

Planification de Trajectoires pour la Navigation des Véhicules Autonomes

Alia CHEBLY

Directeurs de thèse : Ali Charara et Reine Taj

Laboratoire Heudiasyc, UMR CNRS 7253
Université de Technologie de Compiègne
Equipe ASER

Plan

- Introduction
- Objectifs
- Méthode des Tentacules
- Méthode énergétique
- Conclusion
- Perspectives

Introduction

Objectifs de la navigation autonome



Assurer une meilleur circulation

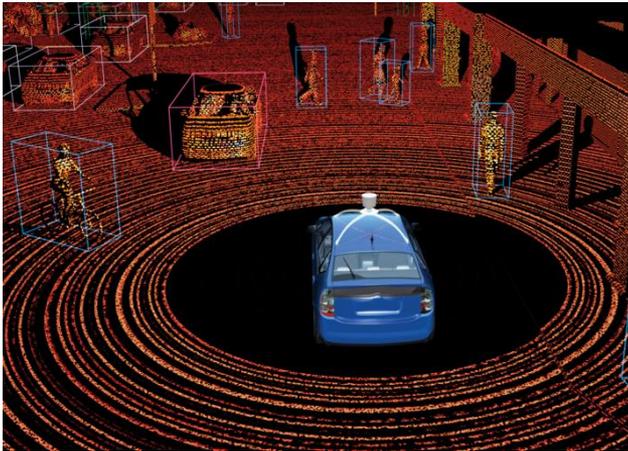


Libérer l'homme de la conduite

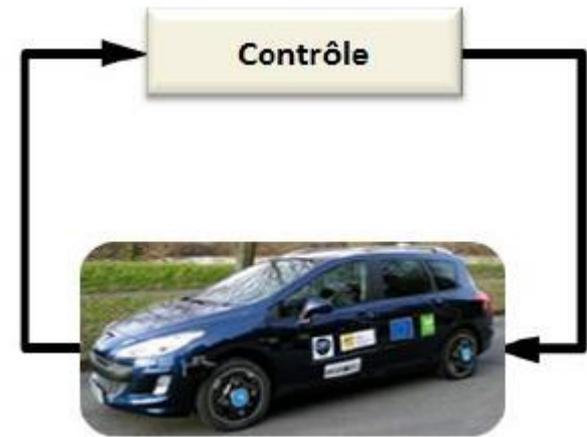


Corriger les défaillances

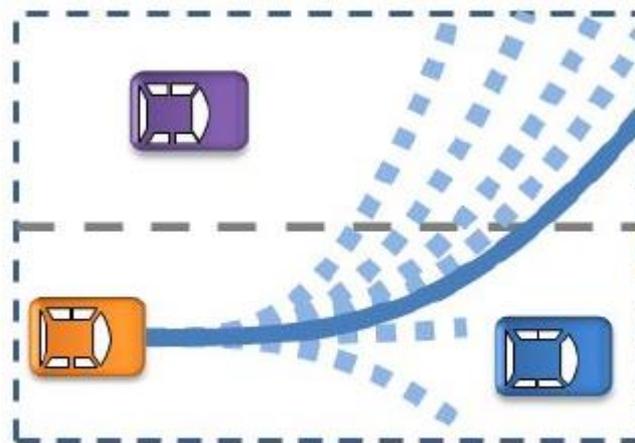
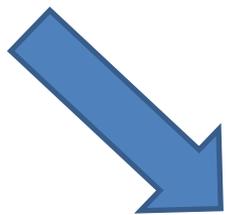
Etapes clés



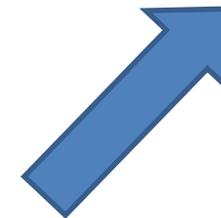
Perception et localisation



Contrôle du véhicule



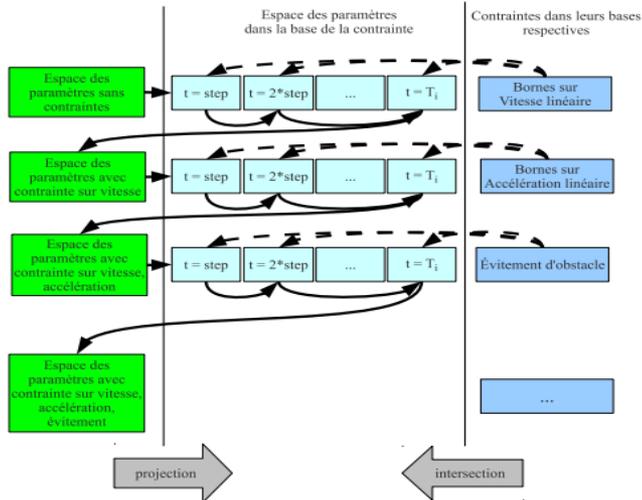
Planification de trajectoires et décision



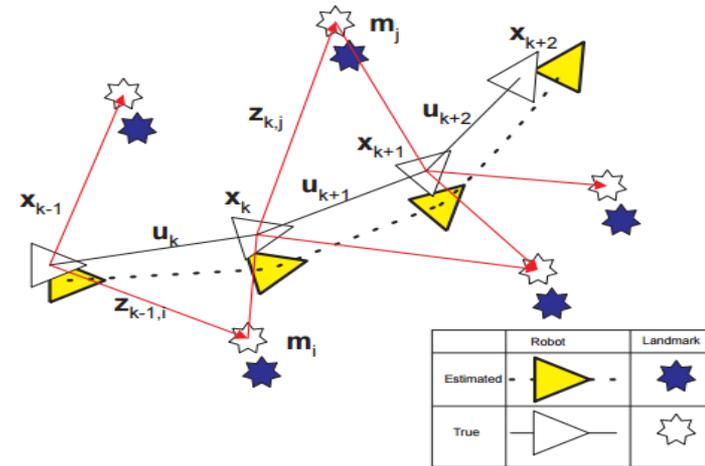
Planification de Trajectoires

Etat de l'art...

