

robotex



Commande d'une formation de robots mobiles en environnement naturel

Audrey GUILLET



Cadre de travail

➤ *Thèse réalisée de 2012 à 2015*

➤ *Laboratoires porteurs*

- Irstea



- Institut Pascal



➤ *Financeurs / Structures de recherche*

- Labex ImobS³



- EquipEx RobotEx



➤ *Projet ANR SafePlatoon (2011-2014)*

- Gestion de convoi de véhicules autonomes
 - Localisation, commande, sécurité



Contexte

La robotique mobile pour l'agriculture

- En agriculture, solutions pour la gestion d'un véhicule
 - Consoles de guidage
- Prise en compte de la dimension coopérative des travaux
 - Collaboratio
 - Coopération



Introduction

Approche développée au cours de la thèse :

*Développer une architecture de commande
stable, sûre, précise et adaptable
pour une formation de robots mobiles évoluant
en environnement naturel*

- Guidage
- Coopération
- Sécurité

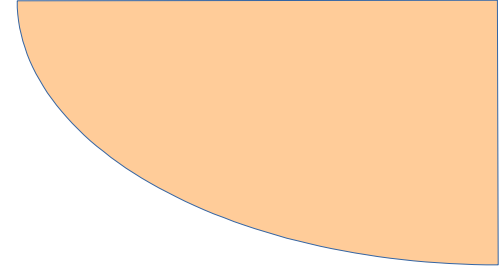


Phénomènes agissant sur l'évolution des véhicules :

- Terrain irrégulier et variable
- Faibles conditions d'adhérence
- Glissements non-négligeables
- Inertie du véhicule

I – Introduction

II – Poursuite de cible
III – Stratégie de commande
IV – Sécurité de la formation
V – Perspectives

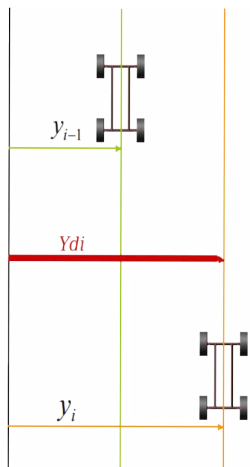


Guidage d'un véhicule pour le suivi d'une cible

- I – Introduction
- II – Poursuite de cible**
- III – Stratégie de commande
- IV – Sécurité de la formation
- V – Perspectives

Commande adaptative de l'angle de braquage

Asservissement latéral :
Commande de l'angle de braquage



- Erreur de positionnement latéral

$$\varepsilon_i^y = y_i - y_i^{des}$$

- Régulateur du 2nd ordre sur l'écart latéral

$$y''_i = -K_d \varepsilon_i^y - K_p \varepsilon_i^y + y_i'^{des}$$

- Loi de commande du braquage

$$\delta_i = \arctan \left[\tan(\beta_i^R) + \frac{L}{\cos(\beta_i^R)} \left(\frac{c(s_i) \cos \gamma_i}{\alpha_i} + \frac{A_i \cos^3 \gamma_i}{\alpha_i^2} \right) \right] - \beta_i^F$$

$$\begin{cases} \gamma_i &= \tilde{\theta}_i + \beta_i^R \\ \alpha_i &= 1 - c(s_i) y_i \\ \eta_i &= \tan \gamma_i - \frac{\dot{y}_i^d}{v_i \cos \gamma_i} \\ A_i &= -K_p \varepsilon_i^y - K_d \alpha_i \eta_i + c(s_i) \alpha_i \tan^2 \gamma_i \end{cases}$$

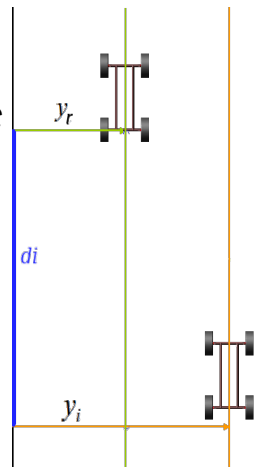
Asservissement longitudinal :
Commande de la vitesse

- Erreur de positionnement longi. du robot i par rapport à la cible c

$$\varepsilon^d = d - d^{des}$$

- Régulateur du 1^{er} ordre sur l'écart longi.

