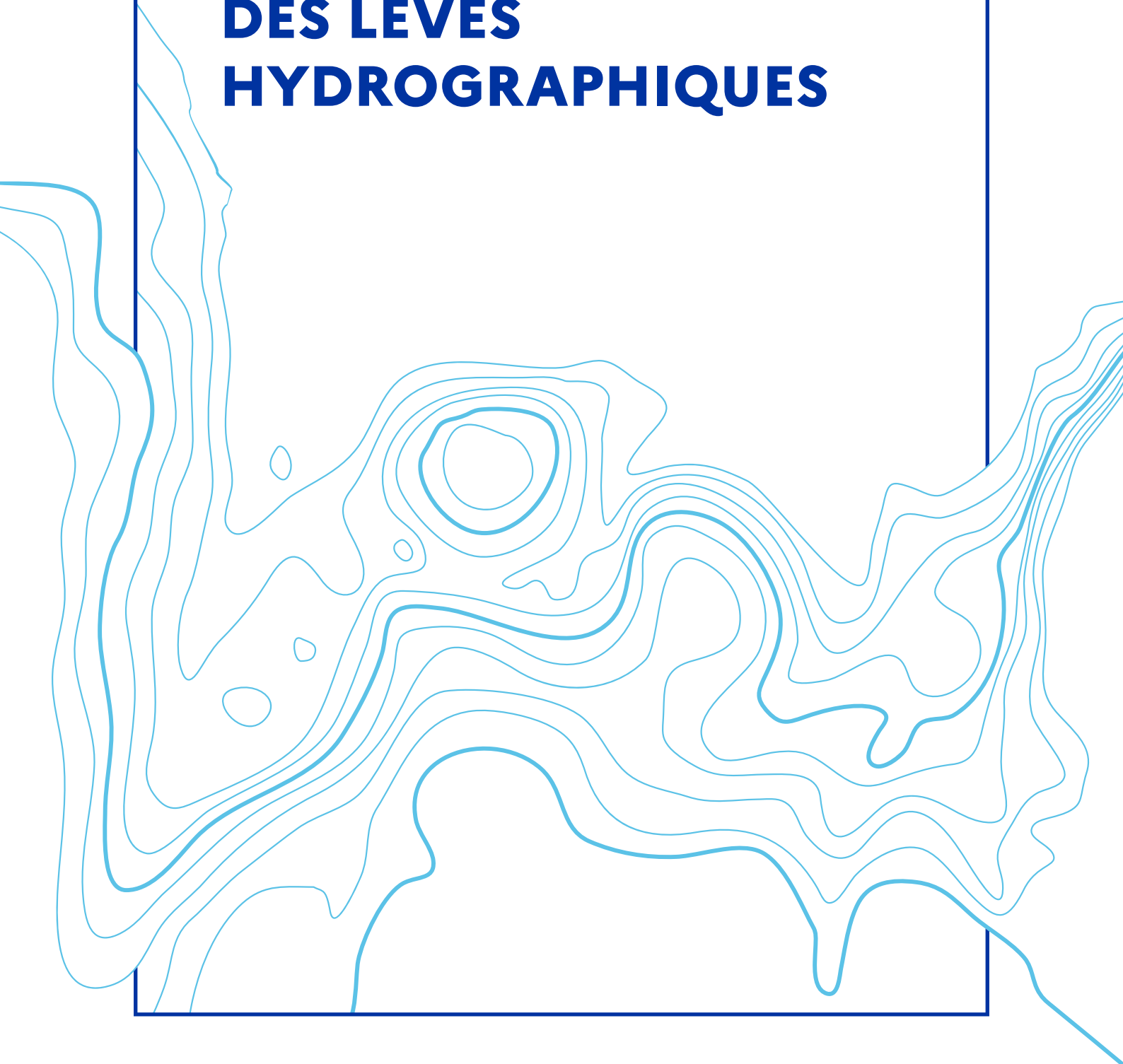


GUIDE DU SHOM POUR LA RÉALISATION DES LEVÉS HYDROGRAPHIQUES



GLOSSAIRE

AFHy	Association francophone d'hydrographie
CEI (ou IEC)	Commission électrotechnique internationale
COI (ou IOC)	Commission océanographique intergouvernemental
GNSS	Global navigation satellite system – Système de navigation par satellite
IHT	Incertitude horizontale totale
IMCA	International marine contractors association
IP	Instruction particulière
IT	Instructions techniques
IVT	Incertitude verticale totale
LiDAR	Light detection and ranging – télédétection par laser
MNT	Modèle Numérique de Terrain
OHI (ou IHO)	Organisation hydrographique internationale
OMI (ou IMO)	Organisation maritime internationale
QC	Quality check – Test de qualité
RAM	Références altimétriques marines
REFMAR	Réseau de référence des observations marégraphiques
RSM	Renseignements sur la sécurité maritime
SH	Service hydrographique
Shom	Service national d'hydrographie et d'océanographie
SMF	Sondeur multifaisceau
UIT (ou ITU)	Union internationale des télécommunications
UNESCO	Organisation des nations unies pour l'éducation, la science et la culture
ZH	Zéro hydrographique

TABLE DES MATIÈRES

1 - INTRODUCTION	6
1.1 - Rôle de l'hydrographie	7
1.2 - Définition d'un levé	7
1.3 - Recommandations pour la réalisation des levés	9
1.4 - Types de levés hydrographiques	11
2 - ORGANISATION ET CONDUITE D'UN LEVÉ	14
2.1 - Étapes d'un levé	15
2.2 - Documents rédactionnels	15
3 - APPLICATION DES NORMES	18
3.1 - Comment atteindre les objectifs des normes ?	19
3.2 - Détermination des incertitudes horizontale et verticale	19
3.3 - Maîtrise des incertitudes horizontale et verticale	22
3.4 - Couverture bathymétrique	23
3.5 - Exploration complète - recherche	24
4 - PRÉPARATION DU LEVÉ	26
4.1 - Références horizontales et verticales	27
4.2 - Marée	27
4.3 - Positionnement	29
4.4 - Détermination du réseau de lignes (ou profils)	30
4.5 - Choix des matériels « annexes »	30
4.6 - Reconnaissance sur zone	34
5 - RÉALISATION DU LEVÉ	36
5.1 - Opérations en temps réel	37
5.2 - Traitement en temps peu différé	39
5.3 - Planification et réalisation des recherches.	40
6 - TRAITEMENT DES DONNÉES	42
6.1 - Création du modèle numérique de terrain	43
6.2 - Traitement de la localisation	43
6.3 - Traitement de la célérité	44
6.4 - Validation de l'attitude et du cap	45
6.5 - Réduction de la marée	45
6.6 - Traitement de la bathymétrie	46
6.7 - Contrôle qualité (QC-test)	52
7 - INFORMATION NAUTIQUE	54
7.1 - Signalement des dangers pour la navigation	55
7.2 - Transmission des données au Shom	55
ANNEXES	56



AVANT-PROPOS

Le Shom est un établissement public de l'État à caractère administratif (EPA) sous tutelle du ministère des Armées et des Anciens combattants (MINARM).

Service national d'hydrographie et d'océanographie, le Shom a pour raison d'être de faire progresser la connaissance de l'environnement physique marin au profit des forces armées, de la sécurité de la navigation, des usages en mer et de la protection de l'océan.

La mission du Shom définie par le Code de la défense est « de connaître et de décrire l'environnement physique marin dans ses relations avec l'atmosphère, avec les fonds marins et les zones littorales, et d'en prévoir l'évolution. Il assure la diffusion des informations correspondantes ».

L'exercice de cette mission se décline en trois finalités :

1. l'exercice des attributions de l'État en matière d'hydrographie nationale, pour satisfaire les besoins de la navigation de surface, dans les eaux sous juridiction française et dans les zones placées sous la responsabilité cartographique de la France ;
2. le soutien de la Défense reposant sur l'expertise apportée par le Shom dans les domaines hydrographiques et océanographiques (HO) à la préparation des systèmes d'armes et de commandement, et au soutien opérationnel délivré aux Forces ;
3. le soutien des politiques publiques, et plus généralement des acteurs, de la mer et du littoral, pour lesquels le Shom valorise ses produits et son expertise, notamment dans la perspective du développement durable des activités humaines en mer.

Héritier d'une histoire de plus de 300 ans, son statut actuel fut créé par le décret n° 2007-800 du 11 mai 2007, puis inséré dans le code de la défense aux articles R3416-1 à R3416-30.

Il exerce les attributions de l'État en matière d'hydrographie nationale dans les zones sous juridiction nationale et dans les zones où la France exerce des responsabilités du fait d'engagements internationaux particuliers, en assurant le recueil, l'archivage et la diffusion des informations officielles nécessaires à la navigation¹.

Les services et établissements publics de l'État et des collectivités territoriales et de la Nouvelle-Calédonie réalisant ou faisant réaliser des levés bathymétriques et géophysiques dans les zones sous juridiction nationale sont tenus de communiquer au Shom les données recueillies ainsi que les éléments nécessaires à leur exploitation. Une convention passée entre le Shom et le service, la collectivité ou l'établissement public concerné précise les modalités, notamment financières, de mise à disposition et de réutilisation des données.

Toute autorisation donnée à des organismes français et étrangers de réaliser des recherches dans les eaux sous juridiction nationale est subordonnée à l'engagement de communiquer au Shom les données recueillies ainsi que les éléments nécessaires à leur exploitation².

Le présent guide a pour objectif de permettre aux hydrographes réalisant des levés hydrographiques de s'inspirer des pratiques et de l'expérience du Shom en matière d'hydrographie ou à tout lecteur d'en comprendre les enjeux.

¹ - Extrait du code de la défense, article R3416-3

² - Extrait du code de la défense, article R3416-6

1 - INTRODUCTION

1.1 - Rôle de l'hydrographie	7
1.2 - Définition d'un levé	7
1.3 - Recommandations pour la réalisation des levés	9
1.4 - Types de levés hydrographiques	11



1.1 - Rôle de l'hydrographie

L'hydrographie, la cartographie marine, les aides à la navigation et la diffusion des Renseignements de Sécurité Maritime (RSM) sont des facteurs clés pour la sécurité maritime et la protection du milieu marin. Ce sont également des éléments essentiels pour le développement de l'infrastructure d'un pays, impliquant non seulement les ports et le transport maritime mais également l'exploitation des ressources marines et la protection de l'écologie marine. Chaque pays maritime est responsable de la cartographie de ses zones maritimes ainsi que de la circulation des renseignements nautiques appropriés.

La définition de l'hydrographie établie par l'Organisation Hydrographique Internationale (OHI) associe étroitement l'hydrographie à la sécurité de la navigation :

«L'hydrographie est la branche des sciences appliquées traitant du mesurage et de la description des éléments physiques des océans, des mers, des zones côtières, des lacs et des fleuves, ainsi que de la prédiction de leur changement dans le temps, essentiellement dans l'intérêt de la sécurité de la navigation et à l'appui de toutes les autres activités maritimes, incluant le développement économique, la sécurité et la défense, la recherche scientifique et la protection environnementale.»

L'OHI reconnaît également que l'hydrographie joue un rôle vital dans toutes les autres activités maritimes. L'hydrographie sous-tend les activités humaines dans, sur et sous la mer incluant :

- la sécurité de la navigation ;
- le commerce maritime et la maîtrise d'un transport efficient et sûr ;
- la défense et la sécurité maritime ;
- la gestion et le développement de la zone côtière ;
- l'exploration et l'exploitation des ressources marines : minéraux et pêche ;
- le tourisme maritime ;
- la protection et la gestion environnementale ;
- la recherche et le sauvetage ;
- les frontières et la politique maritime ;
- les sciences de la mer ;
- les infrastructures de données spatiales maritimes ;
- la modélisation des tsunamis et des risques d'inondations ;
- les loisirs nautiques et la navigation de plaisance.

En France, le Shom est responsable de l'hydrographie au sens de la convention SOLAS¹ pour les zones dans la juridiction de l'État. Pour certaines zones locales comme les ports, la responsabilité hydrographique est attribuée à des acteurs locaux (région, département, commune, grand port).

1.2 - Définition d'un levé

On appelle de manière générale « levé » toute campagne d'acquisition de données à la mer.

En pratique, on distingue :

- les levés hydrographiques qui sont destinés à la cartographie marine et à la sécurité de la navigation ou orientés principalement autour de la bathymétrie ;
- les campagnes d'océanographie qui sont axées sur l'étude des phénomènes physiques ou biologiques dans la colonne d'eau ;
- les levés géophysiques dont les études portent sur les phénomènes physiques terrestres.

1.2.1 - Levés hydrographiques

Les levés hydrographiques sont axés sur la détermination de la profondeur dans la zone levée, la détection des relèvements du fond dangereux pour la navigation et la mise à jour de l'information nautique environnante pour l'entretien ou la création des documents nautiques (cartes, instructions nautiques, livre des feux, etc.) traitant de la zone levée.

¹ - Convention SOLAS, chapitre 5, règle 9

Un levé hydrographique comprend :

- des travaux préparatoires :
 - travaux de géodésie : positionnement de stations de référence GNSS pour la localisation précise des porteurs, mesures de nivellement pour le contrôle des observatoires de marée ;
 - mesures de marée : mise en place et exploitation de marégraphes permanents ou d'observatoires de marée temporaires.
- le levé hydrographique à proprement parler :
 - levés bathymétriques : mesure de la profondeur (sondage) au SMF ou sondeur vertical, mise en œuvre de sonar à balayage latéral pour la détection des relèvements, mise en œuvre de magnétomètres remorqués pour la classification (identification) des épaves, utilisation des techniques du LiDAR ou satellitaires pour la détermination des profondeurs ;
 - mesures hydrologiques : mesures de température, de conductivité ou de célérité du son nécessaires à la mesure précise de la profondeur par les sondeurs acoustiques ;
 - plongées : pour cotation et identification précise de relèvements du fond ;
 - étude de la nature des fonds : par l'imagerie, les mesures à l'aide de sondeur (ou pénétrateur) de sédiment et les prélèvements, dans le but d'estimer la tenue des mouillages ou de quantifier les risques en cas d'échouage.
- des mesures complémentaires :
 - géodésie pour le positionnement de points remarquables à terre : amers ou calage de photographies aériennes ou d'images satellites pour la cartographie ;
 - positionnement du balisage fixe et flottant ;
 - mesures de courant au point fixe : installation de courantomètres ;
 - photographies : aériennes ou depuis la mer, pour les instructions nautiques.

À l'issue du levé, les données sont exploitées selon les standards hydrographiques (internationaux ou dérivés). On parle alors de « rédaction » : c'est la mise en forme des données pour intégration dans des bases de données et rédactions de livrables (plans, rapports, etc.).

1.2.2 - Campagne d'océanographie

Les campagnes d'océanographie sont dédiées à l'étude des phénomènes physiques (essentiellement température, salinité, courants et clarté de l'eau), chimiques (oxygène dissout, sels nutritifs, etc.) ou biologiques (teneur en plancton végétal ou animal) dans la colonne d'eau.

Les mesures sont réalisées le long de radiales, destinées à obtenir une « coupe verticale » de l'océan pour le phénomène étudié, ou en station, de sorte à observer la variation des conditions hydrologiques en un point donné au cours d'une période suffisamment longue pour observer la totalité des variations.

Les campagnes comprennent en général la mise à l'eau de flotteurs, de mouillages ou d'appareils de mesures autonomes restituant leurs données par satellite ou lors de leur relevage plusieurs mois après leur installation.

La diversité des capteurs mis en œuvre au cours des campagnes d'océanographie est telle qu'il n'est pas réaliste d'en établir une liste exhaustive.

1.2.3 - Levés géophysiques

Les levés géophysiques ont pour objectif l'étude des phénomènes physiques terrestres qui expliquent la nature et la morphologie du fond, ou en découlent. Ils mettent en œuvre des techniques similaires à celles des levés hydrographiques, complétés par des capteurs spécifiques.

Les mesures réalisées sont :

- mesures bathymétriques à haute résolution (SMF) pour détermination de la morphologie des fonds ;
- mesures d'imagerie acoustique (SMF ou sonar à balayage latéral) : aide à la détermination de la nature des sédiments de surface ;
- prélèvements du fond : en surface (carottier interface, bennes de prélèvements) ou en profondeur (carottage) pour la détermination précise des natures de sédiment ;
- mesures au sondeur pénétrateur de sédiment (basse fréquence) : détermination de la nature et de la profondeur des différentes couches sédimentaires et rocheuses ;
- mesures au sondeur classificateur de sédiment : estimation de la nature des sédiments de surface ;

- mesures de champ de pesanteur : gravimétrie marine. Le champ de pesanteur est fortement corrélé à la morphologie du fond et à la nature de la croûte terrestre ;
- mesures du champ magnétique terrestre par magnétomètre, remorqué ou non. Le champ magnétique est corrélé à la nature de la croûte terrestre. Les anomalies du champ peuvent permettre de détecter des objets.

1.3 - Recommandations pour la réalisation des levés

1.3.1 - « Publication S-44 » de l'OHI

La 6^e édition de la norme S-44 de l'OHI a été publiée en 2020.

La publication S-44 vise à fournir un ensemble de normes pour les levés hydrographiques, utilisés principalement pour compiler les cartes de navigation essentielles à la sécurité de la navigation, à la connaissance et à la protection de l'environnement marin. Elle précise les normes minimales à atteindre en fonction de l'utilisation prévue.

Il s'agit de la référence internationale pour garantir la qualité des levés hydrographiques.

Les différents chapitres de la « publication S-44 » traitent :

- de la classification des levés pour la sécurité de la navigation ;
- du positionnement horizontal et vertical ;
- des profondeurs, couverture bathymétrique, éléments et nature du fond ;
- des hauteurs d'eau et courants ;
- des levés au-dessus du niveau de référence vertical ;
- des métadonnées ;
- des tableaux et matrice de spécification.

Y figurent également des directives relatives :

- à l'utilisation de la matrice ;
- au contrôle de la qualité ;
- au contrôle de qualité a priori et a posteriori ;
- aux considérations sur la bathymétrie maillée.

Référence	Critères	Ordre 2	Ordre 1b	Ordre 1a	Ordre spécial	Ordre exclusif
Chapitre 1	Description des zones (En général)	Zones dans lesquelles une description générale des fonds est jugée suffisante.	Zones dans lesquelles la profondeur d'eau sous quille n'est pas considérée comme problématique compte tenu du type de navires de surface qui devraient y transiter.	Zones dans lesquelles la profondeur d'eau sous quille n'est pas considérée comme critique, mais où des éléments impactant la navigation de surface peuvent exister.	Zones dans lesquelles la quille est critique	Zones dans lesquelles une <u>profondeur d'eau sous quille</u> minimale stricte et des contraintes de manœuvrabilité s'appliquent
Section 2.6	Profondeurs THU [m] + [% de la profondeur]	20 m + 10% de la profondeur *Ba5, Bb2	5 m + 5% de la profondeur *Ba8, Bb3	5 m + 5% de la profondeur *Ba8, Bb3	2 m *Ba9	1 m *Ba10
Section 2.6 Section 3.2 Section 3.2.3	Profondeurs TVU (a) [m] et (b)	a = 1,0 m b = 0,023 *Bc7, Bd4	a = 0,5 m b = 0,013 *Bc8, Bd6	a = 0,5 m b = 0,013 *Bc8, Bd6	a = 0,25 m b = 0,0075 *Bc10, Bd8	a = 0,15 m b = 0,0075 *Bc12, Bd8
Section 3.3	Détection d'éléments [m] ou [% de la profondeur]	Non demandé	Non demandé	Éléments cubiques > 2 m jusqu'à 40 m de fond ; 10% de la profondeur au-delà de 40 m *Be5, Bf3 au-delà de 40m	Éléments cubiques > 1 m *Be6	Éléments cubiques > 0,5 m *Be9
Section 3.4	Recherche d'éléments [%]	Recommandée mais non obligatoire	Recommandée mais non obligatoire	100% *Bg9	100% *Bg9	200% *Bg12
Section 3.5	Couverture bathymétrique [%]	5% *Bh3	5% *Bh3	≤ 100% *≤ Bh9	100% *Bh9	200% *Bh12

Extrait de la « publication S-44 6^e édition » de l'OHI.

Pour l'IVT, la formule est donnée, à la profondeur P, par : $\sqrt{[a^2 + (b.P)^2]}$.

La conformité à un ordre impose impérativement que l'incertitude ou la valeur de chaque critère respecte les spécifications de l'ordre considéré et cela pour toute la zone levée.

1.3.2 - La norme Shom

La « publication S-44 »² de l'OHI est une norme minimale ; aussi certains services hydrographiques ont élaboré des normes complémentaires afin de la préciser et la compléter ou de répondre à des besoins qui leur sont spécifiques.

Ainsi, la norme Shom a pour objectifs :

- de définir des types de levés bathymétriques à partir des critères de la « publication S-44 » ;
- de définir les normes à respecter sur chacun des critères qui influencent la qualité du levé ;
- d'indiquer les principales étapes du traitement et de la rédaction ;
- de décrire les procédures de contrôle de la qualité au niveau des producteurs de données.

Les levés concernés sont ceux réalisés à l'aide de sondeurs acoustiques monofaisceau ou SMF avec la mise en œuvre en parallèle de capteurs annexes, ainsi que les levés réalisés par lasers aéroportés. Les données de topographie acquises dans le but de compléter les levés bathymétriques ainsi que les mesures de profondeur réalisées par des plongeurs au moyen d'un profondimètre entrent également dans le cadre de cette norme.

Remarque : dans la suite de ce document, seule la norme Shom est considérée.

1.3.3 - Autres normes

L'industrie off-shore a développé, à partir de la « publication S-44 », sa norme (IMCA S 003) pour ses levés. En effet, les tâches spécifiques de ce type de travaux peuvent inclure des levés géophysiques et hydrographiques à haute résolution pour le tracé d'un pipeline et des levés géotechniques afin de concevoir les fondations des structures à installer sur le fond marin. Divers équipements complexes sont utilisés pour ces travaux, comme les ROV et les AUV, ainsi que des techniques de pointe, notamment l'acoustique, les levés sismiques, magnétiques et électriques.

L'AFHy a également publié ses recommandations (basées sur la « publication S-44 ») pour la réalisation des levés bathymétriques.

De nombreux services hydrographiques établissent également leur propre norme dérivée de la « publication S-44 », pouvant introduire de nouveaux critères ou créer des levés plus contraignants que ceux définis par l'OHI. À ce titre, la matrice apparue dans la sixième édition est un outil destiné à la définition de normes dérivées, plus ou moins strictes.

Par ailleurs, afin d'étendre les possibilités de spécifications de levés au-delà des Ordres destinés à la sécurité de la navigation, pour des besoins liés à l'archéologie marine ou à des mesures liées à l'environnement par exemple, la matrice a été conçue afin de pouvoir s'adapter aux exigences de levés d'objectifs différents.

Autres textes importants du domaine :

- arrêté du 16 septembre 2003 (Publié au JORF n°252 du 30 octobre 2003) portant sur les classes de précision applicables aux catégories de travaux topographiques réalisés par l'État, les collectivités locales et leurs établissements publics ou exécutés pour leur compte ;
- décret n°2006-272 du 3 mars 2006 modifiant le décret n°2000-1276 du 26 décembre 2000 relatif aux conditions d'exécution et de publication des levés de plans entrepris par les services publics.

En ce qui concerne les modalités d'emploi des instruments scientifiques, il est difficile de faire un état des lieux complet pour ce qui concerne les normes en lien avec l'hydrographie car il en existe pour chaque type de matériel, chaque type d'utilisation voire chaque pays. Ainsi par exemple concernant uniquement le système de positionnement GNSS, il existe plusieurs normes de performance, définies soit par l'UIT, l'OMI, la CEI ou l'IMCA (S 015).

2 - https://iho.int/uploads/user/pubs/standards/s-44/S-44_Edition_6.2.0_FR.pdf

1.4 - Types de levés hydrographiques

La norme Shom définit différents types de levés hydrographiques :

Type de levé	Zone critique (Hauteur d'eau sous quille minimale et conditions de navigabilité critiques)	Zone d'intérêt particulier (Conditions de navigabilité moins critiques qu'en zone critique)	Levé côtier (Conditions de navigabilité non critiques)	Levé grands fonds pour l'hydrographie générale	Levé en transit	Levé avant dragage
Gamme de profondeur	De la côte à 40 mètres	De la côte à 100 mètres	De la côte à 200 mètres	A partir de 100 mètres	-	-
Incertitude horizontale maximale	Celle préconisée par l'ordre spécial S-44	Celle préconisée par l'ordre 1a S-44	Celle préconisée par l'ordre 1b S-44	Celle préconisée par l'ordre 2 S-44	Celle préconisée par l'ordre 2 S-44	Celle préconisée par l'ordre 1a S-44
Incertitude verticale maximale	Celle préconisée par l'ordre spécial S-44	Celle préconisée par l'ordre 1a S-44	Celle préconisée par l'ordre 1b S-44	Celle préconisée par l'ordre 2 S-44	Celle préconisée par l'ordre 2 S-44	Celle préconisée par l'ordre spécial S-44
Couverture bathymétrique au sens de la S-44	Conforme aux recommandations de l'ordre spécial S-44 : couverture complète requise.	Conforme aux recommandations de l'ordre 1a S-44 : couverture complète non requise.	Conforme aux recommandations de l'ordre 1b S-44 : couverture complète non requise	Conforme aux recommandations de l'ordre 2 S-44 : couverture complète non requise	Non spécifié. Routes à choisir en fonction de la connaissance hydrographique de la zone traversée.	Couverture bathymétrique complète
Exploration complète	Requise par double insonification. Conforme aux capacités de détection prescrites par l'ordre spécial S-44	Requise Conforme aux capacités de détection prescrites par l'ordre 1a S-44	Non requise	Non requise	Non requise	Non requise
Critère de recherche**	Relèvements détectés dépassant le fond environnant* d'au moins 0,5 m et d'au moins 5% de sa profondeur et relèvements de dimensions supérieures ou égales à 1x1x1 m.	Relèvements détectés dépassant le fond environnant* d'au moins 1 m et d'au moins 5% de sa profondeur et relèvements de dimensions supérieures ou égales à 2x2x2 m jusqu'à 40 m et à 10% de la profondeur au-delà.	Pas de recherche	Pas de recherche	Pas de recherche	Pas de recherche

* L'environnement en question est à considérer dans un rayon égal à la profondeur moyenne du lieu.

