

Le Projet LOCOPROL/LOCOLOC

LOW COst satellite based train LOCation system for signalling
and train PROtection for Low density traffic railway lines

Partie 2

Un positionnement sûr basé sur les satellites-LEO Pourquoi les mesures GPS ne sont-ils pas précises? Quelles fautes se présentent-ils?

Dans l'édition précédente de FOCUS (n° 49) nous avons parlé du projet LOCOPROL dans son ensemble. Dans cet article, nous traiterons de manière plus approfondie le problème de l'utilisation des signaux GPS. Une mesure GPS se base sur la mesure du temps nécessaire à un signal partant d'une satellite pour atteindre le récepteur. Cette mesure n'est effectivement pas simple lorsque l'on considère le nombre de petites erreurs qui peuvent l'affecter. Cet article énumère ces erreurs et traite de l'influence qu'elles peuvent avoir sur le but à atteindre à savoir satisfaire à la norme SIL-4. Dans une édition suivante de FOCUS (n° 51), nous expliquerons comment on peut éliminer ces fautes afin de positionner en sécurité un train par satellites et en respectant le but spécifique de ce projet, à savoir concevoir un système low-cost dont le coût sera d'environ 50% des systèmes classiques utilisant des circuits de voie, des compteurs d'essieux, etc.

Le positionnement d'un train par satellites

I. Introduction.

La première partie (voir Focus 49) s'attachait plutôt à l'historique de la naissance du projet LOCOPROL. Dans cette deuxième partie et suivantes (Focus 51 etc), nous examinerons plus en détail certaines facettes et certains problèmes qui jouèrent un rôle lors de la réalisation pratique de ce système et principalement ce qui est si innovant dans ce projet de positionnement d'un train, à savoir la réalisation de la norme SIL4 pour la localisation basée sur l'utilisation des satellites

II. Le principe majeur et l'innovation du projet LOCOPROL: sûreté et "sécurité avant tout" priment sur la précision du positionnement!

Un positionnement

Dans de nombreux projets utilisant également la navigation par satellite on recherche principalement la précision. C'est certainement le cas par exemple pour la topométrie. Dans ce cas

l'appareillage est fixe et on peut après quelques minutes grâce à une moyenne sur une centaine de mesures obtenir une mesure précise.

Le positionnement d'un véhicule en mouvement est plus difficile. Le temps nécessaire au calcul a pour effet de le rendre moins précis. Pour tous les modes de transport où l'on roule à vue, cela n'a pas d'influence car le positionnement ne joue pas une fonction de sécurité. Le conducteur effectue automatiquement les corrections face à des indications imprécises.

En cas d'utilisation des satellites pour le positionnement dans un système de régulation ferroviaire, cette mesure remplit **une fonction de sécurité** et cela change totalement les circonstances dans lesquelles cette mesure GPS sera utilisée.

Une fonction de sécurité = satisfaire à SIL-4

Le positionnement grâce à la navigation par satellite n'est, en soi, pas neuve mais le positionnement **avec une certitude qui atteint la norme SIL4** et donc satisfait à ces normes pour une utilisation dans la signalisation est totalement neuve.

Beaucoup de projets partent du principe qu'il faut localiser le train de manière aussi précise que possible sans s'occuper du problème d'atteindre la norme SIL-4. Une telle précision n'est pas le but principal du projet Locoprol. Ce serait le cas si l'on voulait savoir, sur une ligne à double voie ou dans une gare de triage, sur quelle voie le train se roule mais ce n'est pas le but du projet.

Rester Low cost

D'ailleurs, comme on le lira plus loin, l'augmentation de la précision entraînera une augmentation du prix de réalisation du projet et un des buts est justement d'obtenir un projet low-cost. En effet, grâce à une description de l'infrastructure et le suivi de la position des aiguillages, il est également possible de savoir sur quelle voie le train roule.