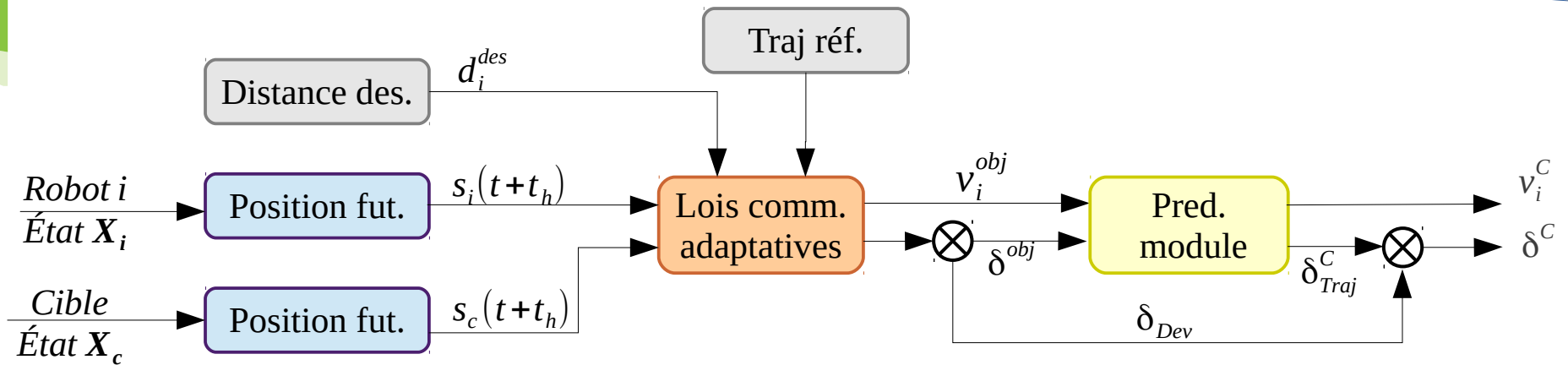
$$\dot{\varepsilon}_i^d + k_i \varepsilon_i^d = 0$$



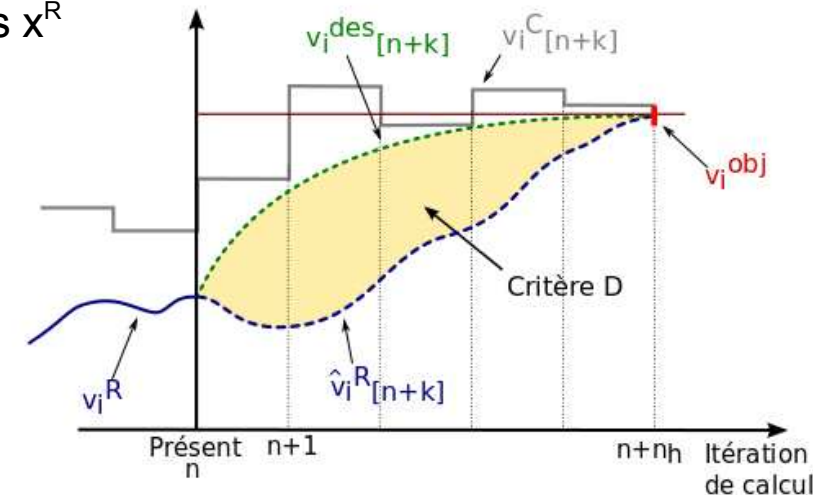
- Loi de commande de la vitesse du robot i

$$v_i = \frac{1 - c(s_i) y_i}{\cos(\tilde{\theta}_i + \beta_i^R)} \left(\frac{v_c \cos(\tilde{\theta}_c + \beta_c^R)}{1 - c(s_c) y_c} + k_i \varepsilon_i^d \right)$$

Commande prédictive



- Estimation des positions futures du robot i et de la cible à l'horizon t_h :
- Objectifs de commande x^{obj} de braquage et de vitesse à $t+t_h$:
 - Lois de commande adaptatives appliquées aux positions futures
- Module de commande prédictif :
 - Définition de la forme désirée pour rejoindre x^{obj} depuis x^R
 - Connaissant le modèle d'évolution du bas-niveau,
 - Calcul de la suite de commandes x^C permettant de suivre au mieux la forme désirée :
Minimisation du critère D