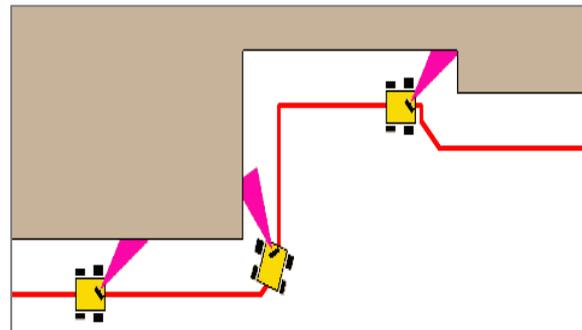
- Fenêtre dynamique [FBT97]



- Localisation et cartographie simultanées [TaI]

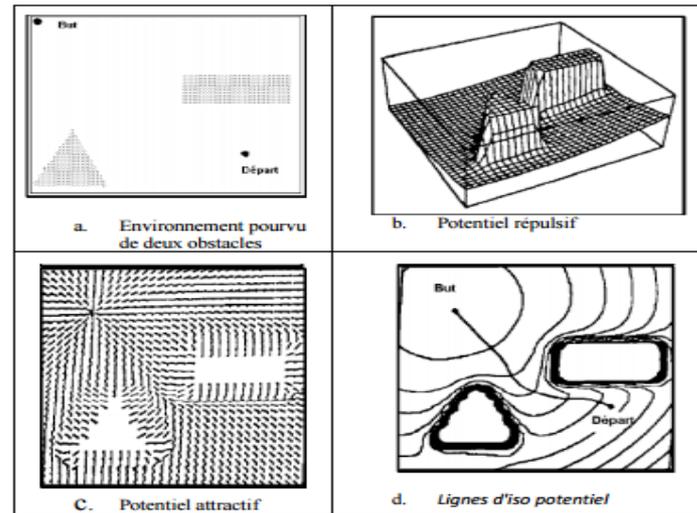


- Suivi de mur [JS09]



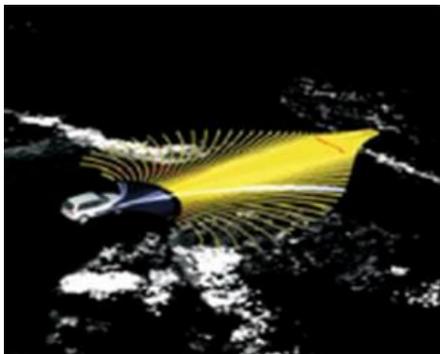
Etat de l'art...

- Champs de potentiel [PHK+05]

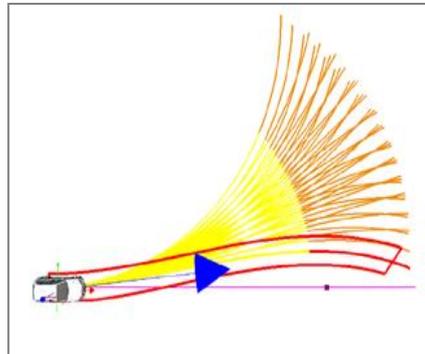


- Tentacules sous forme de [HHH+08] :

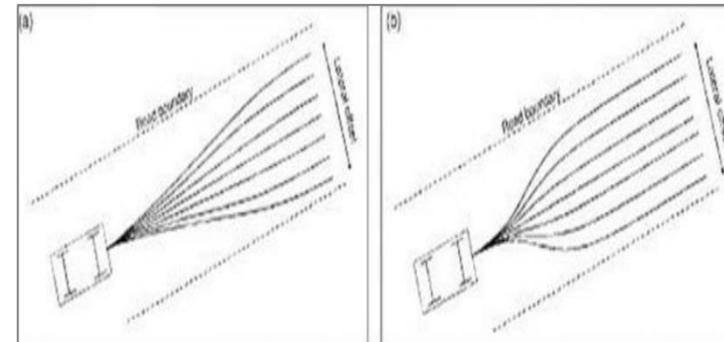
Arcs de cercles



Clothoides



« Nudge » et « swerve »



Approches choisies

□ Méthode des Tentacules sous forme de Clothoïdes

- Méthode simple et rapide
- Prend en compte l'angle de braquage actuel du véhicule

□ Méthode énergétique basé sur le modèle

- Considération des dynamiques du véhicule
- Représentation des sous-systèmes constituant le véhicule
- Développement des stratégies de contrôle basées sur le principe de la passivité

