

Contrôle de radars routiers modulés en fréquence en conditions réalistes de trafic

La tâche du laboratoire Trafic de METAS est de garantir la précision et la fiabilité des moyens de mesure de la vitesse utilisés par la police lors de contrôles de la circulation routière et ce, pendant toute leur durée de vie. Chaque instrument subit un examen de type et une approbation de modèle ainsi que des vérifications périodiques. METAS a développé des méthodes de simulation permettant de contrôler des cinémomètres radars à ondes continues monochromatiques CW (Continuous Wave) et désormais à ondes continues modulées en fréquence FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave).

ERIC CHATAGNY, WALTER FASEL

Pour répondre de manière efficace aux examens et approbations de modèles ainsi qu'aux nombreuses vérifications périodiques des cinémomètres radars et afin de pouvoir offrir un service de haute qualité à ses clients, METAS a développé des procédés d'examen révolutionnaires. Les connaissances acquises dans ces domaines spécifiques ont permis de développer des méthodes de simulation qui permettent de contrôler des cinémomètres radars à ondes continues monochromatiques CW (Continuous Wave) et désormais à ondes continues modulées en fréquence FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave).

L'effet Doppler

Les cinémomètres radars de contrôle routier utilisent le principe de l'effet Doppler pour mesurer la vitesse. Cet effet est le décalage de fréquence d'une onde électromagnétique entre la mesure à l'émission et à la réception lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie au cours du temps. Si l'on désigne de façon générale ce phénomène physique sous le nom d'effet Doppler, on réserve le terme d'effet Doppler-Fizeau aux ondes lumineuses.

Cet effet fut présenté par Christian Doppler en 1842 dans l'article *Über das farbige Licht der Doppelsterne und einige andere Gestirne des Himmels*, confirmé sur les sons par le chercheur néerlandais Christoph Hendrik Diederik Buys Ballot (en utilisant des musiciens jouant une note calibrée sur un train de la ligne Utrecht-Amsterdam), et fut également proposé par Hippolyte Fizeau pour les ondes électromagnétiques en 1848.

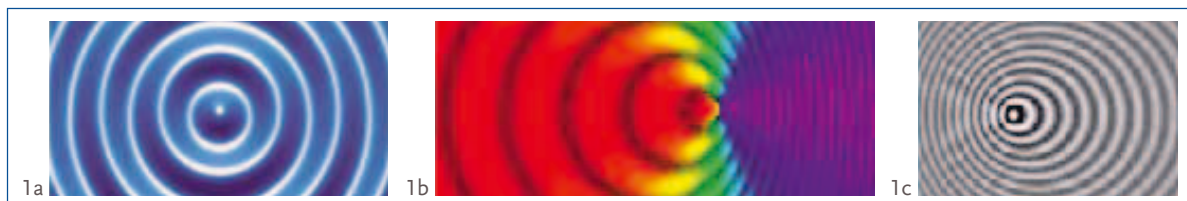
L'effet Doppler se manifeste par exemple pour les ondes sonores dans la perception de la hauteur du son d'un moteur de voiture ou de la sirène d'un véhicule d'urgence. Le son est différent selon que l'on est dans le véhicule (l'émetteur est immobile par rapport au récepteur), que le véhicule se rapproche du récepteur (le son devient plus aigu) ou qu'il s'éloigne (le son devient plus grave). Ce principe est présenté à l'illustration 1.

Principe de fonctionnement du cinémomètre radar « classique »

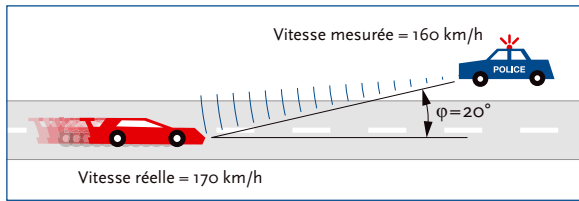
Ce type d'appareil radar utilise une onde continue monochromatique CW (Continuous Wave). Il consiste en un émetteur radio-fréquence sans modulation et un récepteur qui mélange le signal émis et le signal reçu. Si la cible a une vitesse non nulle par rapport au radar, le signal renvoyé aura une fréquence différente de celle du signal émis à cause de l'effet Doppler. La fréquence de l'onde réfléchi sera plus grande pour les véhicules s'approchant du radar et plus petite pour ceux s'éloignant.