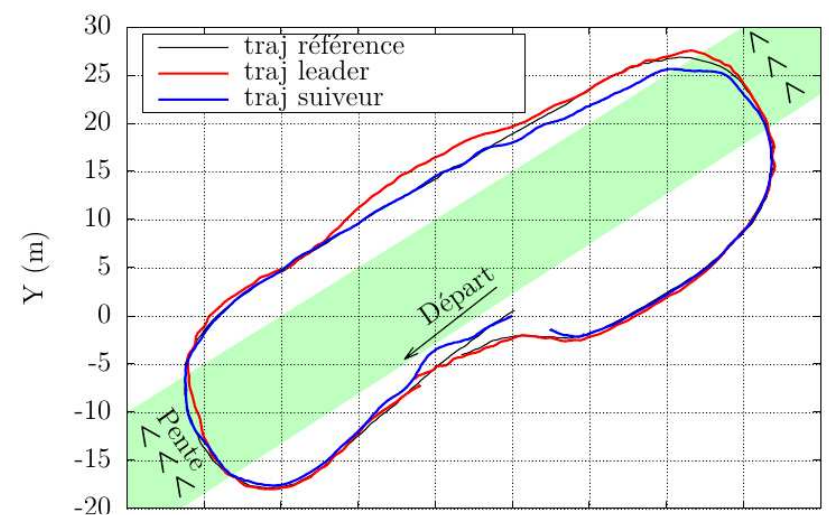


- Application de la première commande x^C

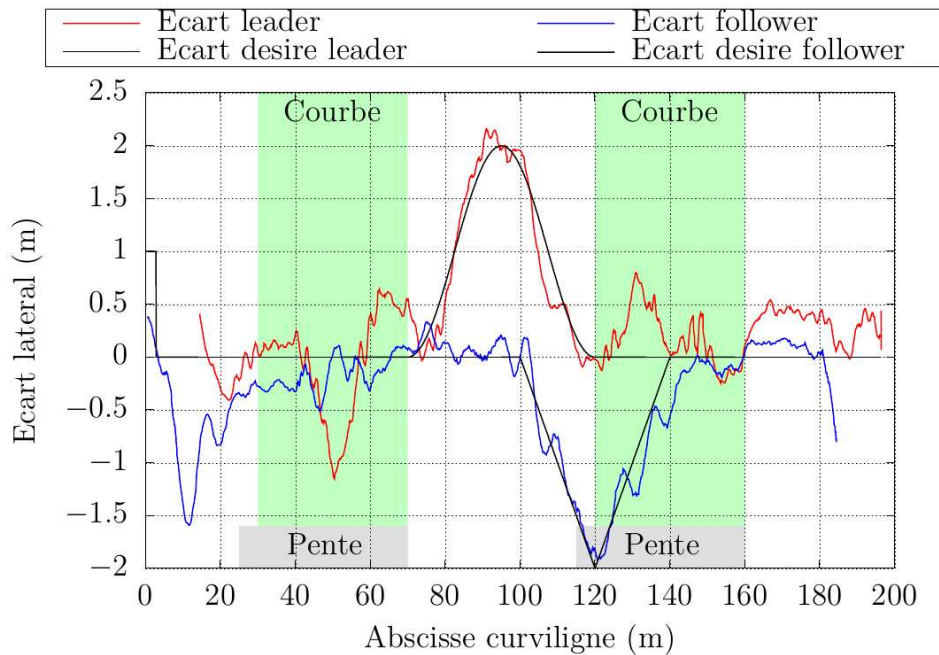
Résultats expérimentaux

Suivi d'un véhicule cible

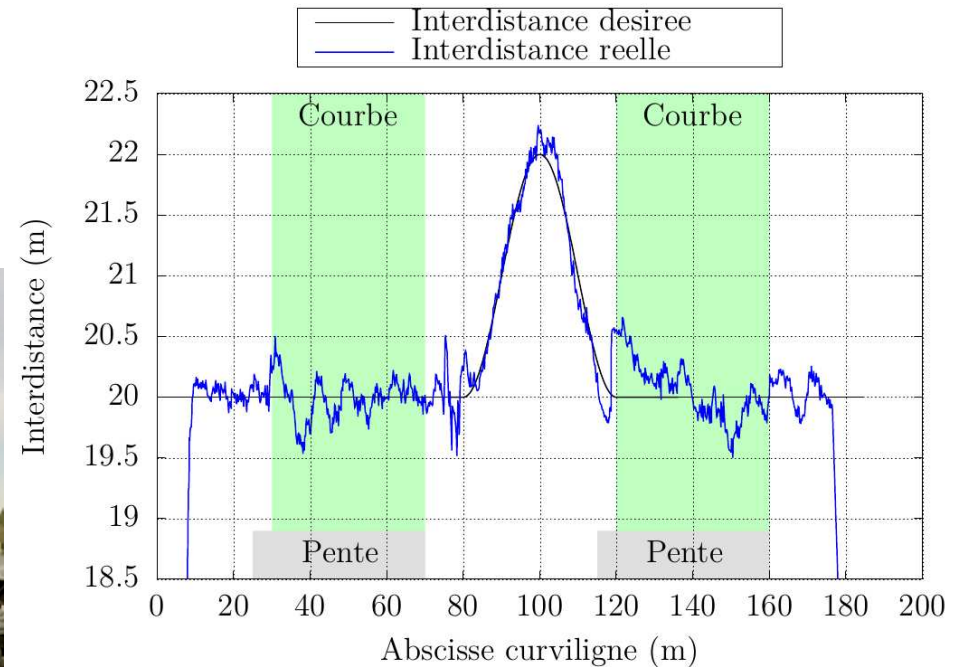
- Interdistance désirée variable : 20-22m
- Écart latéral désiré variable : 0-2m
- Vitesse véhicule cible constante : 2 m/s

