

Projet UV 5.4 : Détermination du trait de côte par GNSS



CALMETTES Edouard

LE DEUNF Julian

RAMOND Christophe

VIEILLARD Martin

27/02/2015

Plan

Remerciements	4
Abstract	4
Résumé.....	4
Introduction.....	5
I. Le trait de côte	6
A. Les différentes définitions	6
B. Définition retenue pour le projet.....	6
II. Etude du problème.....	7
A. Zone d'étude	7
B. Méthodes envisagées.....	7
C. Solution retenue : Levé RTK	8
1. Principe du positionnement RTK.....	8
2. Etapes du levé	9
D. Solution retenue : Données Lidar du SHOM	10
III. Acquisition.....	11
A. Levé de la station de référence : du 14 au 17/11/2014.....	11
1. Manipulation	11
2. Traitement de données.....	11
B. Calcul de la hauteur ellipsoïdale à mi marée	11
C. Levé RTK de la plage du Relecq-Kerhuon, le 12/12/2014	13
1. Préparation du matériel	13
2. Manipulation	14
IV. Traitement.....	16
A. Changement de coordonnées	16
1. Changement de coordonnées géocentriques à géographiques	16
2. Changement de coordonnées géographiques à projetées	17
B. Traitements à la demande.....	18
C. Résultats.....	19
1. Données post-traitées et interpolées.....	19
2. Incertitude des données.....	21
3. Tracé des résultats	23
V. Utilisation des données Litto3D	24

Conclusion	28
Bibliographie.....	29
Table des figures.....	30
Annexe 1 : Type de fichier supporté par le programme	31
Annexe 2 : Traitement des données mobiles.....	32
Annexe 3 : Comparaison des données Argo et mobiles GNSS	33

Remerciements

Nous tenons à remercier M. Raphaël Legouge, ingénieur au Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, pour son aide et sa disponibilité qui ont permis la réalisation de ce projet.

Nous remercions également M. Pierre Simon, pour nous avoir aidés à réaliser le levé sur la plage du Relecq-Kerhuon.

De la même façon, nous saluons la disponibilité et les conseils des professeurs de l'ENSTA Bretagne : M. Pierre Bosser, Mme Amandine Nicolle et M. Rodéric Moitié.

Enfin, nous remercions M. Denis Tranvouez pour nous avoir transmis rapidement le permis de circulation sur les plages avec un véhicule motorisé.

Abstract

The coastline is a common and intuitive notion; however it is difficult to define it precisely due to the variability of the sea level.

The purpose of our project was to determine a definition of the coastline, and to elaborate an acquisition method according to this definition on a part of the Elorn River. According to the characteristics of the studied area and the available means, we decided to measure the elevation of the half-tide height by GNSS surveys.

We also used elevation data from the database Litto3D: by creating a digital elevation model, we were able to delineate a coastline related to the sea level.

Résumé

La détermination du trait de côte varie en fonction des institutions et des utilisations faites. Notre travail consistait à en donner une définition puis à en effectuer le tracé sur une zone de l'Elorn. Pour cela nous avons mis en place une méthode consistant à effectuer un levé à l'aide de récepteurs GNSS. Afin de traiter les premières données nous avons dû faire des calculs de marée et de rattachement à l'ellipsoïde. Un programme sous Python fut créé afin de traiter ces données. Nous avons aussi utilisé des données Lidar disponibles sur le site du SHOM afin de modéliser un bassin et de voir l'évolution de notre trait de côte en fonction de la marée.

Introduction

Le trait de côte est communément considéré comme étant la frontière linéaire entre les domaines maritimes et terrestres. Cependant, cette notion assez intuitive est difficile à définir précisément, de par la nature variable de ce trait de côte, soumis aux mouvements de marée et aux déformations du littoral. Aussi trouve-t-on de nombreuses définitions différentes du trait de côte, certaines étant même parfois complètement fantaisistes et sans aucune rigueur.

Ce flou quant à la terminologie exacte peut vite devenir problématique. En effet, la connaissance de la position précise du trait de côte est nécessaire dans de nombreux domaines d'activités. Par exemple, la différence de définition du trait de côte entre l'IGN et le SHM a fait périlcliter un projet de carte littorale marine et terrestre. De même cette limite peut servir en océanographie, pour des calculs de courants marins ou de déplacements sédimentaires. Elle peut aussi servir à suivre l'évolution des côtes après l'effet des érosions dunaires ou de plages. Enfin, la connaissance précise du trait de côte est surtout vitale pour déterminer les risques encourus par les populations et les installations littorales lors de grosses tempêtes ou de grandes marées.

Le but de notre projet était donc de déterminer le trait de côte pour la partie de l'Elorn comprise entre le pont de l'Iroise à l'ouest, et à l'est la limite définie par le lieu-dit le Passage à Plougastel-Daoulas et la base nautique au Relecq-Kerhuon.

Nous avons d'abord commencé par rechercher et étudier les différentes définitions du trait de côte, envisageant des méthodes de relevé appropriées. La particularité de notre zone d'étude nous aura fait renoncer à plusieurs options.

Après nous être donné une définition de trait de côte adaptée à notre projet et avoir défini un protocole d'acquisition, nous avons pu effectuer les mesures puis le traitement des données, étapes nécessaires au tracé de cette limite. Nous avons également mis au point une deuxième méthode pour obtenir le trait de côte, à partir de données Lidar fournies par le SHOM. Cette méthode, prenant mieux en compte son caractère variable, permet d'en donner une définition plus ajustée aux différentes attentes des utilisateurs de la mer.

I. Le trait de côte

A. Les différentes définitions

La première tâche de notre projet a été de nous renseigner et nous documenter sur le trait de côte et sa définition. C'est lors de cette étape que nous avons réalisé à quel point cette définition était variable d'une source à l'autre.

Le Dictionnaire Hydrographique International décrit le trait de côte comme étant la « ligne portée sur la carte séparant la terre et la mer. Sur la carte marine c'est le plus souvent la laisse de haute mer. » [1] La laisse de haute mer étant la ligne atteinte par la mer lors des plus grandes marées astronomiques.

Le SHOM donne sur son site la définition suivante : « la ligne mince et ondulée formée de sable fin, de débris de coquilles, de petits morceaux d'algues, etc. laissés par les vagues, qui marque la limite supérieure atteinte par leur mouvement sur la plage ». [2]

B. Définition retenue pour le projet

Nous n'avons donc pas de source absolue pour définir cette limite que nous devons modéliser. Nous avons alors réfléchi à une définition qui serait adaptée aux moyens et au délai dont nous disposions. Etant donné la période sur laquelle s'étendait notre projet, nous ne pouvions pas prendre comme définition du trait de côte le niveau des plus hautes mers astronomiques. Nous avons donc choisi de calculer le trait de côte au niveau moyen de la mer.

Le niveau moyen est la moyenne des hauteurs de marée observées à un endroit déterminé pendant un intervalle de temps donné [1]. L'ENSTA Bretagne a déposé un marégraphe au niveau du Passage le 16 septembre 2014. Nous l'avons relevé le 25 novembre. Ainsi, nous disposons des données de deux mois pour calculer la hauteur moyenne au niveau du Passage (Les étapes de ce calcul seront abordées plus loin : § III-B).

II. Etude du problème

A. Zone d'étude

Les zones d'étude de notre projet étaient les plages du Relecq-Kerhuon et de Plougastel-Daoulas entre le pont de l'Iroise et la zone dite du Passage. La zone est présentée en Figure 1 en couleur orange sur une carte IGN.

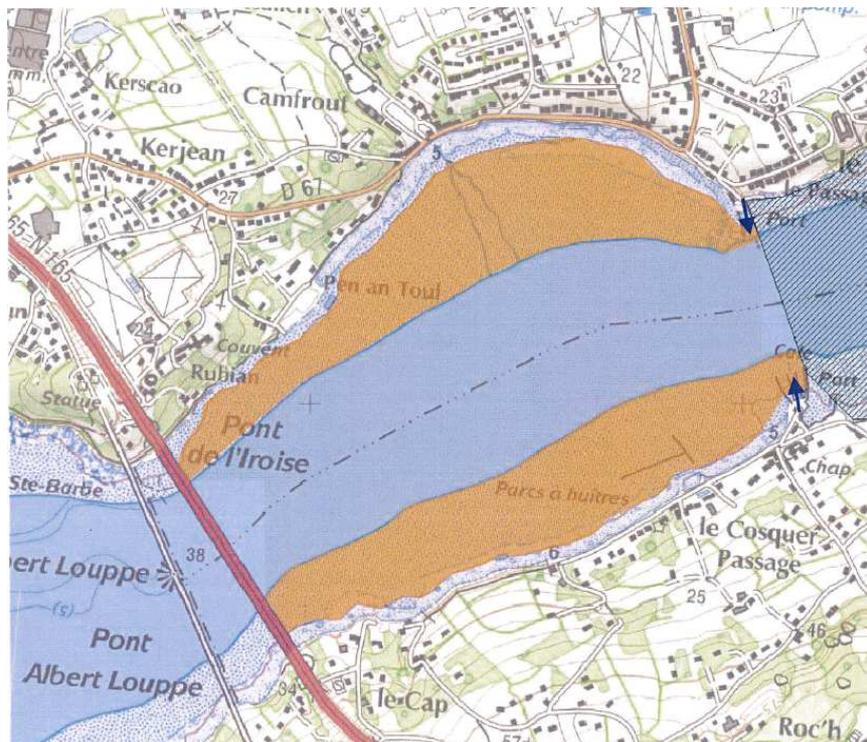


Figure 1: Zone de levé

B. Méthodes envisagées

Lors de réflexions personnelles et de nos recherches bibliographiques, nous avons envisagé plusieurs méthodes pour effectuer le travail qui nous était demandé.

Nous avons d'abord pensé à récupérer des ortho-photos (c'est-à-dire déjà géoréférencées) de notre zone d'étude. En connaissant précisément la date et l'heure de celles-ci, nous aurions pu accéder à la hauteur de marée correspondante et ainsi estimer le trait de côte. Nous comptions récupérer ces photos satellites sur des sites internet tels que Geoportail. Malheureusement, les photos disponibles ne sont pas datées de façon précise.

Une autre méthode aurait été de créer nous-même des photos aériennes de la zone. L'utilisation d'un drone se serait avérée trop coûteuse. Le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine a parfois recours à des cerfs-volants sur lesquels ils fixent un appareil photo : en positionnant au sol des balises sur des points connus, il est possible de corriger les photos et de les géoréférencer. Cependant, cette solution aurait été très laborieuse compte tenu de l'étendu de notre zone d'étude. De plus, ces deux techniques, de part le survol d'équipement, sont interdites sur une zone si proche de l'île Longue.

Nous avons aussi pensé utiliser une station Leica robotisée. Nous nous serions déplacés sur la plage munis de prismes et la station aurait récupéré nos coordonnées dans son référentiel propre. Il nous aurait alors suffi de récupérer les coordonnées de la station pour positionner nos points par rapport à un référentiel géodésique. Cependant l'ENSTA Bretagne n'étant pas doté d'un tel matériel et n'ayant pas réussi à contacter l'entreprise suisse, nous n'avons pas pu utiliser ce procédé.

De part la relative simplicité du matériel requis, un levé GNSS du trait de côte sur la plage s'est présenté comme une option possible. Nous nous placerions en mode RTK, après avoir installé une base et nous passerions à l'aide de stations GNSS mobiles autour d'une altitude donnée, cette altitude correspondant à notre définition du trait de côte.

Cette méthode est celle que nous avons préparée et appliquée. Le déroulement de notre travail sera développé dans les parties suivantes du rapport.

Enfin, nous avons envisagé de réaliser un levé Lidar à l'aide de l'Argo. L'école est dotée d'un Lidar permettant de faire un relevé laser sur de grandes surfaces. Nous aurions parcouru la plage lors de basse mer durant les grandes marées afin de couvrir une grande partie de la plage. Nous aurions pu alors modéliser un bassin et y faire évoluer le trait de côte selon la définition de chacun. Cependant la plage étant recouverte d'algues, nous les chances étaient faibles d'avoir des données exploitables.

Nous avons tout-de-même tenté d'appliquer aussi cette méthode, et avons pu modéliser un modèle numérique de terrain (MNT) pour notre zone d'étude. L'application de cette méthode sera explicitée en dernière partie du rapport.

C. Solution retenue : Levé RTK

1. Principe du positionnement RTK

Le positionnement RTK (littéralement Real Time Kinematic) est une méthode de positionnement en temps réel utilisant des satellites GNSS. Un récepteur GNSS doit être positionné sur un point connu (la station de référence) pour envoyer en temps réel les corrections à un ou plusieurs récepteurs mobiles. Le positionnement du mobile est donc relatif à la position de la station de référence, d'où l'intérêt de déterminer son emplacement exact. Le calcul des corrections se fait par des résolutions d'ambiguïté de phase, on obtient alors la position des récepteurs mobiles avec une précision

verticale et horizontale de l'ordre de quelques centimètres (la précision est variable selon la longueur de la ligne de base).

