

Approximation garantie du domaine de stabilité de l'état d'un véhicule routier

Hoda DANDACH, Jérôme DE MIRAS et Ali CHARARA

UMR CNRS 7253 - Heudiasyc
Université de Technologie de Compiègne
France

Journée "calcul ensembliste", GT MEA

14 Novembre 2013, Paris



Ce projet est cofinancé par l'Union européenne, la Région Picardie et le Fonds européen de développement régional.



Plan

- 1 Motivation et Objectifs
- 2 Dynamique du véhicule
- 3 Formulation et résolution du problème
- 4 Implémentation et résultats
- 5 Conclusion

Statistiques

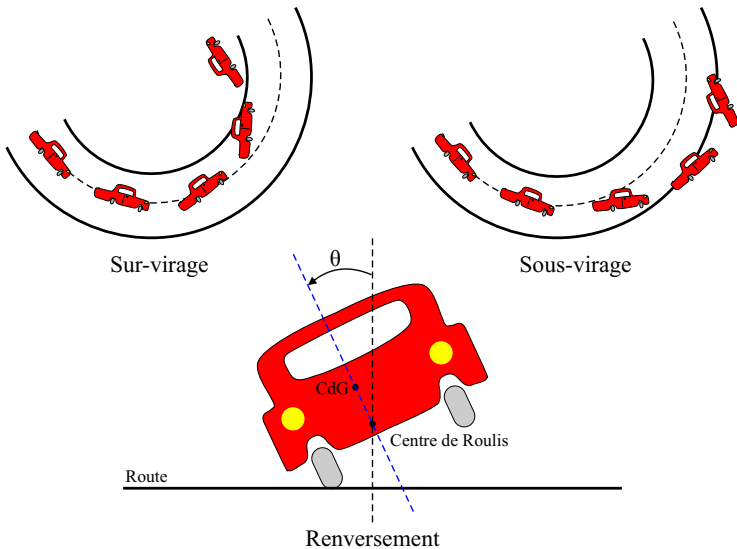
Mortalité sur les routes

	USA	France	Chine	Dans le monde
2010	32,885	3992	65,200	1,2 Million
2011	32,310	3963	62,387	1,2 Million

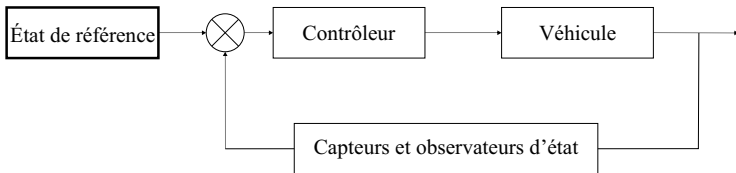
Causes principales des accidents

- Sur estimation de la capacité du véhicule
- Réaction inappropriée et/ou retardée du conducteur

Dangers rencontrés



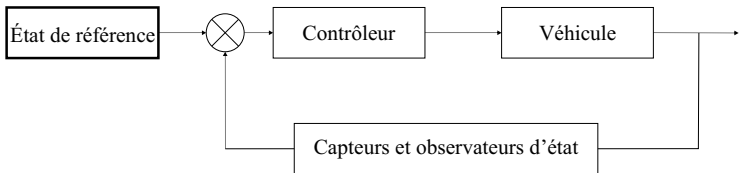
Comment augmenter la sécurité routière ?



Beaucoup de travaux de recherche ont pour objectifs de :

- Garder le véhicule dans un état de stabilité où le sur/sous virage, le renversement, le glissement, le dérapage, etc. sont évités,
- Contrôler les réponses du véhicule, surtout dans des situations critiques .

Comment augmenter la sécurité routière ?



Beaucoup de travaux de recherche ont pour objectifs de :

- Garder le véhicule dans un état de stabilité où le sur/sous virage, le renversement, le glissement, le dérapage, etc. sont évités,
- Contrôler les réponses du véhicule, surtout dans des situations critiques .

Notre objectif

Face à certains dangers prévus, et en utilisant des indicateurs de risque et la dynamique du véhicule, nous nous intéressons à la détermination du domaine de stabilité de certains éléments décrivant l'état du véhicule pour en déduire l'état de référence.

Plan

- 1 Motivation et Objectifs
- 2 Dynamique du véhicule**
- 3 Formulation et résolution du problème
- 4 Implémentation et résultats
- 5 Conclusion

Modèle à 4-roues

Une modélisation de la dynamique du véhicule simple mais assez informative est essentielle pour comprendre son comportement et ses réponses.