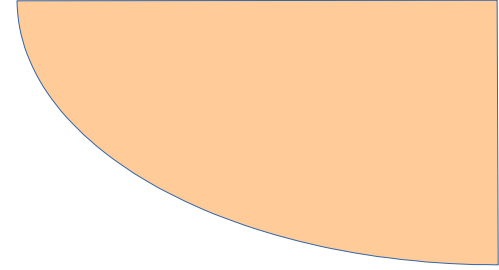


Asservissement latéral



Asservissement longitudinal





Stratégie de commande en formation

Stratégie de commande

Commande bidirectionnelle pondérée

À partir d'une stratégie de commande classique leader-follower de proche en proche

- Pas de stabilité globale du comportement de la formation

Pour un comportement plus compact de la formation, définition de 2 leaders virtuels cohérents (en première et dernière position)

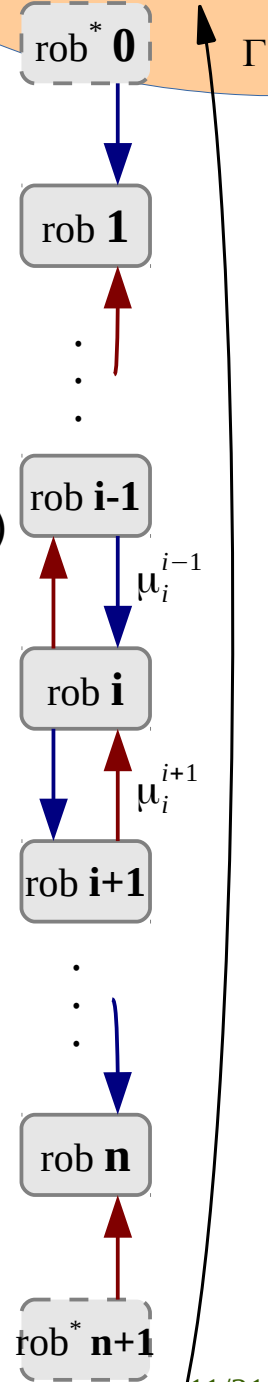
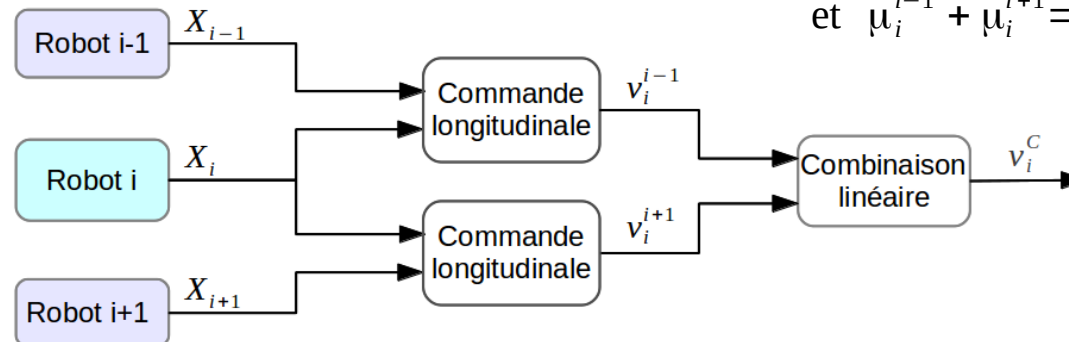
- Commande avec un référencement de proche en proche **descendant**
et
$$v_i^{i-1} = f(X_i, X_{i-1})$$

- Commande avec un référencement de proche en proche **ascendant**
$$v_i^{i+1} = f(X_i, X_{i+1})$$

