



**HAL**  
open science

## Mesure acoustique de la cinématique des véhicules routiers

Pilar Lesage, Francis Golay, Guillaume Dutilleux, Emmanuel Gourdon

► **To cite this version:**

Pilar Lesage, Francis Golay, Guillaume Dutilleux, Emmanuel Gourdon. Mesure acoustique de la cinématique des véhicules routiers. 10ème Congrès Français d'Acoustique, Apr 2010, Lyon, France. hal-00551141

**HAL Id: hal-00551141**

**<https://hal.science/hal-00551141>**

Submitted on 2 Jan 2011

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# 10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

## Mesure acoustique de la cinématique des véhicules routiers

Pilar Lesage<sup>1,4</sup>, Frédéric Bernardin<sup>1,4</sup>, Francis Golay<sup>2,4</sup>, Guillaume Dutilleux<sup>2,4</sup>, Emmanuel Gourdon<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Clermont-Ferrand, 8-10 rue Palissy, F-63017 Clermont-Ferrand Cedex 2

<sup>2</sup>ERA32 « Acoustique » LCPC, Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg, 11 rue Jean Mentelin, F-67035 Strasbourg

<sup>3</sup>Laboratoire des Sciences de l'Habitat – Département Génie Civil et Bâtiment FRE CNRS 3237, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, rue Maurice Audin, F-69518 Vaulx-en-Velin Cedex, gourdon@entpe.fr

<sup>4</sup>{pilar.lesage, frederic.bernardin, francis.golay, guillaume.dutilleux}@developpement-durable.gouv.fr

La caractérisation de l'émission sonore des véhicules nécessite de mesurer parallèlement la cinématique, principalement la vitesse, mais aussi l'accélération. Lorsqu'on s'intéresse à des véhicules "du flot", le choix du dispositif est conditionné par plusieurs facteurs : sécurité, simplicité de déploiement sur le terrain, typologie des véhicules rencontrés, coût admissible et précision souhaitée. Si bien que les cinémomètres radar ou les barrières optiques ne conviennent ou ne suffisent pas toujours.

La méthode développée dans cette communication exploite le maximum de corrélation entre deux points de mesure peu éloignés sur une parallèle à l'axe de passage. Le maximum de vraisemblance est calculé sur un modèle qui dépend à la fois de l'instant de passage au droit d'une distribution de deux microphones parallèle à l'axe de passage du véhicule, de la vitesse, de l'accélération et de la distance entre microphones et axe de passage.

La robustesse de la méthode est validée par des simulations sur des signaux synthétiques et par une campagne expérimentale sur piste avec des véhicules maîtrisés : deux-roues, véhicule léger et poids-lourd. Sur la vitesse, les résultats par rapport au cinémomètre radar sont satisfaisants. Sur l'accélération, les incertitudes sont excessives.

## 1 Introduction

La mesure de l'émission sonore des véhicules du flot, qu'ils soient routiers ou ferroviaires, nécessite de connaître la cinématique de ces véhicules car le facteur vitesse est capital en termes d'émission sonore. L'allure du flot de véhicules, fluide ou saccadée, influe également.

Pour accéder à la vitesse pratiquée par les véhicules sur une infrastructure routière avec la précision la plus grande possible et classifier l'allure suivant trois catégories qualitatives (accélérée, stabilisée, décélérée), on a recours à des dispositifs placés en bord de voie. Le choix du dispositif de mesure est conditionné par plusieurs facteurs : la sécurité, la simplicité de mise en œuvre sur le terrain, le type de véhicules rencontrés (en particulier leur longueur) et enfin le facteur incertitude.

Le dispositif le plus fréquemment employé est le cinémomètre radar. Toutefois, il ne donne que la vitesse, pas l'accélération. Il ne fonctionne pas toujours à basse vitesse ou lorsque la vitesse n'est pas uniforme.

Une des idées est de concevoir un cinémomètre simple à déployer et peu onéreux, basé sur des signaux de pression acoustique enregistrés au passage en un petit nombre de points, fonctionnant pour tous les véhicules. L'objectif visé est la mise au point d'un cinémomètre acoustique permettant d'une part, de déterminer, à partir de l'analyse de signaux acoustiques enregistrés par des microphones, la vitesse d'un véhicule donné dans une gamme allant de 0 à 150 km/h, avec une incertitude attendue de 2 km/h à 95%, et d'autre part, de fournir une appréciation qualitative de l'allure (accélérée, stabilisée, décélérée).

L'exigence de simplicité de mise en œuvre conduit à écarter une solution du type antennerie ou le recours à des barrières optiques.

Le cinémomètre acoustique mis au point utilise deux microphones omnidirectionnels alignés en bord de voie. L'estimation des paramètres cinématiques se fait par un estimateur du maximum de vraisemblance, les phénomènes de perturbation étant modélisés par des processus stochastiques. Le traitement informatique automatisé sous-jacent a été défini.

