

ENSTA
BRETAGNE

ENSTA-BRETAGNE

PROJET DÉCOUVERTE DES SYSTÈMES
UE 2.4
RAPPORT

Positionnement GNSS

Samy AYYADA
Julien STRUILLOU
Antoine BERTRAND
Baptiste GUIVARCH

Table des matières

1 Résumé	2
2 Introduction	2
2.1 Répartition des tâches	2
3 Etude bibliographique	3
3.1 Les GNSS	3
3.1.1 Origines du GPS	3
3.1.2 Applications	3
3.2 Fonctionnement	4
3.2.1 Principe général	4
3.2.2 Détermination de l'inconnue temporelle	4
3.3 Sources d'erreurs	5
3.3.1 Erreurs liées aux satellites	5
3.3.2 Erreurs liées à la propagation et à la station	5
3.3.3 Stratégie de réduction de l'erreur : le GPS en mode différentiel	6
3.4 Norme NMEA	7
4 Description du code réalisé	8
4.1 Le fichier <code>acquisition</code>	8
4.2 Le fichier <code>traitement</code>	8
4.3 Le fichier <code>Tempsreel</code>	9
5 Comparaison de deux récepteurs GNSS	11
5.1 Acquisition des données	11
5.2 Positionnement d'un point à l'aide des récepteurs	12
5.3 Erreurs de justesse et de fidélité des mesures	13
5.4 Les erreurs liées à la résolution des récepteurs	14
5.5 Comparaison des résultats obtenus à l'aide des deux récepteurs	14
5.6 Analyse des résultats	15
6 Choix d'un récepteur	15
7 Conclusion	17

1 Résumé

Ce rapport présente un projet de découverte des systèmes à l'ENSTA Bretagne, axé sur l'étude du fonctionnement des systèmes de positionnement par satellites (GNSS). Deux récepteurs GNSS ont notamment été examinés : le *G-STAR IV* et le *Spectra-80*. Pour analyser les données brutes des récepteurs, nous avons développé des codes Python permettant de les récupérer, de les analyser et de les présenter de manière compréhensible pour l'utilisateur. Nous avons également effectué des évaluations de justesse, de fidélité et de précision de ces capteurs.

2 Introduction

Dans un monde de plus en plus connecté et dépendant de la géolocalisation, la compréhension des systèmes de positionnement par satellites (GNSS) revêt une importance cruciale, tant pour les applications civiles que pour les enjeux stratégiques liés aux systèmes d'armement. Dans le cadre d'un projet de découverte des systèmes à l'ENSTA Bretagne, notre attention s'est portée sur l'étude approfondie des systèmes de positionnement par satellites (GNSS). Pour mener à bien notre étude, nous avons disposé de deux récepteurs GNSS de qualité différente : le G-STAR-IV et le Spectra-80. L'objectif principal de notre étude était de décrire en détail le fonctionnement de ces récepteurs et de comparer leur performance. Dans ce rapport, nous allons d'abord aborder la théorie du positionnement par satellites. Par la suite, nous présenterons les codes Python que nous avons développés pour acquérir et analyser les données issues de chaque récepteur. Enfin, nous évaluerons la précision, l'exactitude et la fiabilité de chacun de ces capteurs, afin de fournir une évaluation détaillée de leurs performances respectives. Les résultats obtenus dans le cadre de ce projet fourniront des informations précieuses pour évaluer l'efficacité et les performances des récepteurs GNSS étudiés, en tenant compte de leurs avantages et de leurs désavantages spécifiques.

2.1 Répartition des tâches

La répartition des tâches pour le projet s'est effectuée comme suit : Antoine et Samy se sont concentrés sur l'utilisation du récepteur *G-STAR IV* et ont développé un programme Python pour extraire les trames NMEA. Leur travail consistait à comprendre le fonctionnement du récepteur et à créer un code capable de récupérer les informations nécessaires à l'analyse des données. De leur côté, Baptiste et Julien ont été chargés d'écrire une étude bibliographique approfondie sur les origines, le fonctionnement et les applications des systèmes de positionnement par satellites (GNSS), en se focalisant particulièrement sur le GPS. Leur travail consistait à recueillir des informations provenant de sources fiables, à les analyser et à les synthétiser dans un document qui fournirait un contexte théorique solide pour le projet.

3 Etude bibliographique

3.1 Les GNSS

Les *Global Navigation Satellite System* (GNSS) sont des systèmes de positionnement qui utilisent les signaux émis par des satellites en orbite autour de la Terre pour déterminer la position d'un système. Un GNSS est considéré opérationnel lorsque la position d'un système à n'importe quel endroit de la Terre peut être connu. Il existe plusieurs GNSS comme le GPS américain, Galileo, développé par l'Union Européenne ou encore Glonass, de conception Russe. Nous nous focaliserons dans la suite sur le GPS.

3.1.1 Origines du GPS

Initialement, le GPS a été développé dans un contexte militaire pour permettre aux forces militaires américaines d'avoir un système de positionnement précis. Son développement a commencé dans les années 1973, et les premiers satellites ont été mis en orbite dans les années 1980. Très rapidement le GPS s'est ouvert à un usage civil, puisque dès les années 1990, le gouvernement américain a déclaré que le GPS serait disponible gratuitement pour une utilisation civile. Aujourd'hui, le GPS américain comprend un système de 24 satellites répartis autour de 6 orbites différentes afin d'offrir une couverture globale à ses utilisateurs.