En mesurant la différence de fréquence entre l'onde émise et celle retournée, on peut calculer la vitesse de la cible. Ceci se fait en trouvant le battement entre les deux ondes. La fréquence de battement des deux signaux, que l'on nomme également la fréquence Doppler, sera proportionnelle à la vitesse suivant l'équation :

$$f_D = 2 \cdot f_0 \cdot \frac{v_r}{c}$$



1 Le principe de l'effet Doppler : la figure 1a illustre une source d'onde stationnaire, 1b une source se déplaçant vers la droite et 1c une source se déplaçant vers la gauche.



2 Cible se déplaçant avec un angle φ vers le radar.

L'équation du calcul de la vitesse est donc :

$$v_r = \frac{f_D \cdot c}{2 \cdot f_0}$$

Symboles :

f_D : fréquence Doppler en Hz;

f_0 : fréquence de l'oscillateur radar en Hz;

v_r : vitesse relative par rapport à l'émetteur en ms^{-1} ;

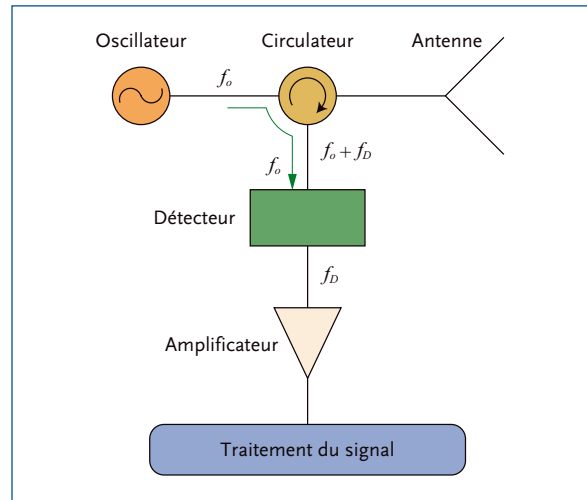
c : vitesse de la lumière dans le vide en ms^{-1} , soit $299\,792\,458\,ms^{-1}$.

La vitesse ainsi obtenue n'est que la vitesse radiale entre le radar et le véhicule. Cette équation n'est donc valable que pour un déplacement de la cible en ligne directe vers le radar.

Si la cible se déplace avec un angle φ par rapport à cette direction, la vitesse notée n'est que la projection sur la radiale au radar, soit la vitesse réelle fois le cosinus de l'angle φ (facteur variant de 0 pour un déplacement perpendiculaire au radar à 1 pour celui vers le radar). L'équation du calcul de la vitesse devient la suivante :

$$v_r = \frac{f_D \cdot c}{2 \cdot f_0 \cdot \cos(\varphi)} \quad (\text{illustration 2})$$

Ce système radar CW ne fournit aucune information sur la distance, et son intérêt réside dans sa simplicité présentée par le schéma-bloc de l'illustration 3. Les premiers radars de ce type ont fait leur apparition vers 1950.



