

Le mouvement de lacet du véhicule lors d'une prise de virage

Cette infotech va permettre de mettre en avant un paramètre cinématique du véhicule qui est primordial lors d'une prise de virage : c'est son **angle de lacet**¹ (et ses paramètres dérivés *vitesse angulaire de lacet* et *accélération de lacet*).

En effet l'observation du comportement en lacet d'un véhicule nous renseigne sur la qualité du guidage de ce véhicule et d'ailleurs les systèmes de contrôle de la trajectoire (ESP et autres de la même famille) appuient leurs stratégies de contrôle sur ces paramètres du lacet grâce à un capteur particulier que nous avons abordé lors de l'infotech n°1.

L'intérêt suscité par le sujet AFS MAVA traitant de l'ESP, disponible sur EDUCAUTO, et la généralisation de ces automatismes sur les véhicules récents font qu'il nous semblait opportun d'apporter un modèle de raisonnement simple sur ces problèmes dits de "tenue de route" .

Vitesse de lacet en virage

Nous considérerons pour la suite que le véhicule s'inscrit dans un virage parfaitement circulaire lui permettant de changer sa direction de roulage de 90 degrés. Voici les positions successives du véhicule lors de ce changement de direction de 1 : entrée dans le virage à 4 : retour à la situation ligne droite (*figure 1*).

Le mouvement du véhicule se décompose traditionnellement en deux mouvements simples :

- Le mouvement du centre de gravité (G) du véhicule qui décrit une trajectoire circulaire à vitesse constante durant le virage.
- Un mouvement du véhicule autour de G qui est une rotation de lacet qui est montrée de manière plus "imagée" par la superposition des axes médians du véhicules dans ses positions successives.

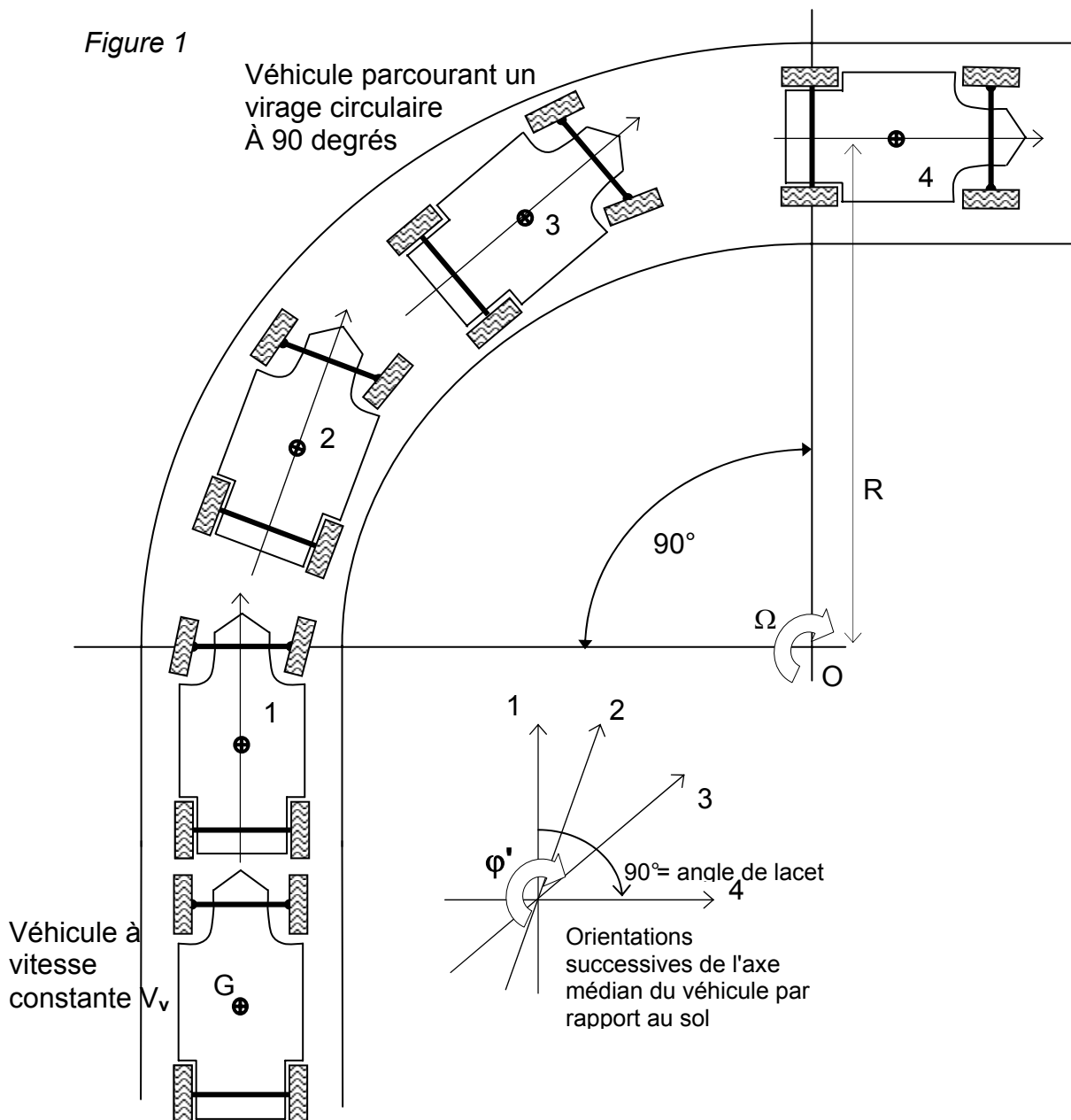
Nous pouvons observer que l'angle de lacet (nous le noterons φ) est égal à l'angle de changement de direction du virage (ici 90°). Nous considérons que le virage est parcouru à vitesse constante V_v ce qui permet d'écrire que la vitesse de rotation du véhicule autour du centre du virage vaut $\Omega = V_v/R$ où R est le rayon du virage (distance G-O). Comme l'angle de lacet évolue de la même manière que l'angle balayé dans le virage par le véhicule nous avons :

$$d\varphi/dt = \Omega = V_v/R \text{ nous noterons pour la suite la vitesse de lacet } \varphi'$$

Cette vitesse φ' sera donc constante durant le virage dans la situation que nous avons définie ; elle est par ailleurs nulle dans la situation 1 et dans la situation 4 puisque le véhicule y est en situation ligne droite. Pour passer d'une vitesse de lacet nulle à une non nulle le véhicule va devoir subir une accélération de lacet en entrée de virage et inversement il aura besoin d'une décélération de lacet en sortie de virage.