2. Etapes du levé

Le levé RTK s'est alors fait en trois étapes. La première a consisté à mettre en place la station de référence, et à acquérir des données pendant un temps suffisamment long pour pouvoir positionner notre base précisément. Il nous a donc fallu trouver un endroit où stationner notre base durant plusieurs jours, et où l'envoi des corrections pourrait couvrir toute la plage, sans masquage de la part de bâtiments ou de végétation. Il fallait aussi un endroit sécurisé, où nous pourrions retrouver notre station après l'acquisition. Nous avons donc opté pour faire du porte à porte à côté de notre zone de levé et avons stationné notre base chez un habitant comme le montre la Figure 2. Nous devons avoir les coordonnées de la base afin de pouvoir corriger les données en temps réel par la suite. Pour avoir une bonne précision de ces coordonnées, nous avons laissé notre station en base durant trois jours.



Figure 2: Localisation de la base RTK

La deuxième étape consistait à définir la hauteur ellipsoïdale du niveau de la mer à mi marée. Notre définition du trait de côte ayant été choisie, il nous a fallu savoir quelle hauteur utiliser lors de nos levés. Nous avons alors déterminé le niveau moyen à l'aide du marégraphe de l'école posé en septembre au niveau de notre zone d'étude. Puis à l'aide d'un nivellement effectué par des élèves de deuxième année de l'ENSTA Bretagne en option hydrographie, nous avons pu rattacher notre niveau moyen à l'ellipsoïde de référence. Cette étape est détaillée au paragraphe §III-B.

Enfin, la troisième étape consistait à faire le levé sur la plage. Nous avons dû au préalable demander l'autorisation aux autorités locales afin de pouvoir se déplacer sur la plage avec un véhicule motorisé de type Argo. Nous avons alors installé notre base à l'endroit où nous avons déterminé les coordonnées précédemment pour recevoir les corrections en temps réel sur la plage. Puis nous nous sommes déplacés à pied et à l'aide de l'Argo autour de la valeur déterminée pour notre trait de côte. Cette étape est détaillée au paragraphe §III-C.

D. Solution retenue : Données Lidar du SHOM

L'idée de pouvoir modéliser le bassin de la zone étudiée nous plaisait particulièrement. Nous avons donc tenté, lors du levé RTK de la plage, d'utiliser le Lidar de l'école. En effet, nous utilisons l'Argo et il nous était facile de le rajouter aux appareils déjà installés. Cependant les conditions météorologiques et l'humidité du sol le jour du levé ont rendu le Lidar inutilisable. Nous n'avons donc pas pu réaliser de relevé laser sur notre zone d'étude.

Cependant, nous nous sommes rendu compte que le SHOM, via son portail d'accès aux données de référence data.shom.fr, partageait des données altimétriques et notamment des données Lidar issues de la base de données Litto3D. Nous avons donc récupéré les modèles numériques de terrain correspondants à la partie de l'Elorn que nous étudions.

Ainsi, nous avons pu déterminer la limite altimétrique correspondant à une hauteur de marée donnée. En extrayant les coordonnées de cette limite et en la reportant sur une image géoréférencée, il est possible de définir jusqu'où ira le flot de marée. Cette méthode a l'avantage de présenter un trait de côte variable, définit pour une hauteur de marée donnée, et qui présente les caractéristiques de cette marée.

III. Acquisition

A. Levé de la station de référence : du 14 au 17/11/2014

1. Manipulation

Nous avons placé la station de référence à côté du passage de telle sorte que l'on puisse recevoir les corrections RTK sur toute la zone d'étude. Le récepteur GNSS est resté en station pendant tout un weekend afin d'estimer sa position le plus précisément possible. Nous avons laissé un repère sur place afin de pouvoir replacer notre station de base pour les levés RTK.

2. Traitement de données

Nous avons traité les données récoltées lors de ce levé à l'aide du logiciel RTKlib, programme gratuit de traitement de données GNSS [3]. L'interface RTKpost permet d'effectuer un traitement en mode « Statique » et donc de calculer la position de notre station de référence [4]. Les données requises pour effectuer ce travail sont les fichiers d'observation de la position à déterminer (fichiers RINEX), les éphémérides précises des satellites, ainsi que les horloges correspondantes. Lors du traitement nous nous sommes rendus compte qu'il y avait eu un problème lors de l'acquisition des données. Nous pouvions exploiter les données uniquement à partir du dimanche 16 novembre 13h42 au lundi 17 novembre 7h41 heure GPS. Ce créneau s'est avéré suffisant pour la précision voulue, puisque nous pouvions déterminer la position de la station de référence à plus ou moins un centimètre. Nous n'avons donc pu utiliser ces données et n'avons pas été obligés de recommencer notre levé et nous avons pu traiter ces données.

B. Calcul de la hauteur ellipsoïdale à mi marée

Nous devons, afin de modéliser notre trait de côte, en déterminer la hauteur ellipsoïdale à mi-marée. Nous avons pour cela récupéré les données du marégraphe immergé en début d'année par les élèves de deuxième année de l'ENSTA Bretagne [4]. Au moyen d'un nivellement, ils avaient aussi reliée à l'ellipsoïde la hauteur d'eau à l'endroit où le marégraphe était immergé. Le principe du rattachement du marégraphe à un point de référence est schématisé en Figure 3.

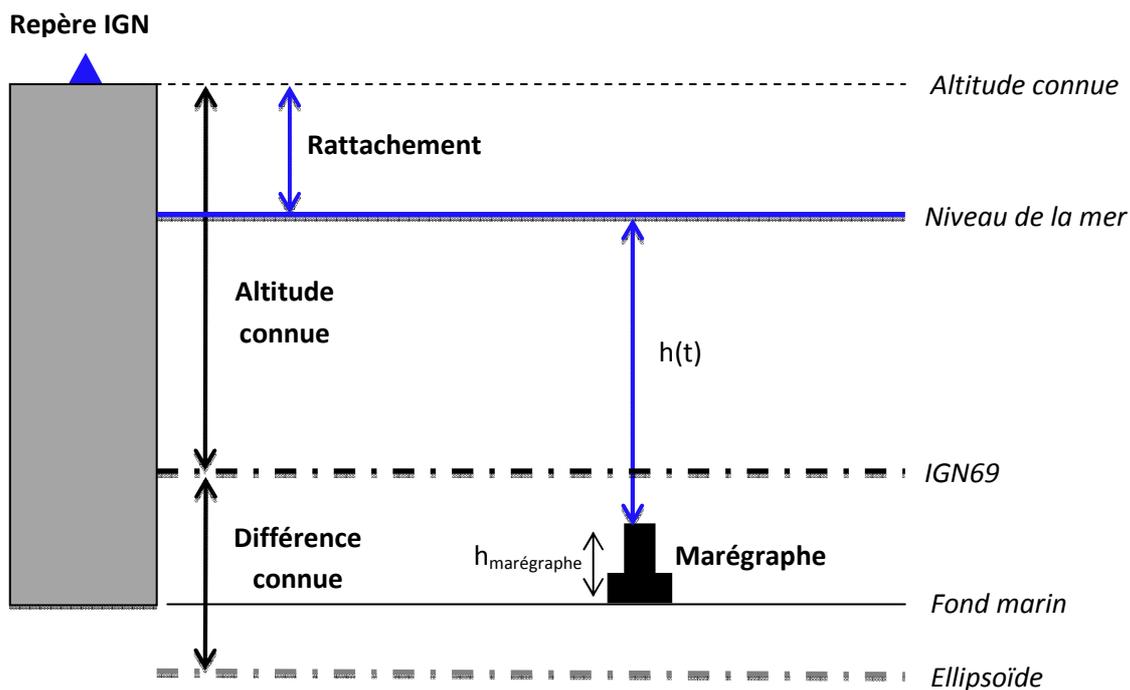


Figure 3 : Principe du rattachement d'un marégraphe à un point de référence

Nous avons ensuite récupéré les valeurs de pression atmosphérique du SHOM afin de corriger la hauteur d'eau de la surcote barométrique. Cette étape s'est déroulée en deux parties. En effet, initialement, les données en notre possession ne couvraient qu'une vingtaine de jours, et nous n'avions pas les données barométriques pour la date à laquelle le nivellement avait été réalisé. Comme il nous fallait une valeur approximative pour pouvoir faire le levé, nous avons décidé de faire une méthode peu précise. Nous avons donc corrigé de la surcote de pression la hauteur d'eau pour les jours dont nous connaissons la pression barométrique. Nous avons ensuite calculé l'écart entre la moyenne des hauteurs du marégraphe et celle des hauteurs corrigées de la pression. Enfin nous avons retranché cet écart à la valeur de hauteur d'eau lors du nivellement. Nous avons ainsi pu ramener une hauteur d'eau corrigée à l'IGN 69, et déterminer cette hauteur ellipsoïdale pour la mi marée. Mais la correction appliquée n'est pas sûre puisqu'elle est un écart entre deux moyennes. Il se peut que le jour du nivellement (29 septembre) les conditions de pression aient été bien différentes que celles des jours pour lesquelles nous avons des données. Le risque est que notre hauteur ellipsoïdale à mi marée soit erronée de plusieurs centimètres.

Après avoir fait le levé au Relecq-Kerhuon, nous avons eu à notre disposition les données barométriques pour tout le temps durant lequel le marégraphe fut immergé. Ainsi, nous avons pu traiter les données du marégraphe après le levé. Nous avons corrigé toutes les valeurs de pression atmosphérique. Grâce au rattachement effectué par les deuxièmes années, nous avons rattaché la hauteur d'eau le 25 septembre 2014 à 11h à l'IGN69 (Figure 4). Nous avons pu alors utiliser le biais trouvé sur toutes les valeurs afin d'obtenir une valeur moyenne vraie.

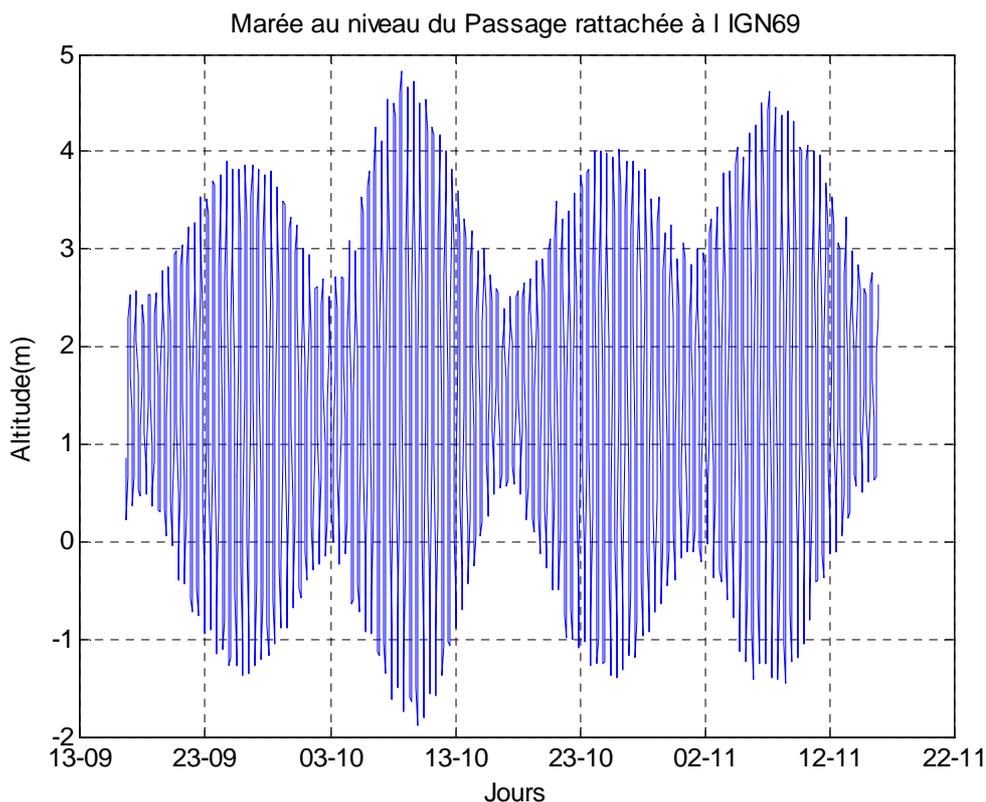


Figure 4: Marée au niveau du passage rattachée à l'IGN69

Finalement nous avons obtenu une différence de 6 cm entre la valeur moyenne calculée initialement et la seconde valeur. Cette erreur n'impacte pas vraiment les données acquises sur le terrain mais permet de réduire l'incertitude concernant le calcul de marée. Ainsi nous avons pu utiliser la dernière valeur pour déterminer notre trait de côte. Nous trouvons une valeur moyenne de 1.46 m avec une incertitude de 6mm par rapport à l'IGN69.

C. Levé RTK de la plage du Relecq-Kerhuon, le 12/12/2014

Le vendredi 12 décembre 2014, nous avons effectué un premier levé sur la plage du Relecq-Kerhuon.

1. Préparation du matériel

Nous avons d'abord récupéré le matériel du SHOM : nous avons pu disposer de plusieurs antennes GNSS avec les cannes adaptées, ainsi que des sacs à dos permettant de transporter le récepteur, une antenne UHF pour recevoir des corrections, et des batteries de rechange. Ce matériel, montré en figure 5, nous a servi à prendre des points manuellement.



