

Comment fournir un positionnement automobile continu et précis sur voie de circulation **Par Alex Ngi, Responsable produit, Stratégie produit pour la navigation à l'estime, u-blox**

Les récepteurs GNSS à bande unique actuellement à la pointe satisfont aux exigences de précision pour les systèmes V2X, ADAS et de conduite autonome dans des conditions idéales à ciel ouvert. Toutefois, pour offrir un service fiable en tout lieu et à tout moment, ils vont devoir surmonter leurs limites en milieu urbain et dans les autres environnements difficiles. Cet article montre comment il est possible d'y parvenir grâce à un système de navigation à l'estime RTK multi-bandes, employant des services de correction GNSS et un modèle de véhicule dynamique.

Le positionnement par satellite joue un rôle unique de facilitateur pour les applications V2X (vehicule-to-everything) et les systèmes d'aide à la conduite automobile ou ADAS (advanced driver-assistance systems), y compris les véhicules autonomes. C'est l'unique technologie capable de déterminer la position absolue d'une voiture en temps réel. Elle fonctionne indépendamment de toute carte, caméra ou repère de terrain. En raison de son principe fondamental de fonctionnement, totalement indépendant de toute autre technologie de détection (p. ex. LIDAR, caméras, ultrasons) utilisée dans les véhicules autonomes, le positionnement par satellite confère au réseau multi-capteurs une base et une ossature qu'aucune autre technologie ne peut fournir.

Les récepteurs des systèmes de positionnement par satellites ou GNSS (global navigation satellite system) sont en train de surmonter une à une les limites inhérentes à leur technologie. Les niveaux de précision se réduisent à quelques dizaines de centimètres et les délais de convergence (le temps nécessaire à un récepteur pour atteindre un niveau de précision défini après coupure et réacquisition du signal) se comptent en secondes. Les délais de latence (temps entre la mesure d'une position et sa transmission au réseau) sont approximativement de 10 millisecondes. Les mises à jour de position peuvent être délivrées bien au-delà de 10 Hz. Par ailleurs, grâce aux améliorations technologiques constantes, le positionnement fonctionne désormais au fond des canyons urbains, sous les structures routières multi-niveaux, ainsi que dans d'autres scénarios complexes.

En somme, le GNSS a atteint la maturité technologique requise pour l'ère des applications V2X et ADAS.

Les récepteurs GNSS n'ont cependant pas l'apanage de cette évolution. Conformément à la loi de Moore, le matériel nécessaire a pu être réduit à la taille d'une puce miniature, adaptée à des équipements grand public, portatifs et à faible consommation. L'omniprésence de la connectivité Internet sans fil a permis la mise en place de services de correction visant à améliorer la précision des systèmes GNSS en minimisant les effets des perturbations ionosphériques, la principale source d'erreurs en GNSS. Enfin, des investissements nationaux et internationaux dans le secteur spatial nous ont permis de bénéficier de nouvelles constellations de satellites, conçues pour des applications innovantes. Elles offrent notamment l'avantage d'un nombre accru de satellites disponibles (visibles) pour les récepteurs.

Ces avancées permettront la mise en circulation de véhicules dotés de récepteurs GNSS multi-bandes et multi-constellations de dernière génération, capables d'assurer une précision sub-métrique, pouvant aller jusqu'à quelques dizaines de centimètres selon les exigences de l'application.

Cependant, il ne suffit pas d'améliorer la précision du positionnement. Un faible temps de latence est une autre exigence critique des applications émergentes comme la communication V2X. En V2X, les véhicules communiquent entre eux ainsi qu'avec les infrastructures routières par l'intermédiaire de messages sans fil pour se transmettre des alertes et des informations sur les

manœuvres, négocier les priorités aux intersections, ainsi que lorsqu'ils se suivent ou qu'ils se dépassent.

