

Analyse du bilan d'erreur appliquée aux systèmes de levés hydrographiques de surface et sous-marin

■ Geraud NAANKEU WATI - Jean-Baptiste GELDOLF - Pierre BOSSER

Afin d'installer les infrastructures sous-marines (pipelines, puits sous-marins, etc.) nécessaires au développement des ressources en hydrocarbures, Total fait régulièrement appel aux compagnies hydrographiques. Ces entreprises effectuent principalement des campagnes d'acquisition de données (hydrographiques et géophysiques) à partir de deux types de systèmes : les systèmes de levé de surface et sous-marin. Durant la phase de préparation de ces campagnes, une estimation du bilan des erreurs du système d'acquisition de données est faite afin d'identifier tous les éléments qui affectent la qualité des données acquises, et de vérifier si l'incertitude sur la position de la sonde bathymétrique répond aux normes proposées par l'organisation hydrographique internationale (OHI) et Total. Cet article donne une analyse approfondie sur l'estimation du bilan d'erreur des systèmes de levé de surface et sous-marin tout en décrivant brièvement l'état de l'art de ces systèmes et en proposant de nouveaux algorithmes d'estimation du budget d'erreur appliqué, aux systèmes de levé de surface et sous-marin. Ces algorithmes se basent sur des modèles fonctionnels de ces systèmes, en prenant particulièrement en compte les termes de covariance entre les erreurs, les angles de désalignement entre la centrale inertielle et le sondeur et la latence entre les capteurs.

■ MOTS-CLÉS

Bilan d'erreur, incertitude, systèmes de levé de surface et sous-marin, positionnement inertiel, loi de propagation de l'incertitude

matique d'un levé hydrographique (systèmes utilisés, changement de repère, données et précisions). La *partie 2* présente une méthode d'estimation du bilan d'erreur pour les systèmes de levé hydrographique. Enfin, la *partie 3* est consacrée à la mise en œuvre d'algorithmes d'estimation du bilan d'erreur et à leurs validations.

État de l'art

■ Description des systèmes de levé hydrographique

Système de levé de surface

Un système de levé de surface est généralement composé de plusieurs capteurs tels qu'un bathycélérimètre (SVP), un système de navigation GNSS, une centrale inertielle (IMU) et un sondeur multifaisceaux (SMF), montés sur un navire (voir Figure 1). Le sondeur multifaisceaux permet de mesurer simultanément la profondeur de l'eau suivant plusieurs directions. Le bathycélérimètre est utilisé pour déterminer le profil de vitesse du son dans la colonne d'eau afin de corriger la profondeur mesurée par le sondeur multifaisceaux. L'IMU permet de

Introduction

Au cours des opérations offshore telles que la cartographie des fonds marins et les campagnes d'inspection d'infrastructures sous-marines, deux types de système de levé hydrographique sont généralement utilisés : les systèmes de levé de surface et ceux sous-marin. Une partie des travaux de préparation de ces opérations consiste à estimer le bilan d'erreur des systèmes. Cette étape est essentielle car elle permet de mieux qualifier les données acquises et de vérifier si les méthodes et équipements utilisés répondent aux normes minimales de l'organisation hydrographique internationale (OHI). L'objectif de cet article est d'analyser le bilan d'erreur des systèmes de levé de surface et sous-marin - communément appelé en hydrographie "bilan d'erreur

ou incertitude totale propagée (TPU¹)". L'article est divisé en trois parties. La *première partie* introduit la problématique TPU : Total Propagated Uncertainty

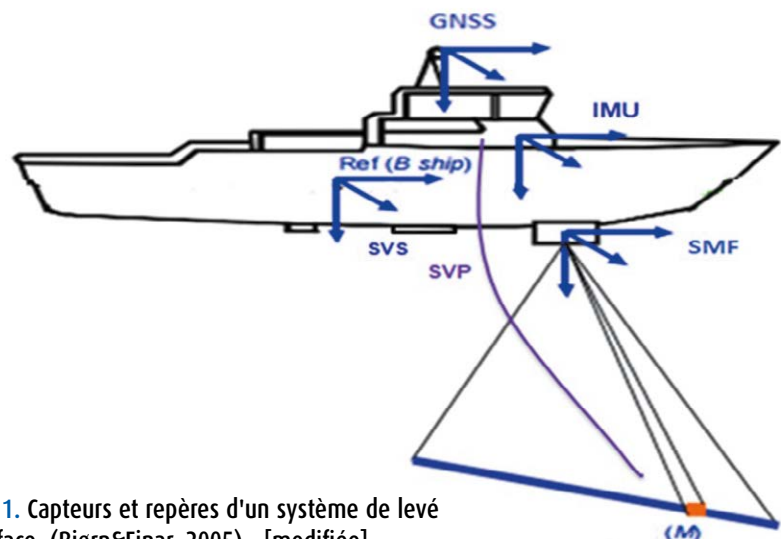


Figure 1. Capteurs et repères d'un système de levé de surface (Bjørn&Einar, 2005) - [modifiée].

mesurer l'attitude du navire. Le système de navigation GNSS fournit la position du navire.

Chaque équipement du système détermine ses mesures par rapport à un repère spécifique. Cependant, il existe régulièrement des désalignements entre le repère de la centrale d'inertielle et le repère du sondeur multifaisceaux. Ses défauts d'alignement sont critiques pour la précision du système et sont déterminés durant sa *calibration*². De plus, les données issues des différents capteurs ne sont pas acquises en même temps ; on introduit ainsi la notion de latence qui permet de prendre en compte le temps de calcul et de transmission de données.

Système de levé sous-marin

Les systèmes de levé sous-marins sont généralement utilisés pour obtenir des données de haute résolution dans les eaux dont la profondeur dépasse les 100 m. La *Figure 2* illustre les capteurs d'un système de levé sous-marin, ainsi que leurs repères associés. Des éventuels désalignements entre des capteurs sont également rencontrés dans ces systèmes et sont corrigés pendant la phase de *calibration*. Pour plus de détails sur les étapes de *calibration* d'un système de levé sous-marin, voir (Naankeu-Wati, 2016).

Un système de levé sous-marin est composé d'un bateau à la surface de l'eau et d'un vecteur sous-marin. Ces

2 étalonnage

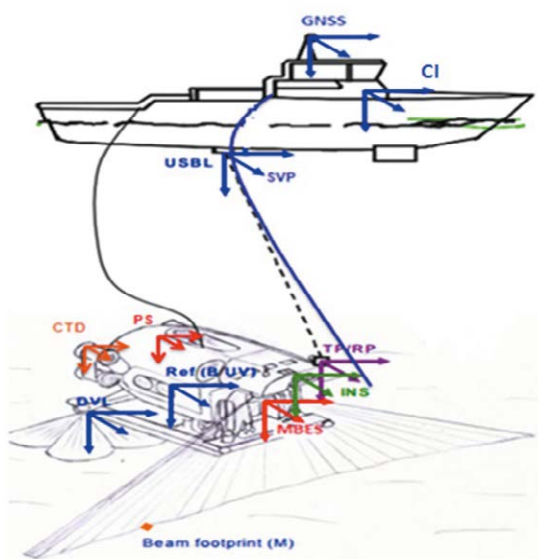


Figure 2. Illustration des repères des différents capteurs d'un système de levé sous-marin - (Bjørn & Einar, 2005) - [modifiée].

deux composantes communiquent en général grâce à des systèmes acoustiques (télémetrie, système de positionnement USBL, etc.). Les vecteurs sous-marins généralement utilisés dans l'industrie maritime sont :

- les AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*),
- les ROV (*Remotely Operated Vehicle*),
- les poissons remorqués.

Le vecteur sous-marin est régulièrement équipé d'une grande variété de capteurs. Son système de navigation intégré détermine la position, l'attitude et la vitesse du véhicule à partir des données d'une centrale inertielle et des systèmes de positionnement acoustique (*DVL-Doppler Velocity Log* et *USBL-Ultra Short BaseLine*). Ces systèmes de positionnement acoustiques permettent d'améliorer la précision finale de la position du véhicule en limitant la dérive inertielle.

Repères et matrices de transformation

Le but de cette section est de définir les repères et les matrices de transformation nécessaires pour déterminer les équations de la position d'une sonde bathymétrique acquise par un système de levé hydrographique. Les principaux repères utilisés sont : le repère terrestre (TRF), le repère géodésique local (LGF), le repère local de navigation local ou le système de projection cartographique, le repère corps et les repères des capteurs.

Repère terrestre

Le repère terrestre (TRF) est un repère de référence terrestre, situé au centre de la terre avec ses trois axes définis comme sur la *figure 3*.

