



expérimentations
navettes autonomes

Etude de Nouvelles aides à la Localisation pour la Navette autonome

Ce projet a été financé par le Gouvernement dans le cadre du Programme d'investissements d'avenir désormais intégré à France 2030, et opéré par l'ADEME



Appel à projet EVRA Expérimentation du véhicule routier autonome
Convention de contractualisation n° 1982C0050

Projet labélisé par



Information

Livrable L2.1.1

Version 1.0 : Approuvée Copil ENA

Date : 01.03.2023

Niveau de diffusion : Public

Auteurs

Matossouwé Agninoube Tchalim – Université G. Eiffel

David Bétaille – Université Gustave Eiffel

Sio-Song Ieng – Université Gustave Eiffel

Jean-Philippe Tarel – Université Gustave Eiffel

Relecteurs

Philippe Vezin – Université Gustave Eiffel

Astrid Bocher – Université Gustave Eiffel

Coordinateur

Philippe Vezin – Université Gustave Eiffel

Université Gustave Eiffel

Cité des mobilités - 25 av. François Mitterrand, Case 24

69675 Bron Cedex

France

Tel: +33 4 72 14 23 79

Email : philippe.vezin@univ-eiffel.fr

www.experimentations-navettes-autonomes.fr

Avertissement

Les informations contenues dans ce document sont fournies « en l'état » et aucune garantie n'est donnée quant à leur adéquation à un usage particulier. Les membres du consortium ne seront pas responsables des dommages de toute nature, y compris, sans limitation, les dommages directs, spéciaux, indirects ou consécutifs qui peuvent résulter de l'utilisation de ces matériaux, sous réserve de toute responsabilité obligatoire en raison de la loi applicable. Bien que les efforts aient été coordonnés, les résultats ne reflètent pas nécessairement l'opinion de tous les membres du consortium ENA.

© 2020 Consortium ENA

RESUME EXECUTIF

Dans la Tâche 2.1. du projet ENA, l'objectif était de travailler sur deux nouvelles aides pour la navette autonome en termes de localisation : aide par un système de bord de voie et aide par le service Galileo précis.

Système de bord de voie

Initialement, nous voulions tester un système d'observation du trafic par caméra pour faciliter la traversée de ronds-points très circulés par la navette autonome. Le consortium a choisi comme site d'expérimentation le cas d'usage de CASA qui a un grand rond-point. Cependant, ce rond-point était déjà équipé de feux intelligents. Sur ce site, les véhicules qui sortent soudainement du stationnement en bord de l'avenue Roumanille sont une situation à risques pour les conducteurs de véhicules ainsi que pour les navettes autonomes qui circulent le long de ces stationnements.

Dans la première partie de ce livrable, un système d'information coopératif original fondé sur le traitement d'image pour surveiller les véhicules stationnés le long de la route qui vont démarrer afin d'avertir la navette autonome de ces départs est présenté. L'avertissement doit être donné suffisamment à l'avance pour que la navette autonome puisse anticiper au mieux et poursuivre sa conduite en toute sécurité et confort. Après avoir décrit le système et le traitement informatique conçu par le département Composant et Systèmes (Cosys) de l'Université Gustave Eiffel, les résultats des tests sur l'efficacité, les limites et les caractéristiques du système proposé sont présentés.

Pour ce faire, ce système sur deux sites a été mis en place et testé avec des types de stationnement différents : emplacements en créneaux et en bataille pour plusieurs positions et orientations de la caméra. Ces tests permettent de faire des recommandations sur la meilleure façon d'installer le système et sur les performances auxquelles on peut s'attendre.

Service Galileo précis

Le positionnement par satellite est central dans la navigation de la navette autonome. Et la solution utilisée sur le site en Brenne, tout comme en agriculture de précision, repose sur des mesures d'interférence de phase entre le mobile et une (ou des) station(s) fixe(s). C'est la technique RTK ou NRTK, N pour Network, Real-Time Kinematic.

Dans le projet, en plus du matériel RTK, du matériel moins sophistiqué, de gamme « automotive », a été embarqué dans l'idée d'évaluer comparativement les précisions, comme décrit dans la deuxième partie de ce livrable.

A noter que ces matériels grand public bénéficieront à terme des corrections HAS (High Accuracy Service) de Galileo, lesquelles n'étaient pas disponibles à l'été 2022. Ces matériels ont donc été évalués en navigation standard.

TABLES DES MATIERES

1.	INTRODUCTION	1
2.	SYSTÈME DE DÉTECTION PRÉCOCE DES SORTIES DE STATIONNEMENT PAR CAMÉRA	1
2.1.	INTRODUCTION	1
2.2.	SYSTÈME D'INFORMATION BORD DE VOIE AVEC CAMÉRA.....	2
2.2.1.	Acquisition vidéo.....	3
2.2.2.	Détection et reconnaissance dans les images	3
2.2.3.	Suivi des détections dans les vidéos	4
2.2.4.	Détection précoce des véhicules sortants du parking	4
2.2.5.	Etalonnage intrinsèque de la caméra	5
2.2.6.	Etalonnage extrinsèque de la caméra	6
2.2.7.	Diffusion des avertissements	7
2.2.8.	Délai de traitement	7
2.3.	TESTS ET ÉVALUATIONS	8
2.3.1.	Erreurs d'étalonnage	8
2.3.2.	Délai de démarrage	8
2.3.3.	Performance de détection	10
2.4.	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	10
3.	LOCALISATION PAR GNSS RTK ET ALTERNATIVES.....	13
3.1.	INTRODUCTION	13
3.2.	ANALYSE DES SOLUTIONS CALCULÉES PAR LE MATÉRIEL DE NAVIGATION TRIMBLE	13
3.3.	ANALYSE DES SOLUTIONS CALCULÉES PAR LE MATÉRIEL DE NAVIGATION UBLOX.....	21
3.4.	CONCLUSIONS	33
4.	RÉFÉRENCES	35

1. INTRODUCTION

Jusqu'à présent, la conduite automobile repose sur la perception de la scène routière par les conducteurs, principalement avec leurs yeux. Chaque conducteur construit une représentation dynamique de son environnement local qui lui permet d'anticiper ses actions en fonction de ses objectifs de navigation. Les limites de la perception, comme la présence d'obstacles occultant une partie de la scène ou de brouillard diminuant la visibilité de la scène, les erreurs de détection, de reconnaissance, d'interprétation ou de compréhension de la scène peuvent conduire à des risques d'accident. Ces erreurs sont souvent dues à une surcharge des capacités cognitives pouvant avoir été réduites par l'état du conducteur, par exemple quand il est fatigué.

L'automatisation du pilotage aérien, qui a commencé à se développer dans les années 60 grâce à la conception d'automates, a montré des gains considérables en termes d'amélioration de la sécurité et en diminution du nombre d'accidents. Avec l'espoir d'une amélioration drastique de la sécurité, les travaux sur l'automatisation de la conduite automobile ont débuté beaucoup plus tardivement, limités par la capacité des systèmes de traitement des informations provenant des capteurs imitant les sens du conducteur, comme des caméras pour imiter les yeux du conducteur ou des micros pour imiter les oreilles. Il a fallu attendre le développement de l'informatique embarquée pour avoir les capacités de traitement nécessaires. Il reste que la perception de l'environnement a des limites intrinsèques qui ne permettent pas de réduire complètement tous les risques. Par exemple, un véhicule ne va pas pouvoir observer seul un piéton qui traverse la route, caché par un bus à l'arrêt. L'automatisation de la conduite ne passe donc pas forcément par la seule imitation des capacités perceptuelles du conducteur.

On dispose aujourd'hui de systèmes de localisation par satellites (GNSS- Global Navigation Satellite System) assez précis pour être utilisés pour différentes applications de navigation aérienne, maritime et terrestre qui apportent des informations absolues très précieuses pour répondre au besoin d'aller d'une origine à une destination. Si la conduite automobile repose en partie sur ce besoin de navigation, elle doit aussi répondre à beaucoup d'autres exigences, en particulier de sécurité, d'économie d'énergie, de confort... Au-delà de la navigation, la localisation par satellites permet, couplée à une carte, un suivi automatisé de la route. La localisation par satellites donne une information absolue : elle détermine par exemple la latitude et la longitude du véhicule, mais également son cap, sa vitesse...

L'accès à la localisation par satellites va bien au-delà des capacités sensibles d'un conducteur. Elle n'est pas trop dégradée par les conditions météorologiques mais peut être dégradée en zone urbaine dense à cause des occultations de satellites, des réflexions sur certains types de bâtiments et du phénomène de diffraction des ondes par les bâtiments. Pour assurer la précision de la localisation, les systèmes de localisation satellitaire sont couramment couplés à des capteurs fournissant des informations de localisation relatives et partielles comme la distance parcourue par le véhicule ou des informations d'accélération comme avec les capteurs inertiels.

Si le couplage de la perception depuis le véhicule et de la localisation par satellites est une fonction essentielle à l'automatisation de la conduite, elle ne suffit pas à une automatisation avec minimisation des risques et doit donc être combinée à d'autres capacités comme par exemple la télécommunication permettant de collecter des informations complémentaires sur l'environnement.

Nous présentons dans la suite deux améliorations imaginées au sein du département Composants et Systèmes de l'Université Gustave Eiffel et testées en collaboration avec les partenaires du projet ENA sur les deux expérimentations : la localisation de véhicule allant démarrer depuis le bord de voie et la localisation embarquée avec des alternatives au GNSS RTK (Real-Time Kinematic).

2. SYSTEME DE DETECTION PRECOCE DES SORTIES DE STATIONNEMENT PAR CAMERA

2.1. INTRODUCTION

Les intersections et les entrées sur route sont connues comme des points dangereux des réseaux routiers depuis plus d'un siècle. Diverses solutions ont été développées pour réduire le nombre d'accidents aux intersections et aux entrées, telles que les feux de circulation, les ronds-points et les rampes d'entrées pour autoroutes. Les véhicules qui sortent soudainement d'un stationnement au bord de la route sont plus difficiles à gérer par l'amélioration de l'infrastructure et induisent des situations à risques pour les conducteurs de véhicules ainsi que pour les navettes autonomes qui circulent le long de ces stationnements.

Des systèmes bord de voie fondés sur l'utilisation de caméras et capables de communiquer, aux usagers de la route, sur le trafic observé à des carrefours et des rond-points ont déjà été proposés, par exemple dans [1, 9]. L'objectif initial était de continuer à développer et tester sur un site expérimental le système d'observation du trafic par caméra permettant de faciliter la traversée de ronds-points très circulés par la navette autonome qui a été conçu dans le cadre du projet FUI Tornado. Le site expérimental de CASA a été retenu. Ce site a un grand rond-point mais qui était déjà prévu qu'il soit équipé de feux intelligents. Par contre, le problème des véhicules sortant soudainement de leur stationnement en bord de voie restait entier, comme cela avait été pointé par Eiffage.

En effet aucun système ne semble avoir été proposé, à notre connaissance, pour prévenir, de façon suffisamment anticipée, de la soudaine sortie de véhicules de leurs emplacements de stationnement en bordure de route. Des caméras sont utilisées par exemple pour une meilleure gestion des entrées, des sorties et de l'occupation des parkings fermés [2], mais pas pour le stationnement en bordure de voie. Dans [3], un véhicule équipé d'un capteur à ultrason fixé sur son côté a été utilisé pour collecter les statistiques d'occupation des emplacements libres de stationnement en bord de route.

Nous proposons donc un système original dont l'objectif premier est d'améliorer la sécurité de conduite des navettes autonomes en circulation en diffusant localement des informations sur les véhicules allant sortir de leur emplacement de stationnement. Ces informations recueillies par la navette autonome lui permettent d'améliorer sa connaissance de son environnement, et peuvent ainsi être utilisées afin de prendre des décisions de conduite plus efficaces, plus sûres et plus confortables. Le système proposé peut également être utilisé à des fins de surveillance du trafic pour collecter les statistiques d'occupation des emplacements de stationnement en bordure de route.

Le système d'information dédié à la détection des sorties de parking en bordure de voie que nous avons conçu est fondé sur une ou plusieurs caméras reliées à une unité de traitement et de communication capable de diffuser des messages d'avertissement précoces aux navettes autonomes. Dans la première partie, le système d'information fondé sur la caméra et les algorithmes de traitement vidéo sont décrits. Dans la partie suivante, nous décrivons les tests réalisés sur deux sites expérimentaux dans les villes de Biot (CASA) et de Champs-sur-Marne et les limites et performances atteintes.

2.2. SYSTEME D'INFORMATION BORD DE VOIE AVEC CAMERA

Nous avons conçu un système d'information avec une caméra qui est capable de détecter les véhicules sortant des emplacements de stationnement en bordure de voie et capable de diffuser localement un avertissement précoce en direction de la navette autonome. L'objectif de ce système d'information est de diffuser la position précise des véhicules sortant de leur place de stationnement en bordure de voie et l'heure de détection.

Comme le montre la Figure 1, le système d'information consiste en :

- une caméra dans un boîtier étanche fixée sur un mât à une hauteur minimum de 6 mètre,
- un ordinateur relié à la caméra pour faire l'acquisition et le traitement vidéo, également dans un boîtier étanche fixé au mât,
- une unité de communication de bord de voie pour envoyer des messages d'avertissement à la navette autonome.



FIGURE 1 : LE SYSTEME D'INFORMATION CONSISTE EN UNE CAMERA FIXEE A UN MAT ORIENTE VERS LES EMPLACEMENTS DE STATIONNEMENT EN BORDURE DE VOIE, ICI A BIOT SUR L'AVENUE ROUMANILLE. LA CAMERA EST RELIEE A L'UNITE DE TRAITEMENT VIDEO PROTEGEE DANS UN BOITIER ETANCHE. POUR LA COMMUNICATION, UNE UNITE DE BORD DE ROUTE EST AUSSI CONNECTEE A L'UNITE DE TRAITEMENT (AJOUTEE ENSUITE SUR L'IMAGE).

Plus l'information prévenant de la sortie d'un véhicule de sa place de stationnement est diffusée tôt, plus la navette autonome peut évaluer efficacement les risques et réagir au mieux. Le temps de détection est une information importante qui doit aussi être diffusée, en même temps que la position du véhicule qui va démarrer. Le délai entre le moment où l'avertissement est reçu par la navette autonome et le moment où le véhicule démarre est donc le principal paramètre critique du système qui détermine son utilité. Un autre paramètre critique est la fréquence à laquelle les avertissements sont actualisés. Ce délai de communication peut être inférieur au délai de détection si un parallélisme est mis en place entre l'acquisition, le traitement et la communication.

2.2.1. Acquisition vidéo

Suivant la longueur du parking en bordure de voie et du fait du champ de vision limité qu'il est possible de traiter correctement, plusieurs caméras peuvent être nécessaires à installer pour avoir une couverture complète du parking. Nous avons étudié deux positions et orientations de caméra : parallèle ou perpendiculaire à l'axe de la route. La caméra doit être installée à plus de 6 mètres au-dessus du sol pour éviter l'occlusion par les camions ou les bus qui sont de tailles élevées. L'objectif de la caméra doit avoir une distance focale fixe et son champ de vision doit être sélectionné pour ne pas couvrir plus que les emplacements de stationnement d'intérêt. Nous avons expérimenté deux types de stationnement en bordure de voie : en créneaux et en bataille.

