

# CONNAÎTRE EN SÉCURITÉ LA POSITION D'UN TRAIN : DE NOUVELLES SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES



☒ Prof. Joël Hancq, Service de Théorie des Circuits et de Traitement du Signal  
He Hongyang, ingénieur chercheur, Multitel asbl

**Depuis 2003 le service TCTS traite, dans le cadre de divers projets soutenus par la Région wallonne en collaboration ou avec le parrainage d'ALSTOM, de la problématique du positionnement sécuritaire de mobiles en visant comme application cible le domaine ferroviaire. Il s'agit ici de définir en temps réel la position précise d'un mobile avec un taux de fiabilité élevé.**

## UNE ÉVOLUTION DE LA SIGNALISATION FERROVIAIRE

Une solution à cette problématique s'avère cruciale dans l'évolution des systèmes de signalisation ferroviaire. Ainsi, l'évolution du système de signalisation européen ERTMS (European Railway Traffic Management System) et, plus particulièrement, de sa composante ETCS (European Train Control System) vers son niveau 3 nécessite une connaissance sûre et précise de la position de chaque train. Dans le cadre du niveau 3, les circuits de voie ne sont plus utilisés avec, comme conséquence, la disparition de l'appareillage joint. Néanmoins, chaque train se voit associé une « bulle de protection » se déplaçant avec lui. La détermination de celle-ci est liée à des intervalles de confiance à la fois sur sa position, sa vitesse voire son accélération définis sur base de capteurs embarqués comme les odomètres de roue, les radars, les accéléromètres, les centrales inertielle... et également les systèmes de navigation satellitaire (GNSS).

L'analyse de la sécurité de ces systèmes détermine un niveau de risque appelé SIL (niveau d'intégrité de la sécurité) dont le niveau SIL4 est le plus élevé et est requis dans les applications ferroviaires, en particulier, lorsqu'il s'agit du transport de personnes.

Cela signifie que les systèmes mis en œuvre pour définir ces intervalles de position et vitesse doivent pouvoir garantir une probabilité de défaillance inférieure à 10<sup>-8</sup> par heure dans leur fonctionnement et les informations qu'ils transmettent.

Pour arriver à garantir de tels niveaux de fiabilité à partir des capteurs précités, des solutions originales s'avèrent nécessaires avec mise en œuvre d'approches diverses étudiées dans une série de projets de recherche auxquels le service TCTS a participé. Quelques-uns sont repris dans les encadrés ci-après.

## DES NOUVELLES APPROCHES

Parmi les diverses approches complémentaires nécessaires, on peut citer :

- L'étude des performances des capteurs utilisés, ce qui est particulièrement le cas pour les nou-

veaux capteurs disponibles telles que les solutions GNSS (Global Navigation Satellite System). Sur ce sujet, Galileo est le premier système satellitaire à fournir une information temps réel sur son niveau de service garanti.

- L'étude d'algorithmes de positionnement ce qui se traduit par des méthodes d'estimation d'état prenant en compte des modèles plus ou moins complexes liés à la connaissance du système modélisé telles qu'abordées par le service d'Automatique de la Faculté (thèse de doctorat « Exploration of robust software sensor techniques with applications in vehicle positioning and bioprocess state estimation » M. GOFFAUX, 2010) ou par des approches statistiques utilisant des technologies de fusion de données telles qu'abordées par le service TCTS en collaboration avec MULTITEL.
- La mise en évidence de fautes sur les informations fournies par les capteurs, ce qui conduit à des notions de capteurs intelligents capables de transmettre en complément une information sur la confiance des données qu'ils fournissent ou l'introduction de modules additionnels capables de mettre en évidence la défaillance d'un capteur.
- La définition d'une architecture efficace pour l'assemblage de ces différentes technologies tant sous les aspects logiciel que matériel. Ainsi, l'incertitude liée aux comportements complexes des capteurs nécessite l'introduction d'un mécanisme de détection des fautes et pannes des capteurs. Idéalement, ce module de détection vient se greffer en amont des techniques de localisation sécuritaire.