Repère géodésique local

Le repère géodésique local ou LGF est utilisé pour définir l'orientation du navire par rapport au TRF. Il est défini comme suit :

- son origine est située à l'origine du repère de la centrale d'attitude,
- son axe x désigné *N-Northing*, pointe vers le nord géographique,
- son axe z dénoté *D-Down*, pointe vers l'intérieur de la Terre et est normal à l'ellipsoïde de référence,
- son axe y, dénoté *E-Easting*, complète le repère orthonormé en pointant vers l'est. Les axes des x et des y se trouvent sur le plan tangent à l'ellipsoïde au point d'intérêt (voir la *Figure 3*).

Repère local de navigation

Le repère local de navigation correspond au système de projection utilisé pour représenter la position de la sonde bathymétrique sur une carte. Ses axes sont définis comme ceux du repère géodésique local. Cependant, son origine est fixe au cours du temps (voir *Figure 3*).

Repère corps (ou repère de l'IMU)

L'origine du repère corps est située à l'origine du repère de la centrale iner-

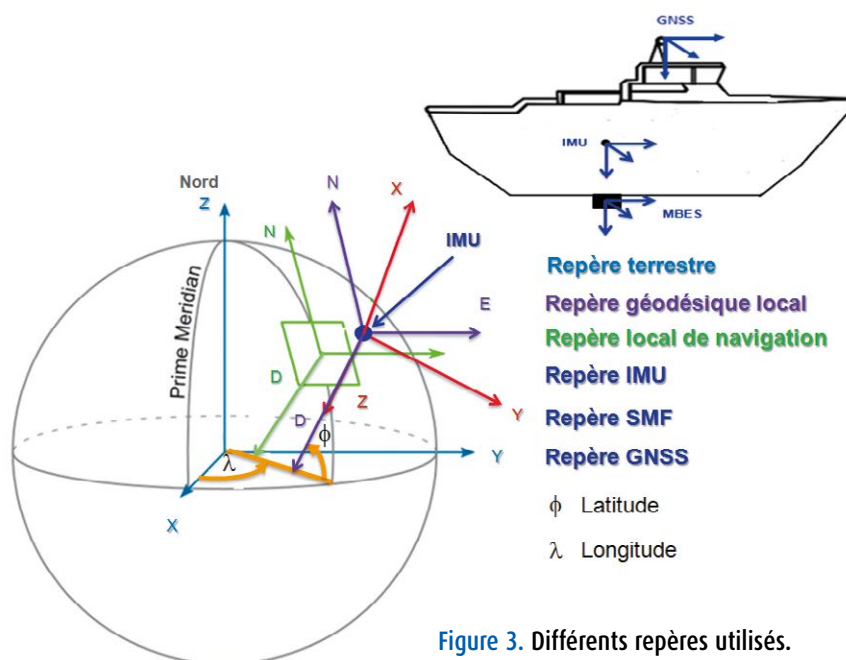


Figure 3. Différents repères utilisés.



Tableau 1. Symboles des repères des capteurs utilisés

Symboles	Repères des capteurs
bG	Repère du système de positionnement GNSS
bS	Repère du SMF
bI	Repère de l'IMU
bU	Repère de l'USBL
bD	Repère du DVL
bN	Repère du navire
bA	Repère de l'AUV

tielle, ses axes restant fixes par rapport à l'IMU. Son axe x est défini suivant l'axe longitudinal de la plate-forme, son axe z est orienté vers le bas, dans le sens, de la gravité, et l'axe y est l'axe droit complétant l'ensemble orthogonal.

Repères des capteurs

Un repère capteur est lié à chaque capteur du système de levé hydrographique. Dans cet article, le symbole b devant une majuscule représente les repères des capteurs. L'ensemble des repères est dénommé dans le *Tableau 1*. Un repère lié à chaque capteur est communément défini comme suit :

- son origine se trouve à un point spécifique du capteur (classiquement, le centre de gravité du capteur),
- son axe x (axe de roulis) est orienté vers l'avant,
- son axe y (axe de tangage) pointe vers la droite,
- son axe z (axe de lacet) pointe vers le bas, complétant un système orthogonal droit.

Bilan d'erreur d'un système de levé hydrographique

La position d'une sonde bathymétrique est déterminée à partir des

mesures issues des différents capteurs et procédures (*calibration* du système, célérité, etc.). Puisque les valeurs vraies de ces mesures ne peuvent être déterminées, il est impossible d'obtenir l'erreur exacte d'une mesure. Cependant, il est possible d'estimer son incertitude à partir des équations de position et des incertitudes associées à chaque mesure issue des différents capteurs. Ceci est communément appelé en hydrographie "bilan d'erreur ou incertitude totale propagée (TPU)".

La TPU est obtenue en combinant toutes les sources d'erreur contribuant à l'incertitude de mesure sur la position de la sonde (*voir Figure 4 et Figure 5*) en utilisant une méthode statistique appelée "loi de propagation de l'incertitude" (JCGM, 2008).

Méthode proposée pour l'estimation du bilan d'erreur des systèmes de levé hydrographique

L'objectif de cette deuxième partie est de présenter une méthode d'estimation du bilan d'erreur appliquée aux

systèmes de levé de surface et sous-marin. Ainsi, les équations de position d'une sonde bathymétrique acquise à partir de ces systèmes seront au préalable établies afin d'estimer le bilan d'erreur de chaque système hydrographique en utilisant la loi de propagation de l'incertitude (JCGM, 2008).

Équations de position d'une sonde bathymétrique acquise à partir d'un système de levé de surface

Description géométrique d'un système de levé de surface SMF

- Un point de référence qui est généralement l'origine de toutes les mesures de bras de levier. Dans cette étude, les mesures des bras de levier seront définies dans le repère de l'IMU.
- Un repère lié à chaque capteur (repère capteur),
- Les mesures du bras de levier entre l'origine du repère X et l'origine du repère Y, exprimées dans le repère M, notées bM , sont symbolisées par LA_{sm}^X . Par exemple, $LA_{IMU_M}^{SMF}$ sont les mesures du bras de levier entre l'origine du repère de l'IMU et l'origine du repère du SMF, exprimés dans le repère de l'IMU bI ,
- Un repère géodésique local (LGF), utilisé pour transformer les coordonnées du LGF au TRF.
- Le repère terrestre (TRF).
- Le repère local de navigation (n) ou système de coordonnées projetées. Ces différents éléments sont représentés sur la *Figure 6*.

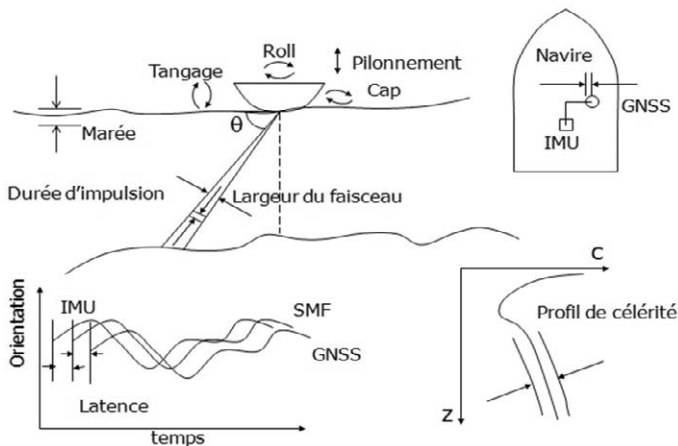


Figure 4. Modèle d'erreur d'un système de levé de surface (Hare, 2004) - [modifiée]. Notez qu'uniquement les principales sources d'erreurs sont illustrées.

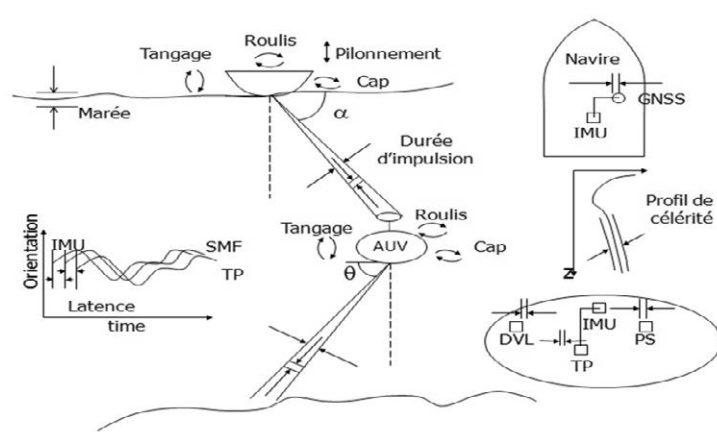


Figure 5. Modèle d'erreur d'un système de levé sous-marin (Hare, 2004) - [modifiée]. Notez que toutes les sources d'erreurs ne sont pas illustrées.

