HAL
open science

Caractérisation comparative des services de positionnement différentiel EGNOS et DGPS IALA dans un contexte d'utilisation maritime et fluvial

Romain Guehennec

To cite this version:

Romain Guehennec. Caractérisation comparative des services de positionnement différentiel EGNOS et DGPS IALA dans un contexte d'utilisation maritime et fluvial. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2013. dumas-00938470

HAL Id: dumas-00938470

https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00938470

Submitted on 29 Jan 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS

ÉCOLE SUPÉRIEURE DES GÉOMÈTRES ET TOPOGRAPHES

MÉMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le DIPLÔME D'INGÉNIEUR CNAM

Spécialité : Géomètre et Topographe

par

Romain GUEHENNEC

Caractérisation comparative des services de positionnement différentiel EGNOS et DGPS IALA dans un contexte d'utilisation maritime et fluvial

Soutenu le 11 juillet 2013

JURY

PRÉSIDENT :	**Monsieur Jérôme Verdun**	
MEMBRES :	**Monsieur Pierre-Yves MARTIN,**	**maître de stage**
	Monsieur Laurent MOREL,	**professeur référent**

Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier l'équipe du CETMEF pour son accueil.

Je tiens à remercier tout particulièrement, en qualité de maître de stage, Monsieur Pierre-Yves Martin, pour son aide et son soutien pour ce travail de fin de cycle d'ingénieur. Il m'a permis d'intégrer avec facilité cette structure et d'avoir accès à des responsabilités très intéressantes pour mon avenir professionnel.

Je voudrais de même souligner l'efficacité des personnes avec lesquelles j'ai eu la chance de travailler, comme Monsieur Pierre LEMOINE, responsable de l'alimentation des dispositifs d'acquisition des mesures.

Je voudrais remercier Monsieur Raphaël LEGOUGE du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine pour sa précieuse collaboration.

Je tiens à remercier de même Monsieur Laurent MOREL, maître de conférence et professeur de géodésie à l'ESGT pour sa relecture consciencieuse et ses précieux conseils.

Liste des abréviations

A

AISM	Association Internationale de Signalisation Maritime = IALA

C

CPF	Central Processing Facility

D

DGPS	Differential GPS
DOP	Dilution of Precision

E

EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service

G

GLONASS	Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPGGA	Global Positioning system fixed data
GPGSA	GNSS DOP and active satellites
GPGSV	Satellites in view
GPS	Global Positioning System

H

HPE	Horizontal Position Error

I

IALA	International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authoritires
IGN	Institut Géographique National
IGP	Ionospheric Grid Point
IGS	International GNSS Service
IPP	Ionospheric Pierce Point
ITRF	International Terrestrial Reference System

M

MT0	Message Type 0

N

NLES	Navigation Land and Earth Station
NMEA	National Marine Electronics Association

O

OMI	Organisation Maritime Internationale

P

PPP	Precise Point Positioning

R

RANA	Récepteur d'Acquisition Nautique Automatique
RIMS	Ranging and Integrity Monitoring Stations
RINEX	Receiver INdependant EXchange
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services
RTK	Real-Time Kinematic

S

SA	Selective Availability
SBAS	Satellite Based Augmentation System

U

UTC	Universal Time Coordinated

W

WAAS	Wide Area Augmentation System

Table des matières

Introduction.....8

I Le cadre d'étude.....10

I.1 Présentation des systèmes de navigation.....10

I.1.1 Stations côtières DGPS IALA françaises.....10

I.1.1.1 Historique.....10

I.1.1.2 Principe et diffusion des corrections.....10

I.1.2 EGNOS : European Geostationary Navigation Overlay Service.....12

I.1.2.1 Historique.....12

I.1.2.2 Principe et diffusion des corrections.....12

I.1.3 Le référentiel : MarineSTAR.....14

I.2 Présentation du dispositif d'essai et d'instrumentation.....15

I.2.1 Le choix des récepteurs.....15

I.2.1.1 Le DGPS IALA.....15

I.2.1.2 EGNOS.....16

I.2.2 Le banc de test.....16

I.2.2.1 Le matériel utilisé.....16

I.2.2.2 Le dispositif de mesure.....18

I.2.3 Les navires d'essai.....19

I.2.3.1 À bord du Pont Aven de la Brittany Ferries.....19

I.2.3.2 Sur le Fromveur II de la Penn Ar Bed.....21

I.2.3.3 Sur la Gironde à bord de l'Arbalestrille.....23

II Comparaison des systèmes EGNOS et DGPS IALA.....24

II.1 La base de calcul.....24

II.1.1 Opérations, simplifications, approximations.....24

II.1.2 Indicateurs statistiques.....27

II.2 Caractérisation du référentiel MarineSTAR.....27

II.3 Le GPS.....31

II.4 Le DGPS IALA.....32

II.4.1 Le DGPS IALA couplé avec le récepteur RTCM externe.....32

II.4.2 Le DGPS IALA « autonome ».....36

II.5 EGNOS.....37

II.5.1 Sur récepteur HEMISPHERE.....37

II.5.2 Sur récepteur FURUNO.....38

III Bilan comparatif sur les services de positionnement étudiés.....39

Conclusion.....40

Bibliographie.....41

Annexes.....43

Résumé.....50

Introduction

<u>Problématique :</u> EGNOS peut-il, dans le cadre du transport maritime et fluvial, totalement suppléer le système actuel de positionnement différentiel DGPS IALA ?

Des premières traversées historiques pour la découverte de nouvelles terres jusqu'à nos jours où la Marine constitue la première voie de transport de marchandise à travers le monde, la connaissance de la localisation a toujours été un objectif primordial. Avec l'arrivée et la démocratisation du GPS, le positionnement absolu s'est imposé comme une avancée majeure dans le domaine du transport maritime. De nouvelles normes ont ainsi été mises en place introduisant des exigences de précision : la position doit être connue à 100 mètres près en pleine mer, 10 mètres [1] en environnement côtier et, pour certaines applications scientifiques, une précision métrique est nécessaire.

Afin de répondre à des exigences internationales de plus en plus strictes dans le domaine des transports, plusieurs systèmes de navigation ont été développés, dont les deux services étudiés dans ce mémoire.

Illustration 1: Couverture du DGPS IALA des différents États

Le DGPS IALA est un système d'augmentation développé spécifiquement pour le transport maritime. Sous couvert d'organisations internationales comme l'Association Internationale de Signalisation Maritime (AISM) et l'Organisation Maritime Internationale (OMI), le DGPS IALA a été conçu sur la base de travaux conduits par les gardes côtes des États-Unis, les US Coast Guards. Développé d'une part pour contrer la Selective Avalaibility[1] du GPS et d'autre part apporter un service d'intégrité[2], le DGPS IALA a été déployé en 1996. Ce système terrestre a une portée de service côtière limitée (de 100 à 300 kilomètres) ; c'est un service gratuit pour l'usager qui est déployé et opéré par les autorités de balisage des États. Néanmoins, il convient de préciser que cette mise en place de ce système n'est pas imposée aux États et donc, qu'ils ne sont pas dans l'obligation d'installer des stations côtières DGPS.

Système élaboré en étroite collaboration avec l'Union Européenne et les organismes responsables de la sécurité aérienne en Europe, EGNOS est un service dédié pour l'aviation civile et conçu sous couvert de l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI). Comparable au DGPS IALA, le système EGNOS relayé par des satellites géostationnaires offre depuis mars 2011, précision et garantie de service en proposant un service d'intégrité performant. Sa couverture européenne est plus large que le DGPS IALA et il reste de plus accessible à l'ensemble des usagers, du fait de sa gratuité d'utilisation.

1 La Selective Availability est un procédé qui a pour objectif de dégrader volontairement la précision du GPS. Elle était utilisée par le Département de la Défense américain jusqu'en 2000 pour restreindre aux utilisateurs civils l'accession à une précision de positionnement meilleure que 100 m.

2 L'intégrité est définie par l'OMI dans sa résolution A915(22) comme la capacité à alerter l'usager dans un délai donné lorsque le système ne doit pas être utilisé pour la navigation.

Bien que développé pour les besoins de l'aviation civile, EGNOS affiche des performances qui répondent aux exigences du positionnement maritime. Pour cette raison, et dans un souci de rationalisation des dépenses, les autorités françaises en charge de la sécurité de la navigation s'interrogent sur la nécessité de poursuivre la diffusion du service DGPS IALA. En effet, la plupart des récepteurs GPS des marchés grand public et professionnel actuels reçoivent et utilisent le service EGNOS ; l'arrêt du service DGPS IALA n'aurait a priori donc pas de conséquences pour la sécurité des usagers du transport maritime.

Afin d'alimenter sa réflexion, les autorités françaises ont commandé au CETMEF une campagne d'essais ayant pour objectif de caractériser les performances de EGNOS et de vérifier qu'elles répondent aux exigences de l'OMI, mais aussi de comparer les performances respectives du DGPS IALA et de EGNOS.

Cette campagne permettra aussi d'examiner et de comparer les modalités de mise en œuvre respectives des deux systèmes à bord d'un navire et notamment pour tout ce qui concerne l'installation des récepteurs et des antennes.

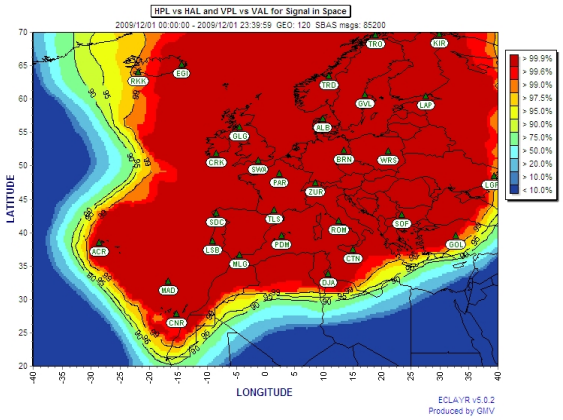


Illustration 2: Couverture du service européen EGNOS

Ce sera enfin l'occasion de tester deux récepteurs DGPS IALA mettant en œuvre des stratégies différentes pour l'acquisition et la réception du signal DGPS IALA.

Une première campagne d'essais *Egnos on the Sea* avait été menée par le CETMEF en 2012 pour caractériser le système EGNOS. Mais l'analyse des mesures laisse suspecter la présence de multi-trajets créés par les superstructures du navire ; ce qui laisse penser que les précautions d'installation des antennes n'ont probablement pas été suffisantes. Pour cette raison, et afin d'éviter toute ambiguïté sur l'interprétation des mesures, les autorités françaises en charge de la sécurité de la navigation ont commandé au CETMEF une campagne d'essais complémentaire.

L'étude consistera donc à comparer simultanément les deux systèmes de navigation IALA et EGNOS dans un contexte maritime et fluvial en décrivant dans une première partie le fonctionnement de ces deux services et du système de référence : MarineSTAR. Nous montrerons de même le dispositif d'acquisition des mesures ainsi que les montages sur les différents bateaux. Ensuite, dans un deuxième temps, nous comparerons sur la base d'approximation locale et d'indices statistiques les différents services de navigation. Enfin, nous dresserons un bilan comparatif des systèmes étudiés afin d'en ressortir les résultats essentiels de cette étude.

I Le cadre d'étude

I.1 Présentation des systèmes de navigation

I.1.1 Stations côtières DGPS IALA françaises

I.1.1.1 Historique

En 1998, afin d'accroître la sécurité de la navigation dans ses eaux territoriales, la France a installé sept stations DGPS. Conçues dans le respect des recommandations de l'AISM et de l'OMI, celles-ci améliorent alors notablement le service GPS : la précision de positionnement de 10 m est meilleure que les 100 m du GPS affecté de la Selective Availability, et le service de contrôle d'intégrité garanti à l'usager que son positionnement est valide. Déployées sur le littoral pour assurer une couverture continue de la bande côtière, elles reprennent les infrastructures du RANA[3], un système de radionavigation hyperbolique devenu obsolète.

I.1.1.2 Principe et diffusion des corrections

Le DGPS ou GPS différentiel est une méthode de positionnement temps réel qui permet grâce à une station de référence fixe de transmettre aux utilisateurs dans la zone de couverture des corrections sur les pseudo-distances des satellites. Ces corrections permettent au récepteur de compenser les erreurs telles que l'imprécision des éphémérides des satellites ou encore les retards apportés au signal GPS par les couches ionosphérique et troposphérique. La position de la station étant connue, les distances géométriques entre la station et tous les satellites sont retranchées aux observations brutes. Ces différences constitueront les corrections différentielles qui seront transmises par voie hertzienne sur la bande [283,5-325] kHz. Cette bande de fréquence présente l'avantage d'atteindre des portées de radiodiffusion relativement importantes pour des puissances d'émission modestes. Toutefois elle est sensible aux interférences externes, tels que les événements climatiques, orages, levés et couchers de soleil où il y a une forte activité électronique dans l'atmosphère [2]. Historiquement cette bande de fréquence était attribuée aux radiophares qui permettaient aux navires de se positionner par triangulation. Devenus obsolètes, les radiophares ont été progressivement abandonnés et la bande de fréquence libérée a été réattribuée pour le service DGPS IALA. Le codage des données transmises par les stations DGPS IALA respectent le standard RTCM sc104 défini par le Radio Technical Commission for Maritime Services.
A proximité immédiate de la station de référence la précision de positionnement est métrique, mais elle se dégrade proportionnellement avec l'éloignement.

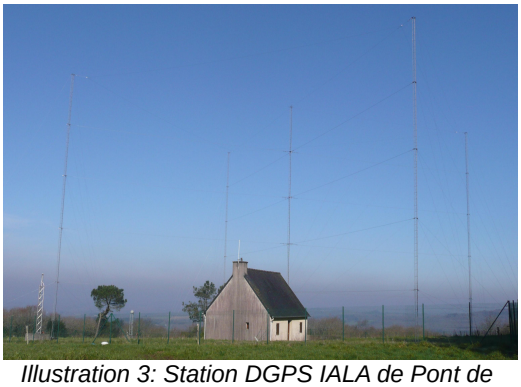


Illustration 3: Station DGPS IALA de Pont de Buis (ID:462)

C'est le phénomène de décorrélation spatiale : les corrections des pseudodistances sont inexactes pour l'usager car la géométrie de la constellation qu'il observe est différente de celle vue par la station de référence. L'expérience a permis de définir la règle mnémotechnique suivante : la précision est dégradée de 1 m tous les 100 km[3][4].La diffusion des corrections s'opère par une antenne externe relativement haute (environ 20 mètres), sa hauteur étant directement reliée à la longueur d'onde d'émission. En électronique, on s'accorde à dire que la hauteur d'antenne doit être égale au quart de la longueur d'onde du signal pour assurer un bon rendement d'émission, c'est-à-dire un rendement en puissance. A 300 Khz, la longueur d'onde vaut environ 1000 mètres ce qui nous ferait une hauteur d'antenne de 250 mètres.

3 Récepteur d'acquisition Nautique Automatique
4 Référence : Recommandation R-121 de l'AISM (Association Internationale de Signalisation Maritime)

Le déploiement et la mise en œuvre de telles antennes sont très dimensionnants : le rayon de haubanage exige des surfaces de terrain importantes et la prise au vent nécessite des ancrages renforcés et onéreux. Pour ces raisons, il a été préféré d'émettre le signal DGPS IALA en utilisant une « antenne capacitive raccourcie ». Ce type d'antenne est moins performant en terme de rendement mais ses coûts d'acquisition et d'exploitation sont beaucoup moins importants.
Dans son principe, l'antenne capacitive courte peut être assimilée à un circuit RLC qui est mis en résonance à la fréquence d'émission du signal DGPS IALA.

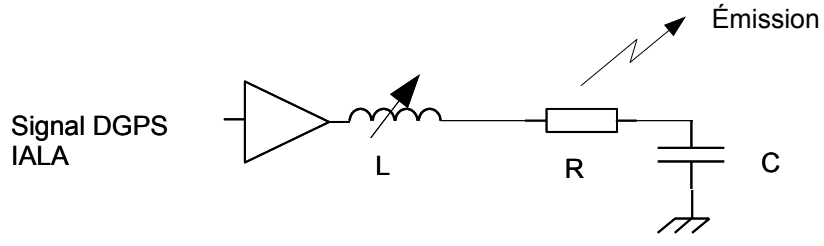


Illustration 4: Principe d'un point de vue électronique de l'émission des corrections différentielles

Dans le schéma équivalent ci-contre, R est la partie résistive du pylône, L est une bobine réglable qui permettra d'accorder la fréquence de résonance du circuit RLC à la fréquence d'émission souhaitée et C est un condensateur dont l'une des plaques est matérialisée par un réseau de fils enterrés au pied du pylône et l'autre plaque est constituée par une nappe de fils tendus au sommet du pylône. R et C étant fixé, on parvient à jouer sur la valeur de l'inductance L pour obtenir une puissance maximale d'émission.

Il existe près de 400 stations DGPS IALA dans le monde dont sept sont sur notre territoire. Le calcul en temps réel des corrections est réalisé grâce à une infrastructure comprenant une station de référence ainsi qu'un moniteur d'intégrité.

Une antenne de référence (« REF » référencée par l'IGN) connue en position reçoit les signaux GPS qui sont transférés vers la station de référence, qui va en déduire alors la correction à appliquer.

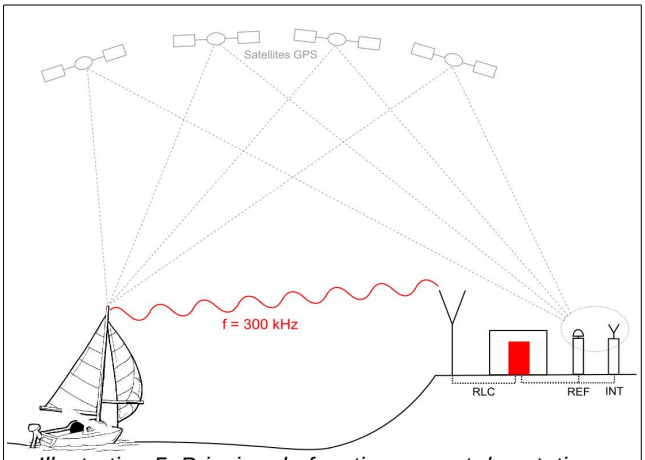


Illustration 5: Principe de fonctionnement des stations côtières DGPS

Illustration 6: Dispositif de contrôle à Pont de Buis

Écran de contrôle

Unité Centrale

Moniteur différentiel

Moniteur d'intégrité

Amplificateur

Le moniteur d'intégrité effectue un contrôle des corrections comparant sa position de référence avec sa position calculée avec les corrections différentielles quviennent d'être établies par la Station de Référence.

