

DETECTION DE PERTE DE PRESSION DANS LES PNEUMATIQUES D'UN VEHICULE PAR COMPARAISON DES RAYONS DYNAMIQUES DES ROUES

EL TANNOURY, Charbel
IRCCyN - Technocentre Renault
Mél : Charbel.El-Tannoury@irccyn.ec-nantes.fr

Résumé : Ce papier s'intéresse au problème de détection de la pression des pneumatiques d'un véhicule par une approche dite indirecte, c'est-à-dire sans l'utilisation de capteurs de pression. Cette approche consiste à déduire une baisse de la pression dès lors qu'une variation d'un paramètre dépendant de celle-ci est observée. Un paramètre lié directement à la pression est le rayon dynamique de la roue. Cependant, comme ce rayon est lié non seulement à la pression du pneumatique mais aussi à la charge du véhicule et aux conditions de conduite, la détection doit se faire par comparaison des rayons dynamiques des quatre roues. Des exemples de simulation seront présentés pour illustrer cette approche et discuter ses limitations.

Mots clés : *Pneumatique, pression, rayon dynamique, détection.*

Collaborations : Renault.

1 Introduction

Le pneumatique est un élément essentiel pour le confort, la tenue de route et la dynamique du véhicule [1]. Or, les propriétés physiques du pneumatique sont largement liées à sa pression. Un sous-gonflage provoque une usure rapide, augmente la consommation de carburant et les émissions de CO₂ mais surtout accentue les risques d'éclatement. Des statistiques récentes [2] montrent que plus de 40% des véhicules roulent avec des pneumatiques sous-gonflés de 0.6 bars en moyenne et que de nombreux accidents sont dus à une défaillance causée par la perte de pression. Ces constats ont montré la nécessité de développer des systèmes de surveillance de la pression des pneumatiques (SSPP) permettant de détecter un dégonflage ou une baisse anormale de la pression. Des textes de réglementation européenne [2] imposent la présence d'un SSPP dans tous les nouveaux véhicules dès 2012. Ce dispositif doit être capable de détecter dans un temps maximum une perte de pression d'au moins 20% de la pression à chaud.

Les premiers SSPP se fondent sur l'installation de capteurs de pression sur chaque roue (méthode dite *directe*) [3]. Cependant, ces capteurs entraînent non seulement des coûts de fabrication et de maintenance supplémentaires mais aussi nécessitent des pneumatiques adaptés à leur installation ainsi qu'une instrumentation spécifique pour la transmission des mesures et le diagnostic. Une alternative (dite approche *indirecte*) [4] est de développer un système capable de fournir une estimation ou de détecter une baisse de la pression à partir du traitement des signaux des capteurs déjà présents dans le véhicule (vitesses angulaires de la roue issues du codeur ABS, accélérations, couple moteur, angle volant).

La baisse de la pression du pneumatique a une incidence directe sur le comportement mécanique (cinématique) de la roue, en termes d'amortissement, de raideur et de rigidité. Cette variation se traduit essentiellement par une diminution du rayon dynamique de la roue, une augmentation de la résistance au roulement et un déplacement des modes de vibration du véhicule vers les basses fréquences [4][5][6]. Tous ces constats ont été exploités pour apporter des solutions de SSPP. La première génération de SSPP se fonde sur l'analyse du rayon dynamique des roues à partir des signaux de vitesses angulaires, ces signaux étant issus du codeur ABS. En effet, une baisse de rayon dynamique est compensée par une augmentation de la vitesse angulaire de la roue. Ce constat permet donc de détecter une perte de pression sur une roue si sa vitesse de rotation est plus élevée que celle des autres roues [4]. Cependant, cette approche est difficile à mettre en oeuvre notamment pour détecter la baisse de pression sur plusieurs roues. La seconde génération de solutions emploie une analyse fréquentielle des signaux de vitesses angulaires. Ces systèmes tirent profit du fait que la baisse de la pression a comme conséquence une diminution de la fréquence de vibration du véhicule et de la roue. Enfin, une solution plus récente consiste en une fusion de ces deux approches [7].

Nous présentons, dans le reste de ce papier, la méthode fondée sur l'analyse des rayons dynamiques des roues. Cette approche sera discutée par un exemple de simulation.

2 Influence de la pression sur le rayon dynamique des roues

La figure 1 résume les grandeurs physiques qui interviennent dans le modèle longitudinal d'une roue de rayon nominal R_{nom} soumise à un couple moteur Γ . La vitesse angulaire de la roue est notée Ω et son centre se déplace à une vitesse longitudinale v_x .

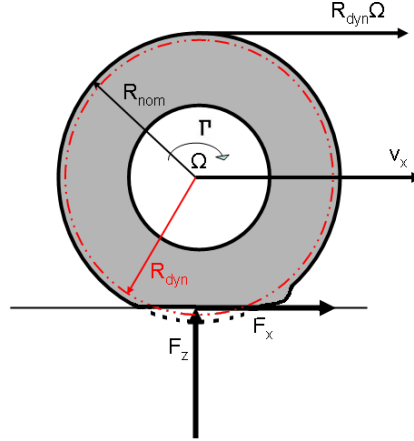


FIGURE 1 – Représentation géométrique du roulement d'un pneu sur une surface horizontale.