La certitude l'emporte sur la précision

L'idée de départ pour un positionnement sauf d'un train se base sur le fait que, un peu comme dans la mécanique quantique, seule une des deux données suivantes peut être déterminée correctement en même temps: soit on veut savoir avec grande précision où le train se trouve mais on a seulement une faible certitude que la donnée est juste, soit on exige une grande certitude et on ne sait pas aussi précisément où le train se trouve mais on sait **très précisément qu'il se situe dans un intervalle déterminé.**

On va donc rechercher la **certitude** que le train se trouve dans une zone déterminée, **une zone de fiabilité ou "intervalle de confiance"** et non la **précision** de savoir où il se trouve dans cet intervalle.

Une édition suivante démontrera qu'on atteint l'intervalle de confiance en ajoutant 2 fois la déviation standard autour du point calculé par la moyenne des mesures, de chaque côté des mesures effectuées par ce récepteur.

Cette zone comprend toutes les fautes possibles incluses dans une mesure. Selon la qualité de la réception, cette zone sera plus ou moins large. Ainsi il est possible de démontrer qu'en prenant cette zone en considération, on peut atteindre pour cette mesure GPS une certitude de 10^{-4} . Evidemment ce niveau est insuffisant pour satisfaire à la norme SIL-4.

On retombe donc sur un principe tel qu'exigé pour la sécurité en signalisation. C'est-à-dire la

division de la voie en sections de block: On sait avec certitude que le train est dans la section de block mais on ne sait pas avec précision où il se trouve dans la section. Dans un tel intervalle ou section, augmenté de la longueur du train, aucun autre train ne peut jamais être présent.

III. La mesure GPS

III.1 Le principe d'une mesure GPS

Tout le monde connaît le système GPS (Global Positioning System) qui été utilisé pour la première fois à grande échelle dans les années 90 lors de la première guerre en Irak. Le système est constitué de 24 satellites et 4 satellites de réserve situés à une altitude d'environ 19.500 km qui font deux fois le tour de la terre par 24 heures. Leur vitesse est d'environ 3750 m/s. Leurs trajectoires sont distribuées sur le globe terrestre de manière à ce que, normalement, à tout instant 5 satellites soient visibles.

Tous les satellites sont équipés d'une horloge atomique et émettent simultanément sur deux fréquences appelées L1 et L2. Les messages émis sont codés et contiennent une série de données. On appelle cela le Pseudo Random Code ou PRC-code, chaque satellite ayant son propre code. L'armée utilise en plus un code secret spécial appelé P-code.

Dès que le récepteur reçoit le signal dont l'amplitude est plus faible que le bruit de fond, il essaye de détecter parmi tous les codes celui qui y correspond et qui identifie le satellite.

Les données suivantes sont, entre autres, toujours présentes: le numéro, la position, l'heure de l'émission du message, les éphémérides - c'est une table reprenant les différentes positions des corps célestes - et encore d'autres paramètres qui sont nécessaire au calcul de positionnement.

L'antenne au sol va recevoir les signaux de tous les satellites situés dans son champ de vision qui seront décodés. Le décodeur enregistre, sur base de son horloge interne, l'heure d'arrivée (TOA = Time Of Arrival) du message et calcule la distance à laquelle se situe l'antenne du satellite. Cette distance est égale à la vitesse de propagation des ondes radio (environ 300.000 km/s) multipliée par le temps. Cette durée vaut au moins $20.000/300.000 \approx 0.066$ secondes. On l'appelle une pseudo-distance ou en anglais un pseudorange. L'appellation pseudo est ajoutée

car cette distance calculée est entachée de quelques petites erreurs. Nous en reparlerons.

Si on peut recevoir les messages de trois satellites simultanément, il est théoriquement possible, par la trigonométrie sphérique, de calculer les coordonnées correctes de l'antenne sur la terre. Un quatrième signal de satellite est nécessaire pour éliminer les différences entre les horloges principalement entre l'horloge des satellites et celle du récepteur.

Le calcul de la position exacte de l'antenne de réception (hauteur et azimut) par rapport à un système de coordonnées centrales de la terre (résolution d'un système de 4 ou plus d'équations à 4 inconnues) n'est pas chose facile et demande des processeurs puissants pour les résoudre en un minimum de temps. On recherchera des méthodes afin de les simplifier.