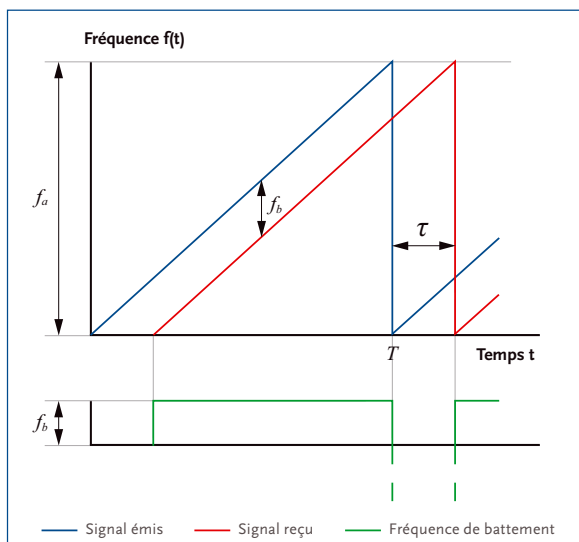
3 Schéma-bloc d'un système radar CW.

Principe de fonctionnement du cinémomètre radar modulé en fréquence

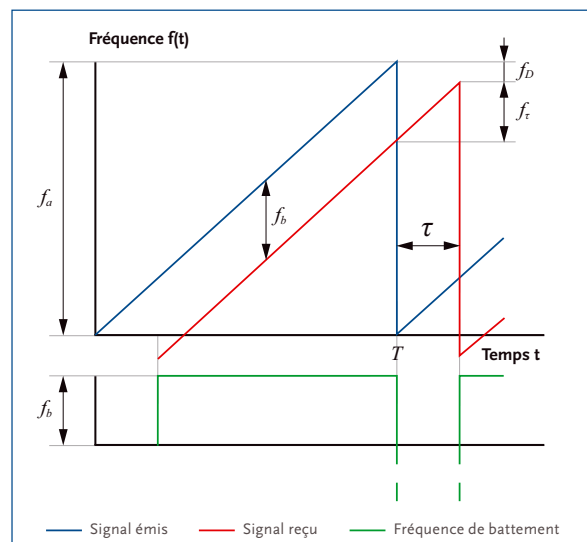
Dans le cas du radar FMCW, la fréquence transmise change en fonction du temps d'une façon connue, ce qui permet en plus la mesure de distance; la mesure de vitesse étant déterminée par l'effet Doppler comme pour le radar CW. Dans ces types de radars, la modulation est en général linéaire, par exemple une fonction triangulaire ou en dents de scie. Pour comprendre la théorie nous prendrons comme exemple la modulation en dent de scie (diagrammes 4 et 5).

Cas d'une cible immobile

Si nous voulons détecter une cible placée à une distance R , nous obtiendrons un signal réfléchi après un temps $\tau = 2R/c$, que nous mélangerons avec le signal transmis, produisant une fréquence de battement f_b . Cette fréquence sera uniquement



4 Modulation de fréquence en dent de scie : cas d'une cible immobile.



5 Modulation de fréquence en dent de scie : cas d'une cible mobile.

due à la distance à la cible, puisqu'il n'y a pas de glissement Doppler et puisque la cible ne bouge pas. Nous pouvons poser les égalités suivantes :

$$\frac{f_a}{T} = \frac{f_b}{\tau}; \tau = \frac{2 \cdot R}{c}$$

Symboles :

R : distance entre la cible et le radar en m;

T : période de la modulation de fréquence en s;

f_a : fréquence au temps T en Hz;

f_b : fréquence de battement en Hz.

La fréquence de battement est exprimée par l'équation suivante :