** Les critères de recherches déterminent les relèvements détectés devant faire l'objet d'une caractérisation. Ils n'imposent pas systématiquement de levés de recherche spécifique.

1.4.1 - Levé de zone critique

Ce type de levé est prescrit pour les zones caractérisées par un trafic maritime régulier où les fonds présentent un danger potentiel et/ou des profondeurs critiques vis-à-vis des navires fréquentant ces zones. Il s'applique en particulier dans les ports, les chenaux d'accès, zones de mouillage et les voies recommandées, avec profondeur sous quille minimale ou par fonds potentiellement dangereux et par fonds inférieurs à 40 mètres.

Ce type de levé découle des prescriptions de l'ordre spécial de la « publication S-44 ».

1.4.2 - Levé de zone d'intérêt particulier

Dans certaines zones (jusqu'à des profondeurs pouvant comporter des relèvements de fond inférieurs à 40 mètres) où les conditions de navigabilité sont moins critiques, les contraintes du levé peuvent être moins fortes : ports, chenaux d'accès, zones de mouillage et voies recommandées ne rentrant pas dans les critères du §1.4.1.

Ce type de levé correspond généralement à des profondeurs en deçà de 100 mètres.

Ce type de levé découle des prescriptions de l'ordre 1a de la « publication S-44 ».

1.4.3 - Levé côtier

Les levés côtiers sont les levés de la côte jusqu'à l'isobathe des 200 mètres ne rentrant pas dans les catégories précédentes.

Ce type de levé, pour lequel l'exploration complète des fonds n'est pas requise, doit être limité aux zones pour lesquelles une connaissance générale des fonds est suffisante.

Ce type de levé découle des prescriptions de l'ordre 1b de la « publication S-44 ».

1.4.4 - Levé grands fonds pour l'hydrographie générale

Levés destinés à la navigation de surface dans des zones où les profondeurs sont suffisamment importantes pour qu'une description générale des fonds soit considérée comme suffisante.

Type de levé à limiter aux fonds supérieurs à 100 m. Passé cette profondeur, l'existence de relèvements de fond artificiels ou naturels pouvant engager la sécurité de navigation de surface devient en effet peu probable.

Ce type de levé découle des prescriptions de l'ordre 2 de la « publication S-44 ».

1.4.5 - Levé en transit

Lors des trajets de ralliement aux zones de travail, les instruments de mesures peuvent être en fonction. L'objectif est alors d'améliorer la connaissance hydrographique générale des zones traversées.

1.4.6 - Levé de reconnaissance

Dans certaines régions incomplètement ou non hydrographiées, des levés de reconnaissance peuvent être réalisés afin de déterminer si la zone sondée est potentiellement navigable (et nécessitera éventuellement des travaux hydrographiques ultérieurs) ou au contraire si elle présente des dangers qui justifient de sa définition comme zone non navigable.

Les spécifications à adopter pour la réalisation des levés sont fonction de l'objectif final du levé (définition d'une voie recommandée, levé côtier...). Elles seront donc définies en se rapportant à l'un des cas décrits ci-dessus.

1.4.7 - Levé avant dragage

L'objectif de ce type de levé n'est pas d'assurer directement la sécurité de la navigation mais de fournir une estimation correcte de la quantité de matériaux à enlever lors d'un dragage. Il ne donne pas lieu à une rédaction aussi poussée que les autres levés puisque les informations recueillies sont amenées à devenir rapidement caduques.

Dans la mesure où les relèvements dangereux doivent disparaître au cours du dragage, les travaux de détection et de cotation systématiques de l'ensemble des relèvements ne sont pas requis. Les spécifications peuvent être ajustées au besoin réel du client.

1.4.8 - Levé de contrôle

Contrôle de levés antérieurs :

L'objectif du levé est de vérifier, sur un échantillonnage réduit des sondes, que la bathymétrie n'a pas évolué par rapport aux informations connues et portées à la connaissance des usagers. Le levé de contrôle peut alors conduire à devoir programmer un nouveau levé si l'évolution observée impacte la sécurité de la navigation.

Un levé de contrôle doit être réalisé avec des critères d'incertitudes horizontale et verticale similaires ou meilleurs que le levé de référence (concerne en particulier les zones fortement évolutives).

Contrôle après dragage :

L'objectif du levé est de contrôler la qualité du dragage, d'une part pour assurer la sécurité de la navigation, et d'autre part éventuellement pour contrôler que les relèvements dangereux ont bien été supprimés et calculer ultérieurement le volume dragué. Les spécifications d'un levé de zone critique devront alors être respectées.

Dans certains cas, le contrôle après dragage n'a pas pour objectif la sécurité de la navigation (dragage avant implantation d'infrastructures sous-marines...). Les spécifications à respecter pourront alors être assouplies et viser des objectifs moins contraignants.

1.4.9 - Levé d'infrastructure

Les levés d'infrastructures ne visent pas à garantir la sécurité de la navigation mais sont utilisés pour les inspections d'ouvrages (port, pont, barrage, fondation de structures pour l'industrie offshore, etc.) afin d'en estimer l'état, anticiper les dégradations et prévoir éventuellement des travaux d'entretien.

Les techniques utilisées peuvent être similaires à celles de l'hydrographie « classique » (SMF, caméras, LiDAR, etc.). Les conditions d'utilisation des matériels sont souvent très différentes de l'hydrographie « classique » (visée des sondeurs plus proches de l'horizontale) et il faut alors faire face à des effets perturbateurs importants tels que des trajets multiples avec la surface ou bien une grande variabilité de la célérité.

Ce type de levé n'est pas traité dans ce document.

2 - ORGANISATION ET CONDUITE D'UN LEVÉ

2.1 - Étapes d'un levé	15
2.2 - Documents rédactionnels	15

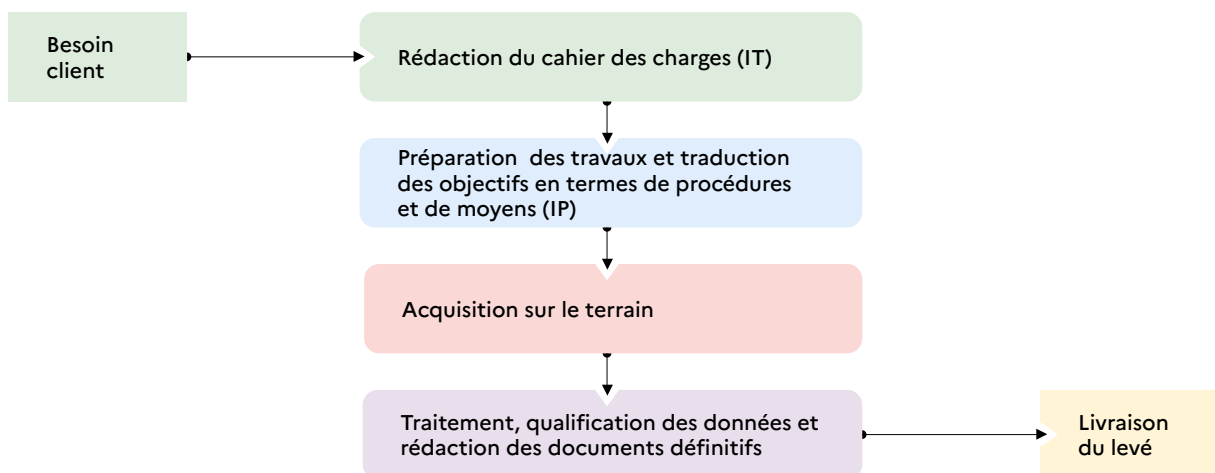


2.1 - Étapes d'un levé

Les différentes étapes d'un levé sont :

- recensement du besoin : IT (ou cahier des charges) ;
- préparation du levé ;
- définition précise des travaux à effectuer (IP) ;
- administration du levé ;
- acquisition à la mer ;
- validation des mesures ;
- recherches de hauts fonds et d'obstructions ;
- exploitation rapide des dangers nouveaux ;
- rédaction du levé ;
- établissement du rapport du levé (rapport particulier) ;
- envoi des données et du rapport.

Le déroulement d'un levé est représenté schématiquement par l'organigramme détaillé, présenté en [annexe 1](#).



2.2 - Documents rédactionnels

2.2.1 - Instructions techniques (ou cahier des charges)

Les instructions techniques (IT) du levé constituent la spécification client d'un levé en réponse aux besoins hydrographiques dans une zone donnée. L'ensemble des éléments utiles à la réalisation des levés (zones, spécifications, livrables, etc.) doit y être intégré :

- objectifs des levés en les priorisant ;
- type de levé ;
- emplacement ;
- surface à sonder ;
- profondeurs moyennes ;
- variabilité des fonds ;
- observations océanographiques ;
- capacité de détection ;
- normes à respecter ;
- délai à respecter : date de livraison du levé à respecter, contrainte de temps ;
- particularités (conditions météorologiques, densité des sondes...) ;
- résultats et documents attendus : signaler toute particularité ou dérogation aux normes dans la stratégie de rédaction ;
- exploitation : indiquer quelle exploitation principale est prévue à l'issue des levés (mise à jour

des documents nautiques, modélisation, production de MNT, livraison d'une prestation, etc.) et le niveau de protection ;

- transmission des résultats : documents à transmettre (papier, numérique), notamment qui est responsable de l'envoi aux États souverains en cas de levés dans des eaux sous juridiction étrangère. Fourniture de documents intermédiaires ou provisoires etc.

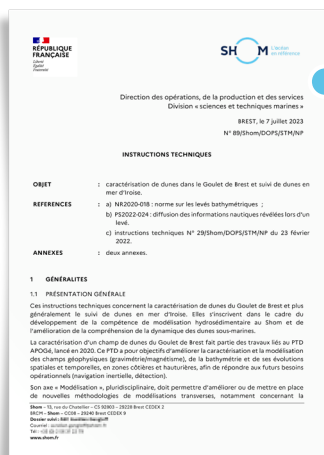
Théoriquement les IT ne définissent pas les moyens à mettre en œuvre, ni les paramètres à appliquer pour parvenir aux spécifications requises.

Le sommaire d'une IT est fourni en exemple en [annexe 8](#).

2.2.2 - Instruction particulière

L'instruction particulière (IP) est un document fondamental qui définit les objectifs précis pour la conduite du levé :

- les généralités précisent le contexte général, les objectifs à atteindre (scientifiques, opérationnels, durée, le personnel, etc.) ;
- détaillent les opérations à la mer, les zones géographiques, l'organisation des travaux, les stratégies de mesures et aménagements possibles, les réglages des différents systèmes, la chronologie de principe, les contraintes spatio-temporelles et les priorités éventuelles ;
- les procédures et systèmes à utiliser (en faisant référence aux normes, guides techniques, procédures, etc.), les produits à fournir à l'issue, ainsi que la répartition des responsabilités entre intervenants internes et externes pour toutes les tâches d'acquisition et traitement de données, et de rédaction des rapports ;
- toute information de nature à aider à la conduite générale du levé.



Instructions techniques (IT)

Quoi ?

(les besoins du client)

Instruction particulière (IP)

Comment ?

(réaliser les travaux)



1.2 PRINCIPAUX MOYENS

Équipement	Points
Le sondeur multifonctions « Moyens fonds » (MFI0)	P1
Les centrales d'attitude SBC NavInteg-Apogee	P1
Le calculateurs de cap	P1
Le système de mesures bathymétriques par sondes périmétriques Sippican	P2
Bathylogiciel portable	P2
Le sondeur multifonctions EA60	P3
ECHOS 3000 (Laplace seulement - Le Pénouze équipé au prochain passage au basati)	P1
ECHOS 10 000 (Laplace)	P1
Le magnétomètre Sledge	P2
Le sonar latéral MPX400	P2
Le système de prélèvement par benne Shipack	P3
Magnétope S-RABO 3800	P1
Cage instrumentée de type CATBN	P1
Véhicules hydrographiques et son SHM SHOMAD	P2
Sonar latéral CHM4 (35 - 700 kHz) de VNI	P3
Bennes Van Veen	P3
Station alimée	P2

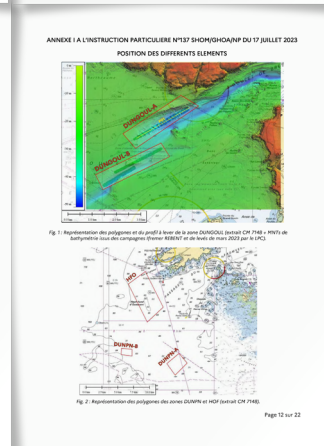
1.3 CHRONOLOGIE DES TRAVAUX

La durée des travaux est détaillée dans le tableau ci-dessous. Les dates seront ajustées en fonction de la disponibilité des BH2.

Tâche	Travaux à réaliser	Temps
T1	Mouillage puis récupération d'une cage instrumentée de type CATBN	13h
T2	Niveaux profils PCI encadrant une phase de flot et une phase de jusant d'une marée de vive-eau (au plus trois acquisitions au total - PHS-BH-FH ou BHS-FH-BHS) à l'aide du SHM, du sondeur de sédiments et du système de classification des fonds.	20h
T3	25 prélèvements à la benne (Shipack) sur les champs de Bennes de la zone DUNGOUL (identifiés SD-X0). Ces points seront ajustés en fonction des niveaux bathymétriques.	9h
T4	9 prélèvements à la benne (Shipack) sur les deux plateaux encadrant le chenal du Goulet de Brest (identifiés SP-X0).	16h
T5	Niveaux surfaciques dans la zone DUNGOUL (BH2).	1,5
T6	Niveaux surfaciques dans la zone DUNGOUL (Laplace).	6h
T7	Niveaux surfaciques dans la zone « DUNPNA » et « DUNPNA-B ».	12h
T8	Niveaux surfaciques dans la zone « HFO ».	24h

Les travaux prescrits par l'instruction technique citée en référence (a) sont les suivants :

Tâche	Travaux à réaliser	Zone	Priorité
T1	Mouillage puis récupération d'une cage instrumentée de type CATBN à une profondeur de 27 m CM.	DUNGOUL	P1.1
T2	Niveaux selon le profil PCI de la zone DUNGOUL encadrant une phase de flot et une phase de jusant d'une marée de vive-eau (au plus trois acquisitions au total - PHS-BH-FH ou BHS-FH-BHS) à l'aide du SHM, du sondeur de sédiments et du système de classification des fonds.	DUNGOUL	P1.2
T3	25 prélèvements à la benne (Shipack) sur les champs de Bennes de la zone DUNGOUL (identifiés SD-X0). Ces points seront ajustés en fonction des niveaux bathymétriques.	DUNGOUL	P1.3
T4	9 prélèvements à la benne (Shipack) sur les deux plateaux encadrant le chenal du Goulet de Brest (identifiés SP-X0).	DUNGOUL	P1.4
T5	Niveaux surfaciques de deux polygones dans la zone DUNGOUL (initiale « DUNGOUL-A » et « DUNGOUL-B » à l'aide du SHM, du sondeur de sédiments et du système de classification des fonds).	DUNGOUL	P1.5
T6	6 prélèvements à la benne (Shipack) dans le chenal du Goulet de Brest (identifiés SC-X0).	DUNGOUL	P1.6
T7	Niveaux surfaciques de deux polygones initiaux « DUNPNA-A » et « DUNPNA-B » à l'aide du SHM, du sondeur de sédiments et du système de classification des fonds.	DUNPNA	P2
T8	Niveaux surfaciques de polygones initiaux « HFO-A » à l'aide du SHM, du sondeur de sédiments et du système de classification des fonds.	HFO	P3



Le sommaire d'une IP est fourni en exemple en [annexe 8](#).

2.2.3 - Rapport

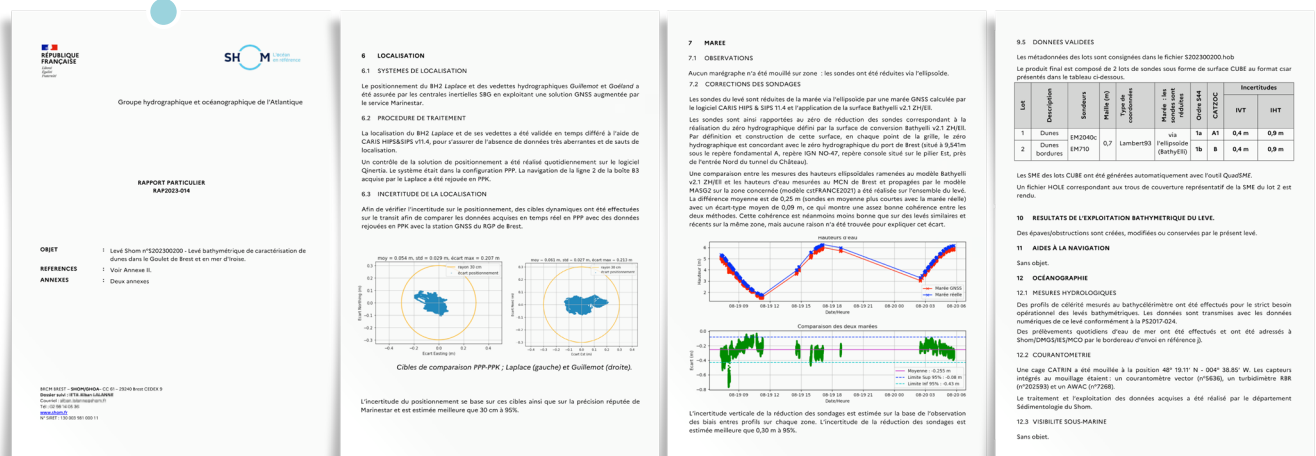
Les levés, et de manière plus générale tous les ensembles cohérents de travaux ou d'activités donnent lieu à l'établissement de rapports particuliers décrivant :

- les objectifs des travaux et les résultats essentiels obtenus ;
- les travaux effectués ;
- les incertitudes horizontale et verticale et les résultats (ordre du levé...) ainsi que les limites de ces résultats ;
- les méthodes employées ;
- les moyens utilisés ;
- les données fournies ;
- les documents communiqués ;
- les éventuels travaux complémentaires à envisager ;
- les renseignements nécessaires à une reprise ultérieure des travaux ;
- les éléments permettant d'exploiter les documents et fichiers établis, en particulier les décisions sur les informations nautiques anciennes à conserver ou à supprimer et l'appréciation du degré d'urgence de l'exploitation a posteriori.

Les rapports font partie des documents de rédaction et, à ce titre, ils engagent la responsabilité de leurs auteurs et doivent donc être rédigés avec le plus grand soin.

Le sommaire d'un rapport est fourni en exemple en [annexe 8](#).

Rapport particulier



3 - APPLICATION DES NORMES

3.1 - Comment atteindre les objectifs des normes ?	19
3.2 - Détermination des incertitudes horizontale et verticale	19
3.3 - Maîtrise des incertitudes horizontale et verticale	22
3.4 - Couverture bathymétrique	23
3.5 - Exploration complète - recherche	24

3.1 - Comment atteindre les objectifs des normes ?

Les normes décrivent des ordres de levé en fonction du degré de sécurité à assurer. Les ordres sont généralement définis à partir :

- des **incertitudes horizontale et verticale** sur la position du point (la sonde) - s'appliquent aux données de bathymétrie réduites et corrigées. La justification que le levé répond à l'ordre sélectionné s'apporte en :
 - montrant que le bilan du calcul a priori des incertitudes permet de respecter les critères de la norme,
 - prouvant que les mesures ne sont pas biaisées. Par exemple, en réalisant un levé de contrôle sur une zone de référence de profondeurs équivalentes à celles du levé. Si un levé sur une zone de référence n'est pas possible, il faut alors comparer les données du nouveau levé avec celles des anciens levés¹,
 - prouvant la répétabilité du levé en calculant l'incertitude a posteriori à l'aide des QC.

Remarque : le calcul a priori des incertitudes (incertitudes théoriques) ne sert qu'à prouver que l'installation des matériels à bord du porteur permet d'effectuer un levé à l'ordre demandé. Ce calcul seul ne permet pas de prouver que le levé a été correctement réalisé.

- du **niveau d'exploration** (.i.e. recherche d'éléments) ;
- du **seuil éventuel** sur la taille des objets qui doivent être détectés (i.e. détection d'éléments) ;
- de la **couverture bathymétrique**.

Par ailleurs, montrer que le personnel en charge de la réalisation et du traitement du levé est correctement formé apporte une garantie supplémentaire vis à vis du respect des normes. La norme S-5 de l'OHI permet de décrire les exigences de formation des hydrographes.

3.2 - Détermination des incertitudes horizontale et verticale

Comme indiqué ci-dessus, Il est nécessaire d'établir, en fonction du système mis en œuvre, un bilan des incertitudes a priori qui prend en compte **toutes** les incertitudes horizontale et verticale. Toutefois, le respect des spécifications par ce bilan ne peut, sauf cas exceptionnel, être utilisé seul pour justifier la conformité du levé à la norme.

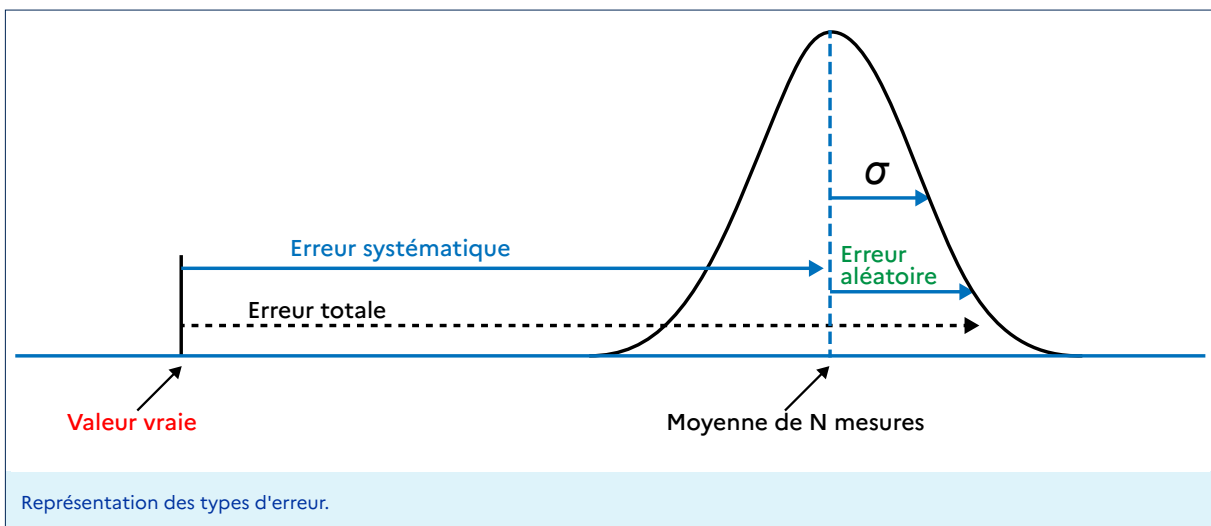
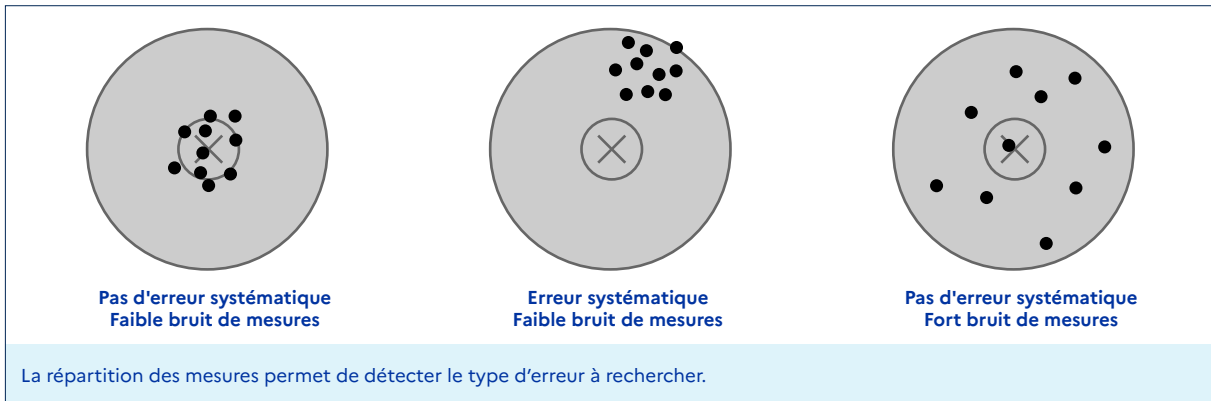
3.2.1 - Rappels sur les erreurs de mesure

Une erreur de mesure est la différence entre la valeur donnée par la mesure et une valeur de référence (étalon) ou la valeur exacte d'une grandeur (souvent inconnue).