III.2 La qualité d'une mesure GPS

La qualité d'une mesure est liée à sa précision. Si, théoriquement, il suffit d'une mesure basée sur uniquement trois satellites pour calculer les coordonnées, il apparaît en pratique qu'une telle mesure est absolument non fiable. Cela provient du fait que lors de la mesure une série d'erreurs interviennent. Ces erreurs seront expliquées en détails ci-dessous.

De plus, les récepteurs utilisés et leurs modèles de calcul ne sont pas équivalents. Ainsi la hauteur du satellite par rapport à l'horizon (son élévation) et la puissance du signal ont une influence on obtient une autre répartition des valeurs calculées en fonction du récepteur utilisé et du modèle de calcul implémenté.

III.3 La mesure GPS comme moyen de positionnement dans la signalisation.

Si on veut exploiter une mesure GPS pour localiser un train dans la signalisation, il faut démontrer que la qualité et l'intégrité des données satisfassent à la norme sévère SIL-4.

III.4 Techniques utilisées pour améliorer la qualité et donc la précision d'une mesure GPS

III.4.1 Simplification par élimination d'une dimension

– une coordonnée peut être considérée comme constante

Une simplification est envisageable s'il est possible de considérer une coordonnée comme environ constante. C'est le cas du trafic maritime où l'on admet que le niveau de la mer est partout à une même distance du centre de la terre. On passe d'un modèle 3-D à un modèle 2-D. Suite à la diminution du nombre des inconnues, le calcul est plus rapide et on a donc besoin de moins de satellites visibles pour déjà obtenir une précision suffisante.

- le trajet du mobile est connu

C'est le cas pour le trafic ferroviaire où on connaît d'avance le trajet. Il suffit de déterminer où le mobile se trouve sur le trajet. Cela permet d'utiliser l'algorithme 1-D (unidimensionnel) comme c'est le cas dans le projet Locomprol (voir Focus suivant). La prise en compte d'un seul satellite est théoriquement suffisante pour déterminer la localisation.

III.4.2 Exécution de plusieurs mesures

En cas de réception de plusieurs satellites, il est possible d'effectuer constamment des calculs par groupes de 4 satellites et de déterminer, grâce aux méthodes statistiques de la moyenne et des moindres carrés, le résultat le plus probable. Plus la puissance de calcul du récepteur est importante plus rapide sera l'obtention du résultat et plus le nombre de calculs par seconde sera élevé. Il est ainsi possible pour une mesure statique d'obtenir déjà une bonne précision grâce à un grand nombre de mesures.

Pour de nombreuses applications où une grande précision n'est pas requise et où la sécurité ne joue aucun rôle, cette méthode est amplement suffisante.

C'est entre autres le cas pour des terminaux portables et pour les GPS dans les voitures.

Remarques: dans les voitures, l'appareil GPS, certainement dans les installations les plus coûteuses, est couplé à un gyroscope et au compteur kilométrique. Cela permet d'encore indiquer la route dans les tunnels courts et de prendre en compte les changements de direction de la voiture.

Si on veut obtenir encore de meilleurs résultats, il est possible d'utiliser un récepteur équipé de filtres KALMAN. C'est un algorithme, basé sur l'intelligence artificielle, qui ne prend automatiquement pas en compte les résultats de mesure qui apparaissent manifestement comme non

plausibles suite à leur trop grande dérive. Naturellement ces récepteurs sont de nouveau un peu plus coûteux.

III.4.3 Utilisation du GPS différentiel

Cette méthode fait usage d'une seconde antenne située à un point bien défini. Si suite à une mesure correcte préalable ou grâce à l'Institut Géographique National les coordonnées exactes de ce lieu sont connues, on peut déterminer la dérive de la mesure GPS en ce point. Sur base de ces corrections, il est possible de déterminer avec grande précision la position des autres antennes situées dans un rayon maximum d'une quinzaine de kilomètres. Plus on s'éloigne de l'antenne de base, plus l'imprécision de la mesure augmente.

Cette méthode permet d'éliminer un dérangement du système GPS qui, certainement au début, était introduit sur les fréquences civiles par l'armée américaine.