$$f_b = f_a \cdot \frac{2 \cdot R}{c \cdot T}$$

Cas d'une cible mobile

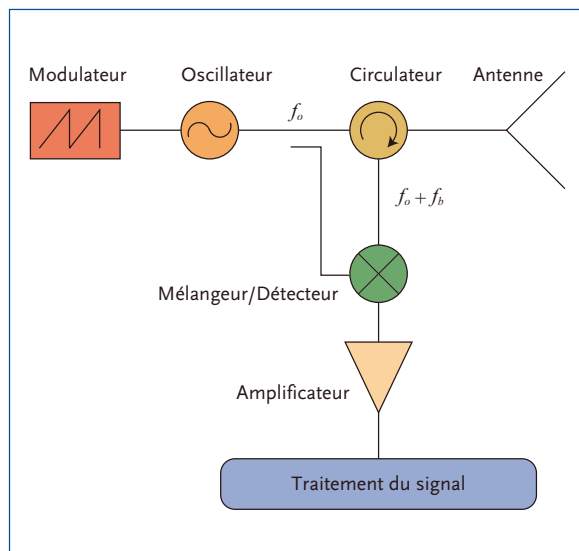
En pratique, le signal réfléchi à deux composantes de fréquences, et leur somme donne la fréquence de battement f_b . Une composante est due au retard lié à la distance, l'autre composante vient du glissement Doppler lié à la vitesse de la cible.

$$f_b = f_D + f_\tau \text{ avec } f_D = 2 \cdot f_0 \cdot \frac{v_r}{c}; f_\tau = f_a \cdot \frac{2 \cdot R}{c \cdot T}$$

Le schéma-bloc du radar FMCW est présenté à l'illustration 6. Il ressemble à celui du radar CW, sauf en ce qui concerne la modulation et le traitement en bande de base du signal f_b .

Modulation de fréquences discrètes

Un système radar avec une modulation linéaire continue présente plusieurs inconvénients dans sa réalisation pratique, notamment une rampe de fréquence qui doit être d'une grande précision avec un filtre de lissage d'ordre très élevé. On préfère souvent utiliser une autre approche, à savoir un nombre de fréquences d'émission discrètes réparties linéairement dans le temps.



6 Schéma-bloc d'un système radar FMCW.

Avantage du radar FMCW

L'information de la distance permet de connaître et de contrôler la position du véhicule (tracking) tout au long du procédé de la mesure de vitesse. Des mesures engendrées par des réflexions multiples peuvent ainsi être détectées plus facilement puis rejetées automatiquement. Dans les systèmes radars CW, les mesures causées par des réflexions multiples doivent être analysées et rejetées par l'opérateur.

Tous les nouveaux cinémomètres radars doivent être approuvés. Dans ce but METAS a développé des méthodes de contrôles fonctionnant sur la base de la simulation.

Apport de la simulation pour le contrôle des cinémomètres radars

METAS dispose de deux procédés pour la vérification des cinémomètres radars : l'examen à l'extérieur avec du trafic routier réel et une méthode de simulation en conditions réalistes de trafic routier.

Lors d'examen à l'extérieur, les conditions routières rencontrées dépendent beaucoup de la météo et de la densité du trafic, ce qui influence la qualité des mesures. Les situations de vitesses excessives ainsi que de fortes accélérations ou décélérations de véhicules ne surviennent que très rarement, alors qu'il est justement intéressant de connaître les réactions de l'instrument dans de tels cas.