3.1.2 Applications

Aujourd'hui, les systèmes GNSS, et plus particulièrement le GPS américain est utilisé dans une grande variété de domaines. Les systèmes GNSS représentent un véritable enjeu stratégique pour les pays. En effet, les GNSS peuvent être utilisés dans un contexte militaire pour la navigation des véhicules, la localisation de cibles ou le guidage de missiles par exemple. Ces systèmes sont également un élément clé de la sécurité et de la sûreté, puisqu'ils sont utilisés pour la navigation aérienne, maritime, ou encore pour le guider les véhicules d'urgence. D'où la nécessité de posséder un système fiable, et accessible en continu. Enfin, les GNSS représentent également un enjeu économique, de par l'importance qu'ils occupent dans l'agriculture de précision, la cartographie, la topographie etc...

Ainsi, les pays qui possèdent ces technologies bénéficient d'un réel avantage sur les autres. En effet, les pays qui n'en disposent pas peuvent être vulnérables en cas de coupure des signaux ou de brouillage par exemple. C'est la raison pour laquelle la Russie, l'Europe, et la Chine ont créés leurs propres systèmes afin de ne plus dépendre uniquement du GPS américain.

3.2 Fonctionnement

3.2.1 Principe général

Les satellites transmettent en permanence des ondes électromagnétiques à des récepteurs GPS. C'est le calcul de la distance entre le récepteur et les satellites qui permet de déterminer la position d'un système.

Les satellites émettent des messages contenant des informations telles que la position du satellite, son code d'identification et l'heure à laquelle le signal a été émis. Ces informations sont envoyées sous la forme de codes pseudos-aléatoires. Le récepteur mesure alors le temps qu'il a fallu au signal pour arriver jusqu'à lui. La vitesse de propagation de l'onde étant connue, le récepteur peut donc déterminer sa distance par rapport au satellite. On sait alors que le récepteur se trouve sur la surface d'une sphère de rayon la distance entre le satellite et le récepteur. En calculant la distance entre un deuxième satellite et le récepteur, on sait que le récepteur se situe à l'intersection des deux sphères. Comme il existe deux points d'intersections possibles entre ces deux sphères, il est nécessaire de calculer la distance entre le récepteur et un troisième satellite afin d'obtenir la position du récepteur, c'est le principe de triangulation.

Pourtant, la connaissance de la distance entre le récepteur et les trois satellites ne suffit pas à déterminer avec précision la position du récepteur. En effet, outre les trois inconnues de position, il existe également une inconnue temporelle. L'horloge du récepteur et des satellites ne sont pas synchronisés, il est donc impossible de déterminer avec précision la position du récepteur sans la connaissance de cette quatrième inconnue. En effet, l'onde se propageant à la vitesse de la lumière, un retard ou une avance d'1 µs entraîne une erreur de 300 m sur la distance.

Si l'horloge du récepteur est en avance par rapport à celle du satellite, le temps de propagation de l'onde va être surestimé et il en sera donc de même pour la distance entre le satellite et le récepteur. A l'inverse, si l'horloge du récepteur est en retard par rapport à celle du satellite, la distance entre le satellite et le récepteur va être sous-estimée. C'est ce qu'illustre la Figure 1 Quatre observations sont donc nécessaires au positionnement d'un système.[1].

3.2.2 Détermination de l'inconnue temporelle

L'inconnue temporelle est déterminée à l'aide des observations du quatrième satellite en utilisant le principe suivant. Les horloges n'étant pas synchronisées, ce n'est pas la distance vraie que l'on mesure, mais une pseudo-distance qui est la somme de la distance entre le récepteur et le satellite et de l'erreur liée à la désynchronisation des horloges. Dans un espace à trois dimensions, la quatrième mesure permet de synchroniser les horloges. Si la position du récepteur estimée par la quatrième mesure coïncide avec la position trouvée par les trois premières observations, la distance estimée est la distance vraie. Sinon, il est nécessaire de modifier l'horloge du récepteur par approximations successives jusqu'à ce que la quatrième mesure coïncide avec les trois autres.

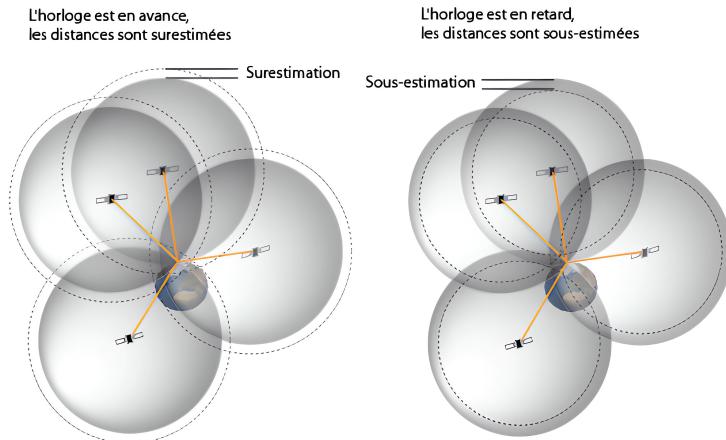


FIGURE 1 – Erreurs liées aux horloges

<http://www.breves-de-maths.fr/mon-gps-doit-savoir-heure/>

3.3 Sources d'erreurs

Les principales sources d'erreur affectant le positionnement GNSS se répartissent en 3 catégories : les erreurs liées aux satellites, les erreurs liées à la propagation et les erreurs liées à la station (antenne et récepteur) et à son environnement.