Malheureusement, l'utilisation de moyens tels que le DGPS augmente à nouveau le coût de la localisation et cet avantage peut hypothéquer un système "low-cost" car il faut placer tous les 30 km une antenne qui doit disposer d'une alimentation et d'un lien au réseau de communication.

III.4.4 Utilisation des satellites de correction: le système EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) et du système WAAS (Wide Area Augmentation System)

Le manque de précision dû à de nombreuses erreurs constitua un frein à l'utilisation du système GPS pour certaines applications. C'est pourquoi l'ESA (European Space Agency), en attendant que le système GALILEO, prévu en 2008, soit opérationnel a développé son propre système, appelé EGNOS, lié à un satellite géostationnaire européen. En Europe, des mesures GPS sont effectuées en permanence en une série de points dont les coordonnées sont connues avec une grande précision. Les résultats de ces mesures, complétés avec les paramètres de correction nécessaires, permettent de neutraliser l'effet des erreurs sur lesquelles nous reviendrons plus tard. Toutes ces informations sont envoyées vers le satellite EGNOS qui les renvoie sur la même fréquence que les satellites GPS vers les récepteurs GPS.

Cela permet ainsi d'obtenir des mesures très précises. La réception des informations EGNOS est toutefois payante.

Pour obtenir des mesures d'une telle précision en Amérique ou en Asie, il faut utiliser un des deux satellites géostationnaires américains WAAS 1 ou 2.

Remarques:

- l'utilisation du **satellite EGNOS permet d'obtenir une précision** de l'ordre de quelques centimètres. Mais malgré sa grande précision, ce système ne permet pas encore d'atteindre la norme SIL4 requise en signalisation. Pour cette raison, le projet LOCOPROL/LOCOLOC n'a donc pas fait usage de ce satellite mais également pour des raisons d'augmentation des coûts.
- le projet **GADEROS** dont nous avons parlé dans l'édition précédente de Focus, utilise le signal EGNOS et atteint donc une grande précision. Ce projet peut être utilisé pour le suivi de manœuvres mais n'atteint pas la norme SIL4 et si on voulait l'atteindre des appareillages complémentaires seraient nécessaires et en augmenteraient à nouveau le coût.

IV Les erreurs de mesure GPS

IV.1 Erreurs des horloges.

Les horloges des satellites.

Les satellites sont équipés d'horloges atomiques. Elles travaillent sur une fréquence d'environ 10.23 MHz. et le plus petit intervalle de temps qu'elles peuvent donner est d'environ un 10 millionième de seconde. Cependant, il existe une petite erreur de synchronisation et des dérives entre les horloges des différents satellites. C'est pourquoi ces horloges sont maintenues sous le contrôle de la Master Control Station. Les corrections sont transmises sur la fréquence militaire L2. Pour les récepteurs L1 qui ne peuvent pas recevoir sur la fréquence militaire, les corrections sont transmises via un paramètre spécial. Ils peuvent donc utiliser cette correction. L'ordre de grandeur de l'erreur causée par le problème de non correction des horloges est estimé à 3 m maximum.

L'horloge du récepteur

Un deuxième gros problème est lié au fait que l'horloge du récepteur n'est pas synchronisée avec celle du satellite. L'installation d'une hor-

loge dans le récepteur est naturellement trop onéreuse. Il y a donc dans le récepteur une erreur sur le temps. Cela génère une 4^{ème} inconnue dans le système. Il faut donc recevoir au moins un 4^{ème} satellite et la résolution de ce système se complique et prend plus de temps. L'utilisation de l'algorithme 1-D (voir Focus suivant) permet d'éliminer cette faute.

IV.2. Erreurs dues à une mauvaise prévision des éphémérides des satellites

La prévision des trajectoires que les satellites vont suivre n'est pas toujours optimale.

Les corrections nécessaires sont transmises par les satellites dans leurs messages.

L'erreur maximale due à ce défaut est estimée à 4,2 m.