Le plan de cette communication s'articule ainsi : la partie 2 présente succinctement l'état de l'art des méthodes de détermination de cinématique à partir de mesures acoustiques. Dans la partie 3, la méthode d'estimation utilisée est décrite. Les parties 4 et 5 dressent un bilan des résultats obtenus à partir de tests synthétiques et de la campagne expérimentale, afin de valider la méthode et de conclure sur sa robustesse.

## 2 Synthèse de l'état de l'art

La littérature relative à la détermination de la vitesse de véhicules du flot en exploitant des signaux de pression acoustique enregistrés en bord de voie met en exergue les hypothèses déterminantes des méthodes les plus souvent rencontrées :

- considérer le véhicule en mouvement, quel qu'il soit, comme une source ponctuelle, alors que les récepteurs sont proches de la trajectoire ;

- supposer les bruits gaussiens stationnaires.

Ces hypothèses ne sont pas toujours vérifiées, ce qui peut entacher les performances du procédé lorsque l'on passe de la théorie à la pratique.

Les publications pointent également un aspect à ne pas négliger : la distance et le parallélisme de la rangée de récepteurs par rapport à la trajectoire sont des données à

maîtriser avec précision. Or, cette condition devient difficilement atteignable lorsque les véhicules ne sont pas guidés sur rail.

Les méthodes ayant recours à un seul microphone omnidirectionnel semblent difficilement généralisables à l'ensemble des véhicules. La plupart des méthodes ayant recours un microphone reposent sur une modélisation du signal reçu [1] ou bien une modélisation de la source [2]. En outre, elles ne permettent pas de déterminer l'accélération.

Dans [3] il est proposé un cinémomètre pour tramway ferroviaire à 1 microphone, fonctionnant par approche inverse bayésienne en supposant une allure stabilisée et la géométrie du tramway connue. Cette méthode exploite le fait qu'à faible vitesse la signature acoustique en Leq court d'un tramway fait apparaître des pics associés aux différents bogies. Cependant, cette méthode peut difficilement s'appliquer dans le cas d'un véhicule léger ou d'un deux-roues : d'une part, l'espacement entre les essieux n'est pas connu ; d'autre part, la distance du microphone par rapport au véhicule au point d'approche maximale CPA (en anglais *Closest Point of Approach*) se doit d'être petite par rapport à la distance entre essieux, ce qui supposerait de placer le microphone très près des pneus.

Les procédés faisant appel à trois microphones ou plus [4,5,6,7] présentent l'intérêt de pouvoir déduire l'accélération puisqu'ils se fondent sur une estimation de l'accélération à partir de la vitesse en deux points distincts. Ils exploitent, selon les cas, la formule «  $v=d/t$  » ou bien l'intercorrélacion des signaux acoustiques. Ils s'avèrent cependant moins attractifs dans la mise en œuvre terrain et concourent également à compliquer l'exploitation en augmentant sensiblement le nombre de signaux à traiter, les instants de passage à identifier. [8] propose à cet effet un algorithme fondé sur le critère du barycentre énergétique pour aider à la détermination des instants de passage.

Quant à une solution mettant en œuvre un maillage microphonique [9] permettant plus aisément de déterminer le point d'approche maximale, puisqu'elle nous engage sur la piste de récepteurs directifs, elle demeure plus délicate à déployer et le traitement s'avère plus lourd à automatiser.

La réflexion s'est concentrée sur la mise en œuvre de deux microphones et l'optimisation de la méthode préconisée par López-Valcarce et al. [10,11,12] qui détermine la vitesse d'un véhicule à la trajectoire connue à partir de signaux acoustiques reçus par une paire de microphones omnidirectionnels séparés d'une distance  $2b$ , parallèlement à l'axe de la trajectoire, et situés à une distance  $D$  de cet axe. La méthode repose sur le décalage temporel entre les deux signaux reçus, pour différentes valeurs de vitesse (proportionnel à la différence de trajet du signal émis pour parvenir aux microphones), ainsi que sur l'estimation de la vitesse par le maximum de vraisemblance. L'influence, sur la robustesse de l'estimation, des valeurs des paramètres du dispositif d'enregistrement ( $D$  et  $b$ ) est mise en avant ainsi que l'importance de la localisation de l'instant de passage  $t_{CPA}$  correspondant au CPA. En effet, l'estimation de la vitesse est sensible à une détermination imparfaite du  $t_{CPA}$  : Des valeurs de ce dernier différant d'un dixième de seconde conduisent à des vitesses estimées pouvant varier jusqu'à 10 km/h. Par ailleurs, cette méthode ne fournit pas d'appréciation sur l'allure. L'adaptation de cette méthode en vue d'élargir son champ d'application constitue l'objet de la présente recherche.