- Combinaison linéaire des 2 commandes
$$v_i^C = \mu_i^{i-1} v_i^{i-1} + \mu_i^{i+1} v_i^{i+1}$$

avec $(\mu_i^{i-1}, \mu_i^{i+1}) \in [0,1]$

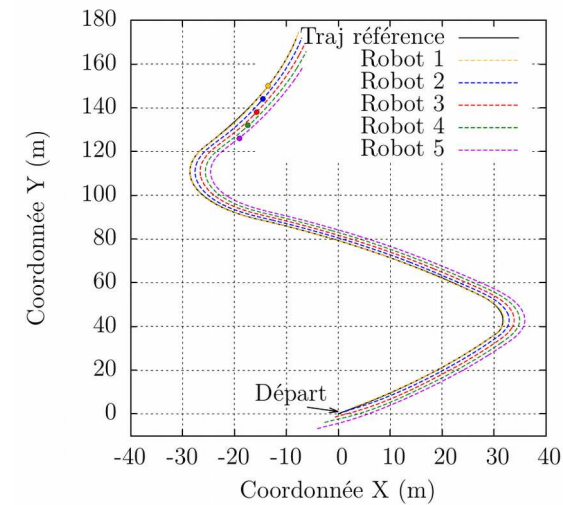
et $\mu_i^{i-1} + \mu_i^{i+1} = 1$



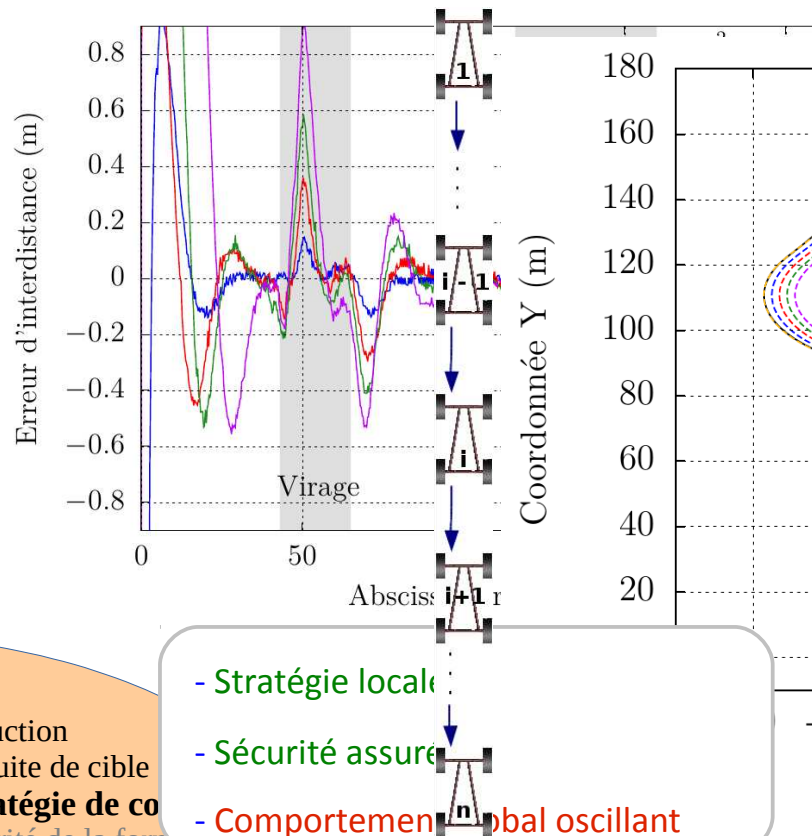
Stratégies existantes leader - suiveur

Résultats de simulation avec 5 robots

- Vitesse leader fixe : 3 m/s
- Interdistance désirée : $d_{i/i-1} = 3$ m
- Écart lateral désiré : $y_i = 2 \cdot (i-1)$ m



Référencement de proche en proche

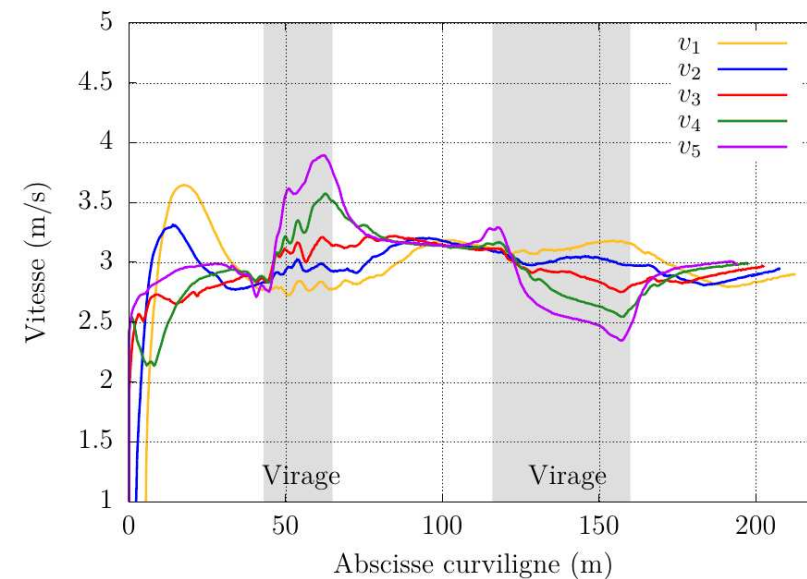


- Stratégie locale
- Sécurité assurée
- Comportement global oscillant

Référencement bidirectionnel

$$(u_{i-1}^i = u_{i+1}^i = 1/2)$$

Vitesse des robots en référencement bidirectionnel



- Stabilité globale de la formation
 - Liens de communication réduits et locaux
- ➡ Stratégie implémentable sans communication active entre les robots voisins