Toute mesure peut comporter :

- **des erreurs aléatoires** : la mesure fluctue autour d'une valeur moyenne (probabilité de type gaussien). Un exemple d'erreur aléatoire est la mesure du temps avec un chronomètre. L'erreur vient du temps de réaction de l'expérimentateur au démarrage et à l'arrêt du chronomètre qui n'est pas toujours le même. Souvent appelées bruit sur la mesure, elles correspondent aux limites des capteurs et du processus d'acquisition ;
- **des erreurs systématiques (ou biais)** : la mesure est entachée d'une erreur fixe, éventuellement stable et prédictible. Exemple d'erreur systématique : mesure avec un décimètre auquel il manque le premier centimètre. La mesure sera alors toujours sous-évaluée d'un centimètre. Ces erreurs sont minimisées voire annulées par un étalonnage ;
- **des erreurs grossières ou aberrantes** : dues à un dysfonctionnement ponctuel du système ou une mauvaise manipulation ; elles sont identifiées en fonction de leur écart avec les autres mesures et éliminées.

¹ - Les levés du Shom sont disponibles sur [data.shom.fr / Mesures bathymétriques](http://data.shom.fr/Mesures_bathymetriques)



Mesurer une grandeur n'est pas simplement rechercher la valeur de cette grandeur mais c'est aussi lui associer une incertitude afin de pouvoir qualifier la qualité de la mesure. L'incertitude de la mesure est un nombre qui caractérise la dispersion des valeurs qui peuvent être attribuées à la grandeur mesurée. L'évaluation de l'incertitude d'une mesure nécessite donc de rechercher toutes les sources d'erreur et d'évaluer l'incertitude associée à chaque source.

Pour les erreurs aléatoires, l'incertitude de mesure est souvent exprimée en tant qu'écart type noté σ ou en variance = σ^2 . Si X_i représente les valeurs prises par N mesures, m la moyenne de ces N mesures, l'écart type se calcule :

$$\sigma^2 = (\sum(X_i - m)^2) / N$$

On montre qu'avec un très grand nombre de valeurs, suivant une répartition selon une loi normale :

- la probabilité que la valeur absolue de $X - m$ soit inférieure à σ est de 68,3 % ;
- la probabilité que la valeur absolue de $X - m$ soit inférieure à $1,96\sigma$ (souvent arrondi dans le langage à 2σ) est de 95 % ;
- la probabilité que la valeur absolue de $X - m$ soit inférieure à 3σ est de 99,7 %.

L'incertitude sur les mesures de profondeur fournies par le sondeur traduit la qualité d'estimation de la profondeur (incertitude verticale) et de la position des sondes (incertitude horizontale) déterminées par le système, en considérant que les incertitudes suivent une loi normale.

L'incertitude globale sur les données de profondeur dépend :

- d'une part de l'incertitude sur les mesures effectuées par le sondeur lui-même : incertitude sur les mesures d'angles et de distance ;
- d'autre part de l'incertitude sur les mesures des capteurs auxiliaires : système de positionnement, centrale d'attitude, mesure de marée, de célérité, etc.

3.2.2 - Incertitude horizontale

Dans ce qui suit, seul le cas du SMF est traité en détail. Les erreurs qui doivent être prises en compte pour un sondeur monofaisceau sont indiquées par un (*).

Pour un SMF, l'incertitude finale sur la position horizontale de la sonde dépend principalement :

- des erreurs sur les rattachements antenne GNSS – antenne sondeur (*);
 - de l'erreur sur la synchronisation système de positionnement - sondeur (*);
 - des erreurs sur l'orientation des antennes du sondeur par rapport à la centrale d'attitude et de cap;
 - de l'erreur sur le profil de célérité (*);
 - de l'erreur sur la célérité de coque (célérité de surface);
 - dans le cas où le résultat du levé est fourni sous forme de MNT et si les sondes sont représentées au centre de la maille (et non à leur position réelle), il faut prendre en compte une erreur supplémentaire sur la position de la sonde (*);
 - du type de centrale inertielle utilisée (erreurs sur le cap, roulis, pilonnement et tangage);
- Erreurs
systématiques
- de la qualité du positionnement du porteur (*);
 - de l'erreur horizontale due au SMF (erreur de mesure acoustique).
- Erreurs
aléatoires

Les explications théoriques concernant les erreurs entrant dans l'incertitude horizontale sont données en [annexe 2](#).

L'incertitude finale sur la position de la sonde $\Delta_{hor}(P)$ à une profondeur P est alors :

$$\Delta_{hor}(P) = \sqrt{X^2 + [Y * P]^2}$$

Avec $X = \sqrt{[\sum(\Delta_{ind})^2]}$ et $Y = \sqrt{[\sum(\Delta_{dep})^2]}$ où Δ_{ind} représente les incertitudes horizontales indépendantes de la profondeur et Δ_{dep} représente les incertitudes horizontales dépendantes de la profondeur.

Ce calcul est effectué pour la profondeur maximale de la zone sondée afin de vérifier que l'incertitude horizontale respecte bien le critère de l'ordre choisi pour le levé. Cette méthode qualifie théoriquement les données de positionnement des sondes du levé à partir des incertitudes en cap, roulis, tangage (englobe les données constructeur et l'estimation de l'incertitude des calibrations), célérités et l'incertitude du positionnement du porteur.

Les valeurs suivantes, fournies à titre d'exemple, permettent d'avoir une idée sur l'influence des différents paramètres pour le positionnement de la sonde :

- roulis : une incertitude de 0,05° sur le roulis => une incertitude sur le positionnement de la sonde d'environ 0,09 % P ;
- tangage : une incertitude de 0,2° sur le tangage => une incertitude sur le positionnement de la sonde d'environ 0,35 % P ;
- cap : une incertitude de 0,2° sur le cap => une incertitude sur la position de la sonde d'environ 0,60 % P à 120° d'ouverture et 0,96 % P à 140° d'ouverture ;
- célérité de coque : une incertitude de 0,2 m/s => une incertitude sur le positionnement de la sonde d'environ 0,02 % P à 120° d'ouverture et 0,04 % P à 140° d'ouverture ;
- profil de célérité : une incertitude de 2 m/s => une incertitude sur le positionnement de la sonde d'environ 0,23 % P à 120° d'ouverture et 0,37 % P à 140° d'ouverture.

3.2.3 - Incertitude verticale

Dans ce qui suit seul le cas du SMF est traité en détail. Les erreurs qui doivent être prises en compte pour un sondeur monofaisceau sont indiquées par un (*).

Pour un SMF, l'incertitude finale sur la position horizontale de la sonde dépend principalement :

- des erreurs sur la correction de la marée (*);
 - des erreurs sur les corrections de tirant d'eau (*);
 - des erreurs sur l'orientation des antennes du sondeur par rapport à la centrale d'attitude et de cap;
 - de l'erreur sur le profil de célérité (*);
 - de l'erreur sur la célérité de coque (célérité de surface);
- Erreurs systématiques
-
- du type de centrale inertielle utilisée (erreurs sur le cap, roulis, pilonnement et tangage);
 - de l'erreur verticale due au SMF (erreur de mesure acoustique).
- Erreurs aléatoires

Les explications théoriques concernant les erreurs entrant dans l'incertitude horizontale sont données en [annexe 3](#).

L'incertitude finale sur la position de la sonde $\Delta_{vert}(P)$ à une profondeur P est alors :

$$\Delta_{vert}(P) = \sqrt{X^2 + [Y * P]^2}$$

Avec $X = \sqrt{[\sum(\Delta_{ind})^2]}$ et $Y = \sqrt{[\sum(\Delta_{dep})^2]}$ où Δ_{ind} représente les incertitudes verticales indépendantes de la profondeur et Δ_{dep} représente les incertitudes verticales dépendantes de la profondeur.

Les valeurs suivantes, fournies à titre d'exemple, permettent d'avoir une idée sur l'influence des différents paramètres pour le positionnement de la sonde :

- roulis : une incertitude de 0,05° sur le roulis => une incertitude sur la valeur de la sonde d'environ 0,15% P à 120° d'ouverture et 0,24% P à 140° d'ouverture ;
- tangage : une incertitude de 0,2° sur le tangage => une incertitude sur la valeur de la sonde négligeable ;
- célérité de coque : une incertitude de 0,2 m/s => une incertitude sur la valeur de la sonde d'environ 0,04% P à 120° d'ouverture et 0,10% P à 140° d'ouverture ;
- profil de célérité : une incertitude de 2 m/s => une incertitude sur la valeur de la sonde d'environ 0,27% P à 120° d'ouverture et 0,39% P à 140° d'ouverture.

3.3 - Maîtrise des incertitudes horizontale et verticale

Les bilans théoriques peuvent être utilisés pour justifier le choix des systèmes employés lors d'un levé. Ils doivent être calculés avant la réalisation du levé afin d'assurer que le porteur et ses systèmes de mesures soient capable d'effectuer le levé à l'ordre requis. La maîtrise de ces incertitudes s'obtient en effectuant régulièrement des opérations de contrôle sur les capacités du matériel. Certaines doivent être réalisées avant les levés et d'autres pendant les levés.

3.3.1 - Étalonnages et ajustages

La maîtrise des incertitudes sur la position et la valeur des sondes lors d'un levé hydrographique nécessite de connaître pour chaque instrument ses limites d'utilisation, les incertitudes de ses mesures et la dérive éventuelle dans le temps de ces incertitudes. Les données fournies par les constructeurs doivent être vérifiées et éventuellement corrigées lors des étalonnages et ajustages.

L'étalonnage est une opération qui consiste à :

- mesurer une grandeur avec un équipement étalon et un équipement à étalonner ;
- comparer ces mesures et en déduire une relation qui permet de corriger les mesures de l'équipement à étalonner ;

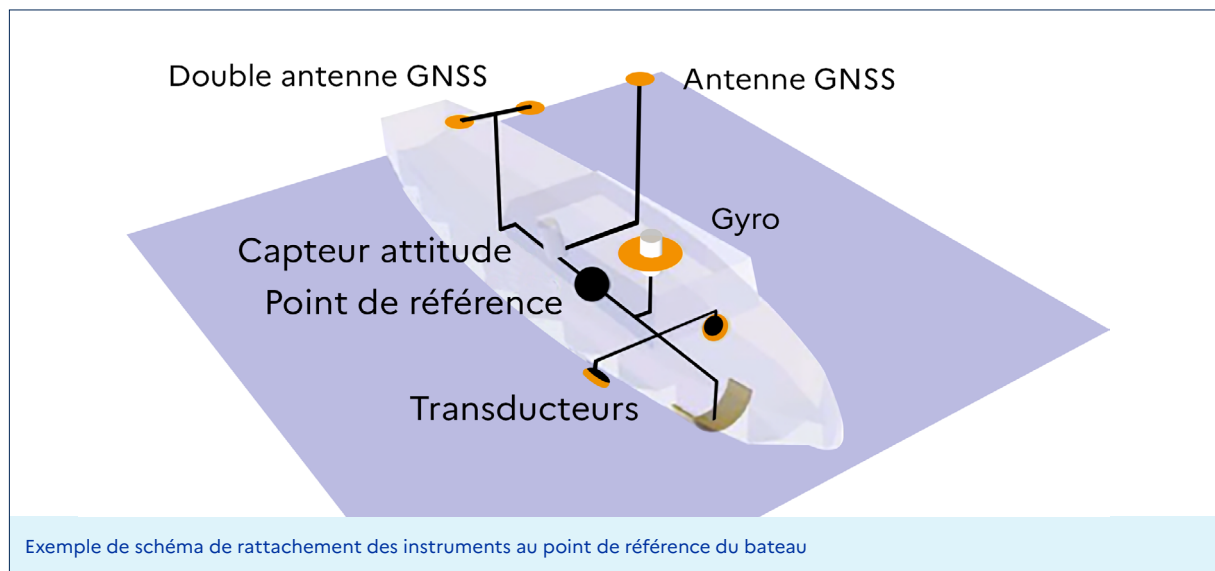
- fournir des incertitudes d'étalonnage.

L'ajustage est une opération (« réglage ») réalisée sur un système de mesures afin qu'il fournisse des résultats qui se situent à l'intérieur de la zone définie par l'erreur maximale tolérée.

Il est préconisé de réaliser ces opérations une fois par an et à chaque fois que du matériel ou du logiciel est modifié à bord.

3.3.2 - Détermination des bras de leviers et angles d'installation

La détermination des bras de levier et des angles d'installation sont une étape importante dans l'installation d'un système hydrographique (antenne du sondeur, antenne GNSS, centrale d'attitude, etc.). Elle doit être réalisée par des équipes spécialisées en métrologie lors de l'installation des capteurs et après tout changement de matériel.



L'objectif est de connaître précisément la position de chaque senseur (antennes GNSS, centrale d'attitude, antennes du sondeur, etc.) par rapport à un point de référence du navire. En effet, les détections des sondes sont positionnées par rapport aux antennes du sondeur et une des problématiques est de positionner les sondes par rapport au point de référence navire. Pour chaque porteur on définit donc un repère dont l'origine est le point de référence du porteur (généralement le centre de gravité qui est souvent l'endroit où est installée la centrale d'attitude), ainsi qu'un plan de référence matérialisé par un marbre ou des repères physiques sur le navire.

Les incertitudes recherchées sur les bras de levier et les angles d'installation des capteurs dans le repère navire sont généralement de l'ordre de $\pm 5\text{mm}$ pour les coordonnées et $\pm 0,02^\circ$ pour les angles.

3.3.3 - Ajustage du SMF

L'ajustage du SMF doit être réalisé, de préférence, sur une zone connue. Les étapes de cette opération sont présentées en [annexe 4](#).

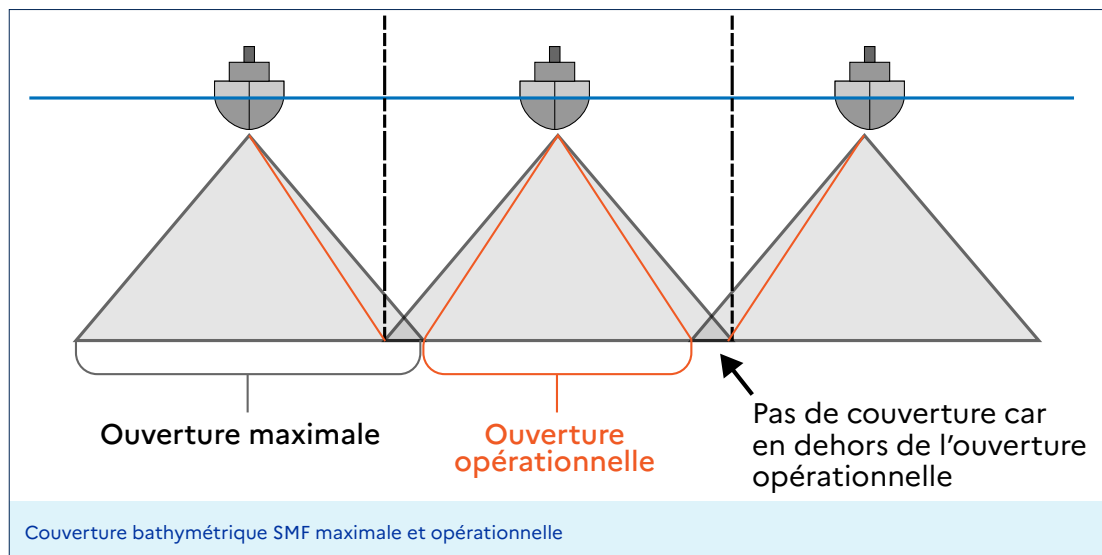
3.4 - Couverture bathymétrique

Le critère de couverture bathymétrique a été introduit lors de l'édition 6 de la S-44, afin de lever certaines ambiguïtés constatées sur les versions précédentes. Une couverture bathymétrique complète implique que chaque zone levée soit insonifiée au moins une fois par un système de mesure bathymétrique.

Dans le cas des SMF, la couverture du levé dépend :

- de la largeur des fauchées. L'ouverture angulaire du SMF doit être opérationnelle à l'ordre sélec-

tionné et à la profondeur du levé. Ainsi un levé réalisé avec une ouverture maximale ne garantit pas une couverture complète si la vérification verticale a montré que la fauchée doit être moindre pour respecter l'ordre sélectionné.



- du taux de recouvrement entre les fauchées adjacentes. Ce recouvrement détermine le taux de couverture bathymétrique.

En plus de ces considérations concernant la surface insonifiée, il faut prendre en compte les problématiques suivantes :

- les interruptions éventuelles d'acquisition ne doivent pas remettre en cause la couverture du levé car elles risquent de créer des « trous dans la couverture » ;
- la vitesse de sondage doit être adaptée en fonction des spécifications du type de levé, des caractéristiques physiques des capteurs mis en œuvre, de l'état de mer et des performances du système navire/sondeur/sonar ;
- le système d'acquisition doit assurer le cas échéant une simple insonification ou l'exploration complète du fond, permettre la détection des relèvements avec la résolution spécifiée et assurer la qualité spécifiée aux données bathymétriques ;
- la vitesse du porteur est donc déterminée en fonction de :
 - la couverture longitudinale bathymétrique à obtenir : la cadence d'émission du SMF et son ouverture longitudinale à la verticale doivent être prises en compte pour définir la vitesse de sondage (se fait généralement de manière automatique avec les SMF récents) ;
 - la contrainte d'exploration et de détection : une vitesse trop importante diminue les capacités de détection ;
 - les limites de mise en œuvre du système qui dépendent de chaque porteur et sont fonction de l'état de la mer (risque de bullage, etc.).

3.5 - Exploration complète - recherche

Au sens de la « publication S-44 », l'objectif d'une exploration complète du fond est de garantir la détection effective de la plupart des relèvements dépassant les critères de détection définis.

Pour garantir une exploration complète, il faut s'appuyer sur les études et vérifications périodiques qui permettent de justifier les fauchées utiles, résolutions et capacités de détection des sondeurs.

Remarque : l'exploration complète du fond peut être obtenue en utilisant un sondeur vertical associé à un sonar à balayage latéral mais, dans ce cas, la couverture bathymétrique complète n'est pas assurée. Inversement, un SMF peut permettre d'atteindre 100% de couverture bathymétrique sans que l'exploration du fond soit complète (par exemple non détection d'un élément cubique de 1 m de côté pour l'ordre spécial ou critère de recherche non respecté).

Dans le cas où une exploration complète est spécifiée, il est préconisé :

- SMF seul : le recouvrement doit assurer l'insonification de chaque point dans des gammes de faisceaux capables de détecter les objets spécifiés pour l'ordre considéré ;
- SMF associé à un sonar à balayage latéral : si le SMF ne permet pas de remplir l'exigence en termes de capacité de détection, la combinaison des deux moyens peut alors permettre d'assurer l'exploration complète sur l'ensemble du levé, en remplissant les exigences imposées par l'ordre considéré.

Les opérations qui aboutissent à la détermination des caractéristiques d'un relèvement du fond sont appelées recherches. L'OHI ne définit pas explicitement de critère de recherche mais précise que l'exploration complète du fond doit s'accompagner de la caractérisation précise des relèvements détectés qui respectent les critères de détection fixés.

L'objectif d'une recherche est :

- soit de confirmer la validité / d'affirmer l'inexistence d'un relèvement de fond précédemment signalé ;
- soit de confirmer les caractéristiques d'un relèvement de fond identifié afin de compléter si nécessaire le levé régulier systématique.

Dans la mesure où ils constituent des dangers pour la navigation de surface, la recherche des relèvements du fond doit permettre la détermination de **la position**, du **brassage** et de **la nature** des points hauts du fond. Des critères complémentaires doivent si possible être déterminés : hauteur par rapport au fond moyen, dimension du relèvement, type (épave, roche, etc.), orientation, durabilité.

Les précautions à prendre pour assurer la détection et la cotation d'éléments peuvent ainsi conduire à augmenter le recouvrement entre les lignes. Pour l'ordre spécial de la « publication S-44 », le Shom considère qu'une double insonification du fond est obligatoire indépendamment du SMF utilisé.

4 - PRÉPARATION DU LEVÉ

4.1 - Références horizontales et verticales	27
4.2 - Marée	27
4.3 - Positionnement	29
4.4 - Détermination du réseau de lignes (ou profils)	30
4.5 - Choix des matériels « annexes »	30
4.6 - Reconnaissance sur zone	34

Étape importante d'un levé, la préparation doit être menée avec soin car des choix qui seront effectués dépendront la manière de réaliser le levé et de le rédiger. La préparation va dans un premier temps consister à rassembler la documentation (cartes marines, instructions nautiques, guides nautiques, livres de feux, les anciens levés, fiche d'observatoire de marée, liste des épaves, points géodésiques, etc.) utile sur la zone à hydrographier.

4.1 - Références horizontales et verticales

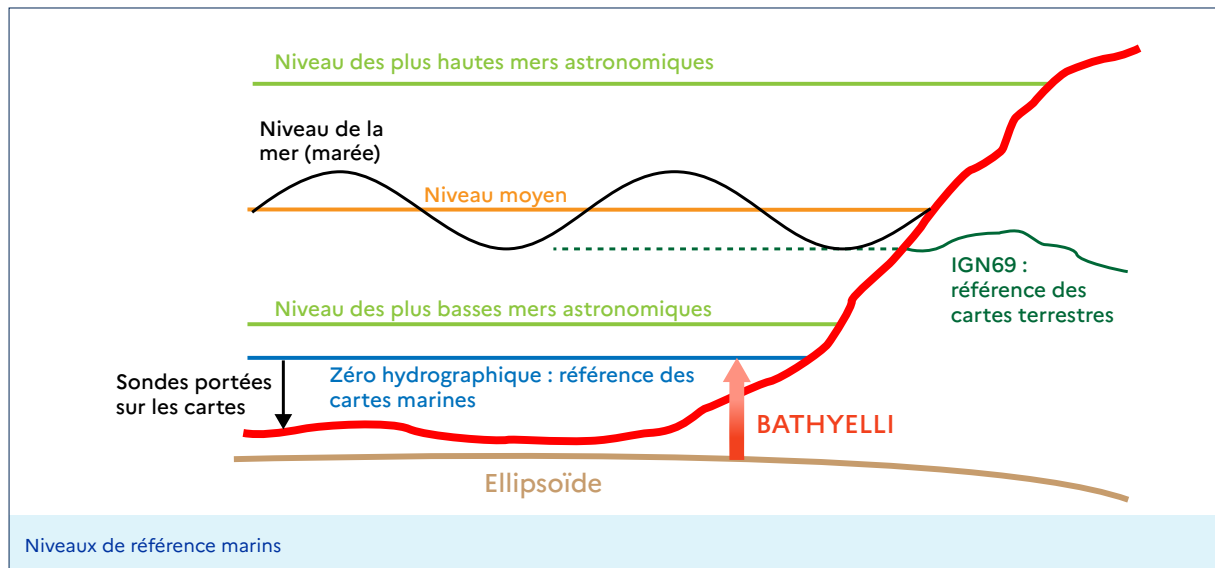
Les références horizontales à utiliser sur les territoires français sont définies dans un arrêté¹ disponible sur [Légifrance](#).

L'ouvrage « Références altimétriques marines »² (RAM), édité par le Shom, fournit l'ensemble des indications quant aux ZH de chaque zone. En particulier, il indique le rattachement de ces ZH à l'IGN69 et/ou à l'ellipsoïde.

4.2 - Marée

4.2.1 - Rappels

Le ZH est le niveau de référence commun aux cartes marines et aux prédictions de marée. C'est le niveau de référence à partir duquel sont comptées, positivement vers le bas, les sondes portées sur les cartes marines et, positivement vers le haut, les hauteurs de marée. Il est choisi, en France, au voisinage du point le plus bas que peut atteindre théoriquement le niveau de la mer à un endroit donné (voisin des plus basses mers astronomiques). Ainsi quel que soit le niveau de marée prédite, la hauteur d'eau disponible pour le navigateur est toujours supérieure à la profondeur indiquée sur la carte marine.



En effet, afin de garantir la sécurité des navigateurs, les hydrographes français ont souvent pris une marge de sécurité et ont coté le ZH en dessous des plus basses mers calculées. Les ZH des ports français ont généralement été adoptés indépendamment les uns des autres. Il en résulte que l'écart entre le ZH et le niveau des plus basses mers astronomiques peut varier entre deux zones de marée (exemple : 19 cm à Calais et 39 cm à Boulogne-sur-Mer).

Important : Pour cette raison, il faut toujours bien préciser le ZH utilisé (exemple : ZH de Calais) lorsque l'on fournit les données d'un levé, et non pas une mention du type « zéro des cartes marines ».

1 - En vigueur, à la rédaction de ce document : Arrêté du 10 mars 2025 portant modification de l'arrêté du 5 mars 2019 portant application du décret n° 2000-1276 modifié portant application de l'article 89 de la loi n° 95-115 du 4 février 1995 modifiée d'orientation pour l'aménagement et le développement durable du territoire relatif aux conditions d'exécution et de publication des levés de plans entrepris par les services publics. <https://www.legifrance.gouv.fr/>

2 - Le RAM est disponible gratuitement sur diffusion.shom.fr / Références Altimétriques Maritimes

Le Shom est le référent national pour le niveau de la mer in situ sur l'ensemble des zones sous juridiction française. À ce titre, il assure dans le cadre de REFMAR différentes fonctions de coordination en matière de collecte et de diffusion des données publiques relatives à l'observation de hauteurs d'eau, de manière à promouvoir leur utilisation dans de multiples applications dans le cadre des recommandations internationales.

Toutefois, les guides qui décrivent la pratique des mesures de marée sont publiés par la COI sous l'égide de l'UNESCO³ : « Manual on Sea Level ». De plus le Shom met à disposition des données sur son site data.shom.fr.

4.2.2 - Réduction de la marée

Il est admis que les sondes doivent être réduites de la marée obligatoirement pour les fonds inférieurs à 200 mètres. Au-delà, la réduction de marée peut être effectuée si les hauteurs d'eau sont connues avec une incertitude suffisante pour améliorer l'incertitude finale des données : cette réduction est réalisée en fonction de la plus-value apportée au levé et si le coût supplémentaire reste acceptable.