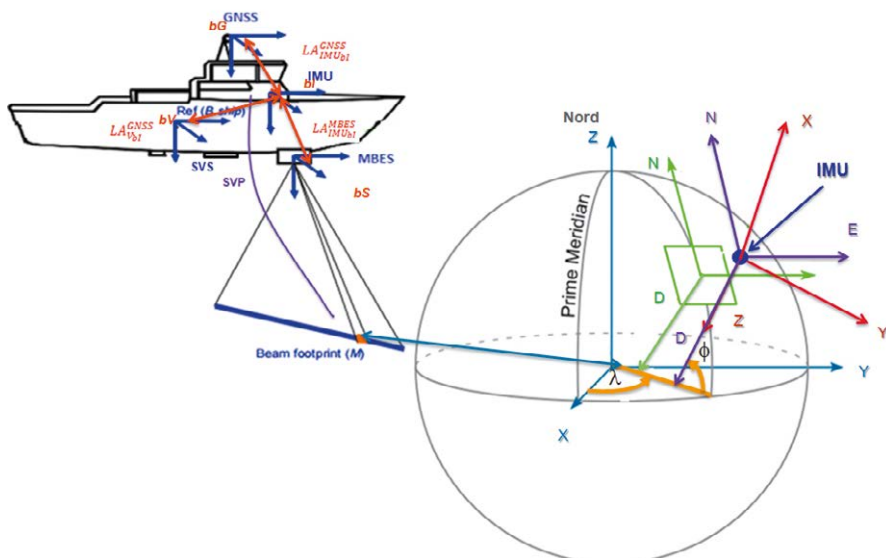


Figure 6. Système de levé de surface multifaisceaux, repères et bras de levier (Björn&Einar, 2005) - [modifiée].

Équations de position d'une sonde bathymétrique exprimée dans le repère local de navigation

L'objectif de cette section est d'exprimer dans le repère local de navigation les équations de position d'une sonde bathymétrique acquise par un système de levé de surface. Les équations de position d'une sonde bathymétrique seront donc exprimées dans un système de coordonnées planes (E, N et h). Ces équations seront ensuite dérivées afin de déterminer l'incertitude sur la position de la sonde. Cette approche suppose que :

1. Les mesures de bras de levier sont connues et définies dans le repère de l'IMU.
2. Les angles de désalignement entre le repère du SMF et le repère de l'IMU existent et sont estimés.
3. Le profil de célérité de la colonne d'eau est connu.
4. Les données acquises par les différents capteurs du système de levé sont synchrones. C'est-à-dire que toutes les mesures des capteurs sont acquises en même temps. Ce qui n'est pas vrai, car il existe une latence entre les capteurs qui crée une erreur de positionnement. Cette erreur sera déterminée à la section "Modélisation de l'écart de positionnement d'une sonde bathymétrique due à la latence dans le système."

Rob Hare a développé un algorithme

d'estimation du bilan d'erreur appliquée aux systèmes de levé de surface (Hare, 2001). Cet algorithme néglige la covariance entre les paramètres non indépendants, ainsi que l'effet de latence entre l'IMU et le SMF alors que cette étude montre que leur prise en compte améliore significativement l'estimation. Il est implémenté dans la plupart des logiciels de navigation et de traitement de données.

Dans le repère du sondeur multifaisceaux (SMF)

En acoustique, la position d'une sonde bathymétrique exprimée dans le repère du sondeur r_{bs} est déterminée à partir de (Debese, 2013) et (Legris, 2014) (voir Figure 7) :

- La distance oblique des faisceaux r ,
 - L'angle d'incidence des faisceaux α ,
- La distance oblique du faisceau est calculée à partir du temps aller-retour de l'onde acoustique et du profil de célérité de la colonne d'eau, tandis que l'angle d'incidence du faisceau α est déterminé à partir de la différence de phase de signal acoustique entre deux récepteurs du sondeur multifaisceaux.

Dans le repère de l'IMU

Soient S et I, les origines des repères du SMF et l'IMU, respectivement.

$L_{IMU_{bl}}^{SMF} = \vec{IS}_{bl}$, les mesures de bras de levier entre l'origine du repère de l'IMU et l'origine du repère du SMF, exprimées dans le repère de l'IMU.

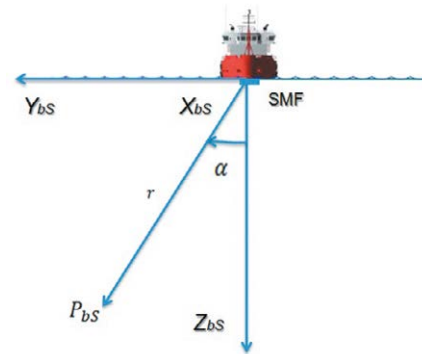


Figure 7. Coordonnées de la position d'une sonde exprimées dans le repère du sondeur.

R_{bs}^{bl} représente la matrice de transformation entre le repère du SMF et le repère de l'IMU (voir Figure 8). La position d'une sonde bathymétrique (M) exprimée dans le repère de l'IMU est déterminée en effectuant deux opérations :

- Une rotation, afin d'aligner le repère du SMF et le repère de l'IMU.
- Une translation, pour tenir compte du décalage entre le repère du SMF et le repère de l'IMU.

A partir de la Figure 8, il apparaît que la position de sonde bathymétrique exprimée dans le repère l'IMU, notée \vec{IM}_{bl} , peut être écrite comme suit :

$$\vec{IM}_{bl} = M_{bl} = L_{IMU_{bl}}^{SMF} + R_{bs}^{bl} r_{bs}$$

Dans le repère terrestre

Soient O et P, les origines du repère terrestre (TRF) et du repère du système de positionnement GNSS, respectivement (voir Figure 9).

$OP_{TRF} = P_{TRF}$, la position du centre de phase du système de positionnement GNSS, exprimée dans le repère terrestre (TRF).

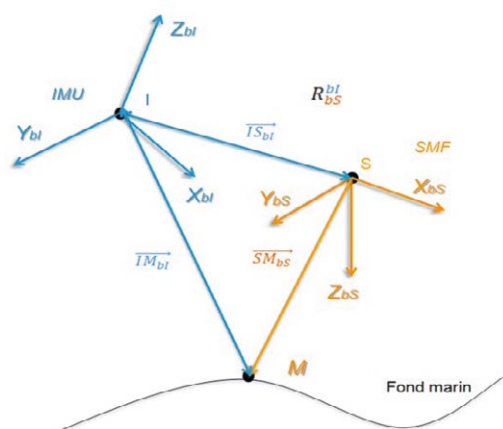


Figure 8. Coordonnées de la position d'une sonde dans le repère du sondeur.

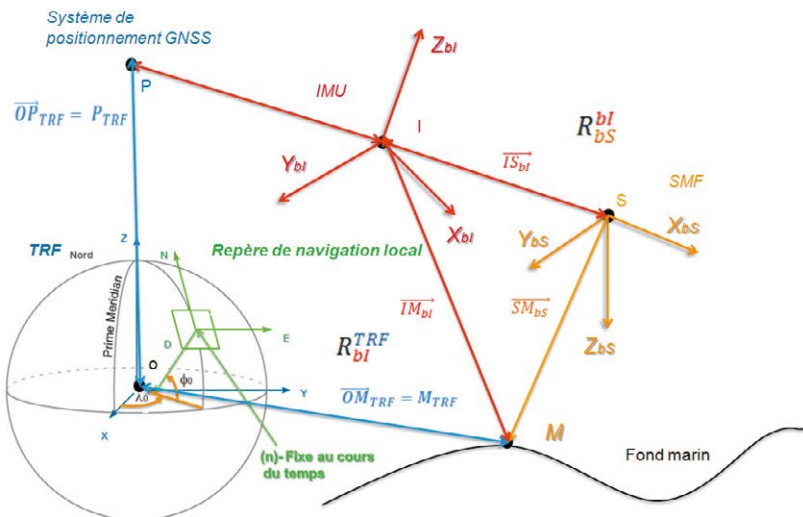


Figure 9. Position d'une sonde bathymétrique exprimée dans le repère terrestre.

$LA_{IMU}^{GNSS} = \overrightarrow{IP}_{bi}$, représentent les mesures de bras de levier entre le repère de l'IMU et le repère du positionnement GNSS, exprimées dans le repère de l'IMU. La position d'une sonde bathymétrique exprimée dans le repère terrestre M_{TRF} est définie comme ci-dessous :

$$M_{TRF} = P_{TRF} + R_{LGF}^{TRF} R_{bi}^{LGF} (R_{bs}^{bi} r_{bs} + LA_{GNSS_{bi}}^{MBES})$$

Où :

- R_{bi}^{TRF} est la matrice de transformation entre le repère de l'IMU et le repère terrestre (TRF),
- R_{LGF}^{TRF} est la matrice de transformation entre le LGF et le TRF,
- R_{bi}^{LGF} est la matrice de transformation entre le repère de l'IMU et le LGF.