Les paramètres contrôlés sont l'écart par rapport à la position de référence, le DOP, l'âge des corrections....

En amont, un domaine de performance est paramétré : corrections toutes les 10 secondes, différence entre les deux systèmes de 10 mètres maximum, etc. Si les corrections ne rentrent pas dans ce domaine, alors le moniteur d'intégrité lance une alarme.

I.1.2 EGNOS : European Geostationary Navigation Overlay Service

I.1.2.1 Historique

Il s'agit d'un système de navigation complémentaire au GPS, se composant d'un réseau terrestre comprenant un ensemble de stations de positionnement et plusieurs centres de contrôle. Opérationnel depuis 2005, il a été développé pour répondre aux besoins de l'aviation civile : précision de positionnement et surtout intégrité, c'est-à-dire fournir à l'utilisateur des informations sur la fiabilité du GPS sous la forme de seuils de confiance et des alarmes en cas d'anomalies.

Le développement d'EGNOS a été financé grâce à trois acteurs principaux : la Commission Européenne, l'Agence Spatiale Européenne et Eurocontrol, l'organisme européen chargé de la sécurité de la navigation aérienne.

I.1.2.2 Principe et diffusion des corrections

Il s'agit d'un réseau efficace basé à la fois sur un segment **spatial** et un segment **terrestre**.

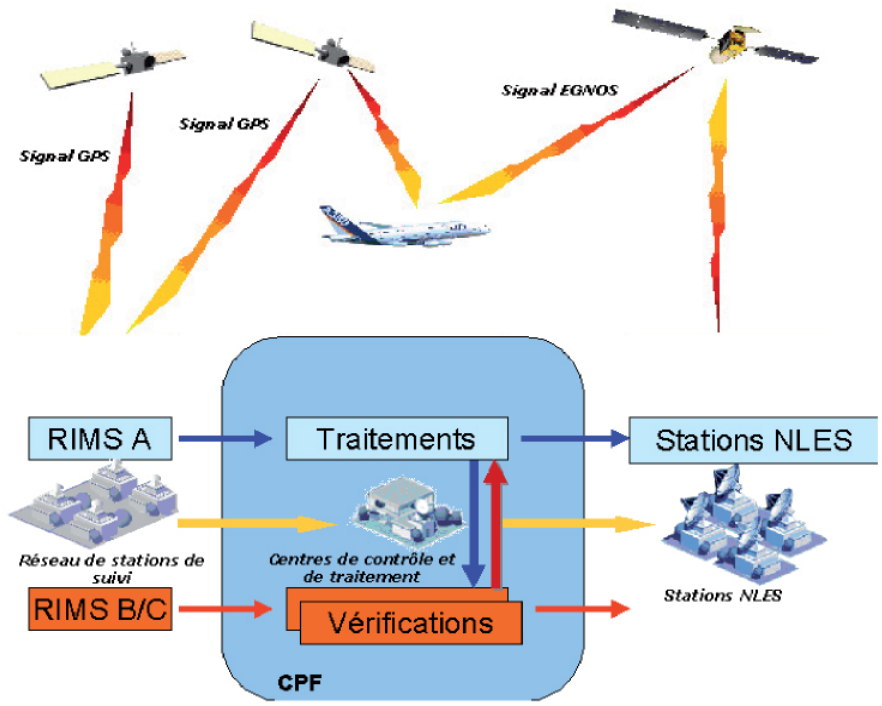


Illustration 7: Segments spatial et terrestre du service EGNOS (Source : CNES)

Un réseau terrestre hiérarchisé délivre un service performant : [4]

- ➔ Réception des signaux GPS
- ➔ Calcul des corrections
- ➔ Transmission au segment spatial

➔ **Réception des signaux GPS : Ranging and Integrity Monitoring Stations (RIMS)**

Une quarantaine de RIMS permettent de collecter les mesures des satellites GPS et des variations ionosphériques. Il existe trois types de RIMS :

- Les RIMS type A qui reçoivent les mesures brutes des satellites qui seront utilisées par les Central Processing Facility (CPF) pour le calcul des corrections
- Les RIMS de type B qui reçoivent également les mesures brutes des satellites qui seront utilisées pour garantir l'intégrité.
- Les RIMS de type C quant à elle sont dédiées à la détection de panne à bord des satellites.

➔ **Calcul des corrections : Central Processing Facility (CPF)**

Les données recueillies par les RIMS sont traitées par les CPF qui estiment les corrections différentielles et les informations d'intégrité puis élaborent les messages EGNOS. Il existe cinq CPF répartis sur quatre sites en Europe (deux en Allemagne, un en Espagne, un en Italie et le dernier au Royaume-Uni) appelés MCC (Mission Control Center). Ces centres calculent deux types de corrections :

- <u>les corrections ionosphériques.</u>

Celles-ci sont calculées en utilisant une grille ionosphérique transmise par EGNOS. Pour estimer l'erreur, le récepteur EGNOS identifie le point d'intersection entre, la droite partant du récepteur et pointant vers le satellite GPS, et la couche ionosphérique située à 350 kilomètres d'altitude. Ce point (IPP : Ionospheric Pierce Point) est localisé dans une grille virtuelle constituée de points connus à la fois en position et en délai atmosphérique (IGP : Ionospheric Grid Points).

Par interpolation entre chaque IPP et les valeurs connues des IGP, le récepteur est capable d'estimer le retard ionosphérique pour chaque IPP et donc chaque pseudo-distance.

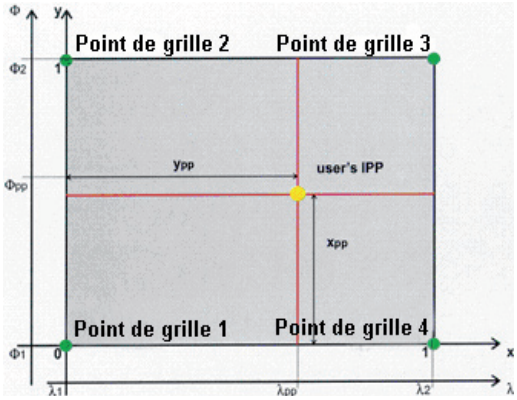


Illustration 8: Principe d'interpolation des IPP (Source:CNES)

- <u>les corrections des erreurs d'éphémérides et d'horloge des satellites GPS.</u>

Les corrections du service GPS sont appliquées en premier lieu puis suivent celles fournies par EGNOS.

➔ **Transmission au segment spatial :Navigation Land Earth Station (NLES)**

Les stations NLES reçoivent les messages EGNOS du CPF et les transmettent aux satellites géostationnaires pour la diffuser aux utilisateurs. Deux NLES sont utilisées (une en redondance) pour chaque satellite géostationnaire qui sont INMARSAT AOR-E, INMARSAT IOR-W et ARTEMIS, ce qui fait un total de six NLES. Ayant une orbite géosynchrone et situés à une latitude nulle, les satellites géostationnaires ne sont plus visibles au-delà de 75° de latitude.

I.1.3 Le référentiel : MarineSTAR

Il a été nécessaire de choisir un référentiel précis car l'éloignement du navire ne permet pas d'envisager une localisation temps réel par l'utilisation du RTK. Seul un système satellitaire peut donc remplir cette mission. MarineSTAR est un système de navigation développé par FUGRO, groupe international leader dans le domaine des géosciences et présent dans plus de 60 pays à travers le monde. Ce système a été conçu pour la navigation maritime, qu'elle soit civile (transports de passagers ou de marchandises, recherche scientifique…) ou même militaire, ainsi que pour les plate-formes offshores.[5]

MarineSTAR peut traiter à la fois les signaux des systèmes GPS et GLONASS. Son positionnement est réalisé en traitant les phases des signaux de navigation des deux fréquences disponibles L1 et L2. Le constructeur annonce une précision de positionnement à 95 % de 10 cm en horizontal ainsi que 15 cm en vertical, et cela quelle que soit la position du navire sur le globe. [5]

Son principe de fonctionnement reste similaire à celui d'EGNOS, le réseau comprend :[5]

- 100 stations de référence qui collectent les données brutes GPS/GLONASS. Les positions de ces stations de référence ont été calculées sur la base des stations du service IGS existant. Ces stations utilisant le système de référence international ITRF08, le positionnement fourni par le service MarineSTAR est donc dans le système de référence ITRF08.
- 2 centres de contrôle du réseau (Network Control Center) à Perth (Australie) et Houston (USA) qui rassemblent et contrôlent les corrections différentielles.
- Un utilisateur qui est couvert par une double émission de satellites géostationnaires parmi les 9 satellites géostationnaires compris dans le réseau.
- Redondance dans le calcul des corrections en utilisant plusieurs modes de traitement des données

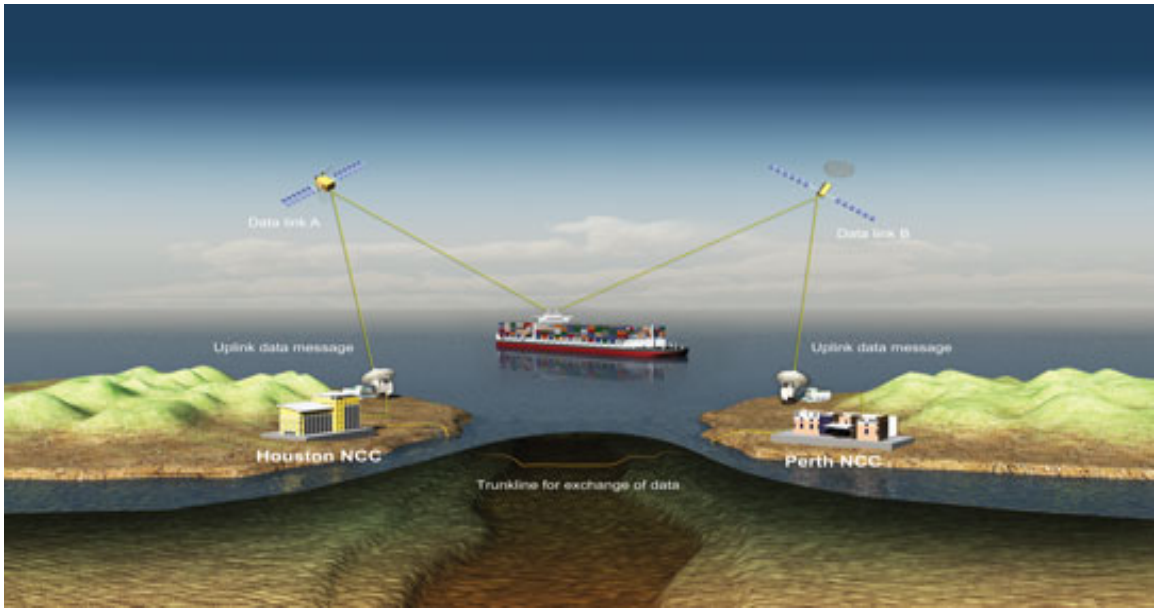


Illustration 9: Réseau de positionnement MarineSTAR

(Source : www.fugromarinestar.com)

I.2 Présentation du dispositif d'essai et d'instrumentation

I.2.1 Le choix des récepteurs

I.2.1.1 Le DGPS IALA

Le signal DGPS IALA est émis depuis des stations terrestres réparties sur le littoral français et européen. Un plan de fréquence établi sous la coordination de l'AISM permet d'éviter les brouillages réciproques ; c'est-à-dire que les fréquences d'émission de deux stations adjacentes sont suffisamment éloignées l'une de l'autre pour qu'il n'y ait pas de perturbations mutuelles. Ce plan de fréquence est canalisé au pas de 0,5 kHz dans la bande [285-315] kHz.

Pour recevoir le signal DGPS IALA, l'usager doit posséder un récepteur DGPS IALA dont le canal de réception est réglable au pas de 0,5 kHz dans la bande des 300 kHz. Ce réglage peut être manuel ou automatique. Dans le cas d'un réglage manuel, c'est l'usager qui fixe le canal de réception sur la station DGPS IALA qu'il souhaite recevoir. Dans le cas d'un réglage automatique, c'est le récepteur qui fixe le canal de réception en appliquant l'une des deux stratégies qui suivent :

- réglage automatique du canal sur le signal DGPS IALA qui présente le meilleur rapport signal à bruit,
- réglage automatique du canal sur le signal DGPS IALA qui optimise la combinaison de 3 paramètres ; à savoir la proximité de la station DGPS IALA, son rapport signal à bruit et la dispersion des mesures corrigées.

Ces deux stratégies sont généralement consécutives à la configuration matérielle qui est adoptée pour recevoir le signal DGPS IALA. En effet le marché propose deux solutions techniques de réception :

La première impose de mettre en œuvre 2 récepteurs. Le premier est un récepteur Moyenne Fréquence 300 kHz ; son rôle se limite à la réception et la démodulation du signal DGPS IALA. Le deuxième est un récepteur 'Standalone[5]' standard qui reçoit le signal GPS et détermine la position. Les corrections différentielles IALA sont alors envoyées grâce à une liaison série au récepteur GPS 'standalone' qui les intègre pour calculer la position corrigée. Cette configuration matérielle est assez contraignante dans la mesure où elle impose d'installer une antenne et un boîtier supplémentaires et d'effectuer du câblage. Elle est le plus souvent adoptée pour mettre à niveau une installation GPS préexistante. Son schéma de principe est le suivant.

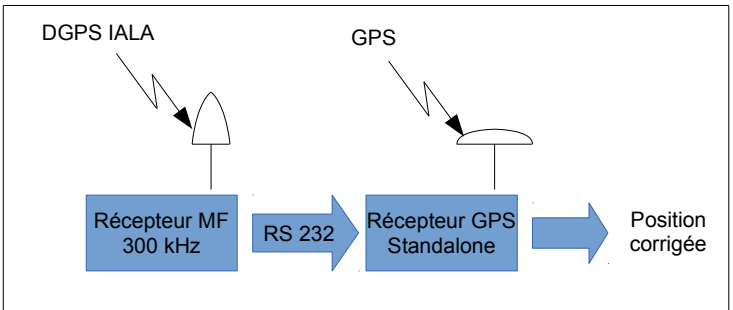


Illustration 10: Premier montage : principe des récepteurs couplés

La deuxième configuration est constituée d'un seul boîtier qui intègre le récepteur GPS 'standalone', le récepteur MF 300 kHz et un calculateur qui pilote le canal de réception du récepteur MF 300 kHz en respectant la stratégie vue plus haut. Cette configuration constitue un système autonome qui n'impose pas de contraintes supplémentaires pour être installé à bord d'un navire. Il s'agit de matériels assez récents. Le schéma de principe est le suivant.

5 'Standalone' signifiant le service GPS dénué de toutes corrections extérieures

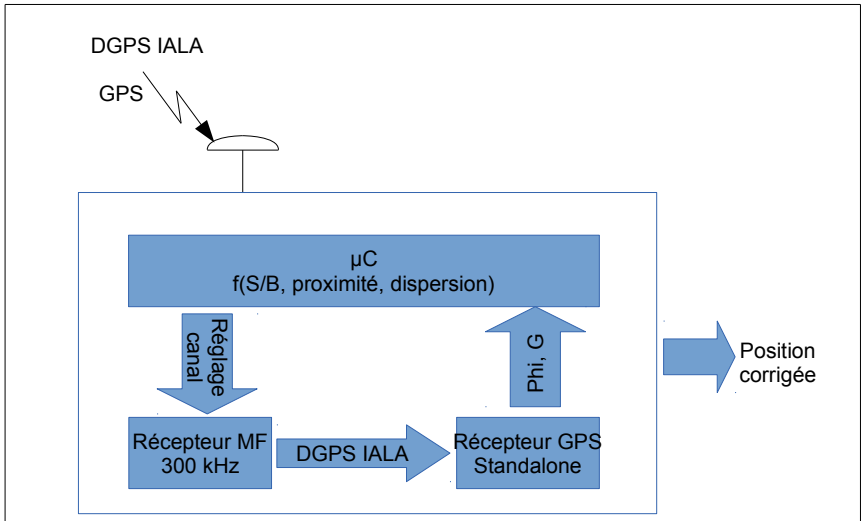


Illustration 11: Deuxième montage : principe du récepteur autonome

Pour cette campagne d'essais on utilisera 2 récepteurs qui mettent chacun en application une des deux stratégies. Ils sont distribués par le constructeur canadien HEMISPHERE qui est un spécialiste du positionnement par GPS en proposant du matériel de gamme « professionnelle ». Ils sont en général utilisés pour le transport maritime ou les études scientifiques mais ne correspondent pas forcément à tous les usagers de la mer tels que les plaisanciers.

I.2.1.2 EGNOS

Bien évidemment dans le cadre de notre étude, nous devrons étudier le service EGNOS et le placer en parallèle du service DGPS IALA, sur une base de comparaison du service MarineSTAR. Pour cela, nous utiliserons de même un récepteur HEMISPHERE. De même, nous intégrerons un récepteur de type « plaisancier » présent sur la plupart des voiliers de taille réduite. Tout ceci sert à tenir compte des différentes catégories de matériels accessibles sur le marché.

I.2.2 Le banc de test

I.2.2.1 Le matériel utilisé

Le montage représenté ci-dessous (illustration 19) est général et chaque campagne possède ses spécificités de montage qui seront détaillées dans leur paragraphe dédié. Nous avons en effet dû faire évoluer le dispositif au fil du temps pour prendre en compte plus de paramètres (type de récepteur...).