Figure 5: Matériel pour levés pédestres

Nous avons aussi préparé le matériel sur l'Argo en connectant un récepteur GNSS, ainsi qu'une station inertielle et une antenne UHF. Comme le lidar était installé, nous l'avons paramétré pour l'utiliser lors du levé, malgré les faibles probabilités d'en extraire des données fiables ; mais il s'est avéré que les conditions météo rendaient impossible son utilisation, nous ne nous en sommes pas servis.

2. Manipulation

Lors de la réinstallation de notre station de référence, nous nous sommes rendu compte que le marqueur (un clou sur un tasseau en bois, enfoncé dans le sol) sur lequel nous avons positionné l'antenne avait été déplacé. Le trou laissé dans le sol par le tasseau était encore présent et nous avons pu remettre le marqueur dedans. Cependant il était évident que les coordonnées n'allaient plus être précisément les mêmes que ce que nous avons calculé lors du premier levé. Durant l'acquisition des données sur le terrain, nous avons rentré dans le récepteur les coordonnées que nous avons calculées auparavant, afin de pouvoir travailler tout en sachant qu'il y aurait un biais à prendre en compte. Pour résoudre ce problème, nous avons enregistré les données brutes de la base

pendant l'acquisition. Nous avons par la suite post-traité ces données afin d'obtenir les coordonnées de la base lors du levé sur la plage du Relecq-Kerhuon. Ayant ces données, nous avons pu calculer le biais entre les données de la première mise en station et la deuxième et appliquer ce biais à toutes les sondes obtenues, par Argo et à la canne, sur la plage le 12 décembre.

Arrivés sur zone, nous avons commencé notre levé. L'Argo a parcouru la plage en serpentant autour de la hauteur ellipsoïdale de mi marée. Nous contrôlions le recouvrement de la hauteur désirée grâce à la hauteur ellipsoïdale affichée sur l'écran de navigation par le logiciel Quinsky, et nous nous écartions d'environ deux mètres autour de cette valeur tout en avançant (Figure 6).

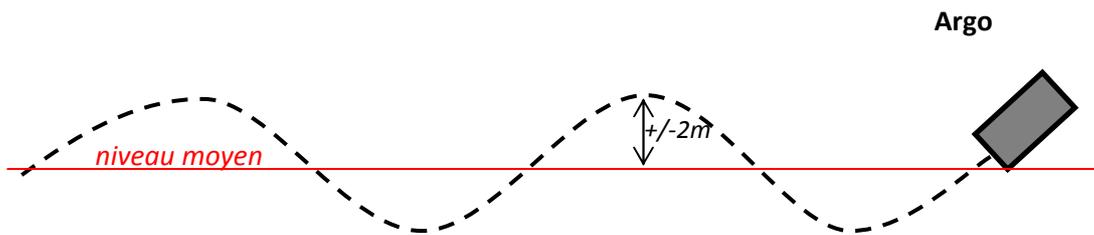


Figure 6 : Profil utilisé pour effectuer le levé Argo

Pendant ce temps, deux d'entre nous prenaient manuellement des points au moyen du matériel du SHOM, en réalisant un maillage de points autour de la ligne définie pour le trait de côte : nous prenions une mesure à la hauteur ellipsoïdale définie, puis une mesure quelques mètres plus haut, et une autre quelques mètres plus bas, en avançant tous les trois ou quatre mètres. Au bout de quelques heures, l'Argo a pu faire le levé de toute la partie nord de notre zone d'étude en serpentant, puis revenir en suivant la ligne de trait de côte. Pour le levé manuel par contre, de par la lenteur du procédé, nous n'avons pu couvrir qu'environ 650 mètres (soit un tiers de la plage) dans le même laps de temps. De plus, les corrections envoyées par la station de référence étaient souvent masquées, et l'attente de leur retour a rendu la manipulation encore plus lente.

IV. Traitement

Une fois que M. Legouge eût fini le travail de post-traitement de position sur nos données GNSS, nous avons pu les utiliser dans notre chaîne de traitement. Pour mener à bien ce traitement nous avons décidé de réaliser un programme informatique permettant d'automatiser les différentes étapes de calcul. Cette liberté nous permet d'implémenter tous les modules nécessaires à notre étude et de connaître exactement les opérations effectuées. Nous avons décidé d'élaborer le programme en langage Python, la licence étant libre, le logiciel peut être utilisé par tout le monde. Le programme est structuré en deux étapes : changement de coordonnées et traitements à la demande.

A. Changement de coordonnées

Le programme reçoit en entrée un fichier de points (voir Annexe 1) au format RTKLIB (.pos) ou Excel (.csv) avec des coordonnées au format géocentrique. Afin que les fichiers de sorties soient exploitables, il est nécessaire de faire un changement de coordonnées de type géocentrique (X, Y, Z) vers des coordonnées géographiques (latitude, longitude, élévation) puis vers des coordonnées projetées (est, nord, élévation).

1. Changement de coordonnées géocentriques à géographiques

Les étapes de calcul présentées ci-dessous pour effectuer le changement d'un système (X, Y, Z) vers (λ, φ, h) sont tirées de Géométrie de l'ellipsoïde de Pierre Bosser [7].

Pour le passage direct, on pose :

$$r = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad \text{et} \quad \mu = \arctan \left[\frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \cdot \left[(1 - f) + \frac{a \cdot e^2}{r} \right] \right]$$

Avec pour notre ellipsoïde (GRS80) :

$$a = 6378137.0 \quad (\text{demi grand axe en mètres})$$

$$b = 6356752.314 \quad (\text{demi petit axe en mètres})$$

$$f = \frac{(a-b)}{a} \quad (\text{aplatissement})$$

$$e = \sqrt{\frac{(a^2 - b^2)}{a^2}} \quad (\text{excentricité})$$

Les coordonnées géographiques sont données par :

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

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

$$h = \sqrt{X^2 + Y^2} \cdot \cos \varphi + Z \sin \varphi - a \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}$$

2. Changement de coordonnées géographiques à projetées

Les formules nécessaires à ce changement de coordonnées ont été tirées du cours de géodésie principal de Thomas Touzé [8].

Dans le tableau suivant (Figure 7), on trouve les constantes utiles à la transformation :

Méridien origine	$\lambda_0 = 3^\circ \text{ E Greenwich}$
Parallèle origine	$\varphi_0 = 46^\circ 30' \text{ N}$
Constante est	$E_0 = 700000 \text{ m}$
Constante nord	$N_0 = 6600000 \text{ m}$
1 ^{er} parallèle automécoïque	$\varphi_1 = 44^\circ \text{ N}$
2 nd parallèle automécoïque	$\varphi_2 = 49^\circ \text{ N}$

Figure 7 : Constantes de définition de la projection Lambert 93 associé au système géodésique français RGF 93

On calcule des constantes secondaires puis on les applique dans les formules directes (Figure 8) pour obtenir les valeurs Est (E) et Nord (N).

Calcul des constantes secondaires :

$$\mathcal{L}_1 = \ln \left[\tan \left(\frac{\varphi_1}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \left(\frac{1 - e \sin \varphi_1}{1 + e \sin \varphi_1} \right)^{\frac{e}{2}} \right] \quad r_1 = \frac{a \cos \varphi_1}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi_1}}$$

$$\mathcal{L}_2 = \ln \left[\tan \left(\frac{\varphi_2}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \left(\frac{1 - e \sin \varphi_2}{1 + e \sin \varphi_2} \right)^{\frac{e}{2}} \right] \quad r_2 = \frac{a \cos \varphi_2}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi_2}}$$

$$\mathcal{L}_0 = \ln \left[\tan \left(\frac{\varphi_0}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \left(\frac{1 - e \sin \varphi_0}{1 + e \sin \varphi_0} \right)^{\frac{e}{2}} \right] \quad n = -\frac{\ln r_2 - \ln r_1}{\mathcal{L}_2 - \mathcal{L}_1}$$

$$R_1 = \frac{r_1}{n} \quad R_0 = R_1 \exp(-n(\mathcal{L}_0 - \mathcal{L}_1))$$

Formules directes :

$$\gamma = n(\lambda - \lambda_0)$$

$$\mathcal{L} = \ln \left[\tan \left(\frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \left(\frac{1 - e \sin \varphi}{1 + e \sin \varphi} \right)^{\frac{e}{2}} \right]$$

$$R = R_0 \exp(-n(\mathcal{L} - \mathcal{L}_0))$$

$$E = E_0 + R \sin \gamma$$

$$N = N_0 + R_0 - R \cos \gamma$$

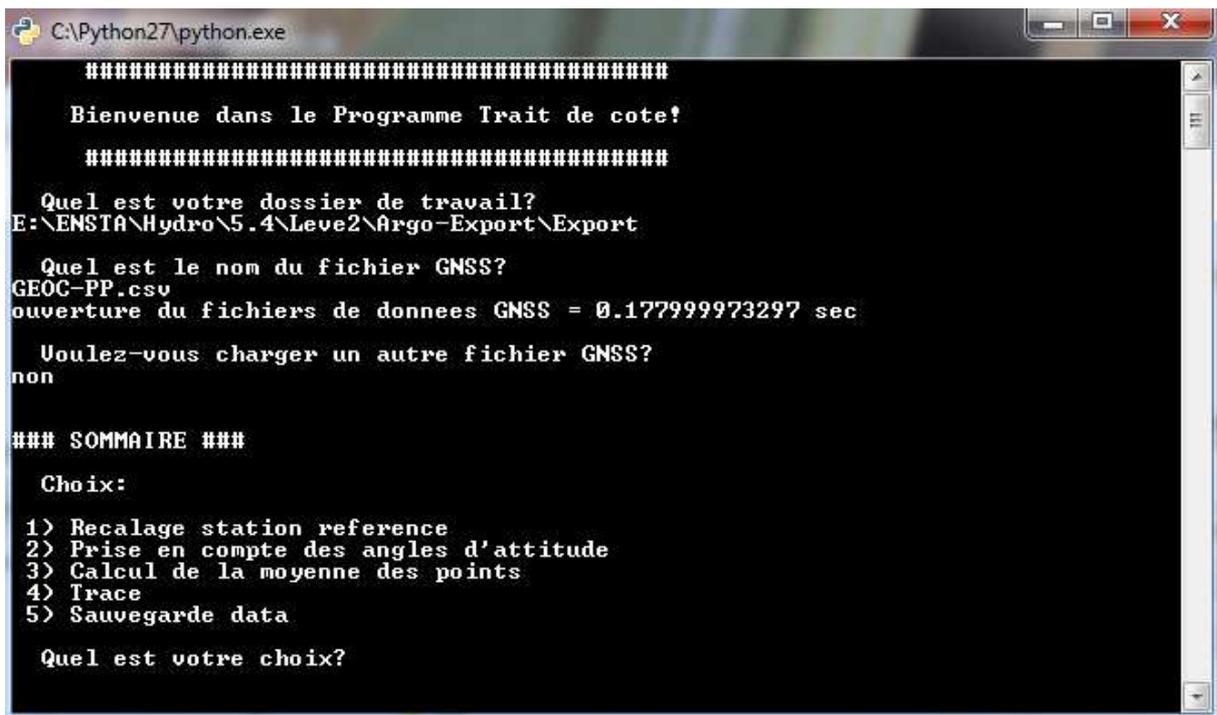
Figure 8 : Formulaire des calculs directs et inverses de la projection L 93 associée au RGF 93

On obtient alors des coordonnées projetées de la forme (E, N, h) .

B. Traitements à la demande

Cette partie du programme donne le choix à l'utilisateur entre différentes fonctionnalités (Figure 9):

- Recalage station référence : ce module permet de débiaiser un éventuel décalage en Est, Nord ou élévation.
- Prise en compte des angles d'attitude : cette fonction, quant à elle, permet de rentrer un fichier contenant les angles de cap, roulis et tangage et de les insérer dans une équation de navigation corrigeant les valeurs GNSS de l'Argo.
- Calcul de la moyenne des points : cette partie permet de moyennner la position d'une station de référence.
- Trace : dans ce module, on peut effectuer divers graphiques (comme une vue Est/Nord).
- Sauvegarde data : cette partie sert à sauvegarder des données transformées lors des fonctions précédentes.



```
C:\Python27\python.exe
#####
Bienvenue dans le Programme Trait de cote!
#####
Quel est votre dossier de travail?
E:\ENSTA\Hydro\5.4\Leve2\Argo-Export\Export
Quel est le nom du fichier GNSS?
GEOC-PP.csv
ouverture du fichiers de donnees GNSS = 0.177999973297 sec
Voulez-vous charger un autre fichier GNSS?
non
### SOMMAIRE ###
Choix:
1) Recalage station reference
2) Prise en compte des angles d'attitude
3) Calcul de la moyenne des points
4) Trace
5) Sauvegarde data
Quel est votre choix?
```

Figure 9 : Fenêtre de commande pour manipuler le programme avec la représentation des choix

Nous avons également réalisé un second programme automatique (qui devra intégrer le traitement à la demande du premier programme) sous python permettant d'interpoler les points obtenus après le traitement final. Cette interpolation est de type linéaire sur une grille calculée par le programme.