Méthode des Tentacules

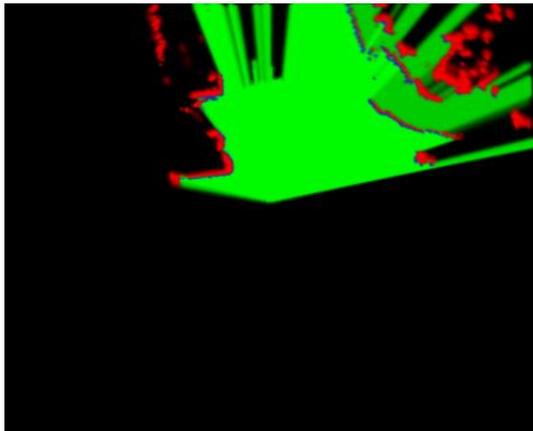
Stratégie de navigation choisie [HHH+08]

Génération de grille d'occupation



- LIDAR Alaska XT (10 Hz)
- Grille d'occupation 2D : 800×800 cellules
- Cellule : 25cm×25cm

Exemple d'une grille [Mor13]



- Cellule libre
- Cellule occupée
- Cellule qui a changé d'état
(Obstacles mobiles ou bruits)

Génération des tentacules

$$\delta_0$$

$$V_x$$

$$a_{y_{\max}}$$

$$a_{x_{\max}}$$

Courbure initiale

$$\rho_0 = \frac{\tan(\delta_0)}{l}$$

Longueur des tentacules:

$$L_{\text{tentacule}} = 7 * V_x - 5$$

Distance de collision

$$L_c = \frac{V_x^2}{a_{x_{\max}}}$$

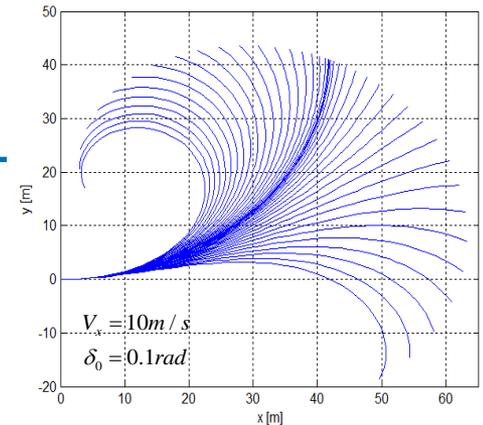
Variation de la courbure par rapport à la longueur du tentacule

$$\frac{\Delta\rho}{\Delta\ell} \in \left\{ \frac{(-\rho_{\max} - \rho_0)}{L_c}, \frac{(\rho_{\max} - \rho_0)}{L_c} \right\}$$

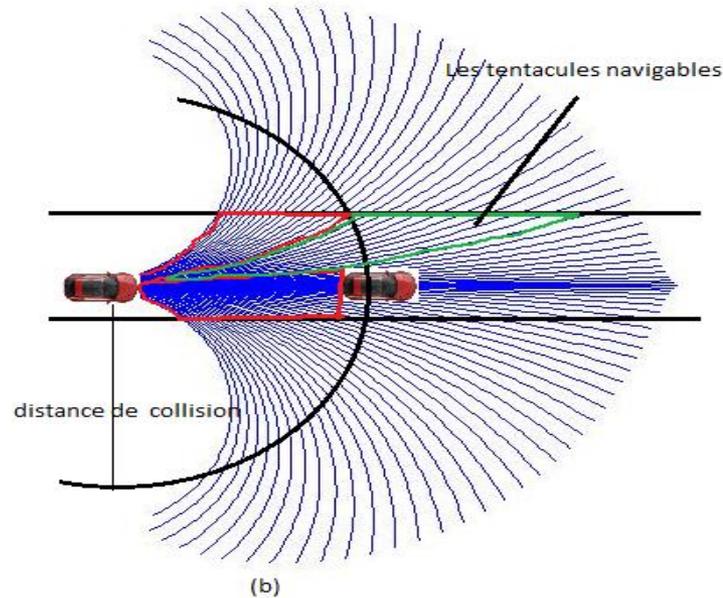
Courbure maximale définie pour une longueur égale à L_c

$$\rho_{\max} = \frac{a_{y_{\max}}}{V_x^2}$$

n Tentacules (41)



Recherche des tentacules navigables



- Distance de collision $L_c = \frac{V_x^2}{a_{x_{\max}}}$

- Tentacule navigable :

Aucun obstacle dans la région de distance inférieure à L_c

Choix du meilleur tentacule

- Calcul de trois critères :
 - Valeur de dégagement $V_{clearance}$
 - Valeur de changement de courbure $V_{curvature}$
 - Valeur de suivi de trajectoire $V_{trajectory}$

$$V_{combined} = a_0 * V_{clearance} + a_1 * V_{curvature} + a_2 * V_{trajectory}$$

- Tentacule choisi : Tentacule navigable qui minimise $V_{combined}$
- Exécution à l'aide d'un contrôleur de la dynamique latérale.