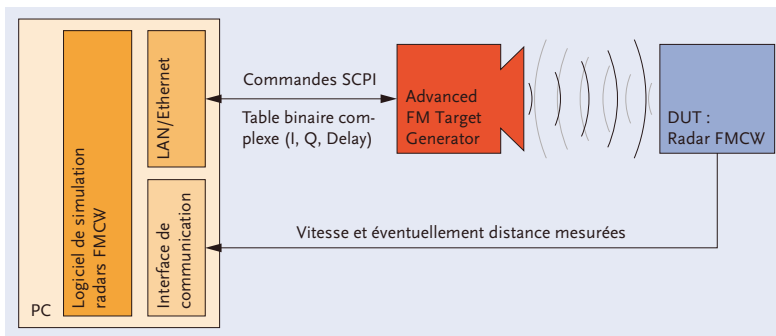
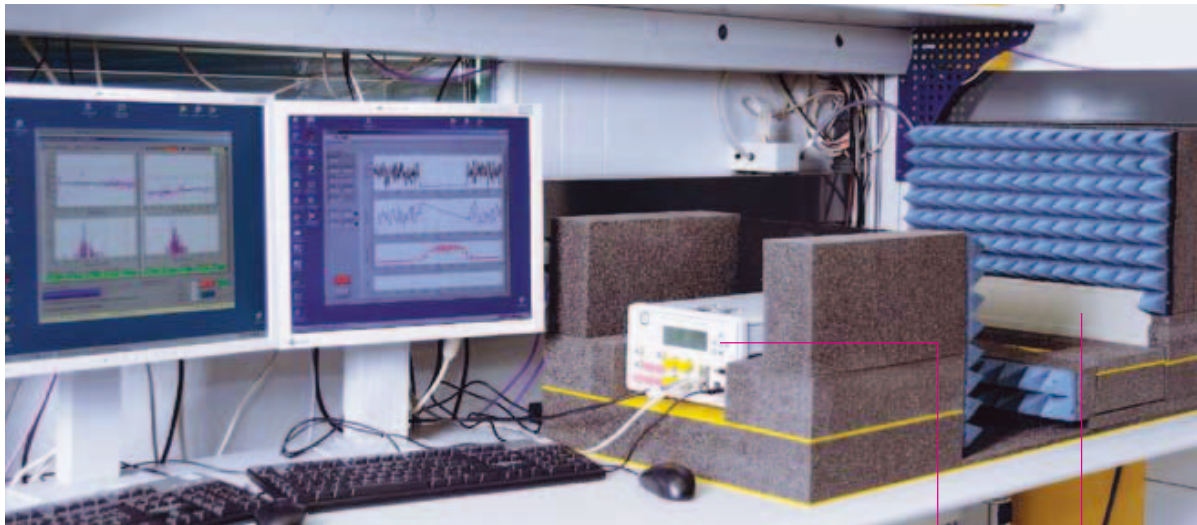
Pour ces raisons, METAS a développé des procédés de simulation qui permettent de contrôler l'instrument dans toute sa gamme de mesure et ainsi de connaître ses limites.

Examen à l'extérieur avec du trafic routier réel

Une place de mesure a été aménagée sur l'autoroute A6 entre Berne et Thoune, en direction de Thoune, à la hauteur de la localité de Münsingen. Les mesures de l'appareil à contrôler peuvent être comparées à celles de deux types de références. Soit un système utilisant trois barrières laser, soit un système utilisant trois capteurs piézo-électriques installés sous la surface de la route pour chacune des deux voies de circulation. Les deux références sont périodiquement comparées entre elles à fin de contrôle.

L'appareil à contrôler doit être positionné de telle façon que le point de déclenchement de la mesure de vitesse (trigger point) soit le plus proche possible de celui de la référence. Un logiciel développé à METAS permet ensuite de synchroniser les couples de mesures attribuées à un même véhicule, de les collecter pour un nombre déterminé de véhicules et de présenter les résultats sous la forme de graphiques accompagnés des valeurs d'incertitude de mesure. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus avec la simulation (voir diagramme 8).

La gamme de vitesse qui est analysée sur ce tronçon d'autoroute s'étend environ de 70 km/h à 140 km/h. La configuration du trafic a une répartition des différents types de véhicules qui est représentative du trafic en Suisse.



7 Place de mesure pour les cinémomètres radars FMCW à METAS.

Méthode de simulation en conditions réalistes de trafic routier
METAS dispose de places de mesure pour la simulation de trafic afin de vérifier les cinémomètres radars CW et également les cinémomètres radars FMCW, ce qui est unique au monde à ce jour.

Contrôle de radars classiques par simulation

Pour les instruments radars classiques, un générateur Doppler à 24 GHz ou 34 GHz est utilisé pour simuler les véhicules en mouvement. La modulation en bande latérale unique (single sideband) est techniquement assez simple à réaliser. Le générateur fonctionne en réémettant vers le radar une bande de fréquence modulée au-dessus ou au-dessous du signal de la porteuse qu'il reçoit de celui-ci. Une entrée analogique permet de commander en fréquence et en amplitude cette modulation et une deuxième commande sélectionne la modulation supérieure ou inférieure.

