



CoRoDyn³

Gestion de la traversabilité dynamique pour la commande relative et le maintien d'intégrité de robots mobiles

Karsten Berns
Grigor Zolinsky

Thèse Jean-Baptiste Braconnier

Post-Doc José-Alfredo Guerrero Mata

Roland Lenain

Michel Berducat

Nicolas Bouton

Roland Chapuis

Yucef Mezouar

Benoit Thuilot

Introduction & contexte

Commande en formation de robots mobiles

- Localisation absolue et/ou relative
- Commande des déplacements
- Maintien d'intégrité de la flotte



- Obstacles
- Stabilité
- Contrôlabilité

- Pertes de communication
- Impossibilité de suivi
- Pertes de perception

➡ A l'échelle du Robot

➡ A l'échelle de la flotte

Objectifs de l'action

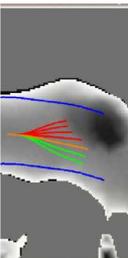
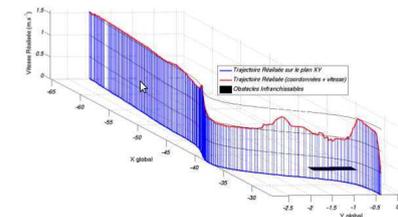
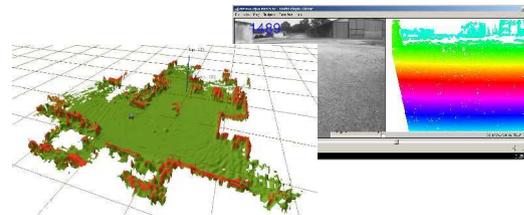
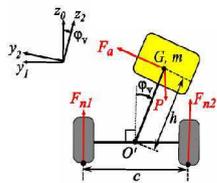
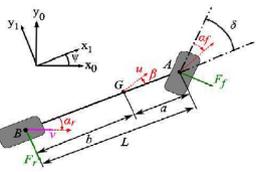
- A/ Maintenir l'intégrité de chaque robot et d'une flotte
- B/ Conserver un asservissement sûr et précis

➡ Exploitation de la notion de traversabilité

Modélisation robots/environnement

Reconstruction 3D

Commande de maintien d'intégrité



Travaux antérieurs et résultats actuels

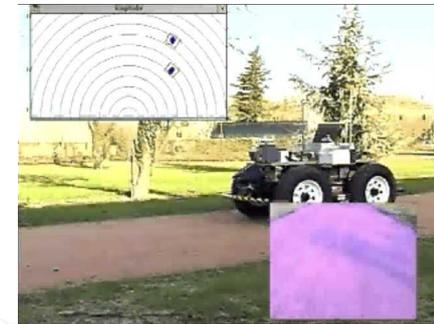
Commande de déplacements à haute dynamique (incertaine)

- Commande adaptative et prédictive
- Observation de la dynamique



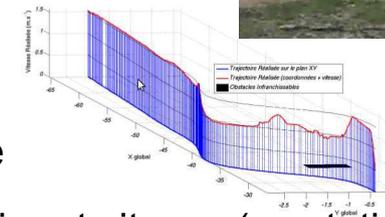
Perception active

- Processus décisionnels
- Fusion pour la localisation et l'environnement 3D



De la stabilité à la traversabilité

- Calcul prédictifs des actions assurant la stabilité dynamique
- Projection sur environnement pour adaptation de la trajectoire et vitesse (en statique)



Compétences partenaire étranger

- Modélisation 3D de l'environnement
- Behavior based Control (+sieurs types de commande)
- Capacités expérimentales

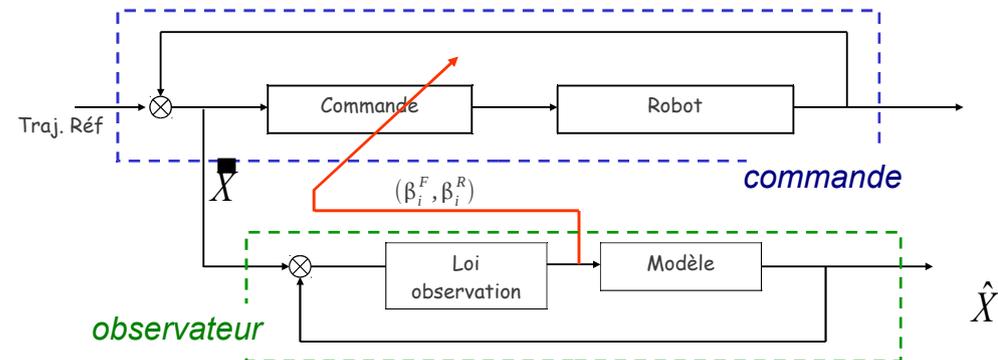
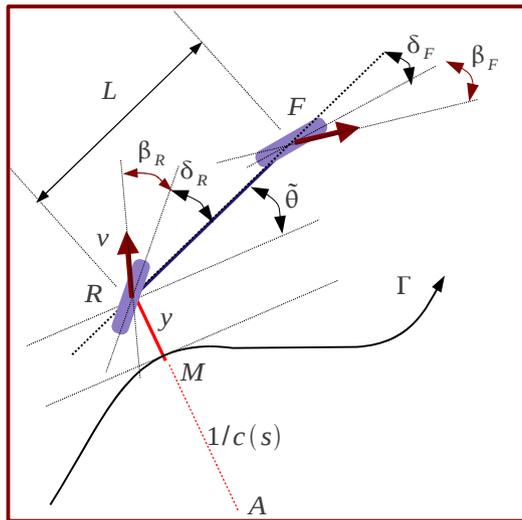


Commande des déplacements

1- Déplacement précis à haute vitesse - adaptation

- Prise en compte des phénomènes spécifique TT
- Dédiées à la commande et/ou l'observation

Modèle cinématique étendu



Observation de variables ou adaptation param.

$$\begin{cases} \dot{s} = V_r \frac{\cos(\tilde{\theta} + \delta_R - \beta_R)}{1 - c(s)y} \\ \dot{y} = V_r \sin(\tilde{\theta} + \delta_R - \beta_R) \\ \dot{\tilde{\theta}} = V_r [\cos(\delta_R - \beta_R)\lambda_1 - \lambda_2] \end{cases}$$

$$\delta_F = \arctan \left\{ \tan(\delta_R - \beta_R) + \frac{L}{\cos(\delta_R - \beta_R)} \left(\frac{c \cos \tilde{\theta}_2}{\alpha} + \frac{A \cos^3 \tilde{\theta}_2}{\alpha^2} \right) \right\} + \beta_F$$

$$\begin{cases} \tilde{\theta}_2 = \tilde{\theta} + \delta_R - \beta_R \\ \alpha = 1 - cy \\ A = -\frac{K_d^2 y}{4} - K_d \alpha \tan \tilde{\theta}_2 + c \alpha \tan^2 \tilde{\theta}_2 \end{cases}$$

Commande adaptative



Commande des déplacements

1- Déplacement précis à haute vitesse - prédiction

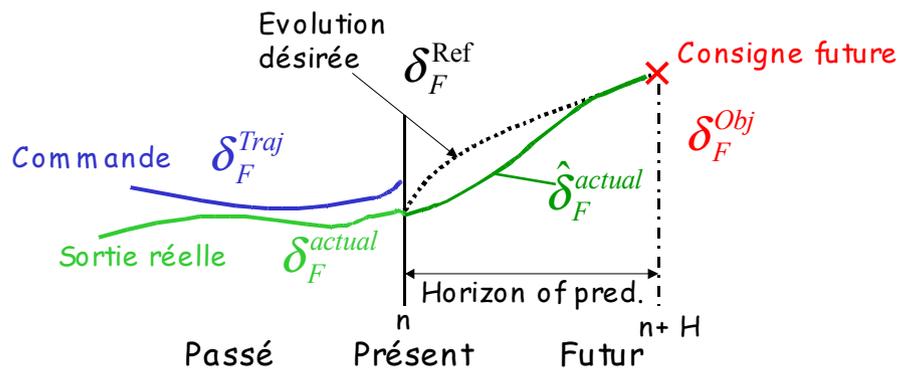
- Tâche 1 : compensation erreurs et glissements

$$\delta_{Deviation} = \arctan\left(\frac{v}{1 + uv + u^2}\right) \quad v = \frac{L}{\cos\beta^R} A \frac{\cos^3\theta_2}{\alpha^2} + \tan\beta^R$$

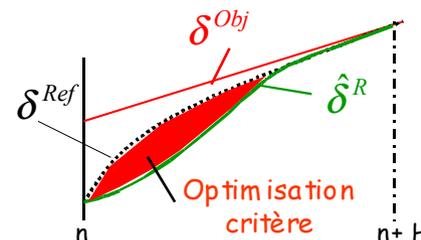
- Tâche 2 : Asservissement de courbure

$$\delta_{Traj} = \arctan(u) \quad u = \frac{L}{\cos\beta^R} c(s) \frac{\cos\theta_2}{\alpha}$$