- <u>Antennes</u>

Illustration 12: Antenne GPS commune A52

Illustration 13: Antenne RTCM MGL-4

Illustration 14: Antenne A30

➢ Récepteurs

Les récepteurs et antennes utilisés sont pour la quasi-totalité du constructeur canadien HEMISPHERE qui propose différentes gammes de matériel. Seul le récepteur type « plaisancier » est du constructeur japonais FURUNO. Il s'agit d'une marque largement usitée dans le domaine maritime que cela soit chez les plaisanciers ou les professionnels de la navigation maritime.

Le GP-37 se veut être dans la catégorie des récepteurs de positionnement de pêche et de plaisance. Il peut traiter les signaux jusqu'à 12 satellites et prend en compte les services GPS, DGPS et WAAS (EGNOS). Il annonce des précisions de positionnement à 95 % de : [6]

- 10 m en GPS
- 5 m en DGPS
- 3 m en EGNOS

Illustration 15: Récepteur plaisancier FURUNO GP-37

Les précisions a priori du constructeur HEMISPHERE sont données ci-après : [7]

Illustration 16: Récepteur RTCM MBX-4

Le récepteur MBX-4 ne reçoit que les corrections différentielles et les transmet directement au récepteur R110. Par conséquent il, n'engendre pas directement de précision de positionnement.

Il est directement relié à l'antenne MGL-4 et se cale sur les signaux qui ont la plus grande puissance d'émission. Les corrections RTCM sont envoyées au R110 via un port série.

Illustration 17: Récepteur R110 EGNOS – IALA

EGNOS : Il a une précision à 95 % de **0.60 mètres** . C'est un récepteur mono-fréquence L1 de classe « *professionnelle* ». Il est programmé pour exploiter les corrections différentielles diffusées par le système EGNOS.

DGPS IALA : Il a une précision **0.60 mètres** pour le DGPS . Identique au précédent, il est programmé pour recevoir des corrections externes venant du récepteur MBX-4.

Illustration 18: Récepteur R320 MarineSTAR

Il a une précision de **0.2 mètres** à 95 %. C'est un récepteur bifréquence L1/L2 de classe « *géodésique* » pouvant être utilisé pour les levés hydrographiques ou les travaux nécessitant une précision importante : forage, câbliers…

Il accède au service d'augmentation MarineSTAR de FUGRO moyennant un abonnement.

I.2.2.2 Le dispositif de mesure

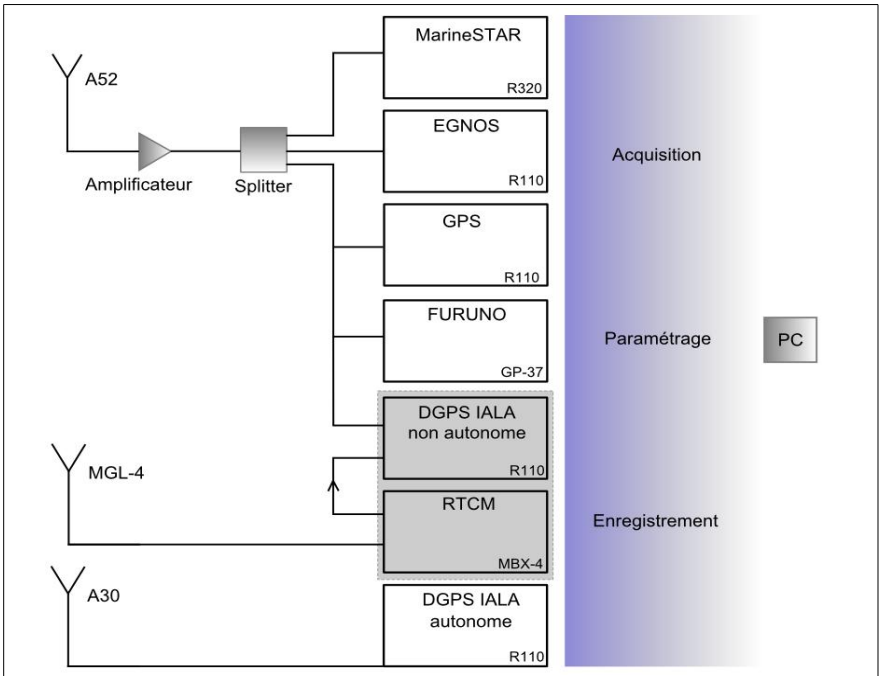


Illustration 19: Montage général d'acquisition de mesures

Le dispositif actuel comprend trois antennes :

- L'antenne A52 (illustration 12) : il s'agit de l'antenne commune capable de recevoir les deux fréquences GPS L1 et L2. Le signal de l'antenne A52 est partagé en plusieurs sorties :
  - le signal MarineSTAR qui comprend à la fois les signaux GPS et les corrections des satellites géostationnaires du service.
  - le signal EGNOS qui est du même type que celui du MarineSTAR, vers le récepteur R110
  - le signal IALA qui ne comporte que les signaux GPS
  - le signal GPS 'standalone' dénué de corrections différentielles
  - le signal EGNOS vers le récepteur FURUNO GP-37

- L'antenne pour les corrections différentielles reçues sous format RTCM. Ici il s'agit de l'antenne MGL-4 (illustration 13) mais selon les expériences et pour des raisons pratiques, elles peuvent différer. Néanmoins leur fonction reste similaire. Ces corrections vont ensuite être envoyées directement au récepteur DGPS non autonome via un port série.

- L'antenne A30 pour le DGPS autonome (illustration 14). Ce récepteur nécessite une antenne externe, car les corrections différentielles de 300 kHz ne passeraient pas dans le splitter pour des raisons de bande passante.

Un système d'acquisition en aval permet de paramétrer et d'acquérir les mesures :

- Les récepteurs (illustrations 15 à 18)
- Les appareils et ports intermédiaires (USB, série…)
- Les logiciels d'acquisition où les paramètres sont réglés :
  - les phrases NMEA à acquérir
  - la cadence d'acquisition des phrases NMEA
  - les paramètres GPS : âge des corrections, angle maximal de masquage des satellites

I.2.3 Les navires d'essai

I.2.3.1 À bord du Pont Aven de la Brittany Ferries

Nos campagnes de mesures sur mer ont pu avoir lieu grâce à la compagnie maritime bretonne Brittany Ferries, qui nous a laissé libre d'installer notre matériel de mesure dans l'enceinte du bateau Pont Aven. D'une longueur de 185 mètres et de 30 mètres en largeur, ce navire peut accueillir jusqu'à 2400 passagers dans plus de 600 cabines. [8]. Il est doté d'un pont supérieur où nous avions à disposition un local technique sous le mâtereau pour y stocker le matériel.

Illustration 20: Le Pont Aven - Brittany Ferries

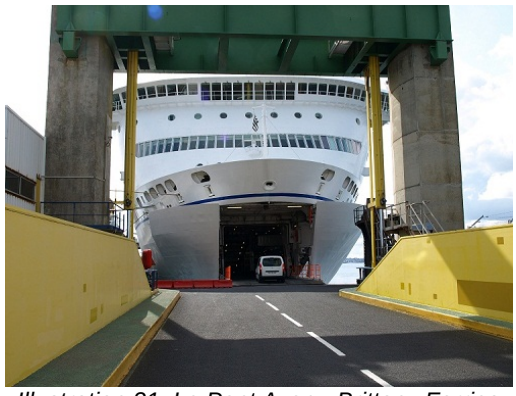


Illustration 21: Le Pont Aven - Brittany Ferries

Nous avons préféré prendre une antenne commune aux signaux GPS prenant en compte les signaux des 3 systèmes de navigation. Cela permet non seulement d'un point de vue pratique d'éviter la multiplication d'antennes mais facilite aussi la comparaison des différents services étudiés. En effet, une antenne spécifique à chaque service engendre des décalages de positionnement et donc l'introduction de bras de levier à corriger. Ici nous n'avions qu'une seule antenne pour trois services : MarineSTAR, EGNOS et le DGPS IALA non autonome.

Au vu de la configuration du pont supérieur du Pont Aven, nous avons dû dérouler environ 24 mètres de câbles, allant de l'antenne jusqu'au dispositif d'enregistrement.

Illustration 22: Antenne commune A52

Nous avons dû tester la place de l'amplificateur dans le montage électrique :

- À la sortie de l'antenne, l'amplificateur sature les signaux de corrections si bien que le récepteur R320 n'arrive plus à exploiter correctement le service MarineSTAR.
- Juste en amont des récepteurs, l'atténuation subie par le signal est trop forte et l'amplification inefficace.

Il s'est révélé après plusieurs expériences que l'amplificateur placé à 15 mètres de part et d'autre de l'antenne et des récepteurs par le câble s'avère être le dispositif le plus efficace en terme de puissance du signal.

Illustration 23: Trajectoire du Pont Aven et Stations DGPS IALA

Illustration 24: Mâtereau du Pont Aven

Du fait de la structure imposante du mâtereau, nous avons dû procéder à une étude préalable pour éviter tout masquage des satellites par cette infrastructure. Premièrement, nous avons installé l'antenne le plus loin possible du mâtereau puis l'avons surélevée. Pour optimiser sa hauteur afin de ne pas être trop sujette à la prise au vent, nous avons calculé une hauteur minimale à respecter.

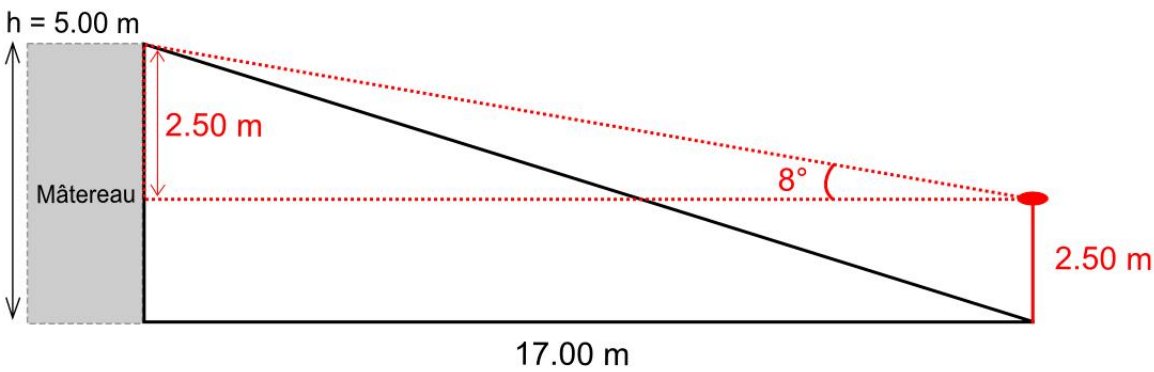


Illustration 25: Calcul de surélévation de l'antenne A52 sur le Pont Aven

La hauteur du mâtereau a été mesurée et vaut environ 5 mètres. Il est recommandé par l'OMI de ne pas utiliser les satellites GPS en dessous un angle de masquage de 7,5°. Connaissant la distance entre l'antenne à positionner et l'angle maximal à prendre en compte, nous sommes arrivés à la conclusion qu'il fallait rehausser l'antenne GPS de 2,50 mètres. (cf illustration 25)

I.2.3.2 Sur le Fromveur II de la Penn Ar Bed

Le Fromveur est une navette appartenant à la compagnie de transport Penn Ar Bed. D'une capacité de 365 passagers et d'une envergure de 45 mètres par 10, elle dessert surtout les îles au large de Brest, soit Molène et Ouessant. [9]

Les mesures ont duré quatre jours, le *Fromveur II* a parcouru le même trajet pendant ces quatre jours allant alors de Brest jusqu'au Conquet puis les îles de Molène et de Ouessant.

Illustration 26: Mât comprenant les trois antennes

Illustration 27: Fromveur II à Ouessant

Illustration 28: Caisse étanche et dispositif d'acquisition des mesures (PC et récepteurs)

Nous avons réitéré le montage de l'étude précédente en intégrant un récepteur GPS 'standalone' ainsi qu'un récepteur DGPS IALA autonome, ne recevant alors pas les corrections RTCM via une source externe, mais directement intégrées avec les signaux GPS par une antenne externe A30. Nous avons donc dû adapter notre dispositif d'acquisition des mesures.

L'antenne a été fixée juste derrière la passerelle (cf illustration 26) sur une échelle permettant ainsi de la dégager au maximum des éventuels masquages. Comme on peut le constater sur l'illustration 27, une cheminée d'échappement est située à proximité des antennes. Une première manipulation a été faite dans ces conditions mais nous avons remarqué des écarts qui semblent suivre une direction donnée, comportement caractéristique des multi-trajets. Sûrement la proximité de la cheminée est la cause de ces dérèglements.

Suite à une première campagne de mesures infructueuses (soupçons de multi-trajets, perturbations des corrections différentielles par l'environnement extérieur), nous avons procédé à une deuxième en prenant en compte plusieurs paramètres :

- un fil métallique servant de masse entre le récepteur et la coque du bateau a permis d'évacuer les fréquences parasites,

– une rallonge métallique du mât d'antenne a permis de surélever le dispositif évitant ainsi les différents masques des infrastructures.

Lors de cette deuxième campagne, nous en avons profité pour intégrer le récepteur FURUNO au dispositif recevant alors les signaux EGNOS via l'antenne commune A52. Les résultats présentés dans la partie II. sont issus de cette deuxième campagne de mesures.

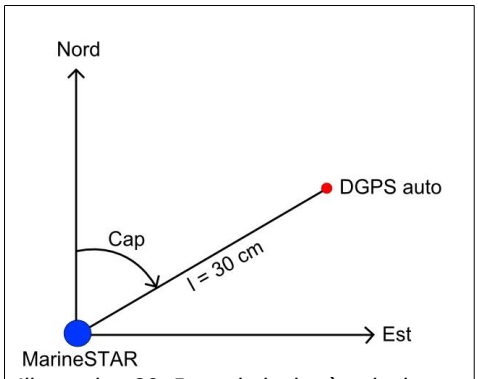


Illustration 29: Bras de levier à calculer en fonction du cap

Illustration 30: Antennes lors de la campagne sur le Fromveur II

Le nouveau dispositif de mesures comprend une antenne supplémentaire par rapport au montage du Pont Aven (illustration 30).

De la gauche vers la droite nous avons :

- l'antenne commune à MarineSTAR, EGNOS, le DGPS non autonome (signal GPS) ainsi que le GPS « naturel »,
- l'antenne pour le DGPS autonome, qui rappelons-le est nécessaire car les corrections RTCM ne passent pas dans le splitter de l'antenne commune.
- l'antenne des corrections RTCM qui seront utilisées pour le DGPS IALA non autonome.

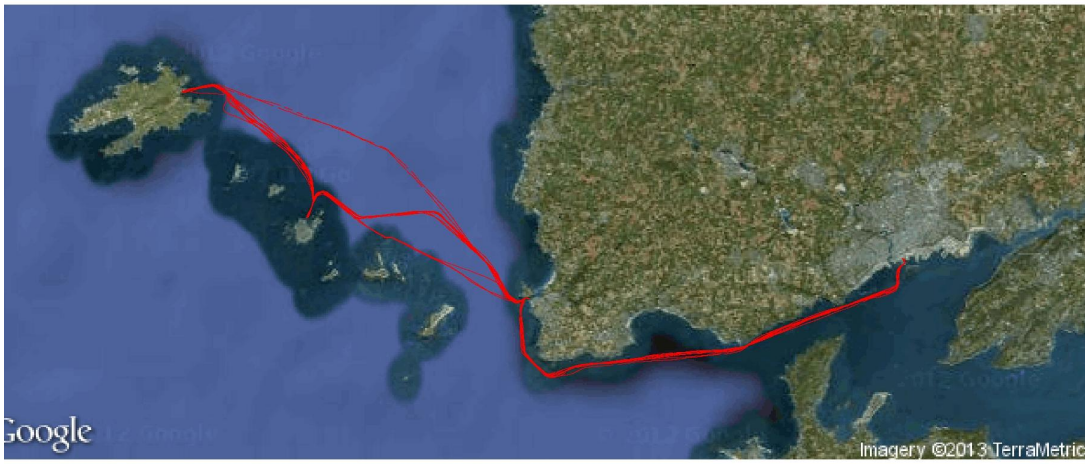


Illustration 31: Trajectoire du Fromveur II

Ce biais alors introduit n'est pas constant dans le plan géographique Nord-Est et dépend donc de l'angle entre le support des antennes et le nord géographique. Le cap du bateau, donné par le phrase NMEA GPVTG nous fournit cette valeur, il a donc suffit de retrancher aux écarts calculés les valeurs $l*\cos(Cap)$ pour l'axe Nord-Sud et $l*\sin(Cap)$ à l'axe Ouest-Est, l étant le bras de levier pour ainsi se ramener à la position de l'antenne commune et comparer avec précision les différents systèmes.

La valeur mesurée du cap peut introduire une imprécision dans le calcul, ainsi elle se calcule par :

$$l*(\sin(Cap_{mesuré})-\sin(Cap_{vrai}))$$

Les imprécisions d'angle ne dépassent pas un degré, les valeurs courantes étant autour de 0,5°. Pour cette dernière valeur et pour un bras de levier de 30 centimètres, les valeurs d'imprécisions résultantes sont 2 millimètres. **Pour les valeurs maximales** (c'est-à-dire un bras de levier de 45 centimètres correspondant à l'antenne à l'autre extrémité de l'antenne de référence et une imprécision de mesure du cap de 1°), **nous avons un écart de 6 millimètres ce qui est donc sans conséquence sur l'interprétation de nos résultats.** Notons de même que la formule reste aussi valable pour la composante Nord-Sud (i.e. cos(Cap)) mais donne des résultats similaires.

I.2.3.3 Sur la Gironde à bord de l'Arbalestrille

Illustration 32: Mât comprenant les trois antennes

Illustration 33: L'Arbalestrille au Verdon

Illustration 34: Valise noire d'énergie et valise blanche étanche d'acquisition

L'Arbalestrille est une vedette hydrographique de 12 mètres de long sur 3 mètres de large appartenant au port de Bordeaux [10]. Elle sert essentiellement pour la bathymétrie en effectuant des sondages dans l'estuaire de la Gironde. L'antenne a été installée à la poupe du navire et, au vu des dimensions réduites, du bateau ne sera pas masquée. N'ayant pas d'alimentation 220 V sur le bateau, une valise énergie (valise noire sur l'illustration 34) a été installée comprenant une batterie au plomb pouvant tenir jusqu'à 24 heures. Elle est rechargée la nuit par le courant disponible sur le quai.

