

Le Projet LOCOPROL/LOCOLOC

Le système LOW COst de LOCALisation des trains par satellite pour la signalisation et de PROtection pour les lignes à faible (Low) densité

Partie 3

Un positionnement sûr basé sur les satellites LEO

Dans l'édition précédente de Focus (n° 50), nous avons parlé du projet LOCOPROL et en particulier des problèmes liés à l'utilisation des satellites pour localiser en sécurité le train en conformité avec la norme SIL-4.

Cette partie est consacrée aux méthodes qui ont été utilisées dans le projet LOCOPROL pour résoudre ce problème grâce principalement à l'algorithme 1-D. Nous mettrons l'accent sur l'aspect innovant du projet qui a réussi en ne prenant en compte que de seulement deux satellites – alors que normalement un minimum de 4 satellites est nécessaire – pour déterminer la localisation exacte du train et, ensuite, que la réception de seulement 6 voire même 4 satellites a permis de satisfaire à la stricte norme SIL-4

Nous ne devons pas perdre de vue qu'il s'agit toujours d'un projet pour des "lignes à faible densité de trafic" qui doit être "low cost". Une enquête au niveau mondial a permis de constater qu'environ 75% de la longueur totale des lignes est à "faible densité de trafic". L'utilisation du système LOCOPROL permet donc d'entrevoir de sérieuses économies pour les installations de sécurité de ces lignes. Pour les pays externes à l'Europe, on l'estime à 45% compte tenu d'un LCC (life cycle cost) de 15 ans pour l'appareillage. Pour l'Europe, on ne prévoit que 25% d'économie compte tenu de la compatibilité nécessaire du système LOCOPROL avec le système ERTMS/ETCS.

1. Introduction: la norme SIL-4 et l'imprécision d'une mesure GPS.

Pour pouvoir utiliser un système de navigation par satellite pour réguler le trafic ferroviaire, il faut disposer d'un système qui répond aux mêmes exigences de sécurité que les systèmes de signalisation existants. Cette exigence de sécurité est bien connue du personnel de la signalisation à savoir la norme SIL-4 (Safety and Integrity Level 4). Cela signifie que le système dans son intégralité – tant pour les composants que pour leur fonctionnement – doit être d'une qualité telle que sur environ 10 milliards d'action seule une erreur peut se produire. Comme principe de la régulation en sécurité du trafic ferroviaire, on admet qu'il n'est pas nécessaire de connaître la position du train à quelques centimètres

près mais que l'on doit savoir avec une grande certitude que le train se trouve dans une zone déterminée appelée également intervalle de confiance.

2. Solutionner quelques problèmes concernant une mesure GPS.

Théoriquement l'observation de 3 satellites doit suffire pour calculer un positionnement. On sait également que l'utilisation du GPS, sans utilisation d'autres moyens, n'est pas aussi précise. Comment faire pour remédier à ce manque de précision et répondre quand même à la norme de sécurité?

2.1 Une solution au problème de non-synchronisation des horloges des satellites avec l'horloge du récepteur

2.1.1 La solution classique

Ce problème se présente à chaque mesure GPS. La méthode traditionnelle consiste à considérer le temps comme une inconnue. Donc si l'on est en présence de 4 inconnues, on doit pouvoir disposer d'au moins 4 satellites et mesurer leur "pseudorange" pour résoudre le système de 4 équations à 4 inconnues.

La résolution d'un tel système est mathématiquement lourde. De plus, compte tenu du faible nombre de mesures et des erreurs dont elles sont entachées, on a **une faible certitude** sur l'exactitude de la solution.

Si on peut recevoir plus de 4 satellites, on disposera d'une information redondante qui offrira une solution meilleure et plus fiable. On recherche alors une solution par la méthode des moindres carrés qui retient la solution statistiquement la plus probable, à savoir celle qui minimise la déviation standard.

Cette méthode de résolution est utilisée en arpentage. L'appareil est mis en station fixe et on procède à des mesures pendant un certain temps. De ce fait, de nombreux calculs sont possibles et le nombre de satellites qui peut différer d'un moment à l'autre sera certainement suffisant pour obtenir une mesure très précise.