Note : dans un système de levé hydrographique, les angles de désalignement de roulis, tangage et cap entre le repère du SMF et le repère de l'IMU sont déterminés pendant la phase de *calibration*. Alors que les angles de roulis, tangage et cap entre le repère de l'IMU et le LGF sont mesurés par l'IMU.

De ce fait, la matrice de transformation entre le repère du SMF et le LGF se fait via deux rotations successives (Bjørn et Einar, 2005), (Farrell, 2008), (Seube et al., 2015). Rob Hare exprime cette matrice de transformation en une seule rotation, c'est-à-dire en ajoutant les angles d'Euler, ce qui n'est pas exact (Groves, 2013). Une nouvelle approche pour déterminer la matrice de transformation entre le repère du SMF et le LGF est donc proposée ici. Cette approche permet de montrer l'influence d'un désalignement de cap entre le repère du SMF et le repère de l'IMU sur la position verticale

d'une sonde bathymétrique, pour plus de détails voir (Naankeu-Wati, 2015).

Équations de la position d'une sonde exprimées dans le repère local de navigation

Pour une interprétation optimale du bilan d'erreur du système, les équations de position de la sonde bathymétrique sont exprimées dans le repère de navigation local via les formules de changement de repère.

L'équation précédente devient alors :

$$M_n = P_n + R_{TRF}^n (\lambda_0, \phi_0) R_{LGF}^{TRF} (\lambda, \phi) R_{bi}^{LGF} (\varphi, \theta, \psi) (R_{bs}^{bi} r_{bs} + LA_{GNSS_{bi}}^{SMF})$$

Pour une zone de levé de taille relativement limitée près de l'origine du repère local de navigation (λ_0, ϕ_0, h) (le repère local de navigation étant fixe), la matrice de transformation entre le LGF et le repère local de navigation (n) peut être approximativement égale à

la matrice identité. Cette approximation est faite afin d'éviter de prendre en compte toutes les formules de projection géodésiques lors de la propagation des incertitudes (λ_0, ϕ_0, h) . L'équation précédente devient alors :

$$M_n = P_n + R_{bi}^n (\varphi, \theta, \psi) (R_{bs}^{bi} r_{bs} + LA_{GNSS_{bi}}^{SMF})$$

Avec :

- $P_n = (N_p, E_p, X_p)$ la position du centre de phase du système de positionnement GNSS, exprimée dans le repère local de navigation (n) ;
- R_{bi}^n la matrice de transformation entre le repère de l'IMU et le repère local de navigation (n) ;
- r_{bs} la position d'une sonde bathymétrique exprimée dans le repère du SMF ;
- $LA_{GNSS_{bi}}^{MBES}$ les mesures de bras de levier entre le centre de phase du système de positionnement de GNSS et l'origine du repère du SMF, exprimée dans le repère de l'IMU ;
- $M_n = (N_M, E_M, X_M)$ la position de la sonde bathymétrique exprimée dans le repère local de navigation (n).

En pratique, les mesures des bras de levier sont généralement exprimées dans le repère de l'IMU. Dans le cas où elles sont exprimées dans le repère du navire bV , alors la matrice de transformation entre le repère du navire et le repère de l'IMU doit être déterminée.

L'équation ci-dessus devient alors :

$$M_n = \begin{pmatrix} N_M \\ E_M \\ X_M \end{pmatrix} = P_n + R_{bi}^n (R_{bs}^{bi} r_{bs} + LA_{bV}^{IMU} + R_{bV}^{bi} LA_{GNSS_{bV}}^{MBES})$$

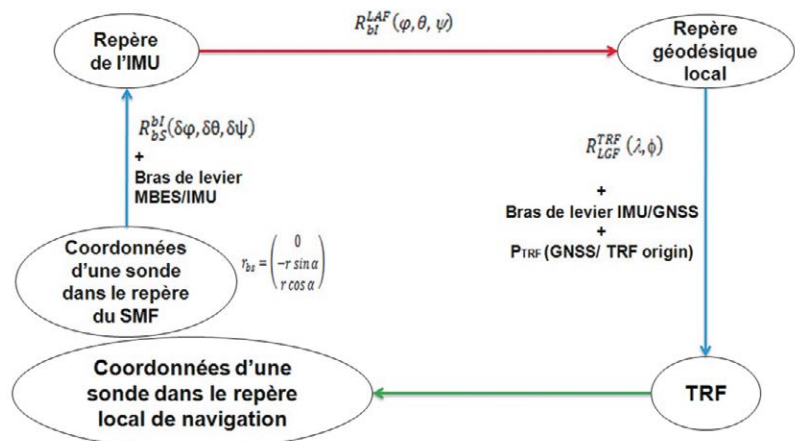


Figure 10. Résumé des différentes rotations (en rouge), transformations (en flèche bleue) et approximations (en vert) nécessaires pour déterminer la position de sonde dans le repère de navigation locale.



La Figure 10 résume les différentes étapes utilisées pour exprimer les équations de position de sonde dans le repère de navigation locale.

Réduction des sondes par rapport à un niveau de référence

En hydrographie, toutes les profondeurs mesurées par le SMF doivent être définies par rapport à un niveau de référence. L'objectif de cette partie est de présenter les équations de réduction des sondes pour les levés hydrographiques classiques [en corrigeant la position verticale de la sonde à partir de la marée (variation de la hauteur du niveau des mers et des océans, causée par les effets de la lune et du soleil)] et pour les levés référencés par rapport à l'ellipsoïde.

Levé hydrographique référencé par rapport à l'ellipsoïde

A partir de la Figure 11, la position verticale d'une sonde bathymétrique par rapport au niveau de référence Z_{Datum} est définie comme suit :

$$z_{Datum} = \text{Hauteur de référence} - (h_{GNSS} - \Delta z - z)$$

La position absolue de la sonde bathymétrique devient alors :

$$M_n = \begin{pmatrix} N_M \\ E_M \\ Z_{Datum} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ SEP \end{pmatrix} + P_n + R_{bl}^n (R_{bs}^{bl} r_{bs} + LA_{GNSS_{bl}}^{SMF})$$

Levé hydrographique classique

A partir de la Figure 12, la position verticale d'une sonde bathymétrique par rapport au niveau de référence Z_{Datum} est donnée par la formule suivante :

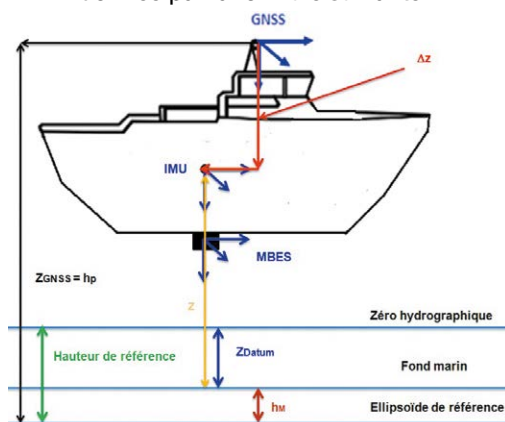


Figure 11. Profondeur réduite déterminée via un levé hydrographique référencé à l'ellipsoïde - (International Federation of Surveyors, 2006) - [modifiée].

$$Z_{Datum} = Z + R_{bl}^n \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ D - H - M - WL \end{pmatrix}$$

- D est le tirant d'eau dynamique,
- H est le pilonnement (déplacement vertical du navire par rapport au niveau de l'eau),
- M est la marée mesurée,
- WL est la distance verticale entre le niveau moyen de la mer et le zéro hydrographique (niveau de référence commun aux cartes bathymétriques),
- $z = Z_n - \Delta z$ est l'écart vertical entre le centre acoustique du sondeur et la position de la sonde exprimé dans le repère de l'IMU,
- $\begin{pmatrix} X_n \\ Y_n \\ Z_n \end{pmatrix} = R_{bl}^n (R_{bs}^{bl} r_{bs} + LA_{GNSS_{bl}}^{SMF})$

$$\Delta z = -LA_{IMU_{X_{bl}}}^{GNSS} \sin\theta + LA_{IMU_{Y_{bl}}}^{GNSS} \cos\theta \sin\phi + LA_{IMU_{Z_{bl}}}^{GNSS} \cos\phi \cos\theta$$

La position absolue de la sonde bathymétrique devient alors :

$$M_n = \begin{pmatrix} N_M \\ E_M \\ Z_{Datum} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N_p \\ E_p \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_n \\ Y_n \\ Z_n \end{pmatrix} - R_{bl}^n \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta z - D + H + M + WL \end{pmatrix}$$

Positionnement dynamique d'un système de levé de surface

Comme mentionné dans la section "Description des systèmes de levé hydrographique", les mesures issues des différents capteurs d'un système d'acquisition ne sont pas fournies à un même instant. Une latence est souvent introduite ou peut exister dans un capteur afin de tenir compte du temps de calcul et de transmission de données. Ceci crée une erreur de position (Bjørn & Einar, 2005). L'objectif de la section suivante est de modéliser l'écart de position créée par la latence dans un système afin d'estimer la contribution de la latence sur l'incertitude de la position d'une sonde bathymétrique.