La caméra doit être dotée d'un diaphragme et d'un réglage du gain automatique pour s'adapter à la variété des conditions d'éclairage, ou mieux être HDR (High Dynamic Range). La caméra peut être connectée à l'ordinateur par un câble IP jusqu'à une longueur de 100 mètres (éventuellement avec l'alimentation par injecteur PoE - Power over Ethernet) ou par un câble USB jusqu'à 5 mètres. Chaque image doit être horodatée par la caméra au moment de l'acquisition, sauf si la transmission est suffisamment rapide (quelques millisecondes) pour permettre un horodatage par l'ordinateur connecté. Les horloges sur la caméra et sur l'ordinateur doivent être synchronisées, en utilisant NTP (Network Time Protocol) ou PTP (Precision Time Protocol) pour plus de précision. Pour la diffusion wifi, l'horloge de l'ordinateur doit être synchronisée avec l'heure GPS.

2.2.2. Détection et reconnaissance dans les images

La vidéo capturée par la caméra est transmise à l'ordinateur pour effectuer la première étape du traitement qui consiste à détecter dans chaque image de la vidéo les véhicules et les piétons observés. Pour cela, nous avons testé la détection et la reconnaissance à l'aide du réseau neuronal convolutif (CNN) bien connu nommé YOLO (You Only Look Once) qui a l'avantage d'être efficace et rapide [4]. YOLO prédit à la fois une carte de probabilité de la présence des objets d'intérêt, plusieurs boîtes englobantes possibles autour de ces objets et des classes potentielles.

L'image d'entrée est divisée en une grille et un nombre réduit de centres d'objet sont prédits dans chaque élément de la grille. Pour chaque centre, plusieurs boîtes englobantes sont prédites ainsi que la classe. Les boîtes englobantes trop proches sont ensuite fusionnées à l'aide de la mesure IoU (Intersection over Union). L'apprentissage consiste donc en l'optimisation de la somme des fonctions d'erreurs suivantes : l'erreur de reconnaissance de la classe, l'erreur sur la position de la boîte englobante et l'erreur sur la présence d'un objet d'intérêt.

Nous avons expérimenté avec la version 5 de YOLO (YOLOv5) qui est plus facile à interfacer dans une chaîne de traitement que les versions précédentes. Les détections se présentent sous la forme de boîtes englobantes avec une étiquette de classe. Nous avons réduit le nombre de classes de 80 à cinq : piéton, voiture, vélo, moto, camion/tracteur/bus.

Nous avons aussi effectué un raffinement de l'apprentissage sur notre propre jeu de données étiquetées pour améliorer les performances de détection et de reconnaissance sur des lieux sélectionnés. Notre jeu de données étiqueté a été construit à partir d'images extraites de quelques vidéos de la caméra sur site. Les images ont été sélectionnées afin d'inclure divers véhicules et diverses positions dans les emplacements de stationnement en bordure de route. Ces images ont été annotées à l'aide de l'outil YOLO_mark.

2.2.3. Suivi des détections dans les vidéos

La détection étant effectuée sur chaque trame de la vidéo, les objets détectés doivent être suivis le long des trames afin d'estimer la vitesse.

Nous avons utilisé Deep SORT [5] pour le suivi d'objets dans des images successives car il est rapide et fiable après un réglage fin des paramètres en fonction des caractéristiques du champ vu par la caméra. Deep SORT consiste en deux étapes : une étape de prédiction utilisant un filtre de Kalman linéaire suivie d'une étape d'association entre les nouvelles détections et les pistes existantes à l'aide de l'algorithme hongrois [6]. L'étape d'association prend en compte la distance géométrique, la vitesse et la similitude visuelle entre les caractéristiques visuelles obtenues à partir de YOLO. Chaque objet nouvellement détecté se voit attribuer un nouvel index de suivi et il conserve son index jusqu'à ce qu'il quitte le champ de la caméra. Cependant, il peut ne pas conserver la même valeur d'index s'il est occulté trop longtemps. Les sorties résultantes sont des pistes avec boîte englobante, étiquette de la classe, index de suivi et vitesse. Pour chaque piste, l'âge d'apparition peut être calculé comme le nombre d'images depuis le début de la piste.

2.2.4. Détection précoce des véhicules sortants du parking

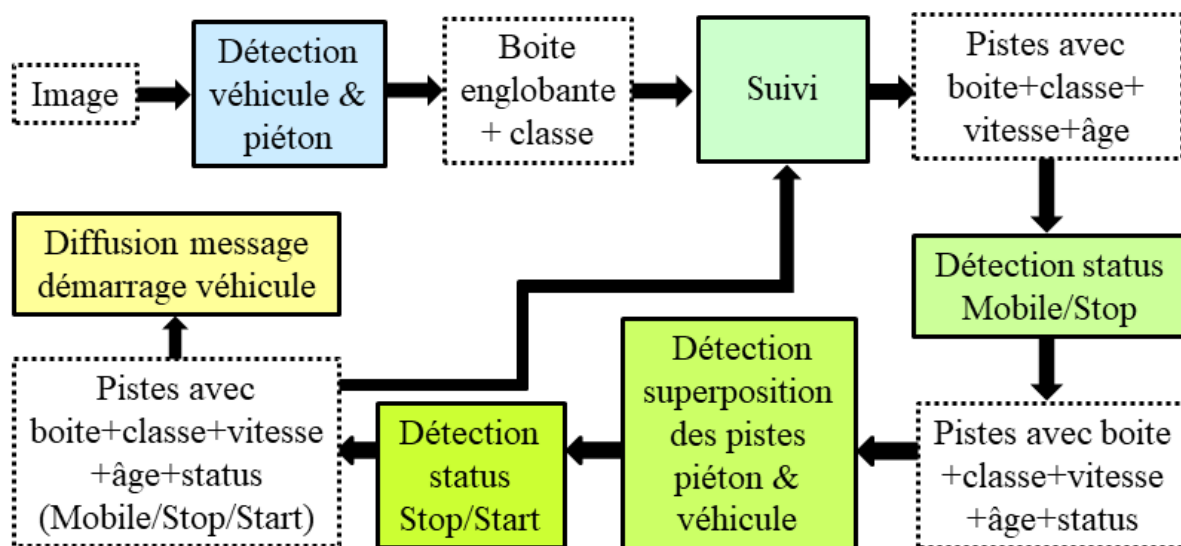


FIGURE 2 : LE TRAITEMENT VIDEO CONSISTE EN UNE DETECTION DES VEHICULES ET DES PIETONS, PUIS D'UN SUIVI. ENSUITE, LES PISTES SONT TRAITES POUR DETECTER QUAND UN PIETON ENTRE DANS SA VOITURE.

Pour réaliser une détection précoce, plutôt que de détecter le démarrage d'une voiture, notre idée est de détecter lorsqu'un piéton entre dans une voiture. En effet, le délai entre l'entrée d'un conducteur dans sa voiture et le démarrage de la voiture est supérieur à plusieurs secondes. Comme le montre la Figure 2, le statut d'une détection, en mouvement (statut 'Mobile') ou à l'arrêt (statut 'Stop'), peut être obtenu à partir de sa piste en fixant un seuil sur sa vitesse estimée.

Lorsque la piste de classe piéton se termine à proximité d'une piste de classe voiture à l'arrêt, on considère que l'entrée du conducteur est détectée. La proximité est obtenue avec un seuil sur l'IoU entre les boîtes englobantes. L'âge du piéton et de la voiture doivent être suffisamment grands pour les considérer lors du test, afin d'éviter d'être perturbé par les changements d'index de suivi dus à des occultations trop longues. Pour supprimer les faux positifs, les piétons détectés suffisamment proches d'un vélo ou d'une moto sont également écartés. Après la détection de l'entrée du conducteur dans une voiture, l'état de la piste de la voiture est défini comme allant démarrer, avec le statut 'Start'.

Nous avons également testé une variante où une contrainte supplémentaire est ajoutée : le statut du piéton doit être à l'état immobile avant de pouvoir envisager qu'il entre dans une voiture.

2.2.5. Etalonnage intrinsèque de la caméra

Pour pouvoir estimer la position au sol des véhicules détectés, la transformation réalisée par la caméra entre le sol et l'image doit être estimée.

La calibration intrinsèque de la caméra consiste à estimer les paramètres du modèle de la caméra tels que la taille des pixels, le centre de l'image et les distorsions. Nous avons utilisé le modèle sténopé de caméra (1) et (2) ajouté de trois termes de distorsion radiale (3) et (4).

Le modèle sténopé de caméra consiste en :

$$u = u_0 + \alpha_u x_u \quad (1)$$

$$v = v_0 + \alpha_v y_u \quad (2)$$

où (u, v) sont les coordonnées de l'image, (α_u, α_v) sont les tailles inverses de pixels, (u_0, v_0) est le centre de l'image et (x_u, y_u) sont les coordonnées projetées sur le plan image sans distorsions. Les coordonnées du plan image original sans distorsions sont liées par le modèle de distorsion radiale suivant :

$$x_u = x (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad (3)$$

$$y_u = y (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad (4)$$

où r est le rayon : $r^2 = x^2 + y^2$.



FIGURE 3 : LE RESULTAT NON DEFORME DE L'IMAGE DE L'ECHIQUIER UTILISE LORS DE L'ETALONNAGE INTRINSEQUE DE LA CAMERA AVEC OPENCV.

L'étalonnage intrinsèque de la caméra consiste à prendre plusieurs images de la même mire plane, voir Figure 3, pour un nombre suffisant d'orientations différentes [7]. Cet étalonnage n'est effectué qu'une seule fois avant que la caméra ne soit fixée dans son boîtier étanche.

2.2.6. Etalonnage extrinsèque de la caméra

La calibration extrinsèque de la caméra consiste à estimer la position et l'orientation de la caméra par rapport à un repère de référence au sol. Elle doit donc être effectuée in situ à chaque intervention sur la caméra.

Pour être en mesure de fournir des informations utiles de position sur les voitures, un système de coordonnées de référence partagé avec la navette autonome doit être utilisé, tel que celui utilisé dans le GPS. Nous utilisons le système de coordonnées de référence Earth Centered Earth Fixed (ECEF) qui est utilisé dans le GPS, et les coordonnées du plan tangent local East-North-Up (ENU).

L'étalonnage extrinsèque de la caméra consiste à sélectionner des points remarquables dans la scène tels que des pieds de panneaux de signalisation, des pieds de lampadaires et des angles de marquage au sol, au sol dans la scène et dans l'image vue de la caméra. Comme le montre la Figure 4, les coordonnées 2D de ces points dans l'image sont associées à leurs coordonnées 3D obtenues par exemple à partir d'un GPS RTK. À partir de cet ensemble de couples de coordonnées 2D et 3D, et connaissant les paramètres intrinsèques de la caméra, la position et l'orientation de la caméra sont estimées en minimisant l'erreur entre les coordonnées de l'image 2D et la projection sur l'image des coordonnées 3D. L'algorithme Simplex de Nelder-Mead [8] a été utilisé pour cette optimisation.

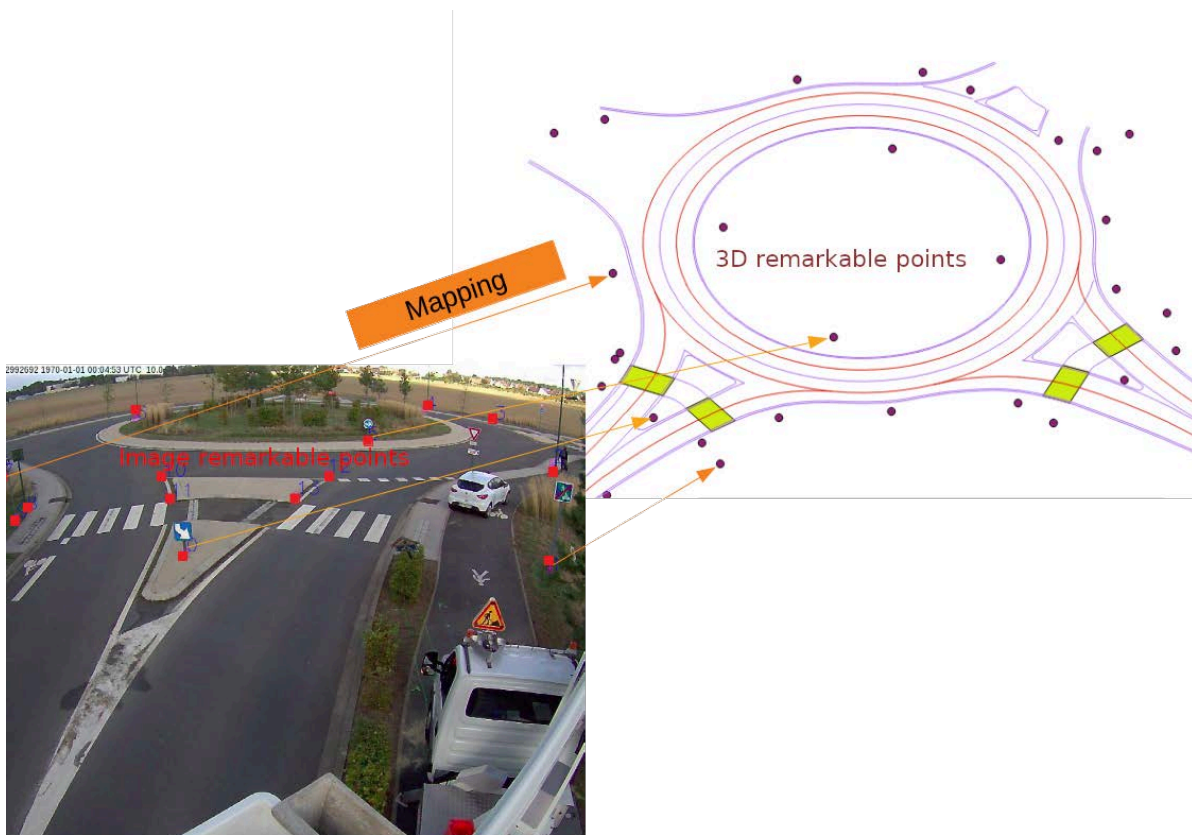


FIGURE 4 : LES COORDONNES 2D DANS L'IMAGE DES POINTS REMARQUABLES SONT ASSOCIEES A LEURS COORDONNES 3D POUR ESTIMER LA POSITION ET L'ORIENTATION DE LA CAMERA.

2.2.7. Diffusion des avertissements

Lorsque qu'un véhicule est détecté comme allant démarrer (piste de voiture avec statut 'Start'), un message d'avertissement est construit et diffusé. Ce message contient la position de la voiture, l'heure actuelle et l'heure d'entrée du conducteur.

La voiture étant détectée comme une boîte englobante dans l'image, même si à partir du calibrage intrinsèque et extrinsèque de la caméra il est possible de faire la rétroprojection sur le sol de cette boîte englobante sous la forme d'un quadrilatère, il faut décider de sa position centrale. La taille de la boîte englobante étant liée à la hauteur de l'objet détecté, nous avons décidé d'utiliser la rétroprojection du milieu du segment inférieur de la boîte englobante comme position détectée au sol. Une alternative est d'associer le véhicule à un emplacement de parking et d'envoyer la position centrale de l'emplacement associé ou l'empreinte au sol de l'emplacement de parking. C'est le choix que paraît le plus robuste.

Les messages d'avertissement sont diffusés à l'aide d'une unité de bord de route (UBR) comme celles de Lacroix City qui peuvent diffuser les informations sur 255 détections en utilisant le format Collective Perception Message (CPM), à la fréquence maximale de 10Hz.