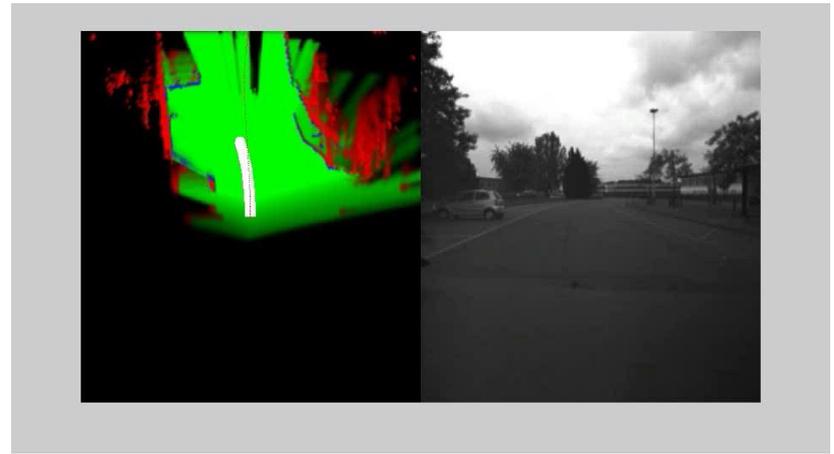
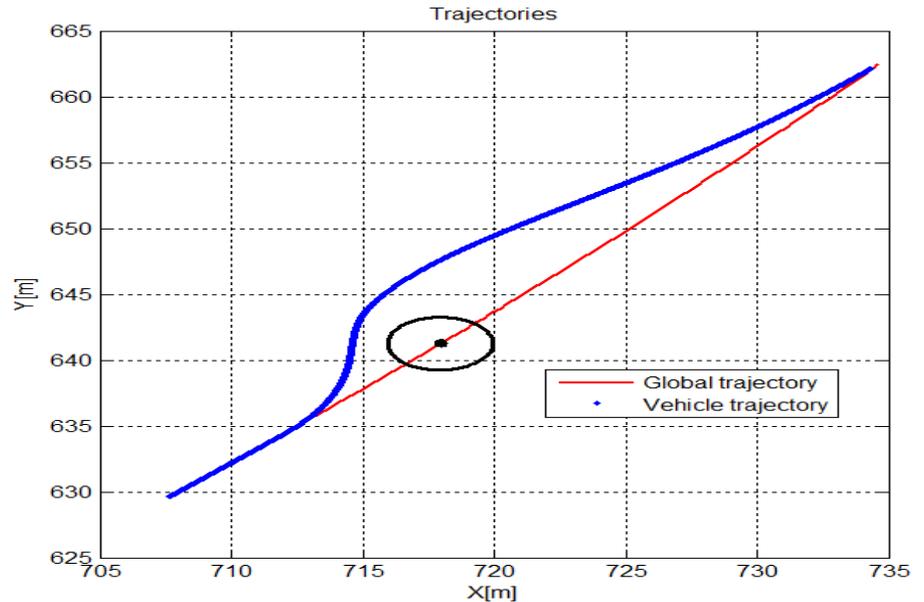
Résultats

1. Un scénario du simulateur Scanner-Studio a été utilisé.

Etapes de travail :

- Générer une carte globale
- Positionner le véhicule dans cette carte
- Générer une carte locale égo-centrée
- Appliquer l'algorithme de navigation développé
- Contrôler le véhicule (contrôleur $I&I$ [TTC13])

2. Test "hors-ligne" sur des données réelles acquises sur le véhicule CARMEN



Méthode énergétique

Modélisation énergétique d'un véhicule en utilisant le formalisme de la robotique

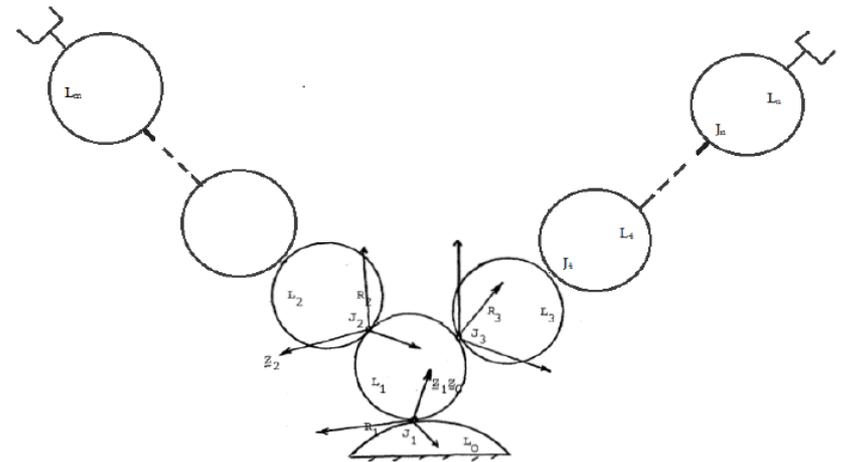
- Description de Denavit-Hartenberg modifiée
- Formalismes connus :
 1. Formalisme de Lagrange
 2. Formalisme de Newton-Euler

- Modèle dynamique inverse

$$\Gamma = f(q, \dot{q}, \ddot{q}, f_e, g)$$

- Modèle dynamique direct

$$\ddot{q} = f(q, \dot{q}, \Gamma, f_e, g)$$



Formalisme de Newton-Euler

Méthode de Luh, Walker et Paul [LWP80]

I. Récurrence avant

- Calcul des vitesses, accélérations et torseurs dynamiques

$${}^j \boldsymbol{w}_j \quad {}^j \dot{\boldsymbol{w}}_j \quad {}^j \dot{\boldsymbol{V}}_j \quad {}^j \boldsymbol{F}_j \quad {}^j \boldsymbol{M} \boldsymbol{o}_j \quad j = 1 \rightarrow n$$