Contrôle de radars FMCW par simulation

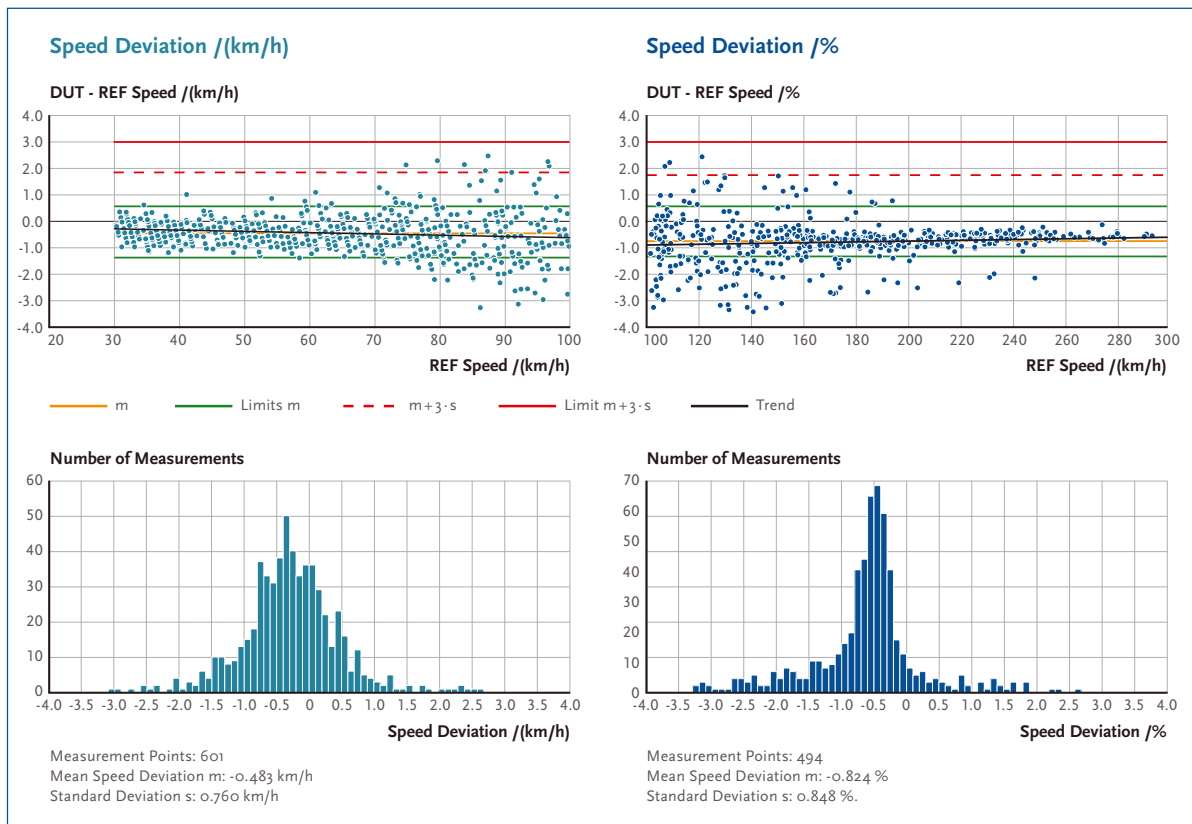
Pour les instruments radars FMCW, c'est un générateur spécialement développé pour METAS qui est utilisé. Ce générateur 24 GHz recourt à une modulation de fréquence très sophistiquée. Il incorpore une technique numérique de traitement de signal avancée permettant de simuler la vitesse et la distance du véhicule en mouvement (photo et illustration 7).

La modulation de fréquence et le décalage temporel du signal donnant l'information de la distance sont définis dans une table de données numériques complexes. L'appareil communique avec une interface LAN/Ethernet et par l'intermédiaire de commandes SCPI (Standard Commands for Programmable Instrumentation). Pour chaque simulation de véhicule, une nouvelle table est calculée et chargée dans l'instrument.