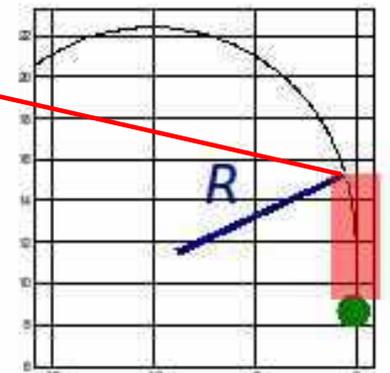
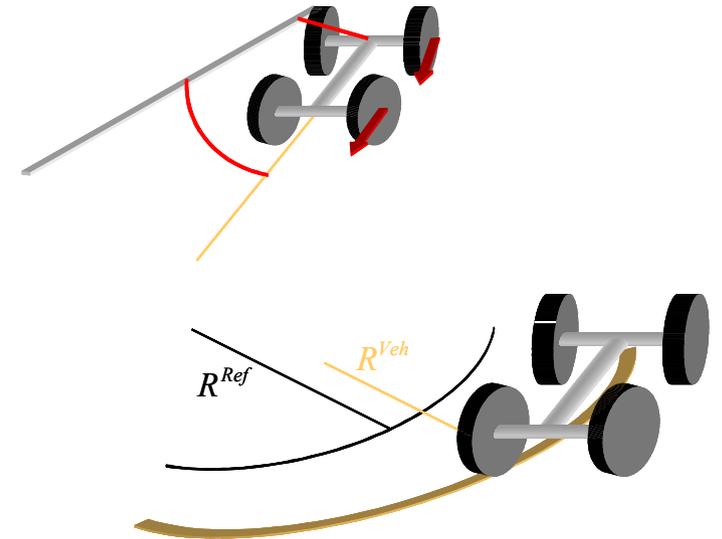
➔ Prédiction sur la trajectoire de référence



Minimisation d'un critère sur l'horizon de prédiction



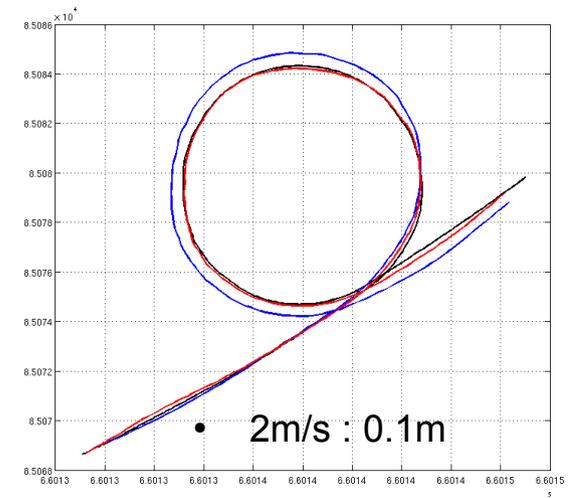
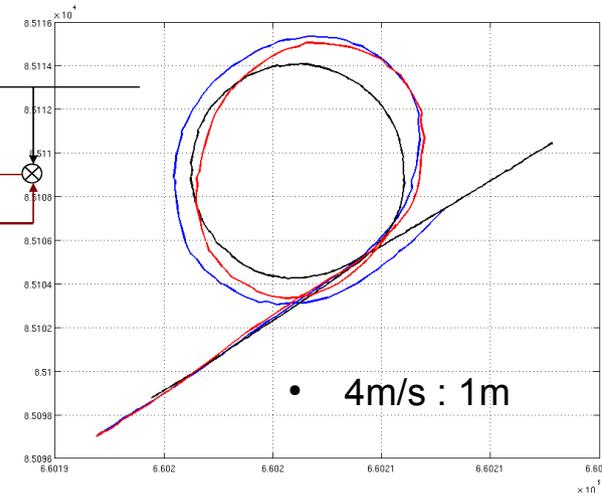
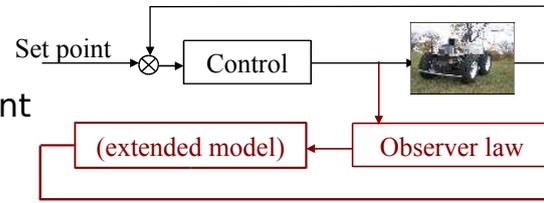
$$\delta = \delta_{Traj} + \delta_{Deviation}$$



Commande des déplacements

1- Déplacement précis à haute vitesse – Observation haute vitesse

- Approche cinématique étendue
 - Précise en Régime Permanent
 - Peu réactive

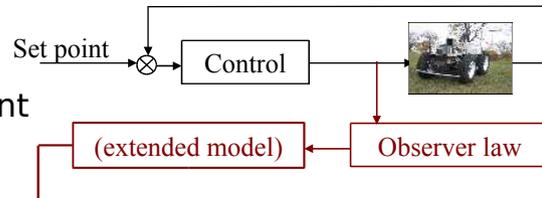


Commande des déplacements

1- Déplacement précis à haute vitesse – Observation haute vitesse

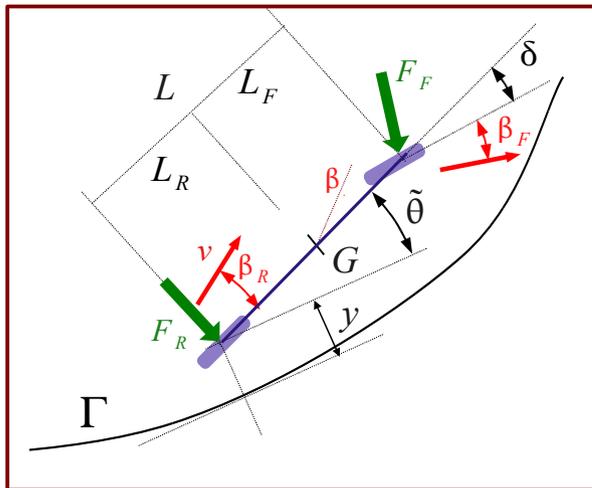
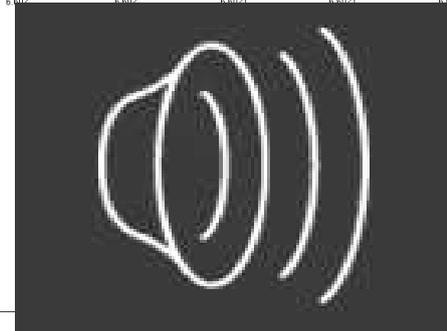
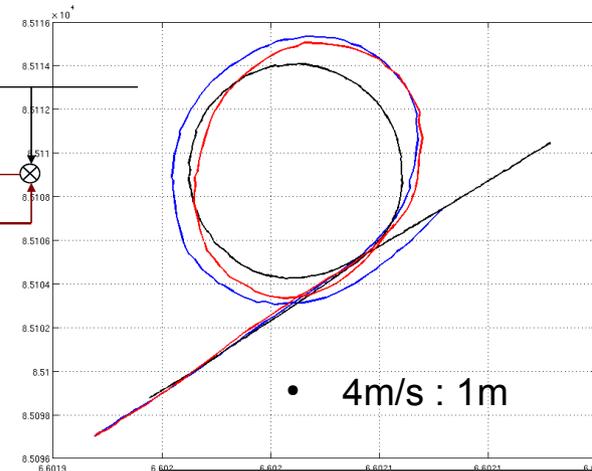
- Approche cinématique étendue

- Précise en Régime Permanent
- Peu réactive

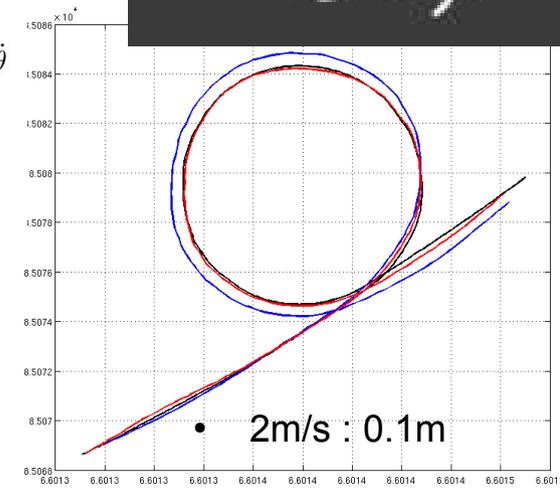


- Approche par modèle dynamique

- Très réactive
- Dépendante de nombreux paramètres et variables



$$\begin{cases} \dot{s} = V_r \frac{\cos(\tilde{\theta} + \delta_R - \beta_R)}{1 - c(s)y} \\ \dot{y} = V_r \sin(\tilde{\theta} + \delta_R - \beta_R) \\ \dot{\tilde{\theta}} = V_r [\cos(\delta_R - \beta_R)\lambda_1 - \lambda_2] \\ \ddot{\tilde{\theta}} = \frac{1}{I_z} (-L_F F_F \cos(\delta_F) + L_R F_R) \\ \dot{\beta} = -\frac{1}{v_2 m} (F_F \cos(\delta_F - \beta) + F_R \cos(\beta)) - \dot{\tilde{\theta}} \\ \beta_R = \arctan\left(\tan \beta - \frac{L_R \dot{\tilde{\theta}}}{v_2 \cos(\beta)}\right) \\ \beta_F = \arctan\left(\tan \beta + \frac{L_F \dot{\tilde{\theta}}}{v_2 \cos(\beta)}\right) - \delta_F \\ v_2 = \frac{v \cos(\beta_R)}{\cos(\beta)} \end{cases}$$



Modèle dynamique (Pneu Lin.)