La modélisation mathématique de l'écart de positionnement due à la latence entre les capteurs a été étudiée différemment par (Seube, 2014) et (Bjørn & Einar, 2005). Elle permet d'améliorer l'estimation de l'écart de positionnement

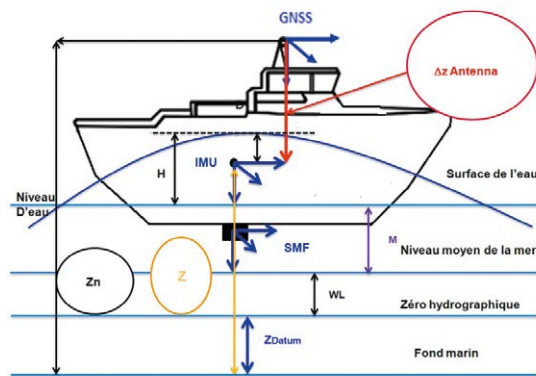


Figure 12. Profondeur réduite déterminée via un levé hydrographique classique - (International Federation of Surveyors, 2006) - [Modifiée].

d'une sonde bathymétrique, ainsi que les spécifications sur les limites de la latence entre le SMF et l'INS étudiées par (Bjørn & Einar, 2005).

Modélisation de l'écart de positionnement d'une sonde bathymétrique dû à la latence

Afin de modéliser l'écart de positionnement d'une sonde dû aux erreurs de temps dans un système de levé de surface, cette approche suppose que :

1. Les **SMF** et **IMU** sont synchronisés à l'heure UTC,
2. Les mesures de pilonnement sont effectuées par l'**IMU**,
3. Les capteurs fournissent des mesures précises, mais celles-ci sont entachées d'erreurs en temps, en dehors du système de positionnement **GNSS**,
4. Les erreurs de temps dans un système sont constantes (ce qui n'est pas vrai en pratique).

Les erreurs de temps dans les capteurs (système de positionnement **GNSS**, **IMU** et **SMF**) peuvent être modélisées comme suit (Bjørn & Einar, 2005) :

$$\begin{aligned} \tilde{t}_{GNSS}^{UTC} &= t_{GNSS}^{UTC} = t \\ \tilde{t}_{IMU}^{UTC} &= t_{IMU}^{UTC} + dt_{IMU}^{UTC} \\ \tilde{t}_{SMF}^{UTC} &= t_{SMF}^{UTC} + dt_{SMF}^{UTC} \end{aligned}$$

Où :

- dt_X^{UTC} est la latence entre le système de positionnement GNSS et le capteur X,
- t_X^{UTC} est le temps de mesure physique du capteur X,
- t_X^{UTC} est le temps d'enregistrement des données par le capteur ou le système d'acquisition.

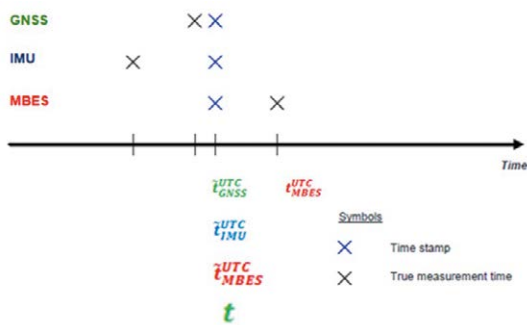


Figure 13. Fusion des données hydrographiques (Bjørn & Einar, 2005).

En supposant que les données issues des différents capteurs sont acquises à un même instant, la position vraie de la sonde bathymétrique M_n déterminée à l'instant SMF t_{SMF}^{UTC} est alors définie comme ci-dessous :

$$M_n(t_{SMF}^{UTC}) = P_n(t_{SMF}^{UTC}) + R_{bl}^n(t_{SMF}^{UTC}) (R_{bs}^{bl} r_{bs}(t_{SMF}^{UTC}) + LA_{GNSS_{bl}}^{SMF}) - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ H(t_{SMF}^{UTC}) \end{pmatrix} + Cte$$

Cte est une constante qui est égale à la somme des différentes corrections appliquées (marée, bras de levier, etc.) lors de la réduction de sondes.

Les erreurs de temps sur les données issues de l'IMU et du SMF sont généralement déterminées durant la phase de calibration. La position de la sonde bathymétrique \bar{M}_n tenant compte des effets de latence est modélisée comme suit :

$$\bar{M}_n = P_n(t) + R_{bl}^n(t_{IMU}^{UTC}) (R_{bs}^{bl} r_{bs}(t_{SMF}^{UTC}) + LA_{GNSS_{bl}}^{SMF}) - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ H(t_{SMF}^{UTC}) \end{pmatrix} + Cte$$

En supposant que les mesures des différents capteurs sont synchrones à l'issue de la calibration du système (Bjørn & Einar, 2005), on obtient

$$t_{GNSS}^{UTC} = t_{SMF}^{UTC} = t_{IMU}^{UTC} = t$$

La position de la sonde bathymétrique due aux effets de latence à l'instant t_{SMF}^{UTC} devient alors :

$$\bar{M}_n = P_n(t_{SMF}^{UTC} + dt_{SMF}^{UTC}) + R_{bl}^n(t_{SMF}^{UTC} - (dt_{IMU}^{UTC} - dt_{SMF}^{UTC})) (R_{bs}^{bl} r_{bs}(t_{SMF}^{UTC}) + LA_{GNSS_{bl}}^{SMF}) - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ H(t_{SMF}^{UTC} - (dt_{IMU}^{UTC} - dt_{SMF}^{UTC})) \end{pmatrix} + Cte$$

A partir des deux équations ci-dessus, l'écart de positionnement d'une sonde bathymétrique dû aux effets de la latence dans un système de levé de surface $\Delta M_n(t_{SMF}^{UTC})$ est défini comme la différence entre M_n et \bar{M}_n . La position de la sonde bathymétrique due aux effets de latence à l'instant (t_{SMF}^{UTC}) devient alors (Naankeu-Wati et al., 2016) :

$$\bar{M}_n(t_{SMF}^{UTC}) = M_n(t_{SMF}^{UTC}) + \Delta M_n(t_{SMF}^{UTC})$$

■ Équations de position d'une sonde acquise par un système de levé sous-marin

Un système de levé sous-marin est généralement composé d'un bateau de surface et d'un vecteur (ROV, AUV ou poisson remorqué). Bien que des systèmes côtiers soient maintenant opérationnels, les systèmes de levé sous-marin sont traditionnellement utilisés pour obtenir des données bathymétriques de haute résolution dans les eaux profondes.

Dans la plupart des opérations de levé sous-marin, la position horizontale du véhicule sous-marin est déterminée par un filtre de Kalman étendu en combinant les données issues :

- des systèmes de positionnement acoustique (GNSS-USBL / SBL / LBL ou DVL),
- du système de navigation inertielle (INS) (voir Figure 14).

La profondeur du vecteur est estimée en combinant les mesures issues du capteur de pression, de la marée et de la pression atmosphérique. Par conséquent l'objectif de cette section est de présenter le principe de fusion des données de navigation d'un véhicule sous-marin afin d'estimer son bilan d'erreur. Ici, seul le cas d'un système de positionnement intégré GNSS-USBL / INS / DVL sera étudié (voir Figure 14). Les données issues du système de positionnement (GNSS-USBL / DVL) sont caractérisées par un bruit relativement élevé / faible, mais uniformément distribué et sans dérive de positionnement. Elles sont couplées à un capteur inertielle (INS) qui offre un très faible bruit, mais avec une incertitude qui croît avec le temps et la distance (Kongsberg, 2015) (voir Figure 15).

Principe général de fusion de données de navigation

Le principe général de fusion de données d'un système de navigation intégré (GNSS-USBL / INS / DVL) est simple. Lorsque les données issues des capteurs extérieurs (DVL/USBL) sont disponibles, le filtre de Kalman étendu implémenté dans l'INS utilise ces données ainsi que leurs incertitudes de mesure pour limiter la dérive de la solution inertielle dans le temps (voir Figure 16).

En raison des conditions environnementales (bancs de poissons, turbulences, etc.) et des variations des propriétés de l'eau (température, pression, etc.) au

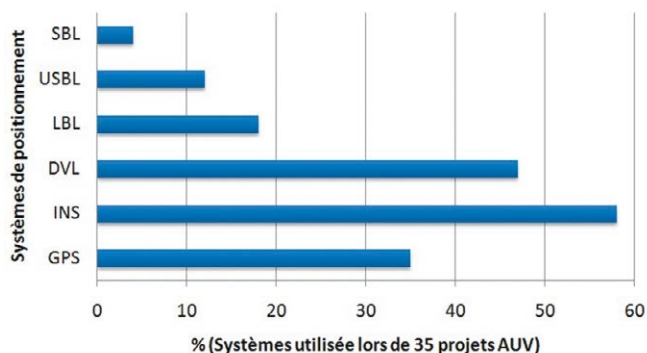


Figure 14. Pourcentage des capteurs utilisés dans 35 projets AUV (Chen, Sen, Klaus, & Hu, 2013) - [Modifiée].

