

# Calcul de l'espace navigable d'un véhicule routier et contrôle en situation critique dans un contexte de réseau de véhicules communicants

Hoda Dandach

Directeur de thèse : Ali Charara

Co-encadrement : Jérôme De Miras



Ce projet est cofinancé par l'Union européenne. L'Europe s'engage en Picardie avec le Fonds européen de développement régional



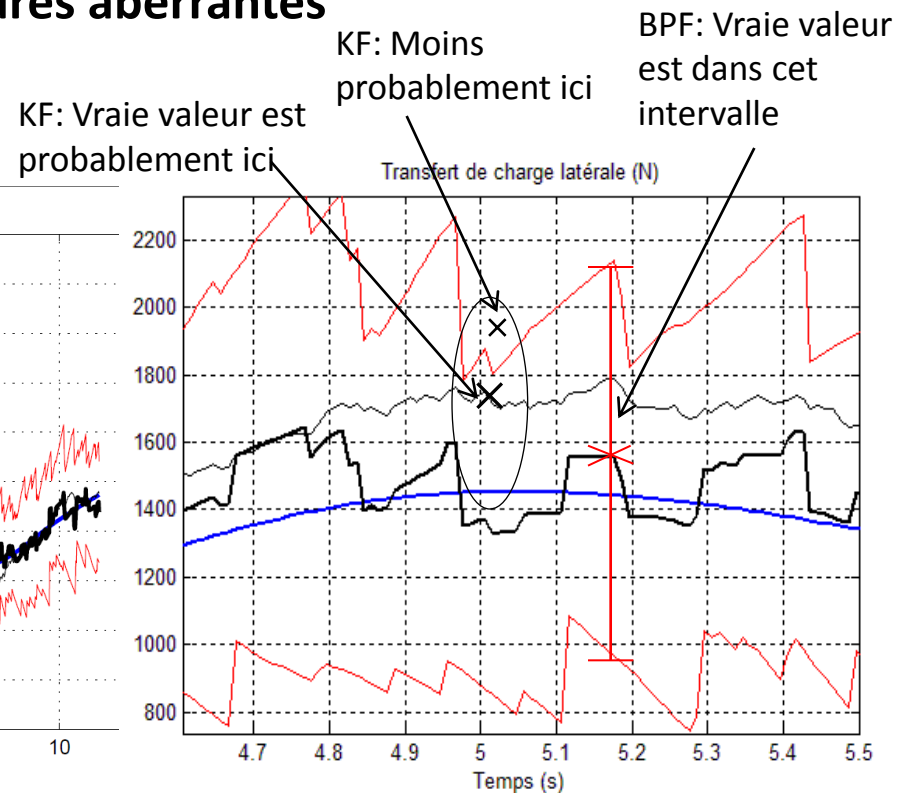
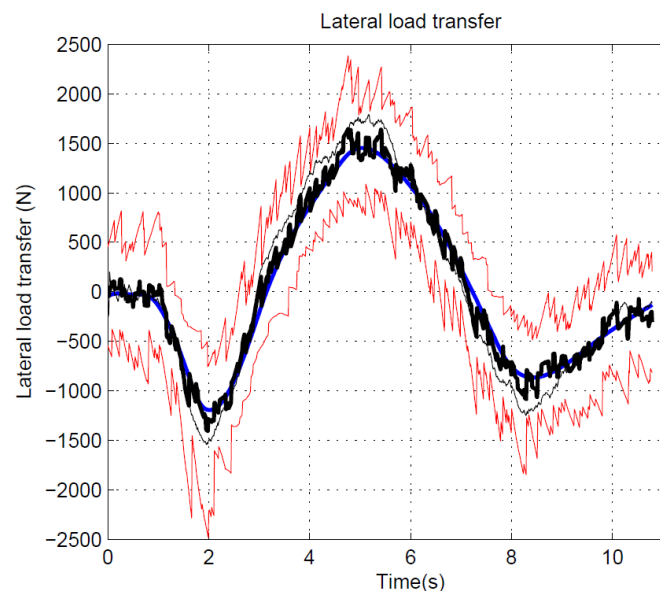
# Motivation

- **Connaissance de l'état du véhicule afin de bien la contrôler et la maintenir stable:**
  - Capteurs proprioceptifs et extéroceptifs
  - Estimation et prédiction d'état:
    - Méthodes bayésiennes, filtres de Kalman, filtres particulaires
- **Hypothèses:**
  - Linéarisation
  - Bruits blancs et gaussiens
  - Sensibilité aux bruits de mesures aberrants
  - Estimation ponctuelle avec une marge de confiance (gaussienne, etc.)

# Motivation

## Approche ensembliste

- S'applique sur les fonctions linéaires et/ou non linéaires
- Robuste aux erreurs et aux mesures aberrantes
- Algorithmes garanties
- Hypothèse: Erreurs bornées



# Objectif

- Estimation et Prédiction d'état d'une façon garantie
- Calcul d'un espace d'état du véhicule (off-line ou on-line en temps réel) où son comportement est stable et contrôlable sur une trajectoire donnée en utilisant l'approche ensembliste par intervalles : C'est **l'espace navigable** du véhicule
- Cet espace constitue **le domaine de stabilité garantie** de contenir l'état stable. Il est une référence utilisée par la commande.