On définit le rayon dynamique (appelé aussi rayon *effectif* ou de *roulement*) R_{dyn} comme étant le rayon moyen calculé à partir du rapport entre la vitesse longitudinale et la vitesse angulaire Ω de la roue. Ce paramètre dépend essentiellement de la pression du pneumatique et de la force verticale F_z (due à la masse du véhicule et à sa charge). La présence de la force verticale F_z entraîne un glissement longitudinal au niveau du contact entre la roue et le sol. Ce glissement correspond à la différence relative entre la vitesse circonférentielle v_c de la roue, en absence de force verticale, $v_c = R_{\text{dyn}}\Omega$ et la vitesse de déplacement longitudinal v_x .

Le problème à traiter consiste à estimer une variation du rayon dynamique R_{dyn} de chaque roue à partir des mesures de signaux de vitesses angulaires des roues.

Afin de détecter une baisse de la pression à partir de l'analyse des rayons dynamiques, il convient d'analyser l'influence de la pression sur le rayon dynamique. La Figure 2 résume les résultats de mesures de ce rayon (pneumatique de marque *Dunlop*, de largeur 195 mm, de hauteur du côté 126,75 mm et de rayon 15 *pouces*) pour différentes valeurs de pression et de vitesses v_x . Il apparaît clairement que cette relation n'est pas linéaire. Il serait donc difficile de se prononcer sur une chute de pression à partir de la mesure du rayon dynamique d'une seule roue. Cependant, il reste possible de réaliser cette détection en comparant les rayons dynamiques des différentes roues.

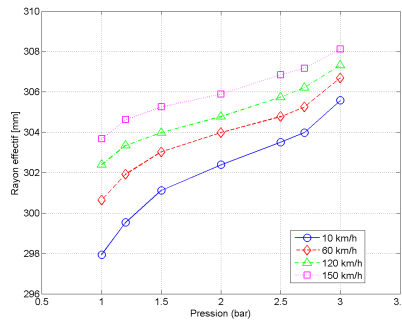


FIGURE 2 – Variation du rayon dynamique en fonction de la pression du pneumatique

3 Détection par comparaison des rayons dynamiques de roues

On suppose que le glissement est le même sur toutes les roues et qu'on est en ligne droite.

3.1 Principe de la méthode

La détection se fait en évaluant trois variables [7]

$$diag(\%) = \left(\frac{\Omega_1 + \Omega_4}{\Omega_2 + \Omega_3} - 1 \right) \times 100 \quad (1)$$

$$axle(\%) = \left(\frac{\Omega_1 + \Omega_2}{\Omega_3 + \Omega_4} - 1 \right) \times 100 \quad (2)$$

$$side(\%) = \left(\frac{\Omega_1 + \Omega_3}{\Omega_2 + \Omega_4} - 1 \right) \times 100 \quad (3)$$

où Ω_i ($i \in [1, 4]$) correspondent, respectivement, aux vitesses angulaires des roues avant gauche (AvG), avant droite (AvD), arrière gauche (ArG) et arrière droite (ArD) du véhicule. Comme résumé dans le tableau 1, il est possible de prévoir le signe des trois indicateurs dans le cas d'une chute de pression sur une seule roue.

	AvG	AvD	ArG	ArD
<i>diag</i>	>0	<0	<0	>0
<i>axle</i>	>0	>0	<0	<0
<i>side</i>	>0	<0	>0	<0

TABLE 1 – Influence du sous-gonflage d'une roue sur les différents indicateurs

3.2 Règle de décision

Le résultat du tableau 1 est utilisé pour mettre en place une règle de décision

1. Si la variable *diag* est positive et dépasse un certain seuil (le seuil est introduit pour prendre en compte la présence du bruit de mesure des vitesses), et si les variables *axle* et *side* sont positives, alors la vitesse Ω_1 est la vitesse la plus élevée et donc la roue AvG est en perte de pression ;
2. Si la variable *diag* est positive et dépasse le seuil, mais les variables *axle* et *side* sont négatives, alors la vitesse Ω_4 est la plus élevée et, dans ce cas, l'alarme correspondant à la roue ArD est activée ;
3. Si la variable *diag* est négative et dépasse le seuil en valeur absolue, et si la variable *axle* est positive alors que la variable *side* est négative, on peut conclure que la vitesse Ω_2 est la vitesse la plus élevée et l'alarme correspondant à la roue AvD est activée ;
4. De même, si la variable *diag* est négative et dépasse le seuil en valeur absolue, mais la variable *axle* est négative cette fois-ci alors que la variable *side* est positive, on conclut que la vitesse Ω_3 est la vitesse la plus élevée et l'alarme correspondant à la roue ArG est activée.