¹ angle de rotation du véhicule autour de son axe vertical (z) passant par son CDG, cet angle étant repéré par rapport à un repère lié au sol.

Figure 1



Conséquences :

Ces accélérations et décélérations sont obtenues en appliquant des moments de lacet au véhicule, ces moments sont générés par les efforts de guidage produits par les pneumatiques. Ce travail vient s'ajouter au travail de guidage déjà demandé aux pneumatiques et peut dans certaines situations de conduite avoir des interactions néfastes pour la stabilité de la trajectoire.

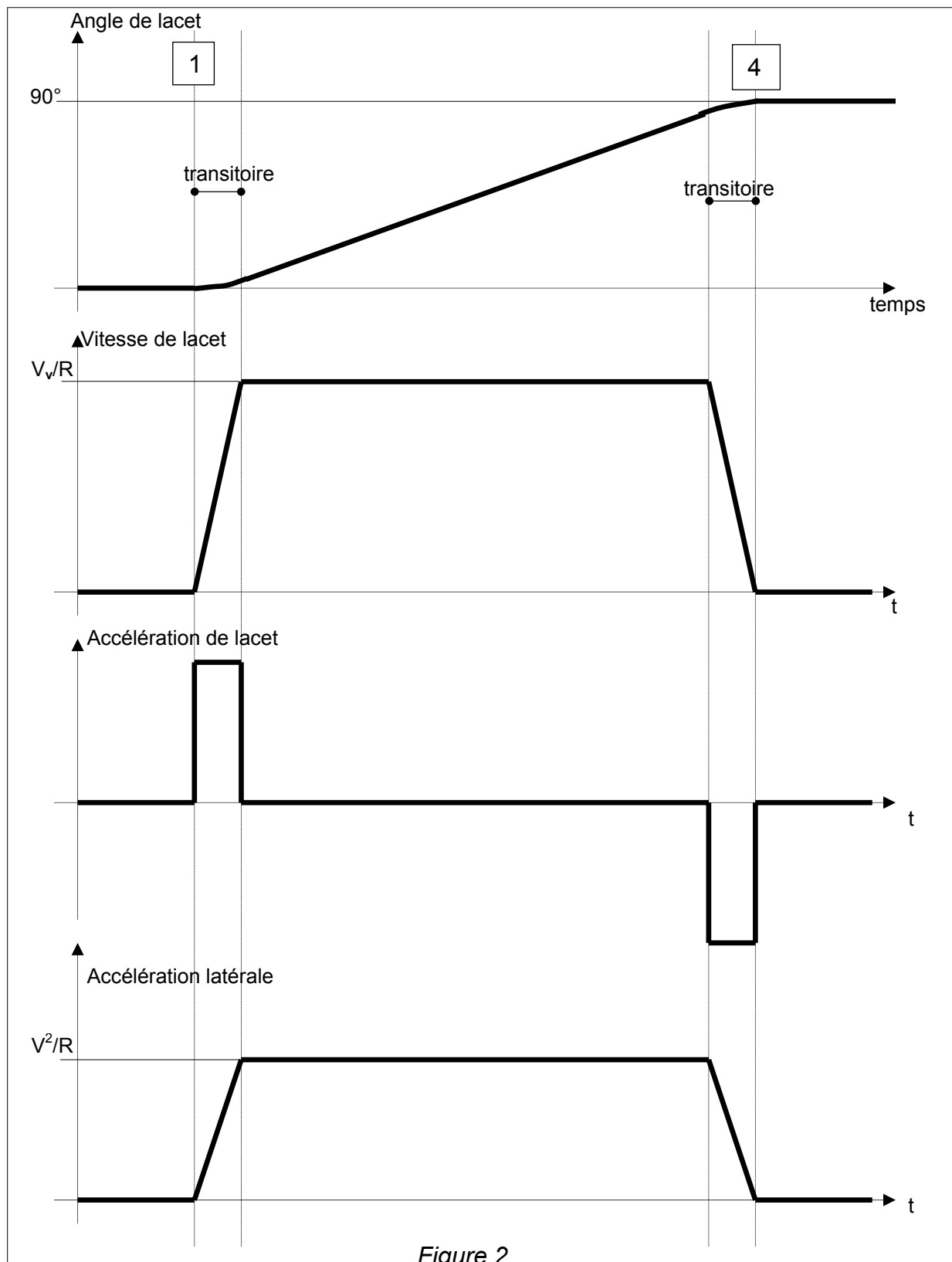
Nous pouvons maintenant distinguer 3 étapes dans la prise de virage :

- Une zone transitoire au début du virage (quelquefois nommée zone d'envirage) durant laquelle le véhicule est accéléré en lacet jusqu'à la valeur $\varphi' = V_v/R$ et les efforts de guidage s'installent sur les quatre roues pour produire l'accélération centripète nécessaire à la prise du virage. Il est souhaitable que cette étape soit de courte durée pour que le véhicule soit stable au plus vite sur la trajectoire souhaitée.
- Une zone où tous les paramètres dynamiques sont constants et durant laquelle le moment de lacet est nul (somme des moments des efforts de guidage par rapport à $G = 0$). La résultante des efforts de guidage est dirigée vers le centre du virage et produit une

accélération latérale (vers O) égale à $\Omega^2.R$ donc également à $(V_v)^2/R$ permettant de suivre la trajectoire.