L'incertitude de la réduction de marée devra être compatible avec les exigences des spécifications en termes d'incertitude verticale sur les mesures bathymétrique, c'est-à-dire que l'incertitude de la correction de marée, cumulée aux autres incertitudes commises sur la mesure verticale ne devra pas excéder la tolérance admise.

Le choix de la manière dont les sondes seront ramenées au ZH est une étape déterminante de la préparation. Elle peut se faire :

- par des observations in situ à l'aide d'un marégraphe et après adoption d'un zéro de réduction ;
- depuis data.shom.fr (le portail de l'information géographique maritime et littorale de référence) : il propose des fonctions de visualisation et de téléchargement des données relatives à la marée dont le calcul de hauteurs d'eau à un pas de temps donné (5, 10, 15, 30 et 60 minutes) ;
- dans le cas où le levé est situé au large ou dans des régions dans lesquelles il n'est pas possible d'effectuer de mesures de marée in situ, les données pourront être corrigées d'une marée issue d'un modèle numérique⁴ ;
- par utilisation de la marée cinématique : mesure de l'altitude du porteur par rapport à l'ellipsoïde en mettant en œuvre un système de mesure d'incertitude centimétrique sur la verticale. Cette solution ne doit être mise en œuvre que si l'altitude du zéro de réduction des sondes sur la zone du levé par rapport à cet ellipsoïde est connue.

En vue du traitement temps réel des données acquises (contrôle qualité des recouvrements, cotations et recherches...), un modèle de marée temporaire le plus précis possible pourra être employé pendant les sondages pour corriger les sondes de la marée. Il permettra d'utiliser de manière optimale les outils de contrôle du levé en temps réel ou peu différé.

4.2.3 - Marée cinématique (ou « marée GNSS »)

L'utilisation de la marée cinématique permet de s'affranchir des incertitudes liées à l'utilisation d'un marégraphe et de l'enfoncement dynamique du porteur au moment de la mesure.

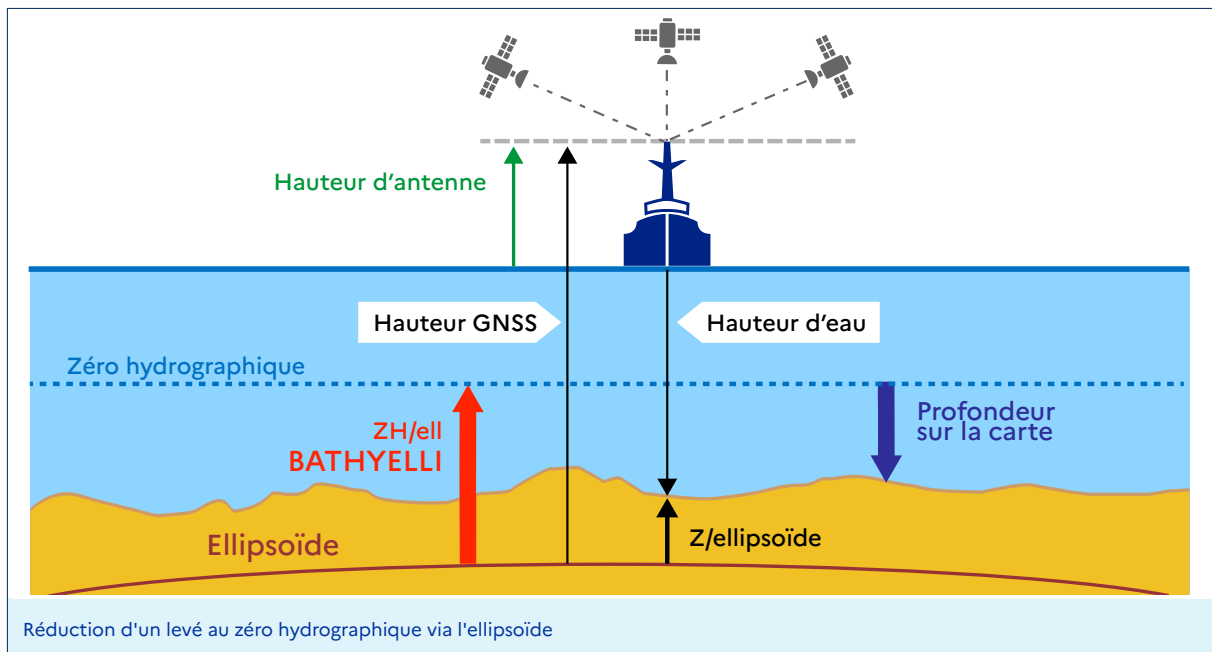
Elle nécessite cependant de disposer d'un système fournissant des corrections GNSS temps réel fiable (aucune interruption de service) et ayant une incertitude verticale suffisante (centimétrique) ou bien d'effectuer des opérations de post-traitement sur les mesures GNSS.

Le principe est le suivant :

- à l'instant t , le sondeur fournit une mesure du fond. Le rattachement précis base / antenne du porteur permet de rapporter cette mesure du sondeur au niveau du point de référence de l'antenne GNSS ;
- la mesure GNSS précise permet de rattacher la mesure de hauteur d'eau au niveau de l'ellipsoïde ;
- cette hauteur ellipsoïdale est convertie en sonde par rapport au ZH local.

3 - Voir unesdoc.unesco.org

4 - Les SH entretiennent des modèles de marée, a minima pour leur zone de responsabilité.



Remarque : Pour ce faire, en France métropolitaine, il peut être utilisé :

- le modèle BathyElli[®] (disponible sur data.shom.fr / Références Verticales) qui donne le décalage entre l'ellipsoïde IAG GRS80 et le ZH ;
- l'ouvrage Références Altimétriques Maritimes (RAM) qui donne la position du ZH dans les ports de référence par rapport à l'ellipsoïde IAG GRS80 ou à la référence altimétrique légale. Cette méthode est valable localement, la propagation du ZH étant dépendante des variations du géoïde et des phénomènes hydrologiques locaux.

Il faut naturellement filtrer la hauteur ellipsoïdale des variations à courte période (pilonnement) mesurées par la centrale d'attitude du porteur, si possible en tenant compte des composantes induites par le roulis et le tangage.

Quelle que soit la méthode choisie pour réduire de la marée il est important de toujours bien détailler dans le rapport du levé les choix effectués car, en cas de doute, cela permet de reprendre la rédaction même plusieurs années après sa réalisation.

4.3 - Positionnement

Les systèmes de navigation sont essentiellement basés sur le GNSS. Toutefois, en fonction du mode de fonctionnement adopté ([voir annexe 5](#)), les incertitudes horizontale et verticale atteintes vont de quelques millimètres à quelques dizaines de mètres. Il est alors nécessaire de choisir la méthode de positionnement en fonction des objectifs du levé.

En général, les levés côtiers sont réalisés en mode GNSS différentiel tandis que les levés hauturiers utilisent le mode naturel. Toutefois, si le levé nécessite une très grande précision, l'emploi de solution PPP est toujours possible (mais souvent onéreuse).

Quelle que soit la méthode de positionnement adoptée, celle-ci doit être contrôlée fréquemment (idéalement pendant tout le levé). Pour cela, des acquisitions au point fixe (appelé « cible »), le plus proche possible de la zone de travail et de préférence sur des points connus sont réalisées. L'objectif est alors de comparer la position réelle du point stationné avec la position donnée par le système de positionnement.

Dans tous les cas, il est fortement recommandé d'enregistrer la donnée brute du système GNSS afin de pouvoir, si nécessaire, réaliser un post-traitement qui permettra d'améliorer sensiblement les incertitudes horizontale et verticale.

5 - Les réalisations du « Zéro Hydrographique » fournies par le modèle BathyElli et les réalisations du « Zéro Hydrographique » fournies par le RAM étant produites de manières différentes, des écarts de l'ordre de 15 cm sont possibles. Il est donc important lors de l'utilisation de l'une de ces réalisations de bien préciser celle qui est employée.

4.4 - Détermination du réseau de lignes (ou profils)

Un levé bathymétrique est constitué de routes rectilignes (lignes, historiquement aussi appelées profils), parallèles entre eux. L'orientation des lignes est choisie de la manière suivante :

- pour les levés SMF : de préférence parallèle aux isobathes (la fauchée est alors de largeur constante, facilitant la planification du levé) ;
- pour les autres levés : de préférence perpendiculaire aux isobathes (permet un meilleur suivi des gradients de pente) ;
- l'orientation des lignes ne doit pas être face aux dangers pour la navigation ;
- dans la mesure du possible, il faut éviter d'avoir un courant traversier pendant le levé.

L'espacement des lignes dépend :

- des taux de recouvrement entre fauchées adjacentes ;
- de la largeur des fauchées qui est fonction de l'ouverture angulaire opérationnelle du sondeur ;
- de la profondeur : si la zone est de profondeur très variable plusieurs méthodes sont possibles pour définir l'espacement des lignes :
 - utiliser la profondeur moyenne de la zone puis venir ensuite combler les trous dans le levé ;
 - si la bathymétrie est correctement connue il est souvent intéressant de créer des « sous-zones » de profondeur homogènes ;
 - si la zone est mal connue : débiter le levé par les zones les plus profondes de manière à détecter les dangers éventuels à l'aide des extrémités de fauchée et adapter l'espacement des lignes au fur et à mesure de l'avancement du levé.

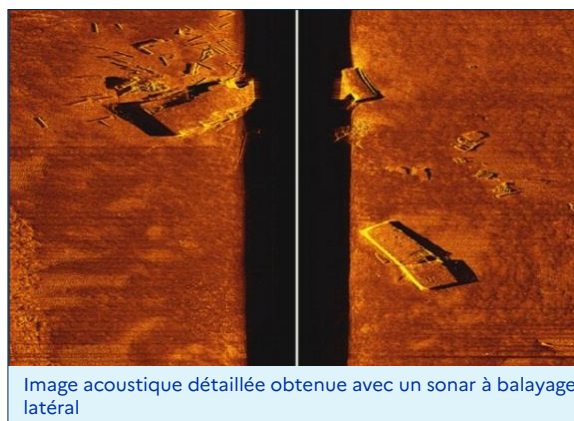
Ainsi, θ étant l'ouverture angulaire opérationnelle du SMF et P la profondeur, la largeur de la fauchée est $L = P \cdot \tan(\theta)$. Si le taux de recouvrement requis est r, l'espacement maximum des lignes est alors $E = (2-r) \cdot P \cdot \tan(\theta)$.

En plus de ce réseau de lignes parallèles (appelées « réguliers »), des lignes sécantes (appelées « traversiers ») formant un angle de 45° à 90° avec le réseau de réguliers, écartés de 10 à 15 fois l'écartement du levé régulier, sont à réaliser : ils serviront à contrôler et qualifier la donnée bathymétrique par comparaison statistique des valeurs aux points de croisement.

4.5 - Choix des matériels « annexes »

4.5.1 - Sonar à balayage latéral

Le sonar à balayage latéral est un engin généralement tracté à l'arrière du navire et rasant le fond (l'altitude du poisson est de 10 à 15% de la profondeur) qui a pour fonction de constituer des images acoustiques détaillées des fonds marins (voir détail sur son fonctionnement en [annexe 6](#)).



L'intérêt de l'utilisation d'un sondeur latéral est double :

- détermination des structures sédimentaires (champ de dunes, mais également homogénéité des sédiments en surface) ;

- détection des accidents sur le fond (dont les obstructions, épaves...).

Toutefois, des inconvénients sur la conduite du levé sont à prendre en compte :

- vitesse de levé moindre (afin de pouvoir tracter le poisson en sécurité et pour l'acquisition d'image exploitable) – 3 à 4 nœuds ;
- accroissement du temps de traitement pour exploiter les données acquises ;
- obligation de faire un nouveau passage au SMF sur les objets détectés pour les coter précisément.

À noter que les performances des SMF de dernière génération réduisent fortement l'intérêt de l'utilisation d'un sonar à balayage latéral en hydrographie : les capacités de détection des SMF par petits fonds sont généralement conformes à la spécification de l'ordre spécial de la « publication S-44 ».

4.5.2 - Magnétomètre

Un magnétomètre est un appareil permettant de mesurer la direction et l'intensité d'un champ magnétique. Certains noyaux d'atome (les métaux en particulier) ont des propriétés analogues à celles de microscopiques boussoles et créent donc des champs magnétiques : c'est cette propriété qui est utilisée pour détecter les masses métalliques (et donc certaines épaves ou obstructions) enfouis ou non.



Magnétomètre utilisé au Shom (Source Marine Magnetics) - Mise à l'eau du magnétomètre (Shom)

La vitesse du porteur est déterminée en fonction des objectifs :

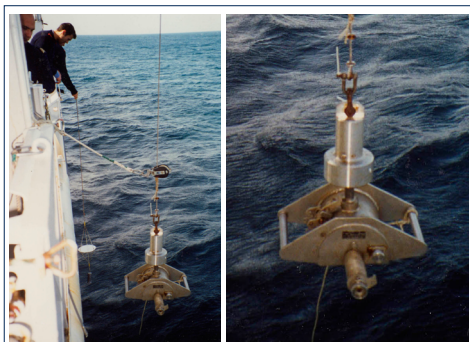
- campagne géophysique (amélioration du modèle magnétique) : vitesse constante de 9 nœuds ;
- recherche d'épave (en particulier dans des zones où les objets peuvent être recouverts) : la vitesse recommandée se situe entre 4 et 8 nœuds (dépend de l'immersion recherchée pour le poisson).

Le poisson doit se trouver à une distance minimum de 3 fois la longueur du bâtiment afin que celui-ci ne perturbe pas la mesure.

4.5.3 - Système de prélèvement de sédiment

Les observations et les prélèvements renseignent sur la nature des fonds, autant d'un point de vue qualitatif (texture du sédiment) que quantitatif (granulométrie). Plusieurs systèmes peuvent être employés :

- **les systèmes de vidéo sous-marine** ont pour but l'obtention d'images numériques orientées du fond. Ils sont utilisés pour reconnaître les objets et structures de petite taille non décelable par méthode acoustique ou par prélèvement (algues, pierres, bancs de coquilles, rides de sable) ou encore pour calibrer les images acoustiques obtenues par sonar à balayage latéral ou SMF ;
- **les bennes** Shipeck ou Van Veen sont des instruments de prélèvement ponctuel de sédiment de surface. L'objectif est de ramener une quantité suffisante de sédiments pour effectuer des analyses granulométriques en laboratoire.



Benne Shipeck



Benne Van Veen

Les bennes sont descendues sur le fond de la mer au bout d'un câble en acier, avec les mâchoires ouvertes. Dès que les mâchoires touchent le fond, le ressort qui maintient les mâchoires ouvertes est relâché. Au moment de la remontée, les mâchoires se referment et emprisonnent une quantité de sable ou de sédiments du fond de la mer.

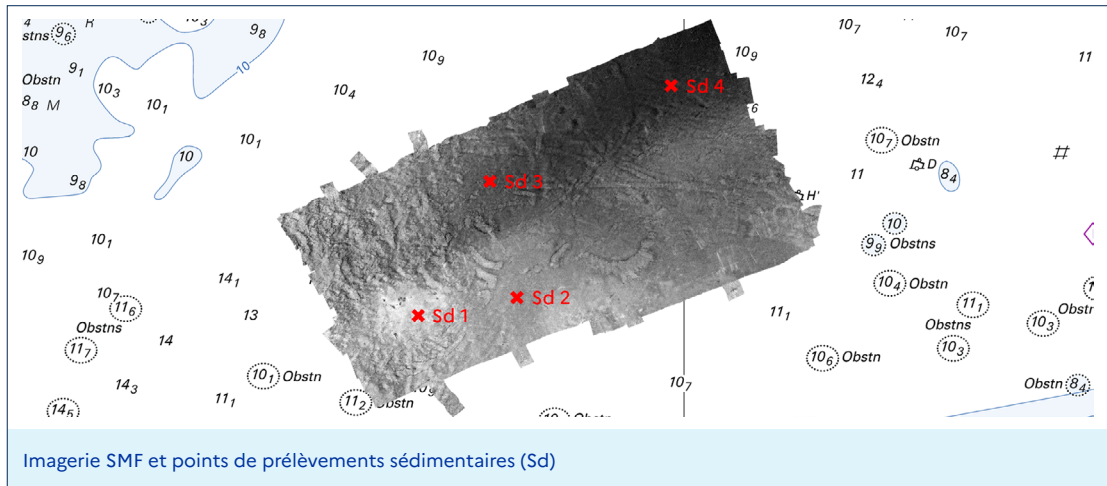
- **le carottage** permet d'obtenir en un point la connaissance de la variabilité des sédiments sur une épaisseur de plusieurs mètres. Le carottier est schématiquement constitué d'un lest de plusieurs centaines de kg, fixé sur un tube en acier terminé par une ogive en acier traité. Le tube est doublé par une chemise en PVC qui sert d'enveloppe à la carotte.



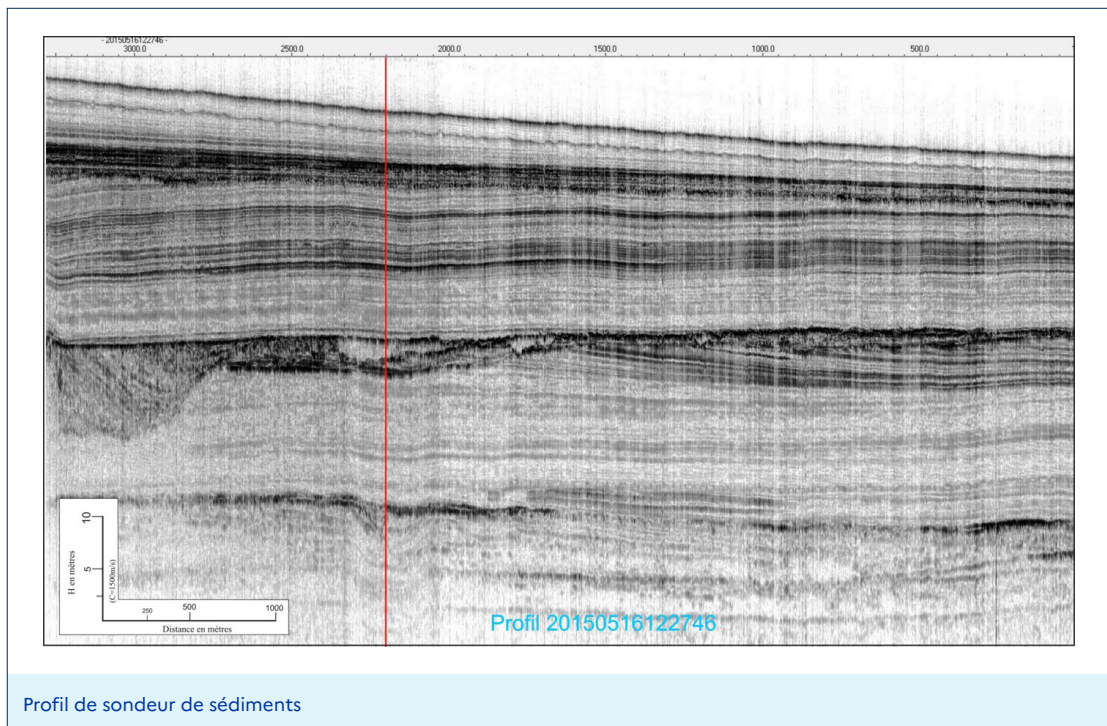
Carottier gravitaire (à gauche) - Diaphragme ou «peau d'orange» retenant le sédiment dans le carottier (au centre) - Carotte de sédiments (à droite)

Un piston coulisse à l'intérieur de cette chemise pour assurer le maintien du sédiment dans le tube, qui est bouché à son extrémité par un système de lames en métal empêchant la sortie du sédiment : «peau d'orange». Un carottier est monté sur un système de largage mécanique constitué d'un bras de manœuvre activant un croc largable, et déclenché par un système de câble lesté par un poids-pilote : le câble du poids pilote est plus long que la longueur du carottier. Lorsque le contrepoids (poids-pilote) touche le fond, le basculement du bras de manœuvre déclenche l'ouverture du croc et la chute libre du carottier. Grâce à sa masse et au lest, celui-ci s'enfonce dans le sédiment, et cela d'autant mieux lorsque ceux-ci sont fins et gorgés d'eau. Le piston remonte dans la chemise, assurant ainsi la tenue de la carotte.

- **les systèmes acoustiques (SMF, sonar à balayage latéral...)** permettent également d'obtenir une imagerie du fond, de cartographier de vastes zones et souvent d'en déduire la nature du fond. Cette dernière doit être confirmée par l'utilisation de systèmes de prélèvement de sédiment.



- les sondeurs de sédiments** (ou pénétrateurs de sédiments) émettent des ondes acoustiques dans une gamme de fréquence comprise généralement entre 2 et 8 kHz. Ces fréquences permettent aux ondes acoustiques de pénétrer dans le sédiment permettant ainsi la détection des différentes couches. On obtient alors une coupe du fond qui montre les « iso-natures du fond ». Ces mesures permettent notamment de sélectionner les points de carottage (zones où les réflecteurs sont resserrés de manière à obtenir une carotte contenant le maximum de strates).



4.6 - Reconnaissance sur zone

S'il est possible de se rendre sur la zone de travail avant le levé, il est fortement conseillé de le faire car une reconnaissance permet de :

- vérifier l'existence de repères géodésiques ou altimétriques ;
- vérifier au besoin le bon fonctionnement du marégraphe et effectuer un nivellement de contrôle ;
- identifier les points géodésiques existants ou en implanter de nouveaux ;
- rechercher, dans le cas d'un levé mettant en œuvre un système GNSS, les différentes anomalies pouvant affecter le système au cours du levé. Dans le cas de levés effectués à proximité de côtes accidentées et élevées, on essaiera d'évaluer les éventuels masquages dus au relief (masquages des satellites ou de la transmission de corrections par voie hertzienne) ;
- prendre contact avec les autorités locales (capitainerie, bureau du port, mairie, etc.) afin d'informer des dates de levé et éventuellement faire déplacer des navires à quai ;
- prendre contact avec les comités des pêches, les associations de plaisanciers, etc. afin d'informer des dates de levé ;
- vérifier que les résultats attendus sont atteignables a priori.



5 - RÉALISATION DU LEVÉ

5.1 - Opérations en temps réel	37
5.2 - Traitement en temps peu différé	39
5.3 - Planification et réalisation des recherches.	40

Les étapes de réalisation du levé (définition et réalisation des recherches, traitement peu différé, qualité et densité des mesures, etc.) sont primordiales pour assurer que les objectifs du levé seront atteints et que le traitement des données sera optimisé.

Les lacunes dans la préparation ou la réalisation d'un levé ne pourront en aucun cas être comblées par le traitement des données ; c'est pour cette raison que ces opérations doivent être réalisées avec le plus grand soin.

5.1 - Opérations en temps réel

Pendant l'acquisition, il est impératif de surveiller de nombreux paramètres sous peine de devoir jeter la donnée acquise ou perdre beaucoup de temps dans la phase de traitement.

5.1.1 - Cahier de quart

Lors de la réalisation du levé, il est conseillé de tenir un cahier de quart (ou de suivi d'acquisition) dans lequel seront notés tous les réglages adoptés, les pertes éventuelles de localisation, les trous dans la couverture, les détections de dangers potentiels, les informations sur la célérité, la marée, la météorologie etc. De manière générale, en cours d'acquisition, toute anomalie détectée doit être notée sur ce cahier. Toutes ces informations seront très utiles pour la personne qui sera chargée de la rédaction du levé.

5.1.2 - Célérité

Les besoins en termes de célérité sont de deux ordres :

- connaissance du profil de célérité sur les lieux du sondage, au moment de la réalisation du levé, pour le calcul du trajet de l'onde acoustique participant au positionnement correct des sondes ;
- connaissance de la célérité de surface en temps réel pour le SMF, nécessaire à la formation des voies et le calcul de la réfraction dans la couche de surface.

Les paramètres concernant la célérité sont critiques et nécessitent une surveillance accrue durant l'acquisition des données. La connaissance du fonctionnement de la correction de célérité par le sondeur (prise en compte ou non de la célérité de coque dans le profil de célérité pour le calcul de la réfraction), de la sensibilité du système aux variations de célérité de surface (dépointage électronique ou non), de la structure de l'antenne (circulaire ou plane) qui influence la sensibilité du système est essentielle pour un positionnement correct des données.

Tout biais anormalement élevé (le seuil admissible est à définir en fonction des sondeurs, plus ou moins sensibles à ce type d'anomalie) entre le célérimètre de coque et la valeur correspondante du profil de célérité doit attirer l'attention de l'opérateur du sondeur. Il peut être dû à une variation réelle de la célérité de coque, qui doit attirer l'attention sur la nécessité éventuelle de procéder à une nouvelle mesure du profil de célérité ou bien à un dysfonctionnement des capteurs qui doit faire l'objet d'investigations.

On surveillera également une incurvation éventuelle de la fauchée du SMF par fonds plats (effet « sourire » ou « sourire inversé »), symptôme fréquent d'un problème de correction de la réfraction et donc d'un mauvais profil de célérité. Cette incurvation est cependant délicate à mettre en évidence en temps réel si le fond est perturbé.

5.1.3 - Filtrage

Certains SMF permettent de paramétrer des filtres en temps réel sur les données acquises (seuillage ou filtres plus complexes, voire décimation). Le principe général à appliquer est de limiter autant que possible l'utilisation de ce type de filtres qui ne permet en général pas la revalidation des données filtrées en temps réel. On se conformera aux recommandations du constructeur ou à la méthodologie d'emploi du système définie en interne.