### 3 Principe d'estimation

#### 3.1 Géométrie du problème

Nous rappelons ci-dessous les hypothèses sous-jacentes à la méthode décrite en [10] : la source en mouvement est supposée ponctuelle et se déplace suivant une trajectoire rectiligne ; les bruits sont supposés stochastiques, stationnaires, indépendants et de moyenne nulle.

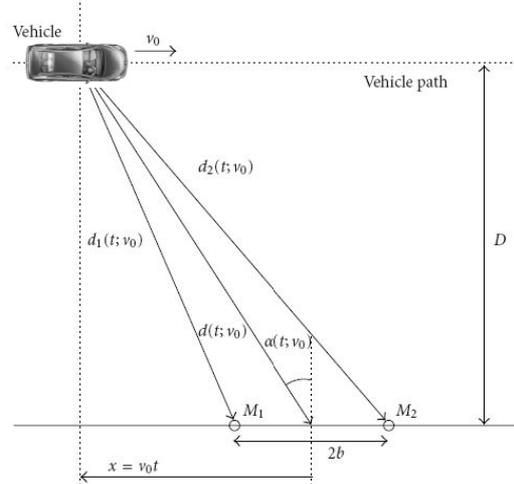


Figure 1 : Géométrie du problème (source : [10])

Comme illustré en figure 1, les microphones sont espacés d'une distance  $2b$ . On note  $D$  la distance entre ces microphones et la trajectoire du véhicule.

On rappelle l'instant de passage, désigné par  $t_{CPA}$ , correspond à l'instant où le véhicule est au point d'approche maximale CPA, à égale distance des deux microphones.

#### 3.2 Estimation de l'instant de passage $t_{CPA}$

Les méthodes répertoriées dans la littérature s'attachent à rechercher le moment où le signal présente un pic énergétique. Or nous n'avons pas la certitude que le  $t_{CPA}$  correspond exactement au temps d'observation du maximum d'énergie locale.

Pour les auteurs de [10], le  $t_{CPA}$ , une fois déterminé, est une constante dans la formule de l'estimateur. Cela revient à supposer que la loi de probabilité de  $(r_1, r_2)$  ne dépend que du seul paramètre  $v$ . En outre, les auteurs n'ont pas cherché à déterminer l'allure.

Dans la présente recherche, une adaptation substantielle a été apportée au procédé d'origine : l'estimateur ne doit pas déterminer uniquement la vitesse mais doit pouvoir porter simultanément sur les paramètres  $t_{CPA}$ , vitesse et accélération. Etant donné qu'il est primordial de connaître précisément la distance  $D$  qui sépare l'axe de la voie de circulation du véhicule de l'axe sur lequel sont alignés les deux microphones, et que cette donnée n'est pas toujours bien connue pour des véhicules non guidés, en particulier pour les deux-roues dont le positionnement sur la voie n'est pas toujours central, il est intéressant de déduire en concomitance cette distance  $D$ . Le procédé pourra ainsi être mis en œuvre sans besoin de connaître parfaitement  $D$  a priori. Nous formulons l'hypothèse que l'estimateur dépend des quatre paramètres :  $t_{CPA}$ ,  $v$ ,  $a$  et  $D$ , où  $v$  est la vitesse et  $a$  l'accélération.

### 3.3 Estimation simultanée de $t_{CPA}$ , de la vitesse, de l'accélération et de la distance microphones/trajectoire du véhicule

L'origine des temps est celle des signaux enregistrés.

On note  $p$  le quadruplet  $(t_{CPA}, a_0, v_0, D)$ .

Le trajet source-microphone 1 vaut :

$$d_1(t; p) = \sqrt{D^2 + (\frac{1}{2}a_0(t - t_{CPA})^2 + v_0(t - t_{CPA}) + b)^2} \quad (1)$$

Le trajet source-microphone 2 vaut :

$$d_2(t; p) = \sqrt{D^2 + (\frac{1}{2}a_0(t - t_{CPA})^2 + v_0(t - t_{CPA}) - b)^2} \quad (2)$$

Le décalage temporel s'exprime comme la différence des retards de propagation :

$$\Delta\tau(t; p) = \tau_2(t; p) - \tau_1(t; p) = \frac{d_2(t; p)}{c} - \frac{d_1(t; p)}{c} \quad (3)$$

où  $c$  est la vitesse de propagation du son et  $v_0$  est la vitesse réelle du véhicule.