Gestion des distances de sécurité inter-véhicules

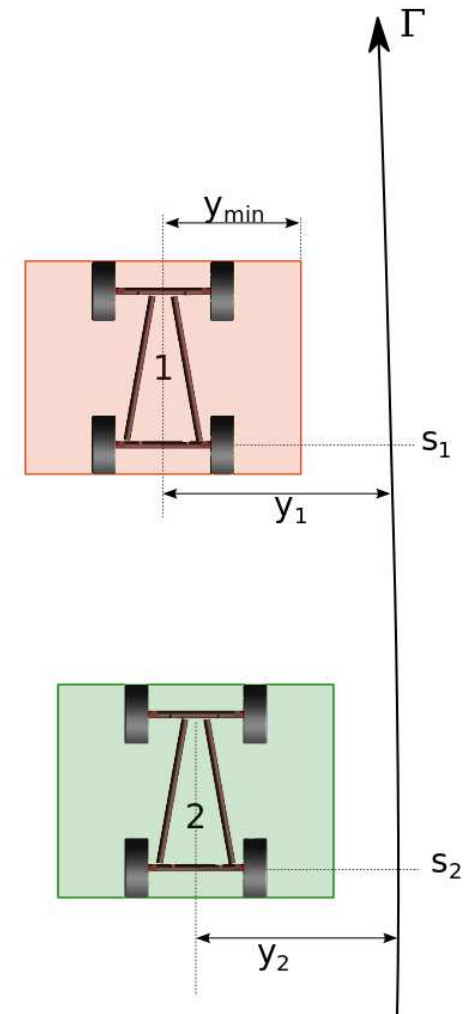
Sécurité de la formation

➤ Non collision entre les véhicules

- Connaissance de la position du véhicule immédiatement précédent
 - Véhicule de référence pour l'étude de la sécurité

*Si le robot précédent s'arrête subitement (défaillance, ...),
pourra-t'on l'éviter :*

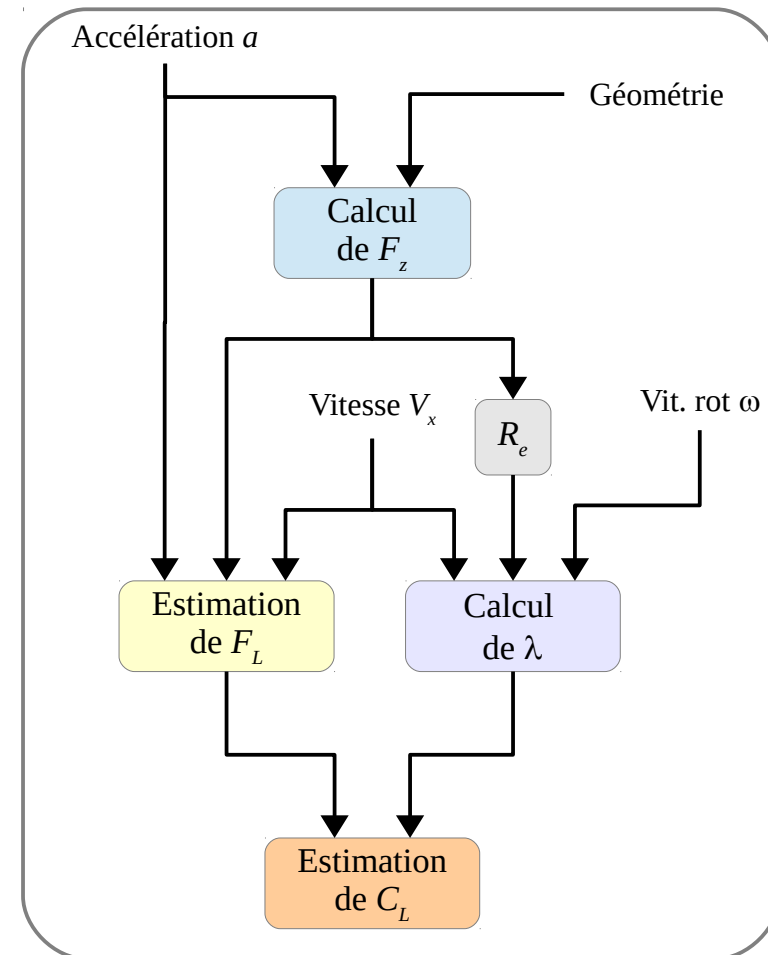
- Par un arrêt d'urgence ?
- Par une trajectoire d'évitement ?