2.1.2 Le problème de mesure avec un récepteur mobile: un calculateur rapide est nécessaire.

Si on veut prendre **une mesure avec un appareil mobile**, une série de problèmes supplémentaires apparaît.

Ainsi, le nombre de satellites que l'on peut recevoir n'est pas uniquement variable d'un moment à un autre mais également d'un endroit à un autre. Si on arrive entre des bâtiments élevés, dans une tranchée ou une vallée encaissée, il est fort possible que, temporairement, on ne reçoive plus de signal direct voire même plus de signal du tout.

De plus, le mouvement relatif de l'antenne de réception aura une influence.

Le type de récepteur interviendra également: si on ne dispose que d'un récepteur séquentiel qui doit détecter les satellites les uns après les autres et effectuer les calculs, la précision

sera plus faible que si on dispose d'un récepteur qui travaille en parallèle et peut détecter plusieurs satellites en même temps. De tels détecteurs sont bien sûr plus onéreux. Pour satisfaire à la norme SIL-4, il faut en être conscient et un tel récepteur sera nécessaire. Le coût du récepteur utilisé dans le cadre de LOCOPROL, le POLARX2, est de l'ordre de 12.500 €.

2.2. La recherche d'une mesure rapide et fiable: l'utilisation de l'algorithme 1-D.

2.2.1 L'algorithme 1-D

Pour obtenir rapidement une solution, on va essayer de simplifier sa recherche en réduisant le nombre d'inconnues, ce qui est possible en réduisant le nombre de dimensions. On va tenir compte du fait que l'on sait que le train roule sur un tronçon de ligne déterminé. On ramène donc le système à une dimension. La deuxième grande inconnue est la non synchronisation des horloges du récepteur et des satellites.

Pour éliminer cette erreur de synchronisation, on utilisera l'algorithme **unidimensionnel ou 1-D, l'"Hyperboloid Surface 1-D Track Intersection Algorithm" ou autrement dit l'algorithme SATHIA (SATellite Hyperbolic Intersection Algorithm)**.

Dans cette méthode de calcul, on part du principe que le train parcourt une voie dont on connaît avec précision les coordonnées de tous les points. Il suffit donc de déterminer où le train se situe par rapport à un point de référence. Il ne subsiste plus qu'une inconnue et la solution serait simple si les imprécisions, citées auparavant, n'existaient pas. Comme la plupart des autres imprécisions (erreurs troposphérique et ionosphérique) peuvent être corrigées par des formules préprogrammées dans le récepteur, l'erreur due à la non synchronisation de l'horloge du récepteur ne doit pas être sous-estimée et peut provoquer de graves problèmes. Il faut tenter de l'éliminer et c'est pourquoi on fait appel aux propriétés d'une hyperbole ou, vu dans l'espace, d'un hyperboloïde.

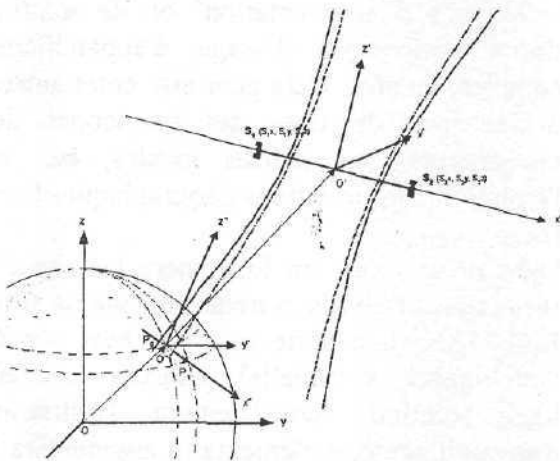
2.2.2 La propriété spécifique d'une hyperbole

Pour les points situés sur l'hyperbole, la différence des distances aux foyers est constante.

On utilisera cette propriété pour éliminer l'erreur de l'horloge du récepteur.