Le signal reçu par le microphone  $M_i$  ( $i \in \{1, 2\}$ ) s'exprime ainsi :

$$r_i(t) = r_i^d(t) + w_i(t) = \frac{s(t - \tau_i(t; p))}{d_i(t; p)} + w_i(t) \quad (4)$$

avec  $w_i(t)$ ,  $1 \leq i \leq 2$ , traduisant les bruits parasites

et  $r_i^d(t) = \frac{s(t - \tau_i(t; p))}{d_i(t; p)}$ ,  $1 \leq i \leq 2$ ,

étant le signal reçu par le microphone  $i$  provenant directement de la source, émis au temps  $t - \tau_i$ .

Au terme d'approximations (détaillées dans [10] pour la seule variable  $v$ ), l'estimateur de  $p$  par maximum de vraisemblance peut être déterminé par la minimisation de la distance euclidienne  $\|r_2 - r_1(p)\|^2$ , où  $r_1(p)$  est un vecteur d'échantillons du signal  $r_1(t - \Delta\tau(t; p))$ .

Sous forme discrétisée, le vecteur de paramètres  $\hat{p}$  est estimé à l'aide de la formule suivante :

$$\hat{p} = \arg \max_p \psi(p) \quad (5)$$

$$\text{où } \psi(p) \approx T_S \sum_{k=-K}^K (r_1[k - k_0(k; p)]r_2[k] - \frac{1}{2}r_1^2[k - k_0(k; p)])$$

avec  $r_i[k] = r_i(kT_S)$ ,

$K = [T/2 T_S]$ ,  $T$  étant la durée de la fenêtre d'étude (dans la plupart des cas 2s)

$$k_0(k; p) = \left\lfloor \frac{\delta\tau(kT_S; p)}{T_S} \right\rfloor \quad (6)$$

$k_0(k; p)$  correspond à la discrétisation de

$$\delta\tau(t; p) = \frac{\Delta\tau(t; p)}{1 - \frac{\partial\tau_1(t; p)}{\partial t}} \quad (7)$$

et renvoie un rang d'échantillon.

Pour chaque  $\frac{\delta\tau(kT_S; p)}{T_S}$ , on récupère et on stocke une valeur d'indice  $k_0$ .

Le calcul des paramètres cinématiques passe par les étapes suivantes :

- Echantillonnage et filtrage passe-haut des signaux de pression acoustique (dans le but d'évincer les composantes

de fréquence qui sont peu sensibles à la direction de l'onde sonore engendrée par le véhicule et qui produisent un bruit de fond détériorant la précision de l'estimation)

- Détermination d'un encadrement du  $t_{CPA}$  à partir du calcul de l'énergie locale. Pour le calcul de l'énergie locale on considère une fenêtre de taille  $\Delta t$  et on fait une somme discrète des  $r[k]$  pour les indices correspondants à cette fenêtre temporelle.

- Pour toutes les valeurs de  $p$ , calcul de

$$\psi(p) = T_S \sum_{k=-K}^K r_1[k - k_0(k; p)]r_2[k] - \frac{1}{2}r_1^2[k - k_0(k; p)] \quad (8)$$

- Détermination du maximum de  $\psi(p)$ . Les valeurs de  $t_{CPA}$ , de  $v$ , de  $a$  et de  $D$  maximisant  $\psi(p)$  sont les estimations de  $t_{CPA\text{réel}}$ ,  $v_0$ ,  $a_0$  et  $D_{\text{réel}}$ .

## 4 Tests sur signaux synthétiques

On considère une source de type bruit blanc gaussien que l'on note  $s(t)$ , en mouvement rectiligne uniformément accéléré, son déplacement étant donné par :

$$x(t) = \frac{1}{2}a_0(t - t_{CPA})^2 + v_0(t - t_{CPA}) \quad (9)$$

où l'on a noté respectivement  $v_0$ ,  $a_0$  l'accélération et la vitesse à  $t=t_{CPA}$ .

Afin de synthétiser les signaux reçus  $r_1$  et  $r_2$ , on utilise le modèle de propagation (4).

### 4.1 Détermination du $t_{CPA}$

Les simulations réalisées montrent que le procédé donne des résultats très satisfaisants. En premier lieu, une plage temporelle est définie. Ensuite, toutes les valeurs de cette plage sont testées dans la formule de l'estimateur. Le fait de considérer  $t_{CPA}$  comme une variable de l'estimateur  $\psi$  apporte un gain considérable à la méthode.