C. Résultats

1. Données post-traitées et interpolées

Sur la Figure 10, on peut voir les données Argo traitées et donc la trajectoire suivie pendant le levé.

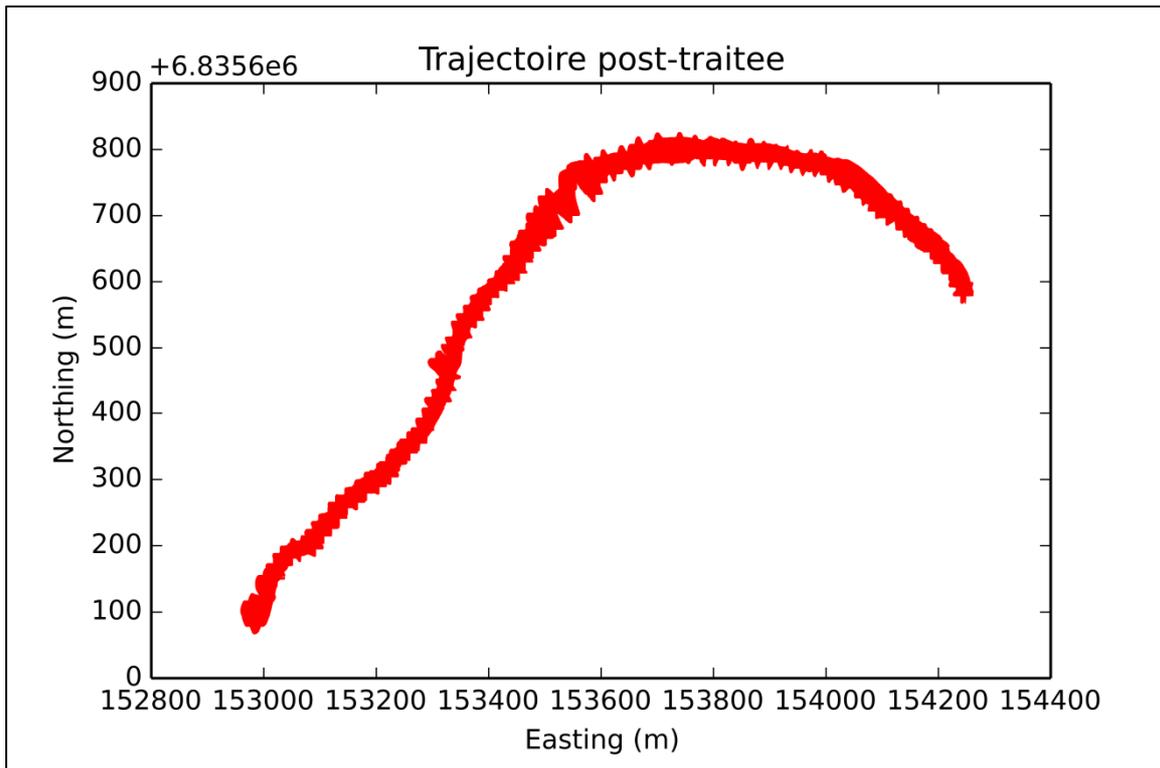


Figure 10 : Trajectoire suivie par l'Argo

Sur la Figure 11 est représentée la hauteur des points en fonction de la distance de chaque point par rapport à notre premier point. Ce graphe permet de visualiser l'amplitude des hauteurs. En rattachant le marégraphe, nous avons trouvé une hauteur de trait de côte à 1.46m par rapport à l'IGN69 soit **52.06m** par rapport à l'ellipsoïde de référence. On voit donc sur la Figure 11 que nous aurons suffisamment de points pour créer une interpolation intéressante. En Annexe 2 est présenté le même traitement pour les données mobiles. La comparaison entre les données mobiles et Argo, qui permet de s'assurer de la bonne prise en compte des angles d'attitude, est disponible en Annexe 3.

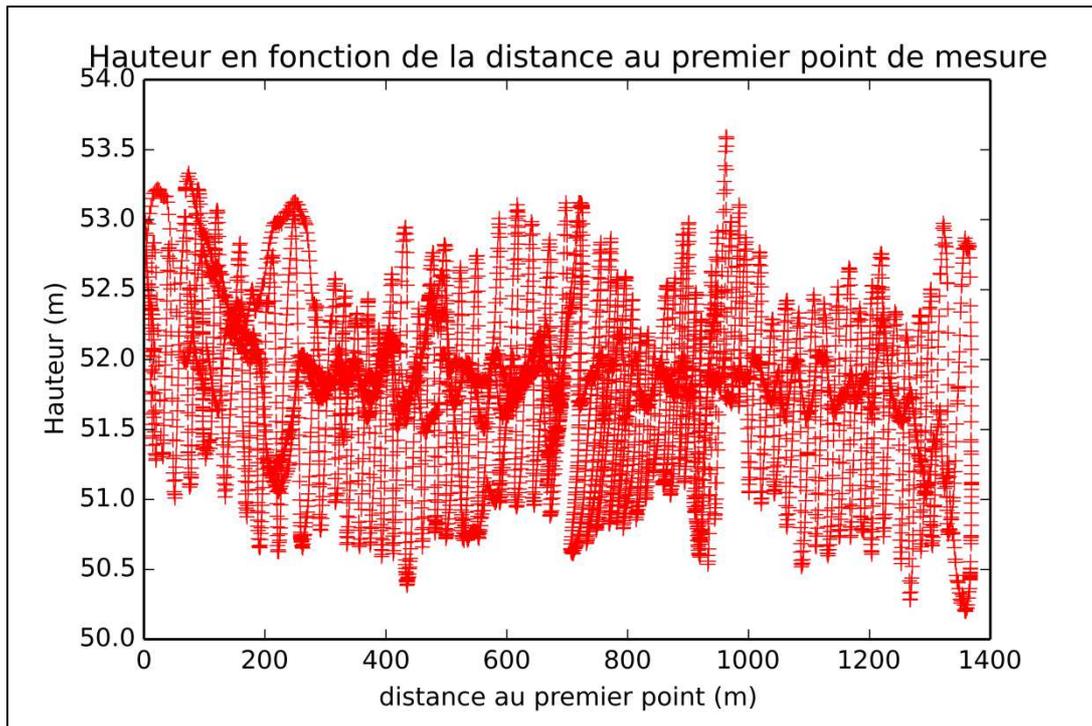


Figure 11 : Hauteur des points mesurés par rapport à l'ellipsoïde en fonction de la distance

La Figure 12 présente les points de trajectoire de l'Argo obtenus après post-traitement et l'interpolation de ces données pour la hauteur calculée comme étant celle de mi-marée.

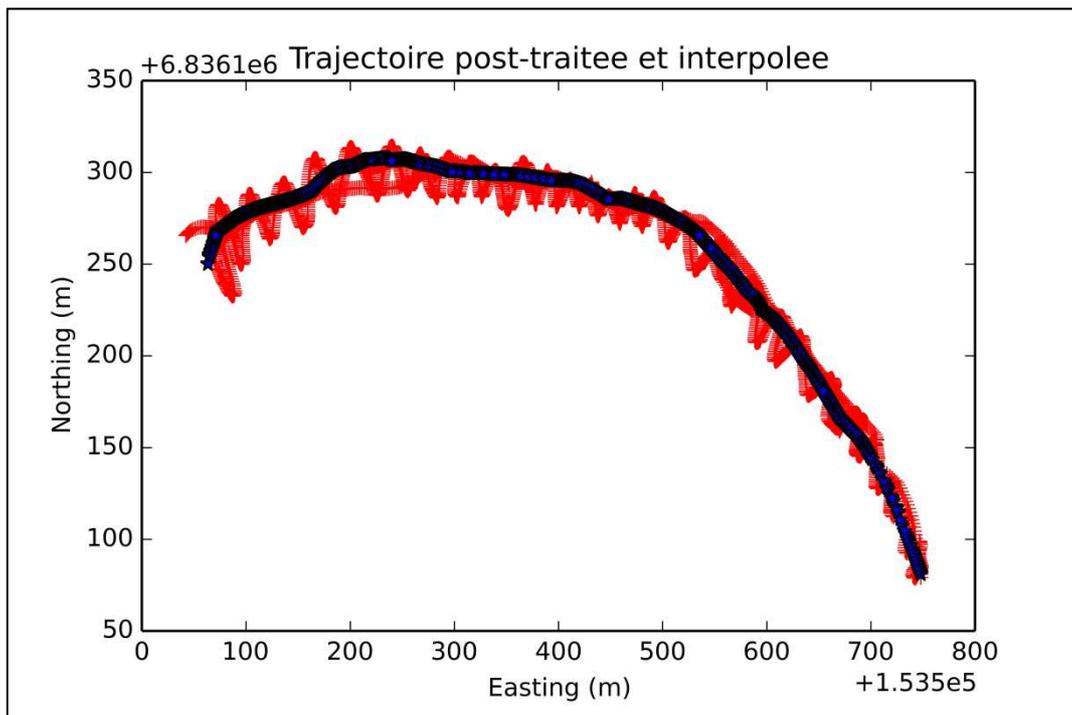


Figure 12 : Superposition du post-traitement et de l'interpolation

En rouge, on peut voir la trajectoire de l'Argo tandis qu'en bleu on visualise l'interpolation de la position des points pour une hauteur comprise entre 52.04 et 52.08 mètres (ce qui nous permet de densifier les valeurs de trait de côte obtenu en impactant peu notre incertitude).

2. Incertitude des données

Nous avons calculé l'incertitude altimétrique de nos mesures afin en faisant l'erreur quadratique pour tous les biais d'erreur. Le tableau suivant récapitule les sources d'imprécision altimétrique.

Description erreurs	erreur (m)	Sources
erreurs liées au calcul de marée		
précision nivellement	Négligé (0.0058)	rapport 2A
précision marégraphe	Négligé	rapport 2A
précision données pression	0.05	encadrants
erreurs de précision du levé		
erreur station de référence		
erreur lecture hauteur d'antenne	négligé	encadrants
erreur capteur en post-traitement statique long	0.05	Documentation capteur
erreur levé pédestre		
erreur bullage (pour une déviation max de 1°)	Négligé (0.0003)	Documentation capteurs
erreur enfoncement perche	0.02	estimation opérateurs
erreur capteur en post-traitement statique court	0,05	Documentation capteur
erreur levé Argo		
erreur données de navigation	0.05	encadrants
erreur capteur en post-traitement cinématique	0.03	Documentation capteur
erreurs de précision des calculs de post-traitement		
erreur RTKLib	0.05	encadrants
erreur Circé	0,05	programme Circé
erreur algorithme de traitement	0,05	programme Circé

Figure 13 : Tableau récapitulatif des incertitudes

En distinguant l'incertitude pour le levé manuel pédestre et celle pour le levé via Argo, on obtient les deux graphiques des Figure 14 et 15.