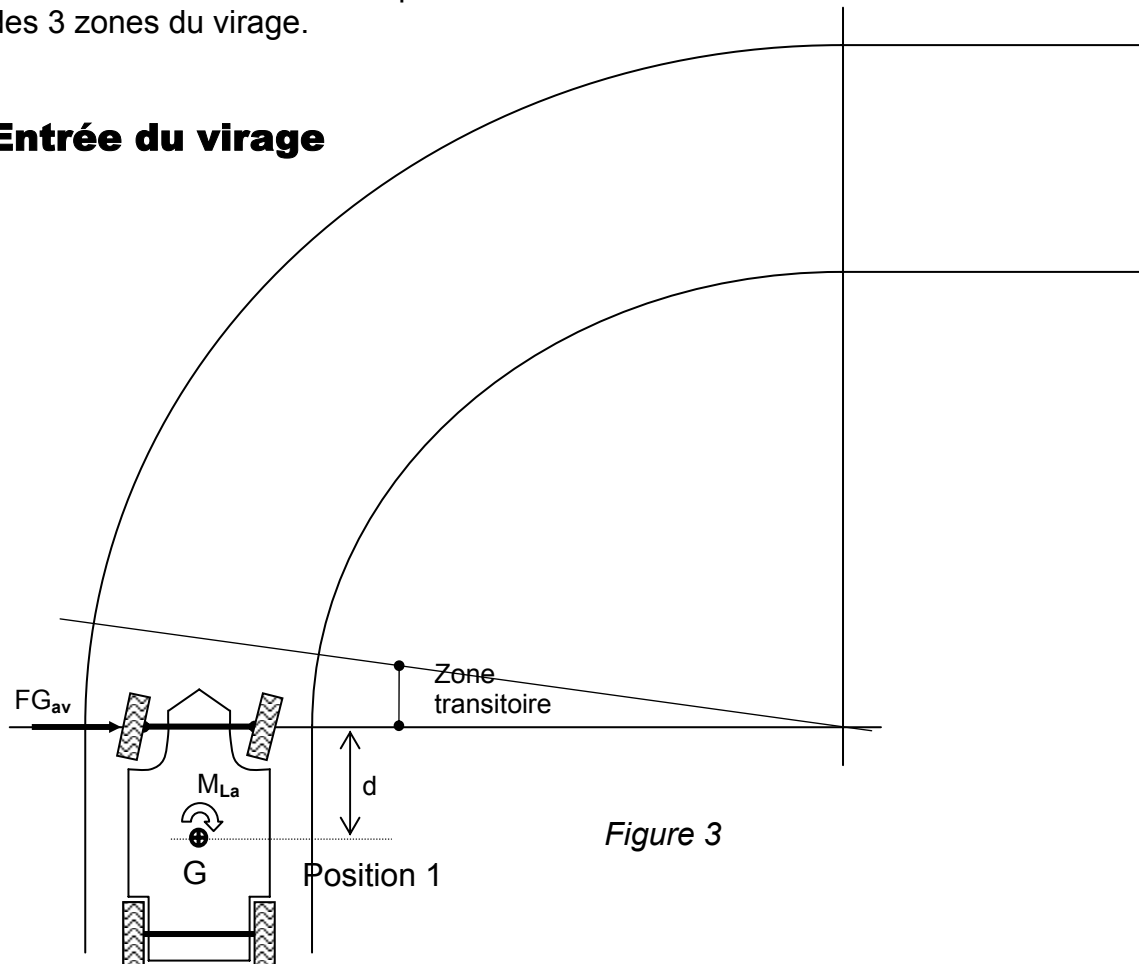
- Une zone transitoire en fin de virage durant laquelle le véhicule est décéléré en lacet jusqu'à $\varphi' = 0$ et les efforts de guidage décroissent jusqu'à une résultante nulle. Cette zone conditionne la stabilité du véhicule sur la ligne droite retrouvée.

Nous allons pouvoir détailler chacune de ces trois étapes mais dès maintenant nous pouvons définir l'évolution idéale des principaux paramètres dynamiques.



Evidement les valeurs réelles n'auront pas une évolution aussi rigoureuse mais l'allure générale sera respectée et tout dépassement transitoire de ces valeurs de consigne pourra être interprété comme une instabilité de la fonction guidage du véhicule. Nous pouvons également remarquer que les valeurs vitesse de lacet et accélération latérale sont mesurées toutes les deux par des capteurs spécifiques sur les systèmes de contrôle de trajectoire. Détaillons maintenant le comportement du véhicule et du conducteur dans chacune des 3 zones du virage.

Entrée du virage



A l'entrée du virage le conducteur agit sur le volant : les roues avant changent d'orientation alors que le véhicule est toujours sur une trajectoire rectiligne. Ceci met les pneumatiques avant en situation de dérive et il produit des efforts de guidage orientés vers l'intérieur du virage.

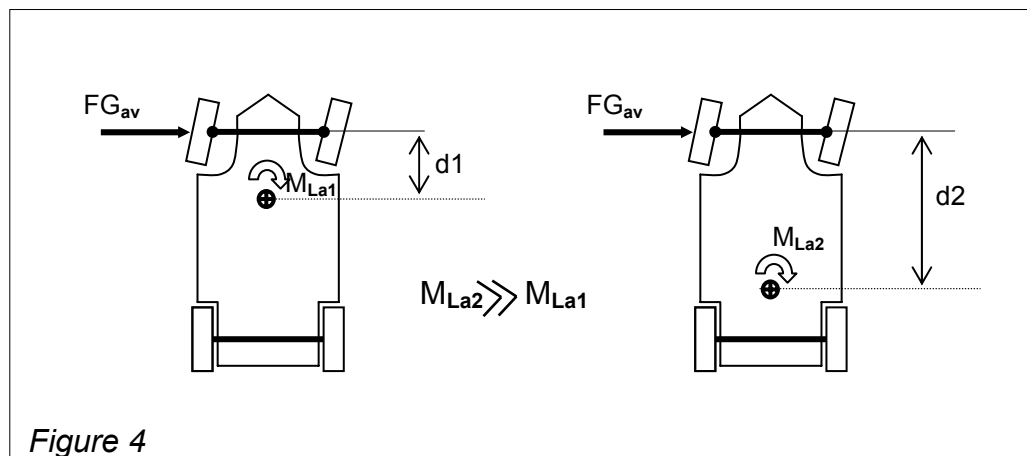
Les roues arrières sont en dérive nulle puisque le véhicule n'a pas entamé son mouvement de lacet. Les efforts de guidage arrières sont nuls et le moment de lacet est dû à $FG_{av} \cdot d = M_{La}$

Durant la zone transitoire le véhicule est mis en rotation par M_{La} ce qui met progressivement les roues arrières en dérive. L'apparition de FG_{ar} augmente l'accélération latérale puisqu'elle vaut $(FG_{av} + FG_{ar}) / \text{Masse véhicule}$ alors qu'elle diminue le moment de lacet car le moment de FG_{ar} est opposé à celui de FG_{av} . tous les paramètres rejoignent donc progressivement les consignes du régime établi.