- Initialisation par les vitesses linéaires et angulaires de la base du robot

II. Récurrence arrière

- Calcul des efforts articulaires en prenant en compte les efforts extérieurs

$${}^j \boldsymbol{f}_j \quad {}^j \boldsymbol{m} \boldsymbol{o}_j \quad j = n \rightarrow 1$$

- Initialisation par des efforts nuls au niveau du corps terminal

- Calcul des couples articulaires Γ :

Projection des efforts articulaires sur l'axe de mouvement de l'articulation

- Calcul du modèle Lagrangien :

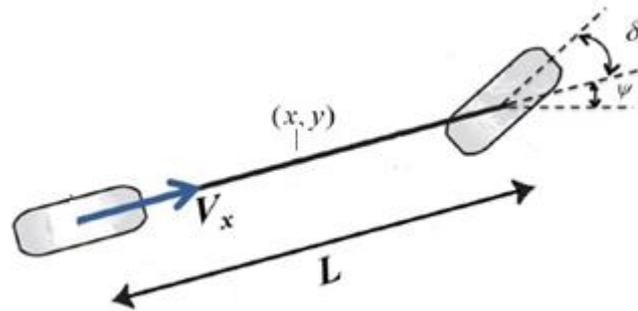
$$\Gamma = f(q, \dot{q}, \ddot{q}, f_e, g) = A(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q}) + J(q)f_e$$

- ***Modèle dynamique direct***

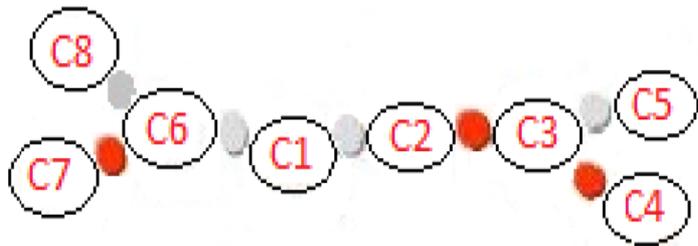
$$\ddot{q} = A^{-1}(q) [\Gamma - H(q, \dot{q}) - J(q)f_e]$$

Modèle bicyclette

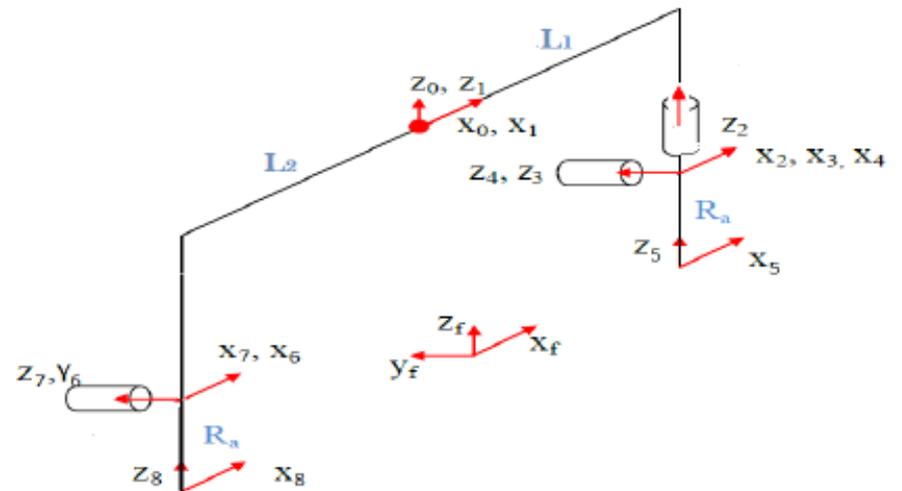
- Vecteurs d'état: $q = [x \ y \ \psi \ \theta_1 \ \theta_2 \ \delta]$
- Dynamiques de tangage et de roulis : négligées.
- Forces de contact pneumatique/chaussée : Modèle de Dugoff.



Modèle bicyclette .



Système poly-articulé décrivant le véhicule.



Modèle articulaire à 5 ddl et 8 corps.

Modèle obtenu :

$$A = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & L_1 m_f - L_2 m r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_1 m_f - L_2 m r & I_{zc} + L_1^2 m_f + L_2^2 m r + I_b & 0 & 0 & I_b \\ 0 & 0 & 0 & I_w & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_w & 0 \\ 0 & 0 & I_b & 0 & 0 & I_b \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \rho C_d s \dot{x}^2 + (L_2 m_r - L_1 m_f) \dot{\psi}^2 - m \dot{\psi} \dot{y} \\ m \dot{\psi} \dot{x} \\ (-L_2 m_r + L_1 m_f) \dot{\psi} \dot{x} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