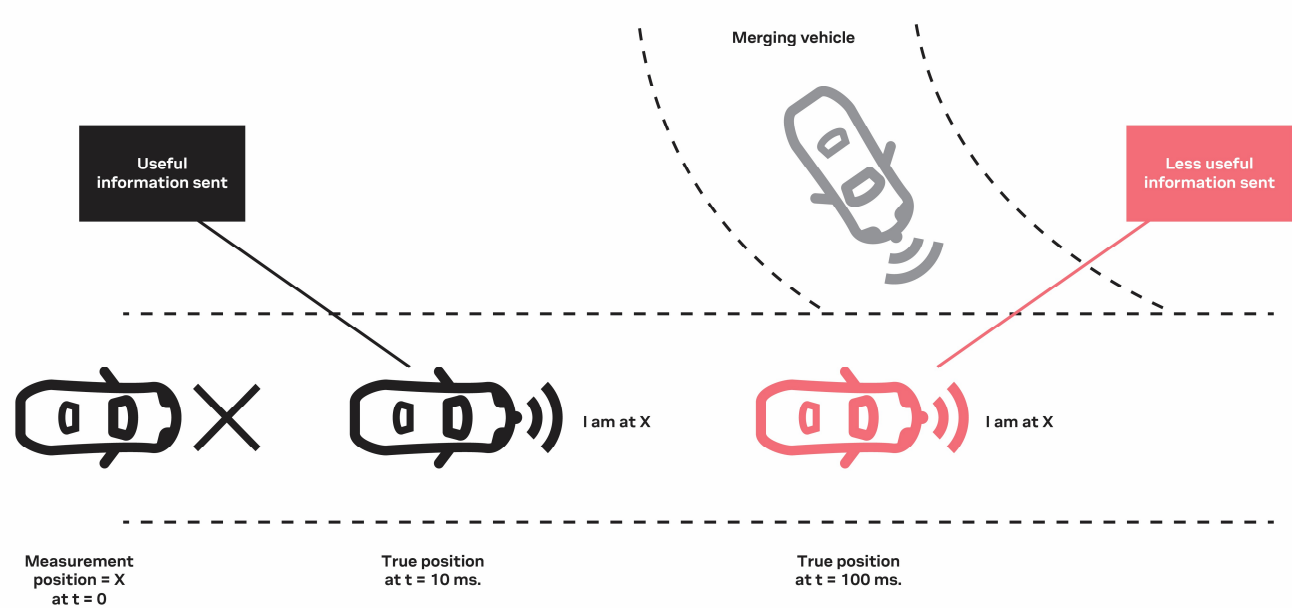


Figure 1 : Effet de la latence sur des cas pratiques en V2X.

Dans le meilleur des cas, un temps de latence trop long peut être gênant parce qu’il conduit à des freinages et des accélérations inutiles, réduit l’efficacité de la circulation des poids lourds en pelotons ou dégrade le confort des passagers. Au pire, il peut avoir des conséquences fatales, en particulier sur autoroute, où une voiture ne met qu’un dixième de seconde pour parcourir une distance équivalant à sa longueur. Le standard de l’Institut européen des normes de télécommunications ETSI (European Telecommunications Standards Institute) portant sur la communication V2X exige des temps de latence inférieurs à 100 millisecondes au niveau système pour la plupart des cas d’utilisation.

Application	Précision	Environnement	RTK requis	Multi-bandes requis	Latence
V2X	< 1 m CEP50	Urbain	Non	Oui	~10 ms
ADAS niveaux 1-3	< 20 cm CEP50	Urbain	Oui	Oui	~10 ms
ADAS niveaux 3-5	< 20 cm CEP50 + niveau de protection	Urbain	Oui	Oui	~10 ms

Tableau 1 : Ce tableau récapitule les exigences des différentes applications du marché automobile.

Remarque : Toutes les applications nécessitent une technologie de navigation à l'estime, incluant les informations des capteurs de tours de roues. La valeur CEP50 correspond au rayon du cercle contenant 50 % de l'ensemble des mesures de position.

Filtre avancé de fusion des capteurs à faible délai de convergence

Pour garantir la viabilité des systèmes ADAS, V2X et, à terme, de conduite autonome, les récepteurs GNSS doivent fournir un positionnement fiable et précis du véhicule sur la voie où il se trouve, y compris dans les environnements difficiles. En cas d'indisponibilité temporaire des signaux satellites, ils doivent rétablir un positionnement de haute précision en quelques secondes, ce qui est possible en combinant un certain nombre d'éléments complémentaires transmis à un filtre unique de fusion des données des capteurs, comme démontré ci-dessous.