Conséquences :

La rapidité avec laquelle le véhicule rejoint le régime établi décide de la maniabilité de celui-ci en entrée de courbe (on parle aussi de vivacité), les principaux facteurs qui décident de cette maniabilité sont faciles à énoncer :

- Le moment d'inertie du véhicule par rapport à G ce qui veut dire qu'à poids égal un véhicule dont les masses principales sont concentrées près de G sera plus vif car le même moment de lacet produira une accélération de lacet plus importante (avantage global aux véhicules courts).
- L'équipement en pneumatiques car pour une même action au volant les pneumatiques généreront un FG_{av} plus important si leur raideur de dérive est plus importante mais c'est aussi le temps de réponse nécessaire au pneumatique pour installer les efforts qui sera ressenti. En effet il lui faut dérouler au sol une certaine longueur de ceinture pour atteindre les efforts nominaux ce qui suppose un délai de réaction fonction de la vitesse et de la technologie de fabrication du pneumatique.
- La distance entre le CDG et les roues avant reste la paramètre le plus important car elle décide directement de la valeur du moment de lacet.

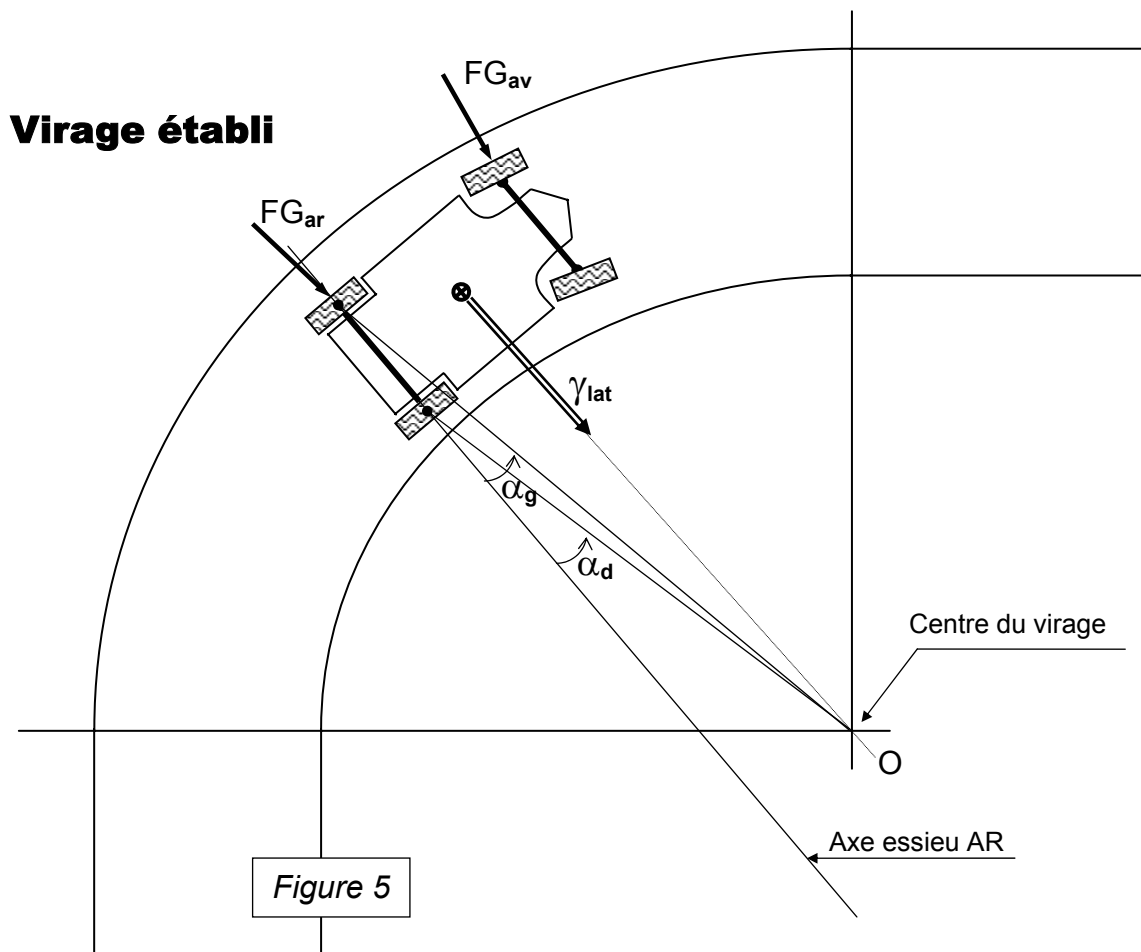


La figure 4 illustre bien le fait qu'un CDG centré arrière améliore grandement la vivacité du véhicule en entrée de virage alors que la configuration habituelle des véhicules modernes (GMP sur l'avant) rend ce véhicule beaucoup plus "paresseux" en entrée de virage. Nous verrons plus loin que la vivacité du véhicule centré AR entraîne d'autres inconvénients sur le comportement dynamique.