Cependant, dans le cas de chutes de pression multiples, la possibilité de détection avec cette même stratégie dépend du nombre de pneumatiques sous-gonflés ainsi que des taux de pertes de pression :

- Une même chute de pression sur deux roues n'est détectée que si les deux roues sont diagonalement opposées. Si les roues dégonflées sont du même côté ou sur le même axe, alors la variable *diag* ne varie pas.
- Pour deux roues avec des pertes de pression différentes, une analyse complète des résultats est bien plus complexe : six combinaisons de deux roues parmi quatre existent et, avec les variantes introduisant différents niveaux de pression, le nombre de scénarios possibles devient très grand. Néanmoins, il est important de noter qu'avec cet algorithme, il est possible mais non certain de détecter deux chutes inégales.
- Pour trois ou quatre roues, la réaction dépend encore de la grandeur des différences de pression. A noter que le cas où les quatre roues ont des pertes égales de pression est indétectable.

Pour toutes ces raisons, une règle plus élaborée doit être mise en place pour la détection des chutes de pressions sur plusieurs roues.

3.3 Exemple et discussion

Nous considérons toutes les configurations possibles avec une chute de pression sur une, deux, trois ou quatre roues. Nous nous limiterons au cas où les pertes de pression simultanées sont égales. Des dépressions de 3 bars à 2.5 bars sont considérées en utilisant les données de la Figure 2. La vitesse du véhicule est fixée à 60 km/h. La Figure 3 permet de visualiser l'incidence des différentes situations sur les variables *diag*, *axle* et *side*. Prenons par exemple le cas où la variable *diag* est strictement positive, *axle* et *side* nulles (instant 9 sur la Figure 3) : on peut conclure qu'une chute de tension a lieu au niveau de la roue située à l'avant du côté gauche et celle à l'arrière du côté droit.

Une stratégie de décision pourra être élaborée à partir de l'étude de ces 16 configurations. Cependant, nous avons supposé une vitesse du véhicule constante et n'avons pas tenu compte de la possibilité d'avoir des glissements différents sur les roues ainsi que des chutes de pressions différentes.

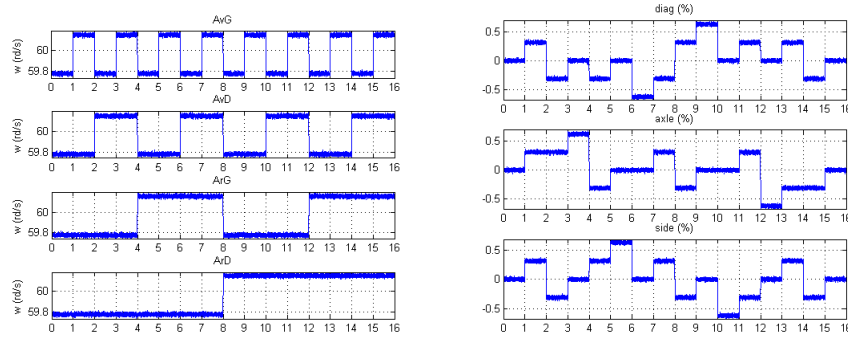


FIGURE 3 – Evolution des indicateurs en fonction des différents scénarios de chute de pression

4 Conclusion

Nous avons présenté dans cet article le principe de fonctionnement des systèmes de surveillance de la pression pneumatique (SSPP) se basant sur l'analyse des rayons dynamiques de roues. L'analyse a montré une dépendance non-linéaire entre la pression et le rayon dynamique des roues. La comparaison des rayons des roues pourrait être une solution adéquate mais celle-ci nécessite une règle de décision plus élaborée et tenant compte des conditions de conduite.

Références

- [1] H. Shraim, A. Rabhi, M. Ouladsine, N. M'Sirdi, and L. Fridman. Estimation and analysis of the tire pressure effects on the comportment of the vehicle center of gravity. In *Proceedings of the 2006 International Workshop on Variable Structure Systems*, 2006.
- [2] BOSCH CONTINENTAL TEEVES, NIRA DYNAMICS and RENAULT. TPMS, patents and specification documents. Technical report, 2006.
- [3] R. Matsuzaki and A. Todoroki. Wireless monitoring of automobile tires for intelligent tires. *Sensors*, 8 :8123–8138, 2008.
- [4] H. Mayer. Comparative diagnosis of tyre pressure. In *Proceedings of 3rd IEEE conference on Control Applications*, pages 627–632, Glasgow, UK, Aug. 1994.
- [5] C.R. Carlson and J.C. Gerdes. Consistent nonlinear estimation of longitudinal tire stiffness and effective radius. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 13(6) :1010–1020, 2005.
- [6] T. Umeno, K. Asano, H. Ohaski, M. Yonetani, T. Naitou, and T. Taguchi. Observer based estimation of parameter variations and its application to tyre pressure diagnosis. *Control Engineering Practice*, 9 :639–645, 2001.
- [7] N. Persson, F. Gustafsson, and M. Drevo. Indirect tire pressure monitoring using sensor fusion. In *Proceedings of 2002 SAE World Congress & Exhibition*, Detroit, MI, USA, 2002.