Modèle à 4-roues

Une modélisation de la dynamique du véhicule simple mais assez informative est essentielle pour comprendre son comportement et ses réponses.

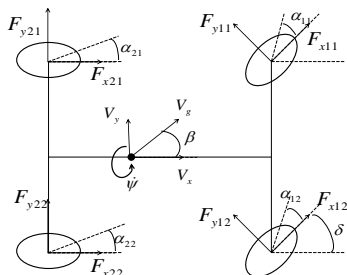


Figure: Modèle à 4-roues

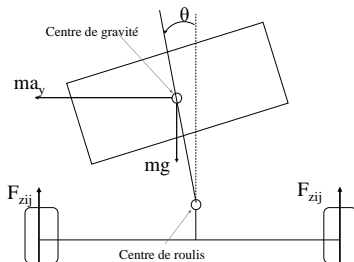


Figure: Mouvement de roulis

Les relations entre ces différents variables et paramètres décrivent le comportement non-linéaire du véhicule.

Modèle à 4-roues : Risque de renversement

Les forces verticales F_z sont principalement générées par le poids du véhicule. Les accélérations a_x et a_y y contribuent aussi.

$$F_{z11,12} = \frac{m}{l}(l_r g - h a_x) \left(\frac{1}{2} \mp \frac{h a_y}{b_f g} \right); \quad F_{z21,22} = \frac{m}{l}(l_f g + h a_x) \left(\frac{1}{2} \mp \frac{h a_y}{b_r g} \right) \quad (1)$$

Modèle à 4-roues : Risque de renversement

Les forces verticales F_z sont principalement générées par le poids du véhicule. Les accélérations a_x et a_y y contribuent aussi.

$$F_{z11,12} = \frac{m}{l}(l_r g - ha_x)\left(\frac{1}{2} \mp \frac{ha_y}{b_f g}\right); \quad F_{z21,22} = \frac{m}{l}(l_f g + ha_x)\left(\frac{1}{2} \mp \frac{ha_y}{b_r g}\right) \quad (1)$$

Indice de renversement : Le challenge consiste à concevoir un indice décrivant le mouvement de roulis et prédisant un risque de renversement possible, comme l'indice de transfert de charge latéral LTR :

$$LTR = \frac{(F_{z11} + F_{z21}) - (F_{z12} + F_{z22})}{\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 F_{zij}} = \frac{2ha_y}{l g e_f e_r} (-(e_f l_f + e_r l_r) + (e_r - e_f) \frac{ha_x}{g}) \quad (2)$$

Modèle à 4-roues : Risque de renversement

Les forces verticales F_z sont principalement générées par le poids du véhicule. Les accélérations a_x et a_y y contribuent aussi.

$$F_{z11,12} = \frac{m}{l}(l_r g - ha_x)\left(\frac{1}{2} \mp \frac{ha_y}{b_f g}\right); \quad F_{z21,22} = \frac{m}{l}(l_f g + ha_x)\left(\frac{1}{2} \mp \frac{ha_y}{b_r g}\right) \quad (1)$$

Indice de renversement : Le challenge consiste à concevoir un indice décrivant le mouvement de roulis et prédisant un risque de renversement possible, comme l'indice de transfert de charge latéral LTR :

$$LTR = \frac{(F_{z11} + F_{z21}) - (F_{z12} + F_{z22})}{\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 F_{zij}} = \frac{2ha_y}{l g e_f e_r} (-(e_f l_f + e_r l_r) + (e_r - e_f) \frac{ha_x}{g}) \quad (2)$$

Domaine de sécurité de LTR

$$LTR \in [-0.8, 0.8]$$

Modèle à 4-roues : Risque de sortie de route

Chaque roue subit une force latérale F_y . Le véhicule tourne grâce à cette force. « Formule magique » de Pacejka :

$$F_y = D_y \sin(C_y \arctan(B_y \alpha - E_y(B_y \alpha - \arctan(B_y \alpha)))) \quad (3)$$

Modèle à 4-roues : Risque de sortie de route

Chaque roue subit une force latérale F_y . Le véhicule tourne grâce à cette force. « Formule magique » de Pacejka :

$$F_y = D_y \sin(C_y \arctan(B_y \alpha - E_y (B_y \alpha - \arctan(B_y \alpha)))) \quad (3)$$