Remarque :

Lorsque les conditions d'adhérence sont précaires les efforts de guidages sont alors très limités et le véhicule est d'autant plus difficile à inscrire en virage. Il devient logique de vouloir faire participer les roues arrière au moment de lacet, il faut alors qu'elles produisent en entrée de virage des efforts opposés à ceux de l'avant. Vous pourrez observer que ceci est réalisé pour les véhicules de course sur glace (trophée Andros) où, grâce à un boîtier de direction à cames à l'arrière, les roues AR sont brièvement braquées à l'opposé de l'AV puis rejoignent un braquage de même sens lorsque l'appui en virage est réalisé. Vous observerez également que l'angle de lacet au cours du virage est égal à la consigne énoncée précédemment augmentée de 90° car dans cette configuration les efforts de guidage sont assurés par la motricité du véhicule et c'est l'avant qui regarde le centre du virage.

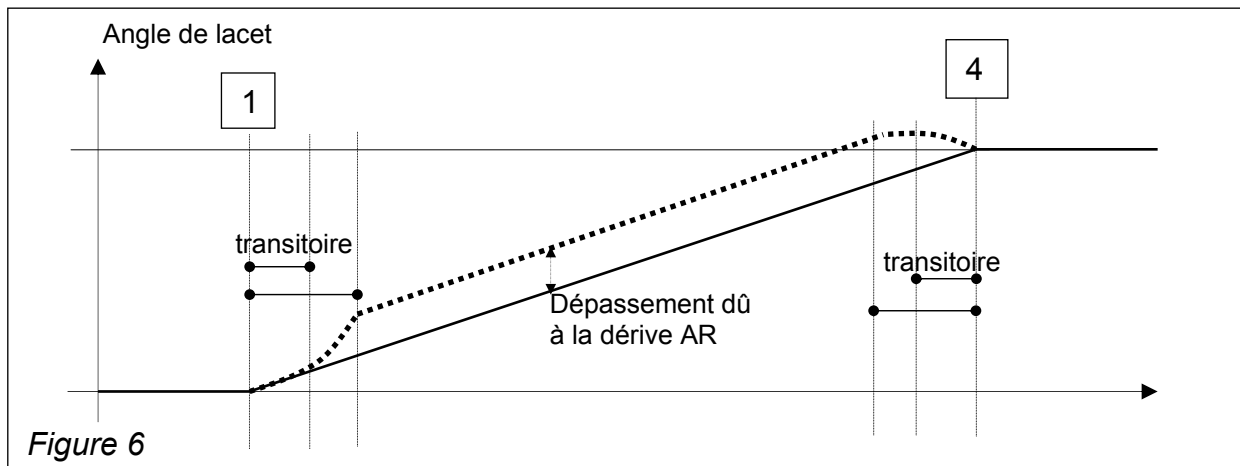
Pour les véhicules équipés de trains traditionnels la technique de pilotage dite "appel, contre-appel" permet par une action anticipée avant le virage de produire des effets assez similaires mais demande un sérieux entraînement au pilotage.



La rotation de lacet a permis d'installer les efforts de guidage AR, le schéma montre bien qu'il faut que l'axe de l'essieu AR soit derrière le centre du virage pour que les pneumatiques AR participent au guidage du véhicule (si O était sur l'axe de l'essieu les valeurs des dérives AR seraient nulles et FG_{ar} serait nul ce qui est impossible en virage). La résultante des efforts de guidage appliqués au véhicule produit l'accélération latérale γ_{lat} qui permet au véhicule de rester inscrit dans le virage. Toutes les valeurs des paramètres restent constants tant que la vitesse est constante et que l'angle au volant ne change pas.

Conséquences :

La mise en dérive du train AR impose au véhicule d'atteindre une valeur de lacet supérieure à la consigne idéale énoncée précédemment (figure 6). Ce dépassement a pour conséquence d'augmenter la durée des transitoires et le travail demandé aux pneumatiques pour produire les moments de lacet. La qualité du guidage en souffrira donc et le véhicule sera d'autant moins stable sur ses trajectoires que la dérive AR sera élevée. Pour rester proche de la consigne de lacet idéale il serait souhaitable de conserver une dérive nulle en G (c'est à dire OG perpendiculaire à l'axe médian du véhicule) ce qui minimiserait les sollicitations des pneumatiques et améliorerait la



qualité du guidage. Le respect de cette condition cinématique peut se réaliser par différentes solutions technologiques qui visent toutes à braquer légèrement les roues AR pour positionner idéalement O par rapport au véhicule :