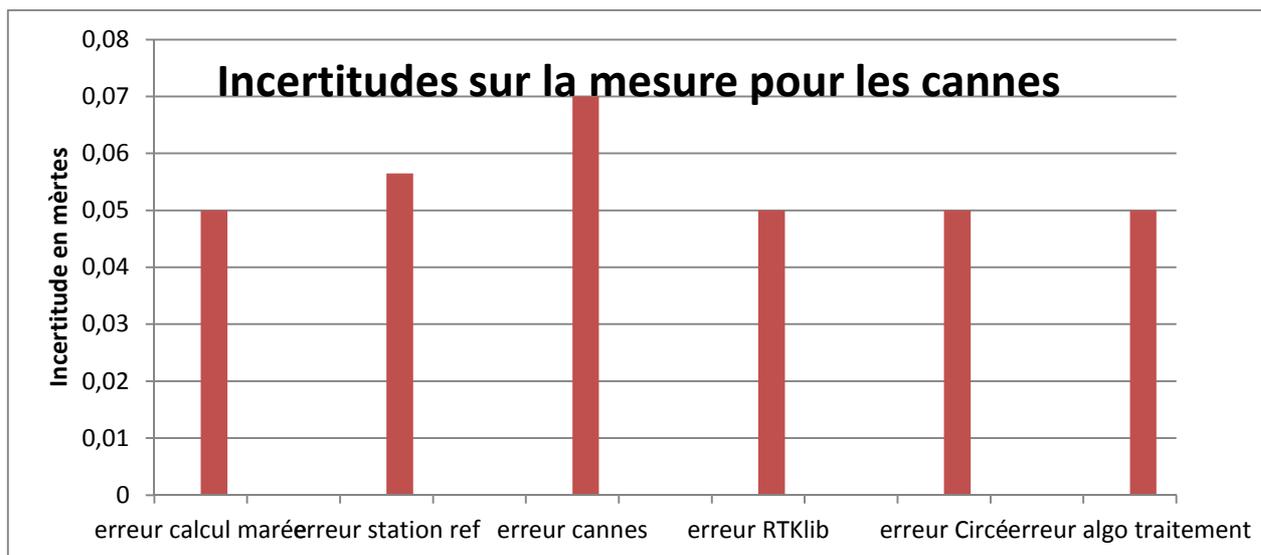


Figure 15 : Incertitudes liées aux cannes

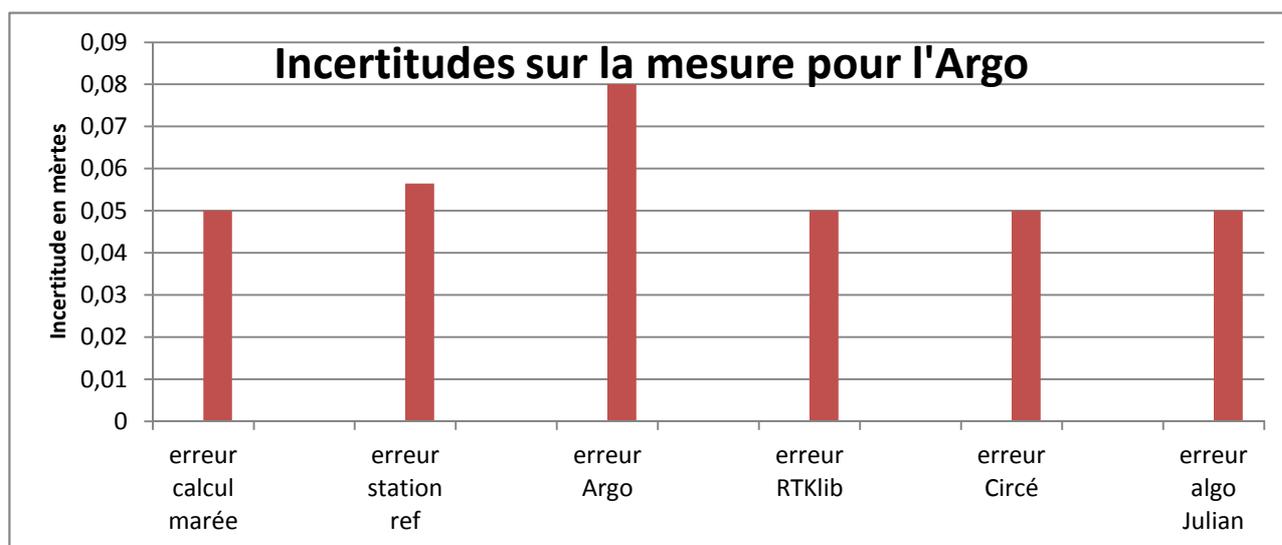


Figure 14 : Incertitude liées à l'Argo

Finalement, on trouve une **incertitude globale de 13,5 centimètres pour le levé manuel pédestre et une erreur de 14.0 centimètres** pour le levé par Argo.

Nous n'avons pas pris le temps d'estimer l'incertitude planimétrique. En effet, cette incertitude est moins grande que celle altimétrique pour les récepteurs GNSS. De plus, comme le sol de notre zone d'étude est relativement plat, les erreurs planimétriques seront moins répercutées que celles

altimétriques lors de l'estimation du trait de côte. On peut donc considérer l'erreur planimétrique comme inférieure à celle que nous avons calculée pour l'altimétrie.

3. Tracé des résultats

Enfin, on trace nos résultats sur une image géoréférencée afin de pouvoir visualiser leur position. Sur la figure 16 sont superposés les traits de côte issus de l'interpolation des données de nos deux méthodes de levé. Nous les avons tracés sur une image géo Tiff représentant la carte IGN au 1 :25000 de notre zone d'étude (les coordonnées sont en Lambert 93).

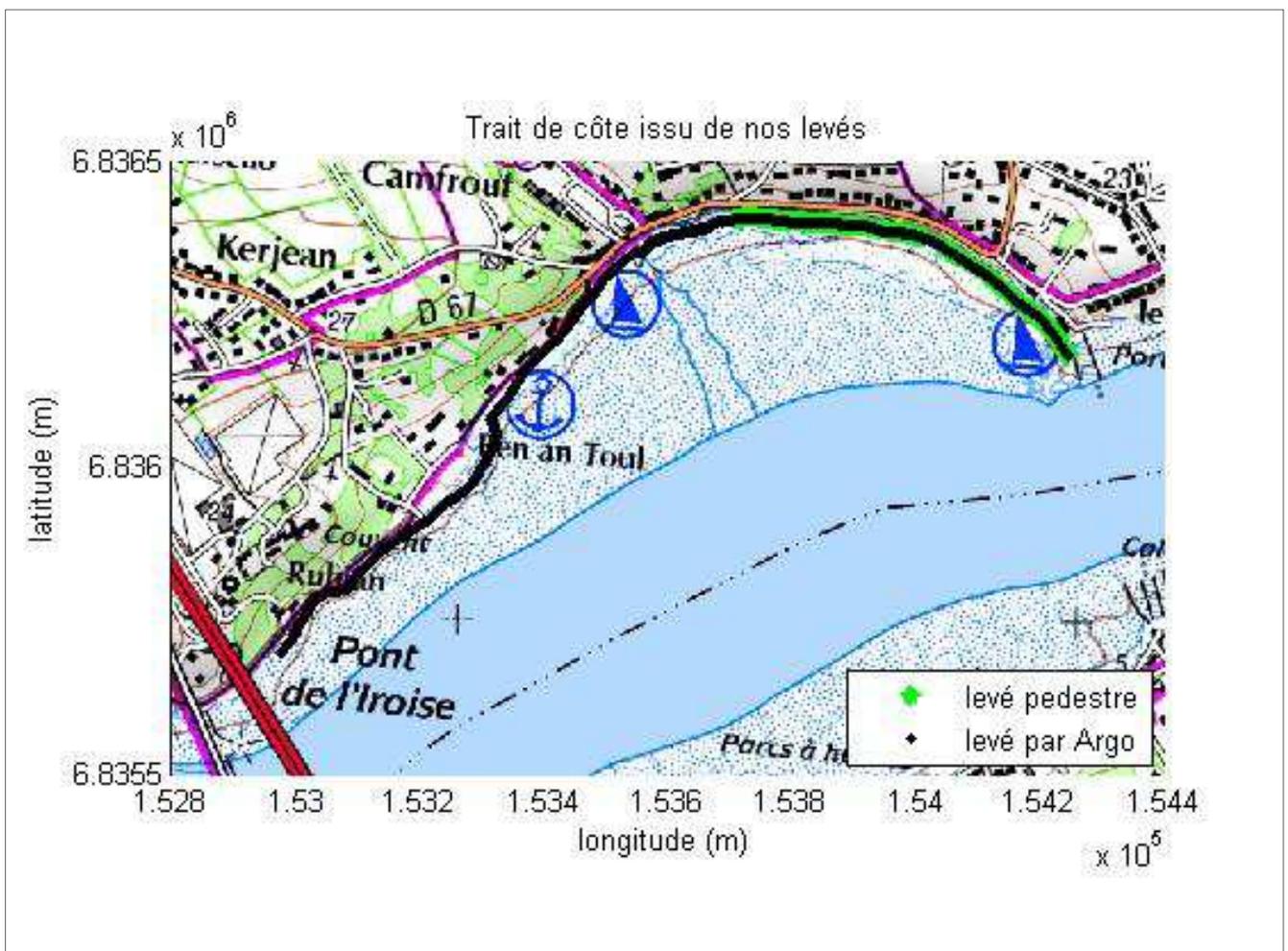


Figure 16 - Superposition sur une image géoréférencée du trait de côte issu de nos levés

On constate que les tracés se superposent bien et occupent sur la carte leur position attendue. Le trait de côte issu de notre levé semble être de bonne qualité.

V. Utilisation des données Litto3D

Comme expliqué auparavant dans les paragraphes §II-B et §II-D, la possibilité de modéliser le bassin altimétrique de notre zone d'étude nous plaisait particulièrement de part le fait de pouvoir tracer le trait de côte en fonction de n'importe quelle hauteur de marée. Nous n'avons pas pu utiliser le lidar de l'école lors de notre levé. Cependant nous nous sommes servis de la base de données Litto3D disponible sur le site du SHOM. Cette base de données fournit les mesures altimétriques des régions littorales, couvrant en même temps une partie de la côte et le début du fond marin. Ces données sont géoréférencées en coordonnées Lambert 93, et l'altitude est indiquée par rapport à l'IGN69.

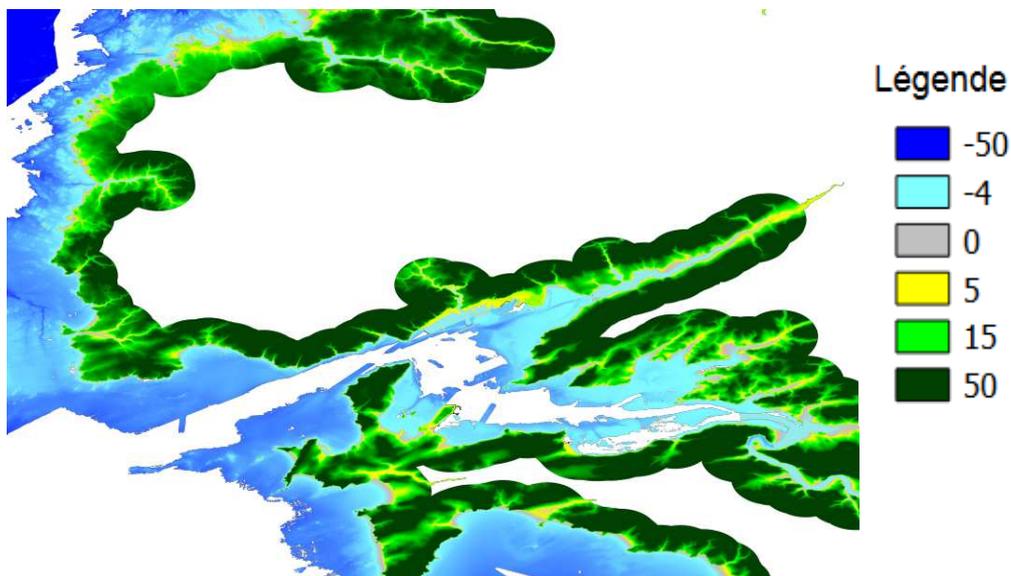


Figure 17 - Données altimétriques proposées par Litto3D pour le Finistère Nord

Nous avons donc téléchargé les données couvrant notre zone d'étude. Notre première tâche a été de faire le tri parmi les fichiers reçus. En effet l'envoi automatique du site data.shom.fr nous avait fait parvenir des données parcellées, pour une aire bien plus grande que celle étudiée, et pour lesquelles la détermination des coordonnées n'était pas forcément évidente.

Une fois les données altimétriques réduites à notre partie de l'Elorn, nous avons pu simuler différents traits de côte en détectant sur notre MNT l'altitude égale à une hauteur d'eau donnée. En récupérant les coordonnées de la limite définie, nous avons pu tracer le trait de côte sur une carte géoréférencée (scan IGN au format GEOTIFF), afin comme précédemment de visualiser notre trait de côte par rapport à des références connues.