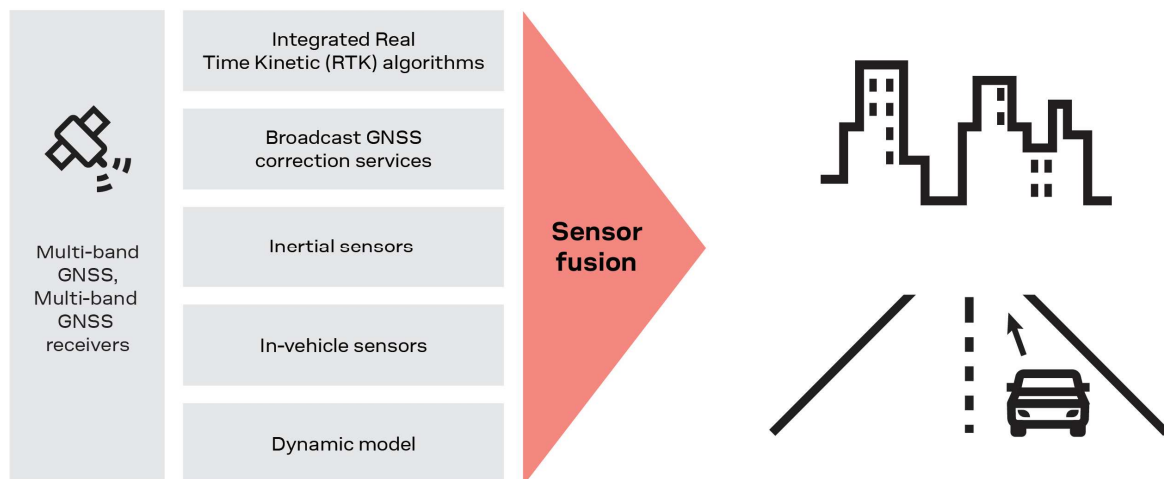


Figure 2 : Filtre unique de fusion des capteurs pour un positionnement de haute précision.

Récepteurs GNSS multi-bandes, multi-constellations : L'augmentation du nombre de constellations GNSS d'envergure mondiale d'une (GPS) à quatre (GPS, GLONASS, Beidou, Galileo) implique que, quel que soit leur emplacement, les récepteurs « voient » davantage de satellites. Ceci couvre amplement l'augmentation du nombre de satellites, requise par les récepteurs pour déterminer leur position sans ambiguïté : quatre pour une constellation unique, environ sept lorsque trois constellations sont utilisées (afin de calculer les différences d'heure entre les constellations, dont les heures de référence diffèrent foncièrement les unes des autres).

Outre un nombre accru de satellites, les récepteurs GNSS multi-bandes peuvent combiner des signaux de fréquences différentes, offrant chacun des avantages spécifiques pour les applications. À titre d'exemple, le traitement simultané de deux signaux de fréquences différentes élimine efficacement jusqu'à 99,9 % des erreurs ionosphériques. Une autre technique, dite combinaison geometry-free, contribue à détecter les glissements de cycle dans la phase de la porteuse. Toutes ces techniques sont uniquement possibles avec des récepteurs multi-bandes.

Algorithmes intégrés de positionnement cinématique en temps réel (RTK) : Alors que les récepteurs GNSS de précision standard suivent la phase de code des signaux d'au moins quatre satellites GNSS pour effectuer une triangulation de leur position, les récepteurs GNSS de haute précision suivent la phase de la porteuse haute fréquence. Afin de résoudre les ambiguïtés dans la phase de la porteuse, les récepteurs GNSS de haute précision utilisent des algorithmes de positionnement cinématique en temps réel (RTK), qui sont parfois intégrés au module récepteur GNSS. Les algorithmes RTK font largement appel aux données de correction délivrées via une connexion sans fil. Les communications cellulaires et satellitaires basées sur la bande L sont idéalement adaptées au marché automobile. En plus d'économiser les coûts de transmission de données, les récepteurs de bande L peuvent réceptionner les données de correction RTK par satellite, même en zone rurale où les connexions cellulaires sont mauvaises voire impossibles.

Diffusion de services de correction GNSS : Les fournisseurs de services de correction GNSS évaluent en permanence les erreurs de signaux GNSS en les surveillant grâce à un réseau de stations de base. Les services de positionnement RTK ponctuel précis (PPP) compensent par exemple les erreurs d'horloge des satellites, d'orbite, de distorsion de signal, les erreurs ionosphériques globales, ainsi que les effets ionosphériques et troposphériques régionaux. Idéalement, les corrections devraient être valables sur de grandes régions, telles que la zone continentale des États-Unis, et nécessiter un minimum de bande passante. Alors que les services existants envoient un flux de correction adapté aux utilisateurs individuels sur la base d'une estimation de position approximative, les fournisseurs de services modernes adoptent une approche plus évolutive, consistant à diffuser le même modèle d'erreur GNSS dynamique à l'ensemble de leurs utilisateurs.