IV.3. Erreurs dues l'imperfection de la trajectoire circulaire des satellites: l'effet de relativité

Les satellites ne parcourent pas une orbite vraiment circulaire autour de la terre mais leur trajectoire est légèrement excentrée. Cela est dû à la force d'attraction du soleil et de la lune dont la position varie au cours de l'année. Cela provoque un petit effet relatif. La vitesse de la lumière est légèrement influencée par une variation de la gravité lors du mouvement du satellite autour de la terre. Des formules permettent de les calculer et de les corriger. Dans la littérature on peut trouver que l'influence maximale peut atteindre environ 70 nanosecondes. Cela correspond à une erreur d'environ 21 m.

IV.4. Erreurs causées par la rotation de la terre

Une autre petite erreur dont il faut tenir compte est la distance que parcourt l'antenne, suite à la rotation de la terre, durant le trajet du signal du satellite vers la terre. Cette erreur est fonction de la latitude (nord ou sud) à laquelle l'antenne se situe. A titre d'information: dans la littérature, on trouve que la vitesse de rotation officielle admise dans le système WGS-48 est de $0,72921151467 \cdot 10^{-4}$ rad/s.

Ici aussi naît une petite erreur due à la relativité du mouvement de l'onde radio par rapport à la terre. Elle est très petite et peut représenter au maximum 18,7 mm.

IV.5 Le problème lié à la situation atmosphérique: l'erreur troposphérique

Il est connu que la vitesse de propagation des ondes radio est légèrement ralentie et infléchie par les basses couches atmosphériques autour de la terre à cause de la variation de l'indice de réfraction. Ce phénomène est visible le soir au niveau du rayonnement solaire.

Cet infléchissement dépend de deux phénomènes physiques: la variation de la pression atmosphérique due à la gravitation et la présence de molécules d'eau. La variation de pression atmosphérique est fonction de la pression locale, de la latitude et de l'altitude à laquelle l'antenne se situe. La quantité d'eau dans l'atmosphère est fonction de l'humidité relative, de la température et de la pression atmosphérique du lieu.

L'angle d'incidence des ondes lors de leur traversée de l'atmosphère influence la longueur du trajet. Dans la littérature, on peut également trouver des formules concernant ce retard en fonction de la pression atmosphérique, de la température et de l'humidité relative au niveau de la mer.

Celui qui veut en savoir plus peut consulter l'ouvrage de référence suivant: Niell, A.E. 1995 Global mapping functions for the atmospheric delay at radio wavelengths VLBI Geodetic Technical Memo Np13, Haystack Observatory MIT, Westford. MA..

IV.6 Le problème lié à l'activité solaire: l'erreur ionosphérique

Les couches supérieures de l'atmosphère, l'ionosphère influence également la propagation des ondes radio car elle provoque une certaine dispersion.

Différents modèles existants permettent d'en définir l'influence. La hauteur du satellite par rapport à l'horizon et la durée du jour locale ou la période de l'année ont une influence.

Cette erreur ne peut qu'être mesurée si on utilise des récepteurs qui peuvent recevoir les deux fréquences. Le récepteur PolarX2 est dans ce cas. Dans l'autre cas on peut utiliser de formules empiriques qui tiennent compte de la latitude (nord ou sud) de la position de l'antenne.

Celui qui veut en savoir plus peut consulter l'ouvrage de référence de Niell, mentionné dans la paragraphe ci-dessus.

V. Diminution de la qualité d'une mesure

V.1 Diminution de la qualité de la mesure par un autre angle d'incidence

Tous les signaux n'étant pas reçus sous le même angle d'incidence, il y a aussi un problème de qualité de mesure des "pseudorange". On peut déterminer une distribution des mesures et via la déviation standard définir si la mesure est de qualité acceptable ou si elle doit être rejetée car elle dérive trop de la valeur attendue.

V.2 L'influence de la qualité du récepteur et le niveau de bruit

Le bruit et la résolution imparfaite du récepteur entraînent également de petites erreurs qui peuvent varier de 10 à 50 cm.

V.3. Problèmes de réflexions

La localisation de l'antenne joue également un rôle. Certainement en environnement urbain mais également en terrain vallonné, se pose la question si le signal de l'antenne est reçu directement ou si c'est un signal réfléchi. La distance d'un signal est en effet plus grande ce qui fausse la mesure. Dans un espace dégagé, cela pose peu de problèmes mais dans un environnement bâti avec de hautes constructions ou dans un relief montagneux avec des vallées cela constitue un problème.