Les services ici testés sont similaires à ceux de la Penn Ar Bed : EGNOS via le récepteur R110, le DGPS IALA via les deux montages autonome et non autonome et le GPS 'standalone'.

Cependant cette première manipulation n'a pas abouti et seulement une heure de mesures a été enregistrée. Probablement le basculement du courant électrique du ponton vers le bateau en est la cause. Nous avons donc dû réitérer l'opération une semaine après en prenant la précaution d'avoir un système d'énergie

autonome qu'on a pu réaliser grâce à des panneaux photovoltaïques qui permettaient de recharger nos batteries. Toute la journée sur le bateau, nous nous sommes aperçus que la réception des corrections différentielles des deux récepteurs DGPS IALA était soumise à des perturbations qui correspondaient à des manœuvres de la vedette : démarrage/arrêt du moteur, accélération franche du bateau, activation du guindeau (système motorisé de montée/descente de la ligne de mouillage). Par exemple lorsque le bateau était immobile moteur à l'arrêt, les corrections ont été reçues avec un signal 100 fois plus important que lorsqu'il était à pleine vitesse. De même l'activation du guindeau entraîne une amélioration nette de la réception des corrections. Nous soupçonnons que le fonctionnement de ces différents moteurs perturbe l'environnement électromagnétique dans lequel nous nous trouvions et selon le cas, peut améliorer ou détériorer la réception des corrections différentielles IALA.

Illustration 35: Trajectoire de l'Arbalestrille sur la Gironde

La documentation du constructeur HEMISPHERE nous renseigne sur ces différents parasites qui sont connus et fréquents lors de la réception du service DGPS IALA : [11]

- ➔ le bruit d'appareils tels que les moteurs mécaniques ou alternateurs
- ➔ le bruit environnant des lignes électriques
- ➔ les convertisseurs de courant
- ➔ les moteurs électriques

Il s'avère que tous ces composants étaient présents à bord de l'Arbalestrille et qu'ils le sont sur tous les bateaux en général. Nous soupçonnons donc une interférence néfaste de ce matériel sur la réception des corrections différentielles DGPS IALA.

II Comparaison des systèmes EGNOS et DGPS IALA

II.1 La base de calcul

II.1.1 Opérations, simplifications, approximations

Pour déterminer les différences de positionnement, une représentation plane et en particulier une projection est nécessaire. Pour cela nous nous sommes basés sur une étude menée par la *Kansas State University* [12]qui traite de la comparaison entre les différents systèmes de positionnement par GPS. Cette étude se nomme 'Comparison of differentially corrected GPS sources for support of site-specific management in agriculture'. Elle a été réalisée par P.I. Coyne, S.J. Casey et G.A. Milliken. L'approximation consiste à projeter localement et concerne donc une très petite surface à l'échelle géocentrique, la courbure de la Terre à cet endroit sera donc négligée. Il en résulte que les différences de positionnement calculées δX, δY et δZ représentent une distance entre un point servant de référence (λ_0,φ_0,h_0) et un point mesuré (λ_i,φ_i,h_i). Les écarts sont calculés à la fois en longitude et en latitude, en se basant respectivement sur les longueurs d'arc des parallèles et des méridiens. Cette méthode a été approuvée par le NCGIA (National Center for Geographic Information and Analysis) centre de recherche indépendant basé aux Etats-Unis spécialiste des sciences de l'information géographique, et mise en place par Anthony P. Kirvan de l'Université d'Austin au Texas. [13]

- **Calcul des longueurs d'arc des méridiens :**

La formule générale pour la courbure d'une surface vaut : $$\frac{1}{R}=\frac{\frac{d^2z}{d^2x}}{\left[1+\left(\frac{dz}{dx}\right)^2\right]^{3/2}} \quad (1).$$

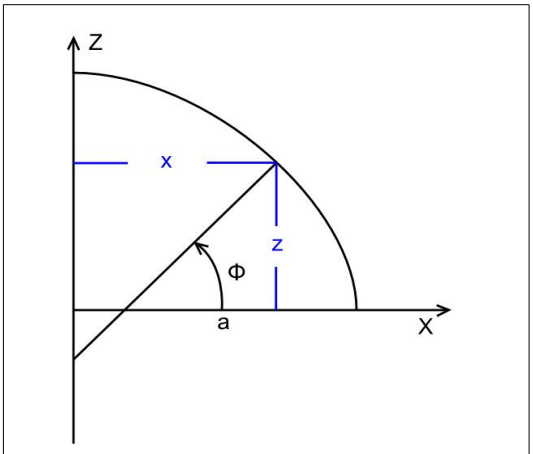


Illustration 36: Plan méridien de la Terre

Géométriquement, on voit que

$$\frac{dz}{dx}=\frac{-1}{\tan\phi}$$

D'où :

$$\frac{d^2z}{d^2x}=\frac{d}{dx}\left(-\frac{1}{\tan\phi}\right)=\frac{1}{\sin^2\phi}\frac{1}{\frac{dx}{d\phi}}$$

Or, dans le plan méridien les coordonnées des points s'écrivent :

$$x=\frac{a\cos\phi}{\sqrt{1-e^2\sin^2\phi}}$$

En dérivant x par rapport à Φ puis en remplaçant $\frac{d^2z}{d^2x}$ dans l'expression initiale (1), on obtient un rayon de courbure $R=\frac{a(1-e^2)}{(1-e^2\sin^2\phi)^{3/2}}$.

En intégrant cette expression pour un angle de 1°, on a : $$\boxed{L(\phi)=\frac{a(1-e^2)}{(1-e^2\sin^2\phi)^{3/2}}\frac{\pi}{180}}$$

Cette expression représente donc la longueur d'un arc méridien à la latitude Φ pour un degré.

➢ **Calcul des longueurs d'arc des parallèles :**

Périmètre du parallèle à l'équateur:

$$2\pi R$$

(R=6 378.166 kms
rayon de la Terre)

À la latitude Φ, le périmètre vaut :

$$2\pi R\cos\phi$$

Numériquement, en divisant par 360 pour obtenir une distance en kilomètres par degré, on a :

$$\boxed{l(\phi)=111.320\cos\phi}$$

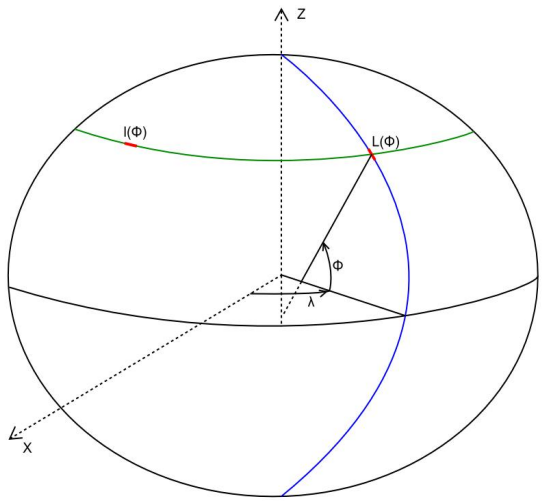


Illustration 37: Longueurs d'un méridien et d'un parallèle par degré

➢ **Calcul des différences de positionnement :**

Les coordonnées géographiques sont directement utilisables moyennant l'hypothèse d'une courbure locale considérée comme nulle. La différence de positionnement planimétrique en X et Y s'exprime donc par la longueur d'un arc pour un degré, multipliée par la différence angulaire des mesures.

$$\boxed{\begin{cases}\delta X_i=(\lambda_i-\lambda_0)\ l(\phi)\\ \delta Y_i=(\phi_i-\phi_0)\ L(\phi)\end{cases}}$$

L'indice i représente le système à tester, ici les stations DGPS ou EGNOS, et l'indice 0 représente la référence c'est-à-dire MarineSTAR. La différence de positionnement planimétrique résulte de :

$$\boxed{\delta=\sqrt{\delta X_i^2+\delta Y_i^2}}$$

➢ **Les fichiers de sortie**

Ils suivent tous la trame NMEA (National Marine Electronics Association) qui définit un standard de communication pour les récepteurs GPS dans le domaine de la Marine. Ainsi, nous pouvons avoir accès à toutes sortes d'informations :

Phrases NMEA	Description
GPGGA	Longitude – Latitude – Nombre de satellites
GPZDA	Date et heure UTC
GPVTG	Cap du navire
GPGSA	*Dilution of Precision* des satellites (HDOP, VDOP…)
GPGSV	Identifiant et puissance du signal des satellites en visibilité
GPGST	Statistiques sur les erreurs de pseudo-distance et sur la position
GPRRE	Erreur estimée sur la position

Nous nous sommes intéressés en particulier à la phrase GPGGA qui fournit entre autre :

- le temps UTC (en HHMMSS)
- la latitude (en degrés décimaux)
- la longitude (en degrés décimaux)
- l'altitude et l'ondulation (H et N en mètres)
- le nombre de satellites visibles (sat)
- l'indice de qualité Q qui indique si le récepteur est calé sur le système de positionnement implanté initialement. Par exemple, il vaut 2 pour le DGPS augmenté (SBAS et DGPS IALA) et 4 pour MarineSTAR. Pour toute analyse qui suit, les mesures dont les facteurs de qualité sont non conformes au service ont été écartées.

Phrase	Temps UTC	Latitude *(DDMM.MM)*		Longitude *(DDMM.MM)*		Q	Sat		Altitude		Ondulation			Station
$GPGGA	140000.00	4828.1426505	N	00503.2732780	W	2	9	1.0	8.6	M	52.8	M	11.2	0462*67
$GPGGA	140001.00	4828.1426437	N	00503.2732708	W	2	9	1.0	8.6	M	52.8	M	7.4	0462*57
$GPGGA	140002.00	4828.1426366	N	00503.2732709	W	2	9	1.0	8.5	M	52.8	M	8.4	0462*5A
$GPGGA	140003.00	4828.1426456	N	00503.2732686	W	2	9	1.0	8.5	M	52.8	M	9.4	0462*58
$GPGGA	140004.00	4828.1426464	N	00503.2732409	W	2	9	1.0	8.5	M	52.8	M	10.4	0462*63
$GPGGA	140005.00	4828.1426380	N	00503.2732288	W	2	9	1.0	8.6	M	52.8	M	11.4	0462*62
$GPGGA	140006.00	4828.1426226	N	00503.2732366	W	2	9	1.0	8.5	M	52.8	M	7.0	0462*5D
$GPGGA	140007.00	4828.1426162	N	00503.2732400	W	2	9	1.0	8.5	M	52.8	M	8.0	0462*57

Tableau 1: Extrait d'une trame NMEA contenant une phrase GPGGA

II.1.2 Indicateurs statistiques

De nombreux indicateurs statistiques existent pour estimer la qualité de positionnement des systèmes GPS. Néanmoins des constantes sont essentielles à déterminer pour caractériser les systèmes :

- l'exactitude du système qui correspond à la différence entre le point mesuré et le point « vrai ». Le terme moyenne correspondra donc à la moyenne des différences.
- la précision du système qui correspond à la dispersion des mesures

Tout au long de l'analyse, nous calculerons ces deux indicateurs en introduisant une valeur seuil de 95 % ce qui signifie que 95 % des mesures auront une erreur de positionnement égales ou inférieures à ce seuil. Pour cela, certaines lois existent permettent de caractériser le comportement des mesures. Dans le cadre de notre étude, la loi de Rayleigh permet de modéliser au mieux le comportement des erreurs calculées comme le montre les deux figures suivantes.

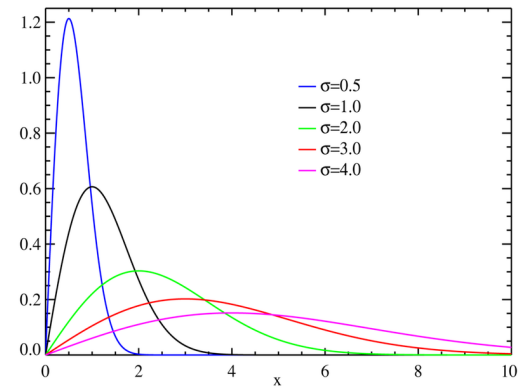


Illustration 38: Densité de probabilité de la loi de Rayleigh (Source :http://fr.wikipedia.org)

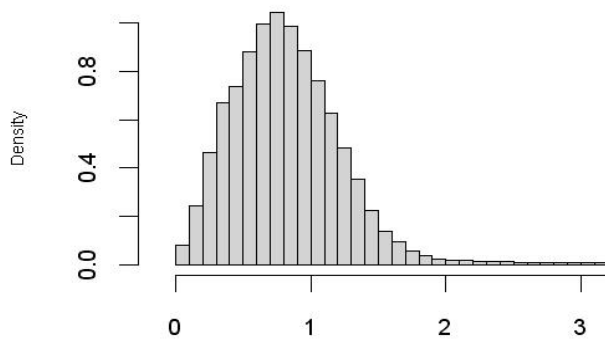


Illustration 39: Extrait d'histogramme de répartition des erreurs planimétriques pour le DGPS IALA sur le Pont-Aven ($\sigma \approx 1$)

On peut remarquer que les courbes[6] suivent la même tendance, la valeur à 95 % correspond alors pour cette loi à multiplier l'écart-type par 2,45.

6 Cf les histogrammes de répartition des erreurs planimétriques annexe 6

II.2 Caractérisation du référentiel MarineSTAR

Afin de caractériser le système de navigation MarineSTAR, nous avons pu procéder à un test en statique sur un pilier appartenant au S.H.O.M. (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) qui a été référencé par les moyens suivants :

- logiciels de post-traitement : GAMIT-GlobK
- Antenne LEICA AR25 avec Râdome LEIT
- Récepteur TRIMBLE SPS852

Il s'agit de matériel de qualité « géodésique » utilisé pour la très haute précision.

Station	Localisation – Pays	Réseau
STBR	*Saint Brieuc – France*	RGP
BRST	*Brest – France*	RGP / IGS
TLSE	*Toulouse – France*	RGP / IGS
LROC	*La Rochelle – France*	RGP / IGS
OPMT	*Paris – France*	RGP / IGS
ZIMM	*Zimmerwald – Suisse*	IGS
HERT	*Hailsham – Angleterre*	IGS
YEBE	*Yebes – Espagne*	IGS
MORP	*Morpeth – Angleterre*	IGS
PDEL	*Ponta DelGada – Portugal*	IGS
FUNC	*Funchal – Portugal*	IGS
REYK	*Reykjavik – Islande*	IGS
FLRS	*Santa Cruz das Flores – Portugal*	IGS
GLSV	*Kiev – Ukraine*	IGS

Tableau 2: Stations de base utilisées pour le calcul du point sous GAMIT - GlobK

Deux logiciels spécifiques utilisés dans le domaine de la géodésie ont été nécessaires pour déterminer le point matérialisé par le pilier :

- **GAMIT**, logiciel qui va être mis -en œuvre dans un premier temps pour résoudre les ambiguïtés de chaque époque de mesures et déterminer une solution de positionnement a priori ;

- **GlobK** qui, dans un deuxième temps va calculer une solution définitive de la position sur l'ensemble des époques de mesures.

Une quinzaine de stations ont été utilisées pour le calcul de la position a priori sur le logiciel GAMIT. Afin de limiter les incertitudes de calculs du positionnement, une répartition omnidirectionnelle des stations de base est préférable. Brest étant une ville située à l'extrémité Ouest de la France, il a été nécessaire de prendre en compte des stations éloignées mais toutefois situées à l'Ouest (Islande, large du Portugal...). Les orbites finales utilisées sont issues de l'IGS[7]. Différents modèles à intégrer dans le logiciel GAMIT ont été nécessaires :

- ➔ Un modèle d'antenne *igs08.atx* comprenant les corrections à appliquer sur les pseudodistances en fonction de l'azimut et de l'élévation des satellites.
- ➔ Utilisation des deux fréquences GPS disponibles L1 et L2 pour supprimer l'erreur ionosphérique.
- ➔ Estimation des retards dans la troposphère par des fonctions de rabattement qui calculent localement les délais troposphériques supplémentaires pour chaque satellite en visibilité.

7 International GNSS Service

➔ Différents modèles supplémentaires :

- modèle de surcharge océanique pour rendre compte de la pression de l'eau des océans sur la croûte terrestre
- modèle de marée solide qui prend en compte les effets de marée sur le magma qui soutient le manteau supérieur terrestre
- modèle de surcharge de marée atmosphérique qui rend compte de l'effet des astres sur l'atmosphère
- modèle de surcharge atmosphérique moyen qui quantifie les surpressions ou dépressions locales sur la croûte terrestre

Plusieurs contraintes ont été rentrées dans les logiciels :

Pour GAMIT, les calculs a priori sont nécessaires pour localiser le réseau de stations de base utilisées dans la détermination du point et ainsi choisir en conséquence les différents modèles applicables localement. Les contraintes sont appliquées sur les coordonnées géocentriques pour les deux logiciels. En ce qui concerne GAMIT, on applique 100 mètres sur les coordonnées géocentriques des stations ne sont pas en ITRF08. Par exemple, on a dû appliquer une contrainte sur la station STBR, la détermination de sa position a priori ayant fait l'objet d'un post-traitement du fichier RINEX avec des orbites radiodiffusées. Les coordonnées des stations IGS elles, ne sont contraintes que de 50 centimètres, leur positionnement étant connu plus précisément. Pour GlobK, les orbites précises de l'IGS sont contraintes sur les éléments képleriens, les stations IGS à 5 centimètres et celles extérieures à 100 mètres.

Après traitement de ces données, GlobK en utilisant toutes les stations du service IGS et toutes les époques des mesures va stabiliser la position du point dans l'ITRF08. A l'issu du calcul et d'après le logiciel, on peut s'attendre dans le cas présent à des incertitudes de l'ordre de **3 à 5 mm** sur les composantes **Est et Nord** et 5 à 8 mm en hauteur.

$$\begin{cases} X = 4228848.44273 \ m \\ Y = -332996.48555 \ m \\ Z = 4747220.48065 \ m \end{cases}$$

Coordonnées géocentriques en ITRF08 du pilier

L'approximation de Kirvan (2) nécessite de travailler avec les coordonnées géographiques. A l'aide de formules rigoureuses et exactes[8], c'est-à-dire sans perte de précision, nous arrivons à des coordonnées géographiques équivalentes.