# Plan

## **1. Détermination du domaine de stabilité**

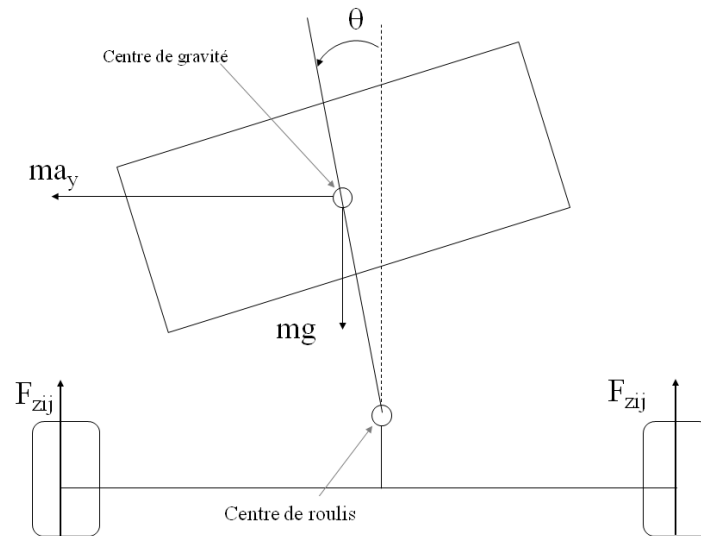
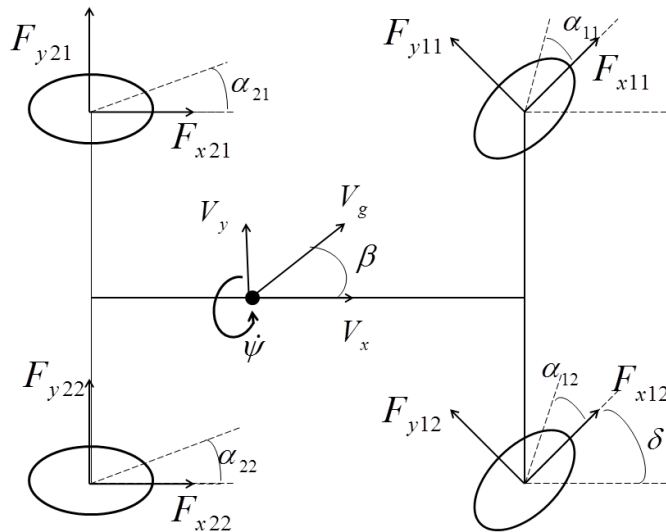
- 1. Dynamique du véhicule**
- 2. Domaine de stabilité cherché**

## **2. Approche ensembliste par Intervalles**

## **3. Résultats**

# Dynamique du véhicule

On s'intéresse à un modèle de véhicule 4-Roues:



$F_{xij}$ ,  $F_{yij}$  et  $F_{zij}$ :

Forces longitudinales, latérales et verticales.  $i \in \{1,2\}$ ,  $j \in \{1,2\}$  (N)

$V_g$ ,  $V_x$ ,  $V_y$ :

vitesse au centre de gravité et ses projections sur les axes x et y (m)

$a_x$  et  $a_y$ :

les accélérations longitudinale et latérale ( $m/s^2$ )

$\beta$  et  $\alpha_{ij}$ :

Angle de dérive au centre de gravité et de chaque roue  $ij$  (rad)

$\theta$ : angle de roulis (rad),  $\delta$ : angle de braquage (rad),  $\dot{\psi}$ : vitesse de lacet (rad/s),  $\sigma$ : glissement

# Dynamique du véhicule

La relation entre les forces verticales et les accélérations est :

$$F_{z11} = m \left( \frac{l_r g}{l} - \frac{h a_x}{l} \right) \left( 0.5 - \frac{h a_y}{b_f g} \right)$$

$$F_{z12} = m \left( \frac{l_r g}{l} - \frac{h a_x}{l} \right) \left( 0.5 + \frac{h a_y}{b_f g} \right)$$

$$F_{z21} = m \left( \frac{l_f g}{l} + \frac{h a_x}{l} \right) \left( 0.5 - \frac{h a_y}{b_r g} \right)$$

$$F_{z22} = m \left( \frac{l_f g}{l} + \frac{h a_x}{l} \right) \left( 0.5 + \frac{h a_y}{b_r g} \right)$$

L'indicateur de renversement indiquant le transfert de charge latérale est:

$$LTR = \frac{(F_{z11} + F_{z21}) - (F_{z12} + F_{z22})}{\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 F_{zij}} \quad LTR \in [-1, 1]$$

Domaine sans risque de renversement:  $LTR \in [-0.8, 0.8]$

# Dynamique du véhicule

Les accélérations peuvent être calculées à partir des forces longitudinales et latérales des roues :

$$a_x = \frac{1}{m} \left( -(F_{y11} + F_{y12}) \sin \delta + (F_{x11} + F_{x12}) \cos \delta + F_{x21} + F_{x22} \right)$$

$$a_y = \frac{1}{m} \left( (F_{y11} + F_{y12}) \cos \delta + (F_{x11} + F_{x12}) \sin \delta + F_{y21} + F_{y22} \right)$$