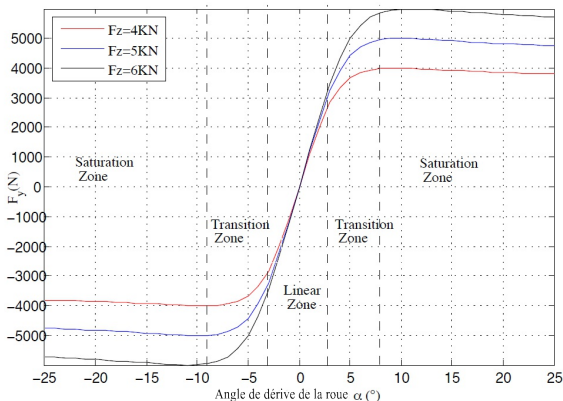


Figure: F_y en fonction de α pour différentes charges F_z

Modèle à 4-roues : Risque de sortie de route

Les phénomènes de sous et sur virage sont principalement dus à la saturation des roues :

- Si les roues avants saturent en premier, le véhicule subit un sous-virage,
- Si les roues arrières saturent en premier, le véhicule subit un sur-virage,

Contrôler le véhicule dans des telles situations est assez difficile et demande un professionnalisme qui n'est pas une qualité commune chez les conducteurs normaux ce qui rend ce comportement particulièrement dangereux.

Modèle à 4-roues : Risque de sortie de route

Les phénomènes de sous et sur virage sont principalement dus à la saturation des roues :

- Si les roues avants saturent en premier, le véhicule subit un sous-virage,
- Si les roues arrières saturent en premier, le véhicule subit un sur-virage,

Contrôler le véhicule dans des telles situations est assez difficile et demande un professionnalisme qui n'est pas une qualité commune chez les conducteurs normaux ce qui rend ce comportement particulièrement dangereux.

Domaine du comportement linéaire

$$\alpha \in [-5, 5]^\circ$$

Modèle à 4-roues

L'angle de dérive de chaque roue ij , $i \in \{1, 2\}$ et $j \in \{1, 2\}$, est lié à v_x , v_y , et $\dot{\psi}$ comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{11} = \delta - \arctan\left(\frac{(v_y + l_f \dot{\psi})}{(v_x - 0.5e_f \dot{\psi})}\right) \\ \alpha_{12} = \delta - \arctan\left(\frac{(v_y + l_f \dot{\psi})}{(v_x + 0.5e_f \dot{\psi})}\right) \\ \alpha_{21} = -\arctan\left(\frac{(v_y - l_r \dot{\psi})}{(v_x - 0.5e_r \dot{\psi})}\right) \\ \alpha_{22} = -\arctan\left(\frac{(v_y - l_r \dot{\psi})}{(v_x + 0.5e_r \dot{\psi})}\right) \\ \beta = \arctan(v_y/v_x) \end{array} \right. \quad (4)$$

δ est l'angle de braquage ($\delta_{11} = \delta_{12} = \delta$). Pour une vitesse constante et un rayon de courbure R :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\psi} = v_x/R \\ a_x = -v_y \dot{\psi} = -v_x v_y/R \\ a_y = v_x^2/R \end{array} \right. \quad (5)$$

Critères de stabilité

Un comportement stable du véhicule est ainsi décrit par un indice de renversement LTR ne dépassant pas le seuil de 0.8, et par des angles de dérive de toutes les roues qui restent plus petits que 5° , en valeurs absolues.

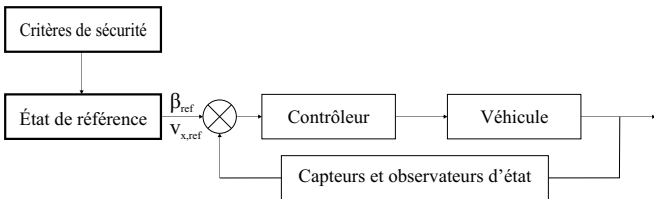
Table: Critères de stabilité du véhicule

Variable	Domaine de stabilité
Indice de renversement LTR	$[-0.8, 0.8]$
Angle de dérive de roue α ($^\circ$)	$[-5, 5]$

Plan

- 1 Motivation et Objectifs
- 2 Dynamique du véhicule
- 3 Formulation et résolution du problème**
- 4 Implémentation et résultats
- 5 Conclusion