Ces diverses approches ont été abordées dans le cadre du projet PIST (encadré).

De l'apport des systèmes de navigation satellitaires Il faut toutefois noter que bon nombre des capteurs embarqués précités fournissent des informations de vitesse (cas du radar, des odomètres de roue) voire d'accélération (centrale inertielle) ; ce qui conduit à voir la zone d'incertitude de position s'accroître au cours du temps d'où la nécessité de recadrage périodique assuré, par exemple, par des balises permettant un positionnement absolu. En cela,

l'utilisation de systèmes satellitaires permet de s'affranchir de telles contraintes.

L'amélioration des performances de ces systèmes satellitaires est généralement obtenue par des solutions d'hybridation avec diverses approches possibles comme :

- L'utilisation de systèmes d'améliorations comme le D-GPS ou système européen EGNOS,
- L'utilisation de capteurs additionnels comme accéléromètres, gyroscopes
- L'utilisation de la cartographie,
- Dans le futur, un mixage de satellites appartenant à des constellations différentes (GPS, Glonass, Galileo, ...)

Sur le principe, la visibilité de 4 satellites est nécessaire pour déterminer la position et s'affranchir de certaines erreurs. La précision de la mesure réalisée dépend de nombreux facteurs.

En pratique, on peut constater la visibilité d'un plus grand nombre de satellites d'où une possibilité de tri des combinaisons possibles de 4 satellites. Divers algorithmes de tri ont été évalués. Cette méthode générale permet d'améliorer la précision des intervalles de vitesse et est applicable à toutes les constellations de satellites.

Ces diverses approches ont été abordées dans le cadre du projet SAPHYRS (encadré).

## QUAND LES SYSTÈMES DE NAVIGATION SATELLITAIRES NE SONT PAS ACCESSIBLES

Des solutions d'hybridation avec des capteurs additionnels comme accéléromètres et gyroscopes permettent de s'affranchir transitoirement d'une perte des signaux satellites mais ces modes dégradés conduisent rapidement à des incertitudes sur la position peu compatibles avec les applications visées.

Dans certaines zones où la réception des signaux satellites est impossible comme, par exemple, les tunnels, il convient de définir des solutions alternatives.

Les deux approches rencontrées sont la répétition des signaux GNSS et l'utilisation de pseudolites.

Ces diverses approches ont été abordées dans le cadre du projet LOCOTRAC (encadré), typiquement pour le cas des tunnels ferroviaires. Une solution originale proposée est basée sur l'utilisation d'un câble rayonnant placé dans le tunnel et alimenté à ses extrémités par des signaux issus de satellites ou de pseudolites.

## D'AUTRES APPLICATIONS

Toutes les techniques présentées ici voient leur cadre potentiel d'application s'étendre largement avec les développements autour des véhicules connectés et, plus récemment, autonomes. Dans ces domaines, si les niveaux d'intégrité des mesures actuellement demandés restent moindres, les précisions sur la position (intervalle de confiance) s'avèrent plus importantes.

## PIST, comment combiner l'information des différents capteurs pour garantir un haut niveau d'intégrité

Dans le cadre du projet PIST (« Positionnement Intelligent et Sécuritaire en Transport », 2004-2007), les méthodes basées sur les intervalles de confiance ont été étudiées et la notion d'intégrité de la mesure a été reliée à ces intervalles. Une méthode originale dite du « K-meilleur » a été développée conduisant au dépôt d'un brevet commun Faculté Polytechnique – Multitel intitulé "A device for and a method of designing a sensor arrangement for a safe automated system, an automated system, a program element and a computer-readable medium" (European Patent application 06 008 296.3).

Sur le principe, l'intégrité associée à une mesure et garantie par les caractéristiques techniques d'un capteur, est la probabilité a priori de trouver

la valeur réelle de la variable dans l'intervalle, lorsqu'on ne connaît aucune autre information sur la valeur réelle de cette variable, c'est-à-dire en l'absence de toute autre mesure.