Contribution 1: développement d'un observateur multi-modèle (en cours de publi)



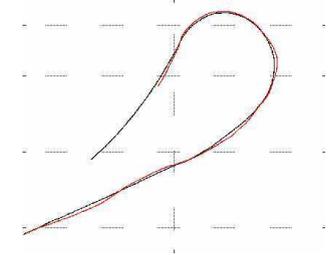
Contribution 2: développement d'un observateur robuste à la variation de vitesse



Commande des déplacements

1- Déplacement précis à haute vitesse – Résultats et risques

- Déplacements précis



- Admissibilité de la trajectoire par rapport à la précision

- Risque des actions générées

- renversement
- contrôlabilité



Action de limitation des commandes

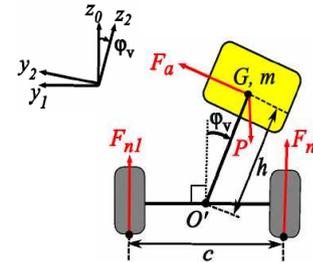
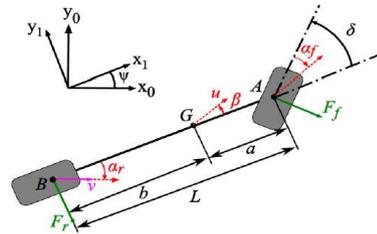


Commande intégrée des déplacements

1- Maintien d'intégrité a – stabilité

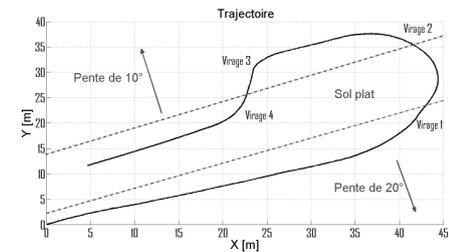
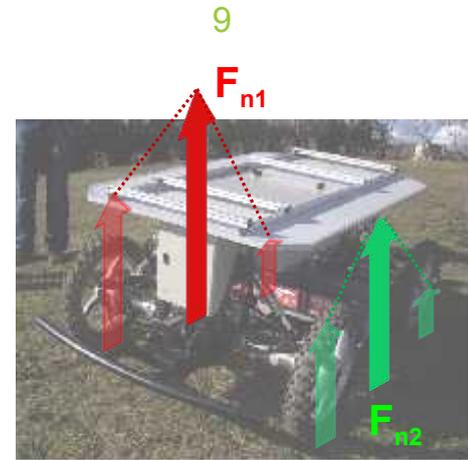
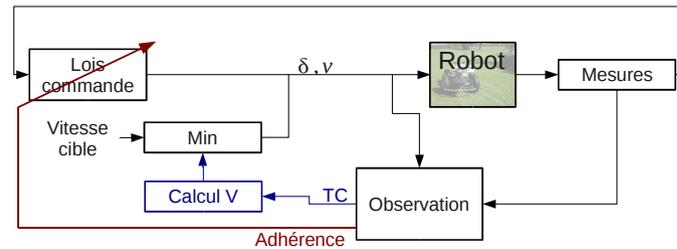
- Extraction du risque

- Choix d'une métrique : le TCL
- Exploitation modèle/obs Lacet + roulis



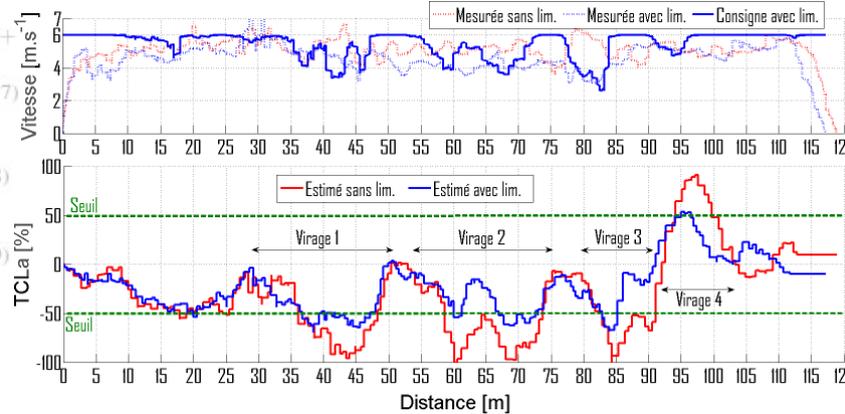
- Anticipation et limitation

- Transfert de charge limite
- vitesse associée



$$TC_l = f(\text{EtatRobot})$$

$$F_{n1} - F_{n2} = \frac{2}{L} \left[\frac{mh}{L} \frac{\sin(\phi_v)}{\cos(\phi_v)} \right]$$



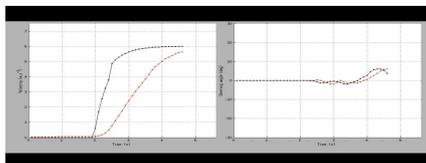
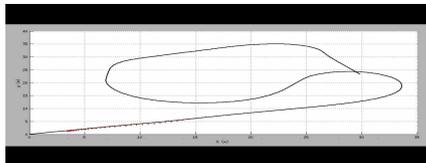
Contribution 4: intégration pente

Commande intègre des déplacements

1- Maintien d'intégrité b – admissibilité dynamique de la trajectoire

- Distinction sous/sur virage

- Glissements avant supérieurs aux glissements arrière
- Saturation de l'angle de braquage durant le virage
- Le robot ne peut augmenter sa vitesse de lacet



Commande intégrée des déplacements

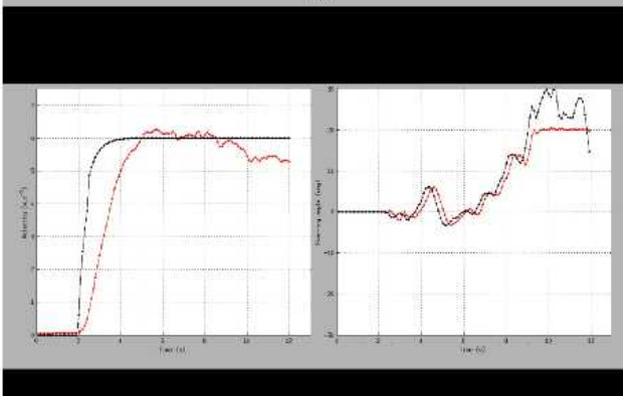
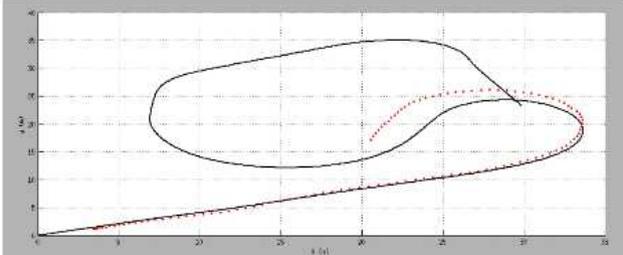
1- Maintien d'intégrité b – admissibilité dynamique de la trajectoire & commandabilité

- Distinction sous/sur virage



- Glissements avant supérieurs aux glissements arrière
- Saturation de l'angle de braquage durant le virage
- Le robot ne peut augmenter sa vitesse de lacet

- Sur virage



- Glissements arrière supérieurs aux glissements avant
- Saturation de l'angle de braquage durant le virage puis inversion
- Le robot acquiert une vitesse de lacet trop importante
- Contre braquage inefficace

Commande intègre des déplacements

1- Maintien d'intégrité b – admissibilité dynamique de la trajectoire & commandabilité

- 1ère étape

Calcul de $\dot{\theta}_{max}$:

-Utilisation du modèle dynamique pour le cas du sous-virage

-Utilisation de la relation liant θ point et v pour le sur-virage

$\dot{\theta}$

Sous virage : $\dot{\theta}_{max1}$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{C_F L_F^2 \cos(\delta_{Fmax}) + C_R L_R^2}{I_z v_2} & \frac{C_R L_R - C_F L_F \cos(\delta_{Fmax})}{I_z} \\ \frac{(C_R L_R - C_F L_F \cos(\delta_{Fmax}))}{m v_2^2} - 1 & -\frac{(C_R + C_F \cos(\delta_{Fmax}))}{m v_2^2} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{C_F L_F \cos(\delta_{Fmax})}{I_z} \\ \frac{C_F \cos(\delta_{Fmax})}{m v_2} \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \beta \end{bmatrix}$$

$$\dot{X} = A * X + B * \delta$$

-Calcul de $\dot{\theta}_{max1}$ à l'horizon H

$$X_{t+dt} = X_t + (A * X_t \pm B * \delta_{max}) dt$$

Sur virage: $\dot{\theta}_{max2}$

$$\dot{\theta}_{max2} = v \frac{\tan(\beta_F \pm \delta_{max}) - \tan(\beta_R)}{L}$$