3.3.1 Erreurs liées aux satellites

Le positionnement GNSS repose sur la connaissance de la position et de l'horloge des satellites composant les constellations. Les erreurs d'orbite et d'horloge satellite impactent le positionnement de manières différentes selon le mode d'utilisation. On peut l'utiliser en positionnement absolu où le récepteur se positionne directement par rapport aux satellites : l'erreur sur la position du satellite se répercute directement sur la position du récepteur. En positionnement relatif, le récepteur se positionne par rapport à un réseau de récepteurs GNSS de position connue (2 stations sont séparées par une distance b appelée ligne de base). L'erreur radiale $\delta(r)$ sur la position du satellite entraîne une erreur $\delta(b)$ sur la ligne de base mesurée.

Il faut prendre en compte les effets relativistes tels que la relativité restreinte où ni l'espace, ni le temps ne sont absolus séparément, *i.e.* les longueurs et durées mesurées dépendent de l'observateur inertiel. Il faut aussi prendre en compte la relativité générale (l'écoulement du temps dépend de l'intensité de la gravitation : il ralentit au voisinage des masses). Enfin, les orbites des satellites se réfèrent au centre de masse de ceux-ci et non à la position du centre de phase de l'antenne émettrice.

3.3.2 Erreurs liées à la propagation et à la station

La mesure de distance d'un satellite repose sur l'hypothèse fondamentale que la vitesse de propagation du signal émis par le satellite est constante et égale à la célérité de la lumière. Ceci est effectivement vérifié uniquement pour une propagation dans le vide, la vitesse de propagation des signaux change avec le déplacement du signal à travers l'ionosphère et la troposphère.

Les erreurs proviennent des trajets multiples qui sont des réflexions parasites avant d'arriver au récepteur. Ils dépendent de l'environnement de l'antenne et du type d'antenne. Les masques qui sont des obstacles physiques peuvent aussi empêcher la réception du signal GPS. L'erreur totale typique pour un positionnement standard peut atteindre les 15m et pour un positionnement précis, elle est inférieure à 20mm.

3.3.3 Stratégie de réduction de l'erreur : le GPS en mode différentiel

Afin d'améliorer la localisation du récepteur, et d'obtenir une précision de l'ordre du cm ou du mm, il est possible d'utiliser le GPS en mode différentiel. Concrètement, cette méthode se base sur l'utilisation de deux récepteurs GPS. Le premier est situé sur une station de référence, sa position est connue avec précision. En déterminant sa position à l'aide des satellites, et en comparant cette mesure à la position réelle du récepteur, on peut déterminer l'erreur. En faisant l'hypothèse que l'erreur est identique pour des récepteurs placés dans une même zone (de l'ordre de 150km), on peut alors déterminer avec précision la position du deuxième récepteur en prenant en compte l'erreur déterminée à l'aide du premier récepteur [3].

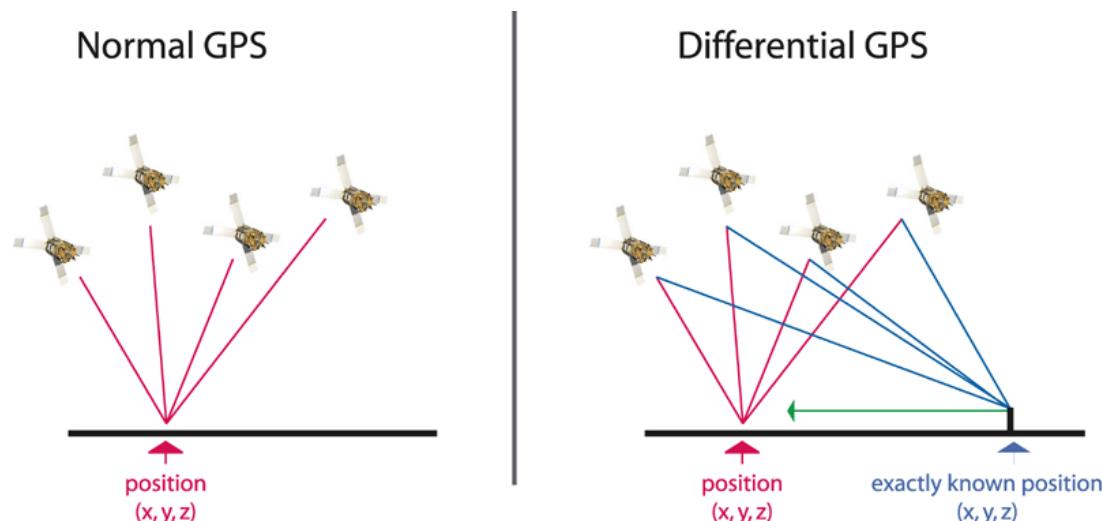


FIGURE 2 – Principe de fonctionnement du gps différentiel
<http://www.cartographie.ird.fr/refugies/methodes-GPS.html>

3.4 Norme NMEA

La norme *National Marine Electronics Association* (NMEA) est un protocole de communication standard utilisé dans l'industrie marine pour permettre à différents appareils électroniques de communiquer entre eux. La norme NMEA définit les messages qui peuvent être échangés entre les équipements électroniques, tels que les GPS, les sondeurs, les radars, les compas électroniques et les pilotes automatiques.

Les messages NMEA sont transmis sous forme de chaînes de caractères ASCII qui contiennent des données sur la position, la vitesse, la direction, la profondeur, etc. Il existe plus d'une trentaine de trames NMEA différentes. Un récepteur GNSS renvoie souvent plusieurs types de trames complémentaires (les GGA et RMC en sont un exemple) car tous les logiciels qui interprètent le NMEA ne connaissent pas toutes les trames. Les trames GGA (Global Positioning System Fix Data) et RMC (Recommended Minimum Specific GNSS Data) sont deux types de trames couramment utilisées dans les systèmes de positionnement par satellites (GNSS) pour transmettre des informations essentielles sur la position et le statut de navigation.