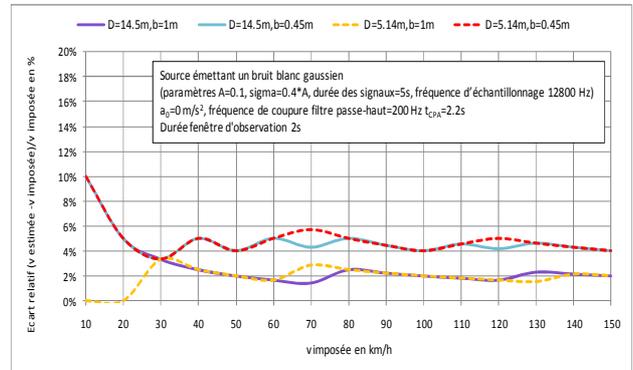


Figure 2: Estimation de la vitesse dans différentes configurations de  $D$  et  $b$ , pour des signaux synthétiques de type bruit blanc gaussien.

### 4.2 Estimation de la vitesse

Pour la configuration  $D=14.5$  m et  $b=0.45$  m, l'objectif d'une précision de 2 km/h à un niveau de confiance de 95% est atteint : la précision est de 0.6 km/h, avec une surestimation moyenne de la vitesse réelle de l'ordre de 3.5 km/h. Trois autres configurations ont été testées (figure 2). Avec une distance microphones/trajectoire portée à 5.14m et un écartement des microphones de 2m, la précision est de 0.3 km/h au niveau de confiance 95%, avec une surestimation moyenne de la vitesse réelle d'environ 1.6 km/h. L'objectif assigné à la méthode en matière d'estimation de la vitesse est atteint dans tous les cas. Dans le cadre des tests sur sources synthétiques, pour une valeur de  $b$  fixée, l'estimation de la vitesse est plus satisfaisante

pour une distance  $D$  égale à 14.5 m. De plus, un écartement des microphones de 2 m délivre de meilleures estimations qu'un écartement de 0.9 m.

### 4.3 Estimation de l'accélération

Globalement, le signe de l'accélération est conforme à la réalité dans 2/3 des cas. En valeur absolue, les estimations sont relativement éloignées des valeurs réelles.

Au vu des tests sur signaux synthétiques la méthode n'est pas satisfaisante pour la détermination de l'accélération.

### 4.4 Estimation de la distance microphones/trajectoire du véhicule

L'incertitude de l'estimation de  $D$  est de 0.09 m au niveau de confiance 95%, avec une sous-estimation moyenne de l'ordre de 0.40 m.

### 4.5 Simulations sur un véhicule guidé de type tramway

Un tramway pouvant être assimilé à un ensemble de sources ponctuelles au niveau des bogies. Celui-ci est modélisé par 4 sources synthétiques émettant un bruit blanc gaussien et se déplaçant à la même vitesse. Ces sources sont équidistantes de 7.50m.

L'incertitude de l'estimation de la vitesse est de 0.25 km/h au niveau de confiance 95%, avec une surestimation moyenne de 1.6 km/h.

Pour des vitesses comprises entre 20 et 30 km/h, il semble préférable de placer les microphones à une distance de 1.5m ou 2m plutôt qu'à 1m de l'axe de déplacement des sources ponctuelles asservies.

Dans le cas de la figure 3, la méthode retient le  $t_{CPA}$  du dernier bogie détecté à 6.335 s et estime la vitesse à 31.33 km/h. Les 4  $t_{CPA}$  sont apparents sur la figure 3.

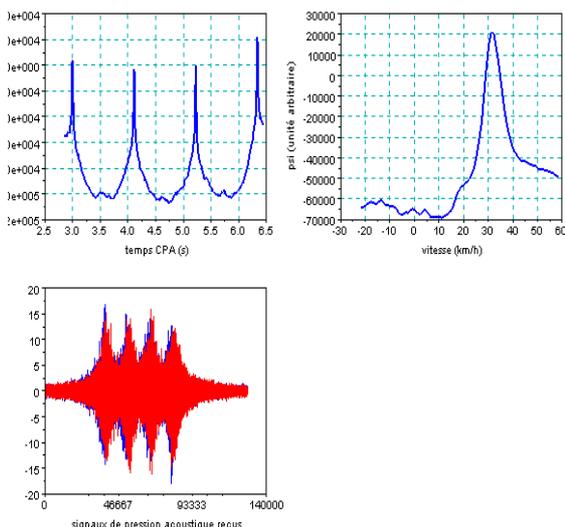


Figure 3: Résultat d'une simulation d'un véhicule guidé à 4 sources équidistantes de 7.5 m.  $D=1.5m$ ,  $v_{réelle}=30$  km/h, CPA du 1<sup>er</sup> bogie à 3 s, amplitudes identiques des sources émettant un bruit blanc gaussien ( $f_1=f_2=f_3=f_4=2000$  Hz)

### 4.6 Conclusions

A l'issue des tests sur signaux synthétiques de type bruit blanc gaussien, la méthode mise en œuvre s'avère robuste en ce qui concerne la détermination du  $t_{CPA}$  et de la vitesse.