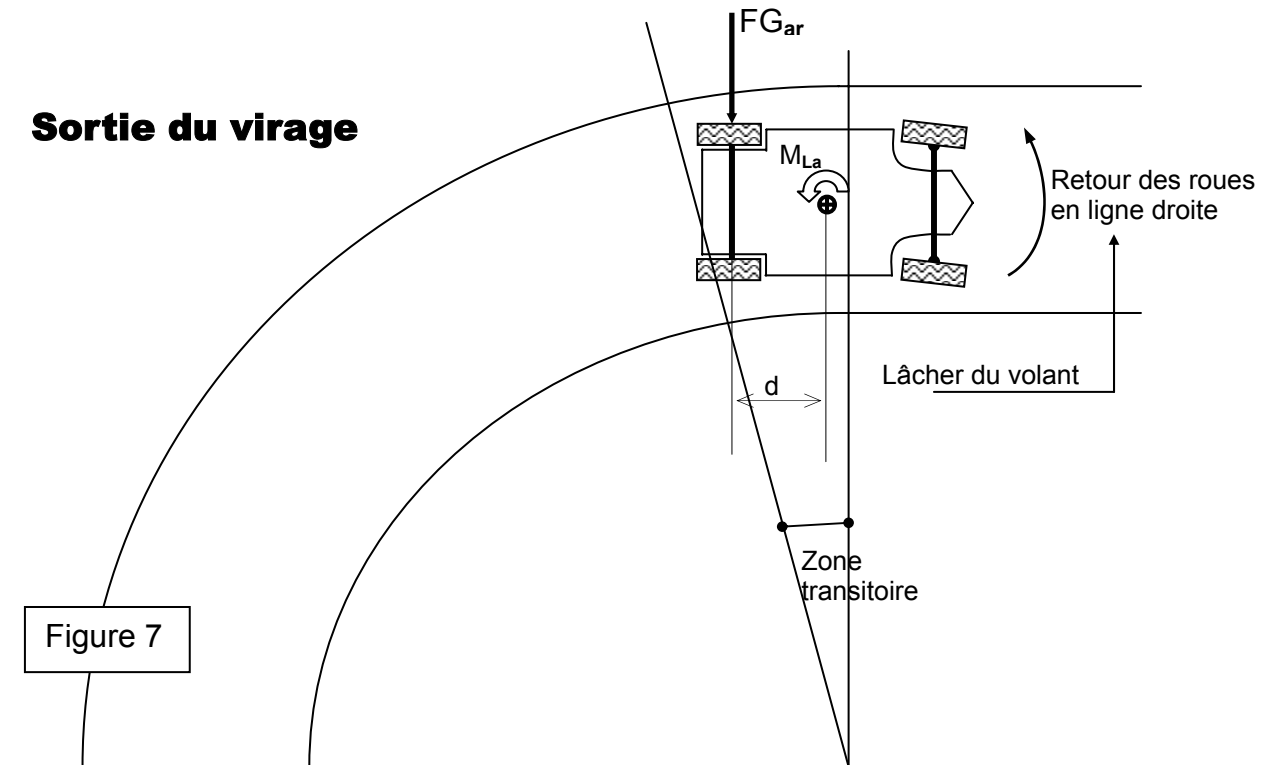
- Mouvement passif de l'essieu AR par rapport à la caisse sous les efforts de guidage (ex ZX Citroën)
- Mouvement passif de chacune des roues sous l'action des efforts de guidage (cas des essieux AR dits "multibras" utilisés par Mercedes entre autre)
- Mouvement passif de chacune des roues sous l'action du roulis de la caisse, réalisé sur la majorité des solutions à "bras tirés" par un profil en tôle déformable reliant les deux essieux (toutes applications) ou de manière plus évoluée par un train à double triangle plus un barre de liaison (Peugeot 406)
- Mouvement actif des roues AR produit par des vérins déformants des éléments élastiques du train (BMW AHK par ex) Les braquages étant contrôlés par ordinateur.
- Mouvement actif des roues AR produit par une crémaillère braquant les roues autour d'un axe de pivot de manière similaire au train AV. Une liaison mécanique relie alors les crémaillères AV et AR, le synchronisme des deux boîtiers peut être fixe (solution Honda) ou un rapport variable peut être géré par un ordinateur et une cinématique assez complexe (solution Mitsubishi)

D'une manière générale nous pouvons retenir que l'essieu AR a énormément d'importance sur la stabilité du véhicule et d'ailleurs un défaut affectant celui-ci est ressenti très tôt par l'utilisateur alors que des défauts majeurs seront mieux tolérés à l'AV. Une démarche de diagnostic doit absolument intégrer ce facteur.

Remarque :

Nous pouvons remarquer sur la figure 5 que sur le train AR la dérive du pneumatique extérieur est inférieure à celle du pneumatique intérieur au virage ($\alpha_g < \alpha_d$). Ce qui fait que la roue la plus chargée est la moins sollicitée en dérive, la capacité de guidage du train n'est donc pas exploitée au mieux. Si la technologie utilisée le permet ceci pourra être corrigé par la stratégie de différenciation des braquages droite et gauche.

Sortie du virage



A la sortie du virage le conducteur relâche son action sur le volant, le couple appliqué aux roues autour de l'axe de pivot par le conducteur devient nul. Les roues se retrouvent soumises aux moments d'auto-alignement induits par la dérive des pneumatiques et sont donc ramenées vers une situation de dérive nulle : les efforts de guidage chutent à zéro à l'avant (figure 7).

La caisse ayant toujours la même attitude par rapport au virage le train AR produit toujours FG_{ar} qui génère un moment de lacet permettant la décélération jusqu'à $\varphi' = 0$ sur la ligne droite.

Cette phase transitoire doit être également courte et ne générer aucune instabilité sur la nouvelle situation ligne droite ce qui est susceptible d'arriver car les pneumatiques se retrouvent tous à efforts de guidages nuls et peuvent favoriser des oscillations latérales dans cette situation ; les valeurs de réglages statiques (pince et carrossage) peuvent contribuer à "brider" le véhicule en ligne droite et atténuer ces phénomènes.

Conséquences :

La rapidité avec laquelle le véhicule rejoint la situation ligne droite dépend des mêmes facteurs qu'à l'entrée :

- Le moment d'inertie par rapport à G.
- L'équipement pneumatiques qui décide de la dérive AR et donc du dépassement de consigne de lacet à éliminer (voir figure 6). Une faible dérive à l'arrière étant toujours favorable au retour en ligne droite donc à la stabilité.
- De la technologie du train AR permettant de limiter ce dépassement de consigne (voir p.7).
- De la distance entre le CDG et l'essieu AR qui est toujours le paramètre de premier ordre puisqu'il règle la valeur du moment de lacet (figure 8).