-Calcul de la vitesse de lacet que l'on peut fournir en contre braquant

- $\dot{\theta}_{max}$ est le minimum de $\dot{\theta}_{max1}$ et $\dot{\theta}_{max2}$

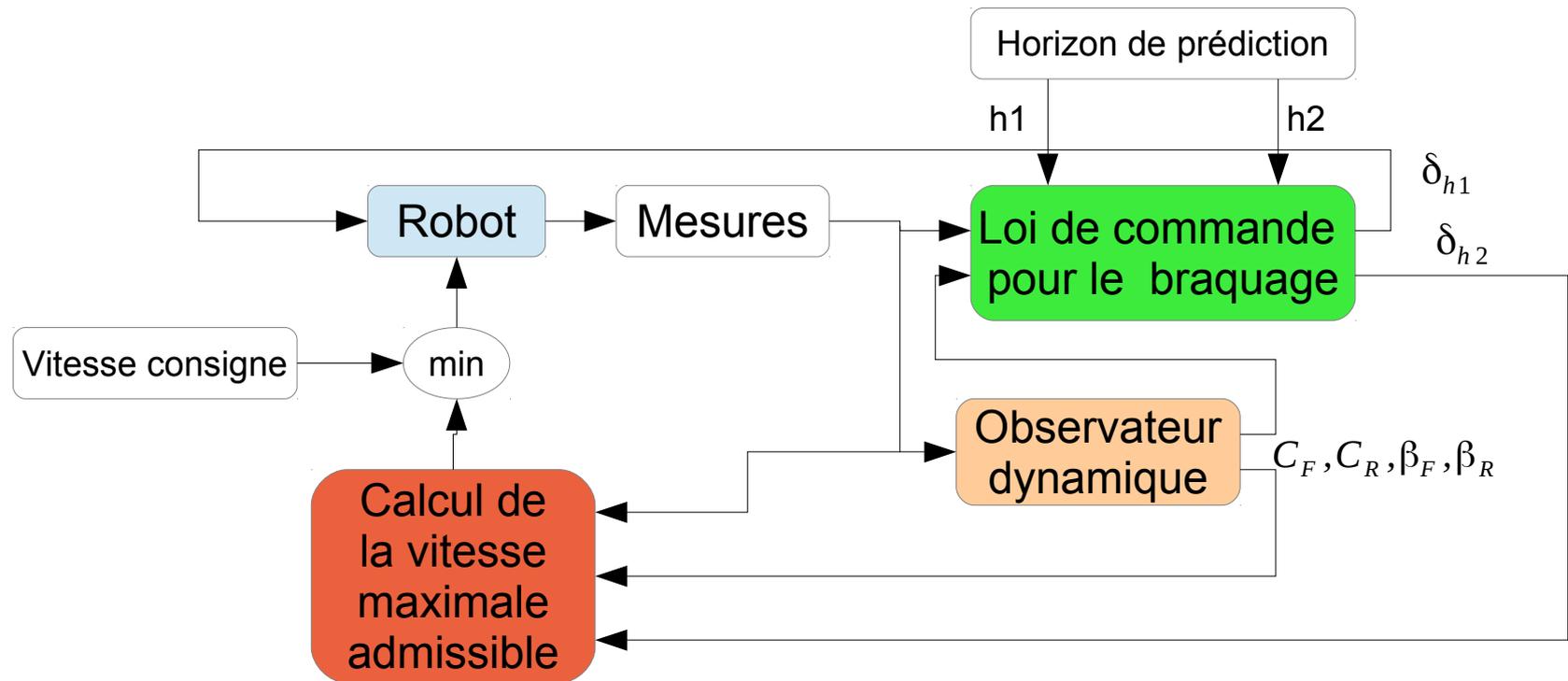
Commande intègre des déplacements

1- Maintien d'intégrité b – admissibilité dynamique de la trajectoire

- 2ième étape : comparaison avec la vitesse de lacet requise $\dot{\theta} = V_T [\cos(\delta_R - \beta_R)\lambda_1 - \lambda_2]$

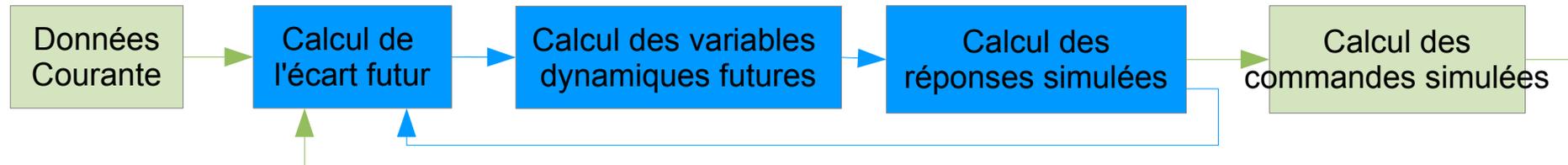
$$v_c = \min \left(v_{Desired}, \frac{L \dot{\theta}_{max}}{\cos(\beta_R)(\tan(\delta_F^{Pred} + \beta_F) - \tan(\beta_R))} \right)$$

- Utilisation d'une commande δ_F^{Pred} avec un horizon différent pour alimenter la loi



Commande intègre des déplacements

1- Maintien d'intégrité C – Erreur maximale admissible



Etape 1 : Calcul de l'écart prédit

- Calcul analytique par le modèle dynamique

- Échantillonné à la fréquence de l'application
- Sur-échantillonnée

Etape 2 : Anticipation de l'état du robot

- Exploitation du modèle dynamique adapté

Etape 3 : Simulation des actionneurs

- Connaissance de la loi de commande
- Application du temps de réponse des actionneurs



Relation entre vitesse entrées et écart à venir

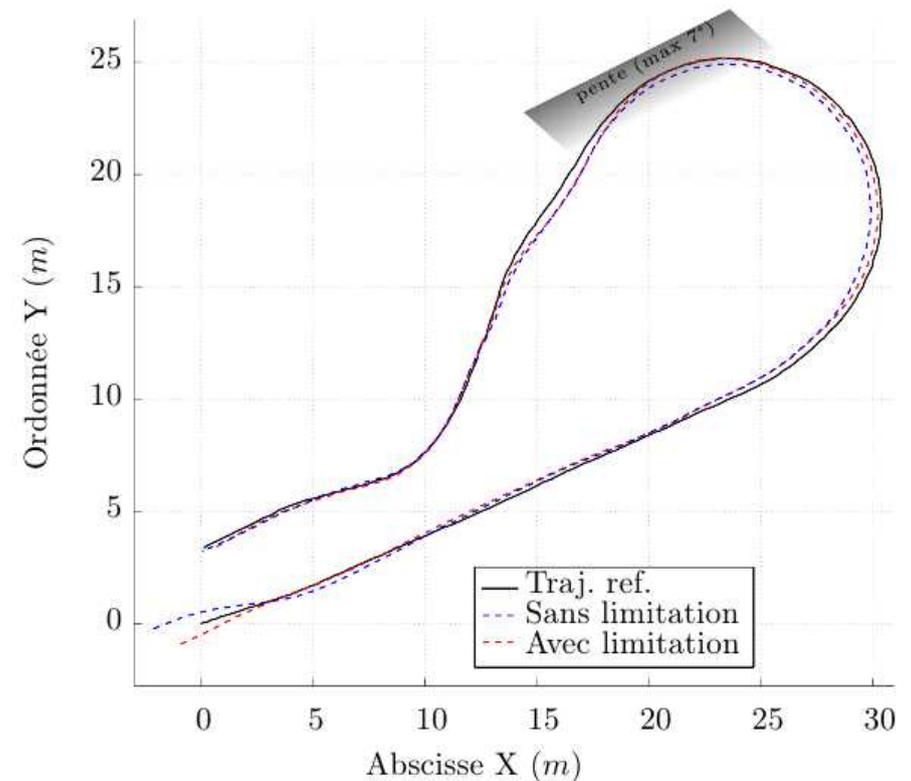
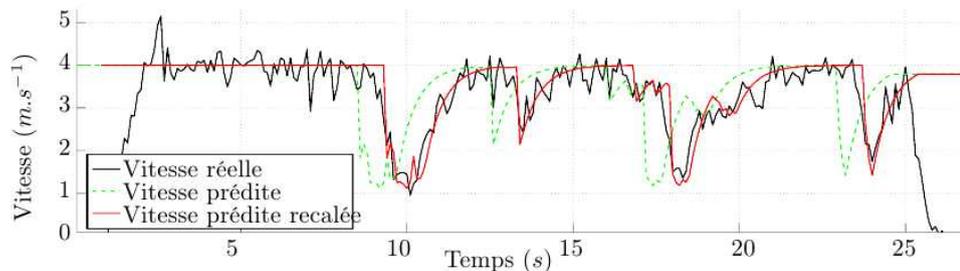
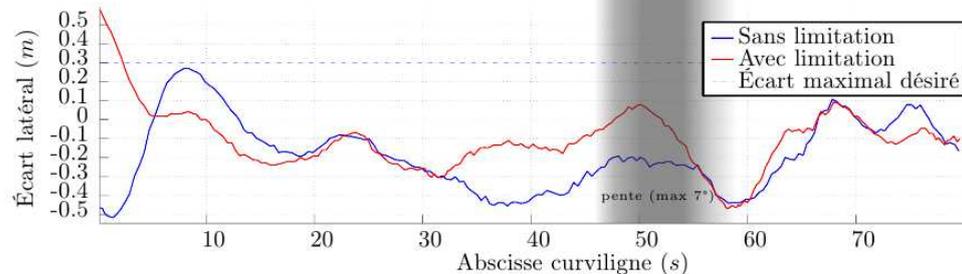