Des seuils sur la profondeur sont appliqués par le logiciel d'acquisition temps réel du SMF afin de faciliter le suivi automatique du fond par le sondeur et éliminer les données aberrantes détectées (bulles, échos dans la colonne d'eau, etc.). Ces seuils doivent être paramétrés de manière constante en temps réel, en se basant sur la profondeur locale, en considérant l'ampleur des variations de fond physiquement possibles

dans la zone du levé, ainsi que le comportement général du système (bruit, aération, etc.) qui peut générer des mesures aberrantes en grande quantité, pénibles à éliminer en post-traitement. Ces seuils doivent toutefois être utilisés avec la plus grande prudence et paramétrés très largement autour du fond.

5.1.4 - Immersion des antennes du sondeur

Si le levé est réduit d'une marée observée, la connaissance de l'immersion des antennes SMF sous la surface est primordiale. La connaissance du tirant d'eau du navire est alors obligatoire. L'utilisation d'un capteur de mesure de l'immersion de la quille, est recommandée afin d'assurer un suivi de la variation du tirant d'eau du navire et, si nécessaire, ajuster l'immersion des antennes du sondeur. A défaut une mesure de tirant d'eau en début et en fin de levé peut être réalisée. Si un modèle fiable d'enfoncement dynamique du porteur en fonction de la vitesse et/ou de la charge est disponible (élaboré par des mesures à la mer), il pourra être utilisé pour affiner l'estimation de l'immersion des antennes du sondeur.

5.1.5 - Attitude

Le suivi temps réel des données d'attitude doit être réalisé :

- en surveillant les alarmes transmises par le système temps réel du sondeur sur la prise en compte des données d'attitude ;
- en surveillant les indicateurs de qualité des données d'attitude lorsqu'elles sont disponibles sur le logiciel temps réel associé au capteur d'attitude. Les options d'alarme visuelle ou sonore fixées sur un seuil de qualité des données devront être utilisées lorsqu'elles existent ;
- en diagnostiquant en temps réel les éventuelles corrections anormales de la bathymétrie. Ces corrections anormales peuvent être (lorsque le système est bien configuré et calibré) :
 - un positionnement aberrant des données par rapport à la route du navire traduisant des valeurs de cap erronées ;
 - des ondulations dans la bathymétrie, de période assez longue, proche de celle de la houle et perceptibles sur toute la largeur de fauchée : mauvaise correction du pilonnement ;
 - des ondulations dans la bathymétrie, de période courte, nulles sur les voies centrales et de signe opposé sur les voies latérales : correction anormale du roulis.

De manière générale, on portera une attention particulière à toutes les structures bathymétriques périodiques ou permanentes corrélées (perpendiculaires ou parallèles) à la route du navire : elles signalent fréquemment des erreurs systématiques. Les retournements seront mis à profit pour juger de leur existence réelle ou non.

5.1.6 - Suivi de ligne

Les systèmes SMF permettant une couverture surfacique, il n'est pas rigoureusement nécessaire de suivre très précisément la route théorique prédéfinie. En cas d'écart à cette route, un maintien du cap sans giration brutale, de sorte à assurer le recouvrement avec les fauchées adjacentes, est préférable à un suivi de route précis mais brusque et oscillant autour du profil théorique. Dans le cas où un système automatique de suivi de route est utilisé, on s'efforcera de limiter les accélérations du navire, et une période de stabilisation en début d'acquisition sera si possible réalisée.

5.1.7 - Imagerie

L'acquisition de données d'imagerie peut avoir un impact sur la cadence d'émission du SMF. Elle représente en effet un volume élevé de données à traiter et peut ralentir le processeur du sondeur et ainsi diminuer la cadence d'acquisition. L'imagerie peut également poser des difficultés de stockage des données (volume important). Son utilité effective devra être prise en compte avant de décider de son acquisition et archivage en temps réel.

5.1.8 - Réalisation de cible

Pour déterminer l'incertitude de positionnement du porteur nécessaire à la qualification de la donnée, la réalisation de cibles (tout au long du levé ou à défaut lors des escales) sur des points connus, à proximité de la zone levée et dans le même mode de localisation, est nécessaire.

5.2 - Traitement en temps peu différé

Certains traitements sur les données doivent être réalisés au fur et à mesure de l'avancement du levé, de sorte à définir au plus vite les travaux de complément (trou de couverture, recherche, etc.). Ceux-ci (principalement des profils de reprise ou des recherches) sont à effectuer avant de quitter la zone de travail.

5.2.1 - Hauteurs d'eau

Dans le cas où il n'est pas fait usage d'une marée cinématique, afin de pouvoir effectuer un contrôle qualité en temps peu différé (emploi des recouvrements et traversiers) et coter approximativement les points hauts au cours du levé (pour signalement des hauts-fonds potentiellement dangereux), on utilisera si possible une marée prédite pour réduire les mesures de profondeur.

5.2.2 - Validation de la navigation

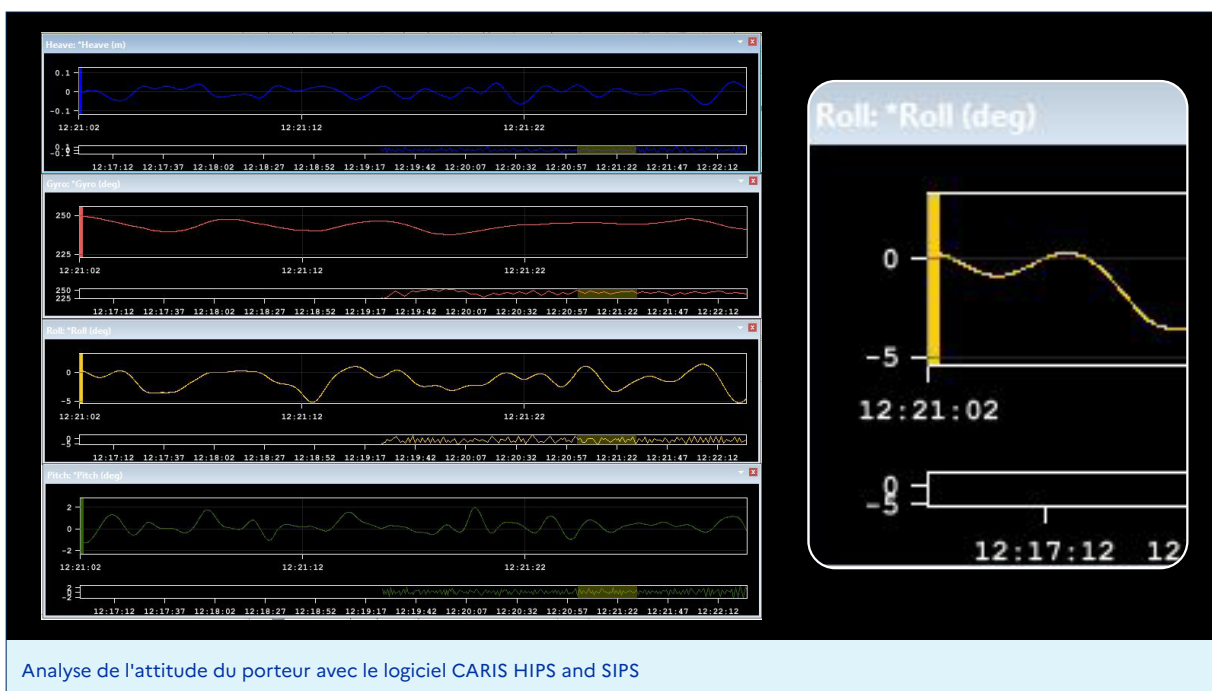
La validation de la navigation consiste à éliminer les données de positions aberrantes avant utilisation pour positionner les sondes, détecter les discontinuités de la route ou de la vitesse fond (saut de localisation, perte du mode différentiel) et décider s'il est possible d'interpoler entre les données invalidées ou bien si des portions de profils doivent être reprises.

Souvent, les écarts recherchés sont de l'ordre de quelques mètres. L'examen des données doit donc se faire à une échelle adaptée à la précision du positionnement recherchée en utilisant les fonctions de zoom.

Dans un temps peu différé, la visualisation des indicateurs de qualité fournis par la centrale inertielle permet d'identifier les changements de mode GNSS et les éventuels sauts. Généralement, lorsque des tops de localisation sont invalidés, ils sont remplacés par le calcul d'une position à l'estime, à condition que l'incertitude sur la position interpolée soit cohérente avec l'ordre du levé.

5.2.3 - Validation de l'attitude et du cap

Les données issues de la centrale inertielle doivent être visualisées sous la forme d'un affichage temporel afin de rechercher les valeurs aberrantes (des pics). Une attention particulière doit être portée sur les données de début de ligne, en particulier sur le pilonnement (heave).



Si la période d'invalidation des données d'attitude est trop longue pour permettre une interpolation avec une incertitude suffisante au regard des incertitudes recherchées, les données bathymétriques doivent être invalidées également.

5.2.4 - Examen de la bathymétrie

Un premier examen de la bathymétrie, en consultant, a minima, les MNT présentant les profondeurs minimales, maximales et moyennes ainsi que les écarts-types sur la profondeur est à faire afin de :

- déterminer les structures du fond pour lesquelles des profils de recherche sont nécessaires ;
- éliminer les données les plus aberrantes et définir des lignes de complément sur les trous de couverture éventuellement générés par cette opération.

5.2.5 - Contrôle de la couverture

Si l'exploration complète du fond est demandée, il est primordial de mettre en évidence les trous de couverture dans la donnée bathymétrique (et sonar à balayage latéral s'il a été mis en œuvre). Si la double insonification est requise, il faut contrôler la double couverture en affichant la surface couverte par un profil sur deux. Dans le cas où le bruit de mesures est très important, un premier traitement doit être réalisé avant de faire ce contrôle de couverture.

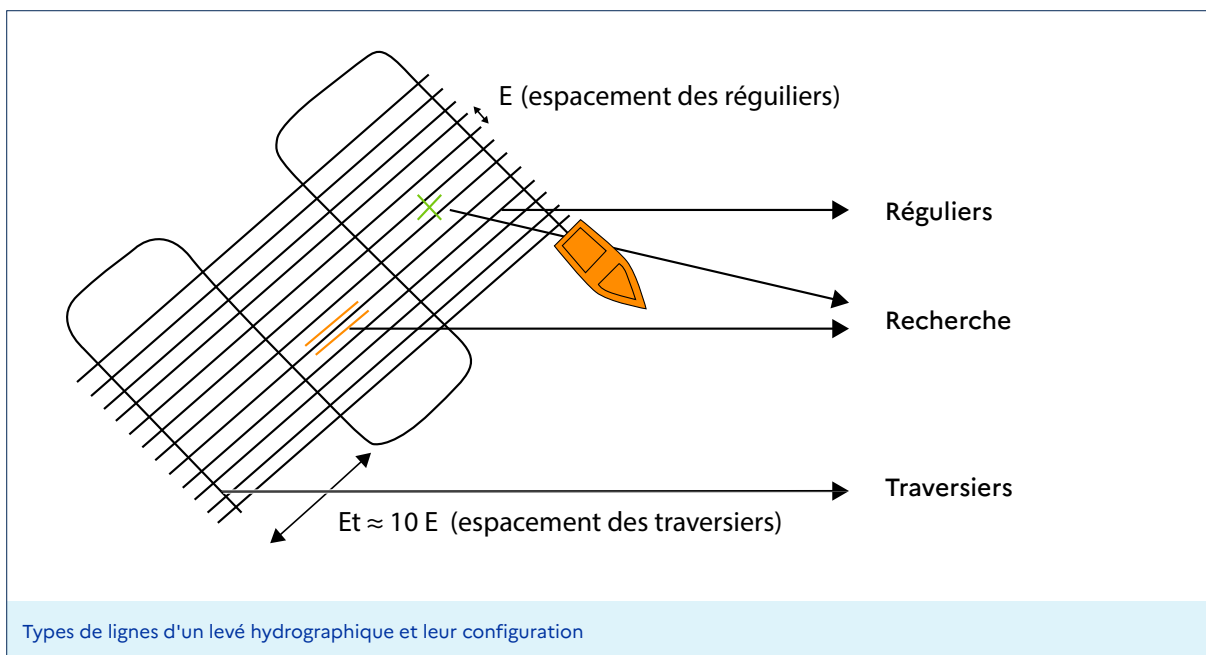
Les recouvrements entre fauchées sont également à examiner afin de mettre en évidence des problèmes de répétabilité dans les données. La vue 2D géoréférencée de la bathymétrie, si possible ombrée et réduite de la marée prédite, est à utiliser.

5.3 - Planification et réalisation des recherches.

Tout paquet de sondes (agrégat de sondes) pouvant potentiellement être une structure réelle doit faire l'objet d'un examen particulier afin de trancher sur l'existence ou non de la structure. Une valeur communément utilisée, au Shom, pour distinguer un agrégat suspect de sondes invalidées du bruit est située entre 5 et 9 sondes ou bien détecté par au moins deux profils différents. Cet examen des sondes doit être réalisé chaque jour afin de planifier les recherches.

Si une inspection par plongeur est possible cette solution sera privilégiée pour effectuer les recherches. Elle permet de vérifier la bonne détection du point haut, de déterminer une cotation et d'identifier la nature de l'objet. La sonde validée la plus courte obtenue par acoustique (faisceaux jugés précis) ou plongeur sera conservée.

Dans le cas contraire, l'ensemble des équipements acoustiques, répondant aux critères de résolution nécessaires pour le levé, sera mis en œuvre afin d'estimer la cotation de l'épave. La sonde la plus courte obtenue sera conservée, et une estimation de son incertitude sera fournie. Dans ce cas, la cotation peut être effectuée par sondage au SMF, avec une résolution optimale et une insonification de l'ensemble de la structure. Le ou les points hauts de la structure devront alors être cotés par les voies les plus précises du SMF, établies lors des essais. Si le SMF le permet, la fauchée sera réduite (ouverture de $2 \times 30^\circ$) de manière à concentrer les faisceaux et ainsi obtenir le maximum de pings sur le relèvement du fond. Si la fauchée ne peut être réduite, une autre façon d'augmenter le nombre de pings sur la structure et donc améliorer la caractérisation du relèvement est de réduire la vitesse du porteur (2 à 4 nœuds).



Dans la mesure du possible, il faut déterminer la nature physique du relèvement, qu'il soit artificiel ou non. Dans le cas d'une épave ou d'une obstruction, la profondeur et la nature du fond environnant devront être déterminées et tous les éléments permettant de suivre l'évolution du relèvement devront être archivés.

Il ne faut pas attribuer au relèvement une cotation provenant de la présence d'objets ne présentant pas de danger et dont la présence est saisonnière ou temporaire (comme des algues).

Si l'étude individuelle de chaque relèvement n'a pas été assurée, la mention de cette omission doit apparaître clairement dans le rapport et dans les métadonnées du levé.

6 - TRAITEMENT DES DONNÉES

6.1 - Création du modèle numérique de terrain	43
6.2 - Traitement de la localisation	43
6.3 - Traitement de la célérité	44
6.4 - Validation de l'attitude et du cap	45
6.5 - Réduction de la marée	45
6.6 - Traitement de la bathymétrie	46
6.7 - Contrôle qualité (QC-test)	52

À l'issue de la session de sondage, les données brutes acquises doivent être sauvegardées à bord ou à terre sur un serveur d'archivage. Ces données doivent constamment être disponibles au moins sur deux supports de sauvegarde différents dont au moins un qui est conservé au cours de l'intégralité du traitement afin de pouvoir y revenir en cas d'erreur.

6.1 - Création du modèle numérique de terrain

Le MNT est l'outil de visualisation de la donnée bathymétrique le plus pratique : son paramétrage (création et utilisation) est donc essentiel pour le traitement des données. Plusieurs choix sont importants :

- taille de la maille : elle doit être de l'ordre de la résolution du sondeur à la profondeur du levé pour obtenir une représentation la plus détaillée du relief. Une maille trop grande peut faire disparaître les oscillations parasites et handicaper la détection des dysfonctionnements du sondeur. La S-44 préconise d'avoir au minimum 5 sondes par maille ;
- l'empreinte au sol : elle doit prendre en compte au mieux la surface couverte par le sondeur et ne pas donner de fausse impression de couverture complète (ou inversement),
- la méthode de génération du MNT : utilisation d'une valeur moyenne de la maille, de la sonde la plus courte, etc. ;
- l'étendue du MNT doit être compatible avec les capacités informatiques du poste de travail (pas de ralentissement de l'accès aux données).

Une attention particulière doit être portée sur la méthode de génération du MNT. L'utilisation de profondeurs moyennes implique un lissage de la bathymétrie dépendant de la taille de maille et de la densité de sondes. Celui-ci peut se montrer impactant pour la détermination du brassage des points hauts, nécessaires pour l'atteinte du critère d'exploration complète.

Les méthodes de traitement et de génération des résultats devront permettre d'assurer la conservation des points hauts issus des relèvements qui devaient être cotés.

D'une manière générale on pourra se référer à l'annexe D de la S-44 6^e édition.

Le MNT est un outil très important lors des opérations de traitement et de contrôle (en complément d'une vue 3D) :

- le niveau de zoom doit être adapté aux dimensions des relèvements à mettre en évidence ;
- la palette de couleur : sa dynamique doit être adaptée à la profondeur locale de sorte que toute variation suspecte se traduise par un changement de couleur ;
- la modification de l'ombrage permet de mieux appréhender la morphologie ou l'aspect d'une remontée de fond pour la classifier. Il doit pouvoir être orienté parallèlement et perpendiculairement à la route du navire de façon à mettre en évidence les erreurs systématiques ;
- l'exagération verticale permet également d'améliorer la détection des remontées de fond ;
- les différentes couches générées sont à utiliser. Par exemple, les couches « deep » (sondes les plus profondes) ou « shoal » (sondes les plus courtes) permettent rapidement d'identifier des erreurs de traitement (oubli de suppression de sondes aberrantes) tandis que la couche « Std deviation » (écart type) met en exergue les zones nécessitant un contrôle approfondi car présentant une plus grande disparité de profondeurs mesurées.

Pour la suite on considère que les sondes les plus grossièrement erronées sont éliminées. Ces anomalies peuvent être éliminées par seuillage sur la profondeur (les seuils sont choisis de sorte à n'éliminer aucune donnée valide), ou manuellement.

6.2 - Traitement de la localisation

La localisation acquise doit être traitée avant d'être utilisée pour positionner les données.

Le traitement des données de position doit aboutir à un jeu de données dont l'incertitude est au plus égale à l'erreur aléatoire théorique du capteur de position : c'est-à-dire que l'on a procédé à l'élimination des erreurs ponctuelles. Les données invalidées doivent être « flaguées » et non supprimées définitivement du lot de données.

Le principe de validation de la navigation est le suivant :

- la navigation, en l'absence de critères objectifs sur la qualité des points GNSS, doit être validée en utilisant une représentation 2D, en utilisant les compléments d'information disponibles tels que des représentations temporelles de la vitesse, de la route fond, du cap, etc. Un point doit être invalidé s'il s'écarte ponctuellement de la route moyenne d'une distance anormalement élevée compte tenu de la précision attendue sur la navigation et de la vitesse du porteur ;
- l'interpolation dans les données de navigation est autorisée, dans une certaine limite : l'estimation de la position possible du porteur au milieu de l'intervalle d'interpolation ne doit pas excéder une valeur définie par le responsable du levé, en fonction de la précision requise sur la localisation.

Le résultat du traitement de la localisation est :

- un jeu de données de positions datées, dont l'incertitude est compatible avec les objectifs du levé ;
- une qualification de la qualité des positions : incertitude horizontale (et verticale si les données d'altitude sont utilisées) ;
- une description de méthodes utilisées dans le traitement de cette localisation, en vue de leur archivage dans les métadonnées ;
- la méthode de qualification des données employée en vue de son archivage dans les métadonnées.

6.3 - Traitement de la célérité

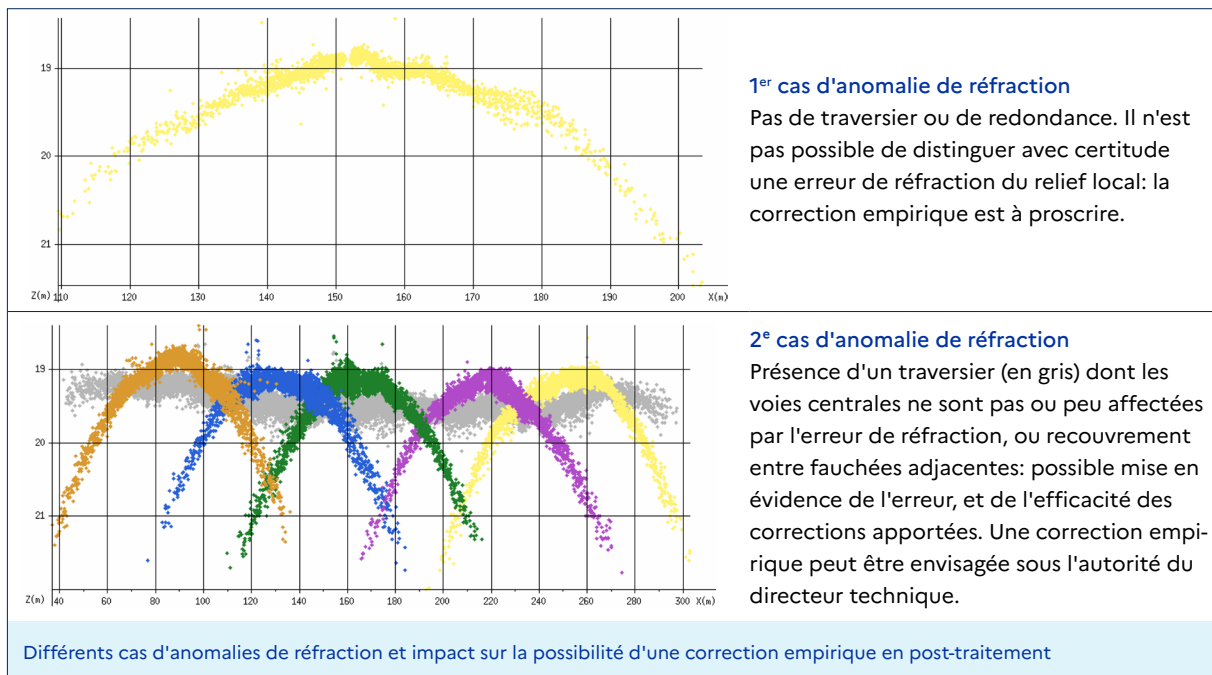
La prise en compte de la célérité est normalement effectuée par le SMF en temps réel.

Le traitement des données de célérité consiste donc à :

- vérifier la cohérence des valeurs de la célérité de surface entre elles, en les visualisant au cours du temps et en recherchant les discontinuités anormales dans ces données ;
- vérifier la cohérence des valeurs de célérité de surface avec celle du profil de célérité utilisé simultanément pour la correction des données ;
- vérifier la qualité du profil de célérité utilisé en temps réel. Ce contrôle doit être effectué en intercomparant des profils proches, ou en comparant le profil courant avec un profil type de la zone sondée (statistiques).

Si une anomalie est détectée dans la célérité de surface et/ou le profil de célérité, les données peuvent généralement être rejouées en temps différé.

La présence d'une erreur de célérité sera détectée lors du contrôle en temps différé, en particulier sur les données provenant des faisceaux latéraux : écarts notables sur ces voies par rapport à des données de référence (faisceaux centraux d'un traversier par exemple), plus réduits sur les voies centrales, incurvation anormale du fond, problèmes de recouvrement sur les voies latérales.



Si une erreur de réfraction est présente dans les données, et que sa cause n'est pas corrigible aisément, deux solutions sont possibles :

- réduire la largeur de la fauchée : solution la plus rigoureuse mais qui peut engendrer l'invalidation d'un grand nombre de données et par conséquent causer des problèmes de couverture ;
- corriger empiriquement l'erreur de réfraction. Solution qui peut être hasardeuse dans certains cas et qui doit être réservée à des situations pour lesquelles il existe des traversiers et lorsque le recouvrement entre fauchées est suffisant pour certifier que la correction apportée supprime un problème de réfraction sans dégrader la représentation du fond.

6.4 - Validation de l'attitude et du cap

Les paramètres d'attitude et de cap doivent être validés, la méthode est identique à celle décrite au §5.2.3. En plus, quelques points à contrôler :

- les périodes des mesures de roulis, tangage et pilonnement doivent être vérifiées ;
- la valeur moyenne du pilonnement doit être observée, en particulier après giration (valeur moyenne normalement nulle).

Un problème de mesure de l'attitude du navire et en particulier du roulis peut également être mis en évidence lors du contrôle des données de bathymétrie (voir §6.6 et annexe 7).

6.5 - Réduction de la marée

La correction de marée en temps différé devra être appliquée pour ramener les mesures de profondeur au zéro de réduction des sondes.

On utilisera selon les cas et les données disponibles :

- un modèle de marée calé sur des observations ;
- des observations de marée ramenées au zéro hydrographique.

La précision du modèle ou des observations utilisées pour réduire les mesures sur l'ensemble de la zone sondée devront être compatibles avec l'incertitude verticale requise.

Dans le cas où le levé a été réalisé par rapport à l'ellipsoïde (marée cinématique) la méthode pour ramener les profondeurs au zéro hydrographique adéquat est détaillée au §4.2.3.

6.6 - Traitement de la bathymétrie

Les objectifs du traitement de la bathymétrie sont :

- de détecter, corriger ou supprimer les erreurs systématiques ;
- de minimiser l'impact des erreurs ponctuelles sur la qualité des données tout en assurant la sécurité de la navigation en priorité ;
- de déterminer les incertitudes horizontale et verticale des données de bathymétrie statistiquement à l'issue du traitement ;
- d'assurer que tous les relèvements du fond qui devaient être détectés et cotés l'ont été.

Par contre, le traitement bathymétrique ne doit pas s'apparenter à « dessiner » le fond (invalidation des sondes jusqu'à obtenir un fond plat par exemple, suppression de bruits sans certitude que le fond obtenu est réel, etc.).