En plus d'accroître la précision des récepteurs GNSS, des données de correction de qualité supérieure réduisent le temps nécessaire au récepteur pour converger vers une estimation de position précise. Ceci revêt une importance critique dans les environnements de conduite normaux comprenant des obstacles aériens, tels que des viaducs, des panneaux autoroutiers, des arbres et des ponts, susceptibles d'interrompre momentanément les signaux GNSS.

Capteurs inertiels et fusion des capteurs : Les capteurs inertiels sont utilisés depuis plusieurs années déjà pour optimiser les récepteurs GNSS. En rendant possible la navigation à l'estime, ils permettent aux systèmes de positionnement des véhicules de combler les coupures GNSS que les récepteurs peuvent rencontrer dans les tunnels, les parkings souterrains ou d'autres environnements complexes bien que courants. En fusionnant les données collectées par les composants individuels de l'unité de mesure inertielle (IMU), le module de positionnement peut continuer à fournir une estimation de position dans les environnements bouchés, où le signal GNSS ne passe pas.

Les capteurs inertiels et la fusion des données des capteurs aident la solution de positionnement à maintenir des informations de position et de vitesse lorsque la réception du signal GNSS est brièvement interrompue. Ceci réduit le délai de rétablissement – c'est-à-dire le temps nécessaire pour résoudre les ambiguïtés dans la phase de la porteuse – lorsque les signaux satellites sont à nouveau disponibles par rapport aux solutions GNSS pures.

Capteurs embarqués : La prise en compte des données des capteurs embarqués dans les véhicules, tels que les capteurs de tours de roue, améliore les performances de la solution de navigation à l'estime. Les algorithmes peuvent rejeter les changements de position rapportés par les inexactitudes du GNSS (dus au blocage du signal) simplement en sachant que la roue n'a pas bougé. Un relevé de vitesse pondéré avec les informations du capteur de tours de roue est plus fiable qu'un système basé sur l'intégration des mesures imprécises d'un accéléromètre. En outre, l'étalonnage des capteurs visant à déterminer la distance parcourue à chaque révolution

s'effectue en continu et forme un cycle vertueux, capable de tenir compte des infimes différences entre les pneus d'hiver et d'été.

Modèle dynamique : Un modèle dynamique du véhicule limite l'impact des erreurs de mesure sur la position rapportée. Le modèle suppose que le véhicule ne glisse pas latéralement, ne saute pas verticalement et n'accélère pas de façon déraisonnable. Toutes les mesures GNSS font l'objet d'un contrôle de plausibilité avant d'être utilisées dans le filtre de navigation.

Quantification des performances dans les tunnels

Mesurer les performances de la solution décrite ci-dessus dans les tunnels est un véritable défi. Pour commencer, la principale source d'erreur est liée aux biais des capteurs, qui ont tendance à s'accumuler lorsqu'ils sont intégrés pour dériver la vitesse (accéléromètres) et le comportement (gyroscopes) du véhicule, en raison de phénomènes essentiellement stochastiques plutôt que systématiques. Afin de décrire correctement leurs effets, un nombre statistiquement représentatif de tunnels doivent être parcourus afin de collecter des données. Deuxièmement, il n'y a pas de position « vraie » évidente, à laquelle comparer les mesures. Idéalement, une technologie de positionnement alternative, basée sur un principe totalement différent, devrait être utilisée dans ces tunnels en tant que référence insensible au masquage du ciel. Enfin, même les coûteux systèmes de référence à base de capteurs d'inertie dérivent dans une certaine mesure.

Plutôt que de tester la configuration par rapport à un système de vérité dans les tunnels réels, nous avons commencé par créer des tunnels virtuels à l'aide des données recueillies à ciel ouvert. Pour ce faire, nous avons « débranché » le récepteur GNSS pour simuler une coupure du GNSS et forcer le système à fonctionner en mode de navigation à l'estime. Ceci nous a permis de comparer les performances de l'unité de mesure inertielle (IMU) par rapport à une configuration de vérité supérieure. La consignation des relevés de la solution de navigation à l'estime et du récepteur GNSS de référence de pointe nous a fourni les données nécessaires pour reproduire des tunnels de différentes longueurs sur des échantillons de portions d'un certain jeu de données. Cette astuce simple a délivré une série de simulations suffisamment étoffée pour évaluer les performances de manière significative d'un point de vue statistique.