Limitation de l'écart de suivi

Résultats expérimentaux :

Trajectoire acquise à $1,5\text{m.s}^{-1}$

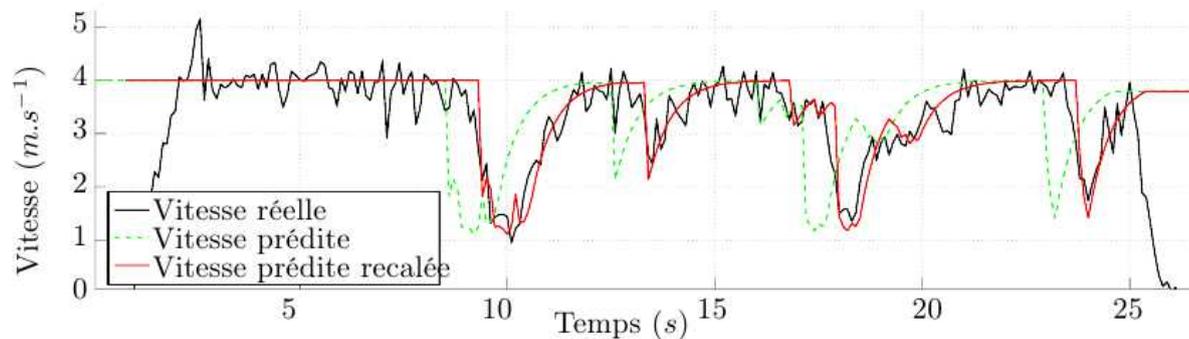
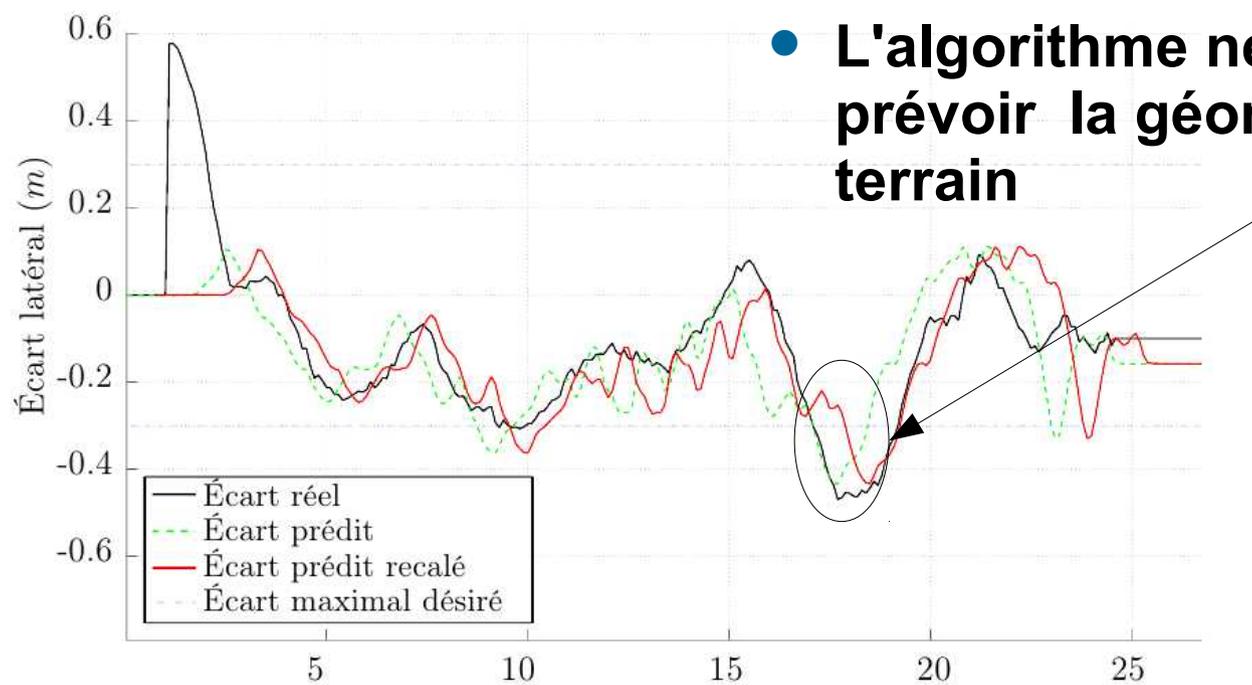
- 2 Essais, avec et sans limitation de la vitesse
- Vitesse consigne 4 m.s^{-1}
- Utilisation de la loi de commande prédictive et de l'observateur multi-modèle
- Temps de prédiction pour l'al de limitation de vitesse : 0,8
- Ecart maximale : 0,3 m



Limitation de l'écart de suivi

Résultats expérimentaux :

- L'algorithme prédit correctement l'écart futur (ainsi que les autres variables)



Avancement commande intègre des déplacements

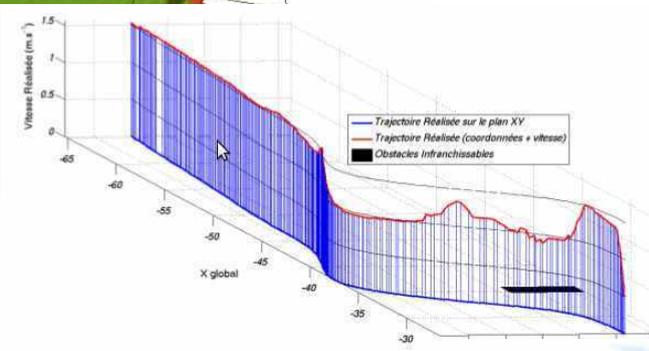
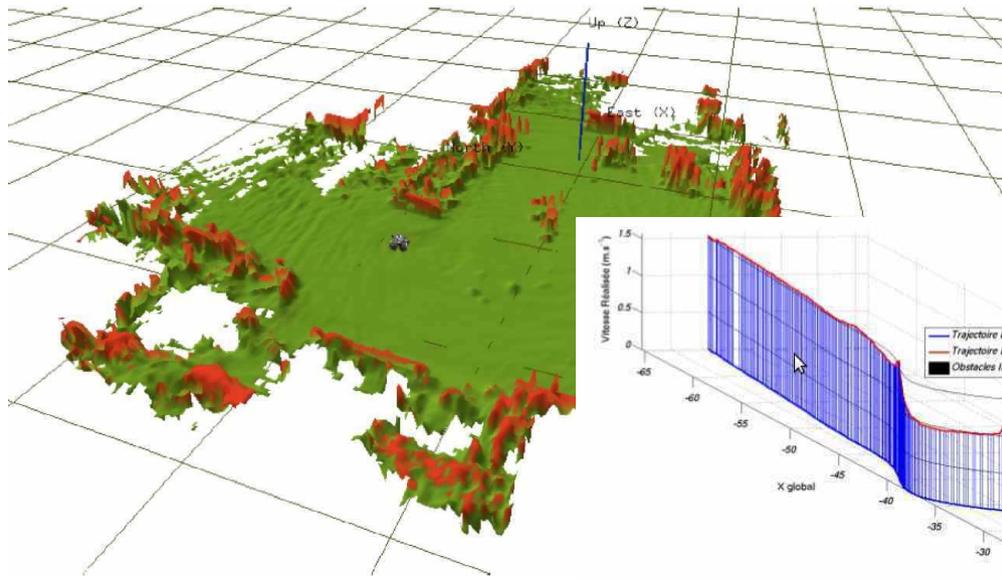
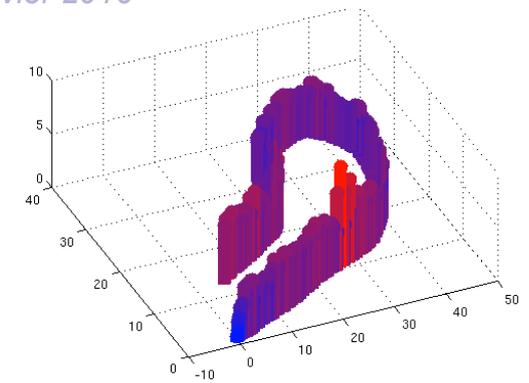
1- Maintien d'intégrité – Résultats