À noter que l'expérience de l'opérateur est primordiale dans le traitement de la bathymétrie.

6.6.1 - Détection et élimination des erreurs systématiques

Une recherche des erreurs systématiques non corrigées en temps réel doit toujours être réalisée avant la recherche des erreurs ponctuelles.

Les erreurs systématiques sont décelées en :

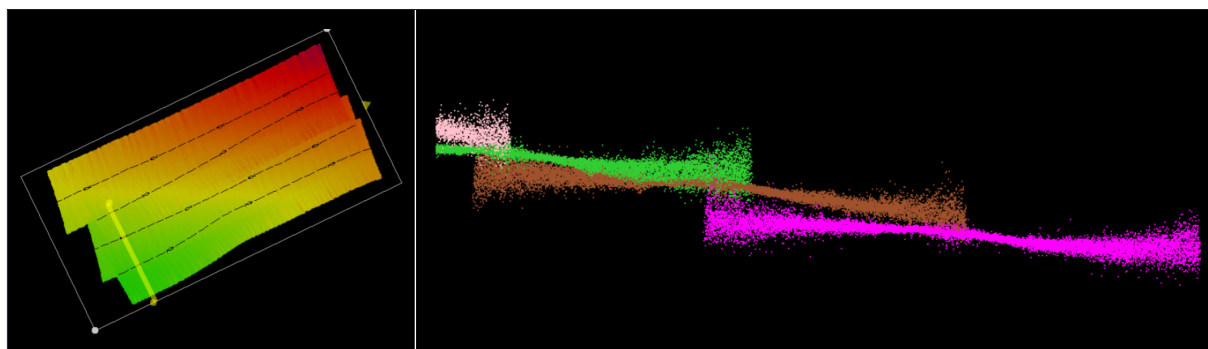
- examinant les zones de recouvrement entre les lignes (réguliers et traversiers) ;
- examinant les intersections entre le levé régulier et les traversiers ;
- en créant un MNT et en faisant varier l'incidence et le contraste de l'éclairage ombré. Il faut alors rechercher les structures du relief corrélées avec la route du navire (parallèle, perpendiculaire, ondulatoire).

Biais vertical constant

Les causes possibles de ce type de biais sont :

- une correction de marée inadaptée ou erronée (si ce biais évolue dans le temps de manière corrélée avec l'heure d'acquisition des lignes, cette cause est la plus probable) ;
- une variation non maîtrisée de l'immersion de la base entre périodes d'acquisition ;
- une correction anormale du pilonnement.

Ce biais se détecte en examinant le croisement entre réguliers et traversiers ou en examinant les recouvrements en extrémité de fauchée. Les données sont examinées en réalisant une coupe perpendiculaire aux lignes.

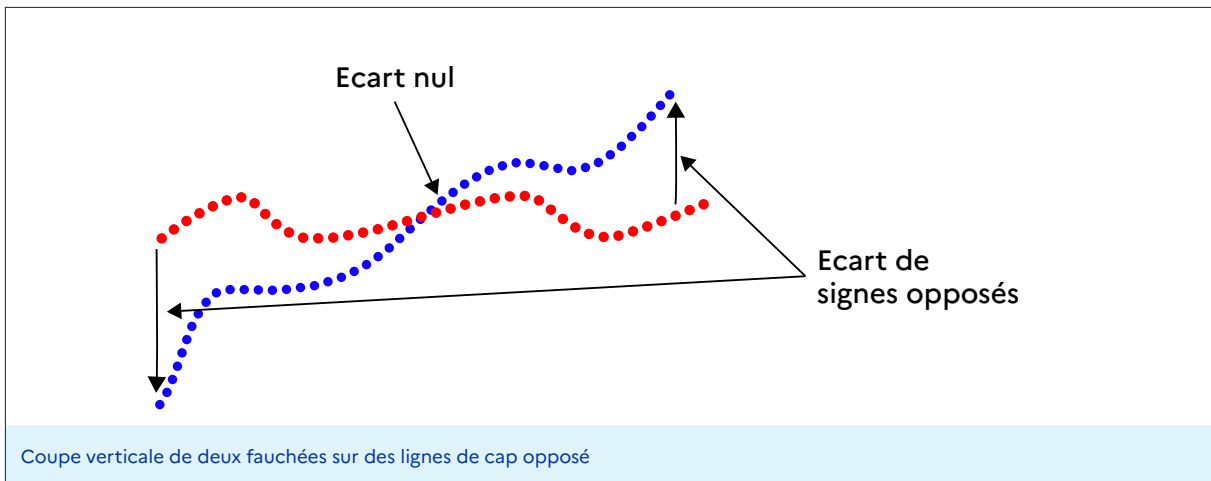


Type d'erreur systématique correspondant à une mauvaise correction d'une des mesures suivantes : hauteur de marée, immersion des bases, pilonnement

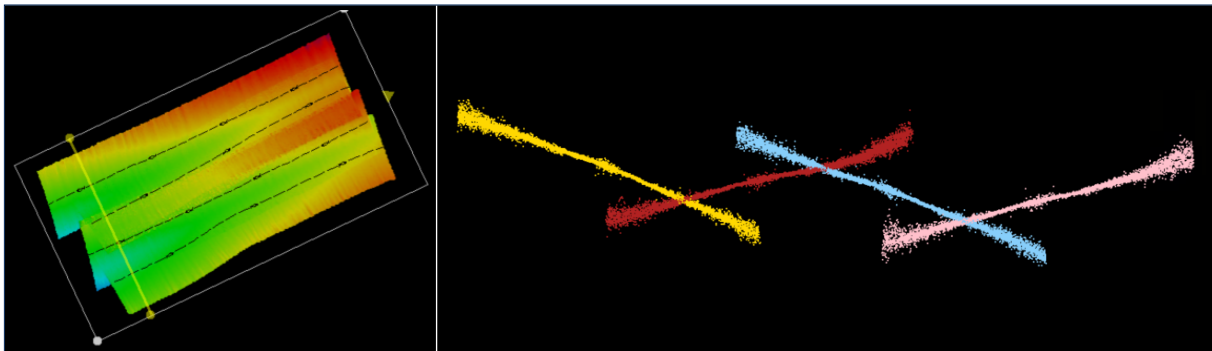
Biais en roulis

Ce biais se repère lorsque les lignes présentent un écart nul sur les voies centrales et des écarts de signes opposés sur les voies latérales. La cause la plus probable est une mauvaise correction du roulis. Ce biais peut être constant (écart sensiblement identique à tous les points de croisement) et être alors corrigé.

Si l'écart évolue dans le temps, il s'agit d'un dysfonctionnement de la centrale d'attitude ou d'un retard mal maîtrisé entre le capteur d'attitude et le sondeur. Dans ce cas le biais est souvent impossible à corriger.



Les données doivent être examinées en réalisant une coupe perpendiculaire aux profils.

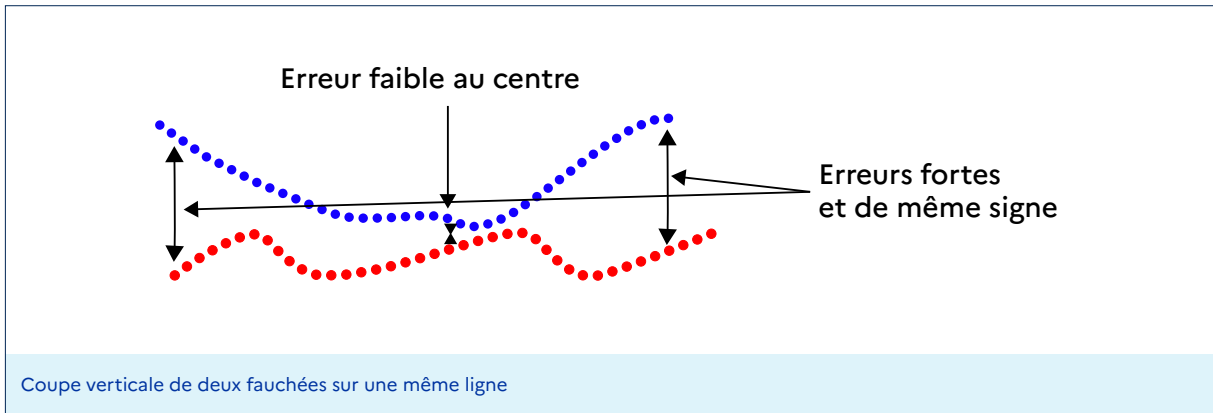


Type d'erreur systématique correspond à un biais en roulis

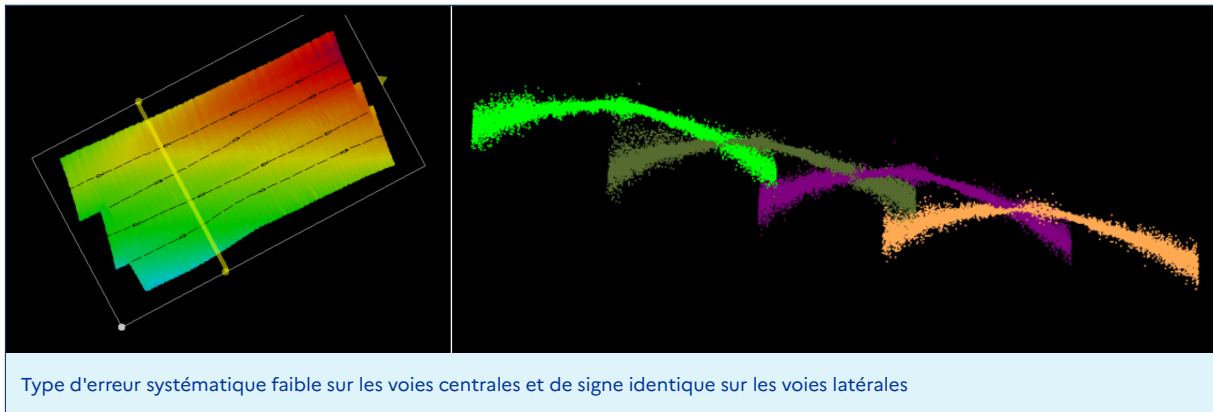
Erreur de réfraction

Ce biais se détecte lorsque les fauchées présentent des valeurs semblables sur les voies centrales, mais présente des écarts forts et de même signe sur les voies latérales. On parle alors de « sourire » ou de « sourire inversé ». La plupart du temps ce biais provient d'une mauvaise connaissance de la célérité soit au niveau de l'antenne soit dans la colonne d'eau. Si des données de célérité correctes sont disponibles il est alors possible de rejouer les données de bathymétrie.

Si la célérité est correcte à tous les niveaux, cette anomalie peut traduire une réfraction mal maîtrisée dans le revêtement de l'antenne.



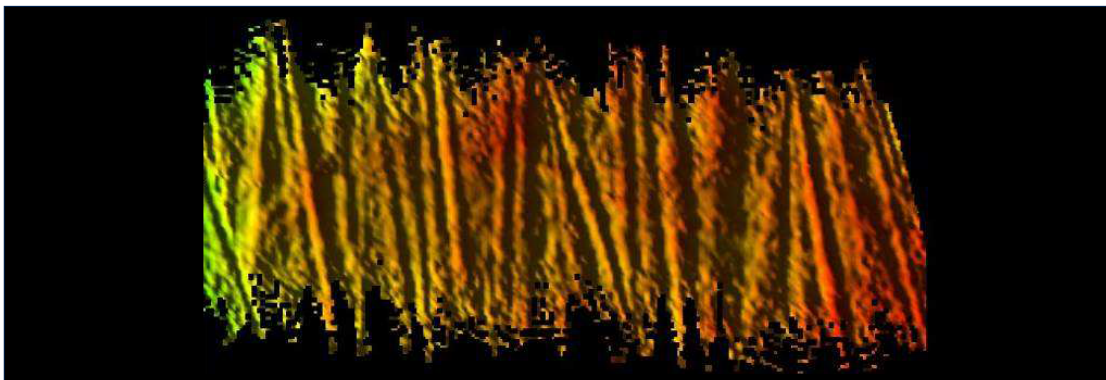
Les données doivent être examinées en réalisant une coupe perpendiculaire aux profils.



Erreur «tôle ondulée»

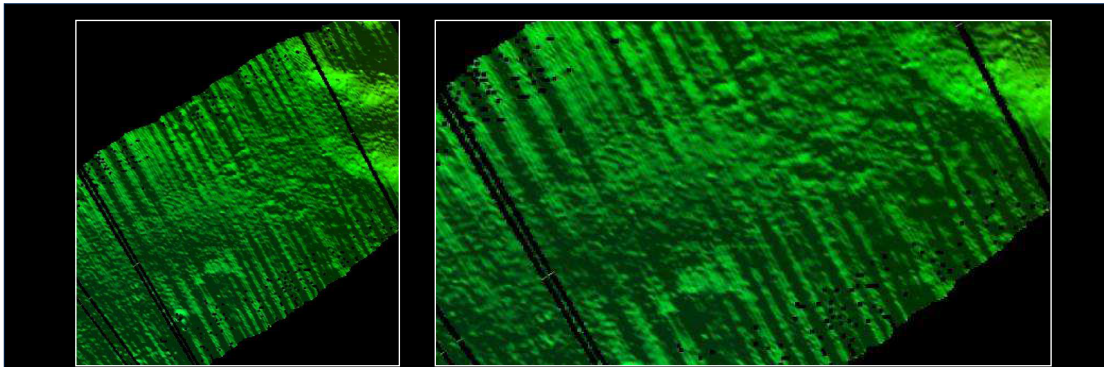
L'erreur de type «tôle ondulée» peut avoir plusieurs causes :

- l'effet «tôle ondulée» est perceptible sur toute la largeur de la fauchée avec une période de quelques secondes : correction anormale du pilonnement ;



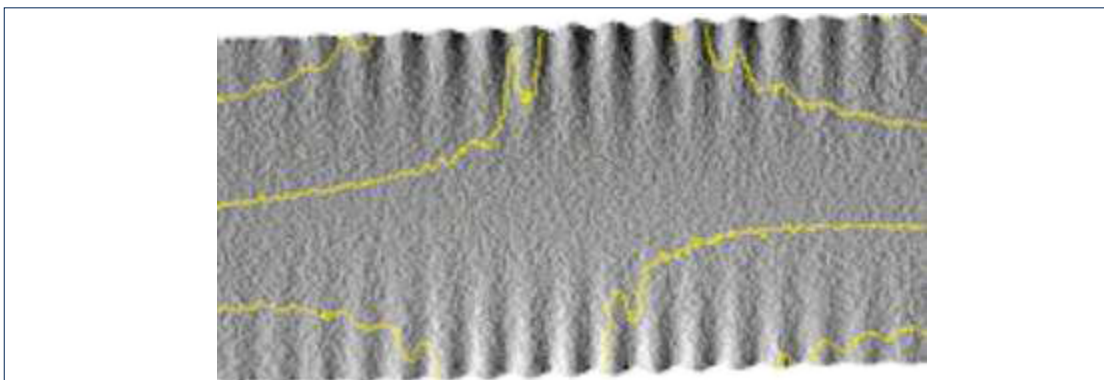
«Tôle ondulée» perceptible sur toute la largeur de fauchée, période de quelques secondes : correction anormale du pilonnement"

- l'effet «tôle ondulée» est perceptible uniquement sur les faisceaux latéraux, une période courte, de signe opposé de part et d'autre, pente transversale apparemment linéaire : correction anormale du roulis ;



« Tôle ondulée » perceptible uniquement sur les faisceaux latéraux, période courte, de signe opposé de part et d'autre de la fauchée."

- L'effet « tôle ondulée » est visible sur les faisceaux extrêmes, en phase entre bâbord et tribord : ce peut être le cas lorsque la thermocline est proche de la surface. Le célérimètre de coque « entre et sort » de la thermocline et délivre alors une valeur moyenne de la célérité qui est alternativement trop forte et trop faible ce qui crée des oscillations en phase sur les voies latérales.



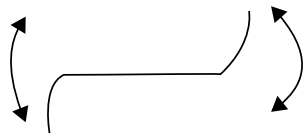
Oscillations des voies latérales en phase (source : John H. Clarke, UNB/OMG)

En pratique, il peut être très difficile de séparer ces sources d'erreur :

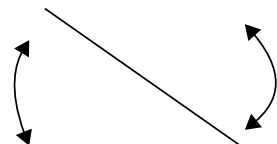
- le roulis et le tangage sont fréquemment en phase ou de fréquences très proches ;
- les oscillations causées par la célérité sont corrélées au roulis ou au tangage et peuvent donc se confondre aisément avec un problème de correction d'attitude ;
- la rugosité du fond s'ajoute aux phénomènes périodiques ;
- les erreurs peuvent se cumuler.

La méthodologie à adopter pour déterminer la source de l'erreur est de :

- favoriser une source d'erreur particulière en cas d'ambiguïté sur la composante d'attitude ;
- adopter une route et une allure minimisant le roulis ou le tangage à l'exclusion de l'autre mouvement ou séparant les fréquences ;
- opérer sur fond plat afin de minimiser l'impact de la rugosité du fond dans l'analyse ;
- extraire la bathymétrie d'un faisceau central et de deux faisceaux latéraux et la comparer avec l'attitude enregistrée en fonction du temps (roulis, tangage, pilonnement). Mettre en évidence les analogies fréquentielles et les différences de phase éventuelles ;
- en cas d'oscillations sur les voies latérales en opposition de phase, observer la coupe transversale du fond :



Si elle présente une incurvation qui s'accroît avec l'incidence, de signe opposé sur les voies opposées, l'anomalie est plus probablement corrélée avec la célérité de surface.



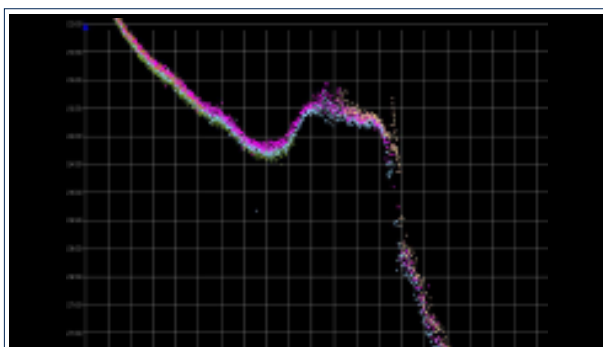
Si celle-ci est linéaire, l'anomalie s'apparente à une correction de roulis imparfaite (réellement ou en apparence).

L'annexe 7 présente quelques exemples complémentaires de mauvais fonctionnement d'un SMF.

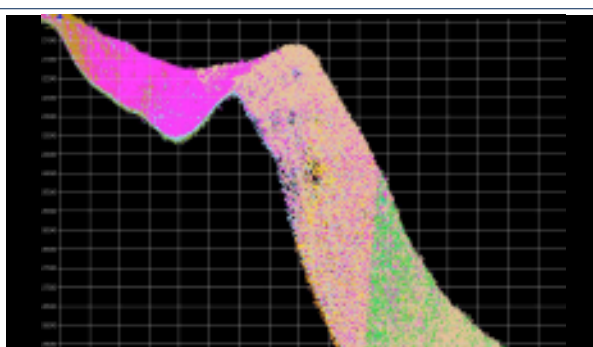
6.6.2 - Traitement des erreurs ponctuelles

Le traitement des erreurs ponctuelles s'effectue à l'aide de l'outil de visualisation des données qui doit permettre la réalisation de coupes dans une partie du lot de sondes. L'ensemble des zones balayées en coupe doit être suivi de sorte à passer en revue toutes les données. Ces coupes doivent être :

- perpendiculaires aux lignes ;
- suffisamment fines pour ne pas masquer les erreurs ponctuelles.



Coupe fine permettant de discerner les sondes

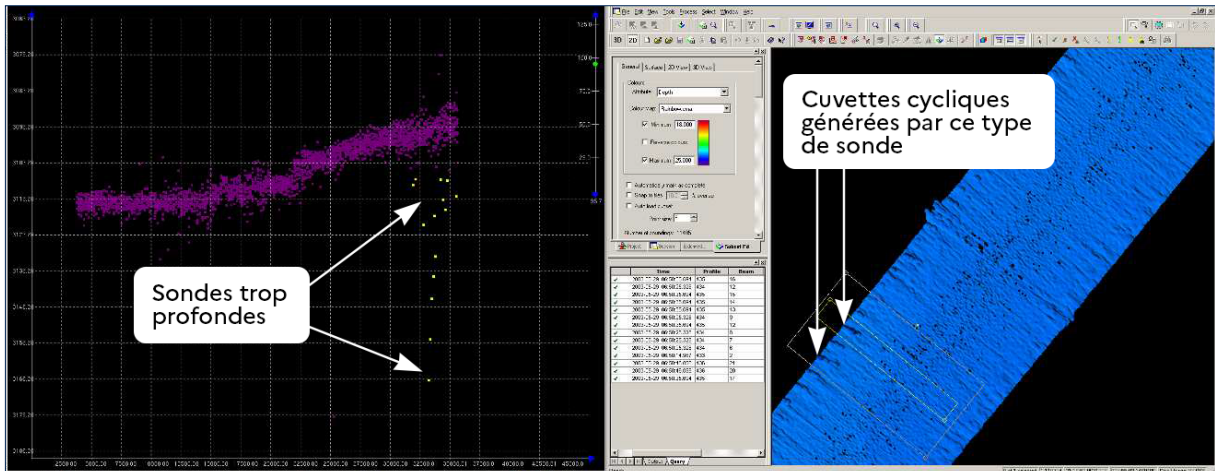


Coupe large ne permettant pas de discerner le bruit

Lorsque des profils adjacents se touchent ou se recouvrent, il est nécessaire de les inclure dans la coupe de sorte à accélérer le traitement. Il est également important de représenter les sondes en fonction de leur fauchée d'appartenance (utilisation de la couleur).

Les erreurs ponctuelles à rechercher sont les sondes qui s'écartent notablement du « matelas de sondes », i.e. d'environ deux fois l'épaisseur de ce dernier. Tout relèvement douteux doit être examiné sous plusieurs angles pour en déterminer au mieux la cohérence géographique.

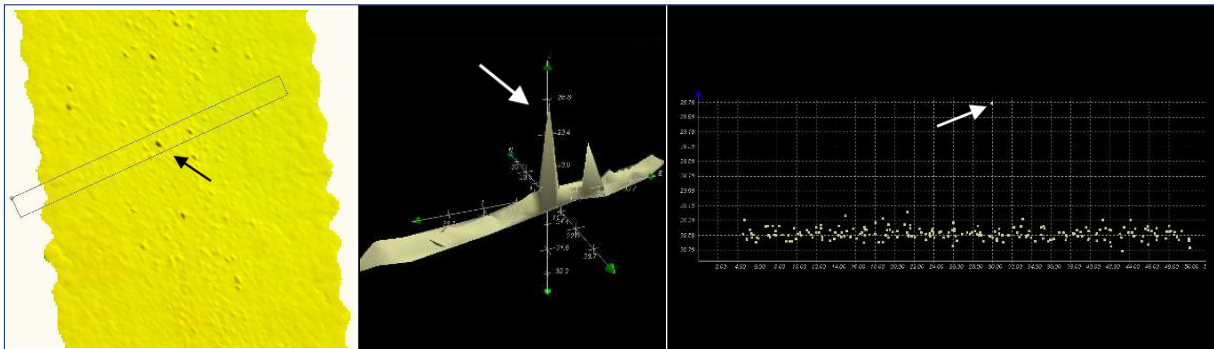
Les erreurs ponctuelles trop profondes sont éliminées dès qu'elles ne représentent pas le fond avec une probabilité suffisante. Par exemple, les sondes trop profondes, s'écartant notablement du fond, incluses dans un groupe qui présente une continuité géographique et qui décrivent un relief théoriquement possible mais peu réaliste doivent être éliminées.



Groupe de sondes s'écartant vers le bas et pouvant être invalidées : elles appartiennent à des cycles et profils adjacents, génèrent une cuvette dans le fond plat qui pourrait théoriquement avoir une existence physique. La position de ces sondes (voies latérales), la grande variation de profondeur et le caractère cyclique de ce type de décrochement du sondeur montre leur caractère aberrant quasi certain : elles peuvent être invalidées systématiquement. La reprise du profil sera décidée par le directeur technique.

Concernant les erreurs ponctuelles plus courtes que le fond environnant :

- elles seront éliminées si elles ne sont détectées que par une seule fauchée sans avoir de cohérence spatiale et si leur nombre est inférieur au seuil de détection fixé pour le levé ;
- le bruit de mesure est supprimé même s'il est apparent sur plusieurs fauchées ;
- les sondes détectées par des fauchées différentes et ne s'apparentant visiblement pas à du bruit sont conservées ;
- les sondes cohérentes spatialement et en nombre supérieur au seuil de détection sont conservées (sauf si éliminées par une recherche).



Relèvement généré par une sonde isolée s'écartant vers le haut. Absence de cohérence spatiale et de redondance confirmée par les vues 3D et en coupe. Cette sonde est à invalider

6.6.3 - Traitement automatique

Des algorithmes de traitement automatique, alternatives au traitement manuel, existent et peuvent accélérer considérablement le temps de traitement. Il existe deux grandes familles :

- « filtre passe haut / passe bas » : il est fortement déconseillé de les utiliser sans vérifier l'ensemble des sondes rejetées. En effet, ces filtres s'appuyant sur des bornes (soit fixe, soit autour de la valeur moyenne du tapis de sonde), ils peuvent supprimer des remontées de fonds ponctuelles dangereuses pour la navigation ;
- « basé sur les incertitudes » : l'emploi de ce type d'algorithme semi-automatique (i.e. l'opérateur doit valider certains choix fait par l'algorithme) est puissant mais suppose un paramétrage très fin et une très bonne connaissance de son fonctionnement sous peine d'obtenir un traitement faux.