Les forces longitudinales et latérales sont calculées à l'aide du modèle donné par Pacejka:

$$F_x = D_x \sin(C_x \arctan(B_x \sigma - E_x (B_x \sigma - \arctan(B_x \sigma))))$$

$$F_y = D_y \sin(C_y \arctan(B_y \alpha - E_y (B_y \alpha - \arctan(B_y \alpha))))$$

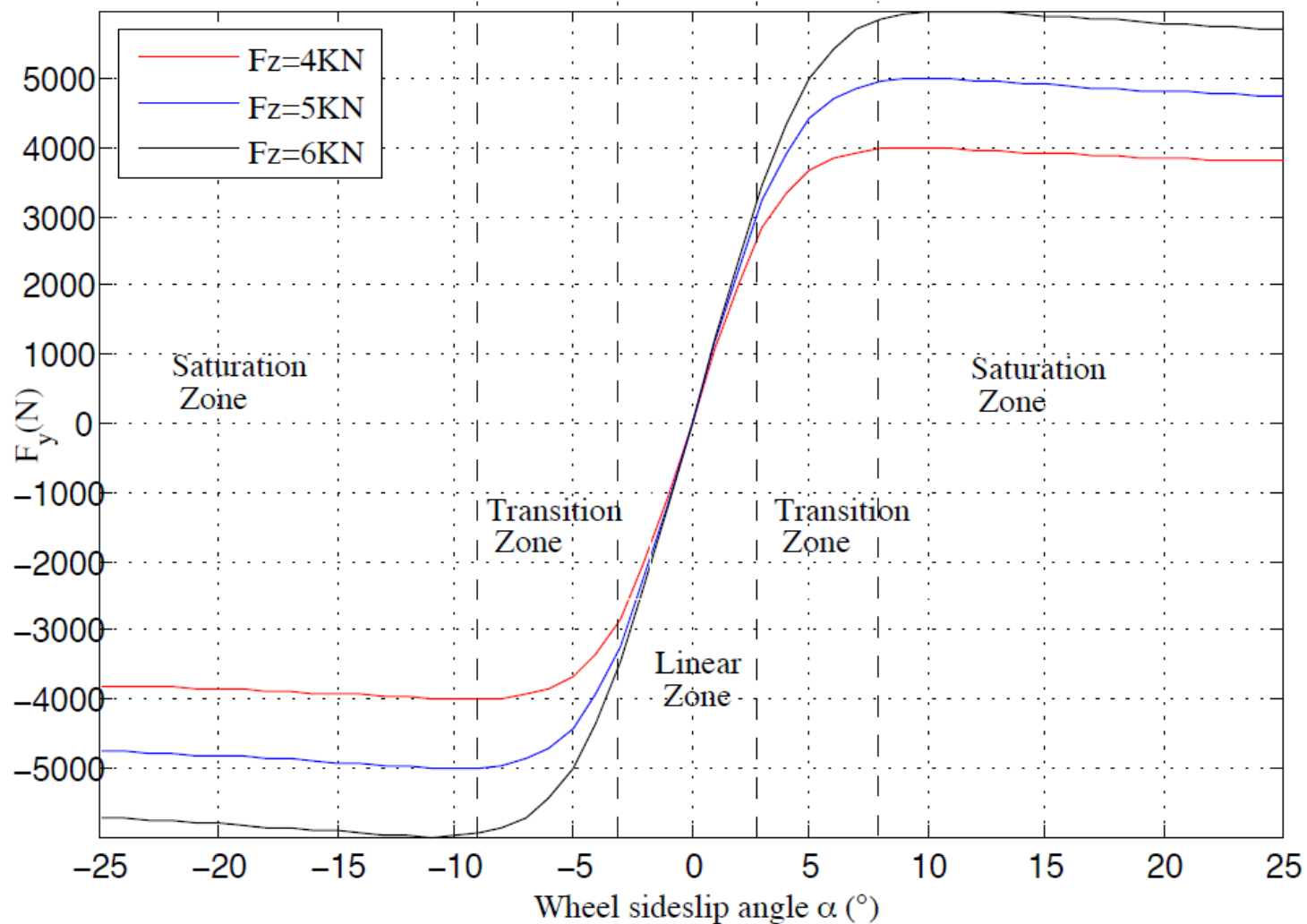
$B$  est la rigidité de dérive latérale (N/rad)

$D = \mu F_z$  la valeur maximale de la courbe

$\mu$  est le coefficient d'adhérence



# Dynamique du véhicule



# Domaine de stabilité

Paramètre (unité)	Domaine de stabilité correspondant
Indice de renversement LTR	$[-0.8, 0.8]$
Glissement $\sigma$ (%)	$[-15, 15]$
Angle de dérive $\alpha$ (°)	$[-6, 6]$

On cherche à caractériser l'ensemble des accélérations  $a_x, a_y$  tel que LTR,  $\sigma$  et  $\alpha$  sont dans leurs domaines de stabilité respectifs et par conséquent le véhicule est stable.

$$S = \{(a_x, a_y) \mid LTR \in [-0.8, 0.8], \sigma \in [-15, 15], \alpha \in [-6, 6]\}$$

# Approche ensembliste par Intervalles

- L'analyse par intervalles consiste à manipuler des intervalles au lieu des nombres réels. Elle a été développée initialement pour gérer les incertitudes et les erreurs de calculs numériques:

Exemple:  $x^2 - 2 = 0$  Une des solutions est :  $x = \sqrt{2}$  Impossible de la représenter exactement !