2.2.8. Délai de traitement

TABLEAU 1 : LATENCE MOYENNE EN SECONDE ENTRE L'ACQUISITION ET LA CREATION DU MESSAGE POUR DIFFERENTES VERSIONS DE YOLO ET DIFFERENTS MODELES DE CAMERA (OU REGLAGE).

Caméra	YOLOv3	YOLOv5
Basler BIP2 1300C (10Hz)	0.543s	0.543s
Basler BIP2 1300C (30Hz)	0.206s	0.207s
Allied Vision Prosilica GT 1930 C		0.111s
Allied Vision Mako G192C		0.095s

En raison de la fréquence maximale de 10Hz de l'UBR, la période de rafraîchissement ne peut pas être inférieure à 0,1 seconde. Idéalement, la latence entre l'acquisition et la construction du message serait inférieure à 0,1 second. Comme indiqué dans le Tableau 1, cette latence n'est pas toujours atteinte. En utilisant une station Dell T7920 avec une carte GPU Nvidia Quadro RTX 5000, le temps de traitement de l'image est d'environ 0.008s. La latence est donc principalement due à l'acquisition par câble IP de la vidéo depuis la caméra et à la transmission des images. Cette latence dépend donc de la caméra utilisée et de son réglage. Nous avons testé trois modèles de caméras avec un réglage différent et avec deux versions de YOLO : version 3 et 5. La latence idéale de 0,1 seconde n'est pas systématiquement atteinte, même si elle est atteinte en moyenne avec la caméra Allied Vision Mako G192C. En effet, la latence est sujette à des variations, généralement avec un écart type de 10% de sa moyenne. La latence la plus faible est obtenue avec les caméras Allied Vision Mako G192C puis Allied Vision Prosilica GT 1920 C. Avec ces deux caméras, la fréquence maximale peut être atteinte grâce au parallélisme entre l'acquisition depuis la caméra et le traitement vidéo sur ordinateur. Avec la caméra Basler BIP2 1300C à 30 Hz d'acquisition d'image, seule une fréquence de rafraîchissement de 8 Hz a été obtenue.

Sur des ordinateurs moins puissants et gourmands en consommation électrique que la station Dell T7920, les temps de latence obtenus sont plus long en fonction de leur puissance de calcul.

2.3. TESTS ET EVALUATIONS

2.3.1. Erreurs d'étalonnage

Après étalonnage intrinsèque et extrinsèque de la caméra, l'erreur moyenne de rétroprojection sur l'image est généralement autour de 2 à 3 pixels. Ces valeurs sont relativement élevées mais cela s'explique par le nombre relativement réduit de points remarquables utilisés. Néanmoins, cela conduit à une précision de localisation au niveau du sol de quelques décimètres, ce qui semble suffisant pour localiser approximativement les véhicules dans leur parking.

2.3.2. Délai de démarrage

Des expérimentations ont été menées, sur deux sites :

- le long de l'avenue Roumanille dans la ville de Biot, CASA, grâce à la société Eiffage qui a conçu le boîtier étanche de l'ordinateur, qui a sélectionné le site et qui a installé le système sur le mât, voir Figure 1,
- le long du boulevard Newton dans la ville de Champs-sur-Marne qui est visible depuis notre laboratoire.

Seules les étapes d'acquisition et de traitement vidéo du système ont été testées sur site. La partie communication avec la réception par la navette autonome n'a pas pu être testée car la réception sur la navette Navya n'avait pas été prévue suffisamment en amont.

Sur le site de CASA, des données vidéo ont été enregistrées aussi continûment que possible sur une période allant de février 2022 à septembre 2022. Sur le site de Champs-sur-Marne, les données ont été enregistrées épisodiquement, en fonction des besoins de tests, sur les années 2021 et 2022.

L'évaluation de la détection précoce des voitures sortant de leur emplacement de parking a été réalisée sur une vidéo d'une durée de 7h30 acquise en une journée à Champs-sur-Marne, après construction manuelle de la vérité-terrain. L'évaluation a également été réalisée sur une vidéo de 7h30 acquise le 9 mai 2022 à Biot, CASA.

Un exemple de détection précoce est illustré sur la Figure 5 à Champs-sur-Marne et sur la Figure 6 à Biot, CASA, où les voitures en mouvement avec le statut 'Mobile ' sont en bleu, les voitures à l'arrêt avec le statut 'Stop' sont en magenta, les voitures allant démarrer avec le statut 'Start' sont en rouge et les piétons sont en vert.

Dans ces deux exemples, le conducteur est détecté entrant dans la voiture 30s et 20s avant que la voiture ne sorte effectivement de sa place de parking. Le délai entre la détection de la montée dans une voiture d'un piéton et le démarrage effectif du véhicule est très important à évaluer pour caractériser l'avance que peut donner notre système par rapport à un capteur qui détecte le démarrage effectif du véhicule. Nous avons observé un délai moyen entre l'entrée du conducteur et le démarrage de la voiture de 52s avec un écart type de 32s, à partir de 20 observations réparties sur les deux journées évaluées. Ce délai est plus grand que celui que nous espérons et il est largement suffisant pour permettre un traitement de la vidéo sur des ordinateurs peu puissants, pour permettre de diffuser les messages d'avertissement avec une fréquence réduite et pour permettre à la navette autonome d'anticiper pleinement les risques et de prendre des décisions de conduite plus efficaces, plus sûres et plus confortables.

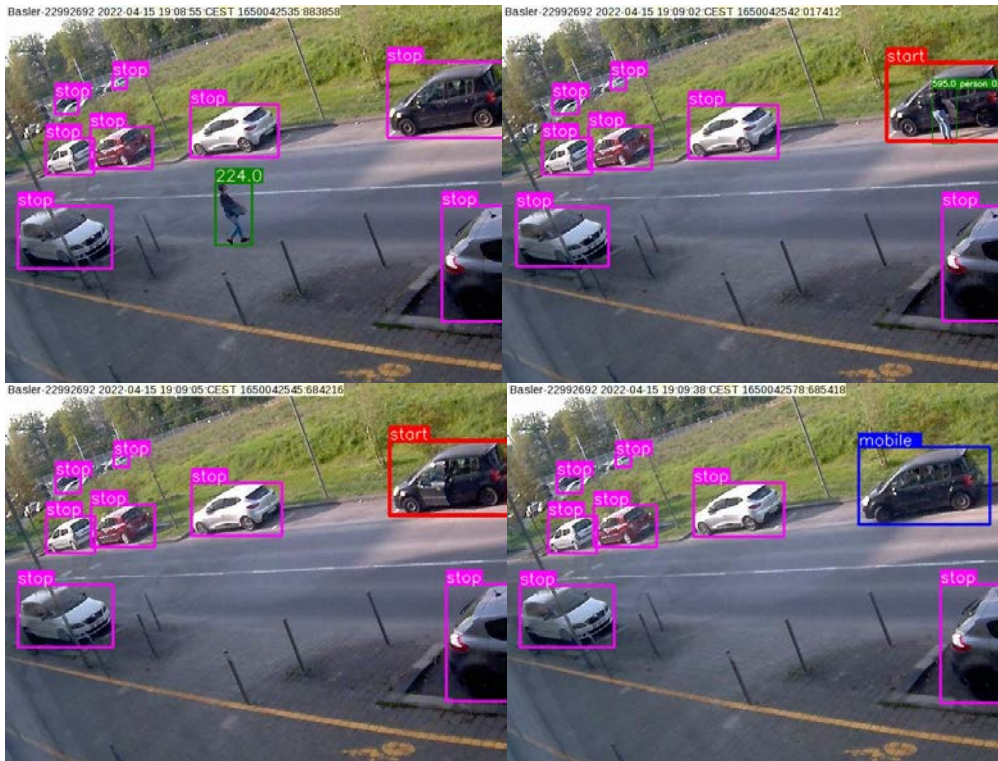


FIGURE 5 : DETECTION PRECOCE, 30S AVANT LA SORTIE, D'UNE SORTIE DE VOITURE A CHAMPS-SUR-MARNE, AVEC PARKINGS EN CRENEAUX EN BORDURE DE VOIES ET AVEC UN CAMERA ORIENTEE PERPENDICULAIREMENT A LA VOIE.



FIGURE 6 : DETECTION PRECOCE, 20S AVANT LA SORTIE, D'UNE SORTIE DE VOITURE A BIOT, AVEC LES PARKINGS EN CRENEAUX ET EN BATAILLE EN BORDURE DE VOIES ET AVEC UNE CAMERA DANS L'AXE DE LA VOIE.

2.3.3. Performance de détection

La caractérisation des performances du détecteur est importante à déterminer, en particulier en fonction du type de parking et en fonction de la position et orientation de la caméra, afin de pouvoir déterminer quels sont les configurations les plus avantageuses et la longueur de parkings qu'il est possible de surveiller avec une seule caméra. Un détecteur doit être évalué par sa précision et son rappel. Le rappel indique le pourcentage de situations à détecter qui ont bien été détectées par le détecteur. La précision indique le pourcentage de situations bien détectées sur l'ensemble des détections obtenues par le détecteur. L'objectif du système de détection des démarrages précoces depuis des emplacements de parking est d'avoir un rappel de 100%, c'est-à-dire ne rater aucun démarrage, et d'avoir la précision la plus élevée possible afin de minimiser les avertissements non pertinents.

Pour l'évaluation sur Champs-sur-Marne, la précision obtenue est de 58% et de 64% avec la variante du détecteur. Dans les deux cas, le rappel est de 100%. Tous les démarrages sont donc détectés avec peu de fausses alarmes grâce à la caméra perpendiculaire à la route qui permet d'observer clairement les entrées des piétons dans les voitures sur une longueur de 30 mètres de parkings en créneaux en bordure de voies, voir Figure 5.

Lorsque la caméra est dans l'axe de la voie, les voitures sont vues avec plus d'occultations, en particulier pour les emplacements de stationnement en épis et en bataille, voir Figure 6.

Ceci conduit à beaucoup plus de difficultés pour détecter correctement chaque véhicule et chaque piéton en particuliers quand ils sont entre deux véhicules. La variante de l'algorithme de détection qui fonctionnait mieux sur avec la caméra perpendiculaire n'est alors plus aussi efficace et les résultats se dégradent vite avec la distance d'observation.

Ainsi, sur l'avenue Roumanille à Biot, CASA, la précision est de 28 % et le rappel de 95 % sur la plage de distances de 30 mètres la plus proche, mais passe à 23 % et 92 % pour une plage de 60 mètres. Nous avons remarqué qu'il y a plus de difficultés sur la partie de parking en bataille, par rapport à la partie de parking en créneaux.

A partir de ces tests, nous avons donc conclu qu'il est nécessaire d'utiliser le système en plaçant la caméra perpendiculairement aux voies afin d'avoir la meilleure visibilité des véhicules et des piétons qui montent dans leur véhicule. Nous n'avons pas pu tester la situation où la caméra est perpendiculaire aux voies et les emplacements de parkings sont en bataille afin de vérifier le bon fonctionnement du système dans cette configuration. Nous avons aussi constaté que les piétons ne trop éloignés sont plus souvent mal détectés, il est donc préférable pour avoir les meilleures performances de traiter une longueur de 30m de parking par caméra.

2.4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Afin de traiter des situations à risques pour la navette autonome que sont les sorties soudaines des emplacements de parking en bordure de voie, nous avons décrit un système original basé sur une caméra et capable de diffuser des avertissements précoces sur les véhicules allant démarrer pour sortir de leurs emplacements de stationnement.

Le système proposé consiste en une caméra vidéo, un ordinateur pour le traitement vidéo et une unité de communication bord de voie pour diffuser les messages d'avertissement. Les

différentes étapes et algorithmes du traitement vidéo ont été décrits et discutés, en particulier la capacité de détection précoce, la rapidité du traitement et la fréquence de rafraîchissement.

Le système proposé a été évalué en termes de performances de détection pour des caméras perpendiculaires ou dans l'axe des voies, et pour différents types d'emplacements de stationnement : en créneaux et en bataille, depuis deux sites dans les villes de Biot, CASA et Champs-sur-Marne.

Des tests, nous avons conclu que notre système a besoin de bien voir la montée des piétons dans leur véhicule ; il est donc nécessaire d'orienter la caméra perpendiculairement aux voies. De bonnes performances sont obtenues en réalisant la surveillance par caméra sur des tronçons de parking d'une longueur de 30 mètres.

3. LOCALISATION PAR GNSS RTK ET ALTERNATIVES

3.1. INTRODUCTION

La navigation de la navette repose en grande partie sur son positionnement précis et sur une carte tout aussi précise. (Les systèmes additionnels de perception visent principalement l'arrêt de la navette quand un obstacle est présent.)

Ce positionnement précis est obtenu par NRTK, mode différentiel basé sur l'interférence de phase entre signaux satellites reçus au mobile et en des bases (des stations fixes) formant un réseau [10].

Nous évaluons la fiabilité de cette solution (partie 3.2).

Puis (partie 3.3), nous évaluons la précision d'une alternative, pour l'instant en positionnement standard multi-constellations, et à terme en PPP (Precise Point Positioning) dès lors que Galileo aura mis à disposition les corrections HAS (High Accuracy Service).

3.2. ANALYSE DES SOLUTIONS CALCULEES PAR LE MATERIEL DE NAVIGATION TRIMBLE

Une INS (Inertial Navigation System) est embarquée dans la navette autonome Milla qui a circulée sur l'expérimentation de Cœur de Brenne. En l'occurrence, un matériel Trimble, couplant navigation par satellites (GNSS - Global Navigation Satellite System) corrigée NRTK et hybridée à une centrale inertielle IMU (Inertial Measurement Unit). On parle de fusion (ou d'hybridation) GNSS inertielle.

La commande de la navette repose sur :

- la déviation entre position/vitesse/cap calculés par l'INS et la carte,
- les obstacles perçus le cas échéant par les capteurs embarqués.

En l'absence d'obstacles, on navigue finalement grâce à l'INS et la carte. Donc la qualité des solutions GNSS NRTK est déterminante. Toutes les constellations sont utilisées, à la fois le code et la phase poreuse. La phase permet de mesurer finement (au cm) le déplacement.

Les solutions GNSS NRTK sont calculées par le matériel Trimble embarqué (antenne et récepteur) au moyen de corrections NRTK (Network RTK) fournies par l'opérateur Orphéon, corrections transmises par le réseau « data mobile Orange ».

ARCH est la station du réseau Orphéon à laquelle les stations virtuelles RTK créées au fur et à mesure du roulage ont toutes été rattachées. Les stations virtuelles jouent le même rôle qu'une station RTK en agriculture de précision, station unique sur une exploitation, mais comme on parcourt ici plusieurs dizaines de kilomètres, on passe de station en station. Aucune de ces stations n'est matérielle : les corrections sont générées par calcul à partir du réseau Orphéon illustré sur la carte Figure 7.