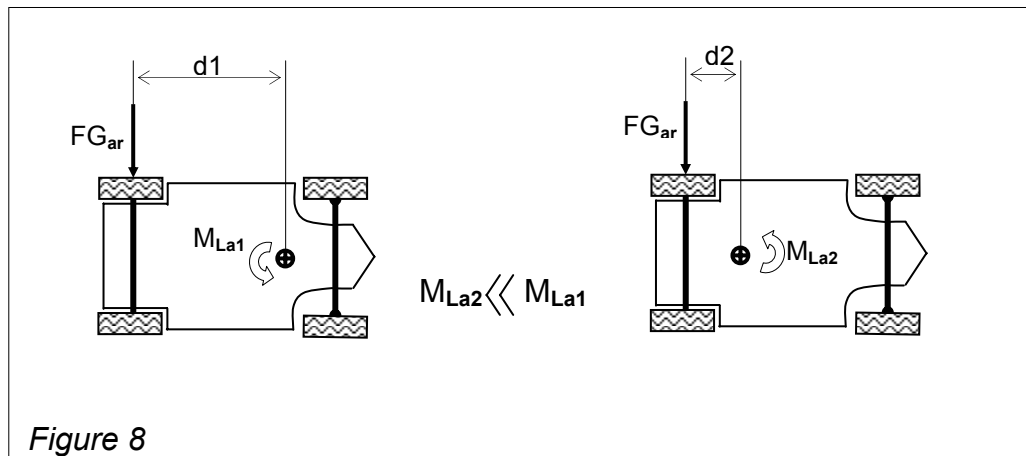


Figure 8

La figure 8 montre que les tendances énoncées à l'entrée du virage sont ici inversées puisque le véhicule dont le CDG est à l'arrière est maintenant le plus lent à éliminer sa vitesse de lacet et à se stabiliser en ligne droite. C'est un gros défaut de cette configuration qui a du mal à sortir du virage et peut continuer son lacet après la fin du virage : le véhicule entame alors un "tête à queue" . Lorsque ce mouvement est entamé (se produit en virage serré et allure rapide) le conducteur est obligé de produire des efforts de guidage sur l'essieu AV orientés vers l'extérieur du virage pour augmenter M_{La} , seul ce "contre-braquage⁽²⁾" pourra éviter le tête à queue annoncé.

Par contre un CDG sur l'avant est très sécurisant puisque le véhicule retrouve rapidement et naturellement (sans action particulière du conducteur) une stabilité en ligne droite.

Conclusions

Le seul examen de l'évolution du lacet du véhicule suffit à rendre compte de la qualité de sa fonction guidage. Le train AR concourt grandement, par sa réalisation technique et son équipement pneumatiques, à la qualité du résultat final.

Un CDG vers l'arrière rend le véhicule très vif en entrée de virage mais délicat à conduire en sortie de virage.

Un CDG vers l'avant du véhicule rend le véhicule difficile à inscrire dans le virage mais facilite le retour à la ligne droite.

Un véhicule de tourisme choisira forcément une configuration favorisant la sécurité de comportement c'est à dire un GMP sur l'avant. Un véhicule devant favoriser la maniabilité dans toutes les situations choisira le meilleur compromis qui sera naturellement un CDG au milieu du véhicule.

Quelques marques, pour des questions d'image, restent fidèles au moteur et roues motrices à l'arrière mais dans ce cas le système ESP assurera la sécurité active dans des situations que les conducteurs ne savent pas forcément gérer.

⁽²⁾ je réserve le terme "contre-braquage" uniquement à cette situation où les efforts de guidage sont orientés vers l'extérieur du virage, à ne pas confondre avec une situation de braquage inverse (par rapport au véhicule) que l'on peut rencontrer sur un véhicule fortement sur-vireur sans que les efforts de guidage aient changés de sens.

Stratégies de contrôle dynamique du lacet (type ESP)

Avec ce scénario détaillé d'une prise de virage par un véhicule nous pouvons maintenant expliquer comment un contrôle de trajectoire peut travailler à partir des informations dont il dispose habituellement : angle de rotation du volant, vitesse du véhicule, accélération latérale et vitesse de rotation de lacet.

Le problème est de décider si φ' à un instant donné est trop fort ou trop faible donc le système de contrôle doit générer une valeur de consigne qui servira d'objectif pour la régulation de la valeur instantanée.

Lorsque le conducteur agit sur le volant l'angle de rotation permet d'estimer le rayon du virage, celui-ci est fonction :

- Des dimensions du véhicule et de la cinématique de la direction
- Des dérives respectives de pneumatiques, qui sont fonction des sollicitations latérales donc liées à la vitesse à laquelle ce braquage est appliqué.

Ce rayon du virage estimé sera utilisable tant que le conducteur ne sollicite pas les pneumatiques près de leur limite d'adhérence (la dérive reste dans son domaine élastique).

La vitesse de lacet de consigne vaut alors : $\varphi' = V_v/R_{\text{estimé}}$ toute évolution de l'angle au volant changera $R_{\text{estimé}}$ et fera évoluer cette consigne.

Si la limite d'adhérence des pneumatiques n'est pas atteinte une corrélation avec l'accélération latérale doit rester vraie $(V_v)^2/R_{\text{estimé}} = \gamma_{\text{lat}}$

Dès que $(V_v)^2/R_{\text{estimé}} > \gamma_{\text{lat}}$ cela veut dire que le véhicule refuse de s'inscrire dans le virage demandé par le conducteur et alors la valeur de consigne doit être définie autrement. L'égalité $\varphi' = V_v/R$ reste vrai mais avec R inconnu.

R peut alors être calculé par $R = (V_v)^2 / \gamma_{\text{lat}}$ ce qui amène à une consigne

$\varphi' = \gamma_{\text{lat}} / V_v$ qui est indépendante de la position du volant et représente la limite de vitesse de lacet imposée par l'adhérence.

Les algorithmes de calcul vont donc travailler avec ces notions de base avec des stratégies particulières durant les transitoires où les valeurs de consignes ne peuvent pas être définies aussi simplement.

Régulation de la vitesse de lacet

Ce sont les opérateurs de frein qui agissent pour générer des variations du moment de lacet par exemple dans le cas que nous avons illustré tout au long de ce document (virage à 90° à droite), une action sur les freins des roues droite augmentera la vitesse de lacet et une action sur les roues gauche la diminuera.

Il nous faut aussi tenir compte qu'une sollicitation en freinage d'une roue augmente sa dérive lorsqu'elle produit des efforts de guidage ce qui fait que pour augmenter la vitesse de lacet il est préférable d'accentuer la dérive AR et diminuer la dérive AV.