6.7 - Contrôle qualité (QC-test)

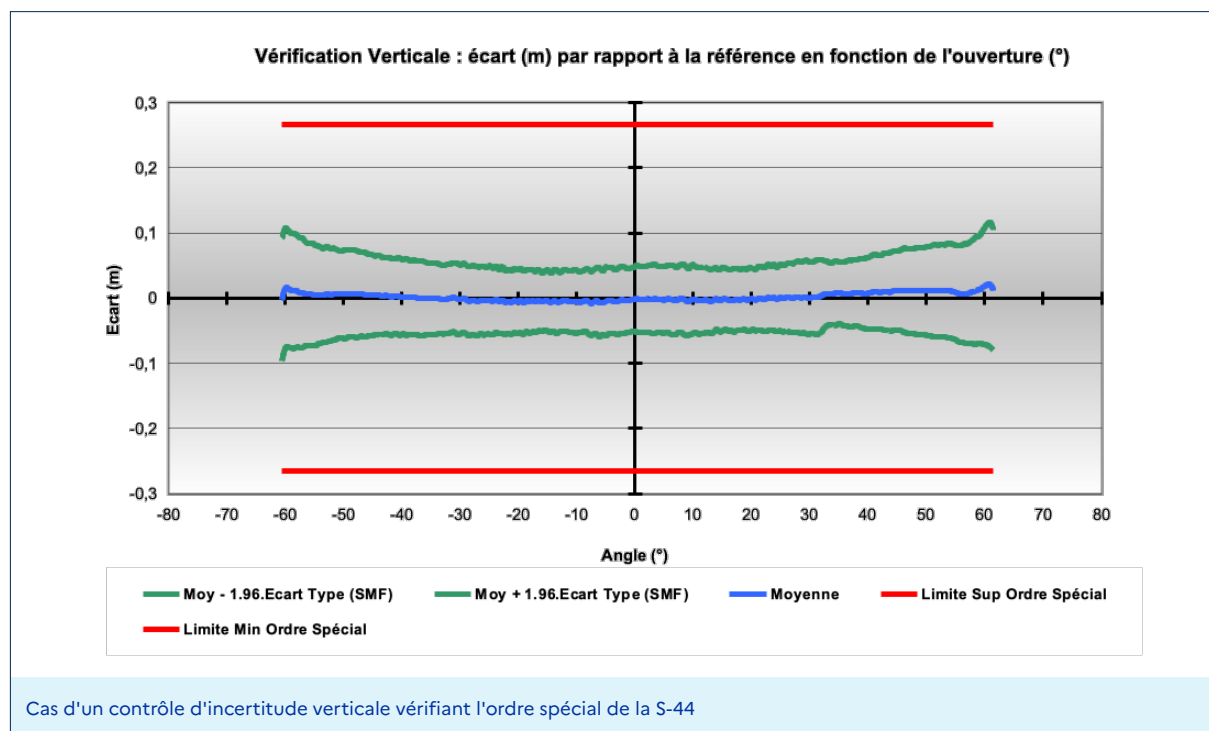
La qualification des données est réalisée si possible en qualifiant statistiquement les sondes en fin de traitement.

6.7.1 - Qualification verticale

Le QC-test usuellement utilisé pour la qualification verticale est le suivant (la vérification verticale du sondeur lors de l'ajustage est un prérequis) :

- génération d'un MNT de référence sur une zone plane du levé à l'aide des voies centrales des traversiers et une taille de maille proche de la réalité physique du sondeur ;
- calcul de l'écart moyen et de l'écart-type associé par faisceau ou incidence entre les sondes issues du levé régulier et ce MNT de référence

Une estimation de l'incertitude verticale à 95% est alors donnée par la moyenne ± 2 fois l'écart type. Il est nécessaire, pour obtenir une incertitude totale de ne pas oublier d'ajouter les incertitudes au rattachement à la référence verticale.



Si la rugosité du fond est trop importante pour réaliser un MNT de référence, l'estimation de la précision verticale est faite en visualisant les points de croisement aux traversiers et en quantifiant les écarts entre réguliers et traversiers. Pour cela, il faut réaliser des coupes fines (10% de la hauteur d'eau) et mesurer l'épaisseur du matelas de sondes : cette mesure s'approche de l'incertitude à 95% des sondes (si les sondes aberrantes ont bien été supprimées).

Il est recommandé de comparer ces résultats au modèle d'erreur a priori (voir [§3.2.3](#)) si celui-ci est fiable.

6.7.2 - Qualification horizontale

La qualification horizontale des sondes par des observations in situ demeurent la méthode la plus fiable : il s'agit alors de comparer la position connue d'un objet à la position mesurée par le levé. Toutefois, ceci suppose de connaître précisément la position d'objets immergés sur la zone de levé, ce qui n'est pas toujours le cas.

Ainsi, souvent, seul un calcul théorique est possible (voir [§3.2.2](#)).

6.7.3 - Autres QC-test

En plus des qualifications verticale et horizontale, les autres critères à atteindre pour le levé (exploration, etc.) doivent être contrôlés et prouvés.

Des comparaisons avec les connaissances antérieures (levé, carte marine, liste d'obstruction, etc.) sont également pertinentes, en tenant compte des qualifications respectives des données. Ceci permet en particulier de vérifier que :

- la cohérence est bonne entre les données (modulo les évolutions connues sur zone telles qu'un dragage) ;
- le levé réalisé ne présente pas un biais constant (souvent lié à une mauvaise prise en compte du tirant d'eau) ;
- l'opérateur n'a pas supprimé des objets dangereux pour la navigation au traitement (a priori, une épave ne « disparaît » pas).

7 - INFORMATION NAUTIQUE

7.1 - Signalement des dangers pour la navigation	55
7.2 - Transmission des données au Shom	55



7.1 - Signalement des dangers pour la navigation

En application de la convention SOLAS (Safety of life at sea), tout élément naturel (banc, roche, récif, affleurement rocheux, etc.) ou artificiel (épave, obstruction, etc.) pouvant représenter un danger imminent pour la navigation (de surface ou sous-marine) selon les critères de la S-4 §B620.3, doit être signalé sans délai aux services compétents.

Toutes les informations utiles sont disponibles sur www.shom.fr / Information nautique.

7.2 - Transmission des données au Shom

Dans les eaux sous souveraineté ou juridiction française, conformément au code minier (article L413-1), au code de la recherche (article L251-3) et au code de la défense (article R3416-6), les données collectées lors de levés conduits ou commandés par des autorités responsables (port, département, région...) ou au cours de campagnes de recherche scientifique marine doivent être transmises au Shom.

Les données bathymétriques sont acceptées dans quasiment tous les formats, si possible nettoyées des données aberrantes et à la meilleure résolution permise par les moyens mise en œuvre. Les formats ASCII LGZ/He (ou XYZ) ou GSF sont ceux qui offrent la plus grande facilité de traitement. Les données devront avoir été réduites de la marée observée si le levé n'a pas été effectué via l'ellipsoïde.

Les levés transmis devront être accompagnés de métadonnées minimales permettant la bonne compréhension des objectifs du levé ainsi que des moyens et procédures mis en œuvre. Ces informations conditionneront l'exploitation et la qualification pour un usage dédié à la sécurité de la navigation.

Par ailleurs, le Shom est autorisé à garder certaines informations confidentielles pour une durée allant jusqu'à 10 ans pour la bathymétrie (dispositions ci-dessus et code des relations entre le public et l'administration). Seules les informations strictement nécessaires à la navigation de surface, à la sécurité et au sauvetage des vies et des biens à la mer (informations nautiques collectées et diffusées en application des articles 7, 8 et 32 de l'ordonnance 2016-1687 du 8 décembre 2016 relative aux espaces maritimes relevant de la souveraineté ou de la juridiction de la République française et des chapitres I et V de la convention SOLAS) seront alors exploitées dans la documentation nautique officielle.

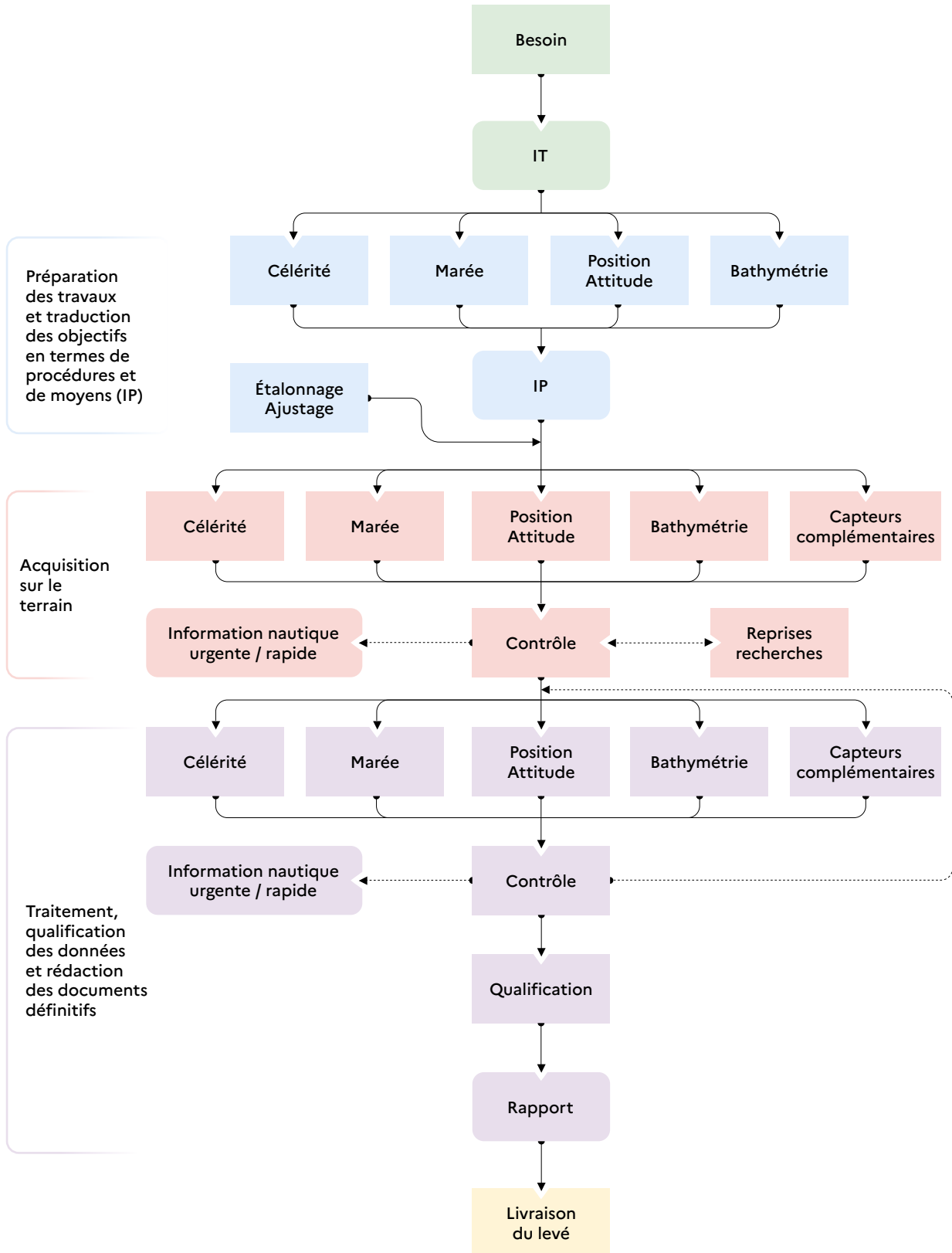
Les données sont à transmettre au bureau du recueil de l'information à l'adresse bri@shom.fr, accompagnées du [formulaire de métadonnées](#) et de la fiche de confidentialité associée.

ANNEXES

Annexe 1 - Déroulement d'un levé	57
Annexe 2 - Incertitude horizontale – Erreurs associées	58
Annexe 3 - Incertitude verticale – Erreurs associées	62
Annexe 4 - Ajustage d'un SMF	64
Annexe 5 - Rappel sur le fonctionnement d'un GNSS	68
Annexe 6 - Rappel sur le fonctionnement d'un sonar à balayage latéral	71
Annexe 7 - Exemples de mauvais fonctionnement d'un SMF	74
Annexe 8 - Sommaires des documents rédactionnels	78

ANNEXE 1

Déroulement d'un levé



ANNEXE 2

Incertitude horizontale – Erreurs associées

Erreur sur les rattachements antenne GNSS / antenne sondeur :

Si la **position relative de l'antenne du sondeur** par rapport à l'antenne de positionnement est entachée d'un décalage de D , cela se traduit par la même erreur sur la position de la sonde $\Delta(\text{pos-ant}) = D$

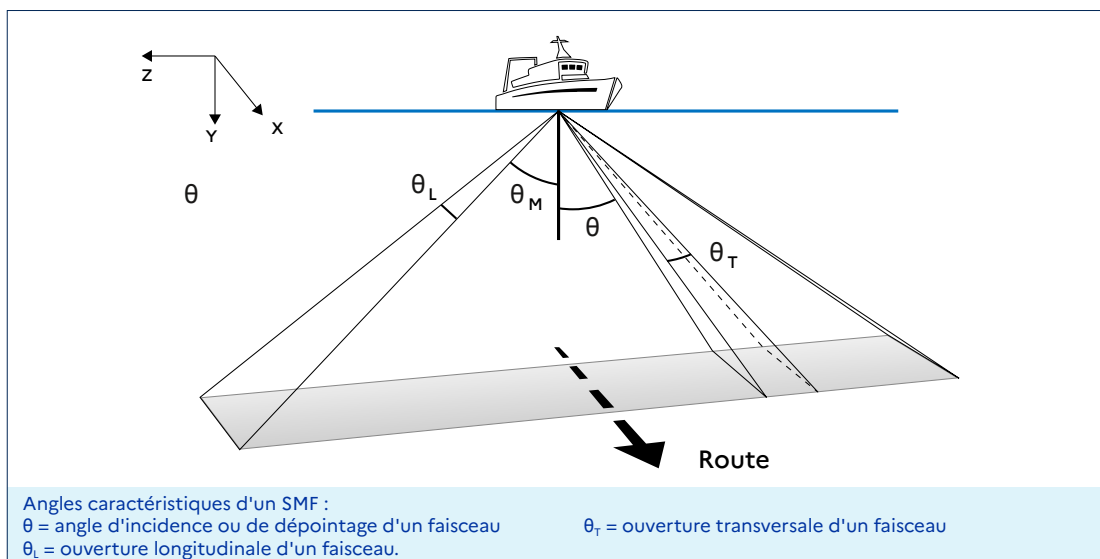
Erreur de synchronisation :

Si Δt est le **décalage de synchronisation** en secondes entre le système de positionnement et le sondeur, si V est la vitesse du navire en m/s, l'erreur faite sur la position de la sonde est alors $\Delta(\text{sync}) = V.\Delta t$ (ainsi à 7 nœuds un décalage de 1/10 de seconde donne un écart sur la position de la sonde de 36 cm).

Erreur sur l'orientation des antennes du sondeur par rapport à la centrale d'attitude :

Un défaut d'orientation de l'antenne du sondeur par rapport à la centrale d'attitude et de cap peut se traduire par (angle en radian) :

- une erreur Δr sur l'angle de roulis qui entraîne une erreur sur la position de la sonde de $\Delta(\text{roulis}) = \Delta r.P$, où P est la profondeur mesurée ;
- une erreur ΔT sur l'angle de tangage qui entraîne une erreur sur la position de la sonde de $\Delta(\text{tangage}) = \Delta T.P$;
- une erreur sur l'angle de cap Δcap qui se traduit par une erreur sur la position de la sonde de $\Delta(\text{cap}) = \Delta \text{cap}.P.\tan\theta$ ou θ est l'angle en radians d'incidence, par rapport à la verticale, d'un faisceau dans le plan transversal au navire (voir schéma ci-dessous).



Erreur sur la célérité (généralité)

Pour fonctionner correctement un SMF a besoin de connaître la célérité sous deux formes :

- au niveau de l'antenne de réception du sondeur : permet de calculer avec précision l'angle d'arrivée du signal ;
- dans toute la colonne d'eau : permet le calcul du chemin acoustique.

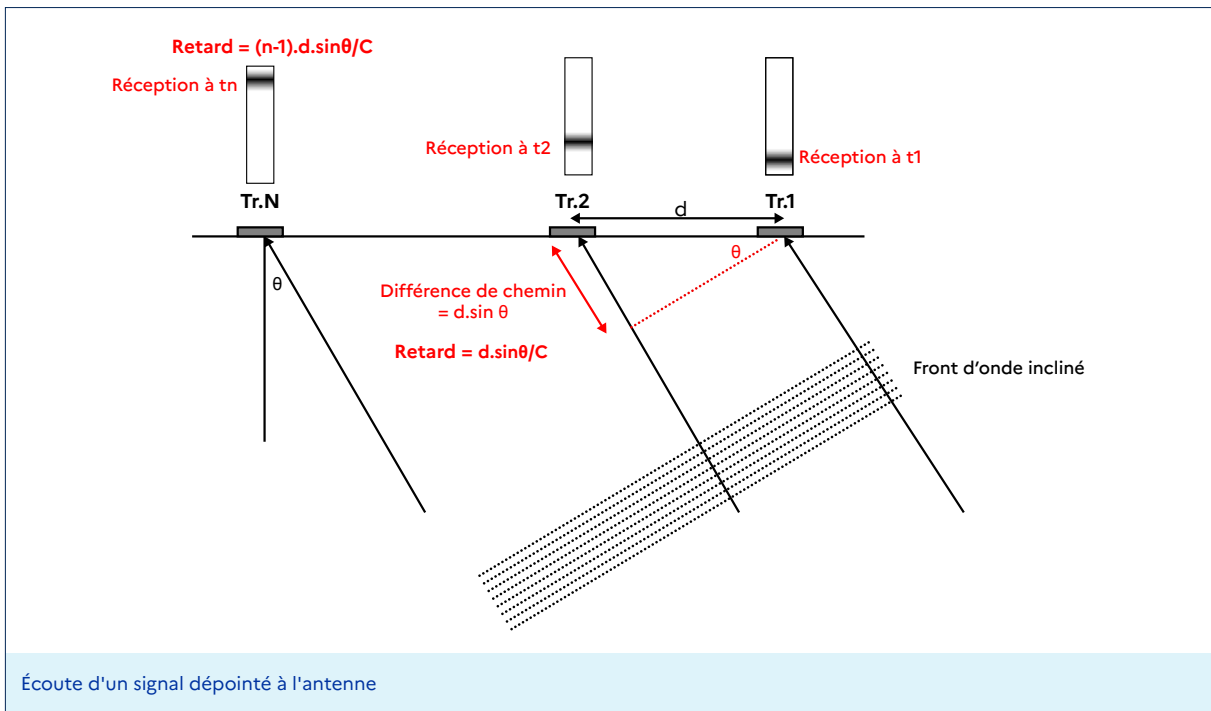
Ces deux données de célérité sont donc indispensables pour fournir une bonne valeur de la sonde et un bon positionnement de celle-ci.

Concernant la célérité on distingue alors les erreurs :

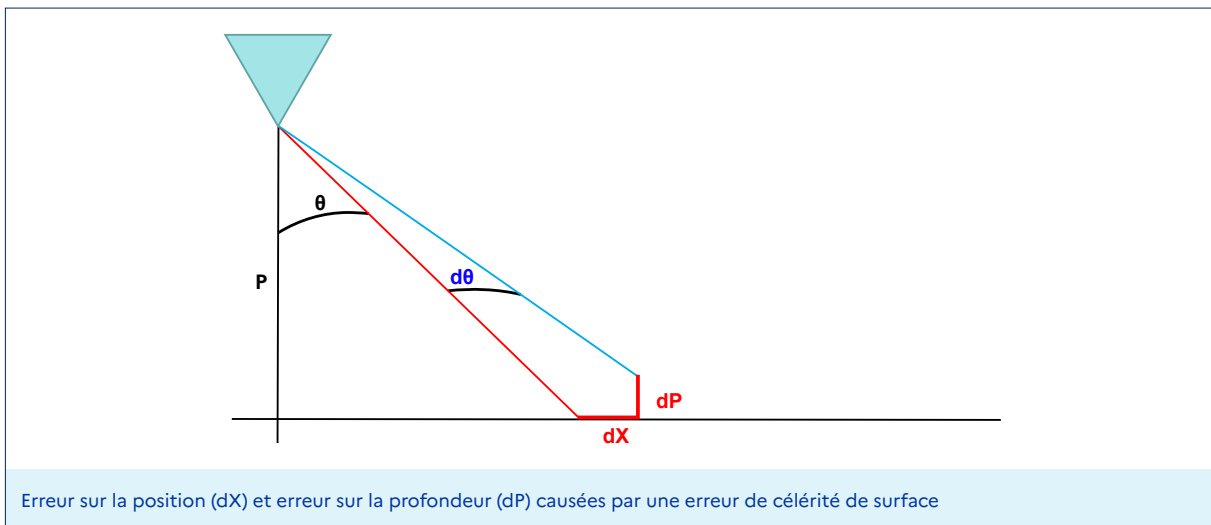
- dues à la célérité de surface fournie par le célérimètre de coque et utilisée pour la formation des voies ;
- dues au profil de célérité fourni par des mesures par bathycélérimètre, tirs sippican, etc. et utilisé pour calculer la profondeur et le trajet des ondes sonores.

Erreur sur la célérité de surface :

Pour écouter dans une direction particulière on peut orienter l'antenne de réception perpendiculairement à cette direction (solution non retenue car elle entraînerait de nouvelles erreurs : jeux pour le déplacement de l'antenne). Sans bouger l'antenne il est possible de dépointer la réception dans une direction θ (angle en radian). Sur le schéma ci-dessous, tout se passe comme si le transducteur élémentaire n° 2 était placé à une distance $d \cdot \sin \theta$. Dans la pratique, le dépointage d'un faisceau consiste à introduire un retard $\Delta t = d \cdot \sin \theta / C_{surf}$.