## 5 Campagne expérimentale

Les mesures se sont déroulées en novembre 2009, sur le circuit automobile d'Issoire (Puy-de-Dôme). Trois véhicules ont participé aux mesures : une motocyclette Yamaha 650, un véhicule léger Renault Clio essence et un poids-lourd de 9.15t.

6 microphones ont été déployés, alignés par paire parallèlement à la voie et 2 à 2 placés à la même hauteur. Les microphones de chaque doublet sont espacés de 1m l'un de l'autre. Les microphones 1 et 2 sont à une distance au sol de 3.75m par rapport à l'axe de déplacement des véhicules et à une hauteur de 0.6m, comme le montre la figure 4.

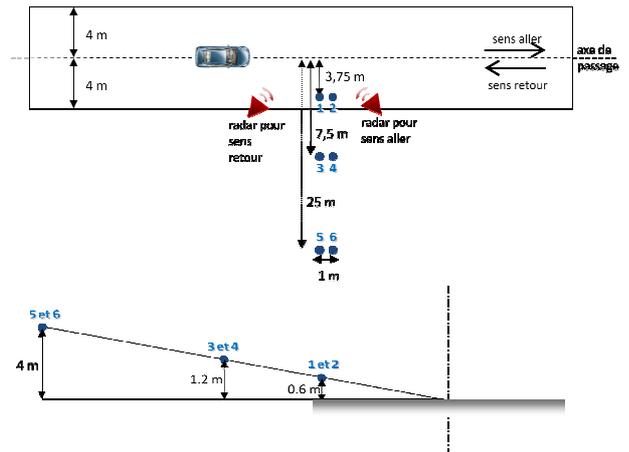


Figure 4 : Positionnement des microphones. (En haut) Vue en plan. (En bas) Vue de profil

Les microphones 3 et 4 (respectivement 5 et 6) sont à une distance au sol de l'axe de déplacement de 7.5 m (respectivement 25 m) et à une hauteur de 1.2 m (respectivement 4m). L'implantation est telle que le CPA est le même pour l'ensemble des doublets. Cette configuration a permis d'étudier l'influence de  $D$  sur la précision de l'estimation des paramètres cinématiques. L'acquisition des signaux est réalisée pour l'ensemble des voies avec une fréquence d'échantillonnage de 51200 Hz, ramenée à 12800 Hz lors de l'exploitation.

Chaque véhicule a effectué des passages à différentes vitesses, à une allure tantôt stabilisée, tantôt accélérée, tantôt décélérée, entre 30 et 110 km/h.

### 5.1 Estimation de la vitesse

La méthode fonctionne bien quel que soit le sens de circulation du véhicule, restituant le bon signe de la vitesse, positif si le sens de déplacement va du microphone  $i$  vers le microphone  $i+1$ , négatif dans le cas contraire.

Globalement, les résultats obtenus à partir de l'exploitation des enregistrements de la paire de microphones 5 et 6 (figure 5), à une distance au sol de l'axe de la trajectoire de 25 m, présentent une incertitude plus faible que ceux provenant des microphones 3 et 4, à une distance au sol de l'axe de la trajectoire de 7.50 m, eux-mêmes présentant une incertitude plus faible que ceux provenant des microphones 1 et 2, à une distance au sol de l'axe de la trajectoire de 3.75 m. L'incertitude décroît avec l'éloignement des microphones, mais même la configuration la moins performante permet d'atteindre

l'objectif de détermination de la vitesse à 2 km/h près, au niveau de confiance 95%.

Par type de véhicule, les meilleurs résultats sont obtenus avec le poids-lourd, les moins bons avec la voiture.

Pour le poids-lourd, les microphones 5 et 6 donnent les meilleurs résultats, en particulier en allure non stabilisée. Une légère surestimation est observée à partir de 60 km/h et au-delà.

Pour la voiture, les meilleurs résultats sont obtenus à partir des enregistrements des microphones 3 et 4 mais également 5 et 6. Pour les microphones 5 et 6, les résultats sont satisfaisants en allure stabilisée pour des vitesses autour de 60km/h, mais avec une sous-estimation de l'ordre de 2km/h.

Pour la motocyclette, les vitesses calculées en exploitant les signaux recueillis par les microphones 1 et 2 sont fortement surestimées en allure décélérée. Les résultats à partir des microphones 3 et 4 sont légèrement meilleurs. Les microphones 5 et 6 donnent de très bons résultats, tant en allure stabilisée que non stabilisée (figure 6) même si en valeur absolue l'écart par rapport à la vitesse réelle tend à s'accroître aux vitesses élevées.