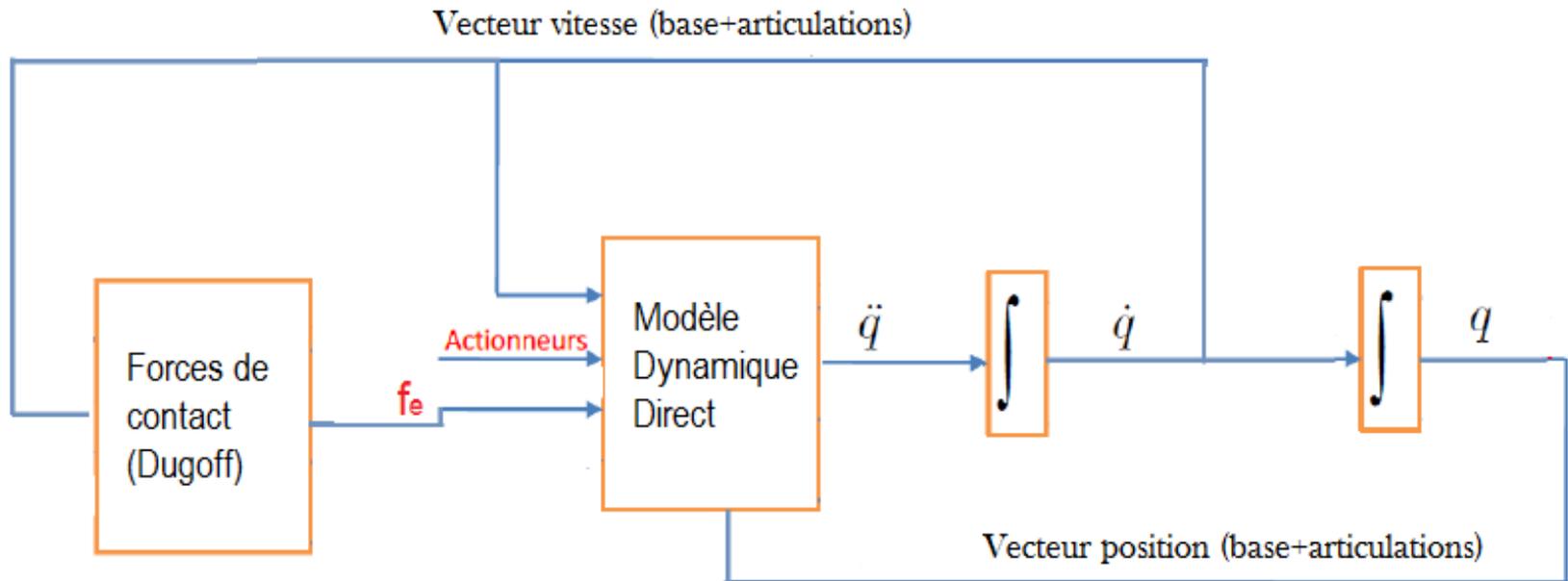
$$J = \begin{bmatrix} -\cos(\delta) & \sin(\delta) & -1 & 0 \\ -\sin(\delta) & -\cos(\delta) & 0 & -1 \\ -L_1 \sin(\delta) & -L_1 \cos(\delta) & 0 & L_2 \\ R_{eff} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{eff} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad f_e = \begin{bmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ F_{x2} \\ F_{y2} \end{bmatrix}$$

$$\ddot{q} = A^{-1}(q) [\Gamma - H(q, \dot{q}) - J(q) f_e]$$

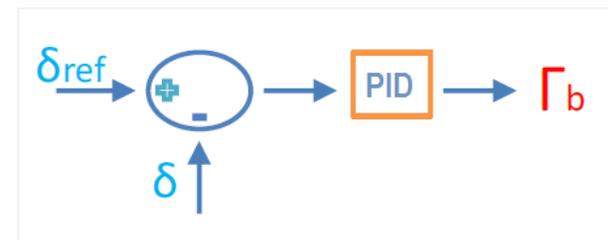
$$q = [x \quad y \quad \psi \quad \theta_1 \quad \theta_2 \quad \delta]$$

L'implémentation de l'algorithme est faite sous Matlab/Simulink.