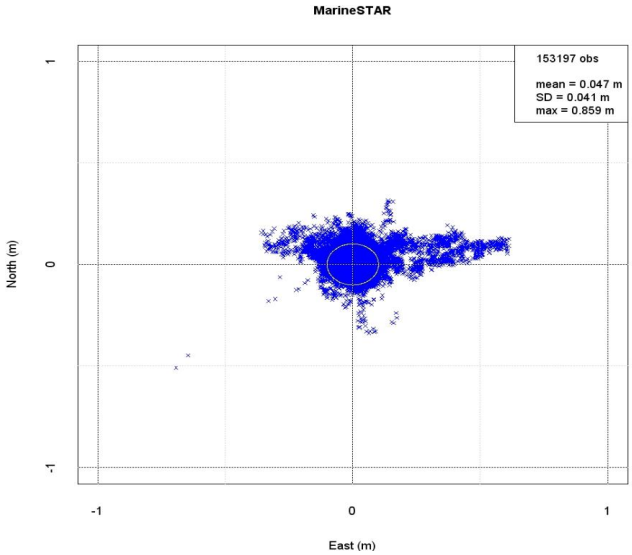


Illustration 41: Caractérisation statique du MarineSTAR

Illustration 40: Pilier du SHOM et antenne A52

8 Cf formules IGN annexe 1

On peut remarquer que le nuage de points mesurés est relativement concentré autour du point de référence matérialisé par le pilier : la valeur de la dispersion vaut 4,1 centimètres et le biais 4,7 centimètres. On peut remarquer tout de même quelques valeurs aberrantes (environ 0.80 mètres), qui sont apparues en fin de mesures, comme le montre le chronogramme des différences de positionnement suivant :

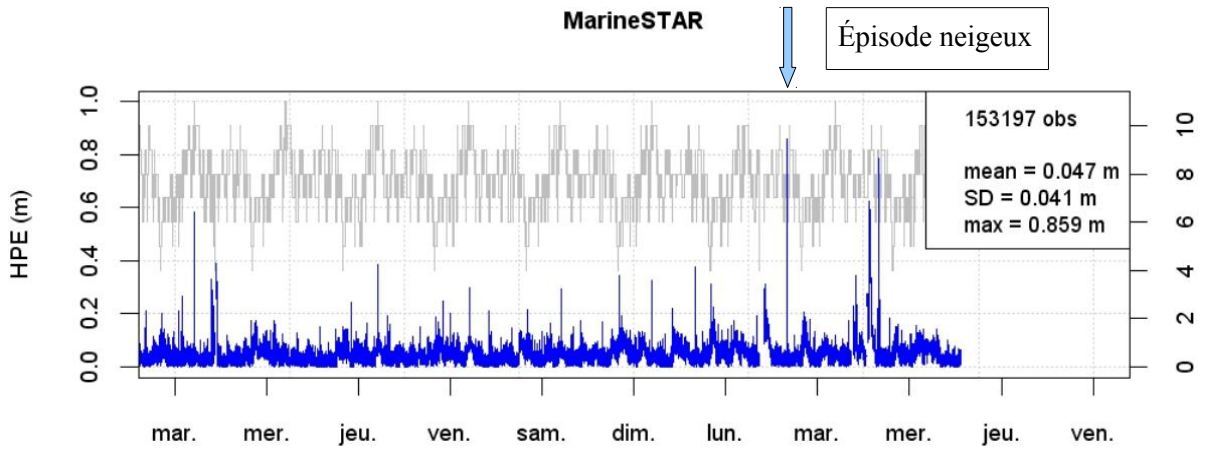


Illustration 42: Erreur de position horizontale du service MarineSTAR

Les hausses d'erreur (HPE : Horizontal Position Error) correspondent avec un épisode neigeux de 24 heures qui a eu lieu à Brest à l'époque des mesures (du lundi au mardi), en effet l'antenne était recouverte d'une couche de 5 cm de neige.

En ce qui concerne la disponibilité du système, sur les 155153 mesures, seulement 1956 sont considérées comme n'étant pas délivrées par MarineSTAR, ce qui représente environ 1 %. Cependant pour plus de rigueur, nous avons écarté les mesures où l'antenne était recouverte de neige ayant pour conséquence les valeurs maximales évoquées précédemment. Ainsi, nous avons arrêté les mesures au lundi, correspondant à un nombre de 111000 mesures. Sur cet intervalle de temps ont été calculés plusieurs indicateurs statistiques afin de caractériser le système MarineSTAR.

Les résultats sont les suivants :

- ➔ Exactitude : **0.044 m**
- ➔ Précision à 95% : **0.078 m**

Sur une période de mesures d'environ une semaine, en positionnement statique, on peut donc affirmer que le système de navigation MarineSTAR affiche une position vraie à 95% inférieure à 10 cm de précision, ce qui est cohérent avec les données du constructeur.

Dans le reste des calculs pour la caractérisation des deux services DGPS IALA et EGNOS, nous calculerons la différence de positionnement par rapport à cette référence et nous obtiendrons donc un positionnement relatif, la position absolue sera donc connue à environ 10 centimètres près.

Pour la caractérisation dynamique du service MarineSTAR, nous pensions utiliser la technique du Precise Point Positioning permettant de fournir un positionnement absolu connu à quelques centimètres près quelle que soit sa localisation. Néanmoins, un problème de format du fichier RINEX (propre au constructeur HEMISPHERE) nous a empêché dans l'immédiat d'aboutir à une étude.

II.3 Le GPS

Avec une trentaine de satellites en activité et une prochaine génération encore plus performante techniquement (Block III), le système de positionnement américain renouvelle et par-là même, améliore son service de localisation. Rappelons de plus que les deux services proposés pour la navigation maritime et étudiés ici, sont des systèmes d'augmentation du service américain et sont censés améliorer de manière significative la localisation donnée par GPS.

C'est pour ces deux raisons que nous avons voulu tester lors de nos dispositifs de mesure le GPS *standalone*[9] . Le résultat de positionnement serait a priori moins précis que celui fourni par les services d'augmentation.

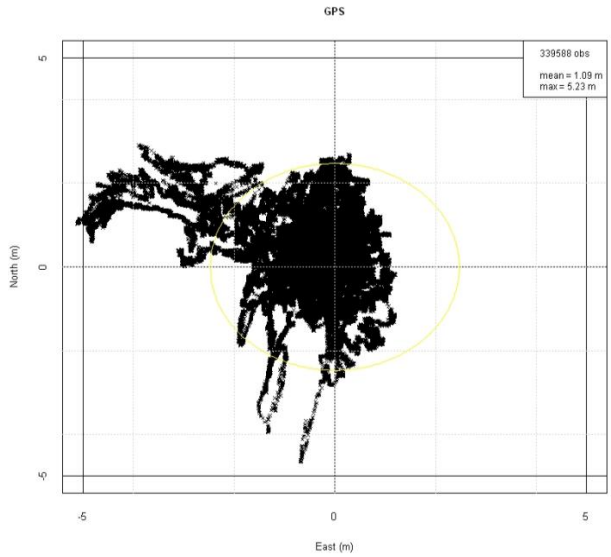


Illustration 43: GPS standalone - Fromveur II

Les résultats sur le Fromveur II nous montrent des écarts maximums de 5 mètres. La dispersion vaut 0,80 mètres et la valeur moyenne est d'un mètre environ.

Par ailleurs, n'étant pas sujet à la réception de corrections extérieures qui parfois peuvent être brouillées par l'environnement extérieur, le GPS fait preuve d'une grande stabilité dans l'acquisition des mesures. Ainsi, nos mesures GPS n'ont pas été perturbées le long des différentes manipulations.

Au vu des difficultés rencontrées sur l'Arbalestrille, nous n'avons que peu de données à traiter (environ 10 000 mesures) ce qui représente une période d'environ trois heures. On a pu en extraire quelques résultats : 1,31 mètres de moyenne et une dispersion de 0,60 mètres.

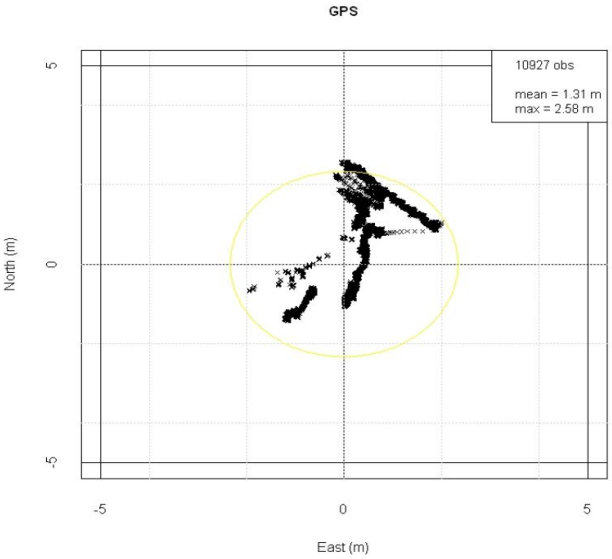


Illustration 44: GPS standalone - L'arbalestrille

9 Terme anglais signifiant le GPS dans son état le plus simple possible, c'est-à-dire sans corrections apportées.

II.4 Le DGPS IALA

Afin de minimiser au mieux l'influence de la qualité du récepteur et ainsi de mieux caractériser le DGPS IALA, nous avons décidé d'effectuer deux montages différents mais fonctionnant toujours grâce à ce même service. Comme nous le montre l'illustration 19, un récepteur IALA R110 est relié à un récepteur RTCM MBX-4 qui reçoit les corrections différentielles des stations côtières et les retransmet au récepteur R110 via un port série. Le deuxième montage est un récepteur R110 qui reçoit à la fois le positionnement GPS et les corrections différentielles par une même antenne.

La réception des corrections différentielles se trouve alors modifiée. Tandis que le récepteur MBX-4 s'appuie essentiellement sur la détection de la puissance du signal émis par les stations côtières quelles que soient leurs localisations, le récepteur R110 autonome se focalisera sur la détection d'un rapport signal sur bruit plus important, et sera donc plus apte à recevoir les stations les plus proches et donc fournissant une solution de positionnement plus juste.

II.4.1 Le DGPS IALA couplé avec le récepteur RTCM externe

Lors de la première semaine, on a pu constater de très longues coupures dans le signal RTCM c'est-à-dire une absence complète de corrections différentielles pendant 48 heures[10] détectée dans la trame GPGGA du DGPS IALA. Par conséquent, nous nous intéresserons qu'aux deuxième et troisième semaines de mesures.

Pays	*Stations*	*Localisation*	2e semaine – Pont Aven				3e semaine – Pont Aven			
			Station (%)	Précision	Moy (m)	Max (m)	Station (%)	Précision	Moy (m)	Max (m)
France	460	*Heauville*	43,7	-	0,96	4,77	53	-	1,03	3,95
	462	*Pont de Buis*		+	0,58	2,13		- -	0,69	5,34
	464	*Olonne*		-	0,99	3,74		-	0,94	3,91
	466	*Cap Ferret*		- -	1,05	4,76		- -	1,23	6,90
Portugal	480	*Cabo Carvoeiro*	0,3	-	1,56	2,95	0,3	-	1,67	2,63
	484	*Ile Horta*		- - -	9,09	19,68		- -	2,29	5,37
Espagne	500	*Cabo Machichaco*	15	+	0,99	2,19	14	+	0,94	2,14
	502	*Cabo Mayor*		- -	0,84	34,03		- -	0,85	3,87
Irlande	660	*Mizen Head*	6	- -	0,61	173,26	6	-	0,53	6,29
	665	*Loop Head*		-	0,62	5,00				
Angleterre	680	*St Catherine's*	28	+	0,54	2,32	21,7	+	0,54	2,29
	681	*Cap Lizard*		+	0,80	2,97		+	0,77	2,18
	689	*Nash Point*		-	1,61	3,96				

Tableau 3: Stations dont le signal a été reçu plus de 100 fois par le MBX-4 sur le Pont Aven

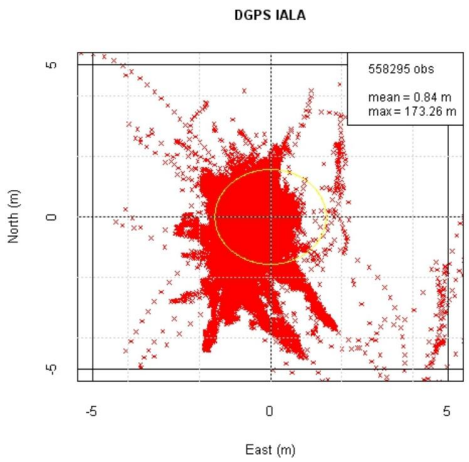


Illustration 45: DGPS IALA couplé – Semaine 2 - PA

Environ 5 % des mesures n'ont pas été corrigées sur le Pont-Aven. La visualisation des écarts planimétriques sur les axes Nord-Sud et Est-Ouest nous montre des écarts moyens de 0,85 mètres et une dispersion de 0,91 mètres pour la deuxième semaine (illustration 45).Nous avons cherché à comprendre d'où pouvait venir cette dispersion. Nous avons pu dénombrer 25 stations différentes utilisées comme source de corrections au total, ce qui au vu du parcours paraît disproportionné. Certaines ne comportaient qu'une dizaine de mesures, situées à l'autre extrémité du globe (Russie, Afrique du Sud...), nous avons donc écarté toutes les stations dont les mesures ne dépassaient pas le seuil arbitraire de 100. Nous sommes arrivés à **13 stations** qui ont été utilisées pour au moins 100 mesures, un nombre de mesures moindre étant non significatif. Le pourcentage d'accrochage des stations est calculé pour les deux semaines et pour le même trajet de navigation. (tableau 3)

10 Cf chronogramme IALA de la première semaine, annexe 2

La campagne sur le Pont Aven nous donne des résultats très dispersés (illustration 45) et le positionnement ainsi fourni est très différent en fonction des pays (tableau 3). Nous allons donc préciser les résultats pays par pays et tenter d'expliquer ces différences observées.

- Portugal

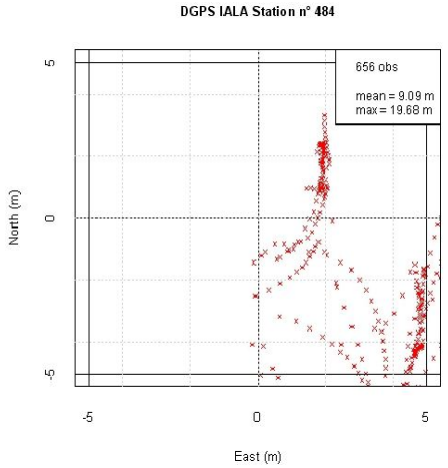


Illustration 46: Station des Açores - Semaine 2 - PA

Le plus faible nombre de mesures (656) des stations triées a été enregistré pour la station de l'île des Açores (illustration 47), située au large du Portugal. Le Pont-Aven devait alors se situer à au moins 2000 kilomètres de là, au large des côtes nord espagnoles. La station fait preuve d'une grande dispersion dans les mesures et d'une valeur maximale d'écart d'environ 20 mètres. Les valeurs aberrantes sont dues au fait que le récepteur MBX-4 s'appuie essentiellement sur la détection de la puissance du signal émis par les stations différentielles quelles que soient leurs localisations. Bien évidemment, on penserait que les stations les plus proches et donc les plus aptes à transmettre les corrections les plus justes ont une puissance maximale mais il est possible quand plusieurs conditions sont réunies (ionisation des couches atmosphériques cf I.1.2.2) que la portée d'émission augmente considérablement. D'ailleurs, nous pouvons confirmer ce résultat car les stations portugaises ont été reçues à la fin de la journée c'est-à-dire quand l'atmosphère est ionisée par le soleil couchant. Cette situation ne se reproduit pas avec le montage DGPS IALA autonome car le récepteur sélectionne les stations dans un périmètre restreint autour de sa position. Ainsi une station émettant un signal faible dans son périmètre sera prise en compte contrairement à une station émettant un signal plus fort en dehors de son périmètre.

- Irlande

Mais la station des Açores n'est pas responsable de la valeur culminante d'écart de 170 mètres, elle vient de la station irlandaise située à Mizen Head alors même que le navire se situait à moins de 100 kilomètres près de cette station. En regardant le fichier RTCM des corrections différentielles, nous nous sommes aperçus à la sortie de Cork que les données satellitaires n'étaient plus corrigées ou très peu, ainsi sur 9 satellites utilisés en positionnement seulement 3 avaient été corrigés. Sur l'illustration 46, la courbe verte foncée indique le nombre de satellites en visibilité, la grise le nombre de satellites utilisés pour le positionnement. Lorsque le Pont Aven accélère (courbe verte claire) correspondant à l'entrée/sortie du ferry dans le port de Cork, le nombre de satellites utilisés pour le positionnement chute grandement diminuant de moitié (de 8 satellites jusqu'à 4), l'erreur de positionnement planimétrique résultante augmente donc considérablement.