Ce problème ne se pose pas en navigation aérienne ou maritime car, une fois dans les air ou en mer, il n'y a plus de buildings ou d'arbres. Ce n'est que le long des côtes ou à l'atterrissage que peuvent se poser de tels problèmes mais dans ces cas d'autres moyens sont disponibles tels qu'entre autres le radar pour déterminer la position en sécurité.

V.4. Effet de masque

L'effet de masque réside dans le fait que l'antenne du récepteur reçoit aussi bien un signal direct qu'un signal réfléchi. C'est le cas si des arbres bordent le tracé. Une partie des signaux parvient directement entre les arbres et une partie du rayonnement réfléchi par les arbres atteint également l'antenne.

Ce peut être également le cas si on utilise une antenne inappropriée.

Ce fut le cas pour l'antenne qui avait été installée sous la raquette de pantographe de l'automotrice 106 en vue relevé précis des caractéristiques de la voie. Une plaque d'environ un mètre

de diamètre a du être placé pour empêcher que l'antenne enregistre également des signaux réfléchis sur la toiture. L'utilisation d'une antenne circulaire permet de résoudre le problème mais s'en posent d'autres de nature aérodynamique auxquels elle est soumise à grande vitesse.

Ce problème ne se pose pas dans le monde de l'aviation où la coque de l'avion joue le rôle de blindage. Dans le monde de la navigation une antenne parabolique, étant donné la faible vitesse, est parfaitement utilisable.

V.5. Le problème de disponibilité des satellites

Comme les satellites parcourent deux orbites par jour, ils ne sont pas tous toujours visibles. A cela s'ajoute que leur orbite n'est pas parfaitement circulaire. De plusieurs orbites respectives peuvent se déplacer. La disponibilité ou "availability" du système consiste à mesurer le temps durant lequel les services sont disponibles. Pour un système de positionnement par satellites, cela dépend du nombre de satellites visibles que l'on peut recevoir et de leur position dans l'espace (bas sur l'horizon ou haut). Ainsi dans un environnement dégagé, le système présentera une beaucoup plus grande disponibilité que dans un environnement urbain ou accidenté. La puissance du signal ainsi que la qualité du récepteur (sensibilité et puissance de calcul pour reconnaître les signaux codés) jouent également un rôle. Le récepteur PolarX2 de Septentrio (prix supérieur à 5000 €) pouvait effectivement recevoir plus de satellites qu'un terminal GPS portable normal surtout pour les satellites situés légèrement au dessus de l'horizon.

V.6. Le problème de l'intégrité des satellites

Qu'en est-il de l'intégrité des données émises? Les émetteurs des satellites peuvent également présenter des erreurs et émettent-ils toujours les données correctes? On sait déjà qu'ils utilisent deux fréquences d'émission L1 et L2 et que les données d'une fréquence, la fréquence militaire, ne peuvent être déchiffrés que via un code secret. Comme le système est la propriété de l'armée américaine, ils peuvent à des fins militaires perturber les données des satellites sur les fréquences civiles.

L'état de santé des satellites – fonctionnent-ils tous? – et les erreurs sur les données émises ne sont pas directement transmis.

Ces dernières questions hypothèquent naturellement l'utilisation d'un tel système pour des fonctions de sécurité.

C'est pour cela que l'Europe veut rendre opérationnel le système Galileo. Ce système comprendra 40 satellites et son intégrité sera garantie par une communication immédiate de tous les dérangements au niveau des données transmises et des pannes des satellites.

VI. Solution des problèmes.

Pour pouvoir se servir du système GPS comme un outil dans une fonction de sécurité il faut qu'on trouve une solution pour les problèmes mentionnées ci dessus.

Pour cela le projet LOCOPROL fait appel à une combinaison de l'algorithme 1-D et les intervalles de confiance qui y sont liées. Cette procédure de travail sera expliquée dans le Focus suivant. ■

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