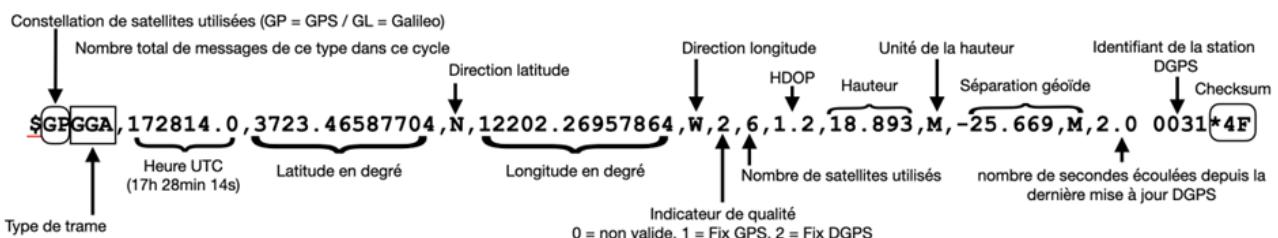


FIGURE 3 – Exemple de trame GGA

Le récepteur GNSS fournit également des trames GSV, qui contiennent des informations détaillées sur les satellites utilisés pour la position et la navigation.

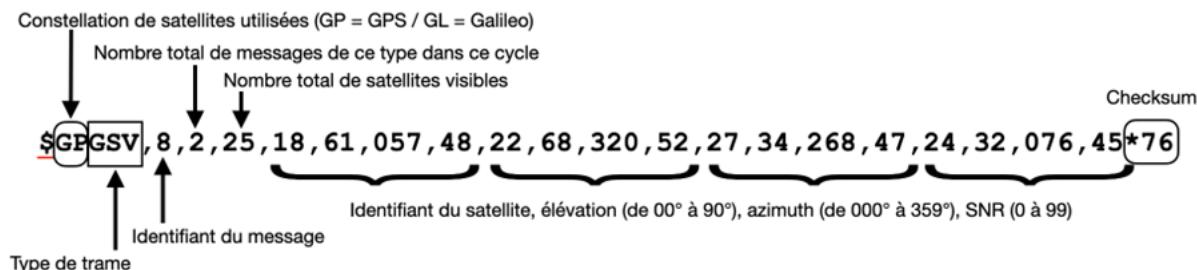


FIGURE 4 – Exemple de trame GSV

4 Description du code réalisé

Nous avons développé trois codes principaux pour notre projet disponibles en annexe.

`acquisition.py` : Ce code récupère les trames NMEA émises par un récepteur GPS et les enregistre dans un fichier au format `".txt"`.

`traitement.py` : Ce code traduit les trames NMEA en une position sur une carte et en une constellation de satellites. Il permet de visualiser la position géographique et les satellites utilisés pour le positionnement.

`TempsReel.py` : Ce code affiche en temps réel la position détectée par le GPS à partir des trames NMEA reçues. Il assure un suivi en temps réel des informations de positionnement fournies par le récepteur GNSS. Dans la suite, nous détaillons l'implémentation de ces codes.

4.1 Le fichier acquisition

Dans un premier temps, les trames NMEA stockées dans le récepteur G-STAR IV sont acquises avec le fichier `acquisition.py` qui utilise la bibliothèque `serial` pour communiquer avec les ports du PC. On précise le port utilisé sur le PC et le débit en bauds de la communication série (qui est indiqué dans la documentation du récepteur G-STAR IV). On ouvre une connexion série avec `serial.Serial` puis dans une boucle on lit chaque ligne des données GPS et on la décode en utilisant l'encodage ASCII à l'aide de `ser.readline().decode`. On ne retient que les lignes commençant par un `"$"` qui précède une ligne NMEA. Ensuite, ces lignes sont retranscrites dans un fichier texte pour être traitées plus tard.

4.2 Le fichier traitement

Dans un deuxième temps, on traite les données acquises pour placer les points sur une carte (ici une image aérienne de l'ENSTA Bretagne). Le fichier `traitement.py` ouvre le fichier texte généré dans le fichier `acquisition.py`.

On crée deux listes vides pour stocker les messages GGA (relatifs à la position géographique, à l'heure et à la qualité du signal GPS) et les messages GSV (qui fournissent des informations sur les satellites visibles depuis la position actuelle telles que le numéro de séquence du message GSV, le numéro de satellite, etc.). On lit chaque ligne du fichier texte et on utilise le bibliothèque `pynmea2` qui permet de traiter les données NMEA. Plus précisément, la fonction `pynmea2.parse` analyse la ligne fournie en tant que chaîne de caractères et renvoie un objet de message NMEA correspondant. Cet objet NMEA a des attributs qui représentent les différents champs et informations de la phrase NMEA. Par exemple, si la ligne NMEA contient une phrase GGA, l'objet de message renvoyé aura des attributs tels que `sentence_type` (type de phrase), `latitude`, `longitude`, `altitude`, etc.