En résumé, tous types de véhicules confondus, une implantation des microphones rapprochée (3.75 m) de l'axe de déplacement débouche sur une surestimation de la vitesse réelle pour des vitesses inférieures à 60 km/h et une sous-estimation pour des vitesses supérieures à 80 km/h. Une implantation médiane (7.50 m) donne des résultats stables quelle que soit l'allure, et satisfaisants, avec une sous-estimation systématique d'environ 2 km/h. Une implantation éloignée (25 m) conduit aux meilleurs résultats, avec une surestimation ne dépassant pas 1.5 km/h.

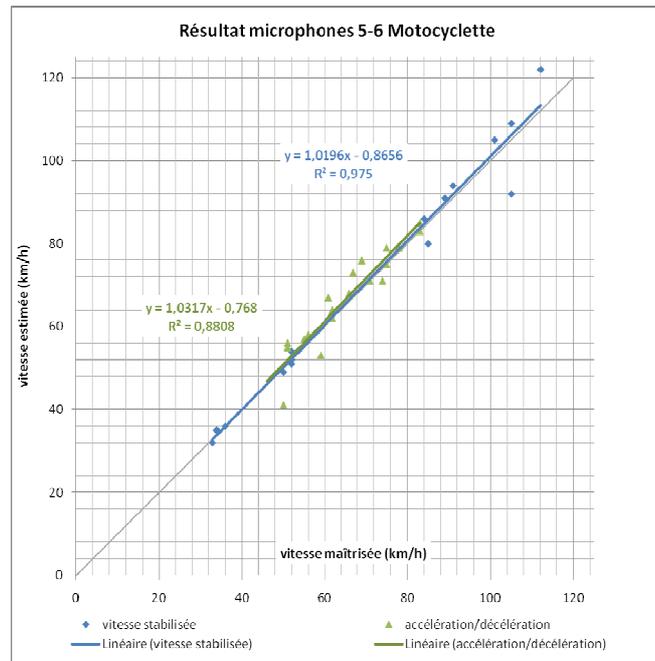


Figure 6 : Résultat des passages de motocyclette à partir des microphones 5 et 6 situés à une distance de 25m de l'axe de déplacement des véhicules

## 5.2 Estimation de l'accélération

Les calculs ont été menés sur une partie des passages, en conservant un prétraitement identique à celui des tests sur la vitesse. L'analyse des résultats se fait en étudiant la cohérence du signe de l'accélération estimée, et de son ordre de grandeur en valeur absolue.

Concernant les enregistrements à partir de la paire de microphones 1 et 2, la plupart des estimations sur des passages en allure stabilisée ont une valeur incohérente (accélération estimée non voisine de 0). En allure non stabilisée, les estimations conduisent à un signe cohérent avec l'allure si celle-ci est accélérée, voire à une valeur aberrante en cas de décélération. La tendance est une large sous-estimation de l'accélération.

Les enregistrements à partir de la paire de microphones 5 et 6 donnent des résultats homogènes quel que soit le véhicule. En allure stabilisée, peu d'estimations ont une accélération estimée voisine de 0. En revanche, pour des passages en allure accélérée ou décélérée, les estimations présentent le signe conformément attendu.

Ainsi, l'estimation de l'accélération par la méthode étudiée conduit à des résultats peu satisfaisants. Seule une implantation éloignée des microphones (à 25m de l'axe de déplacement du véhicule) permet de statuer sur l'allure à partir du signe de l'accélération estimée (et non de son ordre de grandeur) en limitant le risque d'erreur.

## 6 Conclusion

La méthode implémentée exploite les signaux de pression acoustique enregistrés au passage par deux microphones omnidirectionnels alignés le long de la voie. Elle repose sur le décalage temporel entre les deux signaux reçus, pour différentes valeurs de vitesse, et l'estimation par maximum de vraisemblance. Le principe, à l'origine dédié à l'unique estimation de la vitesse, a été étendu à la détermination du temps de passage  $t_{CPA}$  ainsi qu'à celles de l'accélération et de la distance microphones/trajectoire des

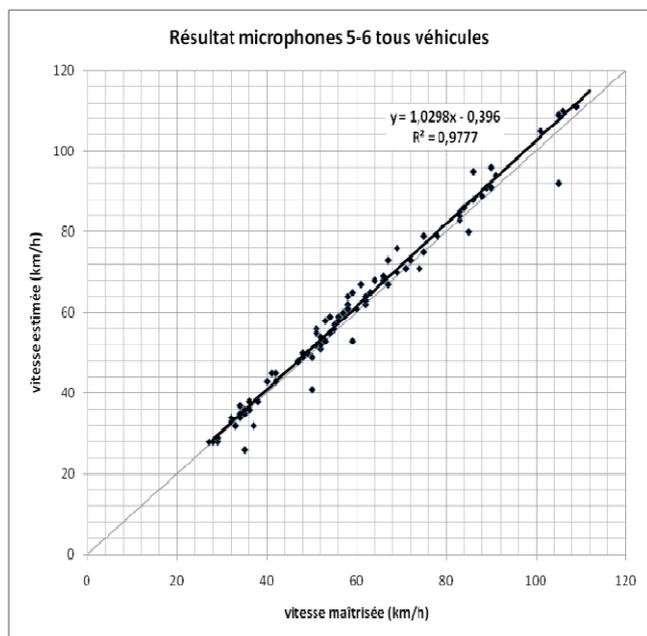


Figure 5 : Résultat à partir des microphones 5 et 6 situés à une distance de 25m de l'axe de déplacement des véhicules. Tous véhicules confondus