- Architecture du simulateur du modèle dynamique



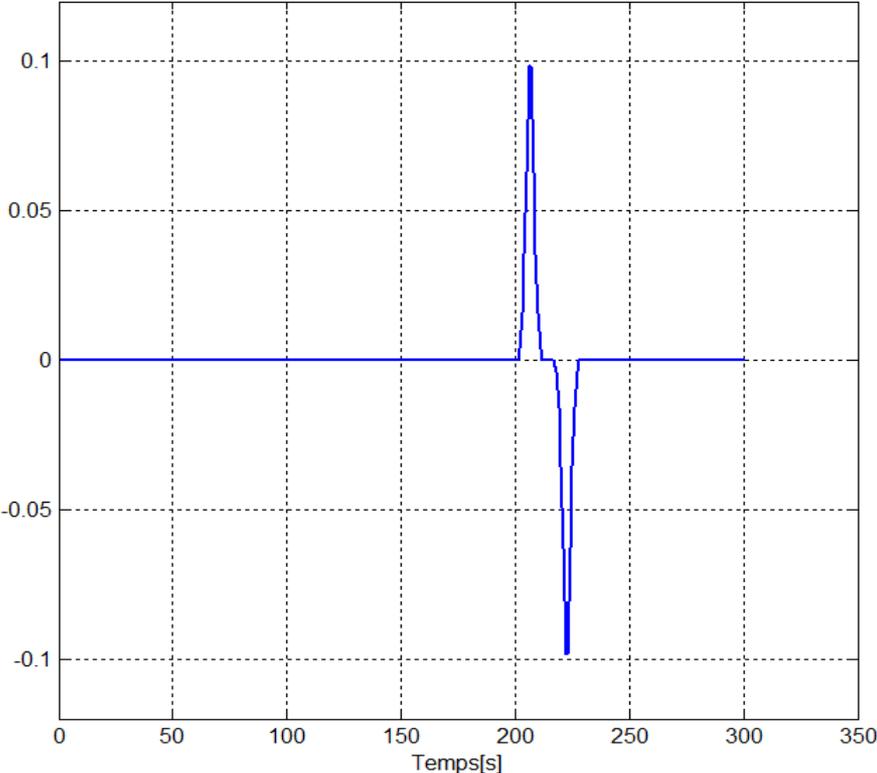
- Génération du couple de braquage



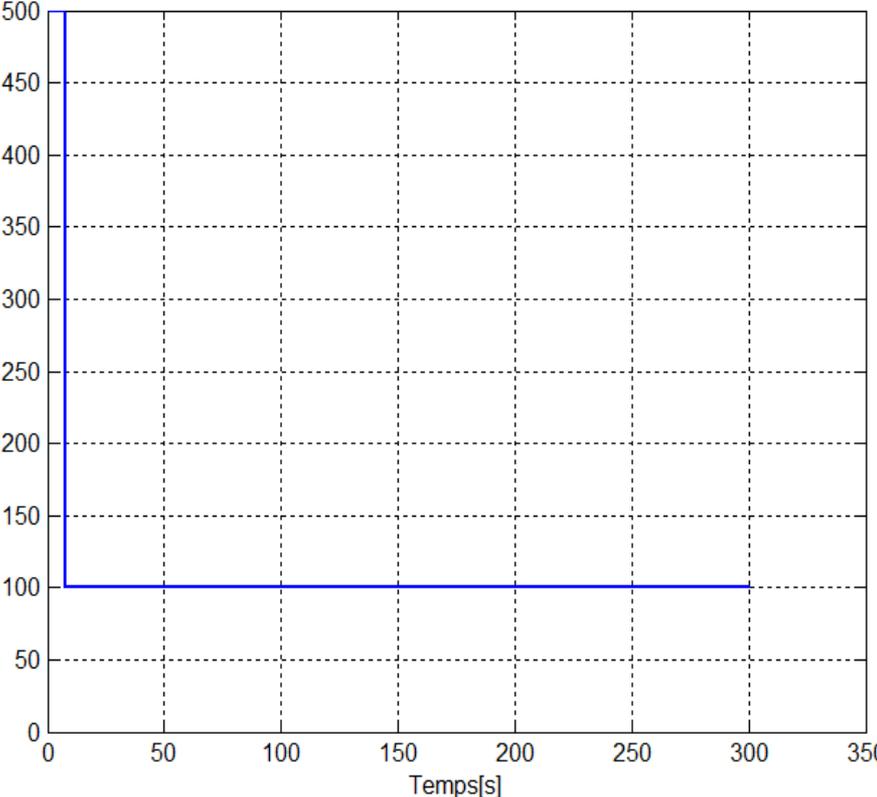
Validation : essai en virage

Entrées du modèle

Angle de braquage désiré [rad]