Arrêt d'urgence

Lors d'un arrêt d'urgence, les efforts longitudinaux exercés sur le pneumatique deviennent non-négligeables

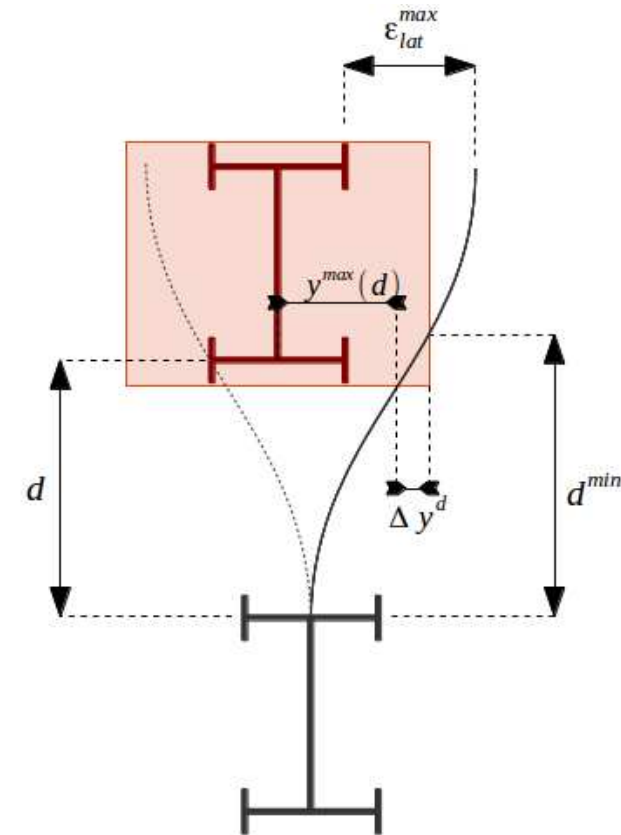
- Modélisation du comportement longitudinal du pneu
 - Estimation des efforts et rigidités longitudinaux
 - Effort vertical F_z
(charge statique + transfert de masse)
 - Glissement longitudinal λ
 - Effort longitudinal F_L
 - Rigidité longitudinale C_L
- Comportement d'arrêt
 - Effort longitudinal transmissible maximum
 - Rigidité longitudinale C_L constante et connue
 - Glissement optimal $\lambda_{max} = 0.1$
 - Commande d'arrêt d'urgence correspondante
 - Commande en couple

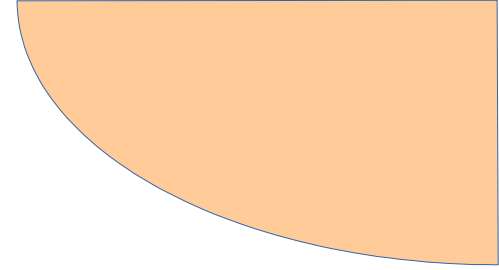


- Estimation de la distance d'arrêt
 - Décélération de freinage constante

Trajectoires d'évitement

- Évitement du robot précédent immobile
 - À vitesse d'avance constante
 - Angle de braquage maximal du véhicule δ^{max}
- Définition de la trajectoire d'évitement
 - D'après la loi de commande du braquage
 - Trajectoire du second ordre d'écart latéral cinématiquement admissible
- Calcul du décalage maximal
 - En parcourant la trajectoire, écart latéral obtenu après la distance inter-véhicule
- En cas de danger, modification des distances désirées :
 - Modification de l'écart latéral désiré $y^{des} += \Delta y^d$,
 - Augmentation de l'interdistance désirée $d^{des} = d^{min}$.