véhicules. La prise en compte de  $t_{CPA}$  dans les paramètres à estimer est fondamentale car les différentes méthodes de détermination du temps de passage disponibles dans la littérature ne sont pas suffisamment précises [8]. En faisant de  $t_{CPA}$  une variable de l'estimateur, on améliore l'efficacité du procédé.

La méthode par maximum de vraisemblance offre un potentiel intéressant, comme l'attestent les simulations effectuées à partir de signaux synthétiques reproduisant une source émettant un bruit blanc gaussien. La génération des signaux synthétiques s'appuie sur le modèle de propagation utilisé dans [10]. Pour des signaux expérimentaux, la méthode a également conduit à des résultats très satisfaisants en ce qui concerne la détermination du  $t_{CPA}$  et de la vitesse. A l'issue de la validation expérimentale, les objectifs de précision sont atteints en ce qui concerne la détermination de la vitesse. (incertitude attendue de 2 km/h à 95%). La méthode fonctionne bien lorsque plusieurs sources se succèdent, ce qui la rend applicable aux véhicules guidés. Elle s'avère ainsi applicable à tout type de véhicule.

La méthode trouve cependant sa limite dans son application à la détermination de l'accélération ou même de l'allure, tant au niveau des tests sur signaux synthétiques que des tests sur des données expérimentales. Il se peut que le non respect de l'hypothèse de stationnarité lorsque l'allure n'est pas stabilisée soit la cause de ce mauvais fonctionnement. Des travaux complémentaires sont nécessaires pour cerner l'origine du problème. A défaut d'une solution de classification de l'accélération à partir d'un seul doublet, il faudra étudier une approche par différence finie avec 2 doublets sur une parallèle à l'axe de passage.

## Remerciements

Cette recherche a été financée par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées dans le cadre de l'opération de recherche 11M061 « Prévoir le bruit en milieu urbain » (2006-2009).

## Références

- [1] Couvreur C., Bresler Y., « Doppler-based motion estimation for wide-band sources from single passive sensor measurements », in *Proc. ICASSP-97*, Munich, Germany, Apr. 21-24 (1997).
- [2] Cevher V., Chellappa R., McClellan J. H., « Vehicle speed estimation using acoustic wave patterns », *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 57, no. 1, 30-47 (2009).
- [3] Dutilleul G., « Acoustic-signature-based determination of railway vehicle speed – application to tramways », *CFA/DAGA'04*, Strasbourg (2004).
- [4] Thomas X., « Caractérisation du bruit d'un « deux-roues » motorisé : création d'un radar sonique », *rapport de stage DUT Mesures Physiques*, IUT de Saint-Etienne (2003).
- [5] Priolet G., « Caractérisation des sources sonores « deux-roues » motorisés : mise au point d'un radar sonique », *rapport n°00/03/16635*, LRPC de Clermont-Ferrand (2003).
- [6] Combret M., « Caractérisation des sources sonores d'un « deux-roues » motorisé », *rapport de stage Licence Professionnelle de mécanique spécialité ingénierie acoustique et vibratoire*, Université du Maine (2004).
- [7] Guilloteau A., « Développement d'un cinémomètre acoustique », *rapport de stage DEUST V.A.S.2.*, Université du Maine (2008).
- [8] Golay F., « Programme Scilab Vitesse\_v1.2 - fonction EnergieMoit.sci », LRPC de Strasbourg (2009).
- [9] Chen S., Sun Z., Bridge B., « Traffic monitoring using digital sound field mapping », *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 50, Issue 6, 1582 – 1589 (2001).
- [10] López-Valcarce R., Mosquera C., Pérez-González F., « Estimation of road vehicle speed using two omnidirectional microphones : A maximum likelihood approach », *EURASIP J. Appl. Signal Process.*, 1059-1077 (2004).
- [11] López-Valcarce R., Hurtado D., Mosquera C., Pérez-González F., « Bias analysis and removal of a microphone array based road traffic speed estimator », *12th European Signal Processing Conference*, Vienna, Austria (2004).
- [12] López-Valcarce R., « Broadband analysis of a microphone array based road traffic speed estimator », *IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop*, Sitges, Spain (2004).