Lorsqu'on observe plusieurs mesures, l'intégrité associée à l'intervalle d'une mesure est modifiée : elle augmente si les mesures sont cohérentes (large intersection) et diminue quand les mesures divergent (intersection vide par exemple).

Des opérations élémentaires réalisables à partir d'intervalles (figure) ont été étudiées en détail afin de disposer d'une base solide pour développer une nouvelle méthode d'estimation, les résultats obtenus après combinaison étant évalués en termes de précision et d'intégrité.

## LOCOTRAC, que faire dans les zones où les satellites ne sont pas visibles

Dans le cadre du projet LOCOTRAC (« Low Cost Train Automatic Control », 2011-2015), l'un des axes de recherches développés était d'assurer un positionnement sûr dans des zones où les signaux satellitaires ne sont naturellement pas accessibles, typiquement dans les tunnels. Ces signaux ne peuvent alors qu'y être répétés ou simulés.

Le point crucial de la répétition des signaux GNSS est que la solution fournie par les algorithmes classiques est alors la position de l'antenne servant à capter les signaux à répéter. D'autres algorithmes doivent être envisagés.

Une solution originale développée à l'UMONS est basée sur l'utilisation d'un câble rayonnant alimenté à ses extrémités par des signaux issus de satellites ou de pseudolites. L'algorithme développé détermine une position d'un récepteur le long du câble rayonnant sur base des « pseu-

do-range » mesurés pour un couple de satellites où chacun n'alimente que l'une des extrémités du câble.

Ainsi, le dispositif de capture des signaux GNSS retransmis sur le câble doit assurer une partition de l'ensemble des satellites en 2 sous-ensembles distincts alimentant chacun une extrémité du câble. On parle de « masquage spatial » de l'ensemble des satellites visibles. Les études menées montrent la forte sensibilité de la méthode élaborée à l'efficacité de ce filtrage spatial.

Une alternative consiste alors à simuler les signaux satellitaires (pseudolites). Dans ce cas, les pseudolites utilisés peuvent disposer d'une horloge commune qui peut, d'ailleurs, être synchronisée sur l'horloge de la constellation de satellites, ce qui en réduit les coûts par rapport à des solutions commerciales actuellement disponibles.

## SAPHYRS, comment combiner l'information des différents satellites pour garantir un haut niveau d'intégrité

Dans la pratique, un récepteur GNSS est un capteur particulièrement efficace étant donné sa capacité à fournir une mesure de position absolue dans un référentiel lié à la Terre (ce qu'aucun autre capteur existant ne peut faire) ainsi qu'une mesure de vitesse de grande précision. Cependant, il souffre d'un problème majeur, à savoir que ses performances dépendent fortement de l'environnement dans lequel il est utilisé. Sa précision peut, en effet, varier d'un facteur 1 à 1000 voire plus si les satellites visibles sont peu nombreux et mal situés les uns par rapport aux autres. Il peut également être fréquemment indisponible dans les milieux dits « masqués » (milieux fortement urbains ou boisés). De plus, certaines erreurs liées à la propagation des ondes électromagnétiques se maîtrisent très difficilement.

Strictement, la visibilité de 4 satellites est nécessaire pour déterminer la position du récepteur. Or, en pratique, un plus grand nombre de satellites sont généralement disponibles.

Un des points largement développé dans le projet SAPHYRS (« SAfe Positioning using a Hybrid and Robust System », 2007 à 2011) fut comment combiner les informations des différents satellites pour s'assurer d'un positionnement sûr et précis. Divers algorithmes de tri sélectionnant les combinaisons de 4 satellites qui permettent d'assurer les meilleures performances ont été évalués. La prise en compte du positionnement géographique des satellites et d'autres facteurs comme le DOP (dilution of precision) sont à la base de ces algorithmes.