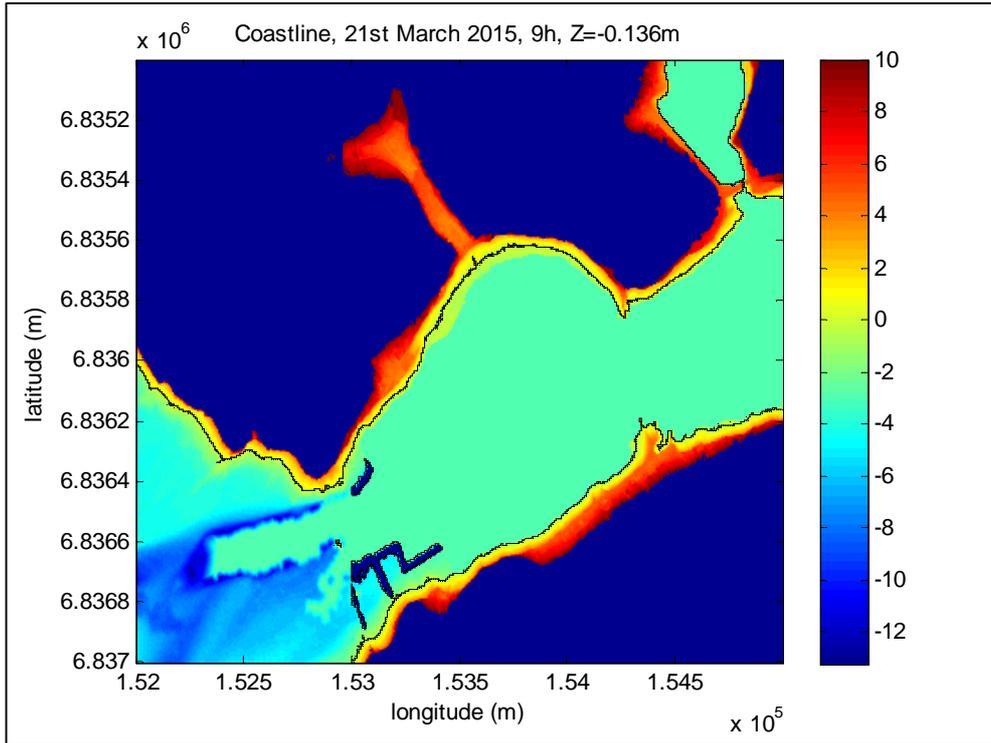


Figure 18 - détection du trait de côte sur le MNT

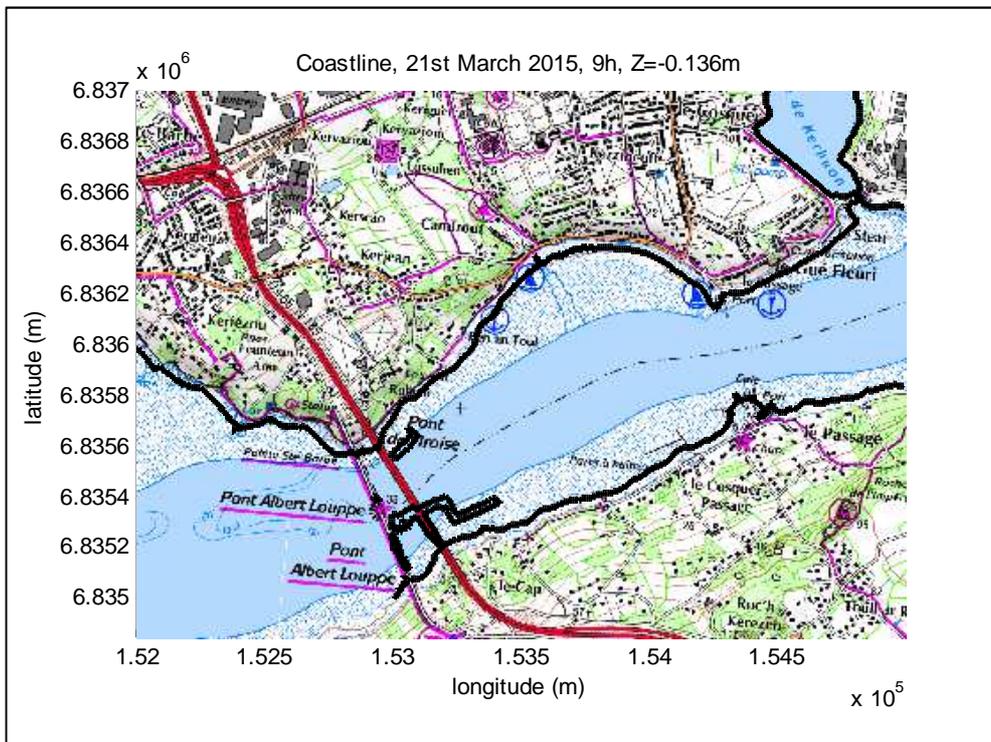


Figure 19 - Report du trait de côte sur une image géoréférencée

Bien entendu, nous avons aussi déterminé le trait de côte pour la hauteur définie précédemment à 1.46 mètre. La superposition de cette limite avec le trait de côte issu de nos relevés, affichée en figure 20 sur une carte géoréférencée, montre que les deux méthodes donnent un résultat similaire pour la détermination du trait de côte. Cela nous indique d'abord, si besoin en était, que notre relevé altimétrique au GNSS est assez précis puisqu'il est positionné au même endroit que les données altimétriques du SHOM. Cela nous indique aussi que ces deux méthodes produisent un trait de côte de qualité similaire, même si la précision altimétrique des données Litto3D est inférieure à celle de nos levés (imprécision maximale à 0,5 mètre) [10]. Ces méthodes peuvent donc être utilisées de manière complémentaire.

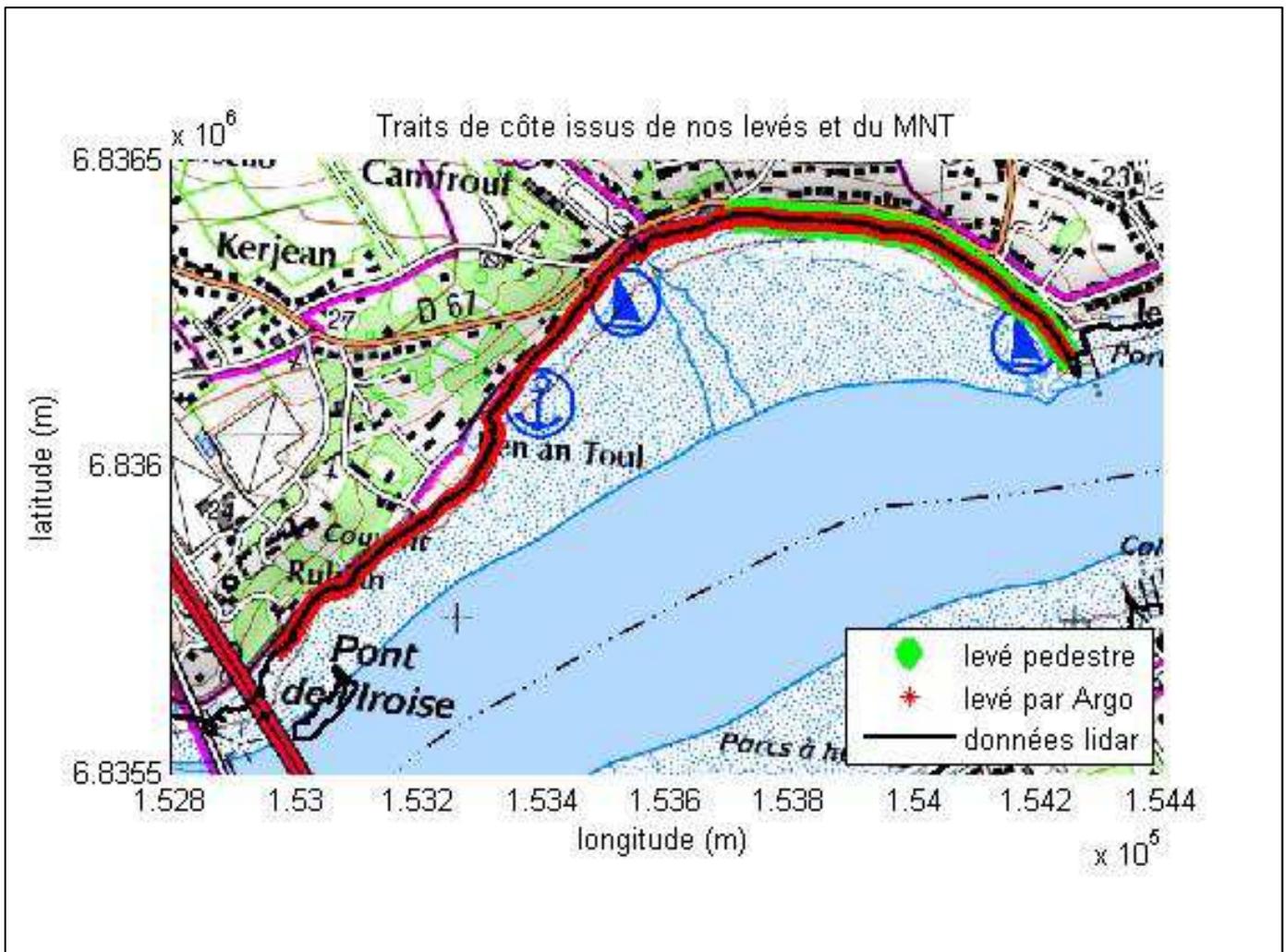


Figure 20 – Superposition sur une image géoréférencée des traits de côte issus des différentes méthodes

Nous avons enfin, grâce au MNT, simulé un trait de côte dans des conditions extrêmes. Nous avons considéré la hauteur d'eau maximale pour le 21 mars 2015, jour de marée exceptionnelle puisque le coefficient sera de 119 à Brest. A cette hauteur d'eau, nous avons rajouté un surcote simulant l'effet d'une tempête telle que la Bretagne en a connu au début de l'année 2014. Pour la tempête Dirk, une surcote de près d'un mètre avait été mesurée à Brest, sous l'effet de la dépression, du vent violent et des vagues [11]. Nous avons donc tracé le trait de côte au maximum de la marée du 21 mars, en

rajoutant une hauteur d'eau de un mètre. La figure 21 montre ce trait de côte tracé sur une carte géoréférencée.

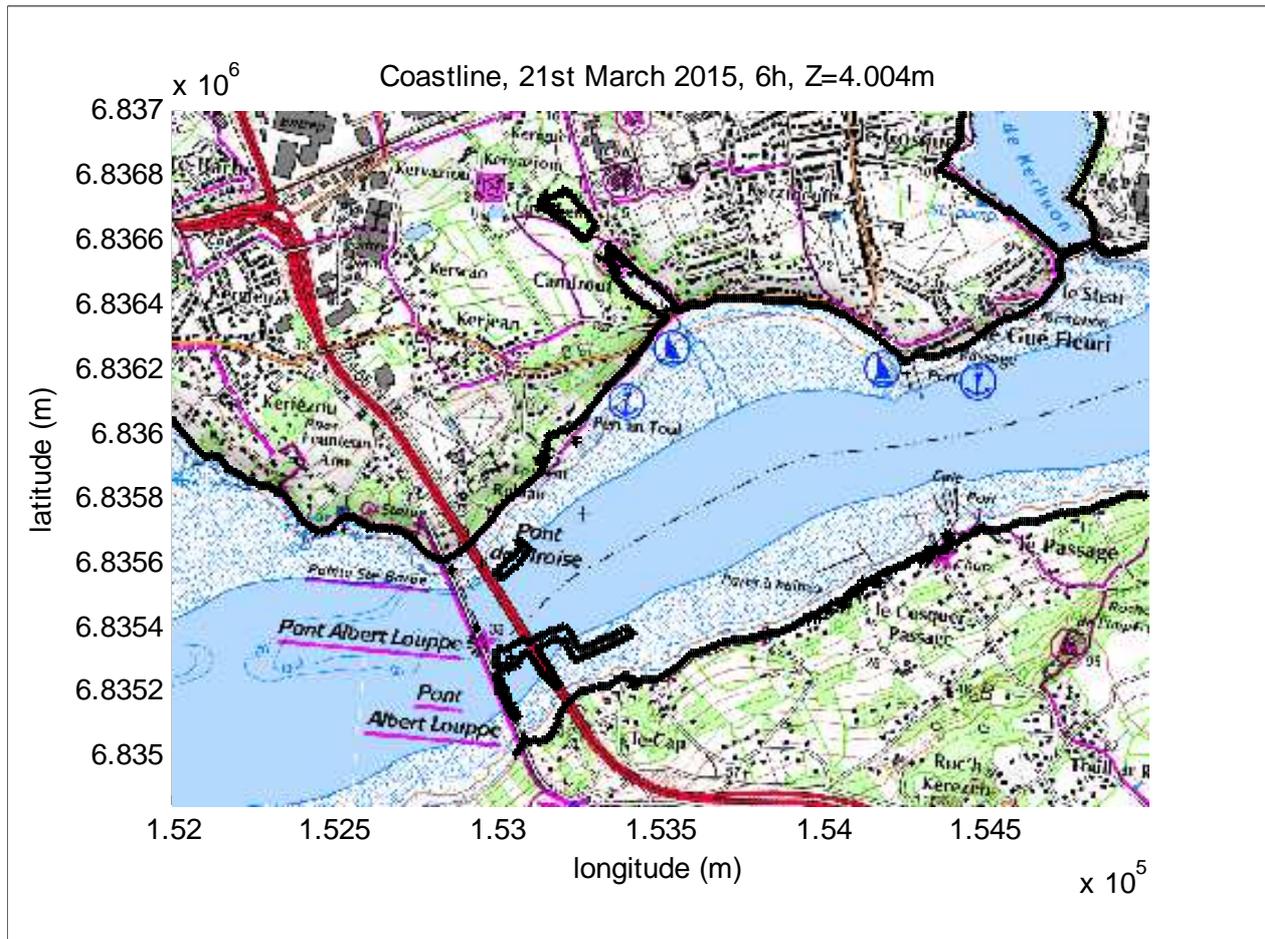


Figure 21 - Simulation du trait de côte en cas de tempête

Dans ces conditions, le trait de côte atteindrait largement la limite des premières habitations. La mer s'engouffrerait au nord de la zone dans un parking à basse altitude, et au sud recouvrirait la jetée et la route. Bien sûr, de telles conditions sont exceptionnelles et hypothétiques. Mais avec le MNT issu de données lidar, les prévisions de marée et les prévisions météorologiques, il est possible de simuler à l'avance un trait de côte pour une hauteur donnée, et permettent entre autre de déterminer si des risques sont à craindre pour les habitants du littoral.

Nous n'avons pas pu développer cette méthode jusqu'au bout. Il existe notamment pour le tracé du trait de côte des artefacts dans l'Elorn, sûrement dû aux deux ponts de la zone. On trouve aussi parfois en fonction de la hauteur recherchée, des limites de trait de côte isolées dans les terres. Si ces points sont bien à la même hauteur ellipsoïdale, ils ne font pas partie pour autant du trait de côte. N'ayant découvert que tardivement la facilité d'accès à la base de données Litto3D, nous n'avons pas eu le temps de corriger ces défauts.