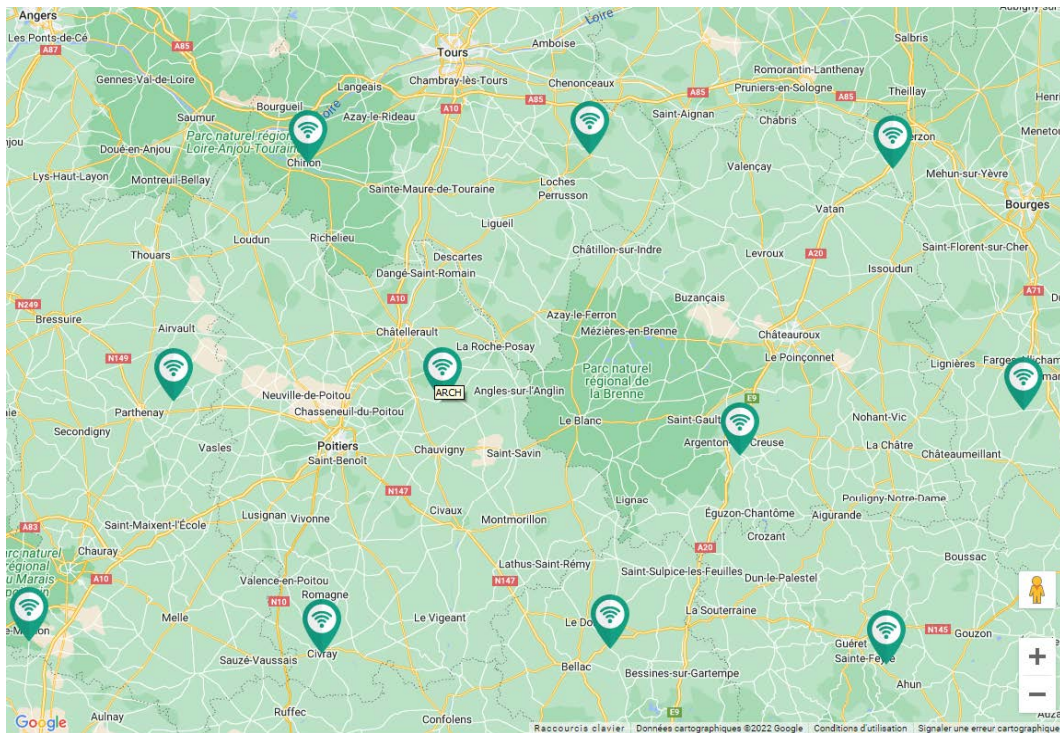


FIGURE 7 : RESEAU NRTK (ORPHEON) LOCALEMENT EN BRENNE.

Les solutions ont été fournies par Milla Group pour les quatre journées : 5, 6, 7 et 8 juillet 2022, au format NMEA GGA (voir Figure 8).

Les solutions calculées par le matériel Trimble embarqué dans la navette Milla pour la navigation par satellites sont très majoritairement NRTK, mais il y a quelques solutions dégradées. Ce sont des coupures (voir Tableau 2). L'indicateur de qualité passe alors de 4 à 2 (GNSS différentiel : la phase des signaux satellites n'est plus utilisée, mais seulement le code... et la résolution des mesures récepteur-satellites passe du cm au m) ou 6 (IMU seule, inertiel pur) rarement.

TABLEAU 2 : 11 ENREGISTREMENTS FOURNIS PAR MILLA (6 SONT ANALYSES ENSUITE).

Date	Durée / Zone / Vitesse moyenne	Part RTK	Durée coupure max
5	62' (dont 7' stop) / complète / 34.1 km/h	98.84	28.20
5	145' (dont 19' stop) / complète / 34.9 km/h	97.54	144.20
6	6' (dont 1' stop) / Mézières / 18.3 km/h	96.23	14.20
6	92' (dont 46' stop) / complète / 33.3 km/h	99.89	6.20
6	<1' / Paulnay / 42.8 km/h	100	/
6	4' (dont 3' stop) / Paulnay / 20.5 km/h	100	/
7	72' (dont 10' stop) / complète / 35.1 km/h	97.93	14.20
7	104' (dont 43' stop) / complète / 35.4 km/h	99.39	14.20
7	16' (dont 1' stop) / Azay-Mézières / 50.9 km/h	96.75	8.20
8	157' (dont 34' stop) / complète / 34.9 km/h	99.07	12.20
8	10' (dont 8' stop) / Mézières / 11.9 km/h	99.32	4.20



NMEA-0183 message: GGA

Related Topics

- NMEA-0183 messages: Overview

Time, position, and fix related data

An example of the GBS message string is:

```
$GPGGA,172814.0,3723.46587704,N,12202.26957864,W,2,6,1.2,18.893,M,-25.669,M,2.0 0031*4F
```

NOTE – The data string exceeds the NMEA standard length.

GGA message fields

Field	Meaning
0	Message ID \$GPGGA
1	UTC of position fix
2	Latitude
3	Direction of latitude: N: North S: South
4	Longitude
5	Direction of longitude: E: East W: West
6	GPS Quality indicator: 0: Fix not valid 1: GPS fix 2: Differential GPS fix (DGNSS), SBAS, OmniSTAR VBS, Beacon, RTX in GVBS mode 3: Not applicable 4: RTK Fixed, xFill 5: RTK Float, OmniSTAR XP/HP, Location RTK, RTX 6: INS Dead reckoning
7	Number of SVs in use, range from 00 through to 24+
8	HDOP
9	Orthometric height (MSL reference)
10	M: unit of measure for orthometric height is meters
11	Geoid separation
12	M: geoid separation measured in meters
13	Age of differential GPS data record, Type 1 or Type 9. Null field when DGPS is not used.
14	Reference station ID, range 0000 to 4095. A null field when any reference station ID is selected and no corrections are received. See table below for a description of the field values.
15	The checksum data, always begins with *

FIGURE 8 : TRAME NMEA GGA.

*Nota : on a noté dans les trames reçues que le nombre de satellites est quelquefois à zéro : \$GPGGA,100138.20,4650.48158249,N,00109.94488670,E,4,00,1.3,115.483,M,47.728,M,1.2,1067*43 malgré un indicateur à 4 (RTK) !*

Par la suite, on analyse les enregistrements où l'itinéraire complet de Mézières à Martizay a été parcouru (voir figures 9 et 10). Les vitesses y sont de 35 km/h en moyenne, pour une vitesse de croisière à 50 km/h. Le mode de conduite est automatique. (Le parcours Azay-Mézières le 7 montre une vitesse plus élevée, tant en moyenne qu'en croisière, ce qui indique un mode de conduite manuel.)

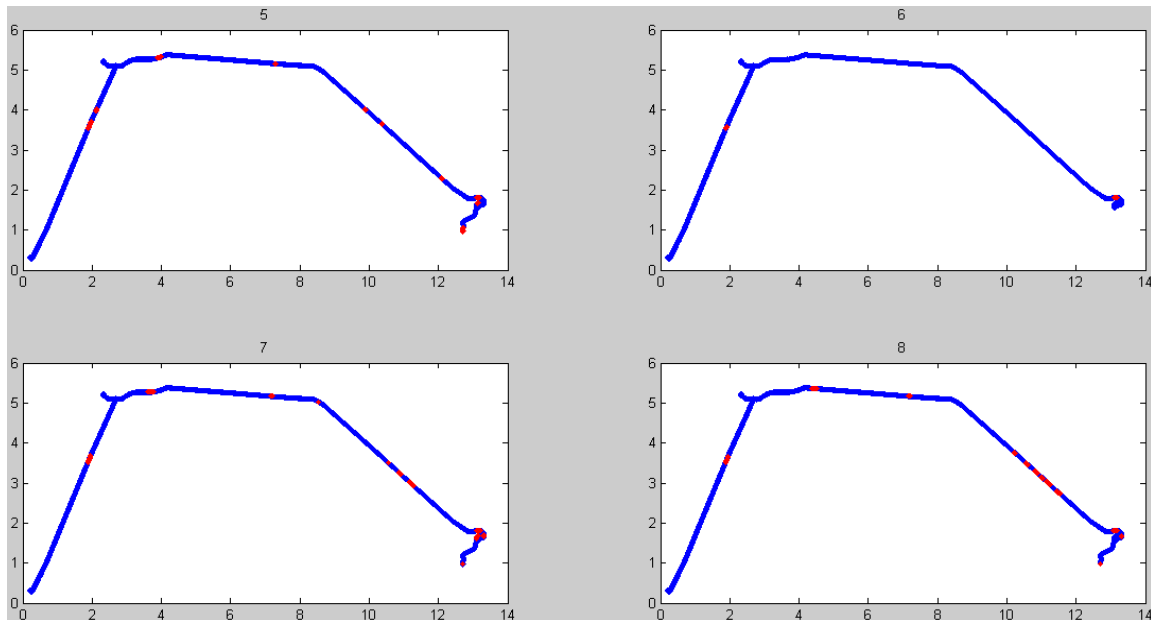


FIGURE 9 : VUES EN PLAN MONTRANT EN ROUGE LES SOLUTIONS LORS DES COUPURES NRTK.

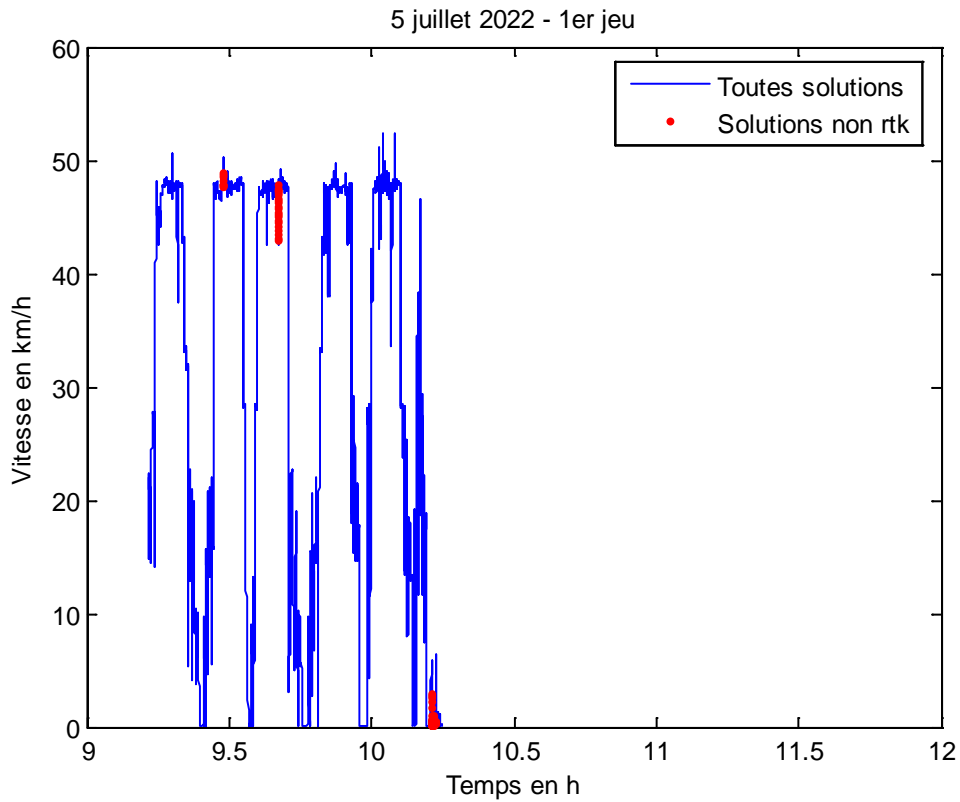
L'analyse des coupures dans les solutions RTK montre que celles-ci peuvent se produire n'importe quand dans le roulage et qu'elles n'entraînent pas nécessairement un arrêt de la navette. Les coupures les plus longues (supérieures à 15 secondes deux fois) ont toutefois conduit à un arrêt.

On a d'abord pensé que ces coupures étaient imputables à la liaison data mobile. Mais ce serait alors sur des zones larges, correspondant à la limite de la couverture du réseau Orange. Or les coupures sont relativement peu étendues temporellement (et spatialement, vu les vitesses pratiquées).

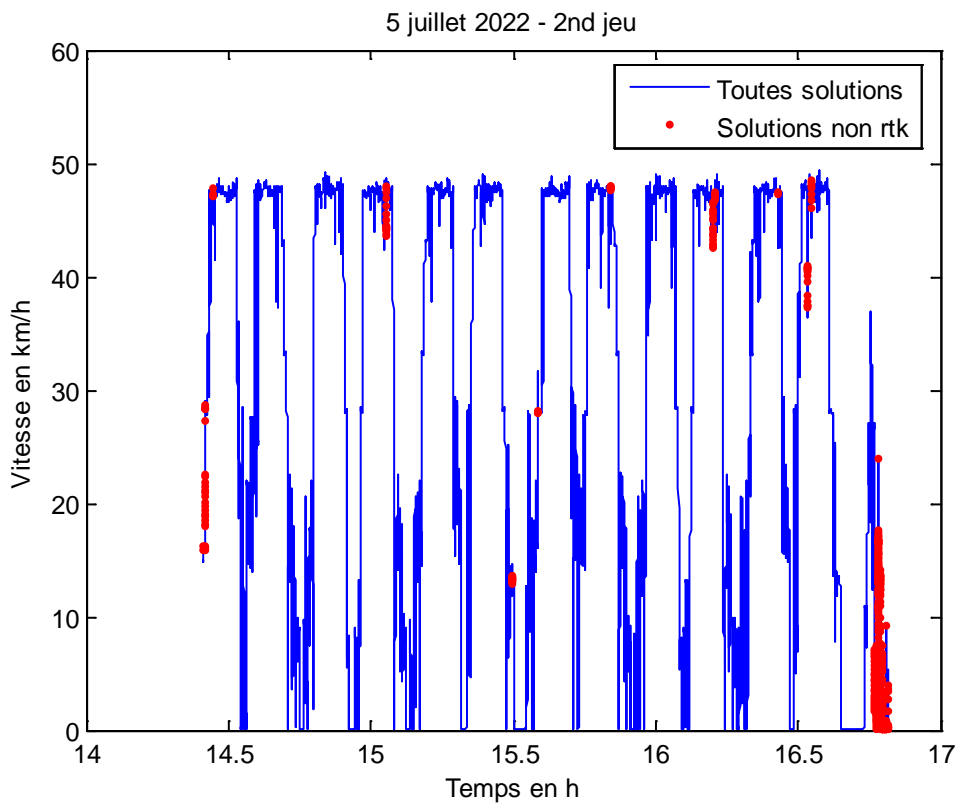
On pense donc à des masques satellites. Même s'il n'y a pas de tunnel ni même de pont sur le parcours, on peut imputer des masques satellites partiels à du couvert végétal.

Ce couvert, possible l'été, conduirait à des coupures dans les solutions RTK, avec des durées de réinitialisation de moins de 10 secondes pour le matériel Trimble utilisé après que le masque partiel est terminé.

Les Figures 10 A à F suivantes montrent les profils de vitesse pour les 6 enregistrements analysés et les vitesses lors des coupures NRTK.