Formulation du problème

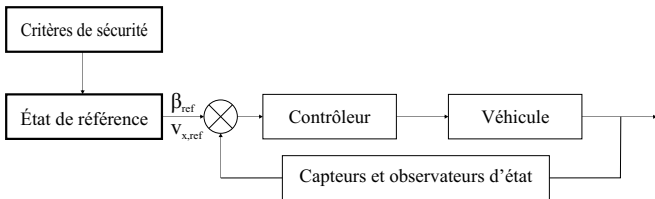


Domaine de stabilité de l'état du véhicule

Deux éléments de l'état sont à étudier :

- La vitesse longitudinale au centre de gravité du véhicule v_x ,
- L'angle de dérive au centre de gravité du véhicule β .

Formulation du problème



Domaine de stabilité de l'état du véhicule

Deux éléments de l'état sont à étudier :

- La vitesse longitudinale au centre de gravité du véhicule v_x ,
- L'angle de dérive au centre de gravité du véhicule β .

Deux cas sont à considérer :

- v_x est connue :

$$S_1 = \{\beta \in [\beta] \mid LTR \in [-0.8, 0.8], \alpha \in [-0.1, 0.1]rad\}$$

- v_x est inconnue :

$$S_2 = \{(\beta, v_x) \in [\beta] \times [v_x] \mid LTR \in [-0.8, 0.8], \alpha \in [-0.1, 0.1]rad\}$$

Inversion ensembliste

C'est un problème d'inversion ensembliste. Les contraintes liant les variables entre elles sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{2ha_y}{lge_f e_r} (-e_f l_f + e_r l_r) + (e_r - e_f) \frac{ha_x}{g} \\ \delta - \arctan\left(\frac{(v_y + l_1 \dot{\psi})}{(v_x - 0.5E\dot{\psi})}\right) \\ \delta - \arctan\left(\frac{(v_y + l_1 \dot{\psi})}{(v_x + 0.5E\dot{\psi})}\right) \\ -\arctan\left(\frac{(v_y - l_2 \dot{\psi})}{(v_x - 0.5E\dot{\psi})}\right) \\ -\arctan\left(\frac{(v_y - l_2 \dot{\psi})}{(v_x + 0.5E\dot{\psi})}\right) \end{array} \right. = \begin{array}{l} LTR = y_1 \in [y_1] = [-0.8, 0.8] \\ \alpha_{11} = y_2 \in [y_2] = [-0.1, 0.1] \\ \alpha_{12} = y_3 \in [y_3] = [-0.1, 0.1] \\ \alpha_{21} = y_4 \in [y_4] = [-0.1, 0.1] \\ \alpha_{22} = y_5 \in [y_5] = [-0.1, 0.1] \end{array} \quad (6)$$

Avec

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\psi} = v_x / R \\ a_x = -v_x v_y / R \\ a_y = v_x^2 / R \\ v_x = v \cos(\beta) \\ v_y = v \sin(\beta) \end{array} \right. \quad (7)$$

Inversion ensembliste

Considérons : $\mathbf{x}_1 = \beta$, $\mathbf{x}_2 = (\beta, v_x)$, $\mathbf{p} = (v, v_y, \psi)$, $\mathbf{y} = (y_1 \times \dots \times y_5)$, le problème revient à approximer les ensembles :

- À vitesse constante ($v_x = cte$),
 $S_1 = \{\mathbf{x}_1 \in [\mathbf{x}_1] \mid \mathbf{f}_1(\mathbf{x}_1, \mathbf{p}) \in [\mathbf{y}]\}, \mathbf{f}_1 : \mathbb{R}^4 \rightarrow \mathbb{R}^5$,
- À vitesse inconnue,
 $S_2 = \{\mathbf{x}_2 \in [\mathbf{x}_2] \mid \mathbf{f}_2(\mathbf{x}_1, \mathbf{p}) \in [\mathbf{y}]\}, \mathbf{f}_2 : \mathbb{R}^5 \rightarrow \mathbb{R}^5$