- Un intervalle encadre la solution avec une erreur bornée quantifiée :  
 $\sqrt{2} \in [1.4142; 1.4143]$
- Le domaine de stabilité est calculé par propagation des contraintes et contraction. Chaque équation du modèle du véhicule est une contrainte sur les éléments du vecteur d'état. On commence avec une grande boîte initiale.

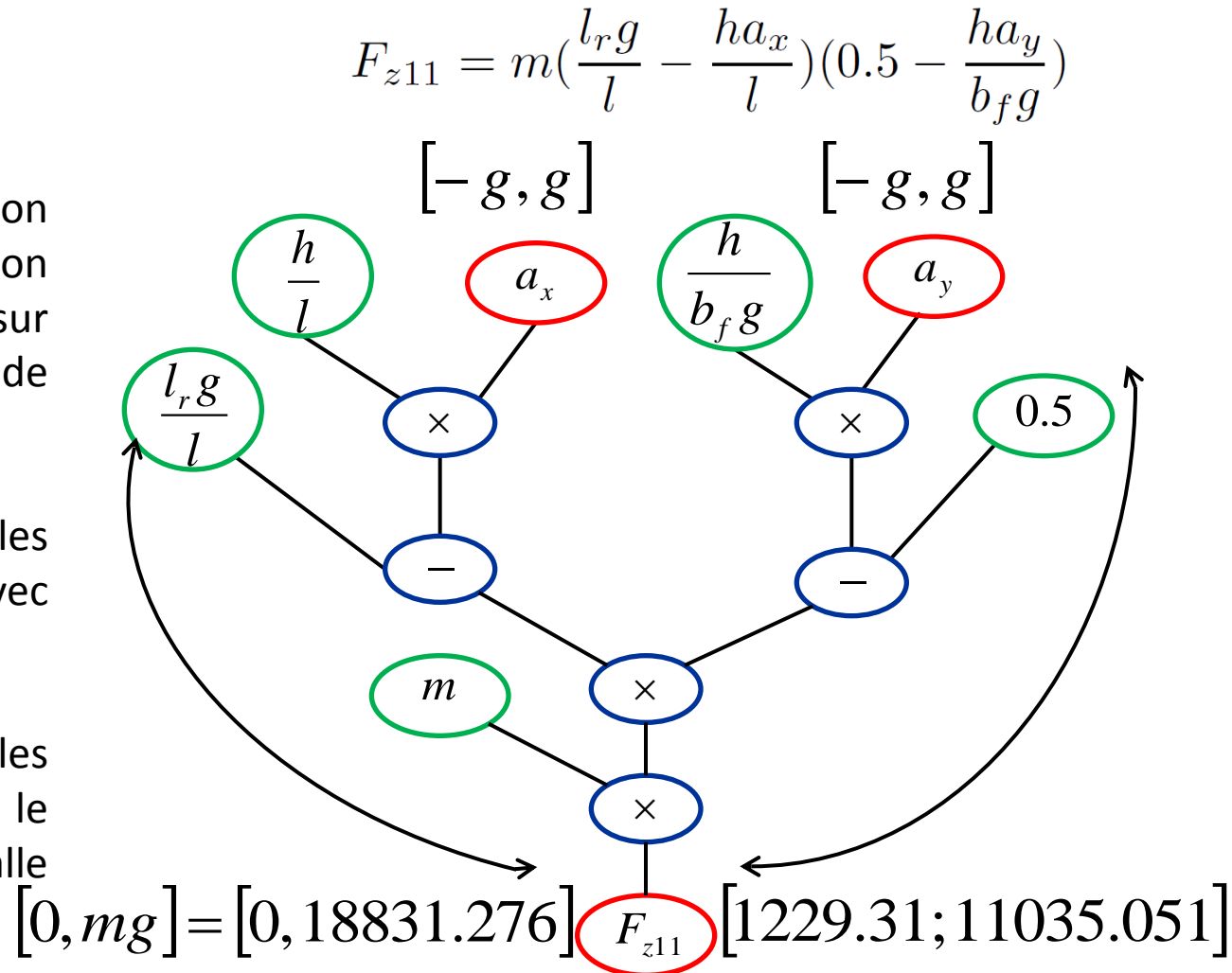
# Propagation des contraintes

Chaque équation est une contrainte.

En utilisant la propagation des contraintes, on contracte les intervalles sur les variables sans perdre de solutions.

La contraction enlève les parties inconsistantes avec la contrainte.