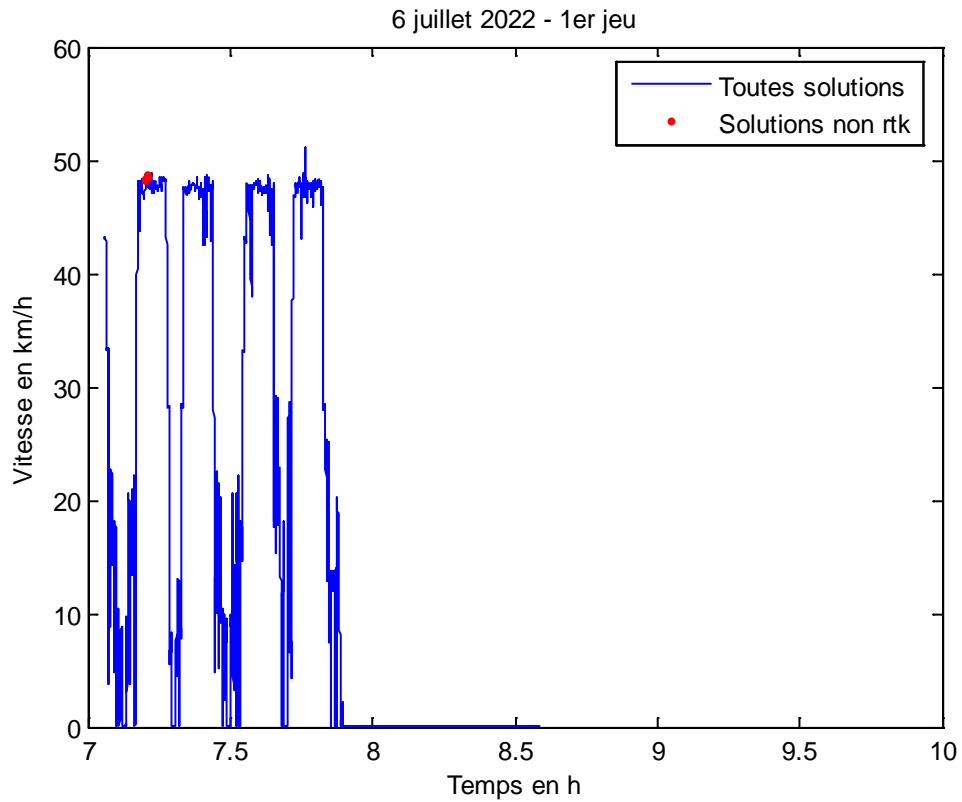


(A)

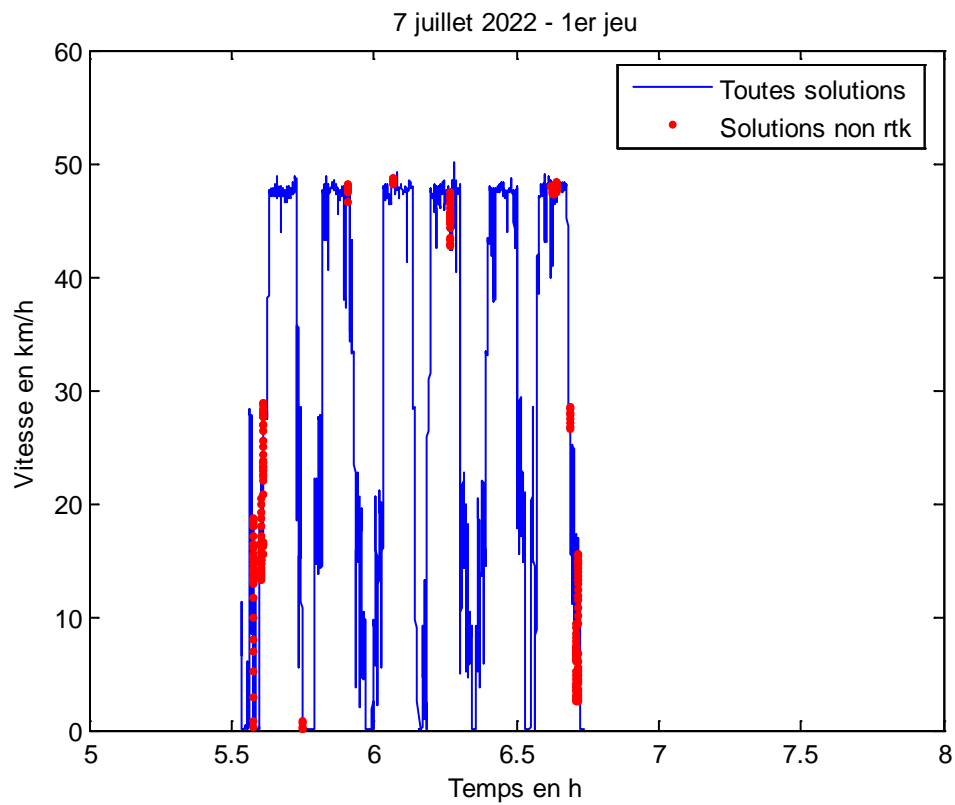


(B)

FIGURES 10 A ET B : PROFILS DE VITESSE MONTRANT EN ROUGE LES VITESSES LORS DES COUPURES NRTK.

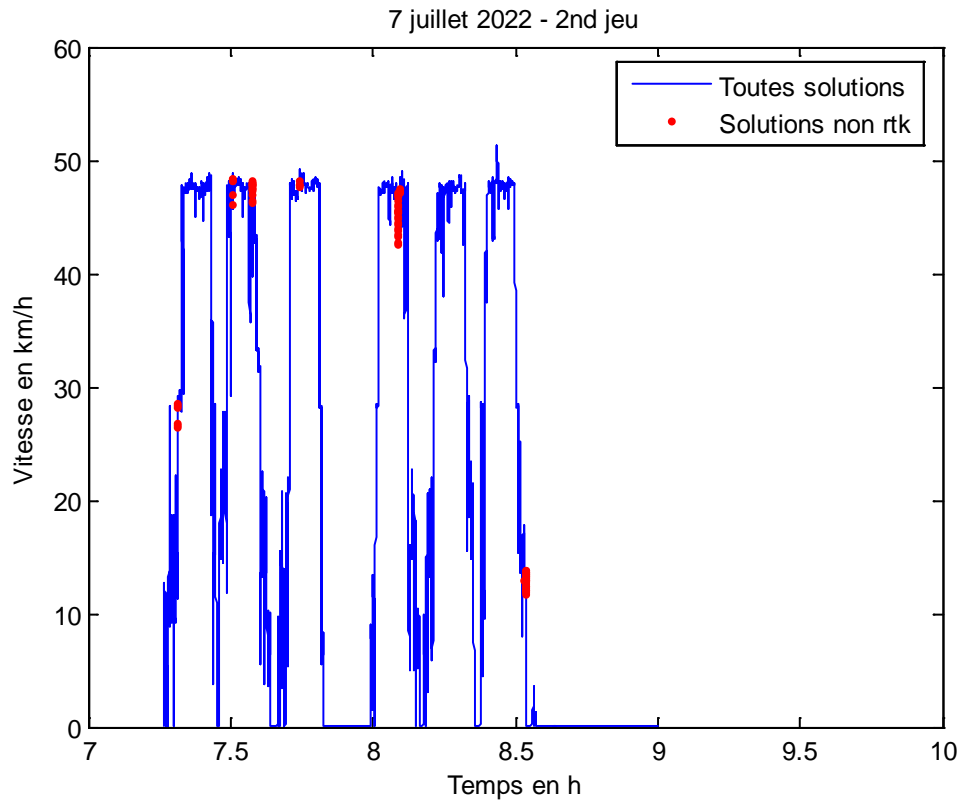


(C)

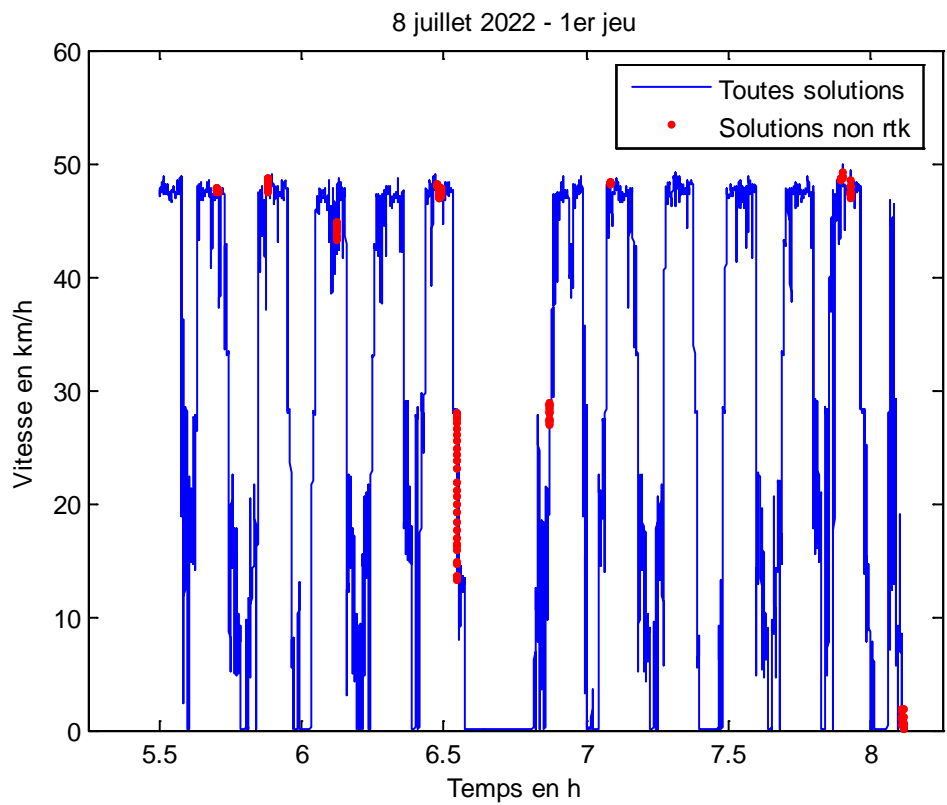


(D)

FIGURES 10 C ET D : PROFILS DE VITESSE MONTRANT EN ROUGE LES VITESSES LORS DES COUPURES NRTK.



(E)



(F)

FIGURES 10 E ET F : PROFILS DE VITESSE MONTRANT EN ROUGE LES VITESSES LORS DES COUPURES NRTK.

Les durées des coupures NRTK sont indiquées dans les Tableaux 3 :

TABLEAUX 3 : DUREES DES COUPURES NRTK (POUR LES 6 ENREGISTREMENTS ANALYSES).

Le 5 juillet, 1 ^{er} jeu 3.80 5.80 27.80 4.80 Le 5 juillet, 2 nd jeu 5.80 3.80 3.80 5.80 10.80 0.80 10.80 7.80 3.80 3.80 1.80 143.80 7.80	Le 7 juillet, 1 ^{er} jeu 9.80 5.20 4.80 0.80 6.80 1.80 13.80 5.80 3.80 0.80 4.80 11.80 2.80 13.80 Le 7 juillet, 2 nd jeu 1.80 4.80 8.80 1.80 5.80 13.80	Le 8 juillet, 1 ^{er} jeu 10.80 5.80 2.80 6.80 1.80 2.80 3.80 4.80 0.80 7.80 8.80 3.80 3.80 8.80 11.80
Le 6 juillet, 1 ^{er} jeu 5.80		

Le système de navigation passe régulièrement de NRTK à DGNSS (Differential GNSS) ou inertiel pur sur le parcours. Deux hypothèses : soit cela est lié à une insuffisance de satellites (végétation dense au-dessus de la navette) pour converger vers une solution RTK, ou bien à une discontinuité de connexion internet (via Orange, ayant la meilleure couverture sur ce site). Les durées étant de quelques secondes pour réinitialiser le calcul RTK dont la convergence prend un peu de temps (selon le nombre de satellites masqués...), c'est plutôt les perturbations satellites qui semblent en cause.

Ces dégradations GNSS sont généralement compensées par les autres sources de positionnement (la centrale inertielle) dans la fusion.

De l'expérience de Milla, il arrive toutefois que l'écart de trajectoire induit soit trop important et nécessite une correction de la part de l'opérateur : ceci n'est pas traçable au seul vu des solutions Trimble.

3.3. ANALYSE DES SOLUTIONS CALCULEES PAR LE MATERIEL DE NAVIGATION UBLOX

Deux récepteurs Ublox de gamme « automobile » ont été embarqués dans la navette Milla.

Ce sont des récepteurs F9P. C'est du matériel « grand public ». Les antennes sont de type marine (voir Figures 11, 12 et 13).

Ils sont configurés :

- toutes constellations (GPS, Glonass, Beidou et Galileo),
- GPS et Galileo seulement.

Un boîtier (« Evabox ») [11] a été développé pour la collecte des données. Ce boîtier a été installé entre le 22 juin et le 13 juillet 2022 à Cœur de Brenne pour 15 jours d'enregistrement.



FIGURE 11 : A) BOITIER « EVABOX », B) PAIRE D'ANTENNES DE TYPE MARINE.

Deux antennes/récepteurs Ublox (av) + une Trimble (ar, jaune).



FIGURE 12 : NAVETTE STATIONNEE A MEZIERES EN BRENN.

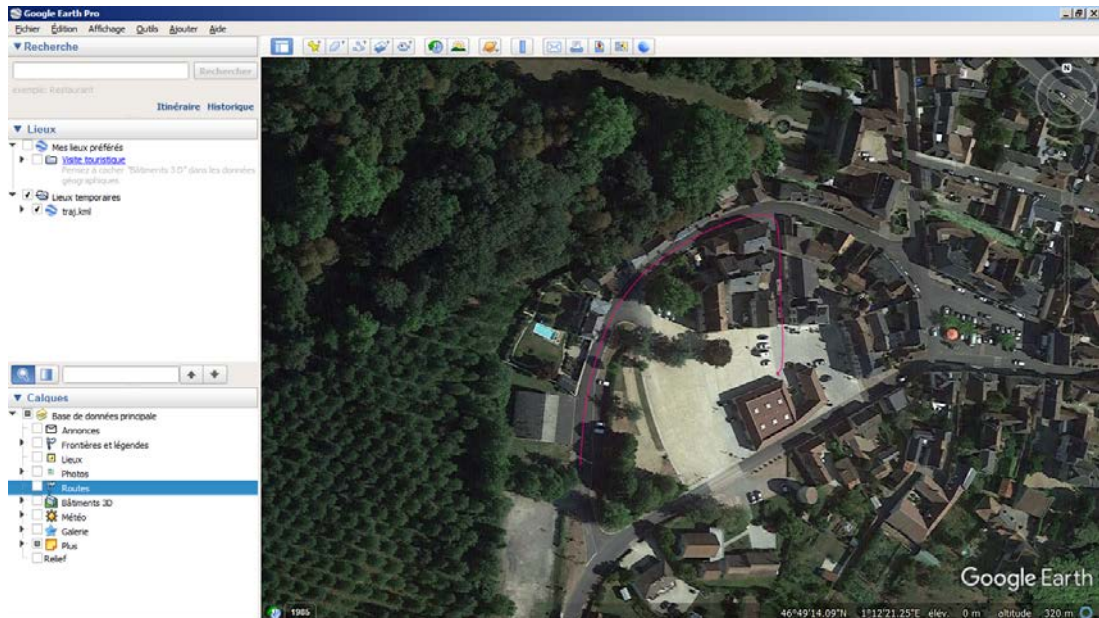


FIGURE 13 : IMAGE GOOGLE EARTH CI MONTRANT UNE MANŒUVRE DE LA NAVETTE ENREGISTREE PLACE DE LA MAIRIE DE MEZIERES EN BRENN.