On ouvre aussi l'image satellite de l'ENSTA Bretagne avec la bibliothèque `rasterio`. Elle permet de lire, écrire et manipuler des données raster géospatiales. Elle est utilisée pour travailler avec des images satellites, des cartes topographiques, des modèles numériques de terrain (MNT) et d'autres types de données géoréférencées. On saisit les coordonnées du coin supérieur gauche de l'image qui nous est déjà fourni, son nombre

de pixels en longueur et largeur ainsi que le nombre de bandes de l'image. Comme l'image est en couleurs RVB, elle sera composée de trois bandes : une pour le canal rouge, une pour le vert et une pour le bleu. La fonction `count` renvoie donc trois. On définit également deux systèmes de coordonnées qui nous seront utiles. A l'aide de la classe `Proj` de la bibliothèque `pypyproj`, le système de coordonnées d'entrée (WGS84) est défini par `inProj = Proj("+init=EPSG:4326")` et celui de sortie (Lambert93) par `outProj = Proj("+init=EPSG:2154")`.

Les coordonnées issues des trames NMEA sont écrites dans le système WGS84. On les convertit en Lambert93 grâce à la fonction `transformation` qui prend en argument la longitude et latitude repérées dans le fichier texte des NMEA acquises. On obtient les coordonnées équivalentes en Lambert93 via la fonction `transform` et on réalise un déplacement affine de ce point pour trouver les coordonnées sur l'image. On crée ensuite un tableau vide qui stockera les données de l'image. On lit chaque bande de l'image à l'aide de la fonction `read` de la bibliothèque `rasterio` et on la stocke dans le tableau. On crée une figure `matplotlib` qui affichera l'image aérienne et un graphique en polaire de la position des satellites.

Sur le graphique en polaire, on affiche la position des satellites présents dans la liste des messages GSV qu'on a rempli plus tôt. Pour ce faire, pour chaque message GSV de la liste, on crée la liste des attributs du message GSV grâce à la fonction `data` du module `pynmea2.nmea`. Les différents attributs sont repérés par une position précise dans cette liste. On a ainsi accès à l'identifiant du satellite, son élévation (l'angle d'élévation en degrés par rapport à l'horizon), son azimut (l'angle d'azimut en degrés par rapport au nord vrai) et son rapport signal à bruit. Enfin, pour chaque message GGA de la liste qu'on a rempli au début, on affiche les positions sur l'image aérienne à l'aide de la fonction `transformation` qui à partir de la latitude et de la longitude dont on a accès grâce aux attributs `longitude` et `latitude`.

4.3 Le fichier Tempsreel

Enfin, le fichier `Tempsreel` réalise en temps réel l'acquisition des trames NMEA et met à jour l'affichage des points dans l'image satellite de l'ENSTA Bretagne (il reprend le code des fichiers `acquisition` et `traitement`). Il ne prend en compte que les trames GGA et ne se préoccupe pas des trames GSV. Il n'affiche donc que les positions et pas le graphique en polaire. Il est utile pour afficher un itinéraire.