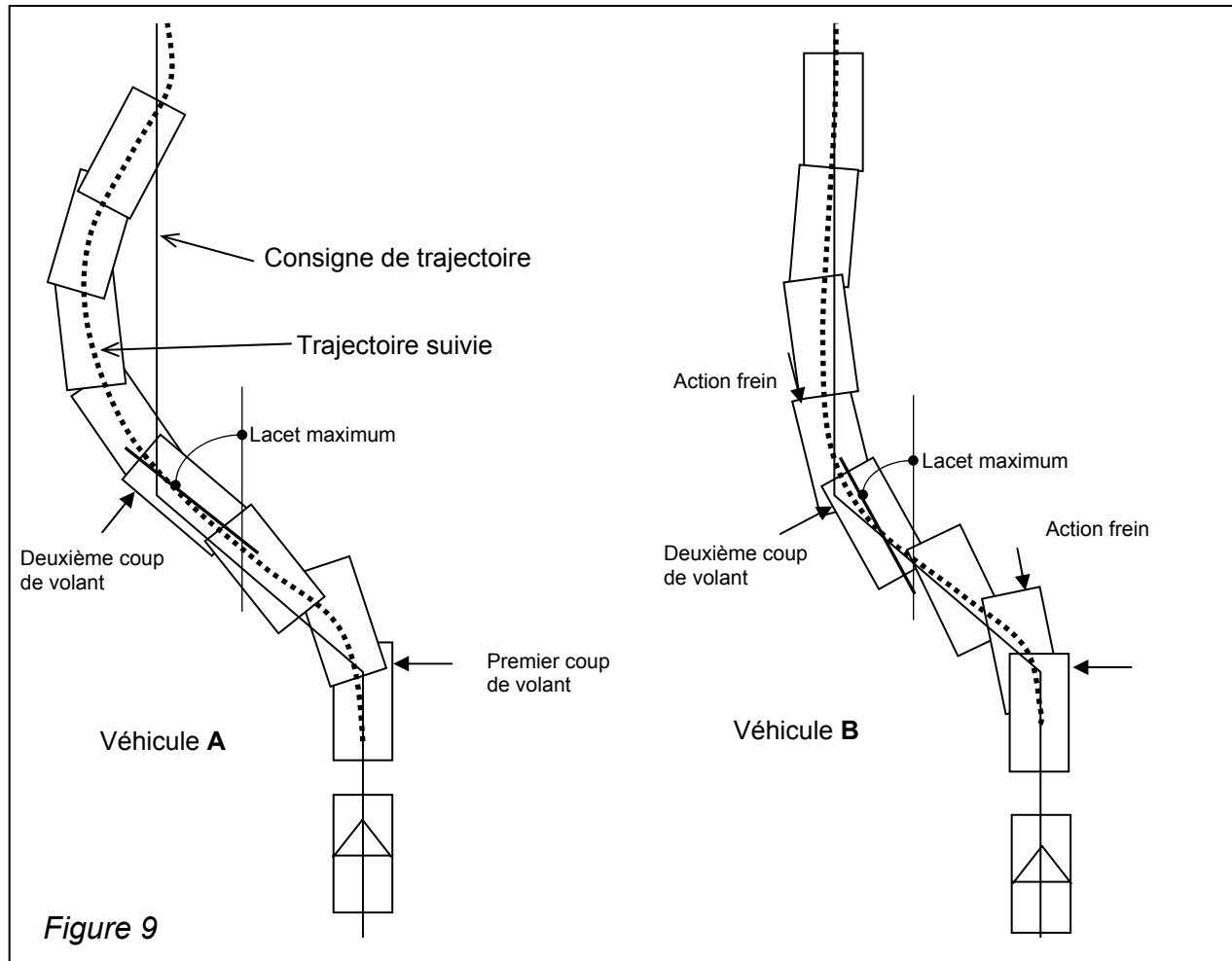
Donc pour augmenter φ' : freinage d'abord sur l'arrière D puis ajouter AVD si nécessaire.

Pour diminuer φ' : freinage d'abord sur l'avant G puis ajouter AVG si nécessaire.

Ces actions sur les freins font que durant tout le processus de régulation la vitesse du véhicule décroît ce qui est un facteur de sécurité si le conducteur avait exagéré sa vitesse de passage en courbe.

Cas particulier : la manœuvre d'évitement.

Il est un cas où la prise de lacet au moment de l'action volant est nuisible à la stabilité, c'est lors d'une manœuvre d'évitement ou de changement brutal de couloir de circulation.



Les schémas de la figure 9 montre la réaction d'un véhicule A à deux coups de volant successifs et assez brutaux puisque ce genre de manœuvre peut être effectuée de manière "réflexe" devant un obstacle imprévu.

Le premier coup de volant crée une vitesse de lacet significative et le véhicule se présente au deuxième coup de volant avec un lacet important et une vitesse de lacet non nulle. Le deuxième coup est long à annuler puis inverser la vitesse de lacet et l'écart est important par rapport à la trajectoire visée. De plus la nouvelle trajectoire ligne droite sera instable pendant une certaine distance, ceci d'autant plus que les réactions de contrôle du conducteur peuvent être totalement inadaptées (réactions réflexes dans une situation difficile).

Le véhicule B illustre le comportement que devrait avoir un système de contrôle de trajectoire sachant interpréter le fait que le véhicule ne s'inscrit pas dans un virage mais entame une manœuvre d'évitement.

Après le premier coup de volant, dès que le lacet naissant a fait apparaître des efforts de guidage à l'AR (ceux-ci sont nécessaires pour accélérer le véhicule vers la gauche) la vitesse de lacet est réduite de manière anticipée par une action sur les

freins. Ceci permet de se présenter au deuxième coup de volant avec un lacet réduit et une vitesse de lacet quasi nulle. La même stratégie étant appliquée au deuxième coup de volant le véhicule retrouve très rapidement une trajectoire rectiligne, ceci étant facilité par le fait que ces freinages ont ralenti le véhicule entre le début et la fin de la manœuvre.

La stratégie de contrôle s'appuiera sur l'analyse de l'action au volant pour détecter cette situation d'évitement : c'est principalement la vitesse de rotation du volant, en corrélation avec la vitesse du véhicule, qui sera le support de cette détection.

Ce chapitre laisse deviner la complexité des algorithmes de décision mis en œuvre et la difficulté de réaliser des calibrations efficaces pour un type de véhicule quels que soient le conducteur et les conditions de roulage.