2.2.3 Application de cette propriété.

On effectue deux pseudo-mesures par rapport à une paire de satellites que l'on considère comme étant les foyers d'une hyperbole. Pour la simplification, on considère que l'on est dans un plan. Pour passer à la réalité, on ne doit considérer l'hyperbole qu'aux alentours de l'axe sur lequel les deux satellites, donc les deux foyers, sont situés (voir figure 1).



Soient S_1 la position du satellite n° 1 aux coordonnées (x_1, y_1) et S_2 la position du satellite n° 2 aux coordonnées (x_2, y_2) . Vu qu'ils constituent les foyers d'une hyperbole, leurs coordonnées réelles dans un système symétrique avec les satellites sur l'axe des X sont pour $S_1 (-f, 0)$ et pour $S_2 (f, 0)$

Soit maintenant ε l'erreur de synchronisation de l'horloge du récepteur.

On effectue alors deux mesures: R_1 est le pseudorange du satellite 1 à la position de l'antenne du train (L) et R_2 celui du satellite 2.

$$R_1 = \text{distance}(S_1, L) = C \times T_1 + \varepsilon + \xi_1$$

$$R_2 = \text{distance}(S_2, L) = C \times T_2 + \varepsilon + \xi_2$$

où L est la localisation du train;

C est la vitesse de propagation des ondes radio, $2,9979 \times 10^8$ m/s ou environ 300.000 km/s;

T_1 est le temps nécessaire pour que les signaux du satellite 1 parviennent à l'antenne;

T_2 est le temps nécessaire pour que les signaux du satellite 2 parviennent à l'antenne;

Aucune mesure n'est parfaite et chacune est entachée d'une petite erreur qui dans la majorité des cas a une distribution Gaussienne: ξ_1 est une petite erreur additionnelle sur la mesure du satellite 1 et ξ_2 est une petite erreur additionnelle sur la mesure du satellite 2.

Si on fait la différence de ces distances, l'erreur de l'horloge ε disparaît et on obtient:

$K = R_1 - R_2 = C \times (T_1 - T_2) + \xi_1 - \xi_2 =$ une constante pour tous les points de l'hyperbole.

Sur base des formules propres à l'hyperboloïde, à savoir,

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{(y^2 + z^2)}{b^2} = 1 \quad \text{et} \quad a = \frac{K}{2} \quad \text{et}$$

$b^2 = f^2 - a^2$, il est possible de le décrire complètement, l'axe x étant l'axe de rotation, avec $f =$ la distance du foyer de l'hyperbole = la demi distance entre les satellites, $a =$ la distance entre le sommet de l'hyperbole et le centre du système de coordonnées X, Y et

K la valeur mesurée, à savoir la différence des distances de chaque point de l'hyperbole aux foyers.

Il est alors possible de calculer le point d'intersection de la ligne ferroviaire avec de la surface de l'hyperboloïde et de savoir où l'antenne du train se trouve.

2.2.4 L'intervalle de confiance

On ne doit plus calculer que l'"intervalle de confiance" à savoir l'erreur ξ sur les mesures dont la répartition est Gaussienne.

Sa détermination est basée sur la comparaison entre la distance réelle que l'on connaît maintenant et les distances mesurées (pseudorange). Quelques mesures permettent de calculer la répartition des fautes ou l'écart type. Vu que l'erreur peut être soit positive soit négative, on ajoutera, de part et d'autre de la valeur mesurée, une valeur de 2ξ à la valeur a

sur l'axe qui relie les deux satellites. Ainsi on est rassuré que 95% des mesures ont des valeurs dans cet intervalle.

Grâce à la même technique de l'algorithme 1-D, on définit deux hyperboloïdes dont on peut calculer les intersections avec la ligne ferroviaire.

Le morceau situé entre ces deux points de contact est l'intervalle de confiance de la mesure. Des calculs peuvent démontrer que dans cet intervalle de $(+2\xi, -2\xi)$ on obtient une certitude de 10^{-4} .