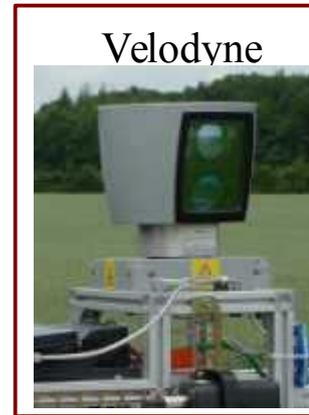
Modélisation Numérique 3D

De la prédiction à la traversabilité

- Processus réactifs et prédictifs par rapport à la trajectoire
- Extrapolation par rapport à l'environnement

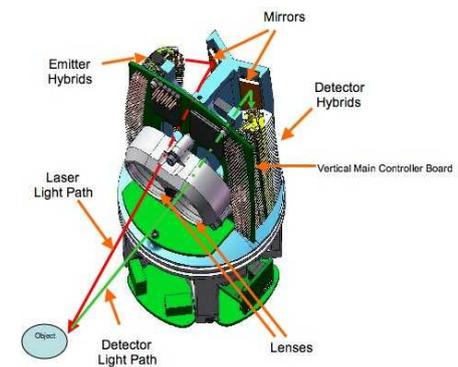


- Projection de la trajectoire en 3D
 - Calcul de la vitesse max
- Stereo-vision



Capteurs 3D

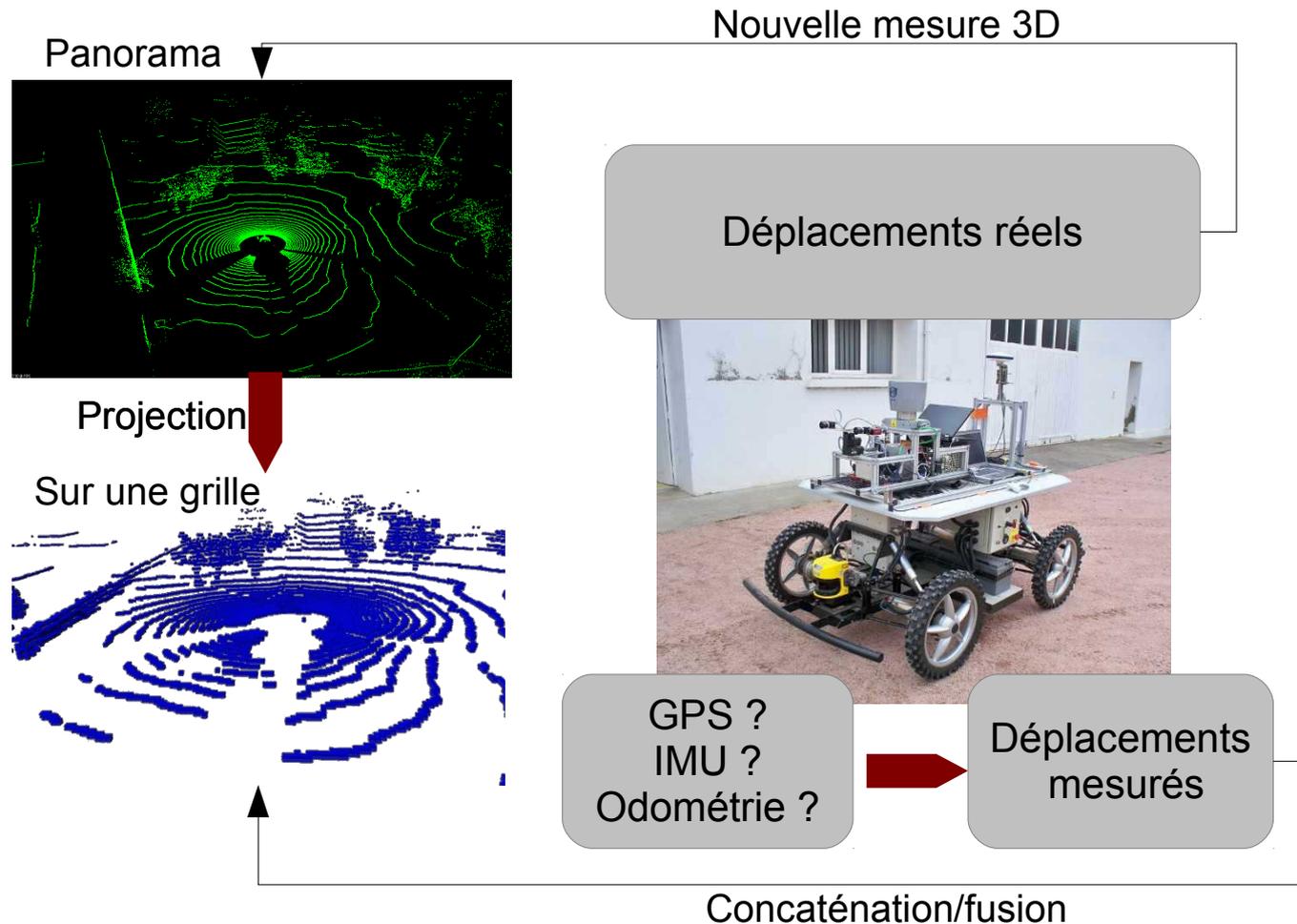
- Banc stéréovision classiques
- Velodyne
- Caméra TOF
- Fusion Laser/caméra



Modélisation Numérique 3D

Reconstruction de l'environnement

- Discrétisation du sol



- Moyenne sur chaque cellule de 10cmX10cm
- Permet de reconstruire l'élévation de chaque cellule
- 1 seule élévation par cellule?

Modélisation Numérique 3D

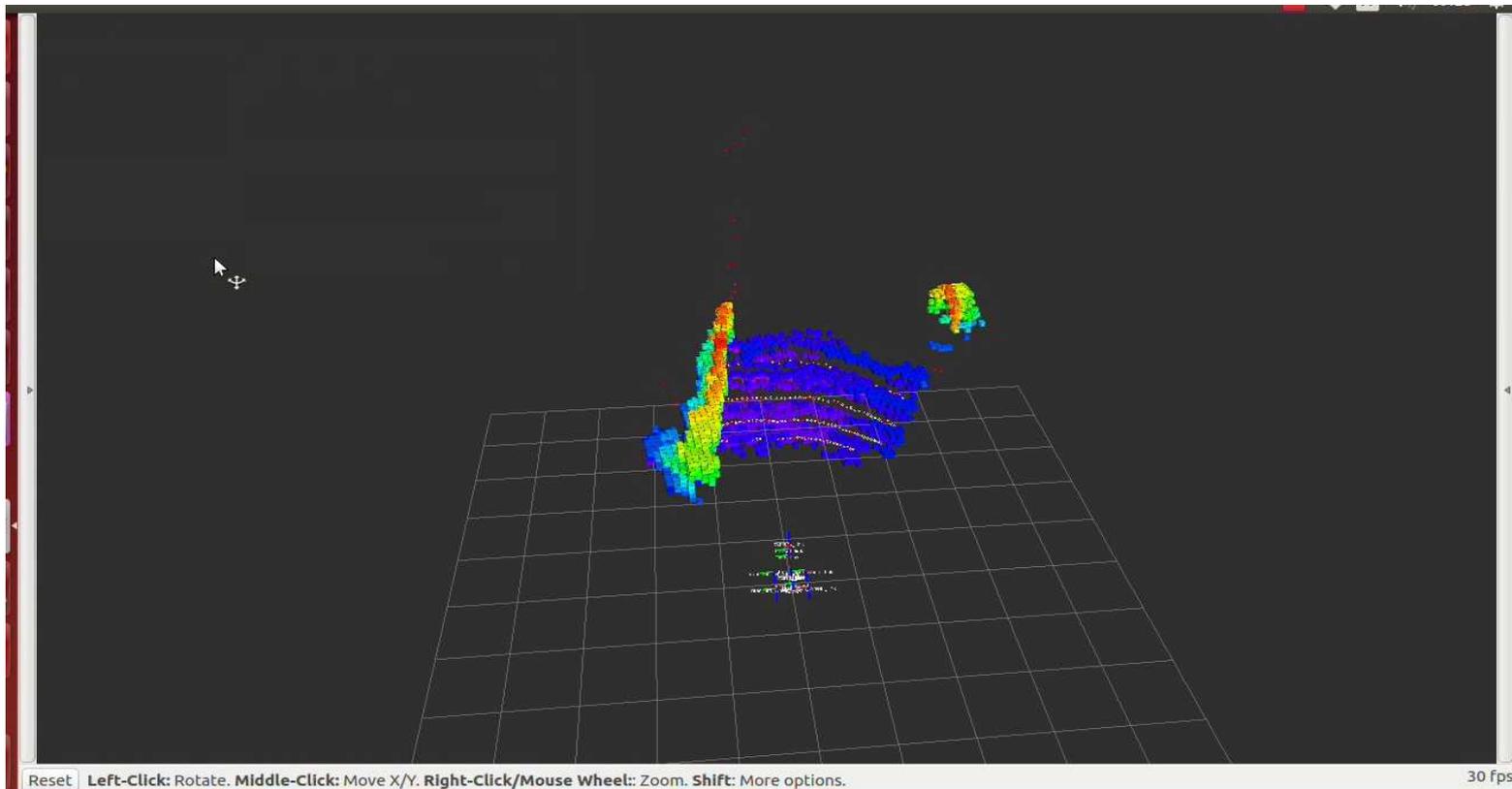
Résultats basses vitesses et terrain naturels