Paramètres pour la caractérisation du trafic de véhicules

La problématique pour la simulation d'un trafic routier est de définir la grandeur physique qui lui est associée. Celle-ci ne peut pas être quantifiée comme une grandeur physique classique qui est exprimée par exemple en unités de longueur, de poids ou de temps. Selon les pays, les régions et la situation sur le terrain, la composition d'un trafic routier diffère beaucoup ainsi que les vitesses autorisées pour chaque type de véhicule et leurs limites d'accélération ou de décélération.

METAS a développé une méthode de simulation où l'on peut définir la configuration du trafic. Le programme permet la simulation de différents types de véhicules, comme des voitures de différentes longueurs, des motos, des camions de grandes ou petites tailles et avec ou sans remorques ainsi que leur répartition dans l'ensemble du trafic. La gamme de vitesse de chaque type de véhicule est également paramétrée. Des



8 Exemple de résultats obtenus par la simulation d'un trafic routier. Les points représentés sur les diagrammes correspondent aux véhicules avec la vitesse mesurée représentée en abscisse et la déviation entre l'instrument à tester (DUT) et la référence (REF) représentée en ordonnée. Les résultats sont séparés en deux parties, jusqu'à 100 km/h les valeurs d'incertitude de mesure sont exprimées en km/h et au-delà de 100 km/h elles sont exprimées en %. Des calculs statistiques permettent de garantir qu'aucune mesure ne dépasse la limite de déviation autorisée (Limit $m + 3 \cdot s$). Les deux diagrammes du bas représentent la répartition des déviations qui tend vers une distribution normale (Gauss). En trafic réel, la présentation graphique est similaire, seule la référence de comparaison est différente et la gamme de vitesse contrôlée est réduite.

perturbations engendrées par les réflexions sur la carrosserie, la rotation des roues ainsi que les limites d'accélération ou de décélération des véhicules peuvent également être paramétrées. Ceci permet de se rapprocher encore plus d'un trafic réel.

La mise au point d'une forme de trafic et des paramètres pour la simulation d'un radar donné est faite par comparaison des résultats obtenus avec ceux mesurés à l'extérieur avec un trafic réel.

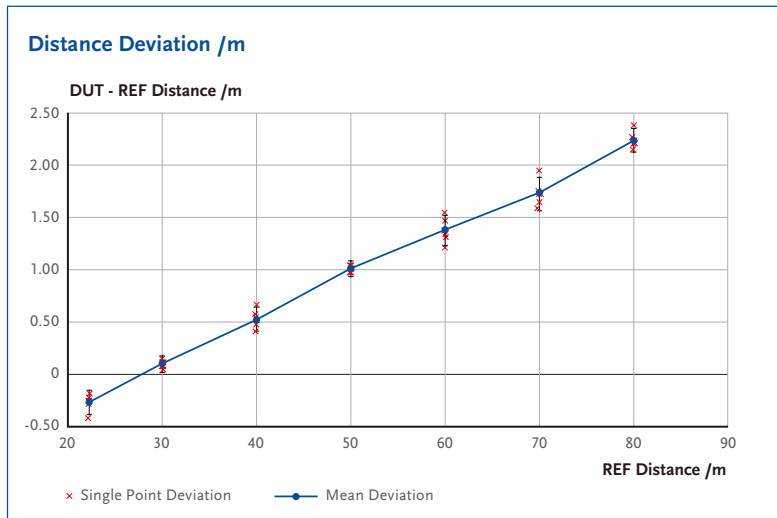
La présentation des résultats obtenus lors d'une simulation de trafic dynamique est similaire à celle utilisée lors des mesures à l'extérieur, par contre la gamme de vitesse contrôlée est beaucoup plus large. Un exemple est proposé au diagramme 8.