Inversion ensembliste

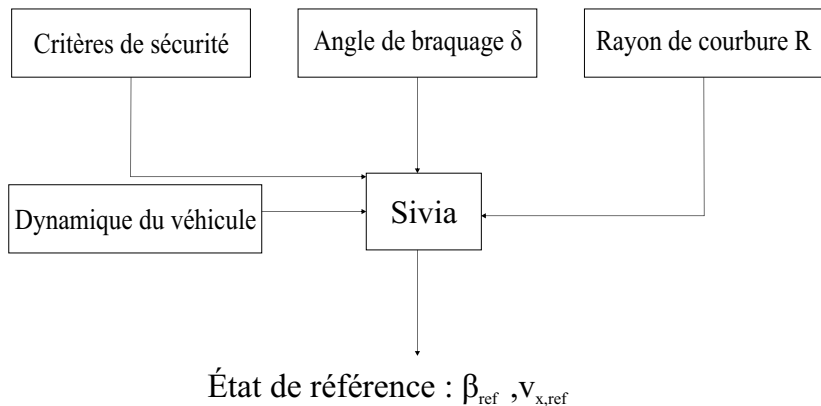
Considérons : $\mathbf{x}_1 = \beta$, $\mathbf{x}_2 = (\beta, v_x)$, $\mathbf{p} = (v, v_y, \psi)$, $\mathbf{y} = (y_1 \times \dots \times y_5)$, le problème revient à approximer les ensembles :

- À vitesse constante ($v_x = cte$),
 $S_1 = \{\mathbf{x}_1 \in [\mathbf{x}_1] \mid \mathbf{f}_1(\mathbf{x}_1, \mathbf{p}) \in [\mathbf{y}]\}$, $\mathbf{f}_1 : \mathbb{R}^4 \rightarrow \mathbb{R}^5$,
- À vitesse inconnue,
 $S_2 = \{\mathbf{x}_2 \in [\mathbf{x}_2] \mid \mathbf{f}_2(\mathbf{x}_2, \mathbf{p}) \in [\mathbf{y}]\}$, $\mathbf{f}_2 : \mathbb{R}^5 \rightarrow \mathbb{R}^5$

Algorithm SIVIA(in: $[\mathbf{x}]$, $[\mathbf{p}]$, δ , $\mathcal{C}_{\uparrow\downarrow}$, \mathbf{f} , $[\mathbf{y}]$, ϵ ; inout: $\underline{\mathbb{X}}$, $\overline{\mathbb{X}}$)

- 1: $[\mathbf{x}] := \mathcal{C}_{\uparrow\downarrow}([\mathbf{x}]);$ % Contracting the box
 - 2: if $([\mathbf{x}] = \emptyset)$ then return; % Discarding the box
 - 3: if $[\mathbf{f}]([\mathbf{x}]) \subset [\mathbf{y}]$, then
 % box belongs to the solution set
 - 4: $\{\underline{\mathbb{X}} := \underline{\mathbb{X}} \cup [\mathbf{x}]; \overline{\mathbb{X}} := \overline{\mathbb{X}} \cup [\mathbf{x}];$ return;};
 - 5: if $(\omega([\mathbf{x}]) < \epsilon)$ then
 % Undetermined box and too small to be bisected
 - 6: $\{\overline{\mathbb{X}} := \overline{\mathbb{X}} \cup [\mathbf{x}];$ return;};
 - 7: bisect $[\mathbf{x}]$ into $[\mathbf{x}_1]$ and $[\mathbf{x}_2]$; % Bisecting the box
 - 8: SIVIA (in: $[\mathbf{x}_1], [\mathbf{p}]$, δ , $\mathcal{C}_{\uparrow\downarrow}$, \mathbf{f} , $[\mathbf{y}]$, ϵ ; inout: $\underline{\mathbb{X}}$, $\overline{\mathbb{X}}$);
 - 9: SIVIA (in: $[\mathbf{x}_2], [\mathbf{p}]$, δ , $\mathcal{C}_{\uparrow\downarrow}$, \mathbf{f} , $[\mathbf{y}]$, ϵ ; inout: $\underline{\mathbb{X}}$, $\overline{\mathbb{X}}$).
-

Algorithme final



Plan

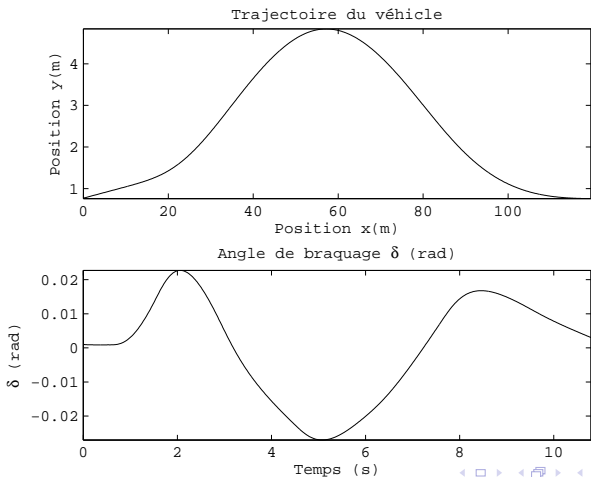
- 1 Motivation et Objectifs
- 2 Dynamique du véhicule
- 3 Formulation et résolution du problème
- 4 Implémentation et résultats**
- 5 Conclusion

Données de Simulation

Le simulateur Callas[®] est utilisé pour générer une trajectoire et l'angle de braquage correspondant.