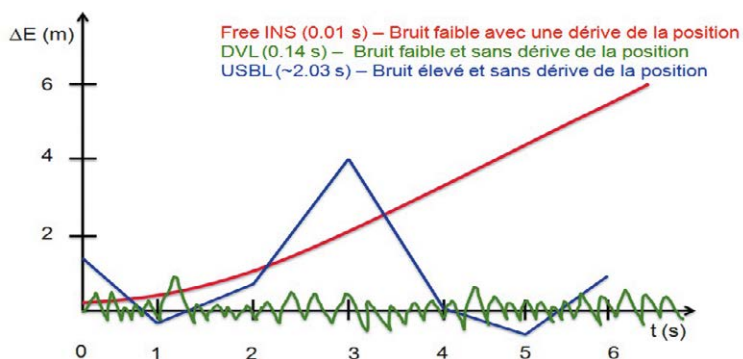


Figure 15. Solutions calculées à partir d'une INS, DVL et USBL.

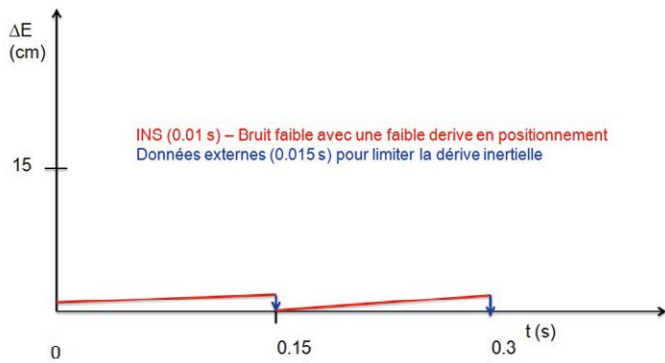


Figure 16. Fusion de données.

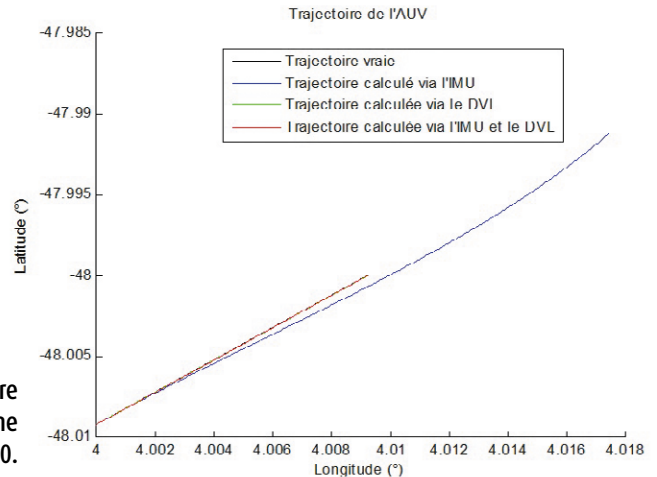


Figure 17. Trajectoire estimée à partir d'une PHINS /RDI WHN-1200.



cours du temps, il est difficile d'estimer en temps réel l'incertitude de mesure des données issues du système de positionnement GNSS-USBL. De ce fait, un écart-type également appelé "poids" est calculé ou fixé dans le filtre de Kalman pour assurer l'intégrité du système de navigation. De plus, les performances du DVL (précision : 0,2-0,4%, fréquence de sortie des données : 0,14 s) sont meilleures que celles du système de positionnement GNSS-USBL (précision : 0,2-0,7 % distance oblique, fréquence de sortie des données : 2,03 s).

On remarque alors que la précision du positionnement sous-marin du système de navigation (GNSS-USBL/DVL/INS) dépend fortement des performances de l'INS et du DVL. La Figure 17 montre la trajectoire d'un AUV estimée à partir d'un système de navigation intégré composé d'une INS et d'un DVL.

Équations de la position horizontale d'une sonde bathymétrique

La position horizontale d'une sonde bathymétrique acquise par un système de levé sous-marin (GNSS-USBL / INS / DVL) est calculée de la même manière que pour un système de levé de surface. Elle combine deux équations :

- la position horizontale du véhicule sous-marin, exprimée dans le repère local de navigation,
- la position horizontale de la sonde bathymétrique par rapport à la position du véhicule sous-marin, exprimée dans le repère local de navigation.

La position horizontale d'une sonde bathymétrique est alors définie comme suit :

$$M_n = P_n + R_{bl}^n(\varphi, \theta, \psi)(R_{bs}^{bl}r_{bs} + LA_{SMF_{bl}}^{INS})$$

Avec :

- P_n la position horizontale du véhicule sous-marin exprimée dans le repère local de navigation,
- R_{bl}^n la matrice de transformation entre le repère de l'INS et le repère local de navigation,
- r_{bs} la position d'une sonde bathymétrique exprimée dans le repère du SMF,
- $LA_{SMF_{bl}}^{INS}$ les mesures de bras de levier entre l'origine du repère du SMF et l'origine du repère de l'INS, exprimée dans le repère de l'INS.

Réduction de sondes

Comme mentionné dans la section "équations de position d'une sonde acquise par un système de levé sous-marin", la profondeur d'un véhicule sous-marin est généralement estimée en combinant les mesures issues du capteur de pression, du profil de

densité de l'eau, de la marée et de la pression atmosphérique. Elle est définie par la formule suivante (voir Figure 18) :

$$z_{Datum} = h_{ps} + z_n - (M + WL)$$

Où :

- h_{ps} est l'immersion de l'AUV.
- M est la marée mesurée ou prédite.
- WL est l'écart entre le MSL et le niveau de référence,
- z_n est l'écart entre le capteur de pression et la sonde bathymétrique.

Une alternative consiste à combiner les informations issues du capteur de pression et du système de positionnement GNSS-USBL dans un système de navigation intégrée. Cette méthode permet de réduire l'effet de la pression induite par les ondes dynamiques à la surface de la mer et d'améliorer la position verticale de la sonde bathymétrique (voir Figure 19).

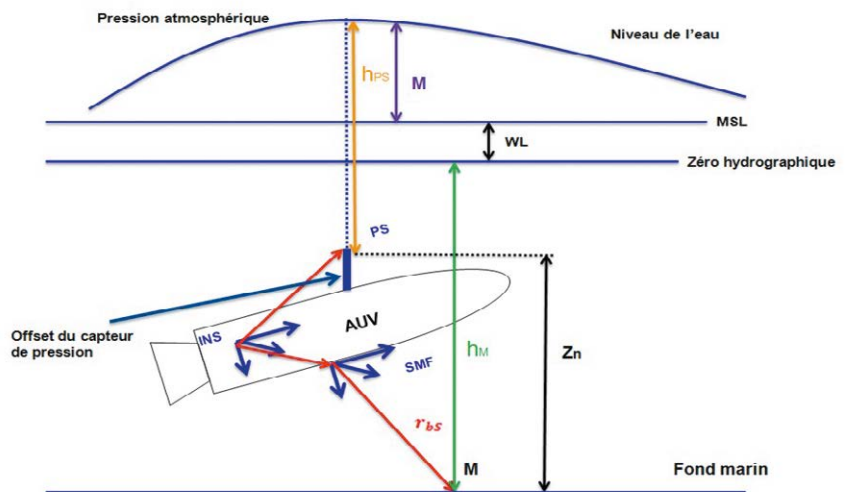


Figure 18. Estimation de la position verticale d'une sonde acquise par un système de levé sous-marin.

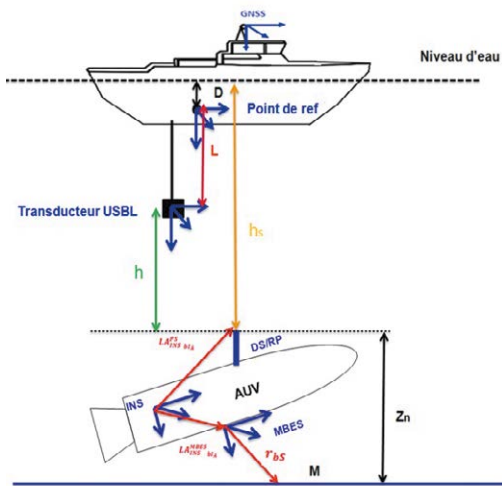


Figure 19. Estimation de la position verticale d'une sonde à partir d'un capteur de pression et d'un système USBL.