Si les domaines des variables ne sont pas consistents, le résultat sera un intervalle vide



# Propagation par contraintes

La boite de recherche initiale est :

$$F_{z11} = m\left(\frac{l_r g}{l} - \frac{h a_x}{l}\right)\left(0.5 - \frac{h a_y}{b_f g}\right) \in [0, mg]$$

$$F_{z12} = m\left(\frac{l_r g}{l} - \frac{h a_x}{l}\right)\left(0.5 + \frac{h a_y}{b_f g}\right) \in [0, mg]$$

$$F_{z21} = m\left(\frac{l_f g}{l} + \frac{h a_x}{l}\right)\left(0.5 - \frac{h a_y}{b_r g}\right) \in [0, mg]$$

$$F_{z22} = m\left(\frac{l_f g}{l} + \frac{h a_x}{l}\right)\left(0.5 + \frac{h a_y}{b_r g}\right) \in [0, mg]$$

$$a_x = \frac{1}{m} \left( -(F_{y11} + F_{y12}) \sin \delta + (F_{x11} + F_{x12}) \cos \delta + F_{x21} + F_{x22} \right) \in [-g, g]$$

$$a_y = \frac{1}{m} \left( (F_{y11} + F_{y12}) \cos \delta + (F_{x11} + F_{x12}) \sin \delta + F_{y21} + F_{y22} \right) \in [-g, g]$$

$$F_x = D_x \sin(C_x \arctan(B_x \sigma - E_x(B_x \sigma - \arctan(B_x \sigma)))) \in [-mg, mg]$$

$$F_y = D_y \sin(C_y \arctan(B_y \alpha - E_y(B_y \alpha - \arctan(B_y \alpha)))) \in [-mg, mg]$$

$$LTR = \frac{(F_{z11} + F_{z21}) - (F_{z12} + F_{z22})}{\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 F_{zij}} \in [-1, 1] \quad \sigma \in [-100, 100], \alpha \in [-25, 25]$$

# Calcul du domaine de stabilité

En contractant par propagation des contraintes, on observe les intervalles de  $LTR, \sigma, \alpha$   
 On distingue 3 cas:

1)  $a_x, a_y$  Tel que  $[LTR] \subset [-0.8, 0.8], [\sigma] \subset [-15, 15], [\alpha] \subset [-6, 6]$

Alors  $a_x, a_y$  est dans le domaine de stabilité et appartient à la solution

2)  $a_x, a_y$  Tel que  $[LTR] \cap [-0.8, 0.8] = \emptyset, \text{ ou } [\sigma] \cap [-15, 15] = \emptyset, \text{ ou } [\alpha] \cap [-6, 6] = \emptyset$

Alors la boîte  $a_x, a_y$  n'appartient pas à la solution

3)  $a_x, a_y$  Tel que  $[LTR] \cap [-0.8, 0.8] \neq \emptyset, [\sigma] \cap [-15, 15] \neq \emptyset, [\alpha] \cap [-6, 6] \neq \emptyset$

Et  $a_x, a_y$  est trop petite, boîte indéterminée. Sinon, on la coupe et on reteste.

# Algorithme Final

Ensemble cherché:

$$S = \{p \in [p] \mid y \in [y]\}$$

$$p = (a_x, a_y)$$

$$[p] = [-10g, 10g] \times [-10g, 10g]$$

$$y = (LTR, \sigma, \alpha)$$

$$[y] = [-0.8, 0.8] \times [-15, 15] \times [-6, 6]$$

---

**Algorithm 3** SIVIAP<sub>↑↓</sub>(in:  $[x]$ ,  $C_{\uparrow\downarrow}$ ,  $[y]$ ,  $\delta$ ,  $\epsilon$ ; inout:  $\underline{S}_p$ ,  $\overline{S}_p$ )

---

- 1:  $[x] := C_{\uparrow\downarrow}([x]);$
  - 2: if  $([x] = \emptyset)$  then return;
  - 3: if  $y \in [y]$ , then
  - 4:    $\{\underline{S}_p := \underline{S}_p \cup [p]; \overline{S}_p := \overline{S}_p \cup [p];$  return; $\};$
  - 5: if  $(\omega([p]) < \epsilon)$  then
  - 6:    $\{\underline{S}_p := \underline{S}_p \cup [p];$  return; $\};$
  - 7: bisect  $[x]$  into  $[x_1]$  and  $[x_2];$
  - 8: SIVIAP<sub>↑↓</sub>(in:  $[x_1]$ ,  $C_{\uparrow\downarrow}$ ,  $[y]$ ,  $\delta$ ,  $\epsilon$ ; inout:  $\underline{S}_p$ ,  $\overline{S}_p$ );
  - 9: SIVIAP<sub>↑↓</sub>(in:  $[x_2]$ ,  $C_{\uparrow\downarrow}$ ,  $[y]$ ,  $\delta$ ,  $\epsilon$ ; inout:  $\underline{S}_p$ ,  $\overline{S}_p$ ).
- 