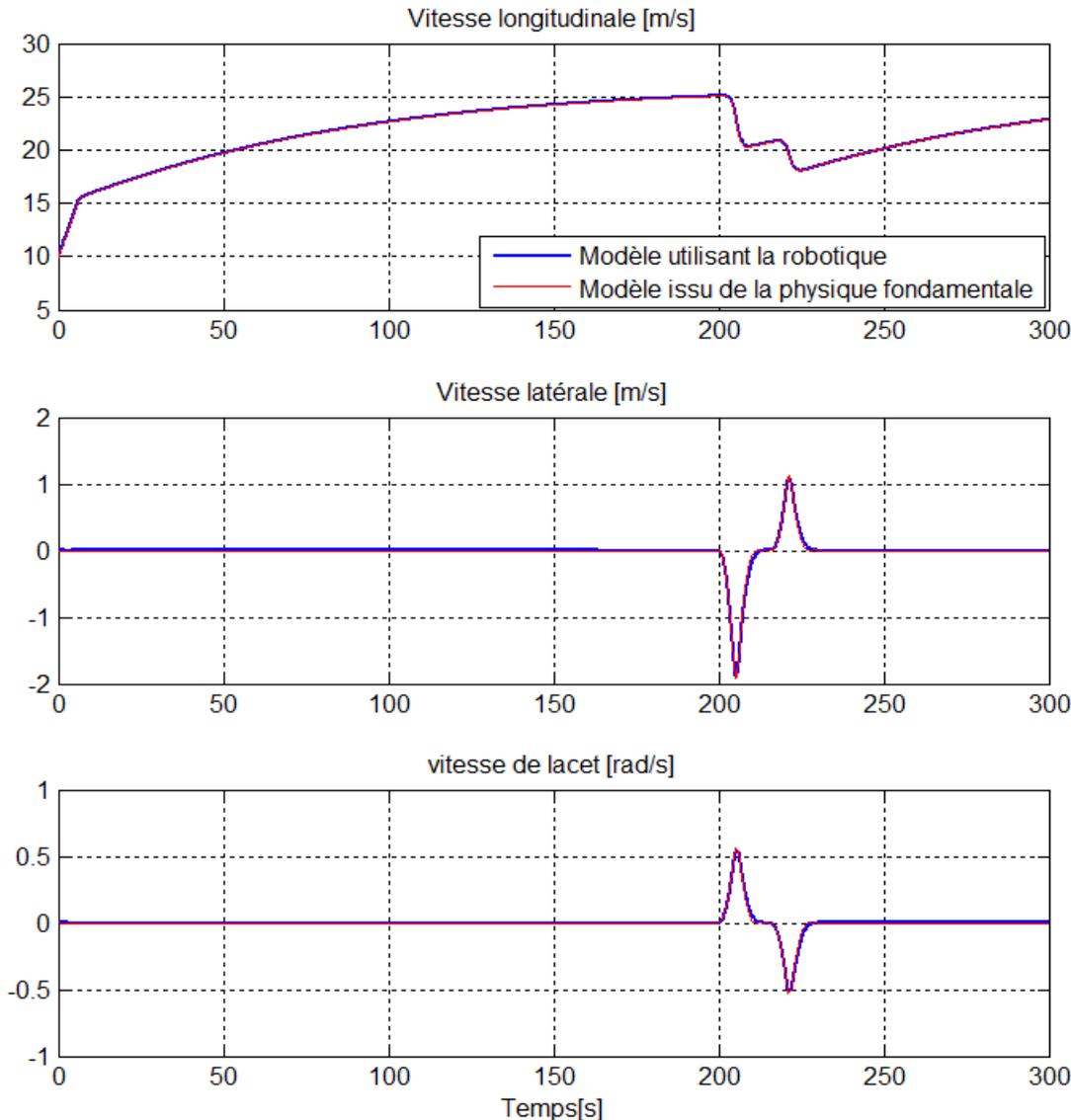


Couple sur la roue arrière [N.m]



Sorties du modèle :

Comparaison entre le modèle développé en utilisant le formalisme de robotique et le modèle obtenu en appliquant le principe fondamental de la physique



Erreur relative maximale:

- 0,78% en terme de vitesse longitudinale
- 2% en terme de vitesse latérale et vitesse de lacet

Le modèle basé sur le formalisme de Robotique est plus exacte puisqu'il prend en compte les interactions entre les différents sous-systèmes du véhicule.

Conclusion

Points abordés durant la première année de thèse :

- Etude bibliographique concernant
 - Les méthodes de planification de trajectoires
 - Les dynamiques des véhicules
 - Les méthodes de modélisation énergétique

- Etude et développement de la méthode des tentacules sous forme de clothoïdes.

- Développement d'un modèle énergétique simplifié (Lagrange) représentant les dynamiques du véhicule.

- Validation de 15 crédits des 20 crédits demandés par l'ED

- Publication d'un article dans la conférence IV2015 portant sur la méthode de tentacules sous forme de clothoïdes [CTTC15]

Perspectives

- Développer un contrôleur basé sur le principe de la passivité
- Développer une approche de génération de trajectoires sous forme d'états énergétiques désirés
- Comparer la performance de la méthode énergétique (méthode basé sur le modèle) avec la méthode des Tentacules (méthode empirique).
- Etudier la faisabilité de ces méthodes à moyennes et grandes vitesses et préciser leurs limitations.
- Valider les algorithmes sur le simulateur ScanerStudio puis sur un véhicule robotisé (Projet Robotex) au laboratoire Heudiasyc.

Références

- [Mor13] J. Moras. *Grilles de perception évidentielles pour la navigation robotique en milieu urbain*. PhD thesis, Université de Technologie de Compiègne, 2013.
- [TTC13] G. Tagne, R. Talj, and A. Charara. Immersion and invariance control for reference trajectory tracking of autonomous vehicles. In *the 16th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013)*, pages 2322–2328, 2013.
- [HHH+08] F. Von Hundelshausen, M. Himmelsbach, F. Hecker, A. Mueller, and H. J. Wuensche. Driving with tentacles: Integral structures for sensing and motion. In *Journal of Field Robotics*, volume 25, 2008.
- [CTTC15] A. Chebly, G. Tagne, R. Talj, and A. Charara. Local trajectory planning and tracking for autonomous vehicle navigation using clothoid tentacles method. In *International IEEE Conference on Intelligent Vehicles Symposium*, Seoul, South Korea, June 2015.
- [LWP 80] J.Y.S. Luh, M.W. Walker and R.C.P. Paul. On-line computational scheme for mechanical manipulators. *Trans. Of ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 102(2), p. 69-76, 1980.
- [FBT97] D. Fox, W. Burgard, and S. Thrun. The dynamic window approach to collision avoidance. In *IEEE Robotics and Automation Magazine*, volume 4, 1997.
- [HHH+8] F. Von Hundelshausen, M. Himmelsbach, F. Hecker, A. Mueller, and H. J. Wuensche. *Driving with tentacles: Integral structures for sensing and motion*. In *Journal of Field Robotics*, volume 25, 2008.
- [PHK+05] C. Pradalier, J. Hermosillo, C. Koike, C. Brailon, P. Bessière, and C. Laugier. *The cycab: a car-like robot navigating autonomously and safely among pedestrians*. In *Robotics and Autonomous Systems*, volume 50, 2005.
- [Tal] R. Talj. *Véhicules Intelligents*. Université de Technologie de Compiègne.
- [JS09] D. Jeltsema and J. M.A. Scherpen. *Multidomain modeling of nonlinear networks and systems*. *IEEE CONTROL SYSTEMS MAGAZINE*, 2009.