Estimation du bilan d'erreur des systèmes de levé hydrographique

L'objectif de cette partie est de décrire les algorithmes d'estimation du bilan d'erreur appliqué aux systèmes de levé de surface et sous-marin.

■ Algorithme d'estimation appliqué aux systèmes de levé de surface

Le bilan d'erreur d'un système de levé de surface est estimé en combinant, via la loi de propagation d'incertitude, l'ensemble des sources d'incertitudes qui affectent la position d'une sonde bathymétrique. L'algorithme d'estimation du bilan d'erreur appliqué aux systèmes de levé de surface suppose que :

1. Les incertitudes des mesures issues des différents capteurs du système sont connues. Toutes ces incertitudes sont normalement distribuées et non corrélées.

2. L'incertitude de mesure de la position horizontale d'une sonde bathymétrique σ_H à 1σ est

$$\sigma_H = \sqrt{\sigma_N^2 + \sigma_E^2 + 2|\text{cov}(N, E)|}$$

Le terme de covariance est exprimé en valeur absolue afin d'être conservatif.

3. Le modèle d'incertitude de mesure du SMF utilisé est celui proposé par (Hammerstad, 2011). Cependant d'autres modèles tels que celui de (Lurton, 2001) pourraient être utilisés.

4. Les erreurs de temps dans le système sont constantes.

Les Figure 20 et Figure 21 présentent les contributions individuelles des sources d'incertitude qui contribuent à l'incertitude globale sur la mesure d'une sonde bathymétrique acquise par un levé hydrographique multifaisceaux référencée par ellipsoïde.

■ Algorithme d'estimation du bilan d'erreur appliqué aux systèmes de levé sous-marin

Le bilan d'erreur d'un système de levé sous-marin est estimé de la même manière que pour un système de levé de surface. Cependant, le véhicule sous-marin n'est pas positionné par

un système GNSS. Il est positionné à partir d'un système de navigation intégré (INS/DVL/USBL). En pratique, l'incertitude de la position horizontale du véhicule sous-marin est estimée par le filtre de Kalman à partir des performances des différents capteurs du système de navigation. Puisque l'implémentation du filtre de Kalman ne fait pas l'objet de notre étude, nous allons ainsi proposer aux lecteurs une simple formule pour déterminer l'incertitude de la position horizontale du véhicule sous-marin. Dans le cas d'un système de navigation composé d'une INS, USBL et DVL, l'incertitude de mesure de la position horizontale du véhicule sous-marin σ_p peut être

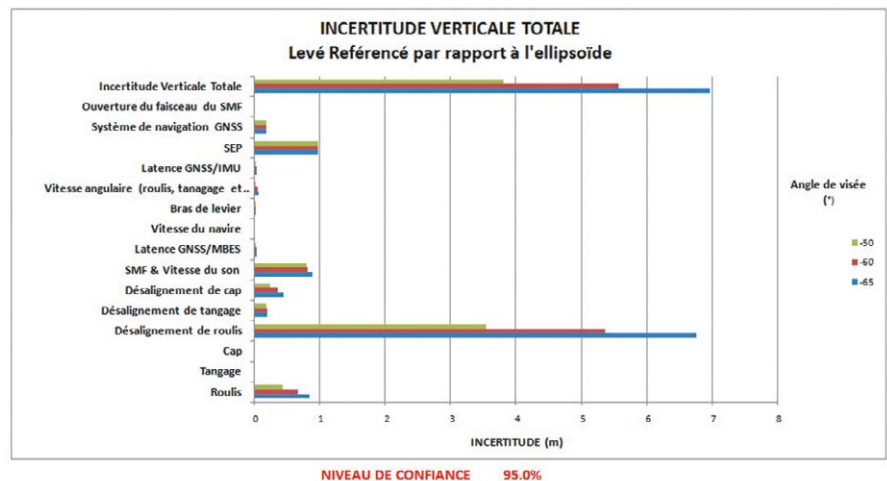


Figure 20 : L'incertitude de mesure de la position verticale d'une sonde bathymétrique acquise par un système de levé de surface-SMF référencée par rapport à l'ellipsoïde. Profondeur=250 m, roulis=6°, incertitude de mesure de roulis=0.1°, angle de désalignement de roulis=0.5°, latence GNSS/SMF=0.1s, latence GNSS/IMU=0.01s.

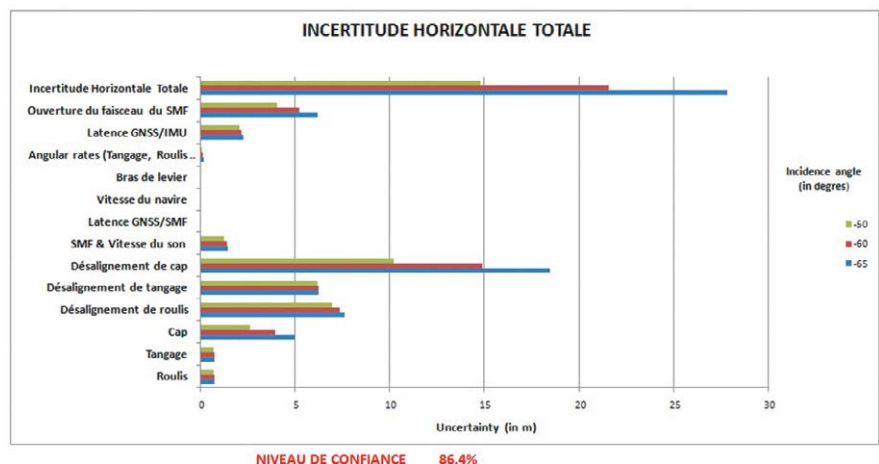


Figure 21 : L'incertitude de mesure de la position horizontale d'une sonde bathymétrique acquise par un système de levé de surface-SMF référencée par rapport à l'ellipsoïde. Profondeur=250 m, roulis=6°, incertitude de mesure de roulis=0.1°, angle de désalignement de roulis=0.5°, latence GNSS/SMF=0.1s, latence GNSS/IMU=0.01s.

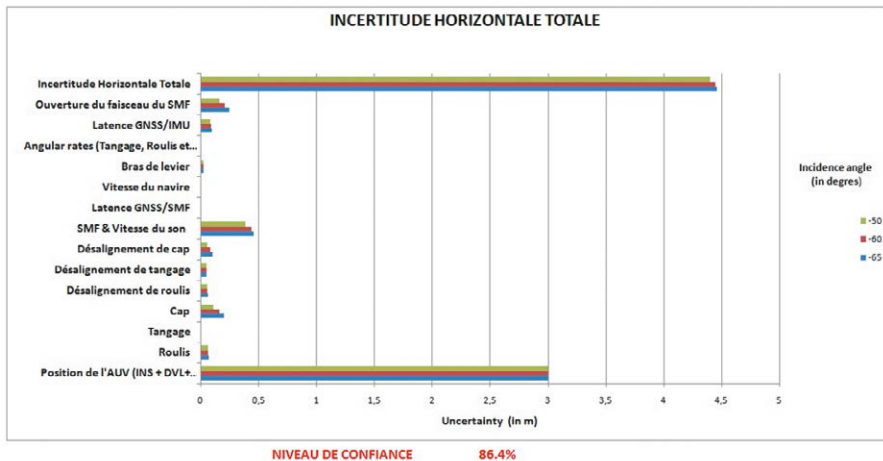


Figure 22. Incertitude horizontale totale pour le système d'enquête AUV (HIPAP 351 PI / PHINS / DVL).

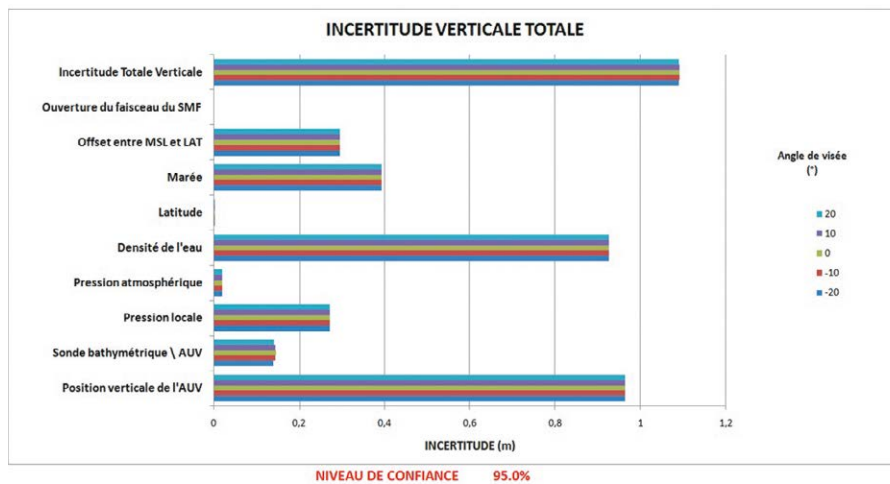


Figure 23. Incertitude verticale totale pour le relevé AUV à 1500 m de profondeur.



exprimée par la formule ci-dessous.

$$\sigma_p = \max \left(\sqrt{\sigma_{INS}^2 + \sigma_{Initialposition}^2}, \sqrt{\sigma_{INS}^2 + \sigma_{DVL}^2} \right)$$

Avec :

- σ_{INS} l'erreur de positionnement de l'INS lorsque les données DVL sont disponibles. Cette erreur dépend de la fréquence des données de sortie du DVL,
- $\sigma_{Initialposition}$ l'erreur de positionnement du système de navigation à l'instant initial,
- σ_{DVL} la précision du positionnement DVL à long terme en position.