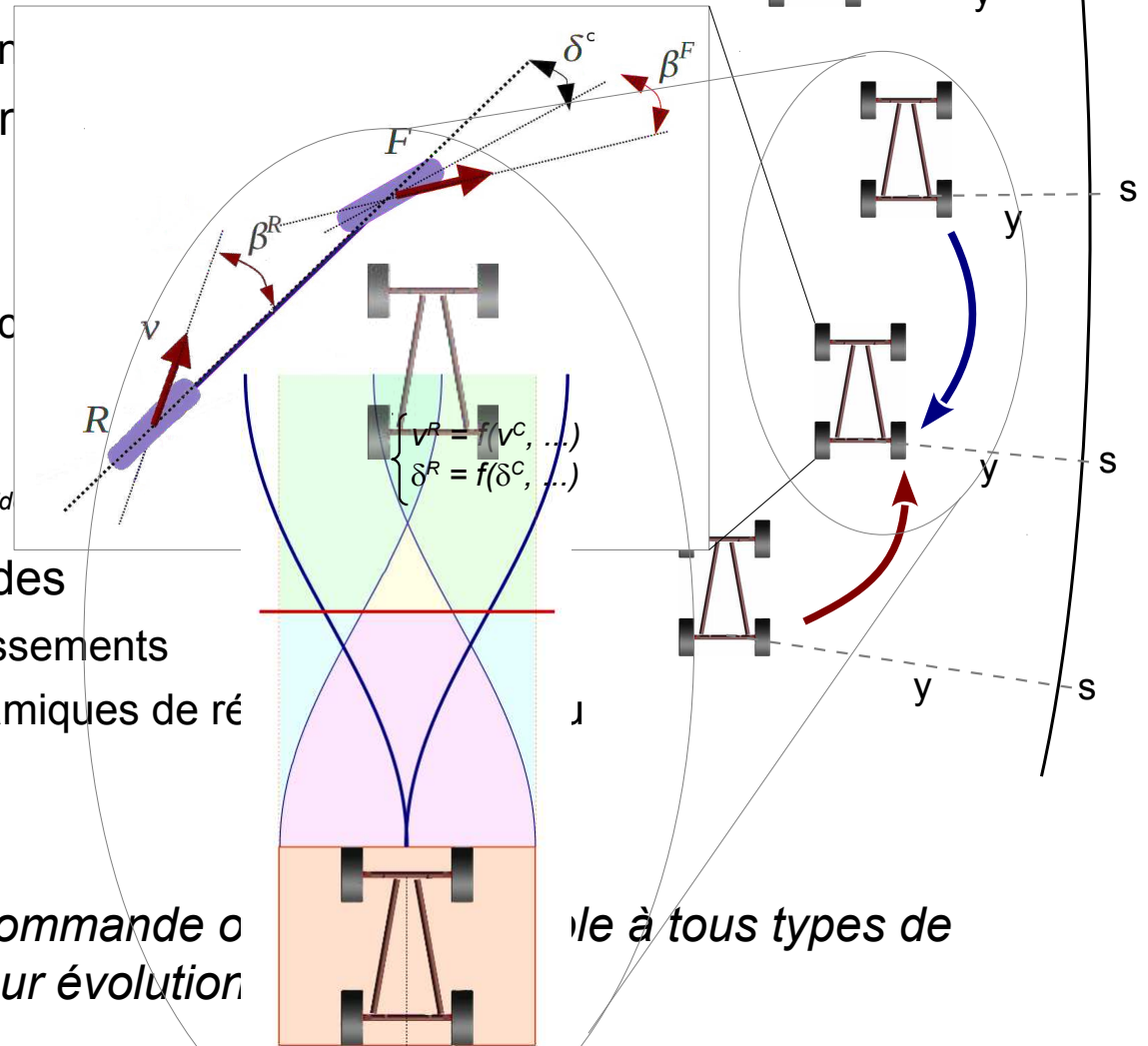


Conclusion et perspectives

Conclusion

➤ *Commande d'une formation de robots mobiles*

- Localisation
 - Par rapport à une référence
- Échange d'informations en
 - Communication active
- Vérification de la sécurité
 - Par rapport au robot précédent
 - Arrêt d'urgence
 - Évitement
 - Modification de y^{des} ou d^{des}
- Élaboration des commandes
 - Prise en compte des glissements
 - Compensation des dynamiques de ré



➤ *Architecture de commande o
formations et à leur évolution*

le à tous types de

Vers des machines totalement autonomes ?

- Quels niveaux d'autonomie pour quelles utilisations ?
 - Assistance au conducteur par l'automatisation partielle de certaines tâches, avec l'humain toujours au centre de la boucle
 - Rupture technologique nécessaire pour arriver au stade d'automatisation totale, repenser la place de l'homme en tant que superviseur
- Objectifs applicatifs
 - Alléger l'agriculteur de tâches répétitives et extrêmement chronophages
 - Capacité à fonctionner quel que soient les conditions d'évolution et à s'adapter à l'environnement
 - Redondance de capteurs
- Exigence fondamentale : assurer la **sécurité**
 - Sécurité de l'opérateur (dans ou en dehors des tracteurs)
 - Sécurité de l'application : maintien des tracteurs dans leur zone d'évolution désirée
 - Garantir l'intégrité des tracteurs



Merci de votre attention