Cependant nous avons pu discerner l'intérêt qu'apportait une telle modélisation du trait de côte. En effet, au lieu de détecter les coordonnées d'une ligne altimétrique issue de mesures de marée, nous pouvons ici tracer cette ligne indépendamment des mesures, en fonction de la caractéristique marine que l'on veut observer.

Conclusion

En conclusion de ce projet, différents points sont à mettre en exergue. Tout d'abord, La définition du trait de côte est extrêmement fluctuante de part la variabilité du niveau de la mer. La pertinence de la définition du trait de côte que nous avons retenue (la limite entre la terre et l'eau pour le niveau moyen) dépend de l'utilisation que l'on veut faire du tracé. Si elle n'est pas utile à la délimitation de zone de sécurité pour les installations anthropiques, elle peut être utile pour la modélisation des effets physiques marins.

Les levés que nous avons effectués sur la plage du Relecq-Kerhuon se sont révélés être assez chronophages. On peut se questionner sur le bien-fondé des levés Argo et pédestres. Si la précision désirée n'est pas trop élevée, les levés Lidar que nous nous sommes procurés peuvent être une alternative suffisante et bien utile. L'incertitude des données est, certes, plus élevée mais le temps de travail demandé est beaucoup plus court.

De plus, avec les données Lidar récupérées et la modélisation du bassin de l'Elorn, d'autres applications sont envisageables. En effet, cette capacité de définir un trait de côte en fonction de n'importe quelle hauteur d'eau permet de mener de nombreuses études qualitatives, adaptées aux demandes et attentes de chacun. Car il est clair que le scientifique, le pêcheur ou l'habitant du littoral n'appréhenderont pas le trait de côte de la même manière. Aussi peut-être cette limite est-elle vouée à ne pas avoir de définition générale ; en revanche elle peut se préciser finement au cas par cas, lorsque sont explicités les conditions et les besoins du tracé du trait de côte.

Il est également important de souligner les bénéfices que nous retirons de ce travail. La première phase du projet pendant laquelle nous avons choisi la façon dont nous mènerions notre travail a été un exercice fort intéressant. En effet, cela nous a obligé à prendre du recul sur le problème et à nous poser les bonnes questions. Cette capacité à élaborer un protocole, une méthodologie, de travail n'est pas nécessairement innée mais indispensable pour des futurs ingénieurs.

Les levés terrains que nous avons effectués ont été également formateurs. Toutes les étapes ont leur importance, de la préparation au traitement de données en passant par l'acquisition. Dans un contexte professionnel, la moindre négligence peut se répercuter sur toute l'entreprise. Prendre conscience du caractère primordial de chaque étape est donc nécessaire.

Enfin, cette expérience de travail en équipe a été fructueuse. Se répartir les tâches, se tenir au courant des avancées de chacun sont les conditions essentielles au bon déroulement de la mission. Ainsi, le travail peut être beaucoup plus efficace, grâce à l'entraide et à la motivation résultant de l'effet de groupe.

Bibliographie

- [1] : Organisation Hydrographique Internationale. Dictionnaire hydrographique. 1998, 281p. Disponible sur : http://www.iho.int/iho_pubs/standard/S-32/S-32-FR.pdf [En ligne] (Consulté le 05/12/2014)
- [2] : SHOM. Communiqués. Disponible sur : <http://www.shom.fr/le-shom/actualites/les-communiqués/actualite-detaillee/article/le-trait-de-cote-telechargeable-sur-le-site-du-shom/> [En ligne] (Consulté le 05/12/2014)
- [3] : Takasu,T. 10/06/2011 *RTKLIB ver. 2.4.1 Manual*. [Document électronique] Disponible sur : www.rtklib.com/prog/manual_2.4.1.pdf [En ligne] (Consulté le 20/11/2014)
- [4] : BOSSER, Pierre, 23 juillet 2014, *Apprendre le positionnement par GNSS avec le logiciel RTKlib*. [Document électronique] (Consulté le 20/11/2014)
- [6] : DIAZ, Mélanie et al. (2014) *Rattachement altimétrique d'un marégraphe*. Rapport de projet. Hydrographie. Brest : ENSTA Bretagne [Document électronique] (Consulté le 10/12/2014)
- [7] : IGN, Mai 2006. *Manuel d'utilisation du logiciel Circé France* Disponible sur : arpf.jimdo.com/app/download/2837233611/circe2000.pdf?t=1258395809 [En ligne] (Consulté le 09/01/2015)
- [8] : TOUZE, Thomas et al. 27 janvier 2014. *Géodésie appliquée*. Notes de cours -Cycle Ingénieur de l'ENSTA Bretagne. (Consulté en janvier 2015)
- [9] : Bosser, Pierre, Année scolaire 2012-2013. *Géométrie de l'ellipsoïde*. Notes de cours -Cycle Ingénieur de l'ENSG. Disponible sur : <http://fad.ensg.eu/moodle/course/category.php?id=63> [En ligne] (Consulté en janvier 2015)
- [10] : SHOM, IGN, janvier 2015. Litto3D, *Descriptif du Contenu*. [Document électronique] (Consulté le 25/02/2015)
- [11] : DAUBORD, Camille, 2014. *Caractérisation de 7 événements de tempête de l'automne-hiver 2013-2014 à partir des données disponibles au SHOM*. Rapport du SHOM. Disponible sur : http://www.shom.fr/fileadmin/data-www/04-LES_ACTIVITES/03-ACTIVITES_SCIENTIFIQUES/06-LES_RAPPORTS_D_ETUDE/RAPPORT-SHOM-TEMPETES-OFFICIEL_VF.pdf [En ligne] (Consulté en février 2015)

Table des figures

Figure 1: Zone de levé	7
Figure 2: Localisation de la base RTK.....	9
Figure 3 : Principe du rattachement d'un marégraphe à un point de référence	12
Figure 4: Marée au niveau du passage rattachée à l'IGN69.....	13
Figure 5: Matériel pour levés pédestres	14
Figure 6 : Profil utilisé pour effectuer le levé Argo	15
Figure 7 : Constantes de définition de la projection Lambert 93 associé au système géodésique français RGF 93.....	17
Figure 8 : Formulaire des calculs directs et inverses de la projection L 93 associée au RGF 93	17
Figure 9 : Fenêtre de commande pour manipuler le programme avec la représentation des choix ...	18
Figure 10 : Trajectoire suivie par l'Argo.....	19
Figure 11 : Hauteur des points mesurés par rapport à l'ellipsoïde en fonction de la distance	20
Figure 12 : Superposition du post-traitement et de l'interpolation.....	20
Figure 13 : Tableau récapitulatif des incertitudes.....	21
Figure 14 : Incertitude liées à l'Argo.....	22
Figure 15 : Incertitudes liées aux cannes	22
Figure 16 - Superposition sur une image géoréférencée du trait de côte issu de nos levés	23
Figure 17 - Données altimétriques proposées par Litoo3D pour le Finistère Nord	24
Figure 18 - détection du trait de côte sur le MNT.....	25
Figure 19 - Report du trait de côte sur une image géoréférencée.....	25
Figure 20 – Superposition sur une image géoréférencée des traits de côte issus des différentes méthodes.....	26
Figure 21 - Simulation du trait de côte en cas de tempête.....	27
Figure 23: fichier Excel exploitable par le programme.....	31
Figure 22: fichier RTKLIB exploitable par le programme.....	31
Figure 24: Trajectoire suivie par les cannes	32
Figure 25: Hauteur des points mesurés par rapport à l'ellipsoïde en fonction de la distance	32
Figure 26: comparaison des points de l'Argo et des mobiles afin de s'assurer du bon traitement des données	33

Annexe 1 : Type de fichier supporté par le programme

```

1 % program : RTKPOST vgg.2.4.1
2 % inp file : F:\ENSTA\Hydro\5.4\BREST\Dimanche 1819 0\64269641.14o
3 % inp file : F:\ENSTA\Hydro\5.4\BREST\Dimanche 1819 0\brst3200.14o
4 % inp file : F:\ENSTA\Hydro\5.4\BREST\Dimanche 1819 0\brdc3200 (1).14n
5 % obs start : 2014/11/16 13:42:30.0 GPST (week1819 49350.0s)
6 % obs end : 2014/11/17 00:00:00.0 GPST (week1819 86400.0s)
7 % pos mode : kinematic
8 % freqs : L1+L2
9 % solution : forward
10 % elev mask : 10.0 deg
11 % srx mask : 0.0 dBHz
12 % dynamics : off
13 % tidescorr : off
14 % ionos opt : iono-free
15 % tropo opt : saastamoinen
16 % ephemeris : broadcast
17 % amb res : fix and hold
18 % val thres : 3.0
19 % antenna :
20 % antenna2 : TRM57971.00 NONE ( 0.0000 0.0000 2.0431)
21 % ref pos : 4231162.7890 -332746.9190 4745130.6870
22 %
23 % (x/y/z-ecef=WGS84,Q=1:fix,2:float,3:sbas,4:dgps,5:single,6:ppp,ns=# of satellites)
24 % GPST x-ecef(m) y-ecef(m) z-ecef(m) Q ns sdx(m) sdy(m) sdz(m) sdx(m) sdy(m) sdz(m) age(s) ratio
25 2014/11/16 13:42:30.000 4230469.2642 -324200.5425 4746328.0248 1 5 0.0215 0.0089 0.0115 -0.0117 -0.0054 0.0133 0.00 3.6
26 2014/11/16 13:42:35.000 4230468.4144 -324200.7101 4746327.8843 2 6 1.1044 0.4190 0.7779 -0.4419 -0.2077 0.8055 5.00 1.2
27 2014/11/16 13:42:40.000 4230468.4140 -324200.7177 4746327.8829 2 6 0.8618 0.3200 0.6337 -0.3120 -0.1476 0.6471 10.00 1.2
28 2014/11/16 13:42:45.000 4230468.4669 -324200.7373 4746327.9333 2 7 0.7158 0.2600 0.5341 -0.2282 -0.0726 0.5391 15.00 1.3
29 2014/11/16 13:42:50.000 4230468.2053 -324200.6844 4746327.7927 2 8 0.6035 0.2227 0.4616 -0.1669 0.0578 0.4555 20.00 1.0
30 2014/11/16 13:42:55.000 4230466.4722 -324200.4168 4746326.7981 2 8 0.5397 0.1994 0.4165 -0.1363 0.0730 0.4079 25.00 1.5
31 2014/11/16 13:43:00.000 4230467.3771 -324200.3522 4746327.8220 2 8 0.4871 0.1810 0.3769 -0.1160 0.0737 0.3678 0.00 2.8
32 2014/11/16 13:43:05.000 4230466.9287 -324200.1603 4746327.8351 2 8 0.4505 0.1676 0.3496 -0.1013 0.0742 0.3402 5.00 1.7
33 2014/11/16 13:43:10.000 4230466.5447 -324200.0392 4746327.8616 2 8 0.4220 0.1570 0.3284 -0.0900 0.0739 0.3188 10.00 1.4
34 2014/11/16 13:43:15.000 4230466.1732 -324199.9630 4746327.8427 2 8 0.3987 0.1483 0.3112 -0.0809 0.0731 0.3015 15.00 1.3
35 2014/11/16 13:43:20.000 4230466.1175 -324199.9185 4746327.9429 2 8 0.3793 0.1412 0.2968 -0.0732 0.0724 0.2870 20.00 1.4
36 2014/11/16 13:43:25.000 4230466.1232 -324199.8903 4746328.0115 2 8 0.3629 0.1353 0.2848 -0.0663 0.0719 0.2748 25.00 1.6
37 2014/11/16 13:43:30.000 4230469.1201 -324200.2816 4746329.8327 2 8 0.3408 0.1278 0.2652 -0.0629 0.0654 0.2571 0.00 1.2
38 2014/11/16 13:43:35.000 4230468.8299 -324200.2623 4746329.5794 2 8 0.3266 0.1227 0.2537 -0.0585 0.0633 0.2462 5.00 1.1
39 2014/11/16 13:43:40.000 4230468.6131 -324200.2694 4746329.3680 2 8 0.3153 0.1185 0.2451 -0.0546 0.0622 0.2378 10.00 1.2