Modélisation Numérique 3D

Résultats basses vitesses et terrain naturels

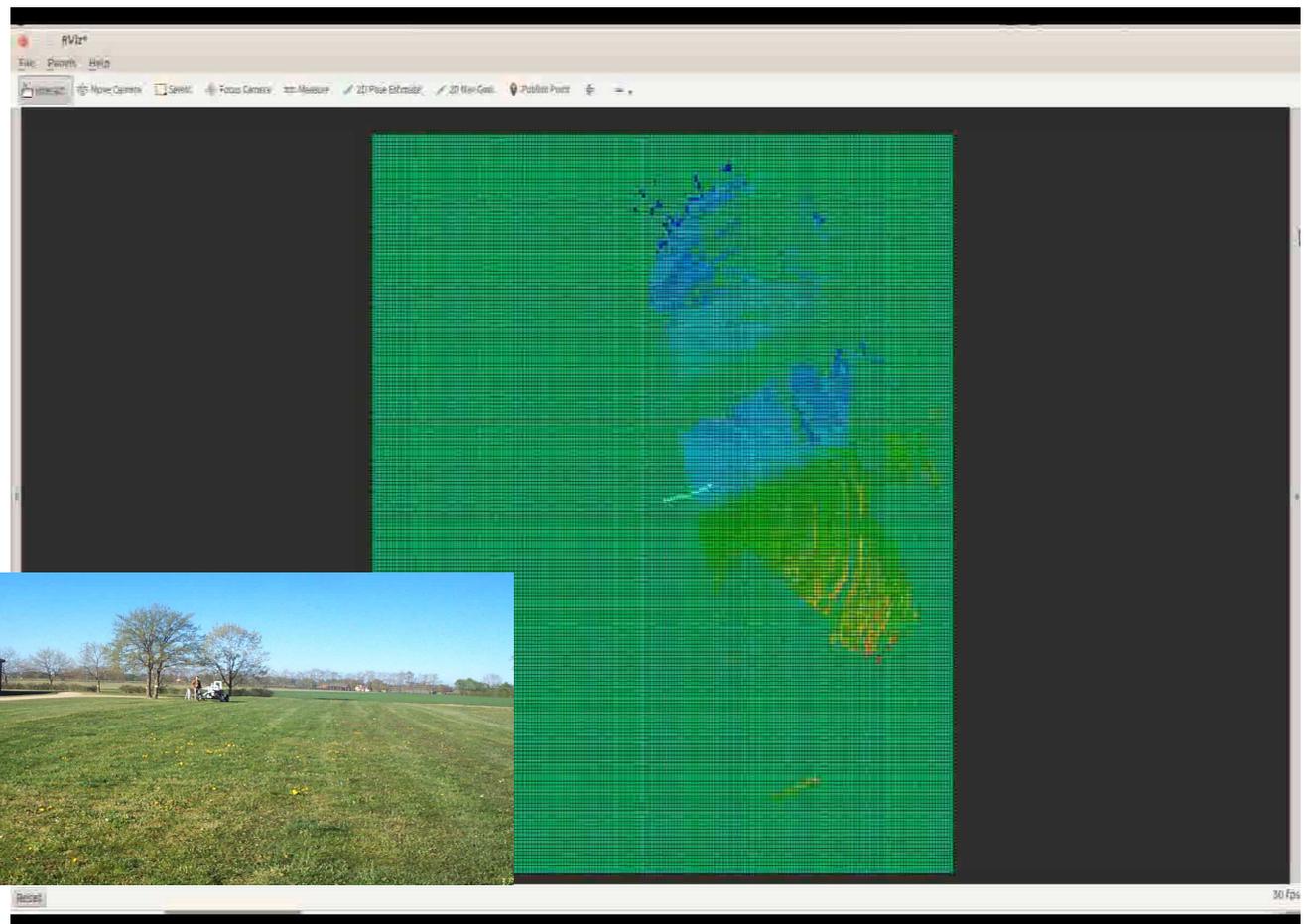
- Bonne localisation
- Carte précise de l'environnement



Avancement perception 3D

Vitesse, temps de calcul et précision localisation

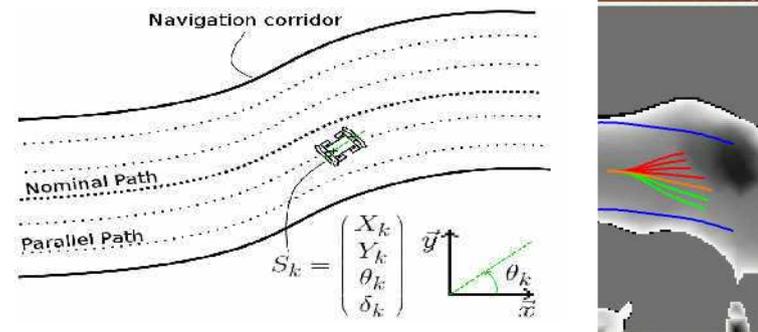
- Vibrations et chocs
- Retard de cap
- Vitesse 5m/s
- Duplication des lignes de niveaux



Fusion perception 3D et traversabilité [en cours]

Lien entre géométrie et vitesse maximale

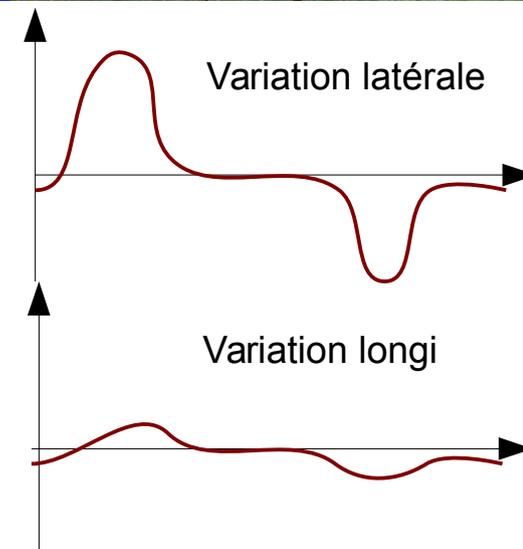
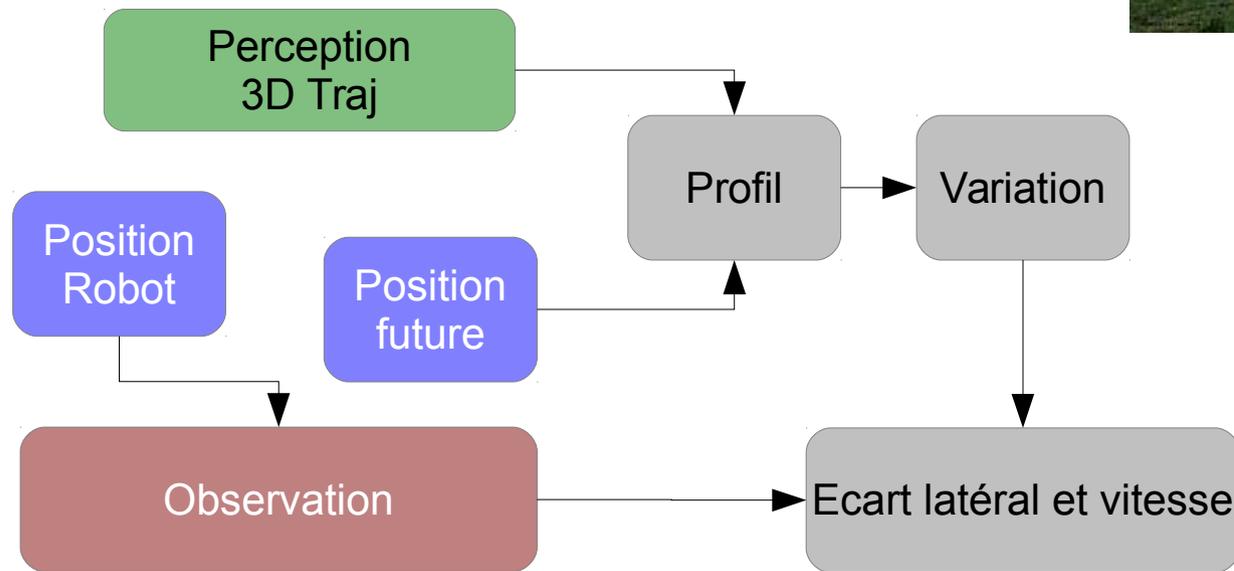
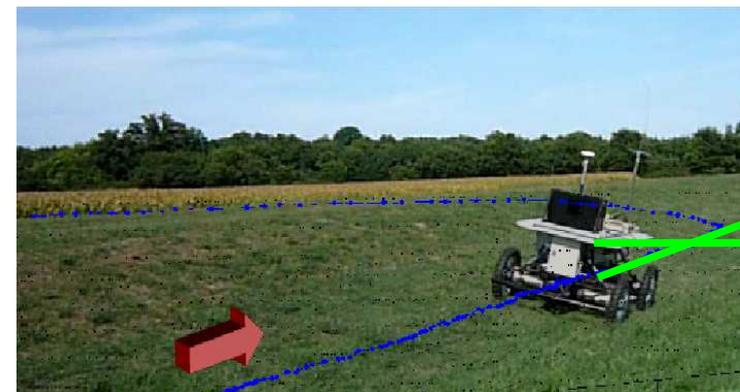
- Connaissance des capacités physique du robot
- Observation de l'adhérence
- Connaissance d'une trajectoire à priori