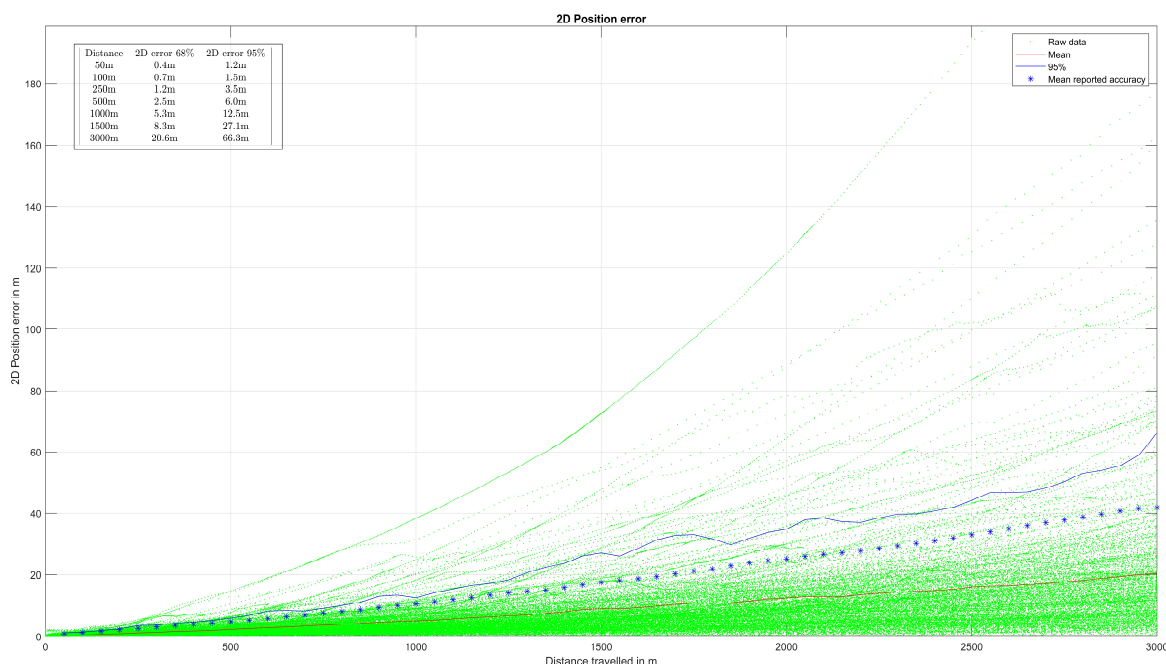


Figure 3 : Erreurs de positionnement en navigation à l'estime.

Le graphique ci-dessus, issu de l'analyse des données de 1758 coupures générées sur 31 simulations, nous a permis de déterminer que notre taux d'erreur de positionnement en fonction de la distance parcourue était d'environ 2 % en mode de navigation à l'estime. En d'autres termes, le défaut de positionnement horizontal augmentait en moyenne de 20 mètres par kilomètre parcouru. Il convient de noter que les performances de l'IMU affectent fortement les résultats des tests du tunnel. Dans notre configuration, nous avons utilisé une IMU de performances moyennes plutôt qu'une unité de pointe.

Éprouvé et testé sur l'asphalte

Les simulations en tunnel n'étaient qu'une partie d'une série plus importante de tests d'équipements. Pour valider que la combinaison de technologies décrite – à savoir un récepteur GNSS multi-bandes et multi-constellations avec des algorithmes RTK intégrés, des données de correction GNSS diffusés, une unité IMU pour la navigation à l'estime, un capteur externe de tours de roue et un modèle dynamique de véhicule – fournit un positionnement fiable et précis sur la voie, nous l'avons également testée avec un certain nombre de scénarios de complexité variable. En raison de la nature stochastique des erreurs du système GNSS et de l'unité IMU, des simulations isolées peuvent générer des performances aussi bien supérieures qu'inférieures aux résultats présentés ci-dessous.

Un récent parcours sur autoroute, majoritairement à ciel ouvert – nos conditions de test les moins difficiles –, a confirmé que notre solution offrait une disponibilité de 100 % et était précise à 5,8 centimètres près 50 % du temps. La composante de vitesse horizontale était précise à 0,02 km/h près 68 % du temps.