Les trajectoires en plani ont été les suivantes, sur les 15 jours :

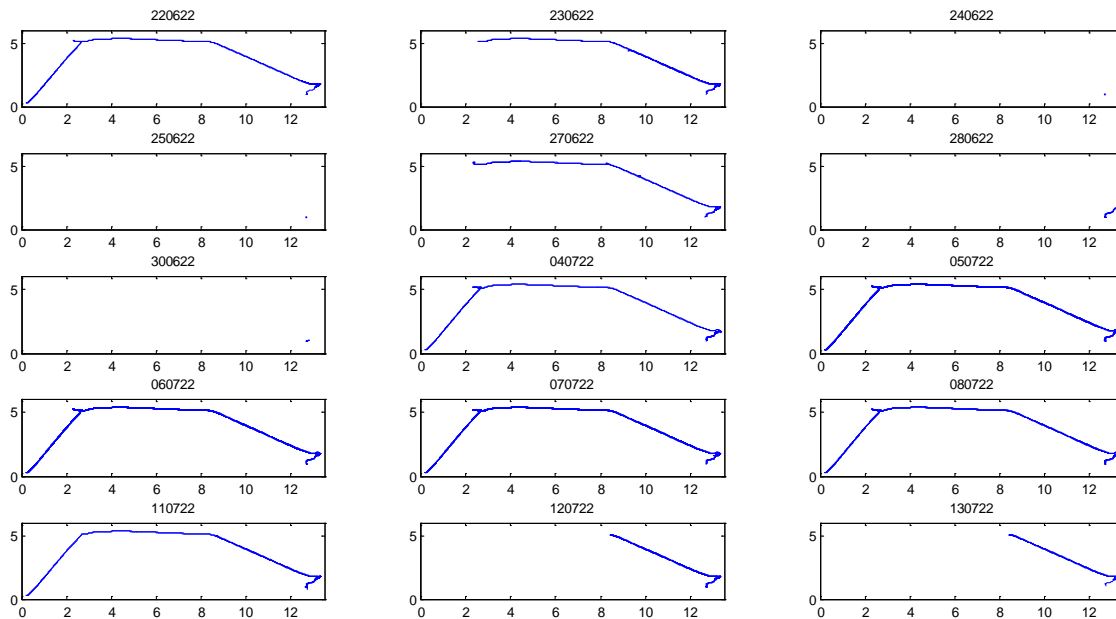


FIGURE 14 : VUES EN PLAN DES 15 JOURS D'ENREGISTREMENT.

Les profils de vitesse on été les suivants, sur les 15 jours :

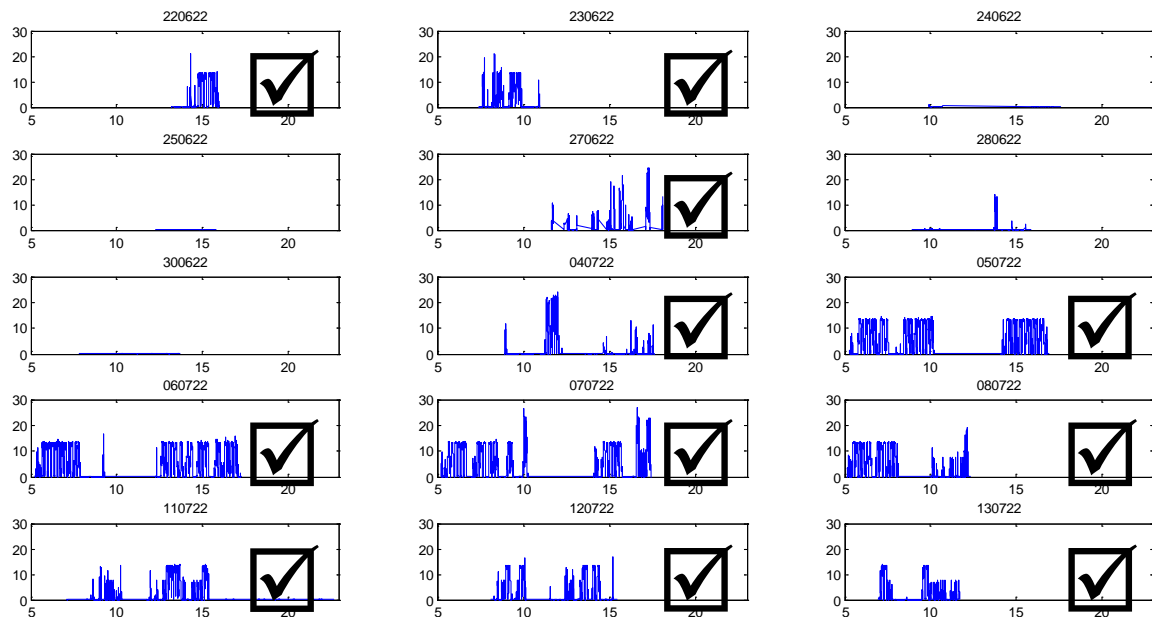
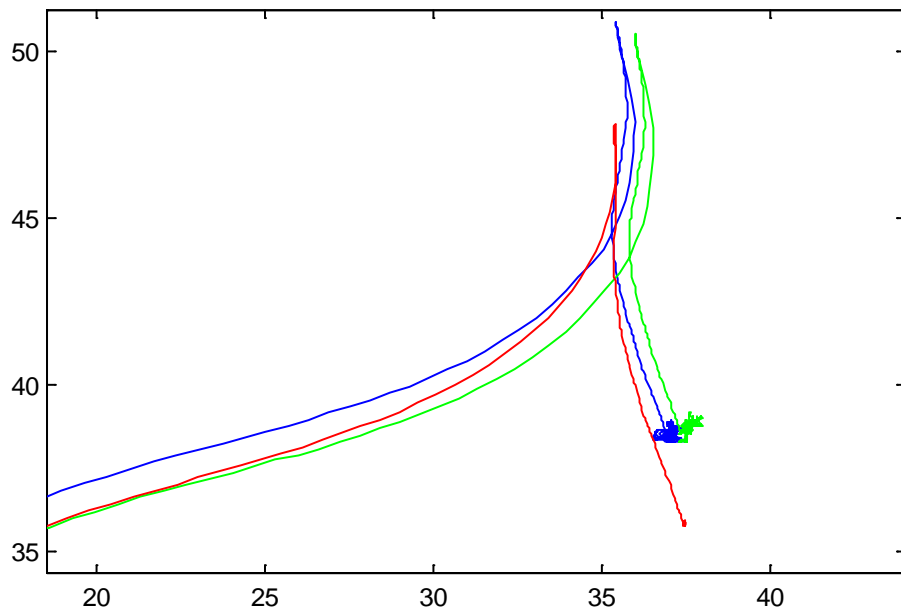


FIGURE 15 : PROFILS EN VITESSE DES 15 JOURS D'ENREGISTREMENT.

Lors des premières exploitations, les données Trimble des 11 jours indiqués ci-dessus ont été demandées à Milla. La suite du rapport se focalise sur les journées 5, 6, 7 et 8 juillet. En effet, on a utilisé les solutions calculées par le matériel Trimble comme référence de position (« vérité terrain ») pour estimer l'erreur faite par les matériels Ublox, dont on sait a priori qu'ils sont d'un ordre de grandeur (voire davantage) moins précis. Les bras de levier (2,26m axialement et $\pm 0,17m$ latéralement) entre les deux antennes Ublox et l'antenne Trimble ont été corrigés au moyen d'un cap estimé à partir des solutions de navigation Trimble.

Le tracé suivant zoome sur la fin du jeu de données du 6 juillet. On est resté statique pendant environ 1/2h. Les bras de levier NE sont PAS corrigés sur ce tracé. Le véhicule est arrivé de l'ouest, tournant plein nord, s'immobilise puis recule d'une dizaine de mètres, finalement orienté nord nord ouest. (C'est à Mézières, à peu près dans la configuration de la photographie du véhicule. Les coordonnées, en m, sont locales.)

Les antennes Ublox sont 2,26m à l'avant de l'antenne Trimble, c'est clairement visible, ainsi que leur positionnement relatif gauche-droite, avec un intervalle de $\pm 0,17\text{m}$, côté conducteur : antenne connectée au récepteur toutes constellations, côté passager : GPS+Galileo.



On voit que le RTK est plus concentré que le GNSS standard. Mais il semble aussi qu'un biais existe dans la direction sud-ouest entre les solutions Ublox et la solution Trimble. (La main représente la position attendue). Ce biais apparaît quasiment d'un mètre, dans les deux directions, et il est relativement répétable comme le montrent les résultats affichés par la suite.

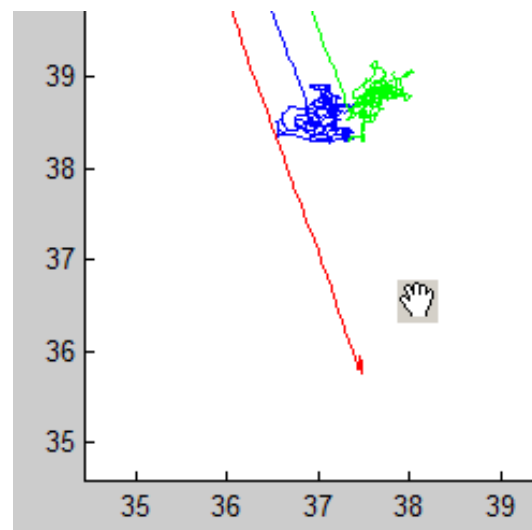


FIGURE 16 : VUE EN PLAN (ET ZOOM) A L'ARRET EN STATIONNEMENT.

Les Figures 17 A à F suivantes montrent les erreurs planes pour les quatre jours : 5 (deux jeux), 6, 7 (deux jeux) et 8 juillet pour les deux configurations des matériels Ublox. Le biais d'un mètre est visible. C'est un biais inexplicé à ce stade de la rédaction du rapport.

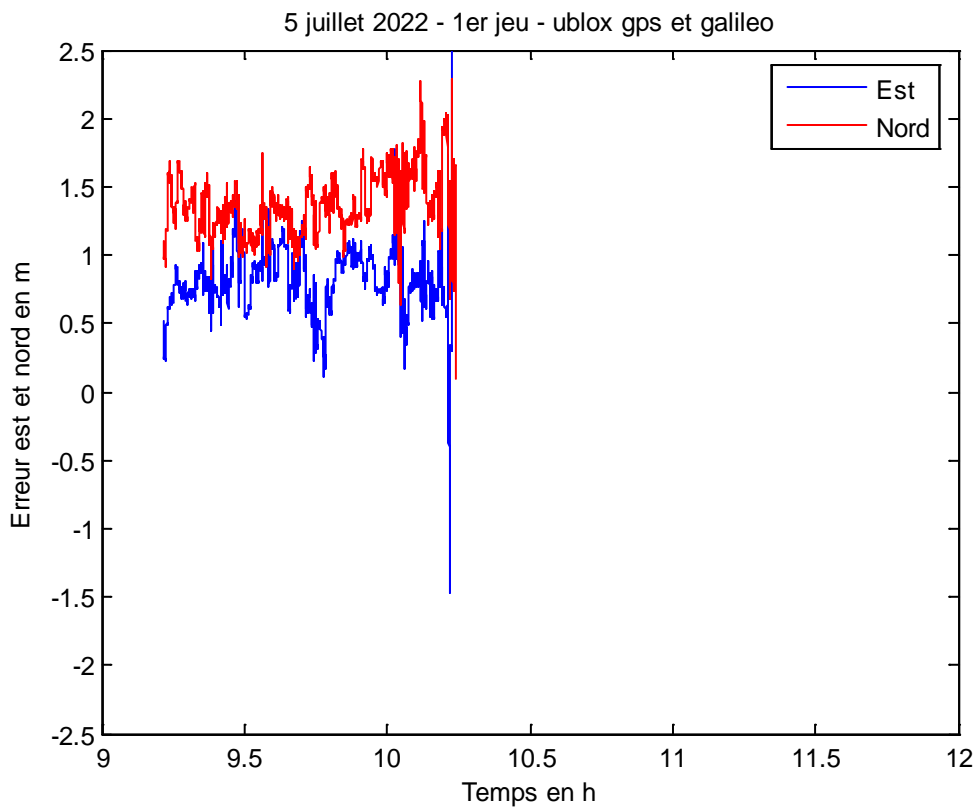
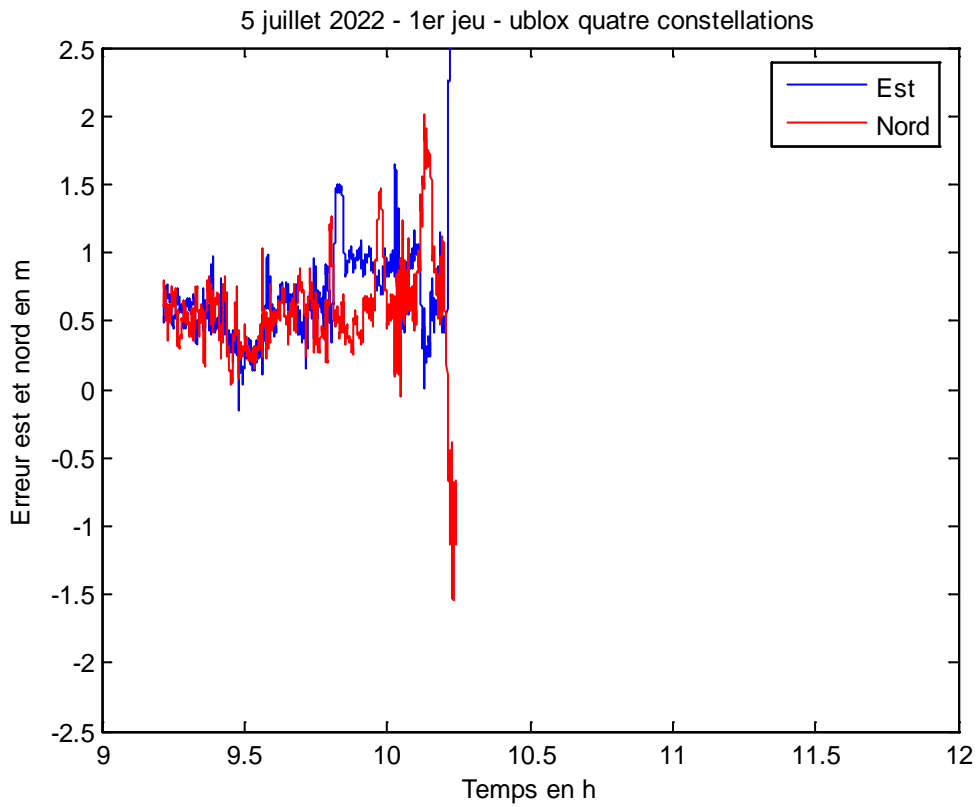


FIGURE 17 A : SERIES TEMPORELLES DES ERREURS EST ET NORD (4 CONSTELLATIONS ET GPS+GALILEO).