Le programme de simulation permet également, pour un type de véhicule donné, de déterminer la linéarité des mesures de vitesse ou de distance (diagramme 9) ainsi que les limites d'accélération mesurées par l'instrument radar (diagramme 10).

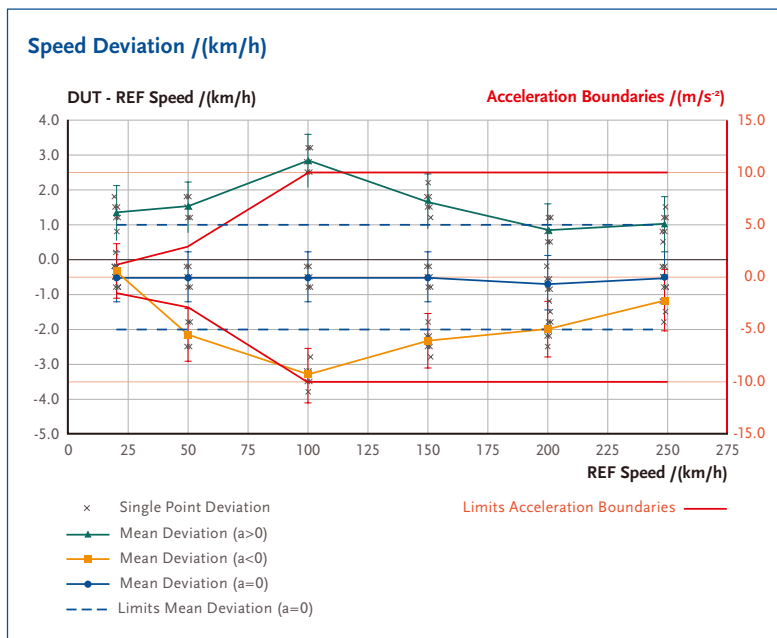
Perspectives pour assurer la précision des mesures des cinémomètres radars

Les moyens de tests développés à METAS pour les cinémomètres radars classiques ainsi que pour les cinémomètres plus évolués à ondes modulées en fréquence permettent d'évaluer les performances et les limites d'opérations de ces instruments de mesure. Ils assurent une application fiable des instruments et aident ainsi à améliorer la sécurité dans la circulation routière.

La simulation en laboratoire d'un trafic routier ainsi que des conditions critiques en vitesses et en accélérations est très efficace et reproductible. Elle apporte une aide précieuse pour s'assurer du bon fonctionnement de ces instruments.



9 Exemple de résultats obtenus par simulation pour déterminer de la linéarité des mesures de distance (uniquement pour la simulation de radars FMCW).



10 Exemple de résultats obtenus par simulation pour déterminer les limites d'accélération. Cette analyse permet de connaître la réaction du cinémomètre radar lors de mesure de véhicules en phase d'accélération (en vert) ou de décélération (en jaune). Les courbes en rouge représentent les limites d'accélérations de l'instrument aux différentes vitesses examinées. La courbe en bleu donne la linéarité des mesures avec des vitesses constantes (sans phase d'accélération) et les lignes discontinues bleues les limites à ne pas dépasser.

Références

- [1] R. Mende, Radarsysteme zur automatischen Abstandsregelung in Automobilen, Dissertation, 1999.
- [2] Melinda Baracskaï, Richárd Horváth, Dr. Ferenc Oláh, CW and FMCW radar adaptation for vehicle technology, HU, ISSN 1418-7108, HEJ Manuscript no. TAR-070416-A.
- [3] Detlef Brumbi, Grundlagen der Radartechnik zur Füllstandmessung, 4. Auflage, Mai 2003.



Walter Fasel (à gauche), chef de la section *Trafic, acoustique et vibration*, tél. direct +41 31 32 33 311, walter.fasel@metas.ch, et Eric Chatagny, expert technique, tél. direct +41 31 32 33 492, eric.chatagny@metas.ch.