Thèse P. Delmas

Recherche de l'écart optimal par rapport au couloir

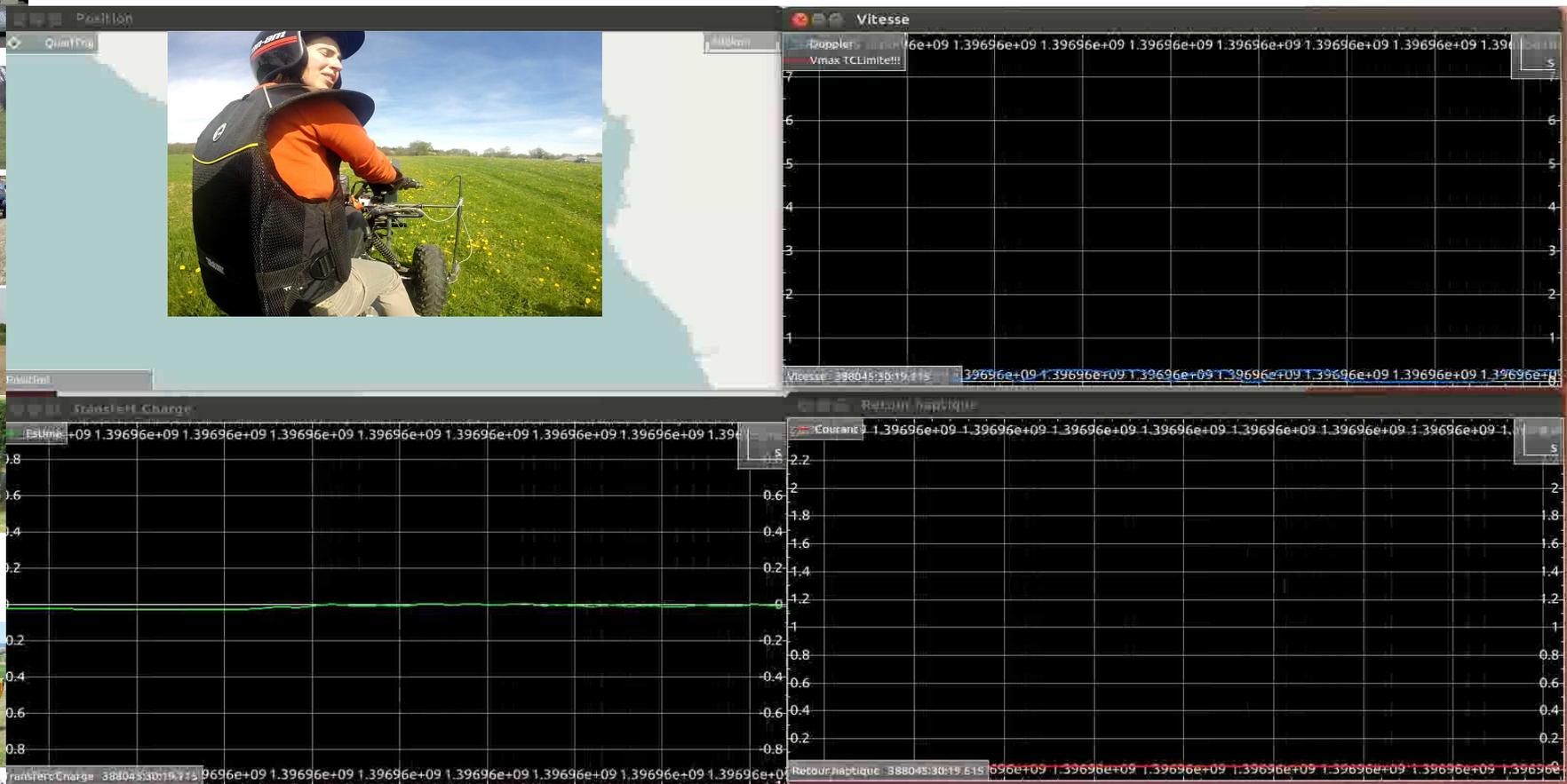
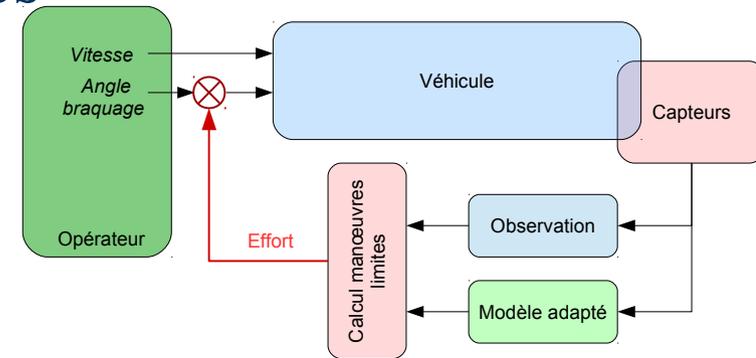
- Évaluation de la nappe dans le couloir (repère de Frénet)
- Extraction des gradients d'élévation
- Recherche du point optimal vitesse/écart
- Rétro-action commande et précision garantie



Retombées applicatives court termes

Maintien Intégrité 4 – Application à l'aide à la conduite

- Stratégie d'estimation simplifiée
- Retour d'effort pour la manette des gaz
- Autres variables de commande (Cf simulateur)



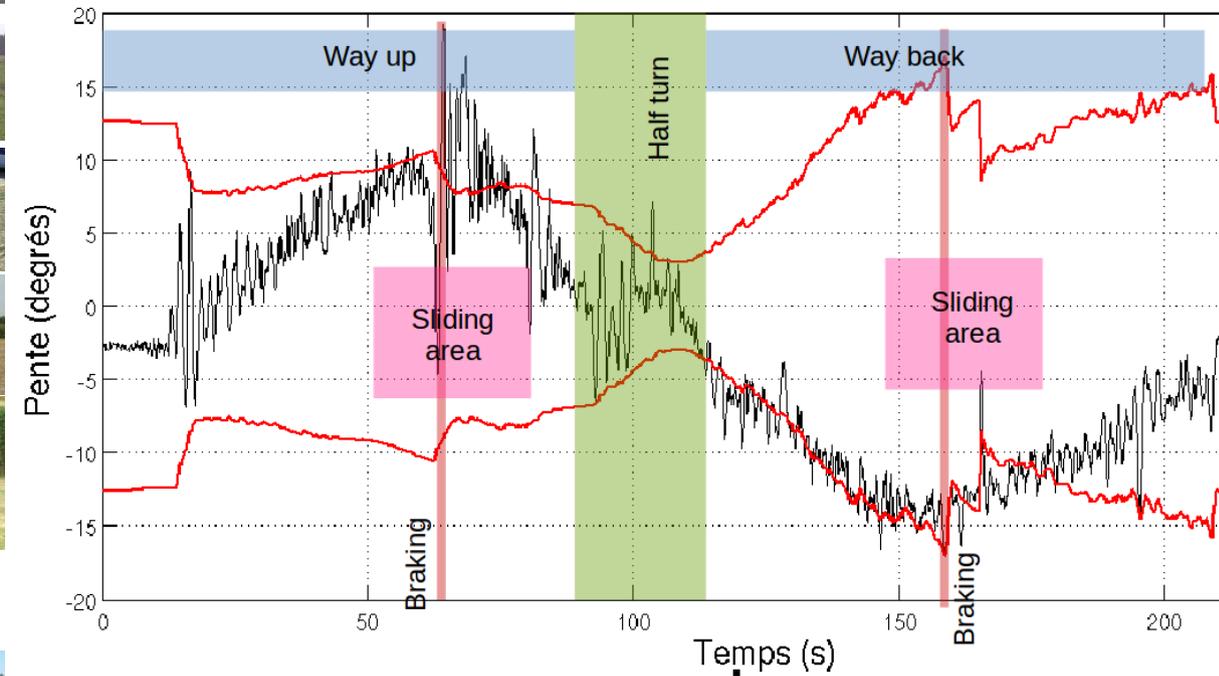
Retombées applicatives court termes

Maintien Intégrité 5 – Application à l'aide à la conduite

- Extraction des capacités de franchissement
- En fonction de l'état estimé du véhicule
- Domaine de contrôle garanti



Pente Maximale admissible



Distance de freinage