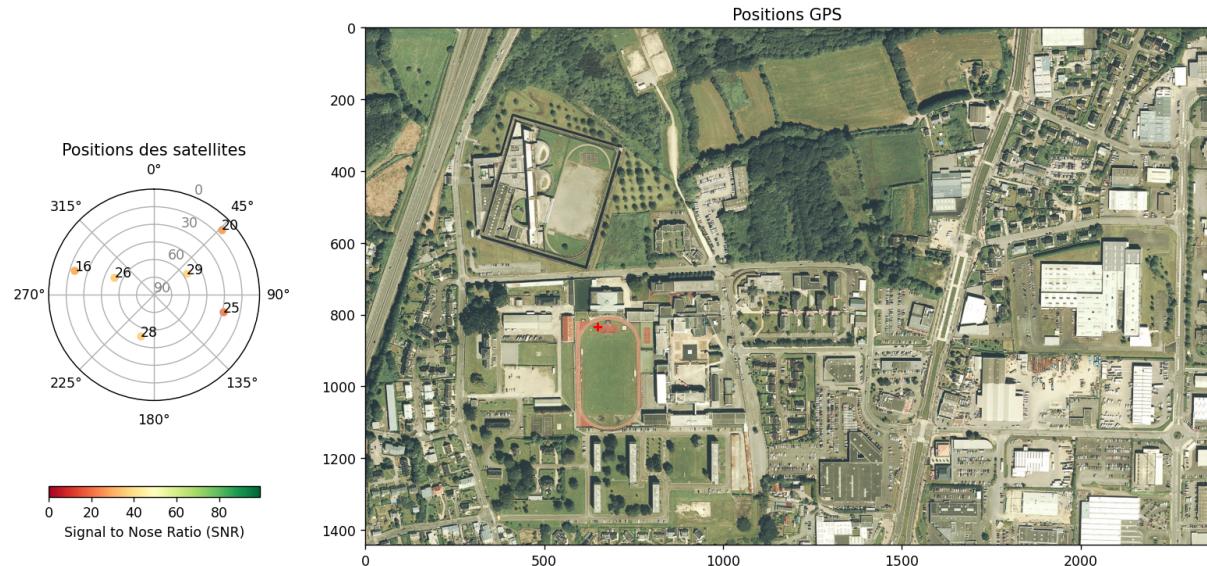


FIGURE 5 – Positionnement à l'aide du récepteur GSTAR-IV

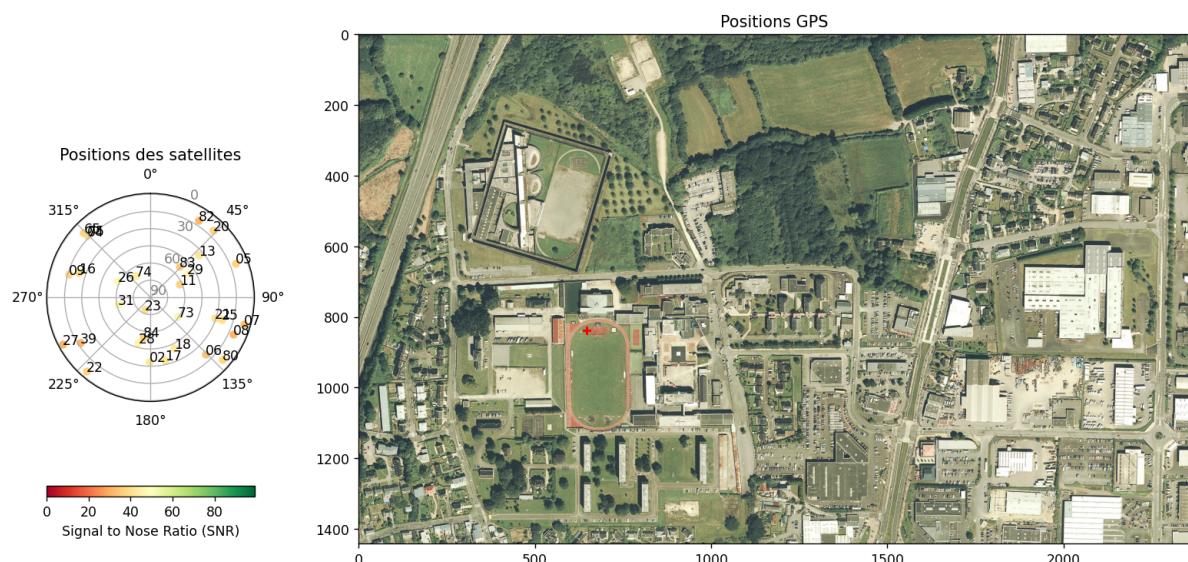


FIGURE 6 – Positionnement à l'aide du récepteur SPECTRA 80

5 Comparaison de deux récepteurs GNSS

5.1 Acquisition des données

Des relevés ont été réalisés à l'aide de deux récepteurs GNSS distincts au niveau d'un point géoréférencé du stade de l'ENSTA-Bretagne. Le premier système est un récepteur G-STAR IV, qui présente une précision de positionnement de l'ordre de 2.5m [2]. Le deuxième système utilisé, beaucoup plus coûteux est le récepteur SP80 de la marque Spectra Precision. Sa précision est de l'ordre du cm. L'objectif est double, comparer les positions obtenues à l'aide des deux récepteurs mais également comparer ces positions avec la valeur théorique du point géoréférencé. Les coordonnées du point de référence ont été déterminées en 2019 à l'aide d'un GNSS statique (SPS855 + Trimble Zephyr2). Pour obtenir des valeurs en mètres, on comparera les projections en Lambert93 du point de référence et des positions obtenues à l'aide des récepteurs. Le point de référence a une précision dans ce système de projection inférieure à un cm. Concernant les données altimétriques, nous sommes passés par le repère de référence vertical (IGN69). La précision y est inférieure à 4 cm



FIGURE 7 – Récepteur utilisé pour la mesure du point de référence

5.2 Positionnement d'un point à l'aide des récepteurs

Dans un premier temps, intéressons-nous aux résultats fournis par les deux récepteurs. La figure 6 montre les résultats obtenus respectivement par les récepteur G-STAR IV et SPECTRA80. Comme décrit en amont dans ce rapport, après avoir été traité, et subit une projection, les données acquises par le récepteur sont représentées sur une carte.

La croix rouge est la position du point de référence sur lequel les mesures ont été réalisées. Les croix bleues montrent les résultats obtenus à l'aide des deux récepteurs. Graphiquement, on observe un léger écart entre la position vraie et la position déterminée par les récepteurs. Les positions des deux récepteurs sont assez regroupées, mais le récepteur GSTAR-IV semble plus éloigné du point de référence.

Les mesures ayant été réalisées dans les mêmes conditions et dans un intervalle de temps restreints, on peut supposer que la différence de positionnement entre les deux récepteurs est principalement due à leur différence de qualité.