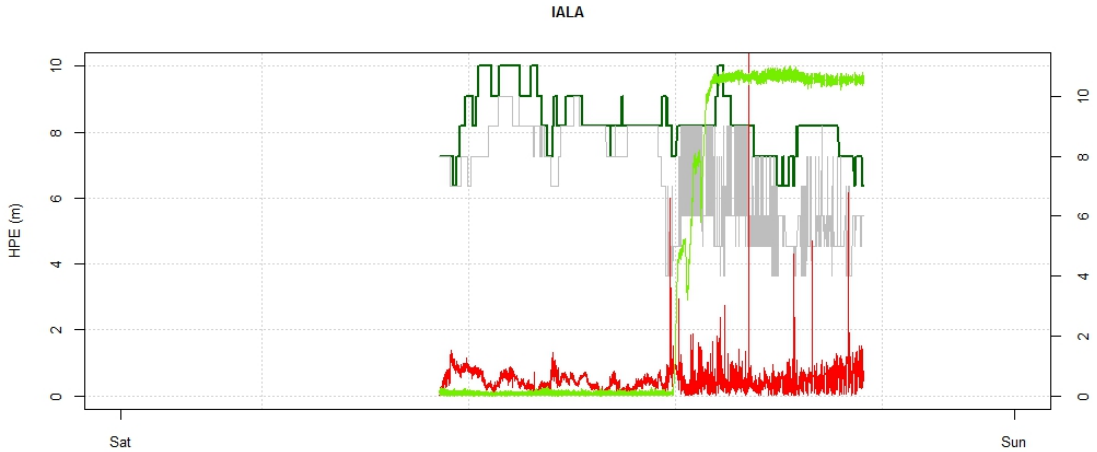


Illustration 47 : Sortie du port de Cork avec le nombre de satellites en visibilité (vert foncé), le nombre de satellites utilisés (gris), la vitesse du Pont Aven (vert clair) et l'erreur planimétrique horizontale (rouge)

Lors de l'accélération, les appareils électroniques au sein du navire se mettent à fonctionner (groupes électrogènes, alternateurs, moteurs, convertisseurs de courant) et émettent des fréquences parasites qui n'existent pas au mouillage du bateau, polluant la réception des corrections différentielles. On peut remarquer sur l'illustration x une différence flagrante des erreurs planimétriques entre l'arrêt (vitesse nulle) et l'accélération.

- Angleterre

Les stations anglaises de la côte Sud montrent un service IALA précis et exact, avec notamment la station de Sainte Catherine (n°680) qui se rapproche du système EGNOS en terme de qualité de positionnement. Elles affichent un écart moyen d'environ 0,70 mètres et des valeurs maximales de 3 mètres (illustrations 48 et 49).

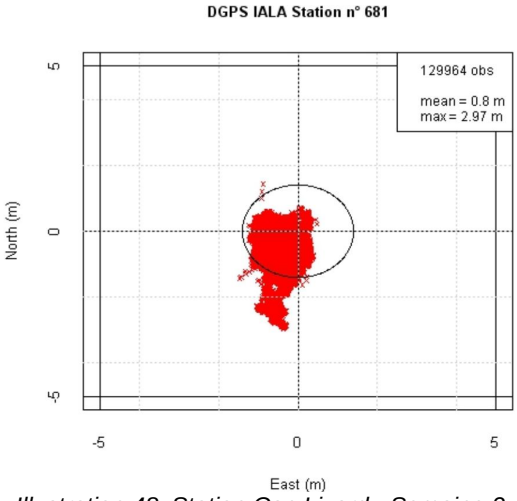


Illustration 48: Station Cap Lizard - Semaine 2 - PA

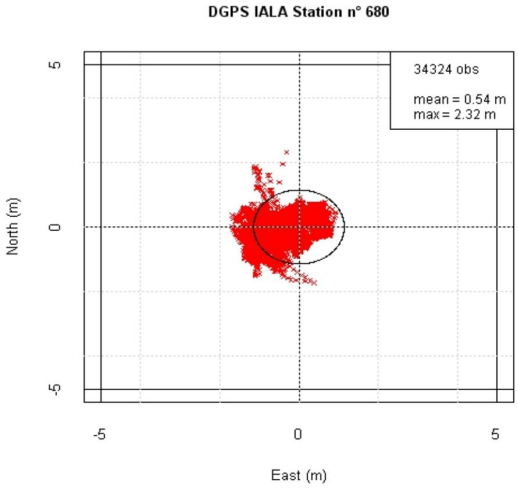


Illustration 49: Station St Catherine's - Semaine 2 - PA

- France

On remarque que les nuages de points pour les stations françaises sont moins condensés que pour les stations anglaises. Elles offrent une moins bonne précision et des valeurs maximales d'écarts plus élevées, et ce pour un nombre de mesures comparables. Elles affichent des valeurs moyennes d'environ 1 mètre, des valeurs maximales de 5 mètres et la dispersion est plus importante (illustrations 50 et 51).

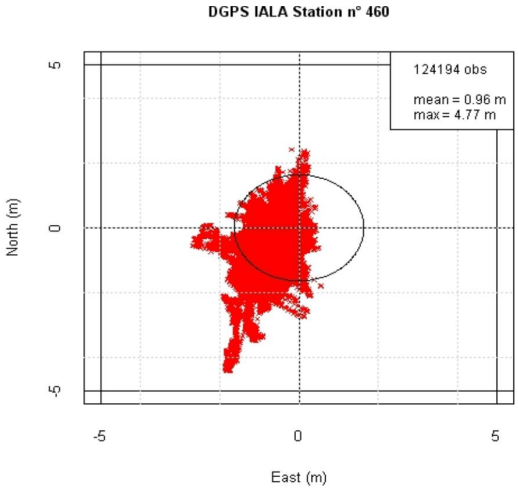


Illustration 50: Station d'Heauville - Semaine 2 - PA

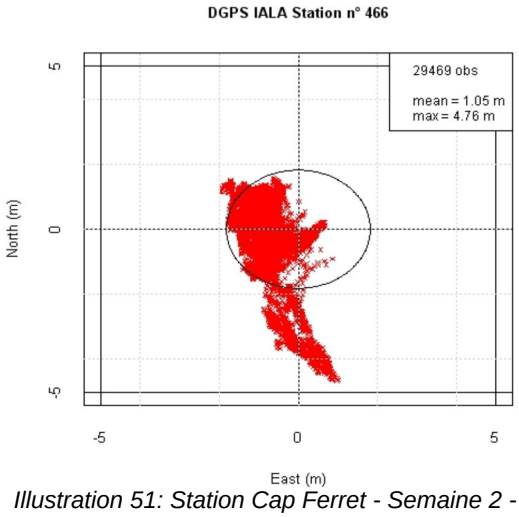


Illustration 51: Station Cap Ferret - Semaine 2 - PA

Les observations permettent de conclure que la qualité du rendu de service IALA est meilleure pour les stations britanniques que pour les stations françaises. Cela peut s'expliquer par le matériel qui est plus récent pour les stations britanniques (récepteur TRIMBLE) et donc plus performant notamment au niveau de l'horloge récepteur face à nos stations françaises (récepteur THALES) qui ont désormais une dizaine d'années.

Nous avons d'autres pistes qui restent à explorer :

→ Il existe différents types de messages dans le format RTCM des corrections, chaque pays étant libre de choisir les types de messages envoyés. Les stations françaises développent le message de type 1 (cf illustration 52 « MT01 ») qui envoie en même temps les corrections de tous les satellites utilisés pour le positionnement. Les stations britanniques elles, utilisent un message de type 9 (« MT09 ») qui transmet de même les corrections mais de façon ternaire, trois satellites par trois, et donc possède une période de rafraîchissement plus courte, les corrections sont donc renouvelées plus souvent.

```
TM Rtcm2.3 815.4 Wed Mar 13 09:13:24.859 2013
MT01 Stat 462 Status 0 Sec 815.4 Seq 3 Frame 15

MT01 SV 1 ZCount 815.4 FktPRC 0.020 FktRRC 0.0020 PRC -14.020 RRC 0.0000 IOD 27
UDRE 0_OSigDErr_<=_1m

MT01 SV 4 ZCount 815.4 FktPRC 0.020 FktRRC 0.0020 PRC -7.540 RRC -0.0020 IOD 34
UDRE 0_OSigDErr_<=_1m
```

Illustration 52: Extrait de corrections différentielles envoyées par le station Pont de Buis sous format RTCM-sc104

La *PseudoRange Correction* (en mètres) (PRC) permet de prendre en compte à la fois les retards dus au passage dans l'ionosphère et la troposphère et les décalages d'horloge satellites. La station de référence calcule avec ces données une pseudo-distance puis la compare à une pseudo-distance de référence qui est calculée grâce à la position connue de la station. Les différences entre les deux pseudo-distances constitueront les corrections différentielles.

$$PRC(t) = PRC(t_0) + RRC * (t - t_0)$$

La *Range Rate Correction* (RRC), littéralement, le taux de correction de la pseudo-distance exprimé en $m.s^{-1}$ est directement relié à la correction de pseudo-distance *PseudoRange Correction* (en mètres). Elle est calculée sur la base de la fréquence Doppler des satellites en visibilité. Cette fréquence rend compte de l'éloignement du satellite par rapport au récepteur et donc indirectement, de sa vitesse radiale. [14]

La RRC a été mise en place lors de la Selective Avaibility, mesure décidée par les Américains visant à introduire des décalages de temps dans les mesures GPS, ayant alors pour conséquences des variations de PRC allant jusqu'à plusieurs mètres, et ce pendant une période de 10 secondes (ION). La RRC, estimatrice de la variation de la pseudo-distance et donc de la correction de la pseudo-distance (PRC) permettait alors, moyennant un intervalle de temps de 10 secondes, d'estimer les futures corrections de pseudo-distances et d'éviter les variations qui pouvaient avoir lieu pendant ces intervalles de temps.[15]

Depuis que ce dispositif a été levé par Bill Clinton le 1er mai 2000, une recommandation publiée par IALA [16], estime que la RRC présente dans le message RTCM sc-104 devrait être supprimée, car elle entraîne une latence dans la transmission des corrections, celles-ci seront donc moins datées et donc de meilleurs précisions.

II.4.2 Le DGPS IALA « autonome »

Les deux dispositifs fonctionnent différemment et notamment dans la réception des corrections différentielles. Le montage autonome n'est constitué que d'un seul récepteur qui possède son propre algorithme de traitement et d'optimisation (cf I.2.1.1), l'autre montage non autonome est lui constitué de deux récepteurs dont un s'occupe de uniquement de la réception des corrections différentielles.

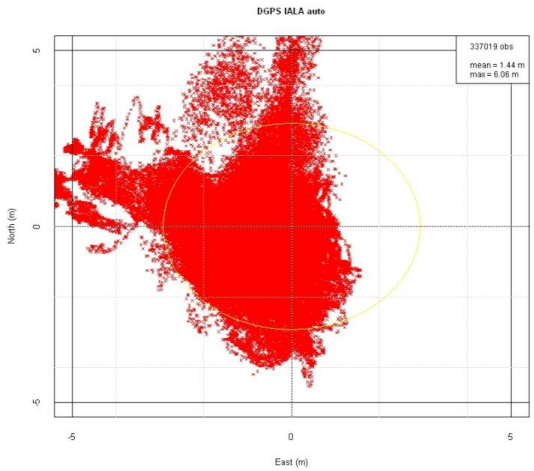


Illustration 53: DGPS auto – Fromveur II

Ce montage montre une valeur moyenne de 1,44 mètres et une dispersion de 0,87 mètres (illustration 38). Le montage non autonome lui affiche une valeur moyenne de 1,20 mètres et une dispersion de 0,85 mètres.

Les résultats ne sont alors pas meilleurs que pour le DGPS couplé, le DGPS autonome montre une dispersion relativement importante ainsi que des valeurs maximales élevées (6 mètres par rapport au référentiel). Nous avons de plus remarqué que contrairement à ce qui était prévu, nous dénombrons 6 stations DGPS IALA utilisées pour le positionnement alors que le montage non autonome ne prend en compte que deux stations seulement.

Il convient aussi de rappeler que, quelle que soit la qualité des mesures du service DGPS IALA, il faut apporter une attention particulière aux montages et installations aux bords des navires. Le brouillage est omniprésent et l'obtention de mesures corrigées nécessite des modalités d'installations spécifiques.

Le DGPS IALA autonome montre de bons résultats de positionnement sur l'Arbalestrille. Il affiche une valeur moyenne de 0,54 mètres, une dispersion de 0,29 mètres et une valeur maximale d'environ 2 mètres.

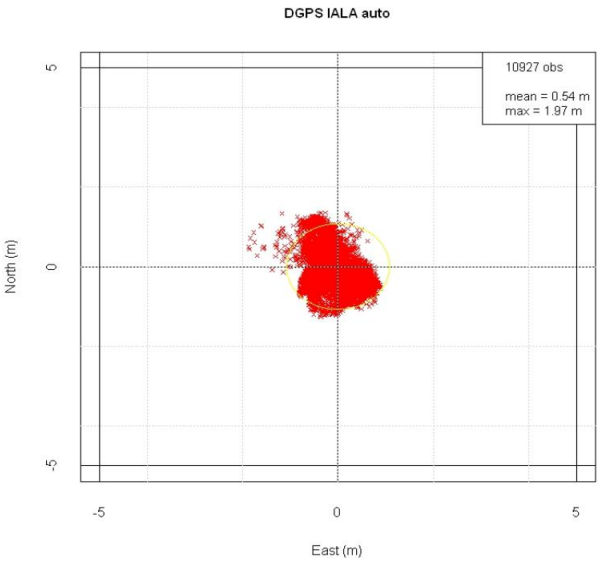


Illustration 54: DGPS auto - l'Arbalestrille

Ces résultats sont différents de la campagne sur le Fromveur II bien que le montage d'acquisition des mesures soit similaire.

II.5 EGNOS

II.5.1 Sur récepteur HEMISPHERE

EGNOS est très largement disponible avec quelques coupures tout de même, celles-ci ne dépassant pas la minute. En regardant sur les phrases NMEA de la première semaine à bord du Pont-Aven, on a pu constater que les premières coupures de signal d'EGNOS avaient eu lieu dans le port Ferry de Cork, où il y a eu à deux reprises des coupures d'environ une minute. L'hypothèse de la perte du satellite géostationnaire par masquage a donc été avancée cependant, ces coupures se sont réitérées plusieurs fois en pleine mer. Elles correspondent en réalité au basculement du satellite géostationnaire qui se fait selon un certain laps de temps. Ainsi, le satellite 120 (INMARSAT à 15,5° W) a laissé la place au satellite 124 (ARTEMIS à 21,5° E) et réciproquement. Par ailleurs, on remarque qu'au fil des semaines, les coupures de signal dues à ce basculement baissent ; 6 coupures sont observées la première semaine et une seule la troisième semaine, s'agissant pourtant du même trajet parcouru par le bateau. Cela veut donc dire que la disponibilité des satellites géostationnaires n'est pas mise en cause du fait de leur orbite géosynchrone.

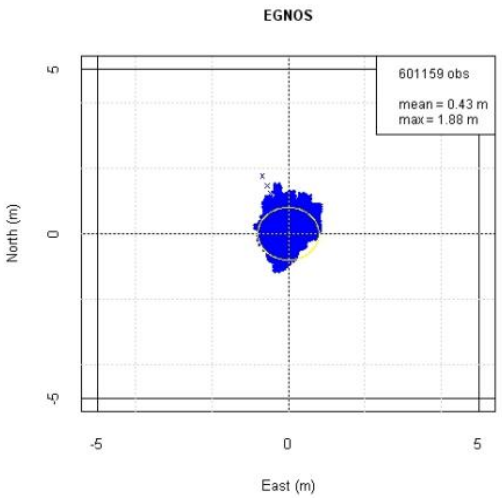


Illustration 55: EGNOS - Semaine 2 - PA

Le service EGNOS fournit un positionnement de qualité : le nuage de points est très condensé et peu biaisé autour de la référence. Les valeurs moyennes sont en dessous 50 centimètres et les maximales ne dépassent pas les 2 mètres. Ce résultat est similaire la troisième semaine sur le Pont Aven[11], on ne peut donc que remarquer la très bonne performance du service EGNOS lors de cette campagne.

Cependant il convient de faire attention au placement de l'antenne recevant les signaux satellitaires d'EGNOS. Comme on peut le constater sur l'illustration 43, les mesures peuvent être affectées de signatures typiques de multi-trajets reconnaissables à leur direction particulière sur le plan géographique Nord – Est et responsables d'une baisse de précision. Cependant, même après avoir rehaussé l'antenne lors de la deuxième campagne, nous obtenons des résultats similaires (illustration 43). Nous soupçonnons en outre un masquage du dispositif par la topographie du lieu (dénivelée importante près du port)

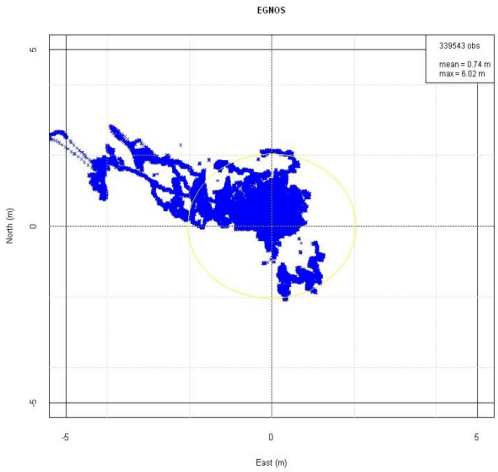


Illustration 56: EGNOS - Fromveur II

11 Cf annexe 5 – Visualisation des écarts planimétriques pour EGNOS la troisième semaine sur le Pont Aven

Du fait des fortes perturbations du service DGPS IALA sur la Gironde, nous avons sélectionné pour le service EGNOS une période de temps synchrone à la série temporelle du DGPS IALA. Cependant dans les trois heures de mesures analysées, le service EGNOS fournit un positionnement de qualité sur la Gironde : une valeur maximale de 1,43 mètres et une dispersion de seulement 0,20 mètres. Ces résultats ne sont pas comparables en dimension temporelle à ceux du Pont Aven où nous avions deux semaines de mesures complètes. Néanmoins nous pouvons souligner la qualité du positionnement par le service EGNOS sur fleuve.