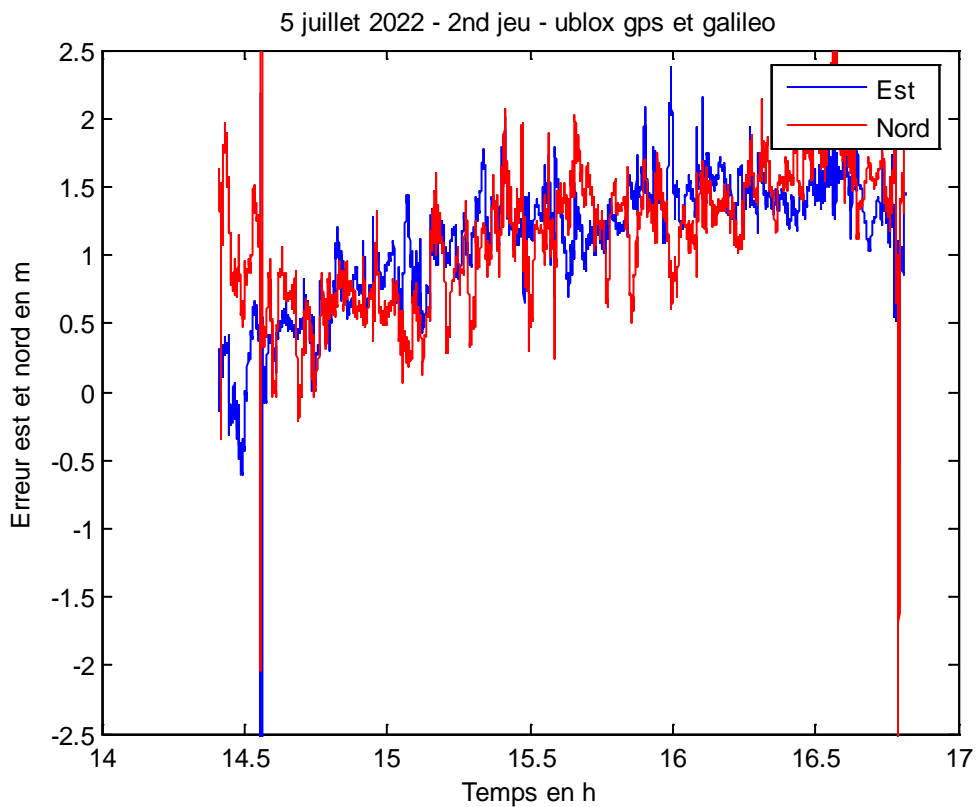
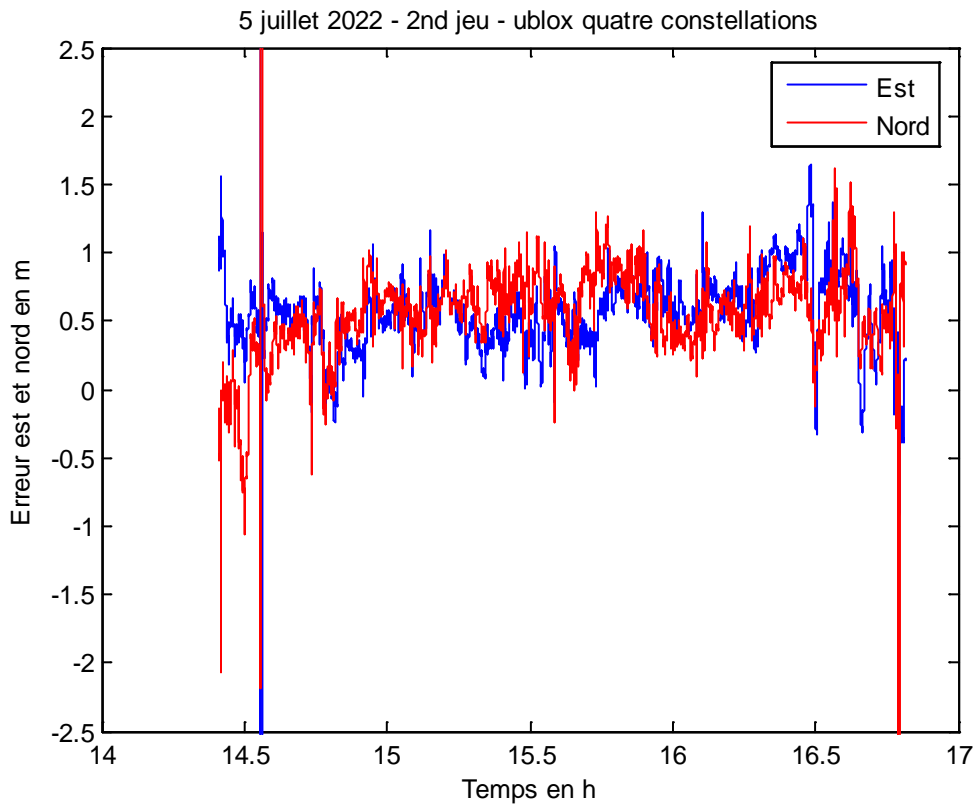


FIGURE 17 B : SERIES TEMPORELLES DES ERREURS EST ET NORD (4 CONSTELLATIONS ET GPS+GALILEO).

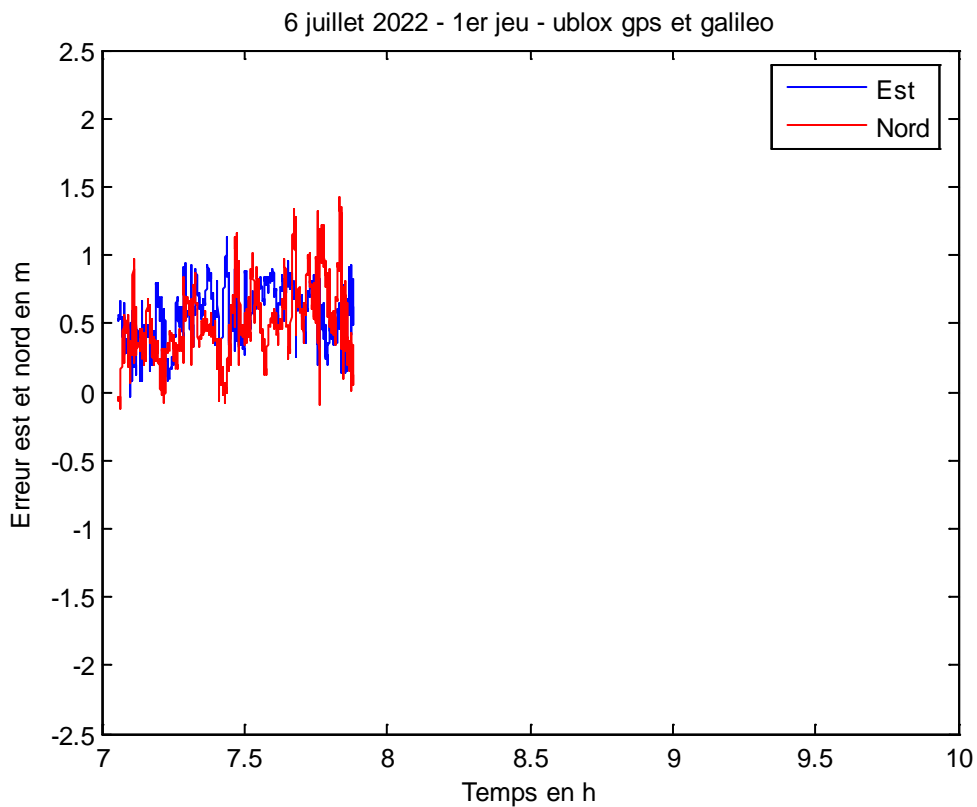
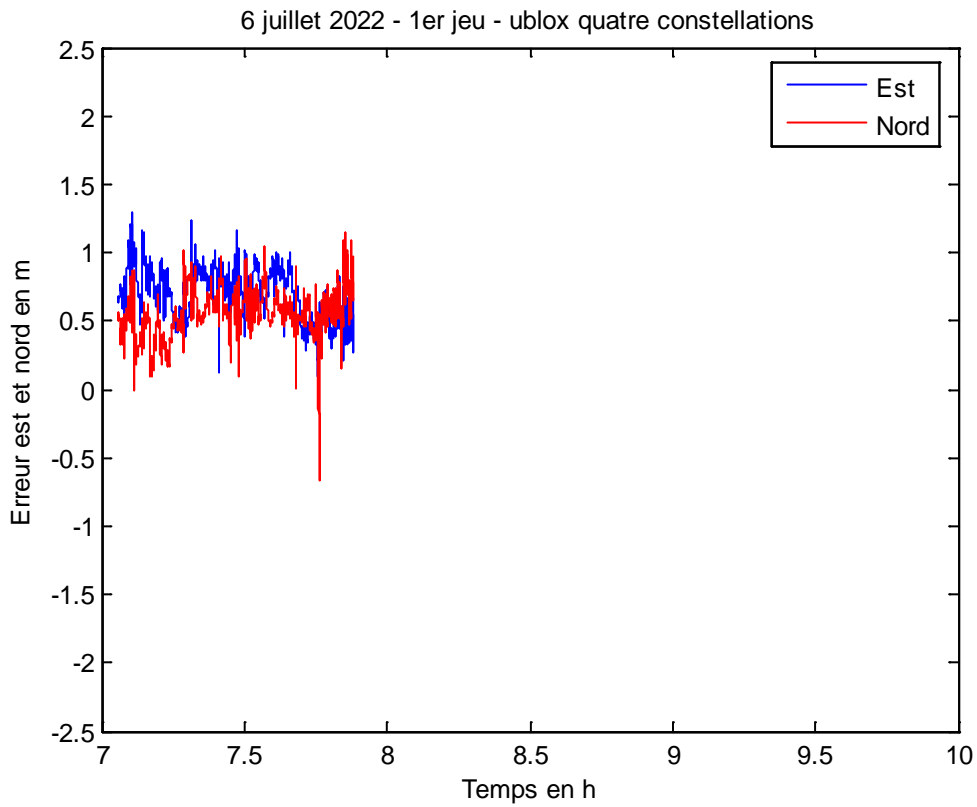


FIGURE 17 C : SERIES TEMPORELLES DES ERREURS EST ET NORD (4 CONSTELLATIONS ET GPS+GALILEO).

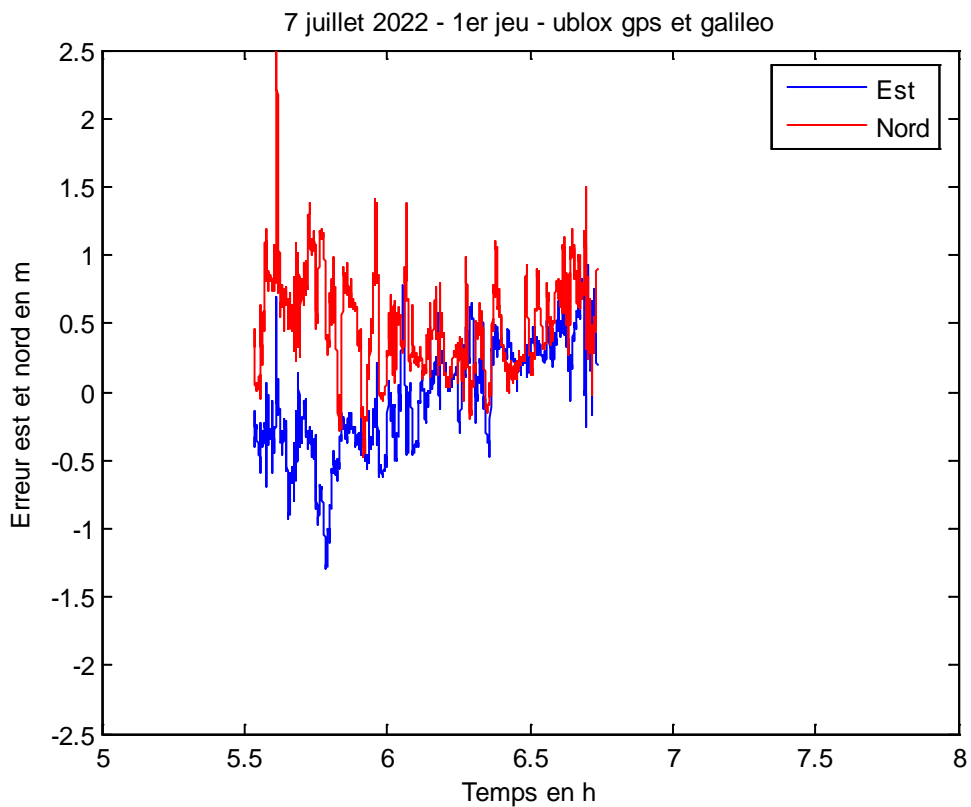
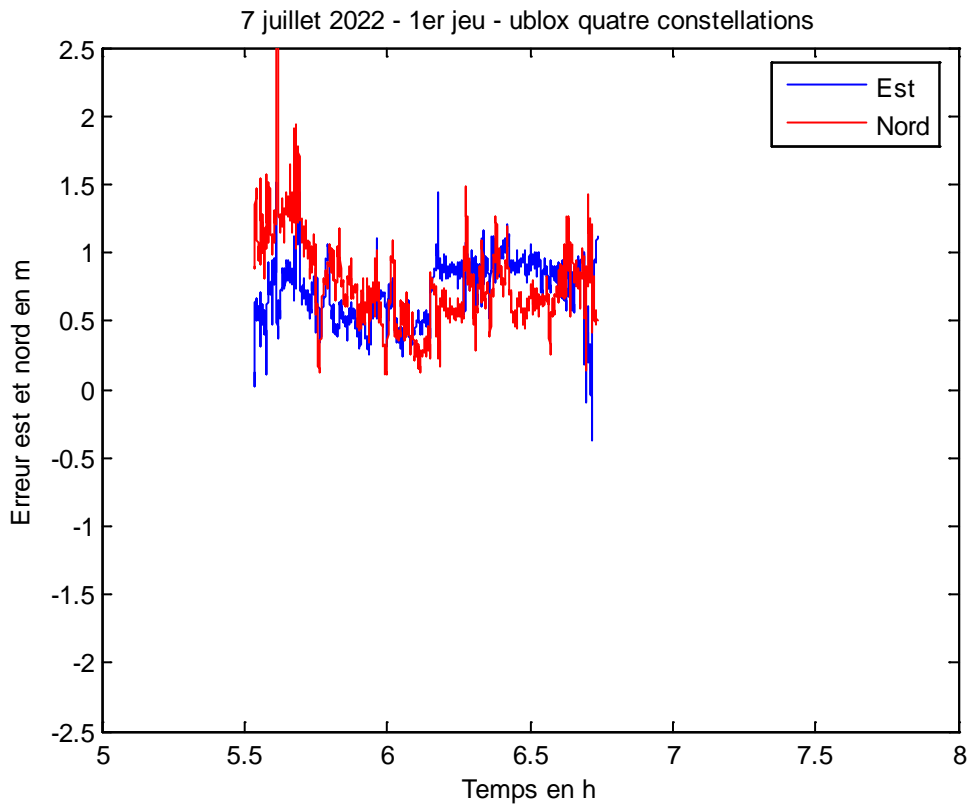


FIGURE 17 D : SERIES TEMPORELLES DES ERREURS EST ET NORD (4 CONSTELLATIONS ET GPS+GALILEO).