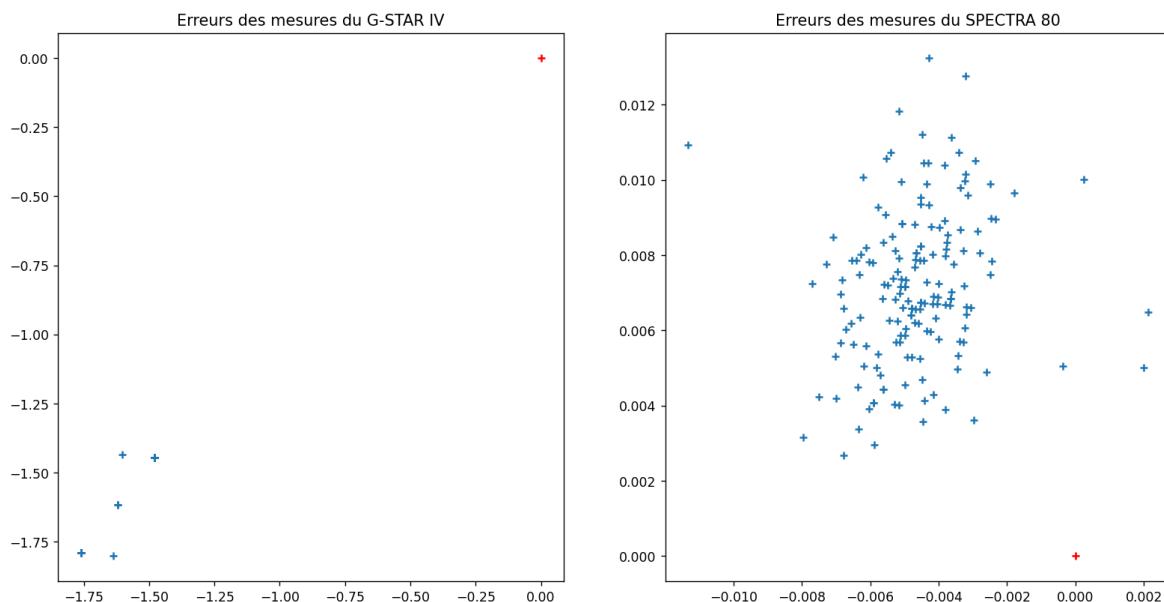


FIGURE 8 – Récepteur utilisé pour la mesure du point de référence

5.3 Erreurs de justesse et de fidélité des mesures

Pour estimer la pertinence du travail réalisé, et pour comparer les deux récepteurs utilisés, il est nécessaire de s'intéresser aux erreurs de justesse et de fidélité des mesures.

La fidélité d'une mesure est définie par le Guide ISO/CEI 99 comme "l'Étroitesse de l'accord entre les indications ou les valeurs mesurées obtenues par des mesurages répétés du même objet ou d'objets similaires dans des conditions spécifiées". Concrètement, plus un échantillon de mesures est fidèle plus son écart-type est faible. C'est un bon indicateur de la dispersion des mesures.

La justesse est-elle définie comme "l'étroitesse de l'accord entre la MOYENNE d'un nombre infini de valeurs mesurées répétées et une valeur de référence" (Guide ISO/CEI 99). Dans notre cas, cette valeur de référence est un point du stade de l'ENSTA-Bretagne dont la position est géoréférencée, et donc connue avec précision. L'erreur de précision totale correspond à la racine de la somme des erreurs au carré. C'est cette valeur qui définit la précision du positionnement :

Pour estimer ces erreurs de fidélité et de justesse, un autre fichier python a été créé. Nous avons décidé de comparer les valeurs projetées en Lambert93, raison pour laquelle, les valeurs de longitude et de latitude ont été converties en mètres. Pour déterminer l'erreur de fidélité, une fonction prend en paramètres la liste des valeurs acquises à l'aide des récepteurs GSTAR-IV et RTK. Dans notre cas, l'espace est à trois dimensions (longitude, latitude, altitude). La fonction calcule l'écart-type dans chaque direction. L'écart-type total correspond à la racine de la somme des écarts-types au carré.

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{\text{lat}}^2 + \sigma_{\text{long}}^2 + \sigma_{\text{alt}}^2} \quad (1)$$

Pour estimer l'erreur de justesse, une autre fonction a été créée. Elle prend en arguments la liste des mesures et la position du point géoréférencé. De la même manière, on calcule la distance entre la valeur vraie et la moyenne dans chaune des directions. L'erreur de justesse correspond à la racine de la somme des moyennes au carré dans chaque direction

$$\text{justesse} = \sqrt{x_{\text{lat}}^2 + x_{\text{long}}^2 + x_{\text{alt}}^2} \quad (2)$$

Erreurs (mètres)	Justesse	Fidélité	Totale
Avec altitude	8.22	0.18	8.23
Sans altitude	2.40	0.18	2.41
Altitude uniquement	7.86	0.04	7.86

TABLE 1 – Tableau des erreurs de mesures du GSTAR IV

Erreurs (mètres)	Justesse	Fidélité	Totale
Avec altitude	0.893	0.004	0.893
Sans altitude	0.008	0.002	0.008
Altitude uniquement	0.893	0.003	0.893

TABLE 2 – Tableau des erreurs de mesures du SPECTRA 80

5.4 Les erreurs liées à la résolution des récepteurs

Nous avons réalisé les études des erreurs sur un échantillon d'une centaine de mesures (120 pour le G-STAR et 126 pour le SPECTRA). Cependant, on remarque sur la figure 8 une différence notable entre les deux mesures. En effet, alors que sur le SPECTRA 80 tous les points (ou presque sont affichés) sur le G-STAR IV, on observe seulement 5 points distincts. En fait, les 120 points sont superposés sur 5 points. Ce phénomène est du à la plus faible résolution de mesure du G-STAR IV que du SPECTRA 80. Par ailleurs, on retrouve ce phénomène de superposition pour le SPECTRA, mais beaucoup moins car il a une bien meilleure résolution. Ainsi le G-STAR IV a une résolution de l'ordre de 10cm alors que celle du SPECTRA 80 est inférieure à 1mm. Cette erreur n'a pas été prise en compte lors des calculs précédents cependant il ne faut pas les négliger pour autant.

5.5 Comparaison des résultats obtenus à l'aide des deux récepteurs

Les tableaux ci-dessus décrivent les erreurs de justesse et de précision des deux récepteurs.

Comme on peut le voir, le récepteur GSTAR-IV présente une erreur de justesse de 8.22m et une erreur de fidélité de moins de 0.2m. Si les valeurs sont assez groupées, la précision du positionnement en revanche est moindre que celle décrite dans la documentation du récepteur (de l'ordre de 2.5m). Cette tendance se confirme avec le récepteur SPECTRA 80 qui possède une fidélité importante mais une erreur de justesse de 0.893m. De nouveau, là où le récepteur est sensé posséder une précision de l'ordre du cm, dans notre cas, il présente une erreur de l'ordre du m.