---

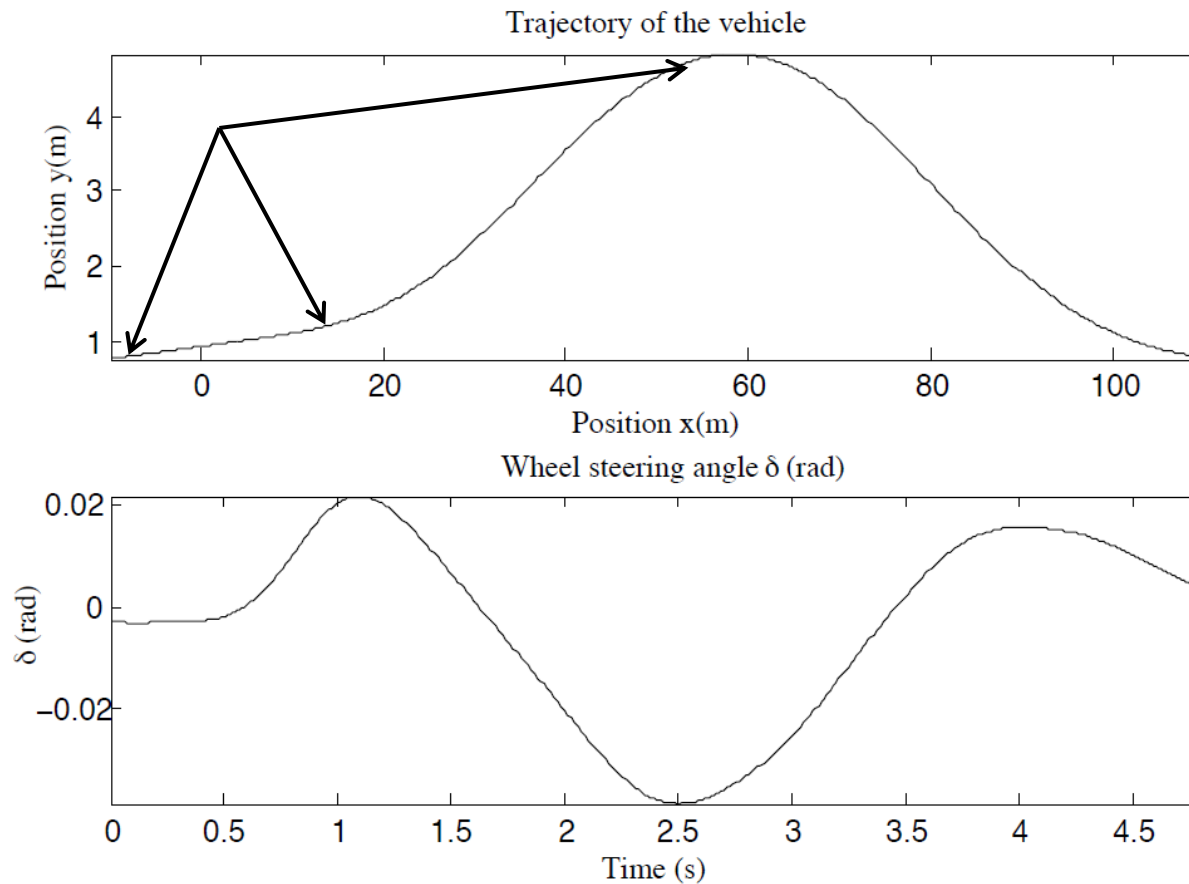
**Algorithm 4** Vehicle Stability Domain Approximation

---

- 1: **Input:**  $\delta, \epsilon$
  - 2: **Output:**  $\underline{S}_p$  and  $\overline{S}_p$
  - 3: SIVIAP<sub>↑↓</sub>(in:  $[x]$ ,  $C_{\uparrow\downarrow}$ ,  $[y]$ ,  $\delta$ ,  $\epsilon$ ; inout:  $\underline{S}_p$ ,  $\overline{S}_p$ )
-

# Validation

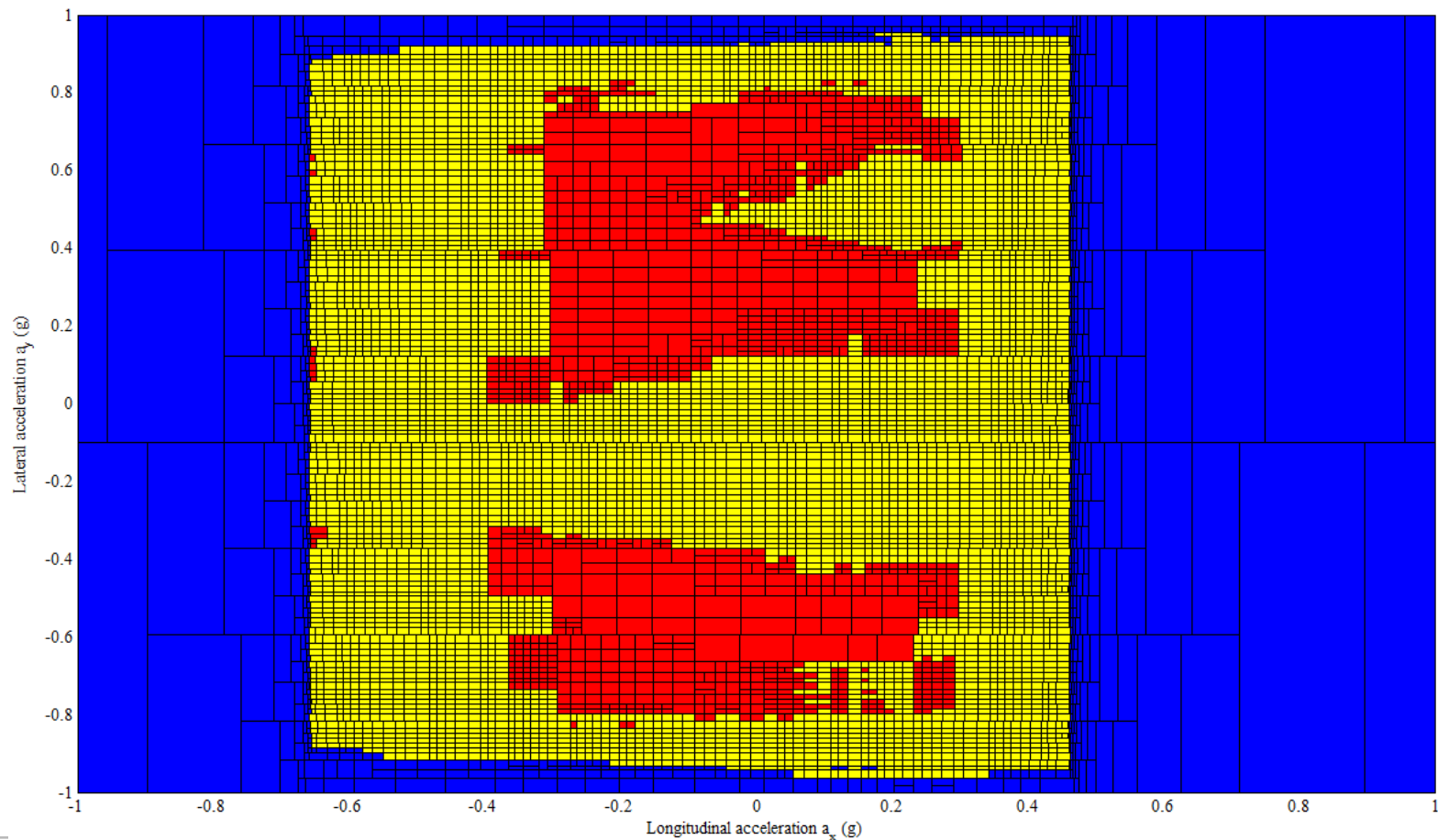
Simulation d'une trajectoire connue et un angle de braquage donné à un instant précis:





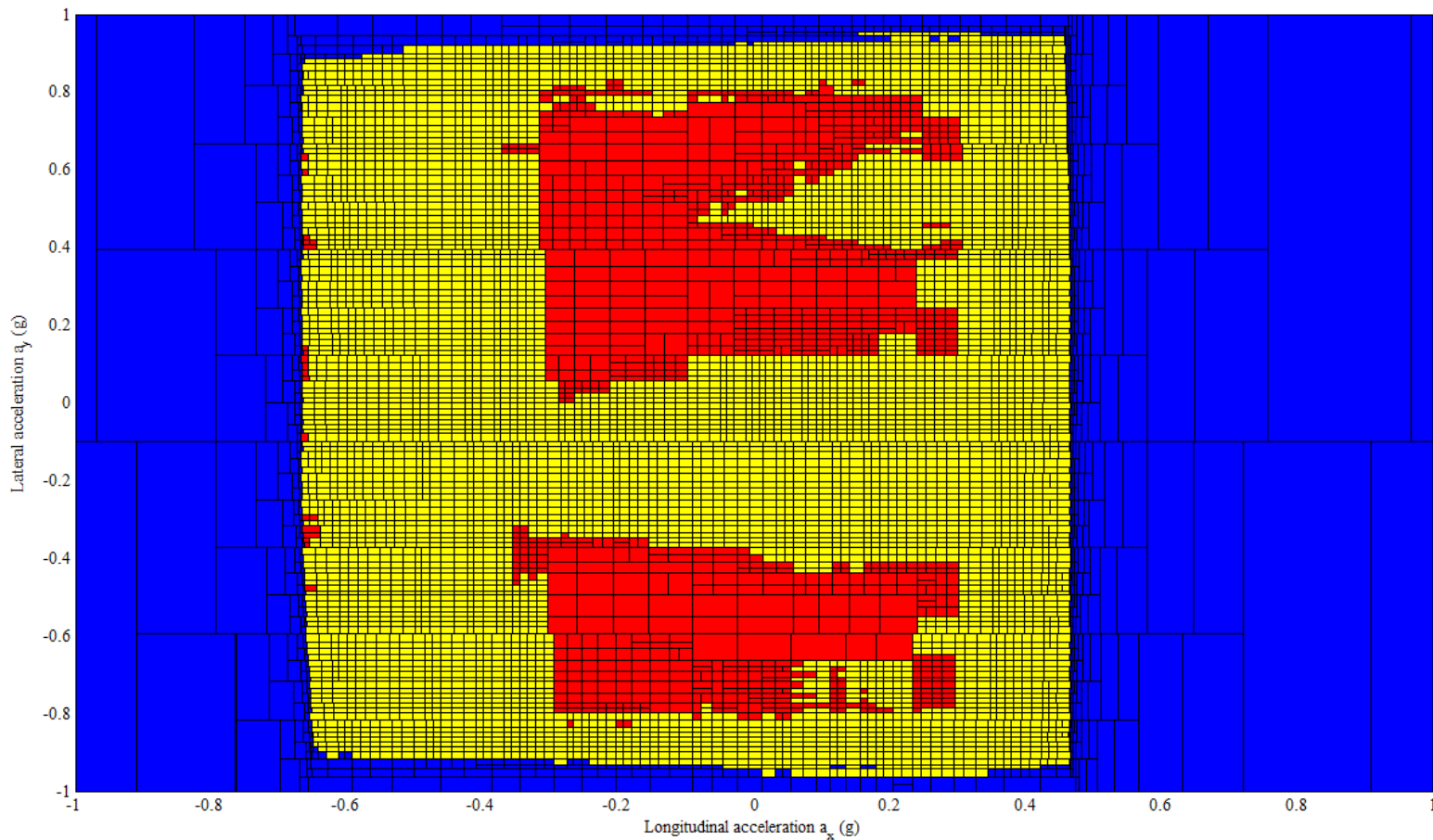
# Résultats

Au début avec  $\delta = 0$



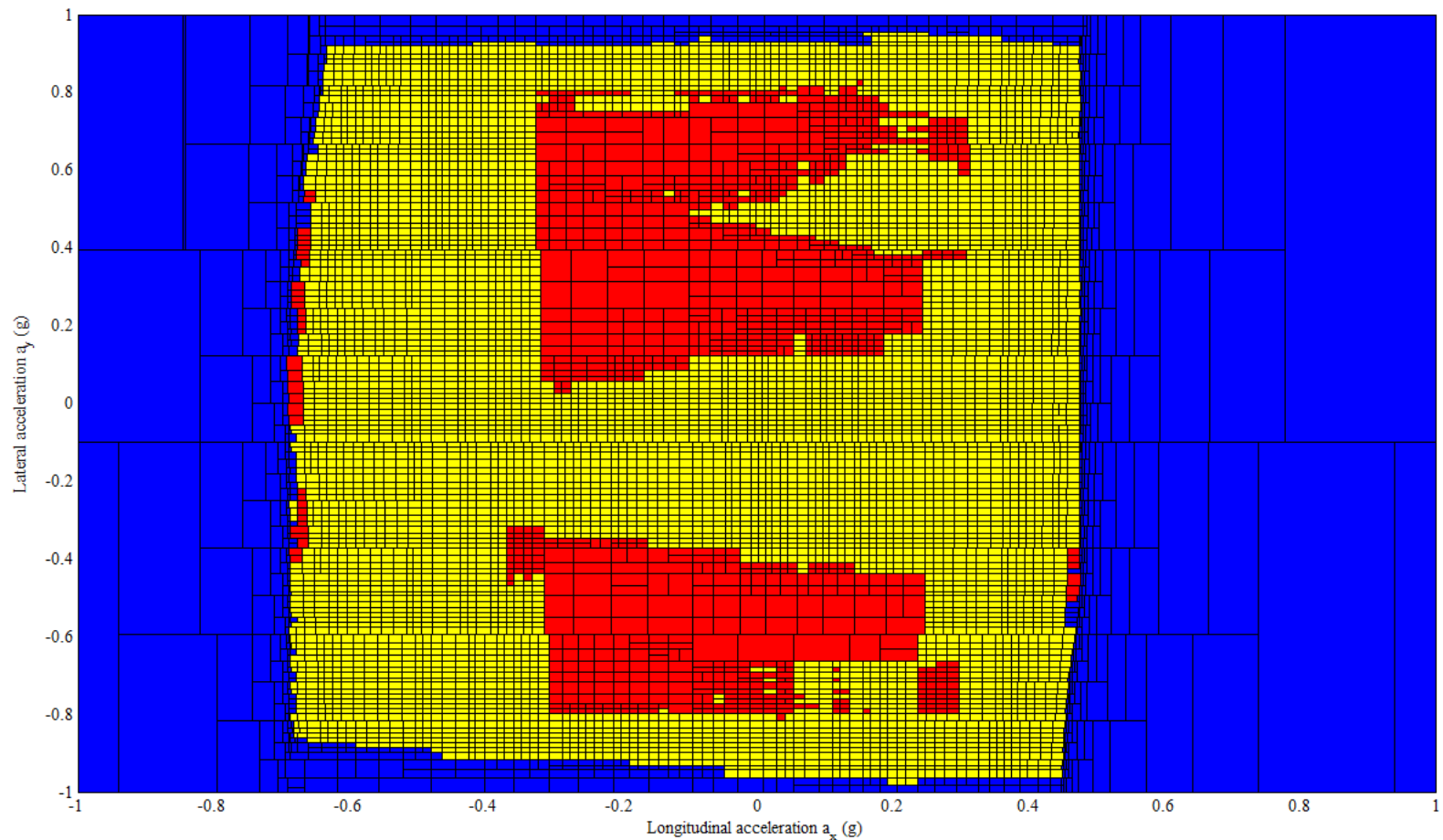
# Résultats

Au premier virage avec  $\delta = 0.01 \text{ rad}$



# Résultats

Au deuxième virage avec  $\delta = 0.036 \text{ rad}$



# Conclusions et Perspectives

- Développement d'une méthode par intervalles pour calculer un ensemble des accélérationnements garanti de mener à un état de conduite stable. On a besoin d'améliorer les résultats surtout en ajoutant un couplage.
- Cet ensemble approximé (approximation intérieure et extérieure) est utilisé pour une commande longitudinale et latérale.
- Calcul de la vitesse longitudinale et la vitesse de lacet du véhicule limites du véhicule. Ils seront les références de la commande développée par nos partenaires de projet à Amiens.

Merci pour votre attention!