Données de Simulation

Le simulateur Callas[®] est utilisé pour générer une trajectoire et l'angle de braquage correspondant.



Domaine de stabilité de β à vitesse constante

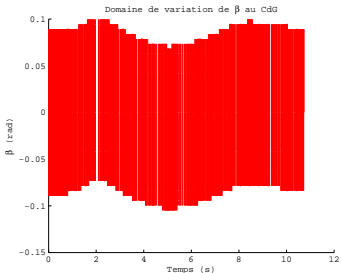
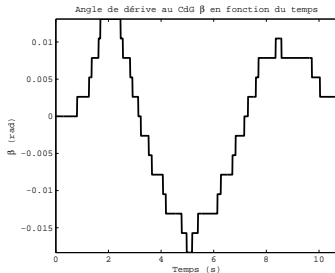
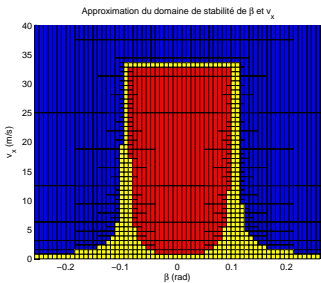
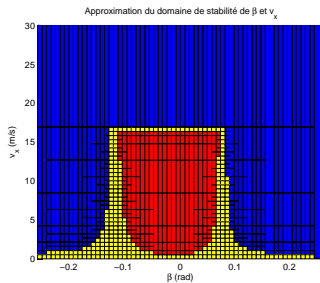
(a) Domaine de β (b) β au centre du domaine

Figure: Domaine de stabilité de S_1 de β

Domaine de stabilité de v_x et de β



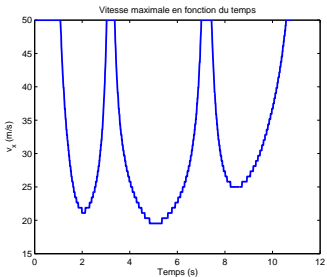
(a) Pendant le premier virage



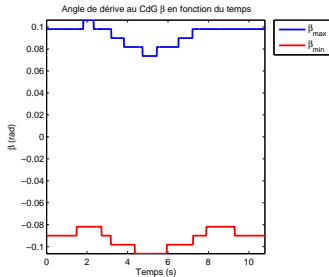
(b) Pendant le deuxième virage

Figure: Domaine de stabilité S_2 de (β, v_x)

Domaine de stabilité de v_x et de β



(a) $v_{x,max}$ en fonction du temps



(b) β en fonction du temps

Figure: Domaine de stabilité S_2 de (β, v_x)

Plan

- 1 Motivation et Objectifs
- 2 Dynamique du véhicule
- 3 Formulation et résolution du problème
- 4 Implémentation et résultats
- 5 Conclusion**

Conclusions et Perspectives

- Conclusions

- Nouvelle méthode pour calculer le domaine de stabilité des éléments du vecteur d'état du véhicule.
- En utilisant l'analyse par intervalle, le domaine de stabilité est approximé d'une manière garantie face à certains facteurs de risque.

- Perspectives

- Utiliser l'état de référence déduit du domaine de stabilité dans une loi de commande,
- Ajouter autres contraintes comme le dévers de la route et son état (mouillé, glacé),

Conclusions et Perspectives

- Conclusions
 - Nouvelle méthode pour calculer le domaine de stabilité des éléments du vecteur d'état du véhicule.
 - En utilisant l'analyse par intervalle, le domaine de stabilité est approximé d'une manière garantie face à certains facteurs de risque.
- Perspectives
 - Utiliser l'état de référence déduit du domaine de stabilité dans une loi de commande,
 - Ajouter autres contraintes comme le dévers de la route et son état (mouillé, glacé),

Merci pour votre attention
Questions? Suggestions?