Si l'écart de précision entre les deux récepteurs correspond aux résultats attendus, la précision des deux systèmes en revanche est bien moindre qu'espérée. Même en ajoutant deux mètres aux valeurs d'altitude obtenues avec le récepteur SPECTRA 80 (les mesures ayant été réalisées à l'aide d'une perche), la précision de l'altitude semble anormalement faible au regard des deux autres coordonnées. C'est la raison qui nous a poussé à déterminer les erreurs avec et sans l'altitude.

Comme on peut le voir dans le tableau, l'erreur totale sans altitude du récepteur SPECTRA 80 est de l'ordre du cm. L'erreur de justesse de ce système est presque uniquement due à l'erreur de justesse de l'altitude.

5.6 Analyse des résultats

On a pu relever différents facteurs qui ont pu affecter la précision des mesures parmi lesquels :

- Les conditions climatiques nuageuses lors de la prise de mesures
- Le nombre de chiffres significatifs des mesures où l'erreur de résolution
- L'incertitude liée au positionnement des récepteurs sur le point de référence
- Les erreurs liées à la propagation

6 Choix d'un récepteur

Les deux récepteurs utilisés au cours de ce projet présentent chacun des avantages et des inconvénients. Bien que le choix du récepteur dépende principalement de l'utilisation que l'on souhaite en faire, on peut donner quelques critères de sélection.

Premièrement, le prix des deux récepteurs est très différent. Là où le récepteur GSTAR-IV coûte une soixantaine d'euros, le prix du récepteur SPECTRA 80 s'élève lui à plusieurs milliers d'euros.

Cette différence de prix est révélatrice de la différence de précision des deux systèmes. Là où le récepteur GSTAR-IV ne capte que les satellites de la constellation GPS, le système SPECTRA 80 est capable de capter des satellites d'autres constellations, GLONASS, GALILEO ou BEIDOU par exemple. De plus, afin de réduire encore l'erreur de précision, ce système est connecté à Internet et peu enlever aux valeurs obtenues l'erreur qu'il reçoit d'une station de référence cf gps différentiel biblio. Cela contribue grandement à améliorer la qualité du système, et peut expliquer la différence de précision observée entre les deux récepteurs.

Si le récepteur GSTAR-IV peut à première vue sembler plus facile d'utilisation, contrairement au système SPECTRA 80, il ne traite pas les valeurs obtenues. Il renvoie uniquement les trames GPS, qui devront être analysées ultérieurement par l'utilisateur. Il est à noter que les deux récepteurs sont portables, mais que le système GSTAR-IV est tout de même plus facilement transportable. Si l'utilisateur souhaite réaliser une mesure très précise, il est plus raisonnable d'investir dans le récepteur SPECTRA 80. Sinon, le système GSTAR-IV peut suffire à avoir une bonne approximation du positionnement moyennant un peu plus d'efforts de l'utilisateur.



FIGURE 9 – G-STAR IV



FIGURE 10 – SPECTRA 80

7 Conclusion

Le projet de découverte des systèmes nous a offert l'opportunité d'approfondir nos connaissances sur le fonctionnement des systèmes de positionnement par satellites (GNSS). Nous avons étudié en détail la théorie sous-jacente et nous nous sommes penchés sur la façon dont les capteurs GNSS utilisent les trames NMEA pour déterminer notre position. Nous avons notamment développé des codes informatiques qui permettent de traiter les trames NMEA fournies par les récepteurs. De plus, nous avons réalisé une comparaison entre deux récepteurs GNSS, à savoir le GSTAR IV et le Spectra-80 dont nous avons évalué les performances. Cette comparaison nous a permis de comprendre que chaque récepteur présente des avantages et des défauts spécifiques, rendant préférable l'utilisation de l'un ou de l'autre en fonction des besoins. Le tableau ci-dessous récapitule les avantages et les défauts de chacun des récepteurs.

Récepteur	Avantages	Défauts
GSTAR IV	Coût relativement abordable (environ 60 euros)	Limité en termes de fonctionnalités avancées
GSTAR IV	Bonne fiabilité et justesse	Moins adapté aux applications exigeantes
GSTAR IV	Peu encombrant	
Spectra-80	Fonctionnalités avancées (capte plusieurs constellations de satellites)	Coût élevé (environ 10'000 euros)
Spectra-80	Adapté aux applications exigeantes (donne une position au centimètre près)	Plus encombrant

TABLE 3 – Tableau des avantages et défauts des deux capteurs

Références

- [1] Pierre BOSSER. *GNSS : Systèmes globaux de positionnement par satellites.* 2015.
- [2] Global SAT. *Documentation G-STAR IV.* 2012.
- [3] N.Fauvet V.FREYCON. *De l'acquisition des relevés à leur intégration dans un SIG.* Cirad.fr, 1998.

Table des figures

1	Erreurs liées aux horloges	5
2	Principe de fonctionnement du gps différentiel	6
3	Exemple de trame GGA	7
4	Exemple de trame GSV	7
5	Positionnement à l'aide du récepteur GSTAR-IV	10
6	Positionnement à l'aide du récepteur SPECTRA 80	10
7	Récepteur utilisé pour la mesure du point de référence	11
8	Récepteur utilisé pour la mesure du point de référence	12
9	G-STAR IV	16
10	SPECTRA 80	16