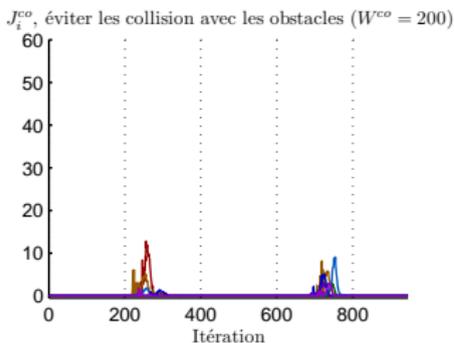
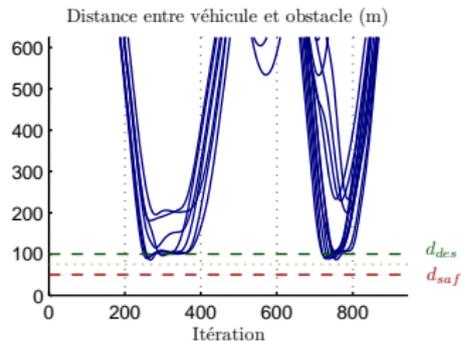
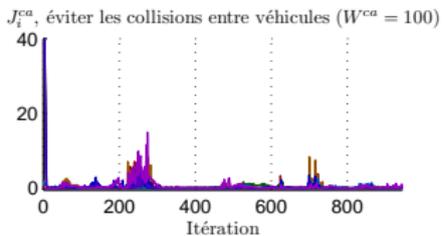
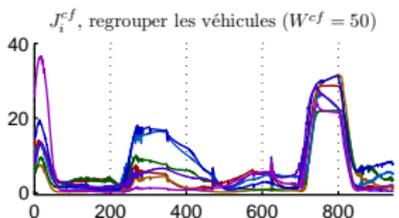
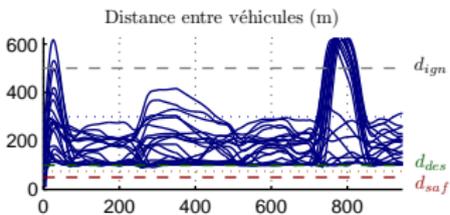
$$\Delta\omega_{max} = 0.15rad/s^2$$

$$\Delta v_{max} = 4m/s^2$$

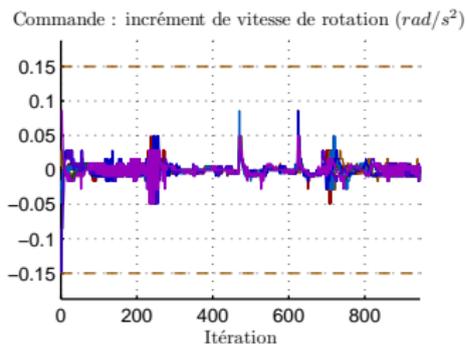
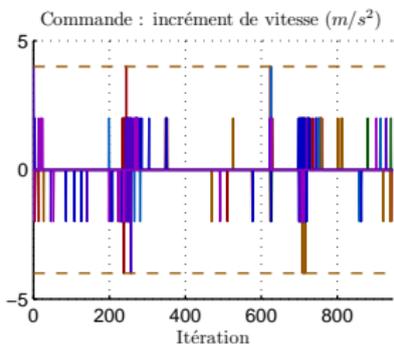
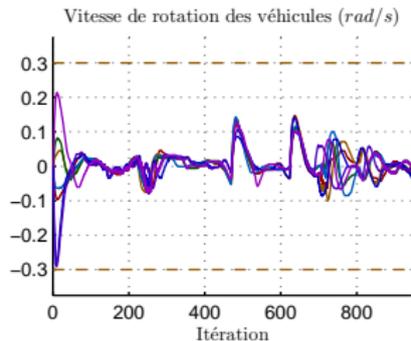
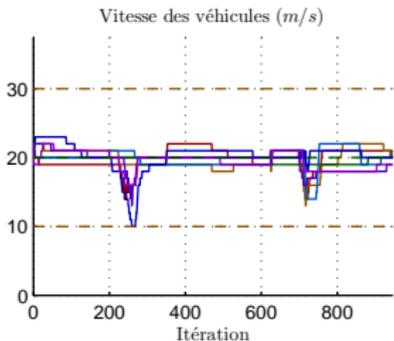
# Résultats (1)



# Résultats (2)



# Résultats (3)



# Conclusion et perspectives

## Conclusion

- Présentation d'une loi de guidage permettant
  - d'assurer l'accomplissement des différentes composantes d'une mission sans planification préalable
  - d'éviter les collisions
  - de regrouper les véhicules
- De plus,
  - Le calcul des commandes est distribué parmi les véhicules
  - La durée de calcul est constante quelle que soit la situation

## Travaux en cours et à venir

- Extension 3D de la méthode
- Utilisation d'un modèle réaliste de véhicule
- Utilisation de la méthode pour l'exploration coopérative

*Merci de votre  
Attention*

email : [yohan.rochefort\(at\)onera.fr](mailto:yohan.rochefort@onera.fr)