Si maintenant on applique cette méthode de calcul sur **3 paires de satellites indépendants** et que, pour chaque paire, on détermine un intervalle de confiance, et que, finalement, on superpose les intervalles de confiance et prend les points limites les plus éloignés, on obtient un intervalle de confiance avec une certitude de 10^{-12} qui satisfait également à la norme SIL-4. Cela signifie donc concrètement qu'il faut recevoir **en permanence au minimum les signaux de 6 satellites**. Lors des parcours d'essai sur la ligne 144, il est apparu que la réception simultanée des signaux directs de 6 satellites n'est possible que durant 60% du temps.

Lors des mesures pratiques, on a pu constater qu'un tel intervalle peut varier d'une septantaine de mètres à exceptionnellement parfois 600 mètres à des endroits où peu de satellites sont visibles simultanément.

2.3 Quid s'il n'est pas possible de recevoir 6 satellites simultanément?

Comme on a constaté qu'il n'est pas toujours possible de recevoir 6 satellites, on a adapté l'algorithme et on s'est limité à la réception des signaux de 4 satellites. C'était possible dans 95% du temps.

Cela a comme conséquence que l'on ne peut former 3 paires indépendantes de satellites mais que l'on doit prendre en compte toutes les combinaisons des signaux des 4 satellites pour quand même satisfaire à la norme SIL-4. Cela nécessite également beaucoup plus de calculs et engendre une plus grosse charge pour le processeur. La preuve de l'obtention

d'un tel niveau de probabilité est également plus difficile que dans le cas de 6 satellites.

La vérification de cette argumentation est du ressort de l'institut INRETS. Ils doivent, en tant qu'organe de contrôle, vérifier que l'ensemble du système répond aux exigences posées.

2.4 L'augmentation de l'intégrité des mesures d'un satellite.

Le fait que le positionnement n'est suffisamment précis que seulement durant 95% du temps subsiste. Cela diminue l'efficacité du système et nécessite d'adapter des distances de sécurité plus importantes. Actuellement, il est possible de compenser ce manque de disponibilité et d'intégrité par l'utilisation de techniques d'"augmentation" ou de solution d'amélioration par l'usage d'appareillages complémentaires. Cela peut être entre autres: des senseurs de roues, des gyroscopes, des tachymètres, des balises locales, etc. ou l'émission d'informations géographiques locales.

Dans de tels cas, on fusionnera les signaux reçus des différents systèmes et, via un filtre KALMAN (une sorte de filtre basé sur de l'intelligence artificielle), choisira la meilleure solution. Naturellement, l'utilisation d'appareillage complémentaire augmentera le coût du système.

Lors de la mise en pratique de ces améliorations de l'intégrité, deux méthodes sont possibles:

- la méthode d'"intégrité passive": cette méthode prend en compte toutes les mesures et les moins fiables ne feront qu'allonger l'intervalle de confiance. Rendue de ce fait moins précise, elle ne met cependant pas en cause la sécurité par des pseudomesures corrompues par des réflexions ou des chemins multiples;
- la méthode d'"intégrité active": ou le monitoring de l'intégrité, cela consiste à exclure un positionnement erroné ou invraisemblable. Cela peut arriver lorsque l'angle entre deux satellites est très petit et que l'on obtient un point d'intersection moins précis avec la ligne sur laquelle le train roule. Ainsi, la méthode de positionnement "failure

detection/exclusion" (FDE) permet d'accroître l'exactitude du positionnement GNSS par un niveau constant de l'intégrité.

Améliorations complémentaires

L'utilisation de moyens complémentaires tels que les signaux des satellites EGNOS ou WAAS permet encore d'améliorer la précision de la localisation. Des simulations ont montré que durant 95% du temps on obtient ± 50 m. ou que durant 99,9% du temps l'intervalle de confiance était de ± 95 m.

L'utilisation du signal du satellite EGNOS est effectivement payant et pas strictement nécessaire pour satisfaire à la norme SIL-4. Cela rend, en effet, la solution "low-cost" plus coûteuse.