Les Figure 22 et Figure 23 présentent les contributions individuelles de chaque source d'incertitude qui contribuent à l'incertitude de mesure de la position verticale et horizontale d'une sonde bathymétrique acquise par un levé hydrographique classique multifaisceaux par AUV.

Validation de l'algorithme d'estimation avec une campagne d'inspection de pipelines par AUV

En 2014, Total a réalisé une campagne d'inspection de pipelines par AUV. Les points du réseau LBL précédemment déterminés lors d'une campagne de positionnement LBL ont également été déterminés grâce au sondeur multifaisceaux monté sur l'AUV. Les positions des points du réseau LBL ont été prises comme référence ("valeur vraie"), car ce sont les structures sous-marines dont la position est connue avec la plus grande précision (comprise entre 10 cm et 1 m à 2 sigma). La comparaison (en valeur absolue) entre les coordonnées des points de réseau LBL et celles estimées par l'AUV donne une indication de l'exactitude du système de levé AUV. Cette exactitude sera alors

comparée au bilan d'erreur estimé à l'aide de l'algorithme TPU afin de le valider.

Le tableau 2 présente les exactitudes et les incertitudes de mesure verticale de quelques points du réseau LBL. L'exactitude moyenne suivant la profondeur est de 1.5 m. Elle est inférieure à l'incertitude estimée qui était de 0.39 m à 1 500 m.

La profondeur de l'AUV est estimée via la formule d'hydrostatique qui dépend des propriétés de l'eau de mer (température, salinité, conductivité, pression), la latitude, la pression atmosphérique, la marée, etc. (Voir Figure 23). Ces résultats sont très satisfaisants, car les incertitudes de mesure estimées sont supérieures aux exactitudes effectivement atteintes, tout en ayant un ordre de grandeur similaire.

Conclusion

L'objectif de cette étude était de développer un outil d'estimation d'erreur appliqué aux systèmes de levé de surface et sous-marin. Une étude approfondie sur développement des algorithmes d'estimation du bilan d'erreur de ces systèmes a été faite. Elle a permis :

- D'améliorer les coordonnées de la position d'une sonde bathymétrique acquise par des systèmes de levé de surface et sous-marin. La principale valeur ajoutée est :
 - l'implémentation claire des équations de positionnement d'une sonde bathymétrique acquise par ces systèmes,
 - la bonne prise en compte des angles de désalignement entre la centrale inertielle et le sondeur. Cette amélioration a permis de savoir qu'un désalignement de cap entre la centrale inertielle et le sondeur influence la profondeur d'une sonde bathymétrique.
- D'améliorer les algorithmes d'estimation du bilan d'erreur appliqués aux systèmes de levé hydrographiques. La principale valeur ajoutée est :
 - la prise en compte de tous les termes de covariance entre les



Tableau 2. Exactitudes et incertitudes de mesure verticale de quelques points du réseau LBL

Frame ID	Profondeur (As Built)	Exactitude verticale	Incertitude vertical à 2 σ (95%)
DAL 16	1411.95 m	0.35	<1.61 m
DAL 16	1411.95 m	0.32	<1.61 m
DAL 59	1179.45 m	0.42	< 1.49 m
DAL 64	1223.89 m	0.42	< 1.51 m
DAL 90	1276.05 m	0.23	<1.54 m
DAL 90	1276.05 m	0.06	< 1.54 m
GIR 47	1303.69 m	0.95	< 1.55 m

erreurs par la différentiation et par propagation des erreurs,

- la prise en compte de la latence entre tous les capteurs.

A partir de ces algorithmes, un outil d'estimation du bilan d'erreur a été implémenté. Cet outil sera utilisé par les ingénieurs de Total afin de contrôler la qualité des données hydrographiques. A la suite de cette étude, des projets axés sur l'estimation des incertitudes des données issues des différentes procédures (correction du profil célérité, réduction de sondes bathymétriques, calibration des bras de leviers et de la latence, etc.) et capteurs devront être étudiés afin de mieux qualifier les données. Un grand merci à tous les membres de la communauté hydrographique et topographique impliqués dans ce projet, pour leur soutien et excellent conseil. ●

Contacts

Geraud NAANKEU WATI

Ingénieur Hydrographe ENSTA Bretagne (PFE chez Total en 2015/ 2016)
Spécialiste en positionnement et géomatique chez SUB-C-MARINE
geraud.naankeu@ensta-bretagne.org / gnw@subcmarine.com

Jean-Baptiste GELDOF

Ingénieur géomètre-topographe chez TOTAL EP.
jean-baptiste.geldof@total.com

Pierre BOSSER

Enseignant-Chercheur à l'ENSTA Bretagne
pierre.bosser@ensta-bretagne.fr

Bibliographie

1. Articles - revues à comité de relecture

- Naankeu-Wati, G., Geldof, J-B., Seube, N., 2016. *Error Budget Analysis for surface and underwater survey systems: International Hydrographic Review.*

2. Articles - actes de conférences

- Seube, N., Levilly, S. & Keyetieu, R., 2015. *Automatic 3D Bore-sight and Latency Estimation of IMU and Multi-Beam Echo Sounder Systems.*

3. Ouvrages

- Debesse, N., 2013, *Bathymétrie. Sondeurs, traitement de données, modèles numériques de terrain.* Paris : Ellipses Editions Marketing S.A.

- Farrell, J., 2008, *Aided Navigation: GPS with High Rate Sensors.* New York: McGraw-Hill.

- Groves, P. D., 2013, *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems,* Second Edition ed. Houston: Artech House.

- Lurton, X., 2001, *Précision de mesure des sonars bathymétrique en fonction du rapport signal/bruit.*

4. Rapports techniques

- Bjørn, J. & Einar, B., 2005, *Time Referencing in Offshore Survey Systems.*

- Hagen, O. K., 2006. *TerrLab - a generic simulation and post-processing tool for terrain referenced navigation, Norway.*

- International Federation of Surveyors, 2006, *FIG Guide on the development of Vertical Reference Surface for Hydrography.*

- ICGM, 2008, *Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement.*

5. Cours

- Legris, M., 2014, *Cours de bathymétrie à l'ENSTA Bretagne, Brest.*

- Seube, N., 2014, *Cours d'hydrographie à l'ENSTA Bretagne, Brest.*

6. Mémoires

- Hare, R., 2001, *Error Budget Analysis for US NAVAL Oceanographic Office (NAVOCEANO) Hydrographic Survey Systems,* Mississippi: University Mississippi.

- Naankeu-Wati, G., 2015, *Estimation of error budget for hydrographic survey systems : ENSTA Bretagne /Total*

- Naankeu-Wati, G., 2016, *Computation of AUV trajectory for hydrographic surveys : Université de Bretagne occidentale /Total*

7. Articles consultables en ligne

- Kongsberg, High Precision Acoustic Positioning - HIPAP, consulté le 20 juillet 2015, [http://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0397.nsf/AllWeb/D3F9B693E19302BBC12571B6003DD0AE/\\$file/HIPAP_Family_brochure_v3_lowres.pdf?OpenElement](http://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0397.nsf/AllWeb/D3F9B693E19302BBC12571B6003DD0AE/$file/HIPAP_Family_brochure_v3_lowres.pdf?OpenElement)

ABSTRACT

To install subsea infrastructures (pipelines, subsea wells, etc.) necessary for the development of hydrocarbon resources, TOTAL regularly contracts hydrographic companies to perform hydrographic surveys. These companies mainly use two types of hydrographic survey systems: surface and underwater survey systems. However, the error budget estimation of these systems is a phase very important in order to better identify the parameters which affect the data quality and verify whether the different surveys meet the minimum requirements proposed by International Hydrographic Organization (IHO) and TOTAL. This paper gives an in-depth analysis on the error budget estimation of surface and underwater survey systems by presenting the state-of-the-art of these systems and proposing new algorithms of error budget estimation for these systems. These algorithms are based on clear functional models of these systems, by taking particularly into account of the covariance terms between errors, misalignment angles between the inertial measurement unit and the sounder and the latency between the sensors.