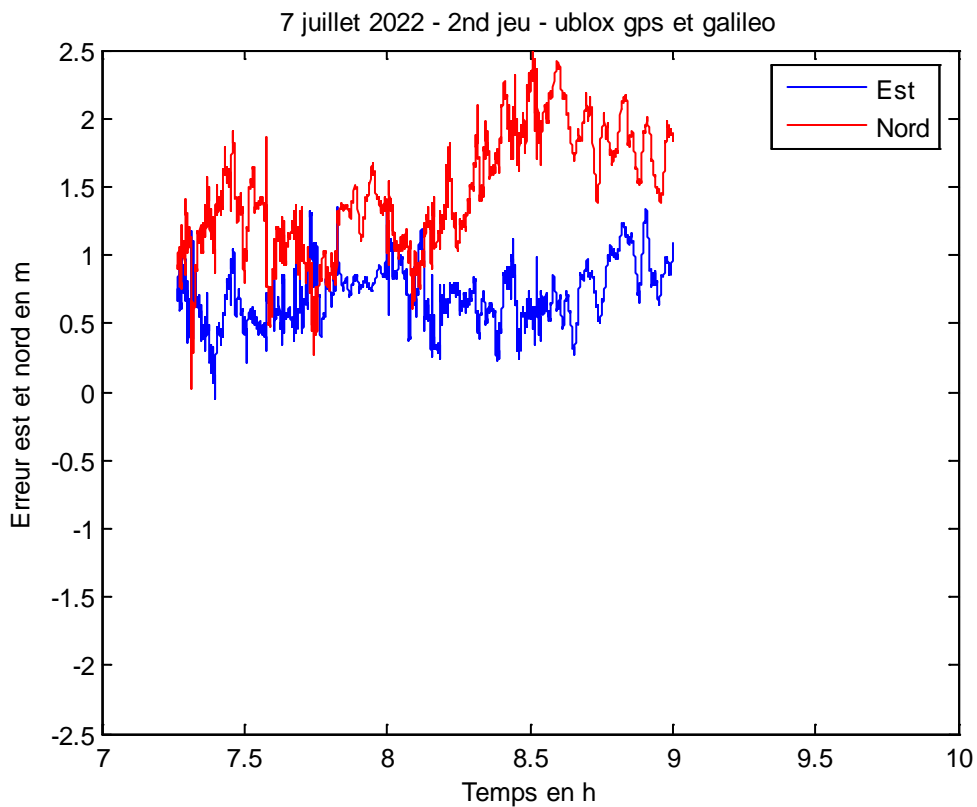
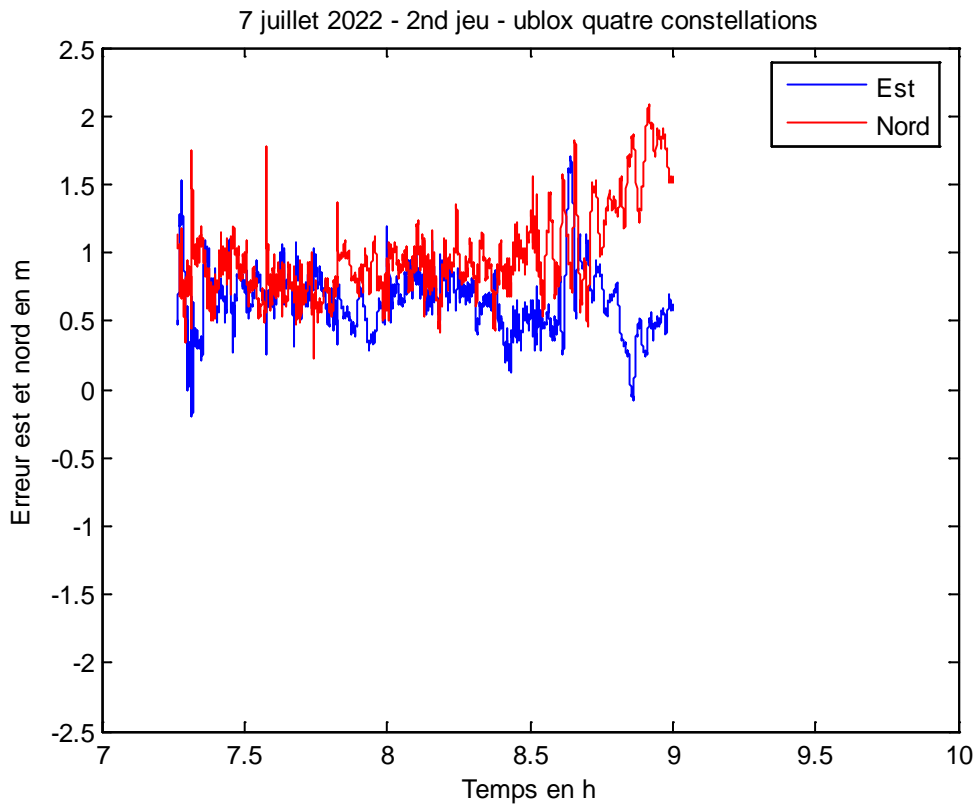


FIGURE 17 E : SERIES TEMPORELLES DES ERREURS EST ET NORD (4 CONSTELLATIONS ET GPS+GALILEO).

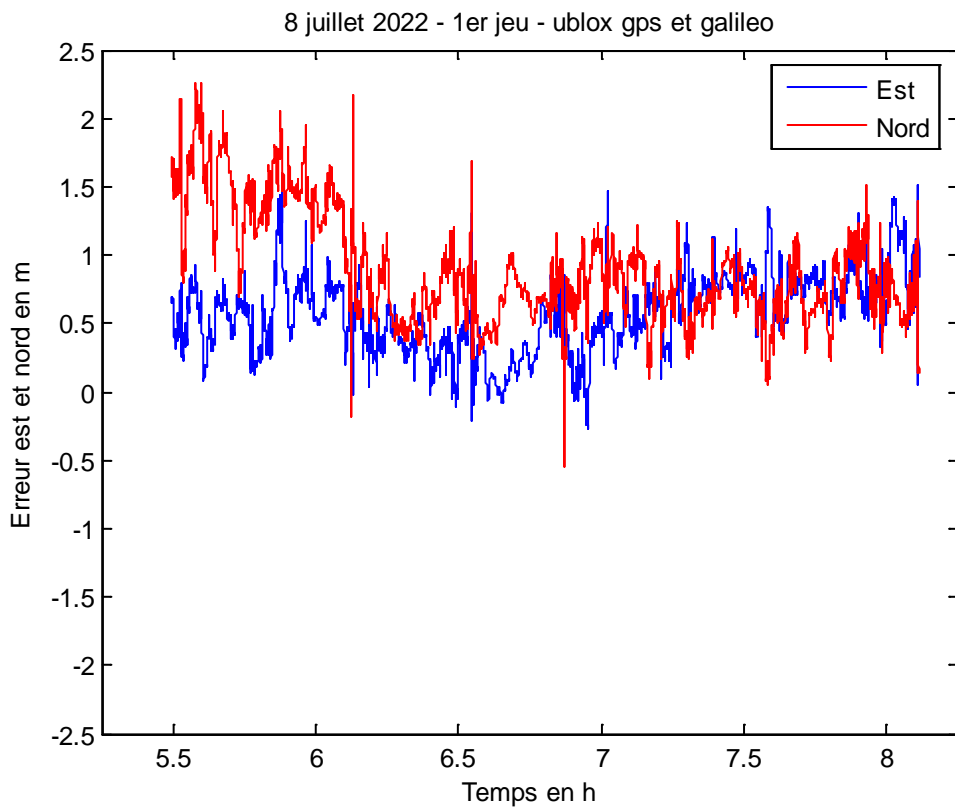
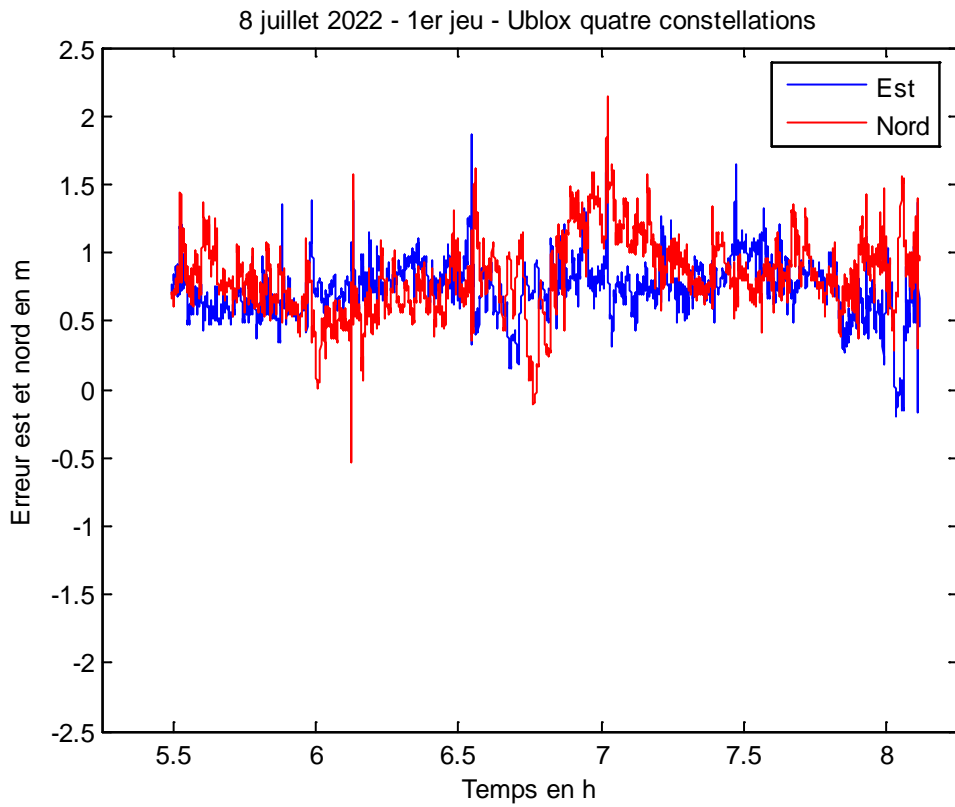


FIGURE 17 F : SERIES TEMPORELLES DES ERREURS EST ET NORD (4 CONSTELLATIONS ET GPS+GALILEO).

Le Tableau 4 indique les erreurs planes médianes, en m, en mode de positionnement standard :

TABLEAU 4 : ERREURS PLANES MEDIANES EN M (POUR LES 6 ENREGISTREMENTS ANALYSES).

Jours	Quatre constellations	GPS+Galileo
5 juillet	0.91	1.62
5 juillet 2 nd jeu	0.84	1.77
6 juillet	0.92	0.79
7 juillet	1.09	0.61
7 juillet 2 nd jeu	1.16	1.61
8 juillet	1.14	1.04

La multiplication des constellations utilisées améliore globalement la précision de positionnement : surtout, cette précision est plus stable dans le temps, moins variable au cours de la journée. (Le biais qu'on a constaté augmente d'autant les erreurs planes..., et, à notre connaissance, on ne peut que considérer qu'il fait partie de l'erreur du positionnement GNSS standard.)

Calculs PPP :

PPP est le mode de positionnement précis autonome (c'est-à-dire non différentiel, ce qui constitue la principale différence entre lui et le (N)RTK).

PPP et RTK utilisent le code et la phase des signaux GNSS (alors que le mode de positionnement standard n'utilise que le code). Pour utiliser la phase avec sa pleine précision, il faut soit procéder en différentiel avec une ou des stations de base (plusieurs en NRTK) lesquelles partagent les mêmes perturbations atmosphériques et satellitaires (orbites et horloges) que l'on élimine donc par différenciation, ou bien utiliser des modèles fins de ces perturbations (appliquer des « corrections »), modèles diffusés en temps réel sur la fréquence E6b ou, à défaut, téléchargeables en temps différé.

Le PPP de Galileo, dit HAS, High Accuracy Service, n'était pas encore disponible à l'été 2022. Depuis, il l'est : www.euspa.europa.eu/newsroom/news/galileo-high-accuracy-service-now-operational et ses performances restent à mesurer dans le cadre des applications de transport terrestre.

25 January 2023

Galileo High Accuracy Service goes live!

- The Galileo High Accuracy Service (HAS) is a new, enhanced service of the EU's positioning system [offering an accuracy of 25cm](#). The service is transmitted directly via the Galileo satellites while it can also be accessible through the internet.

Aussi avons-nous entrepris le développement d'un logiciel de calcul PPP utilisant des fichiers téléchargés. Ce travail n'est pas terminé et demandera des efforts qui dépassent le cadre d'ENA. Quant au temps réel, il concerne la R&D des fabricants de matériels GNSS qui devraient rapidement proposer une mise à jour de leur software, le hardware étant le plus souvent déjà prêt pour la fréquence E6b.

3.4. CONCLUSIONS

L'étude a montré :

1) qu'il reste à consolider l'intégrité des solutions de navigation NRTK, lesquelles ne sont pas suffisamment dignes de confiance pour l'application envisagée de conduite automatisée. En effet, il a fallu reprendre la main à différentes reprises sans que ces solutions n'indiquent quelque alarme que ce soit. Le couplage avec d'autres capteurs est certainement la meilleure piste à investiguer encore, car les mesures satellites resteront perturbées par les arbres et les bâtiments.

2) que les solutions de navigation à moindre coût, que ce soit GNSS autonome en mode standard métrique en précision, ou que ce soit GNSS autonome en mode PPP HAS (High Accuracy Service) non encore opérationnel, méritent des développements complémentaires et ne serviront en robotique mobile que si des améliorations de performances conséquentes sont obtenues.

Nos perspectives sont de monter en compétences concernant les calculs de navigation PPP pour pouvoir évaluer l'apport de Galileo HAS pour les transports terrestres.

4. REFERENCES

- [1] Sio-Song Ieng, Mathias Paget, Matossouwe Agninoube Tchali, et Jean-Philippe Tarel, "Improved awareness for safer intersection of flow of mobiles," soumis à IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV'23), 2023.
- [2] Khaoula Hassoune, Wafaa Dachry, Fouad Moutaouakkil, et Hicham Medromi, "Smart parking systems: A survey," in 11th IEEE International Conference on Intelligent Systems: Theories and Applications (SITA), 2016, pp. 1–6.
- [3] Suhas Mathur, Tong Jin, Nikhil Kasturirangan, Janani Chandrasekaran, Wenzhi Xue, Marco Gruteser, et Wade Trappe, "Parknet: drive-by sensing of road-side parking statistics," in Proceedings of the 8th international conference on Mobile systems, applications, and services, 2010, pp. 123–136.
- [4] Joseph Redmon, Santosh Kumar Divvala, Ross B. Girshick, et Ali Farhadi, "You only look once: Unified, real-time object detection," CoRR, vol. abs/1506.02640, 2015.
- [5] Nicolai Wojke, Alex Bewley, et Dietrich Paulus, "Simple online and realtime tracking with a deep association metric," in 2017 IEEE international conference on image processing (ICIP), 2017, pp. 3645–3649.
- [6] Kuhn, Harold W., "The Hungarian method for the assignment problem," in Naval research logistics quarterly, 1955, vol. 2, no 1-2, p. 83-97.
- [7] Zhengyou Zhang, "Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations," in Proceedings of the IEEE international conference on computer vision, 1999, vol. 1, pp. 666–673.
- [8] John A. Nelder and Roger Mead, "A simplex method for function minimization," Computer Journal, vol. 7, pp. 308–313, 1965.
- [9] Masi stephano, Xu Philippe, Bonnifait Philippe, et Ieng Sio-Song, "Augmented perception with cooperative roadside vision systems for autonomous driving in complex scenarios," in 2021 IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC), 2021, pp. 1140–1146.
- [10] Françoise Duquenne, Serge Botton, François Peyret, David Bétaille, Pascal Willis, GPS – localisation et navigation par satellites, 2ème édition, Hermès-science Lavoisier, ISBN : 2-7462-1090-8, 2005 : notamment chapitre 3, "Le positionnement dynamique".
- [11] Eva Bregeon, Maquettage d'un enregistreur de données GNSS, rapport de stage ESEO, été 2021.



Tentez l'expérience