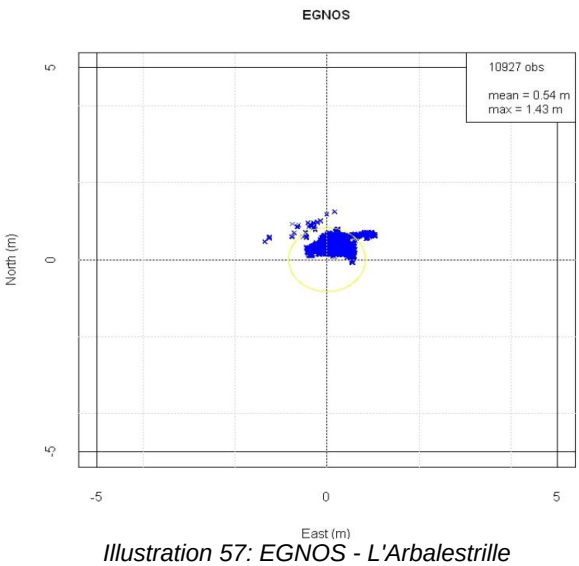


Illustration 57: EGNOS - L'Arbalestrille

II.5.2 Sur récepteur FURUNO

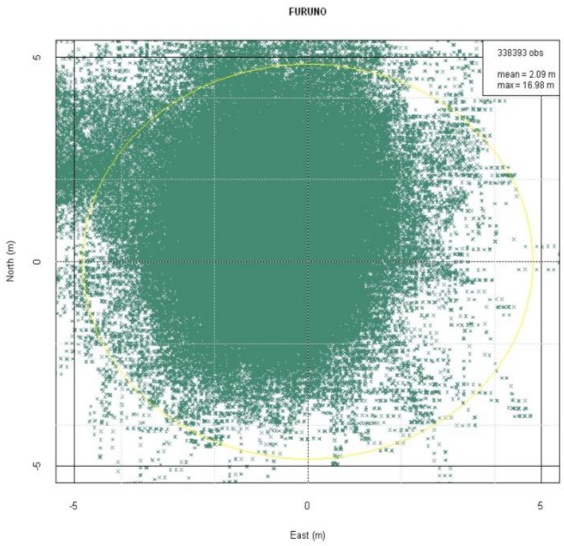


Illustration 58: EGNOS - Furuno - Fromveur II

Nous avons voulu tester de même le service EGNOS sur un récepteur entrée de gamme utilisé par des plaisanciers. Les résultats ainsi obtenus sont très nettement moins bons que ceux obtenus que le récepteur de qualité professionnelle HEMISPHERE R110. On obtient un écart moyen de 2 mètres et une dispersion de 1,41 mètres. A 95 %, on obtient une précision de 3,45 mètres. Néanmoins on reste dans les précisions a priori du constructeur annoncées à 3 mètres pour le service EGNOS.

III Bilan comparatif sur les services de positionnement étudiés

Pont Aven	1ere semaine 527 356 mesures		2e semaine 601 896 mesures		3e semaine 606 900 mesures	
	Sans signal	Disponibilité (%)	Sans signal	Disponibilité (%)	Sans signal	Disponibilité (%)
MarineSTAR	0	100,00%	0	100,00%	0	100,00%
EGNOS	279	99,95%	96	99,98%	49	99,99%
IALA RTCM	225376	57,26%	42960	92,86%	30200	95,02%

Tableau 4: Récapitulatif des disponibilités des différents services sur le Pont Aven

MarineSTAR présente une disponibilité sans faille tout au long des trois semaines, il n'y a eu aucune coupure de signal, néanmoins certaines mesures n'ont pas été assurées par le service mais relayées par le GPS ou le DGPS. Elles ne dépassent pas 0,1 % la deuxième semaine. EGNOS est très largement disponible aussi, bien qu'il soit très brièvement coupé pour des raisons de basculement de satellites géostationnaires. Reste le DGPS IALA, ici le DGPS couplé avec un récepteur externe, qui montre de grandes indisponibilités la première semaine, ce qui pourrait s'expliquer par des facteurs environnementaux (parasites...). Néanmoins, EGNOS est sur ce point de vue plus disponible que le système actuel de navigation maritime.

Lors de la première semaine, on a pu constater de très longues coupures dans le signal RTCM c'est-à-dire une absence complète de corrections différentielles détectées dans la trame GPGGA du DGPS IALA. Par conséquent, 48 heures consécutives de données n'ont pas été transférées au récepteur. Le système EGNOS n'a pas eu ce genre de problème et a été disponible tout au long de la première semaine. Nous soupçonnons une défaillance technique du récepteur MBX-4. C'est pour cela que nous comparerons que les deuxième et troisième semaine, où les coupures de signal sont beaucoup moins importantes.

Navire		GPS		IALA RTCM		DGPS auto		EGNOS – R110		EGNOS – FURUNO	
PONT AVEN	*Période*	*2e semaine*	*3e semaine*	*2e semaine*	*3e semaine*	*2e semaine*	*3e semaine*	*2e semaine*	*3e semaine*	*2e semaine*	*3e semaine*
	Min			0,02	0,03			0,01	0,01		
	Max			173,26	6,90			1,88	3,00		
	Moy			0,84	0,85			0,43	0,44		
	Écart-type			0,91	0,51			0,22	0,26		
	95 %			2,23	1,25			0,54	0,64		
FROMVEUR II	*Période*	*1ère campagne*	*2e campagne*	*1ère campagne*	*2e campagne*	*1ère campagne*	*2e campagne*	*1ère campagne*	*2e campagne*	*1ère campagne*	*2e campagne*
	Min	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,04	0,01	0,01		0,05
	Max	4,05	5,23	4,54	8,08	4,00	6,06	3,02	6,02		16,98
	Moy	1,02	1,09	0,81	1,20	1,01	1,44	0,59	0,74		2,09
	Écart-type	0,68	0,80	0,59	0,85	0,61	0,87	0,41	0,71		1,41
	95 %	1,67	1,96	1,45	2,08	1,49	2,13	1,00	1,74		3,45
ARBALESTRILE	*Période*	*½ journée*		*½ journée*		*½ journée*		*½ journée*			
	Min	0,02		0,01		0,01		0,01			
	Max	2,58		1,80		1,97		1,43			
	Moy	1,31		0,51		0,54		0,54			
	Écart-type	0,60		0,29		0,29		0,19			
	95 %	1,47		0,71		0,71		0,47			

Tableau 5: Récapitulatif des écarts des services testés pendant les différentes campagnes de mesures

Les valeurs de précision pour le DGPS IALA diminuent de moitié entre la deuxième et troisième semaine, les valeurs maximales ne dépassant plus alors les 10 mètres[12]. Néanmoins, on peut constater que le service EGNOS fournit un positionnement deux fois plus précis que le service DGPS IALA.

Les grands écarts calculés lors de la deuxième semaine sur le Pont Aven (173 mètres) montre que le service DGPS IALA peut fournir une position très éloignée de la position de référence et ce, pour plusieurs raisons évoquées auparavant. Ce dernier service ne fournit donc pas une position conforme et imposée par l'OMI qui est au maximum de 100 mètres en pleine mer.

12 Cf Annexe 4 – Visualisation des écarts planimétriques pour le DGPS IALA la troisième semaine sur le Pont Aven

Cependant après 3 semaines de mesures dont 2 exploitables, on peut remarquer que le système EGNOS reste meilleur que le système DGPS IALA, et ce pour plusieurs raisons :

Les écarts n'excèdent pas 2 mètres, les baisses de nombre de satellites ne sont pas répercutables sur les écarts calculés, nous n'avons de plus pas remarqué de coupure de signal [13] n'excédant pas une minute lors de la première semaine.

Nous pouvons donc affirmer que **le système EGNOS dans le cadre de nos mesures pendant deux semaines en mer est plus précis et disponible que le système DGPS IALA. Néanmoins nous avons montré que la qualité du récepteur et donc le post-traitement intégré influe nettement sur le résultat final du positionnement.**

Lors de la campagne sur le Fromveur II, nous avons de plus montré que le DGPS IALA fournit un positionnement très dispersé, et ce quel que soit le montage réalisé (autonome ou non). Le DGPS autonome censé restreindre le périmètre d'accroche des stations différentielles IALA va, lors de la deuxième campagne, recevoir les corrections de plus de six stations contrairement au DGPS non autonome qui n'en reçoit que deux.

Rappelons que le dispositif du DGPS autonome s'appuie sur trois critères de choix des stations de corrections : le rapport signal à bruit, la proximité de la station et la dispersion des mesures corrigées par celles-ci. Lorsqu'une station proche ne remplit les critères de dispersion intégrés dans le récepteur, ce dernier va élargir son périmètre et recevoir des corrections de stations étant beaucoup plus loin, quitte alors à avoir un positionnement moins précis.

La position GPS *standalone* fournie par un récepteur de qualité professionnelle est de bonne précision voire meilleure que le DGPS IALA dans certains cas (tableau 5). **Le service IALA a été un service très fortement perturbé dans cette campagne, contrairement au GPS *standalone* qui a fait preuve d'une grande stabilité lors de cette période d'essai et ce, pour une précision quasi-équivalente au système d'augmentation DGPS IALA.**

Malgré les nombreuses raisons de dysfonctionnements sur la Gironde , les résultats obtenus montrent des services EGNOS et DGPS IALA performants affichant tous deux des valeurs d'écarts par rapport au référentiel très réduites. **Dans une caractérisation fluviale des services sur une série temporelle de mesures réduite, EGNOS reste tout de même meilleur que le DGPS IALA.**

13 Cf Annexe 3 – Chronogramme du service EGNOS la première semaine sur le Pont Aven

Conclusion

La caractérisation des deux services DGPS IALA et EGNOS lors de nos campagnes d'acquisition de données sur mer et sur fleuve, nous montre des résultats disparates.

Le DGPS IALA nous fournit un positionnement conforme aux recommandations de navigation maritime dans le domaine de la précision la plupart du temps, néanmoins il fait preuve d'une grande instabilité dans la réception des corrections différentielles, due essentiellement aux équipements électroniques présents à bord des navires, pour lequel il est censé fournir un positionnement continu.

Le service EGNOS nous montre une qualité de positionnement répondant dans une très large mesure aux nouvelles normes de l'OMI. Le service est stable, disponible et précis d'environ un mètre au maximum. De même, nous n'avons pas constaté une influence des infrastructures environnantes sur la qualité du positionnement.

De plus le service EGNOS comparativement au service actuel de positionnement DGPS IALA se montre meilleur dans les campagnes de mesures réalisées. Nous pouvons l'expliquer par plusieurs raisons :

- ➔ Le service n'est délivré que par un unique fournisseur présent dans toute l'Europe contrairement au service DGPS IALA qui lui, multiplie ses sources de corrections de positionnement de fait de sa présence dans la quasi-totalité des pays.
- ➔ La bande de fréquence [283,5-325] kHz est très sensible aux brouillages extérieurs et se perturbe très facilement au risque de perdre un positionnement précis et cohérent.

Le service EGNOS pourrait alors se proposer comme un système de positionnement temps réel pour la navigation maritime. Néanmoins nous nous devons de replacer nos résultats dans leur contexte : nos études sont basées sur des périodes de mesures précises, sur des jeux de données déterminées et ne concernent qu'une partie restreinte du globe en affichant des latitudes/longitudes similaires. En fonction de la localisation du service, EGNOS peut revêtir plusieurs dénominations qui sont différentes : WAAS pour l'Amérique du Nord et MSAS pour le Japon. En outre la limite de couverture des satellites géostationnaires est un paramètre à prendre en compte : à l'approche des pôles le service n'est plus délivré correctement et s'arrête brusquement au-delà de certaines latitudes. Ainsi, des stations côtières différentielles DGPS sont d'un grand secours pour un positionnement temps réel des navires dans les zones où le service EGNOS n'est plus présent.

Peut-être peut on penser à une complémentarité des deux services étudiés dans ce mémoire, ce qui certes afficherait une redondance dans les zones desservies par le service EGNOS mais aurait l'avantage de fournir un positionnement précis et ce, sur la quasi-totalité du globe. Nous ne pouvons pas écarter non plus la solution du GPS 'standalone' qui fournit des résultats très corrects comparativement aux autres services en étude lors de nos campagnes de mesures. C'est en effet une piste à suivre, notamment avec la modernisation du GPS avec l'arrivée du Block III ainsi que le système de positionnement européen GALILEO.

Ce travail de longue haleine fût très intéressant que cela soit dans le domaine de la théorie ou de la pratique. Le positionnement par GPS est une technique qui rend compte d'un nombre très important d'événements ou de perturbations extérieures et nécessite un investissement particulièrement important quant à la compréhension de tous ces phénomènes. A cela s'ajoute une participation sur le terrain active et mainte fois soumise à des problèmes techniques ou pratiques et donc très riche en enseignements.

Bibliographie

1: Organisation Maritime Internationale.Appendix : Operational Requirements. In : Organisation Maritime Internationale(éd.), Resolution A.1046(27) WORLDWIDE RADIONAVIGATION SYSTEM. Londres: OMI, Londres, 30 novembre 2012, p. 5
2: Association Internationale de Signalisation Maritime.Sources of Vulnerability. In : AISM(éd.), IALA Recommendation R-129 on GNSS Vulnerability and Mitigation Measures . France: AISM, France, Décembre 2008, p. 19
3: Association Internationale de Signalisation Maritime.Accuracy. In : AISM(éd.), IALA Recommendation R-121Onthe Performance and Monitoring ofDGNSS Services in the Frequency Band 283.5 – 325 kHz. France: , France, Décembre 2004, p. 37
4: Centre National d'Etudes Spatiales, Commission Européenne, Agence Spatiale Européenne.L'architecture d'EGNOS. In : CNES, CE, ESA(éd.), GUIDE EGNOS à l'usage des développeurs d'applications. UE: , UE, 30 juillet 2009, p. 104
5: Fugro.MARINESTAR, [en ligne]. Disponible sur <http://www.fugromarinestar.com/>. (consulté le 10/02/2013)
6: FURUNO.Caractéristiques du navigateur DGPS GP-37. In : FURUNO(éd.), Manuel d'utilisation du modèle GP-37. : , , 2002, p. 109
7: HEMISPHERE.Accuracy. In : HEMISPHERE(éd.), R320 & R110 GNSS Receiver. Canada: , Canada, 2010, p. 2
8: Brittany Ferries.Pont Aven, [en ligne]. Disponible sur <http://www.brittany-ferries.fr/traversees/navires/pont-aven>. (consulté le 02/04/2012)
9: Penn Ar Bed.Fromveur II, [en ligne]. Disponible sur <http://www.pennarbed.fr/fr/compagnie-penn-ar-bed/nos-navires/81-fromveur-ii-2011>. (consulté le 02/05/2013)
10: Chantier Naval Gatto.L'Arbalestrille, [en ligne]. Disponible sur <http://www.chantier-naval-gatto.com/>. (consulté le 25/05/2013)
11: HEMISPHERE.Radiobeacon Reception. In : HEMISPHERE(éd.), Hemisphere GPS Technical Reference. Canada: , Canada, 2012, p.
12: COYNE P.II, CASEY S.J., MILLIKEN G.A..Static Test. In : COYNE P.II, CASEY S.J., MILLIKEN G.A.(éd.), Comparison of Differentially Corrected GPS Sources for Support of Site-Specific Management in Agriculture. Kansas: , Kansas State University, 2009, p. 7
13: Penn State Wilkes-Barre.Surveying, [en ligne]. Disponible sur <http://wb.psu.edu/Academics/Degrees/surveying.htm>. (consulté le 15/10/2013)
14: Association Internationale de Signalisation Maritime.Reference Station - Range Rate Correction. In : AISM(éd.), IALA Recommendation R-121 On the Performance and Monitoring of DGNSS Services in the Frequency Band 283.5 – 325 kHz. France: AISM, France, Décembre 2004, p. 27
15: Byungwoon Park, Jeonghan Kim, Sanghoon Jun et al... In : Byungwoon Park, Jeonghan Kim, Sanghoon Jun et al.(éd.), The Need for Range Rate Corrections in DGPS Correction Messages. : , , 2004, p. 1266
16: Association Internationale de Signalisation Maritime.Range Rate Corrections. In : AISM(éd.), IALA Recommendation R-135 OnThe Future of DGNSS. France: , France, Décembre 2008, p. 11

Table des annexes

- Annexe 1 : Formules pour le passage des coordonnées cartésiennes (X,Y,Z) aux coordonnées géographiques (λ,φ,h)

- Annexe 2 : Chronogramme des erreurs planimétriques (HPE) la première semaine de mesures sur le Pont Aven pour le service DGPS IALA

- Annexe 3 : Chronogramme des erreurs planimétriques (HPE) la première semaine de mesures sur le Pont Aven pour le service EGNOS

- Annexe 4 : Représentation des erreurs planimétriques (HPE) en projection Nord-Est la troisième semaine de mesures sur le Pont Aven pour le DGPS IALA

- Annexe 5 : Représentation des erreurs planimétriques (HPE) en projection Nord-Est la troisième semaine de mesures sur le Pont Aven pour EGNOS

- Annexe 6 : Histogrammes de répartition des erreurs planimétriques (HPE) pendant la deuxième campagne de mesures sur le Fromveur II

Annexe 1
Passage des coordonnées cartésiennes (X,Y,Z) aux coordonnées géographiques (λ,φ,h)

Source : Bowring, 1985, « The accuracy of geodetic latitude abd height equations », Survey Review, 28, pp202-206

$$f = 1 - \sqrt{1 - e^2} \qquad R = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

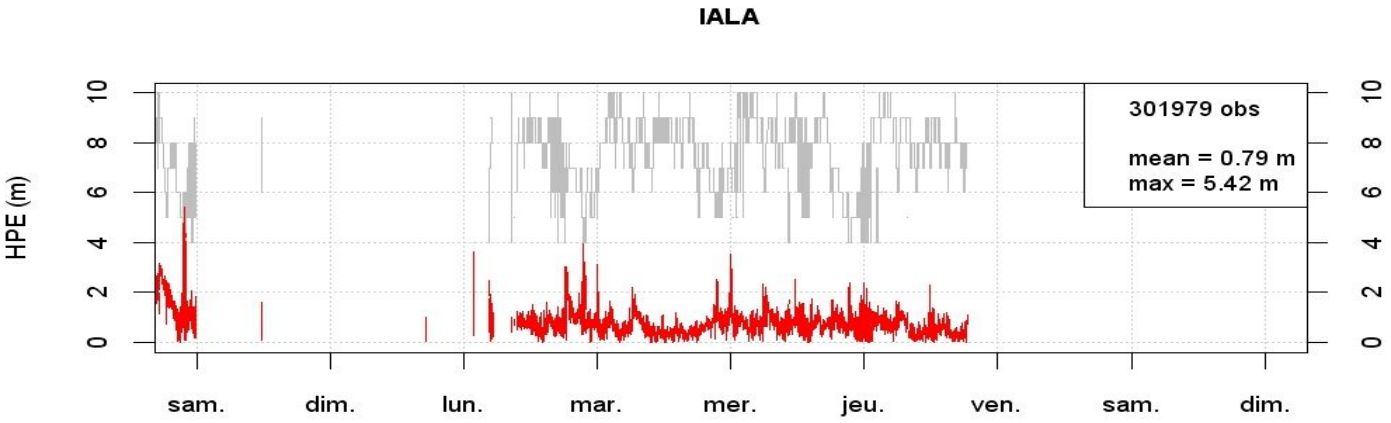
$$\boxed{\lambda = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right)}$$

$$\mu = \arctan\left[\frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} . \left(\left(1 - f\right) + \left(\frac{e^2 a}{R}\right)\right)\right]$$