2.5 La solution du problème de réflexion et du masquage.

2.5.1 Introduction

Afin de garantir l'intégrité des calculs et donc la sécurité, on ne veut recevoir que des signaux directs. Ainsi on s'impose une grande restriction qui peut avoir comme conséquence que l'on reçoit trop peu de satellites pour effectuer des calculs qui satisfont à la norme SIL-4.

2.5.2 Parer aux signaux réfléchis et masqués

Comment va-t-on parer aux signaux réfléchis ou masqués qui en fait faussent légèrement les calculs?

Le laboratoire INRETS-LEOST (Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité - Laboratoire Electronique, Ondes et Signaux pour les Transports) une division de l'institut INRETS, installé à Lille - Villeneuve d'Ascq fait de nombreuses recherches sur l'utilisation des mesures GPS pour déterminer la position de véhicules en mouvement. Ainsi, ils ont été confrontés à la problématique de réflexion et de masquage des signaux GPS reçus, principalement en ville. Ils ont développé une méthode de calcul spéciale pour déterminer le niveau de risque de réflexion. Ce programme s'appelle PREDISAT.

2.5.3 La méthode PREDISAT.

Cette méthode consiste à filmer les deux côtés du trajet que l'on parcourt. Pour ce faire, on utilise deux caméras latérales qui sont placées à un angle de 45° sur le véhicule en mouvement. Ainsi, une image des obstacles latéraux (bâtiments, arbres, etc.) est obtenue. Une photo électronique est prise environ tous les 10 m. Les photos sont ensuite analysées par un programme qu'ils ont conçu et on peut déterminer un angle d'ouverture grâce auquel on peut garantir une réception de 95% de signaux directs de satellites et donc être considérés "bons".

Ainsi les signaux des satellites bas sur l'horizon qui ne peuvent être reçus que par réflexion sont éliminés.

Cet angle est variable en fonction de l'endroit où l'on se trouve. Si on se trouve dans une zone plate ou "open sky", alors l'angle d'ouverture peut aller jusqu'à 170° . Il y aura beaucoup de satellites visibles dont on pourra utiliser le signal. Ainsi, lors des parcours d'essai sur la ligne 144, on a pu à certains endroits prendre 11 satellites en compte.

Remarque: même dans un environnement complètement plat, on ne peut pas aller jusqu'à 180° à cause de l'influence de l'erreur ionosphérique à ces basses positions zénithales.

Si on se situe dans une vallée encaissée ou entre de hauts bâtiments, l'angle d'ouverture sera petit et seulement peu de "bons" satellites pourront être reçus. Seuls ceux situés haut dans le ciel pourront être pris en compte. Lors des essais en Provence sur la petite ligne entre Nice et Digne, il y avait des endroits situés dans la vallée entre de grosses masses rocheuses où aucun "bon" satellite ne pouvait être reçu. Un tel phénomène ne dure évidemment pas puisque ces satellites ne sont pas géostationnaires mais bougent également.

Ce fait est également un argument supplémentaire pour déterminer le positionnement de telle manière que l'on ait besoin d'aussi peu de satellites que possible. D'où l'avantage de l'algorithme 1-D grâce auquel on peut déjà avoir un bon positionnement avec 2 satellites. Nous devons toutefois rappeler que le posi-

tionnement avec 2 satellites est insuffisant pour satisfaire à la norme SIL-4.

Remarque: dans le monde de l'aviation on se contente d'une intégrité de 10^{-7} . Il faut signaler que dans cet environnement le problème de réflexion ou de chemins multiples est quasi inexistant. L'antenne se trouve au dessus de l'avion et n'est protégée par rien.