```

Figure 22: fichier RTKLIB exploitable par le programme

```

PLAGE0000,12/12/2014 11:11:23,Oui,Oui,GPS,Statique,Phase : toutes fixes,L1/E1+L2,4230511.6563,-324293.1363,4746270.2813,0.0020,0.0028,0.0034
PLAGE0001,12/12/2014 11:11:38,Oui,Oui,GPS,Statique,Phase : toutes fixes,L1/E1+L2,4230511.7706,-324293.5606,4746270.1183,0.0014,0.0019,0.0024
PLAGE0002,12/12/2014 11:11:52,Oui,Oui,GPS,Statique,Phase : toutes fixes,L1/E1+L2,4230511.4692,-324292.9189,4746270.5573,0.0019,0.0026,0.0032
PLAGE0003,12/12/2014 11:12:11,Oui,Oui,GPS,Statique,Phase : toutes fixes,L1/E1+L2,4230508.9897,-324296.0731,4746272.4567,0.0016,0.0022,0.0027
PLAGE0004,12/12/2014 11:12:24,Oui,Oui,GPS,Statique,Phase : toutes fixes,L1/E1+L2,4230508.7994,-324295.6758,4746272.7470,0.0012,0.0017,0.0021
PLAGE0005,12/12/2014 11:12:42,Oui,Oui,GPS,Statique,Phase : toutes fixes,L1/E1+L2,4230509.1964,-324296.7280,4746272.1248,0.0012,0.0017,0.0020
PLAGE0006,12/12/2014 11:13:09,Oui,Oui,GPS,Statique,Phase : toutes fixes,L1/E1+L2,4230506.7107,-324298.0267,4746274.3628,0.0036,0.0050,0.0062
PLAGE0007,12/12/2014 11:13:24,Oui,Oui,GPS,Statique,Phase : toutes fixes,L1/E1+L2,4230506.4379,-324297.2563,4746274.8083,0.0016,0.0023,0.0028
PLAGE0008,12/12/2014 11:13:36,Oui,Oui,GPS,Statique,Phase : toutes fixes,L1/E1+L2,4230507.0989,-324298.9827,4746273.7924,0.0038,0.0056,0.0067
PLAGE0009,12/12/2014 11:14:00,Oui,Oui,GPS,Statique,Phase : toutes fixes,L1/E1+L2,4230504.5545,-324300.1597,4746276.1214,0.0017,0.0025,0.0030
PLAGE0010,12/12/2014 11:14:15,Oui,Oui,GPS,Statique,Phase : toutes fixes,L1/E1+L2,4230504.2564,-324299.5020,4746276.5518,0.0013,0.0020,0.0024
PLAGE0011,12/12/2014 11:14:29,Oui,Oui,GPS,Statique,Phase : toutes fixes,L1/E1+L2,4230504.8057,-324301.1483,4746275.6576,0.0016,0.0024,0.0028
PLAGE0012,12/12/2014 11:15:00,Oui,Oui,GPS,Statique,Phase : toutes fixes,L1/E1+L2,4230502.2637,-324302.1357,4746277.9992,0.0016,0.0023,0.0028
PLAGE0013,12/12/2014 11:15:16,Oui,Oui,GPS,Statique,Phase : toutes fixes,L1/E1+L2,4230501.7971,-324301.2407,4746278.6905,0.0016,0.0023,0.0028
PLAGE0014,12/12/2014 11:15:35,Oui,Oui,GPS,Statique,Phase : toutes fixes,L1/E1+L2,4230502.6043,-324303.0978,4746277.4959,0.0023,0.0034,0.0041
PLAGE0015,12/12/2014 11:15:53,Oui,Oui,GPS,Statique,Phase : toutes fixes,L1/E1+L2,4230500.7004,-324303.8074,4746279.2794,0.0023,0.0034,0.0040
PLAGE0016,12/12/2014 11:16:11,Oui,Oui,GPS,Statique,Phase : toutes fixes,L1/E1+L2,4230500.2293,-324302.9003,4746279.9166,0.0015,0.0022,0.0027
PLAGE0017,12/12/2014 11:16:28,Oui,Oui,GPS,Statique,Phase : toutes fixes,L1/E1+L2,4230501.1982,-324304.9125,4746278.5364,0.0021,0.0031,0.0037
PLAGE0018,12/12/2014 11:16:48,Oui,Oui,GPS,Statique,Phase : toutes fixes,L1/E1+L2,4230498.8717,-324305.5644,4746280.7525,0.0021,0.0032,0.0038
PLAGE0019,12/12/2014 11:17:04,Oui,Oui,GPS,Statique,Phase : toutes fixes,L1/E1+L2,4230498.3013,-324304.3790,4746281.5687,0.0014,0.0020,0.0024

```

Figure 23: fichier Excel exploitable par le programme

Annexe 2 : Traitement des données mobiles

Cette annexe présente le même type de traitement que les données présentées dans la partie 4 mais pour les données relevé grâce aux perches GNSS.

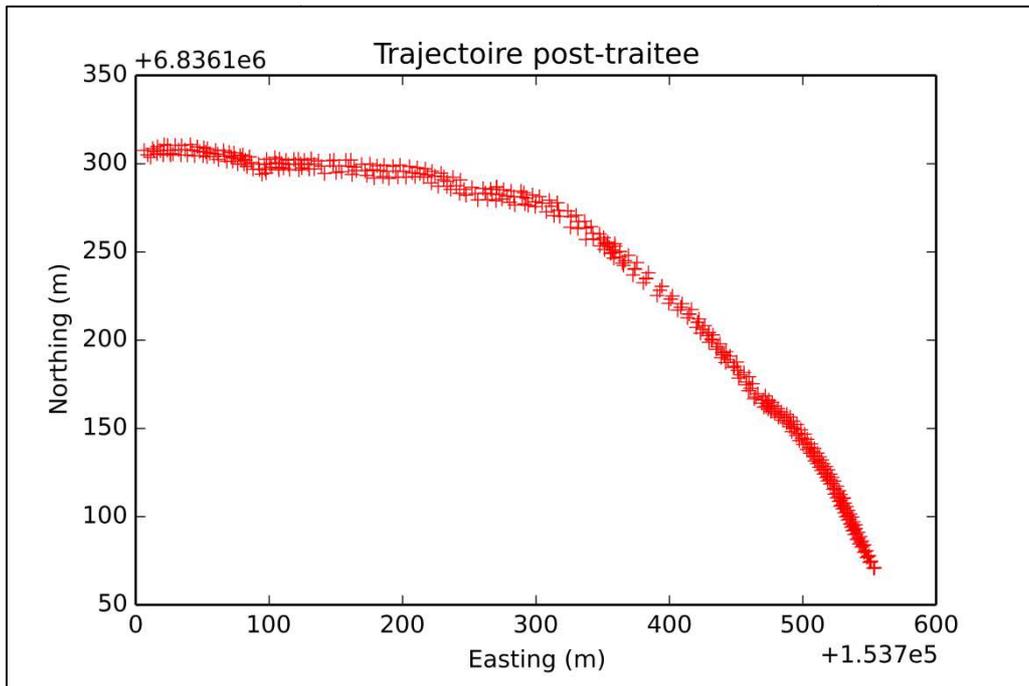


Figure 24: Trajectoire suivie par les cannes

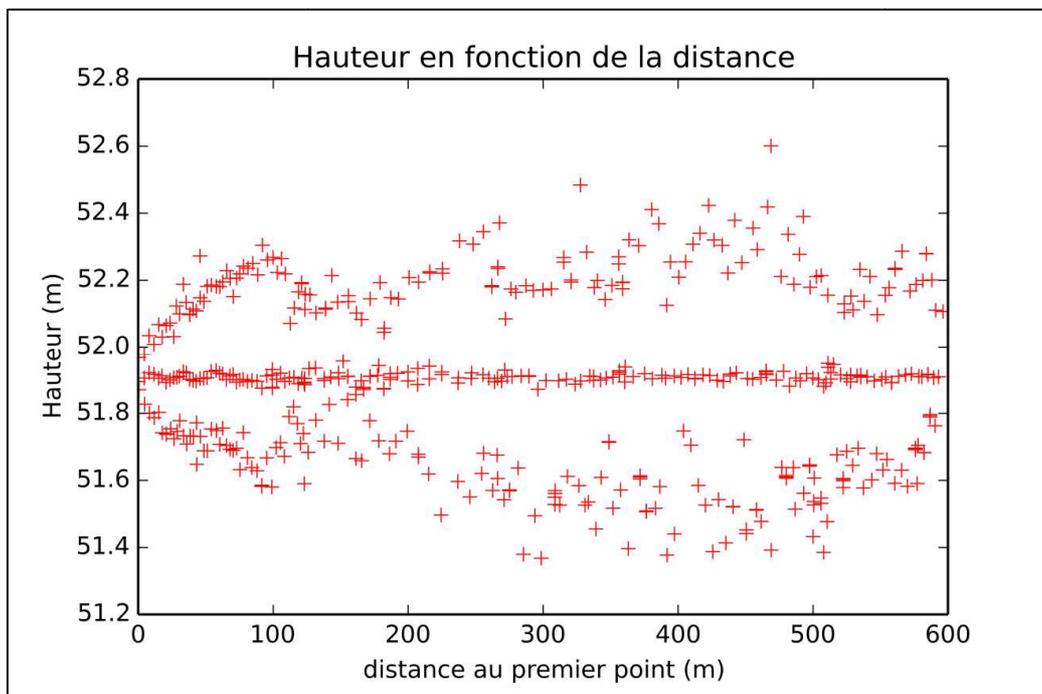


Figure 25: Hauteur des points mesurés par rapport à l'ellipsoïde en fonction de la distance

Annexe 3 : Comparaison des données Argo et mobiles GNSS

Pour cette comparaison nous avons regardé sur une dizaine de points la cohérence de la hauteur mesurée entre l'Argo et les mobiles. Cette comparaison s'est faite sous Matlab.

Cette différence est de l'ordre du centimètre pour des valeurs proches en Est et en Nord (moins de 5 cm de distance entre les points étudiés), tous les points subissant le même débiaisage ce contrôle simple suffit, si nous voulions aller plus loin nous pourrions calculer l'interdistance des points et calculer la différence de hauteur sur un ensemble de point don l'interdistance serait inférieure à un seuil raisonnable (5 cm par exemple).

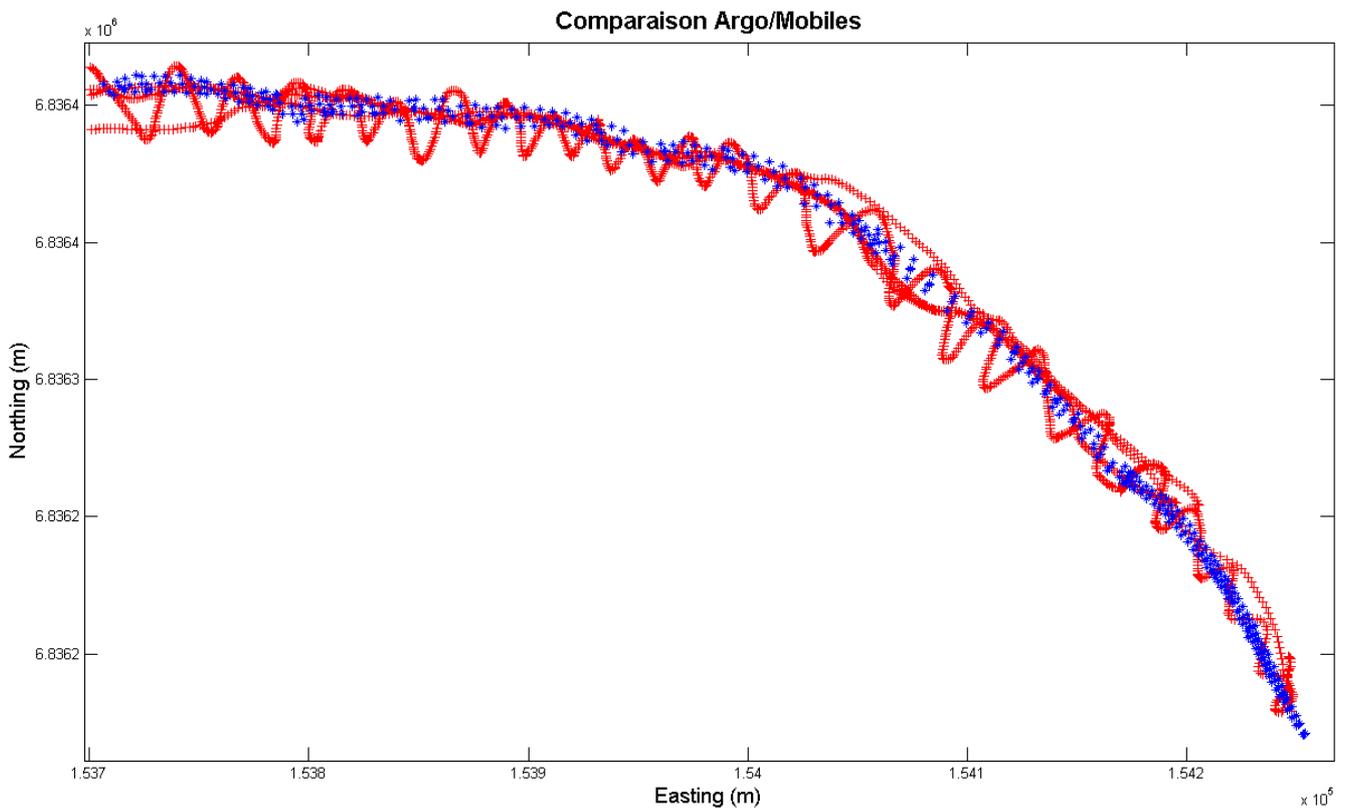


Figure 26: comparaison des points de l'Argo et des mobiles afin de s'assurer du bon traitement des données