Durant notre test, nous avons relevé un écart considérable entre un RTK fixe (ambiguïtés entières de la phase de la porteuse résolues), un RTK flottant (ambiguïtés entières de la phase de la porteuse non résolues) et la navigation à l'estime avec des chiffres respectifs de 82 %, 14,8 % et 3,1 %. Globalement, la précision de la solution a été multipliée par dix par rapport à la technologie existante des récepteurs à bande unique. Il convient toutefois d'avertir que les comparaisons absolues entre un RTK fixe et flottant peuvent être trompeuses. Pour un récepteur donné, c'est un bon indicateur du niveau relatif de difficulté entre différentes pistes de test lors de l'évaluation de la précision atteinte. Le facteur de mérite est moins utile pour comparer deux récepteurs.

Les résultats des tests menés à ciel ouvert sur autoroute et en milieu urbain classique à Paris ont révélé de remarquables améliorations de performances par rapport aux configurations non-RTK à bande unique. Dans le scénario de canyon urbain le plus défavorable, testé dans le quartier de La Défense à Paris, les performances sont restées supérieures aux exigences des applications V2X. Bien que le récepteur GNSS ait été incapable de résoudre totalement les ambiguïtés entières de la phase de la porteuse, la CEP68ⁱ était d'environ 1,10 mètre, pour une solution précise à au moins 1,70 mètre près 95 % du temps. Ce scénario montre clairement comment la technologie utilisée peut améliorer les performances de positionnement dans les environnements urbains les plus difficiles.

Pour finir, nous avons testé les performances dans un tunnel de deux kilomètres à Göteborg, en Suède, où notre solution a obtenu de meilleurs résultats que lors de nos simulations approfondies. À 1 % de la distance parcourue, la dérive était 50 % moins importante que prévu. En outre, le retour au niveau de précision de positionnement sur la voie n'a pris que deux secondes. Cette rapidité de convergence est le fruit de la combinaison de plusieurs facteurs comprenant des récepteurs GNSS multi-fréquences, des services de correction GNSS et une estimation

relativement précise de la position déduite de la navigation à l'estime. Le positionnement précis sur la voie n'est clairement pas maintenu dans les tunnels de grande longueur. Dans ce type de scénario, les véhicules hautement automatisés et sans conducteur peuvent toutefois compenser ce manque de précision à l'aide de technologies de positionnement complémentaires.

Scénario	À ciel ouvert	Milieu urbain	Canyon urbain
CEP50 en mètres	0,05	0,65	0,81
CEP68 en mètres	0,07	0,85	1,11
CEP95 en mètres	0,13	1,83	1,70

Tableau 2 : À ciel ouvert : trajet autoroutier en Bourgogne, milieu urbain : arrondissements 12-16 de Paris, canyon urbain : quartier de La Défense à Paris

Une valeur ajoutée évidente pour le GNSS automobile

En conclusion, les solutions combinant des récepteurs GNSS multi-bandes et multi-constellations avec des algorithmes RTK intégrés, des données de correction GNSS diffusées, une unité IMU pour la navigation à l'estime, un capteur externe de tours de roue et un modèle dynamique sont en mesure de fournir un positionnement continu et précis sur la voie, même dans les environnements les plus difficiles. Ce dispositif peut être encore amélioré en fusionnant les informations issues d'autres capteurs de véhicules, tels que des caméras et des radars. Tout cela contribuera à rendre nos systèmes de transport plus sûrs, plus confortables et plus efficaces. La technologie GNSS complétée de la navigation à l'estime est ainsi opérationnelle pour les applications automobiles avancées.

Nous avons trouvé les moyens de multiplier par dix les performances des technologies existantes en termes de précision. La continuité de service en environnement urbain est obtenue grâce à une puissante combinaison de récepteurs GNSS multi-bandes et multi-constellations, capables d'optimiser la visibilité des satellites dans les scénarios de blocage partiel, à la navigation à l'estime pour combler les courtes coupures de réception GNSS, ainsi qu'à des services de correction GNSS assurant un rétablissement rapide en cas de brèves interruptions GNSS. Compte tenu de leur précision et de leur couverture globale, ainsi que du fait que le GNSS est l'unique source de vérité absolue en matière de position et de temps, l'intégration de ces technologies ne peut que profiter aux applications automobiles avancées.

ⁱ Dans ce contexte, une CEP68 (erreur circulaire probable de 68 %) de 1,1 mètre signifie que 68 % des relevés se situent dans un rayon de 1,1 mètre autour de l'emplacement réel du récepteur GNSS sur une surface à deux dimensions.