3. Une approche du block système virtuel.

Une fois que l'antenne du train est positionnée et que l'on connaît l'intervalle de confiance – qui en réalité varie constamment en longueur – on en revient au principe de la signalisation classique. Il faut augmenter l'intervalle de confiance d'une distance suffisante pour que le train suivant puisse freiner et ne puisse entrer en collision avec le train précédent. Comme en réalité l'intervalle de confiance varie constamment, ce n'est pas une sinécure et il faut prendre une zone de sécurité suffisante. On s'approche alors de la notion de block virtuel dans lequel la distance entre les trains est fonction de leurs vitesses. Ce système, assisté du système ETCS/ERTMS, a été testé en pratique auprès du "Chemin de Fer de Provence" sur la ligne Nice - Digne. Deux autorails se sont suivis à une distance de sécurité sur une ligne non équipée de cantonnements ni de signaux intermédiaires.

4. Des problèmes encore à investiguer et résoudre.

a) **Influences EMC:** quoi qu'il en soit, il subsiste encore quelques aspects complémentaires à examiner dans le cadre de l'utilisation des satellites à des fins sécuritaires. Ce peut être l'influence de signaux parasites ou par exemple l'influence des champs électromagnétiques lors de courants importants captés par la locomotive qui tracte ou pousse un train équipé du système LOCOPROL ainsi que la production d'étincelles à la caténaire ou d'autres influences EMC.

b) Le problème de l'intégrité du train.

La signalisation classique permet de confirmer que le train, au complet, a quitté

la section de block. En effet, grâce aux circuits de voie ou aux compteurs d'essieux, on peut constater que tous les essieux qui sont entrés dans une section de block l'ont également quittée. Il n'en va pas de même avec la navigation par satellite. On sait uniquement quelque chose au niveau de l'antenne et pour savoir dans quelle mesure le train est encore complet, il faut le déterminer d'une autre manière. A ce sujet, différentes méthodes ont été développées soit via d'une petite antenne GPS sur le dernier véhicule soit une détection de pression. Nous n'approfondirons pas le sujet car cela nous mènerait trop loin. Dans tous les cas, il ne faut pas perdre de vue que l'on recherche une solution "low-cost".

5. Quid en cas de nombre insuffisant de satellites ou moins de 4 satellites?

Si effectivement trop peu de satellites sont visibles, alors il faut pour déterminer la position soit travailler par extrapolation soit utiliser d'autres moyens tels que les balises passives, un gyroscope spécialisé piloté par laser appelé aussi INU (inertial navigation unit) ou les pseudolites.

Les balises passives: c'est une balise qui ne nécessite pas d'alimentation et donc pas de câblage. Le train doit être équipé d'une antenne qui, lorsque le train passe sur la balise, envoie un premier signal vers la balise pour l'activer en énergie et reçoit en retour l'information contenue dans la balise. Le signal reçu permet au train de se localiser avec précision. On utilisera naturellement l'Eurobalise standardisée.

L'INU est un appareil très précis et très coûteux constitué de gyroscopes laser. Ils suivent très précisément tous les mouvements du train. L'appareil est aussi utilisé dans l'aviation pour tenir les avions sur course.

Les pseudolites: ce sont des émetteurs fixes qui imitent le signal d'une satellite. D'où leur nom contracté pseudo(-satel)lite. On utilise ces appareils aux endroits où ce n'est pas du tout possible de recevoir les signaux des satellites comme dans les tunnels etc.

Ces moyens augmentent toutefois le prix de l'équipement et le but était précisément de les maintenir aussi bas que possible.

6. Travaux préparatoires.

Pour pouvoir utiliser l'algorithme 1-D, il faut faire le relevé complet de la ligne ferroviaire. Une méthode spéciale a été développée pour le réaliser rapidement. Cette méthode consiste à mesurer les coordonnées de la voie ferroviaire tout en roulant. L'aspect innovant

de ce système sera décrit dans un prochain Focus.

7. Le projet GALILEO.

Finalement il faut encore évoquer le projet Galileo lui-même car l'ensemble du projet LOCOPROL compte sur ce nouveau système de satellites disposant d'une très haute intégrité et d'un plus grand nombre de satellites. Cela sera également traité dans un prochain Focus.

*texte: ir Hubert Ryckebosch
traduction: ir Philippe Delcour*