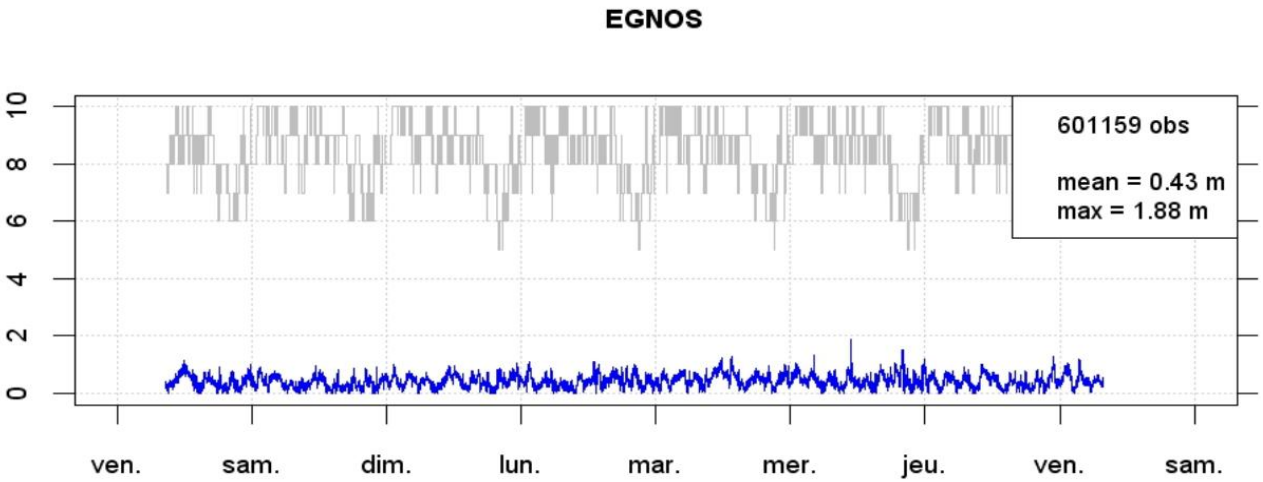
$$\boxed{\phi = \arctan\left[\frac{Z\left(1 - f\right) + e^2 a \ \sin^3 \mu}{\left(1 - f\right)\left[\sqrt{X^2 + Y^2} - e^2 a \ \cos^3 \mu\right]}\right]}$$

$$\boxed{h = \left[\sqrt{X^2 + Y^2} . \cos \phi\right] + \left[Z sin \ \phi\right] + \left[a \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}\right]}$$

Annexes 2 & 3
Chronogrammes des erreurs planimétriques (HPE) la première semaine de mesures sur le Pont Aven

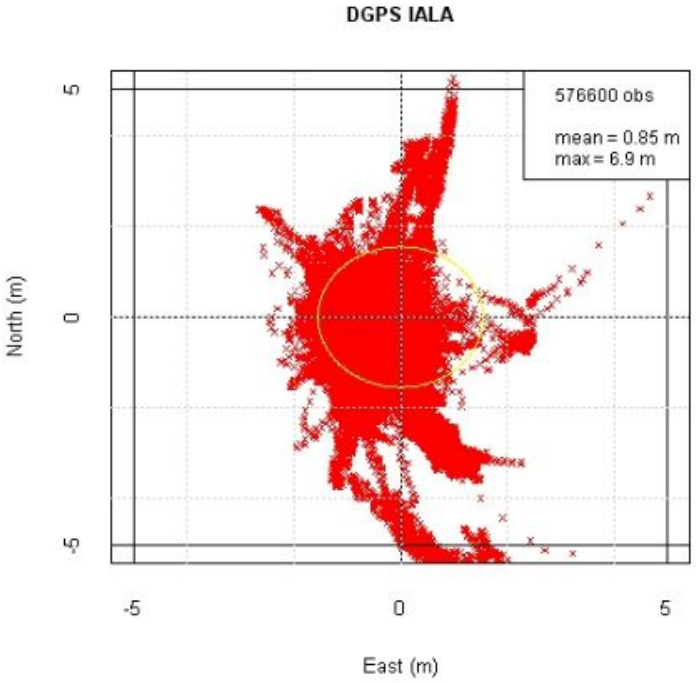


Annexe 2 : Chronogrammes des erreurs planimétriques (HPE) la première semaine de mesures sur le Pont Aven pour le service DGPS IALA

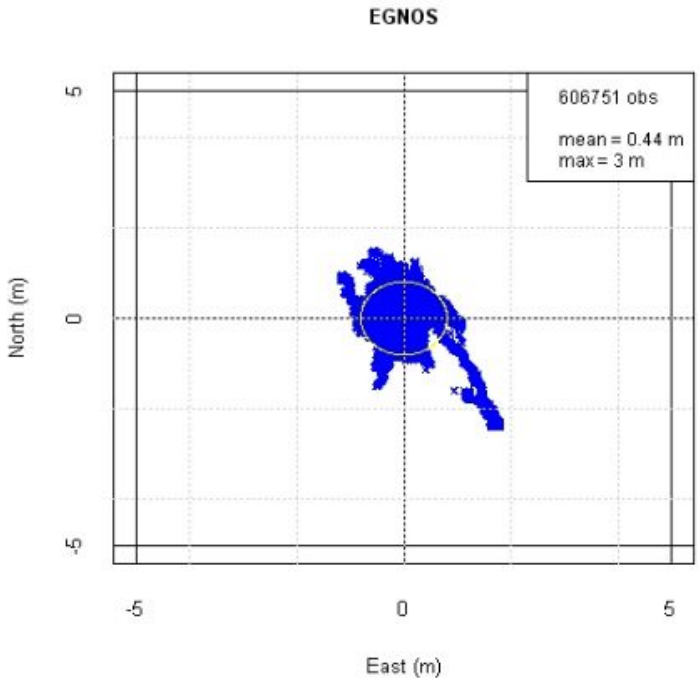


Annexe 3 : Chronogrammes des erreurs planimétriques (HPE) la première semaine de mesures sur le Pont Aven pour le service EGNOS

Annexes 4 & 5
Représentation des erreurs planimétriques (HPE) en projection Nord – Est la troisième semaine de mesures sur le Pont Aven

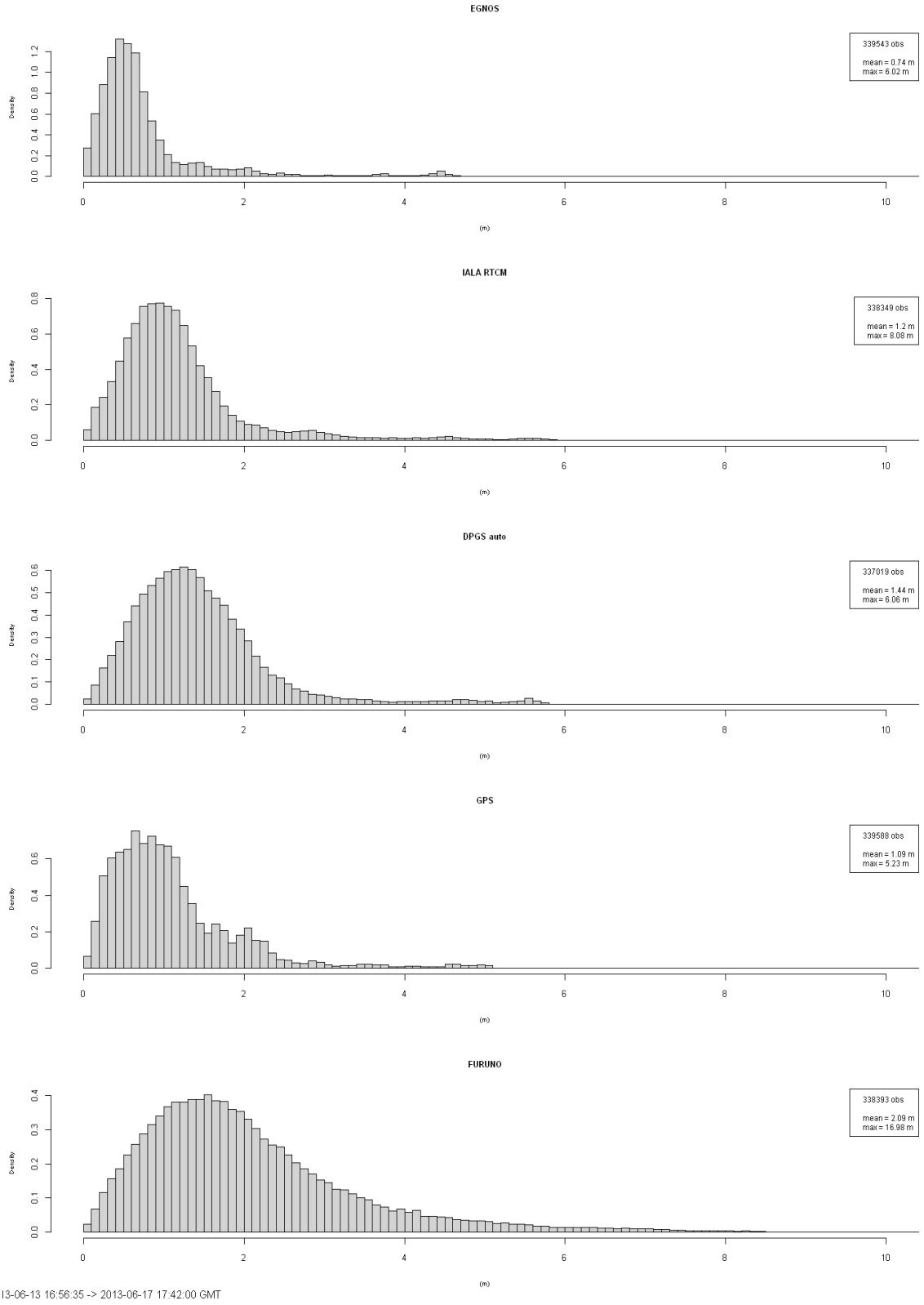


Annexe 4 : Représentation des erreurs planimétriques (HPE) en projection Nord – Est la troisième semaine de mesures sur le Pont Aven pour le DGPS IALA



Annexe 5 : Représentation des erreurs planimétriques (HPE) en projection Nord – Est la troisième semaine de mesures sur le Pont Aven pour EGNOS

Annexe 6
Histogrammes de répartition des erreurs planimétriques (HPE) pendant la deuxième campagne de mesures sur le Fromveur II



Annexe 6 : Histogrammes de répartition des HPE pour (de haut en bas):EGNOS sur R110, DGPS IALA couplé, DGPS IALA autonome, GPS et EGNOS sur FURUNO

Table des illustrations

Illustration 1: Couverture du DGPS IALA des différents États....9
Illustration 2: Couverture du service européen EGNOS....10
Illustration 3: Station DGPS IALA de Pont de Buis (ID:462)....11
Illustration 4: Principe d'un point de vue électronique de l'émission des corrections différentielles....12
Illustration 5: Principe de fonctionnement des stations côtières DGPS....12
Illustration 6: Dispositif de contrôle à Pont de Buis....12
Illustration 7: Segments spatial et terrestre du service EGNOS (Source : CNES)....13
Illustration 8: Principe d'interpolation des IPP (Source:CNES)....14
Illustration 9: Réseau de positionnement MarineSTAR....15
Illustration 10: Premier montage : principe des récepteurs couplés....16
Illustration 11: Deuxième montage : principe du récepteur autonome....17
Illustration 12: Antenne GPS commune A52....17
Illustration 13: Antenne RTCM MGL-4....17
Illustration 14: Antenne A30....17
Illustration 15: Récepteur plaisancier FURUNO GP-37....18
Illustration 16: Récepteur RTCM MBX-4....18
Illustration 17: Récepteur R110 EGNOS – IALA....18
Illustration 18: Récepteur R320 MarineSTAR....18
Illustration 19: Montage général d'acquisition de mesures....19
Illustration 20: Le Pont Aven - Brittany Ferries....20
Illustration 21: Le Pont Aven - Brittany Ferries....20
Illustration 22: Antenne commune A52....20
Illustration 23: Trajectoire du Pont Aven et Stations DGPS IALA....21
Illustration 24: Mâtereau du Pont Aven....21
Illustration 25: Calcul de surélévation de l'antenne A52 sur le Pont Aven....21
Illustration 26: Mât comprenant les trois antennes....22
Illustration 27: Fromveur II à Ouessant....22
Illustration 28: Caisse étanche et dispositif d'acquisition des mesures (PC et récepteurs)....22
Illustration 29: Bras de levier à calculer en fonction du cap....23
Illustration 30: Antennes lors de la campagne sur le Fromveur II....23
Illustration 31: Trajectoire du Fromveur II....23
Illustration 32: Mât comprenant les trois antennes....24
Illustration 33: L'Arbalestrille au Verdon....24

Illustration 34: Valise noire d'énergie et valise blanche étanche d'acquisition.....24
Illustration 35: Trajectoire de l'Arbalestrille sur la Gironde.....25
Illustration 36: Plan méridien de la Terre.....26
Illustration 37: Longueurs d'un méridien et d'un parallèle par degré.....27
Illustration 38: Densité de probabilité de la loi de Rayleigh (Source :http://fr.wikipedia.org).....28
Illustration 39: Extrait d'histogramme de répartition des erreurs planimétriques pour le DGPS IALA sur le Pont-Aven ($\sigma \approx 1$).....28
Illustration 40: Caractérisation statique du MarineSTAR.....30
Illustration 41: Pilier du SHOM et antenne A52.....30
Illustration 42: Erreur de position horizontale du service MarineSTAR.....31
Illustration 43: GPS standalone - Fromveur II.....32
Illustration 44: GPS standalone - L'arbalestrille.....32
Illustration 45: DGPS IALA couplé – Semaine 2 - PA.....33
Illustration 46: Station des Açores - Semaine 2 - PA.....34
Illustration 47 : Sortie du port de Cork avec le nombre de satellites en visibilité (vert foncé), le nombre de satellites utilisés (gris), la vitesse du Pont Aven (vert clair) et l'erreur planimétrique horizontale (rouge)34
Illustration 48: Station Cap Lizard - Semaine 2 - PA.....35
Illustration 49: Station St Catherine's - Semaine 2 - PA.....35
Illustration 50: Station d'Heauville - Semaine 2 - PA.....35
Illustration 51: Station Cap Ferret - Semaine 2 - PA.....35
Illustration 52: Extrait de corrections différentielles envoyées par le station Pont de Buis sous format RTCM-sc104.....36
Illustration 53: DGPS auto – Fromveur II.....37
Illustration 54: DGPS auto - l'Arbalestrille.....37
Illustration 55: EGNOS - Semaine 2 - PA.....38
Illustration 56: EGNOS - Fromveur II 38
Illustration 57: EGNOS - L'Arbalestrille.....39
Illustration 58: EGNOS - Furuno - Fromveur II.....39

Liste des tableaux

Tableau 1: Extrait d'une trame NMEA contenant une phrase GPGGA.....28
Tableau 2: Stations de base utilisées pour le calcul du point sous GAMIT - GlobK.....29
Tableau 3: Stations dont le signal a été reçu plus de 100 fois par le MBX-4 sur le Pont Aven.....33
Tableau 4: Récapitulatif des disponibilités des différents services sur le Pont Aven.....40
Tableau 5: Récapitulatif des écarts des services testés pendant les différentes campagnes de mesures 40

Caractérisation du service de positionnement différentiel EGNOS dans un contexte d'utilisation maritime et fluvial

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Le Mans 2013

RESUME

Pour répondre aux exigences de positionnement maritime édictées par l'OMI, les États ont mis en place il y a une quinzaine d'années des stations côtières connues sous l'appellation de stations DGPS IALA. Celles-ci diffusent des corrections différentielles GPS permettant un positionnement précis à l'approche des côtes. Cependant, sous l'influence de la politique actuelle d'économie, ces stations vieillissantes doivent répondre de leur efficacité face à un système spatial, EGNOS, apportant un service équivalent de positionnement et ce pour des modalités d'utilisation très réduites. Étant développé pour répondre à des besoins de transport aérien, les particularités de l'environnement du navire (ports, ponts…) peuvent éventuellement introduire des limitations pour le niveau de service de EGNOS. Pour ces raisons, le CETMEF doit caractériser, à travers plusieurs campagnes de mesures sur mer et sur fleuve, le service EGNOS comparativement au service actuellement en place, le DGPS IALA.

Mots clés : positionnement, maritime, DGPS, EGNOS, limitations, campagnes.

SUMMARY

In order to meet the requirements of maritime positioning established by the IMO, states set up fifteen year ago, coastal stations known under the naming of DGPS IALA stations. They broadcast GPS differential corrections allowing precise positioning near maritime coasts. As part of a retrenchment policy, these older stations have to meet effectiveness face to an all-spatial system EGNOS which provides an equivalent service for very reduced operational procedures. Specially-engineered for the air transport sector, the boat's surroundings and particularly outside factors could risk disrupting the orderly functioning. That's why, the CETMEF by several campaigns of measurement by sea and by river have to characterise comparatively the two services: EGNOS and the current one, IALA beacon differential GNSS service.

Key words : positioning, maritime, DGPS, EGNOS, surroundings, campaigns.