Si la célérité de surface est entachée d'une erreur ΔC_{surf} , le retard de dépointage est modifié en conséquence et le dépointage initial θ devient $\theta + d\theta$ et cela entraîne une erreur sur la position de la sonde et sa valeur :

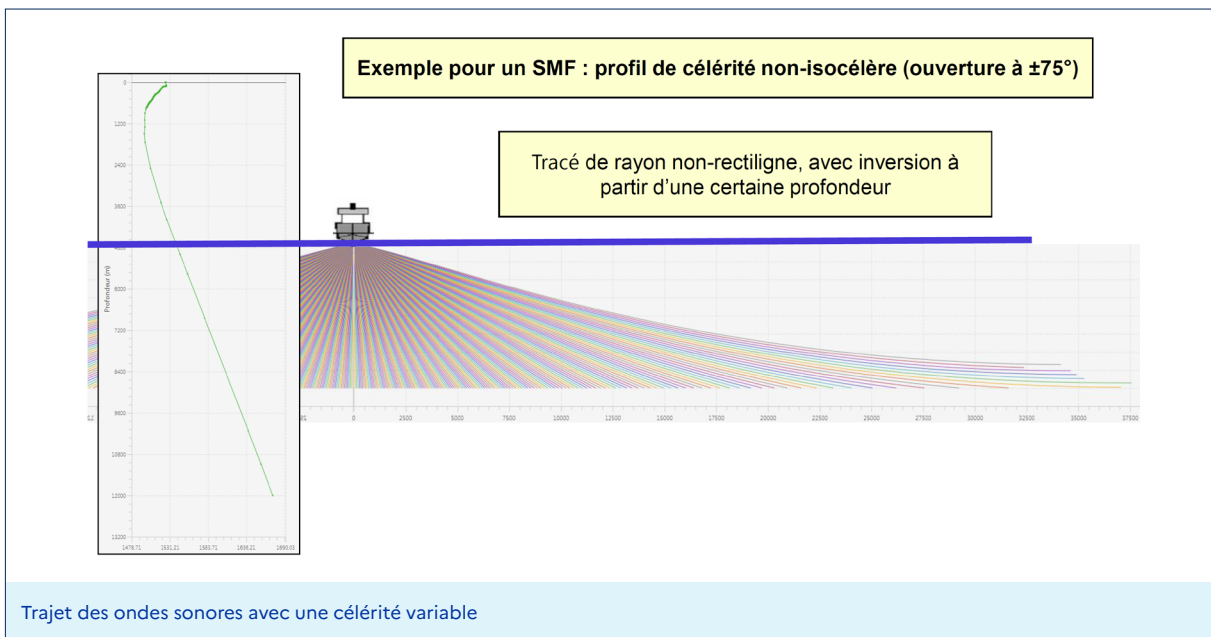
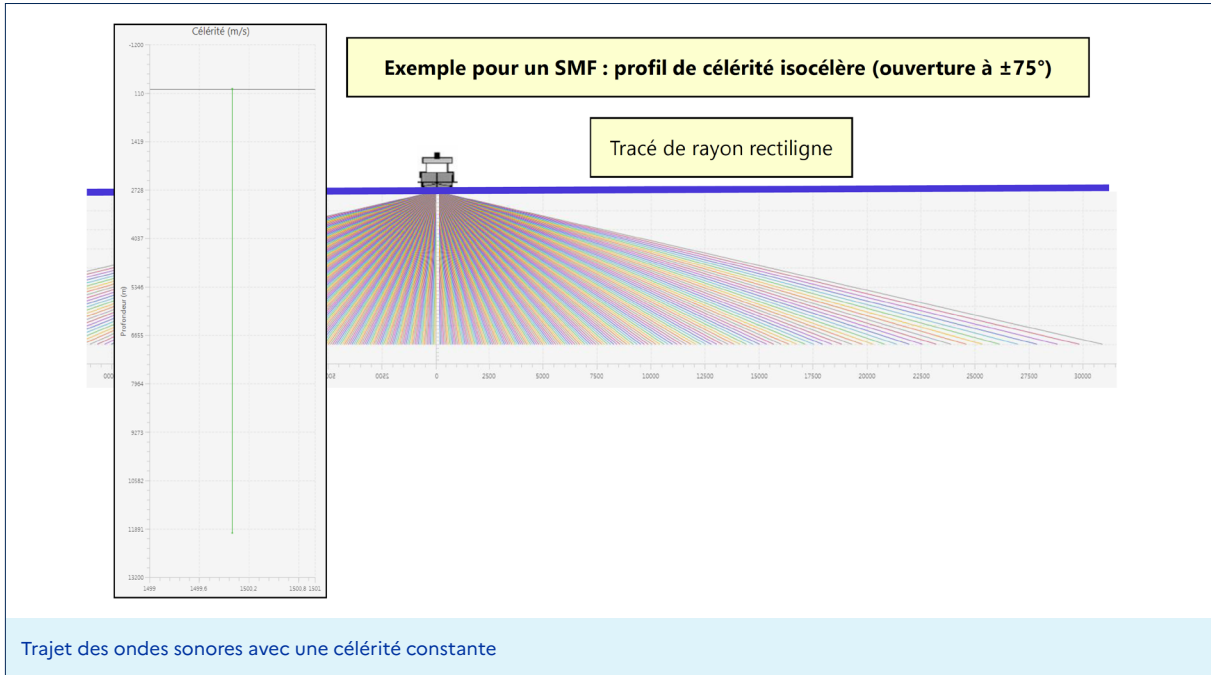


L'erreur sur la position horizontale de la sonde due à la mauvaise célérité de surface est alors :

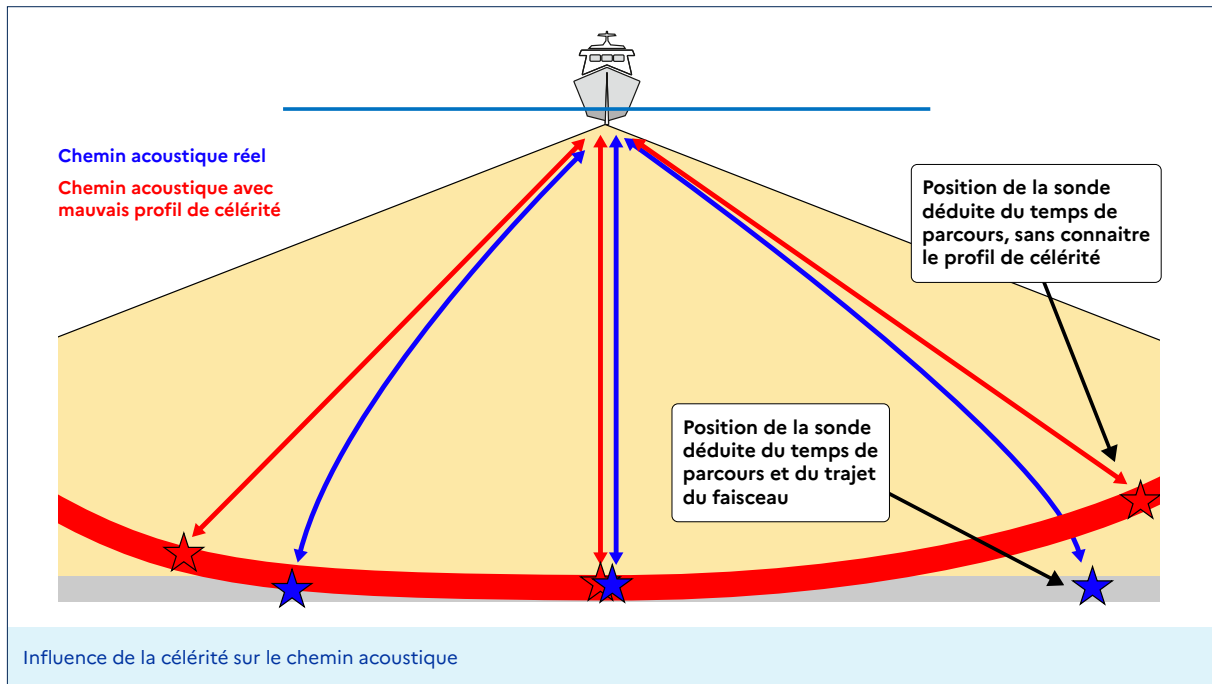
$$\Delta C_{surf} = P \cdot \tan \theta \cdot \Delta C / C$$

Erreur sur le profil de célérité :

Le profil de célérité sert à reconstruire le trajet des ondes acoustiques sous l'eau.



Donc si le profil de célérité est entaché d'une erreur la valeur et la position des sondes seront également affectées d'une erreur :



Erreur liée à la centrale inertielle :

La centrale inertielle mesure le roulis, le tangage, le cap et le pilonnement. Les incertitudes sur chacune de ces grandeurs sont déterminées à partir de la documentation du constructeur. Un ordre de grandeur des valeurs courantes de ces incertitudes figure dans le tableau suivant :

Incertitude en cap	Incertitude en roulis	Incertitude en tangage
0,2°	entre 0,04° et 0,1°	0,2°

- l'incertitude sur le positionnement de la sonde $\Delta(\text{roulis})$ due à l'incertitude sur la mesure du roulis (σ_r) vaut : $\Delta(\text{roulis}) = \sigma_r \cdot P$, où P est la profondeur mesurée ;
- l'incertitude sur le positionnement de la sonde $\Delta(\text{tangage})$ due à l'incertitude sur la mesure du tangage (σ_t) vaut : $\Delta(\text{tangage}) = \sigma_t \cdot P$;
- l'incertitude sur le positionnement de la sonde $\Delta(\text{cap})$ due à l'incertitude sur la mesure du cap (σ_c) vaut : $\Delta(\text{cap}) = \sigma_c \cdot P \cdot \tan\theta$.

Erreur liée à la localisation :

Une erreur sur position du porteur se répercute directement sur la position de la sonde.

$\Delta(\text{posit}) = \text{incertitude sur la localisation}$.

Erreur de mesure acoustique :

Un SMF détermine la position et la valeur d'une sonde à partir d'une mesure de distance et d'une mesure d'angle. Les constructeurs proposent un modèle permettant de déterminer les écarts types sur ces deux mesures en fonction de l'incidence, de la profondeur et des caractéristiques du SMF (durée d'impulsion, type de détection, largeur des faisceaux, etc.).

ANNEXE 3

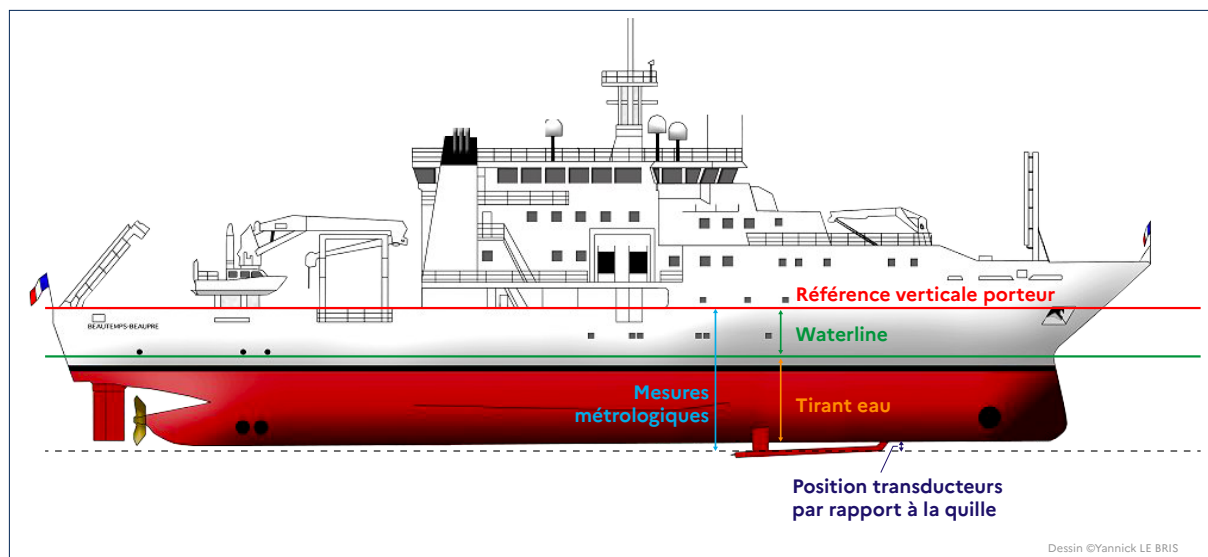
Incertitude verticale – Erreurs associées

La marée : (les levés effectués par rapport à l'ellipsoïde ne sont pas concernés)

L'incertitude de la hauteur d'eau adoptée pour la réduction des sondages est souvent difficile à quantifier, qu'elle soit directement issue de mesures d'un marégraphe ou obtenue par la mise en œuvre d'un modèle de marée. En effet, l'incertitude des mesures peut être impactée par de nombreux paramètres (type de marégraphe, proximité de la zone de levé, variabilité de la marée, qualité des prédictions, décotes/surcotes, nivellement, etc.). La valeur adoptée pour l'incertitude de la marée dépend de chaque chantier et elle est déterminée par le responsable du levé.

Le tirant d'eau : (les levés effectués par rapport à l'ellipsoïde ne sont pas concernés)

La problématique de connaître précisément la position des antennes du sondeur par rapport à la surface de l'eau est importante car, suivant le porteur, les variations en fonction de la charge peuvent être conséquentes.



De plus, il faut distinguer :

- le tirant d'eau statique qui correspond au tirant d'eau mesuré lorsque le navire est à vitesse nulle ;
- le tirant d'eau dynamique qui correspond à la composante liée à l'enfoncement du navire en lien avec sa vitesse (en général, plus le navire va vite, plus il se cabre).

Remarque : plus le porteur est gros, plus ces variations peuvent être importantes et difficiles à évaluer. Un navire de 60 m de longueur peut avoir des variations de tirant d'eau de plusieurs dizaines de cm alors qu'une embarcation de 8 m atteindra à peine 10 cm de variation.

Erreurs lors de l'utilisation de la marée cinématique

Des erreurs sont à prendre en compte lors de l'utilisation d'une marée cinématique :

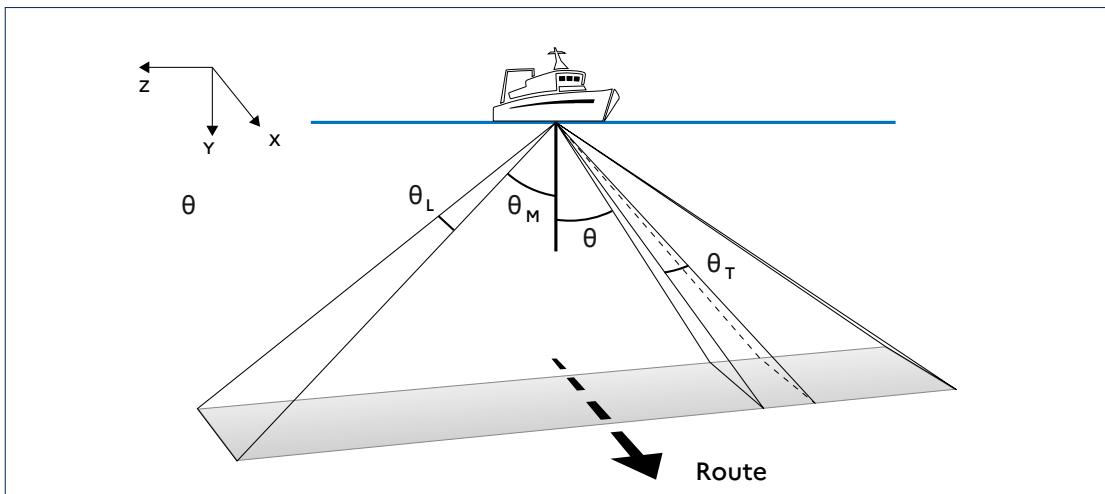
- l'incertitude sur la mesure de la composante verticale avec le système GNSS ;
- l'incertitude du rattachement de l'ellipsoïde au ZH :
 - modèle direct (type BathyElli) : incertitude du modèle¹ ;
 - passage par une référence terrestre (type grille RAF09) puis de cette référence au ZH : incertitude de la grille de rattachement à la référence terrestre ajoutée à celle du rattachement du ZH à cette même référence terrestre.

¹ - Dans le cas d'une utilisation du modèle BathyElli disponible sur data.shom.fr, cette incertitude est donnée en chaque point.

Erreur sur l'orientation des antennes du sondeur par rapport à la centrale d'attitude :

Un défaut d'orientation de l'antenne sondeur par rapport à la centrale d'attitude et de cap peut se traduire par (angle en radian) :

- une erreur Δr sur l'angle de roulis qui entraîne une erreur sur la profondeur de **$\Delta P(\text{roulis}) = \Delta r \cdot P \cdot \tan\theta$** , où P est la profondeur mesurée ;
- Une erreur Δt sur l'angle de tangage se traduit par une erreur sur la profondeur de **$\Delta P(\text{tangage}) = \Delta t^2 \cdot P/2$** ;
- Une erreur sur l'angle de cap n'a pas d'influence sur la profondeur.



Erreur sur la célérité de surface (célérité de coque) :

Une erreur ΔC sur la célérité de surface entraîne une erreur sur la profondeur de **$\Delta P(C_{\text{surf}}) = P \cdot \tan^2\theta \cdot \Delta C/C$** (angle en radian).

Erreur sur le profil de célérité :

L'incertitude verticale due à un mauvais profil de célérité se traite de la même manière que l'incertitude horizontale (voir [annexe 2](#)).

Erreur liée à la centrale inertielle :

La centrale inertielle mesure le roulis, le tangage, le cap et le pilonnement. Les incertitudes sur chacune de ces grandeurs sont déterminées à partir de la documentation du constructeur. Un ordre de grandeur des valeurs courantes de ces incertitudes figure dans le tableau suivant :

Incertitude en cap	Incertitude en roulis	Incertitude en tangage
0,2°	entre 0,04° et 0,1°	0,2°

- le pilonnement est le mouvement de translation vertical du navire. Il se répercute directement sur la mesure de la profondeur donc : **$\Delta(P) = : \Delta(\text{pilonnement})$** ;
- l'incertitude sur le positionnement de la sonde $\Delta(\text{roulis})$ due à l'incertitude sur la mesure du roulis (σ_r) vaut : **$\Delta(\text{roulis}) = \sigma_r \cdot P \cdot \tan\theta$** ;
- l'incertitude sur le positionnement de la sonde $\Delta(\text{tangage})$ due à l'incertitude sur la mesure du tangage (σ_t) vaut : **$\Delta(\text{tangage}) = \sigma_t^2 \cdot P/2$** ;
- une erreur sur la mesure de cap n'a pas d'impact sur la valeur de la profondeur.

Erreur due au sondeur (erreur acoustique) :

Un SMF détermine la position et la valeur d'une sonde à partir d'une mesure de distance et d'une mesure d'angle. Les constructeurs proposent un modèle permettant de déterminer les écarts types sur ces deux mesures en fonction de l'incidence, de la profondeur et des caractéristiques du SMF (durée d'impulsion, type de détection, largeur des faisceaux...).

ANNEXE 4

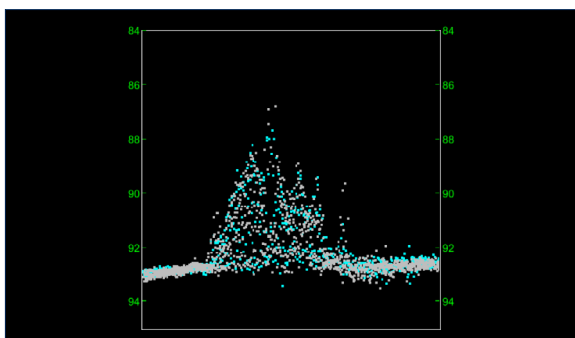
Ajustage d'un SMF

Les étapes d'un ajustage d'un SMF sont les suivantes (à faire impérativement dans l'ordre indiqué pour les 4 premières étapes) :

Contrôle de la synchronisation :

Les informations délivrées par le système de positionnement et celles issues du sondeur doivent être calées sur la même base temporelle.

Une méthode pour réaliser la synchronisation est de suivre deux fois la même ligne au même cap sur une épave ou une pente (visualiser le début et la fin de la pente) à des vitesses différentes (4 nœuds et 8 nœuds par exemple). Le contrôle s'effectue sur les faisceaux centraux : en théorie les deux lots de sondes obtenus ne doivent pas être décalés ; s'il y a un décalage il faut alors déterminer le retard temporel.



La ligne réalisée à 4 nœuds (pixels bleus) et celle réalisée à 8 nœuds doivent être identiques. C'est le cas ici donc pas de correction

Contrôle de la synchronisation avec le logiciel CARIS HIPS and SIPS

Contrôle du tangage :

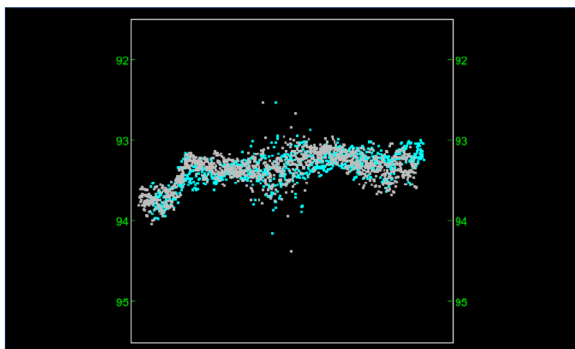
L'objectif est de déterminer un biais éventuel, non maîtrisé, en tangage.

Une méthode pour réaliser ce contrôle est de suivre deux fois la même ligne, à la même vitesse mais avec des caps opposés, sur une épave ou sur une pente (visualiser le début et la fin de la pente). Le contrôle s'effectue sur les faisceaux centraux : en théorie les deux lots de sondes obtenus ne doivent pas être décalés ; s'il y a un décalage il faut alors déterminer le biais en tangage.

Contrôle du roulis :

L'objectif est de déterminer un biais éventuel, non maîtrisé, en roulis.

Une méthode pour réaliser ce contrôle est de suivre deux fois la même ligne à la même vitesse mais avec des caps inverses. Le fond doit être relativement plat et l'ouverture du SMF la plus large possible. Le contrôle se fait par comparaison des fauchées sur les deux lots de sondes et en particulier sur les faisceaux extrêmes.



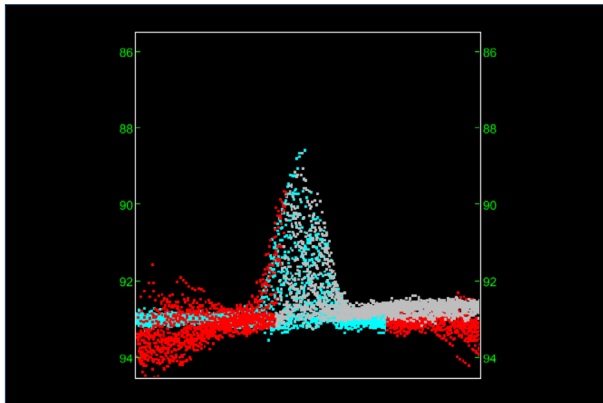
La ligne en bleu et celle en gris présentent un décalage visible en bout de fauchée (gris plus profond que bleu à droite). Correction déterminée ici : 0,08°.

Contrôle du roulis avec le logiciel CARIS HIPS and SIPS

Contrôle du cap :

L'objectif est de déterminer un biais éventuel, non maîtrisé, en cap.

Une méthode pour réaliser ce contrôle est de suivre deux lignes parallèles de part et d'autre d'une épave ou d'une remontée. Les cap et vitesse sont identiques durant ces lignes. Le contrôle s'effectue en superposant les sondes bâbord d'une ligne avec les sondes tribord de l'autre ligne au niveau de l'épave. Aucun décalage ne doit être visible sur l'épave.



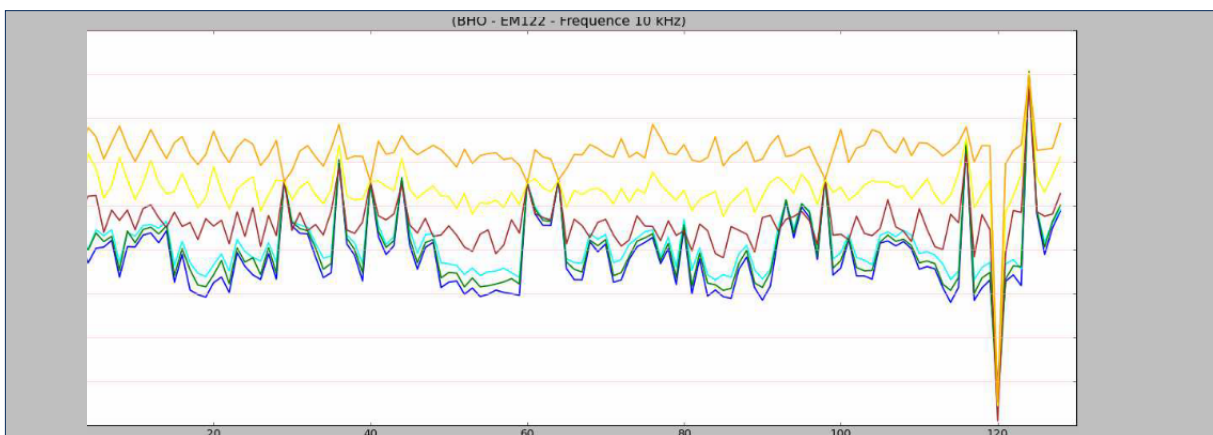
Au niveau de l'épave aucun décalage entre les sondes en bleu et celles en gris donc pas de correction pour le cap.
En rouge : sondes bâbord ou tribord non utilisées pour le contrôle du cap

Contrôle du tangage avec le logiciel CARIS HIPS and SIPS

Mesures de bruit :

Elles permettent de vérifier la sensibilité de chaque transducteur élémentaire en réception, pour différentes vitesses. Si un transducteur est défaillant, cela se traduit par une réponse faible ou identique quelle que soit la vitesse. Si des transducteurs sont défaillants, une action corrective est à envisager (changement des transducteurs).

Les mesures de bruit se font en transit à différentes vitesses (de 0 à vitesse maximale de levé), l'émission du sondeur est stoppée et on enregistre les retours (bruit rayonné par le navire) au niveau de chaque transducteur.

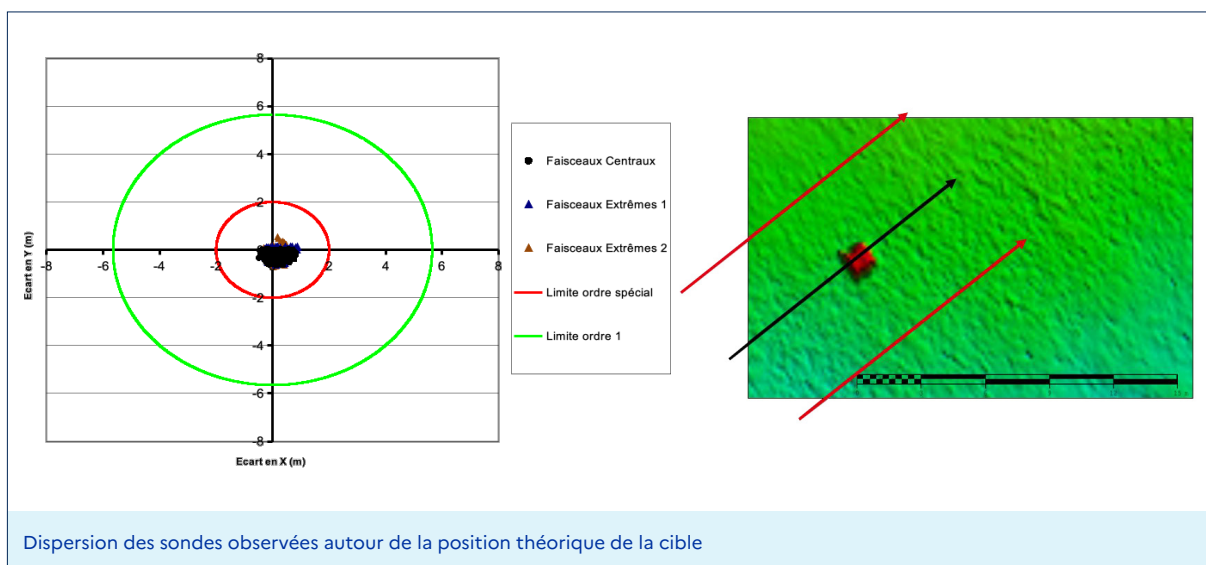


Mesure du bruit (db) en fonction de la vitesse du navire (Nds)

Vérification horizontale :

Elle permet de contrôler les performances horizontales du système SMF dans son ensemble, de garantir l'absence de biais horizontal et valide le système. Cette opération permet la qualification du porteur car elle prend en compte l'ensemble des sources d'erreur. Elle se réalise suivant le protocole :

- réaliser plusieurs lignes au-dessus d'un objet ou d'une structure dont la position est connue (la cible doit être insonifiée par les faisceaux centraux et extrêmes) ;
- extraire les sondes sur une cible en coordonnées projetées ;
- analyser la dispersion des sondes en X et Y autour de la valeur théorique et comparaison aux exigences de la norme.



Vérification verticale :

Elle permet de contrôler les performances verticales du système SMF dans son ensemble, de garantir l'absence de biais vertical et valide le système. Cette opération permet la qualification du porteur car elle prend en compte l'ensemble des sources d'erreur. Elle se réalise suivant le protocole :

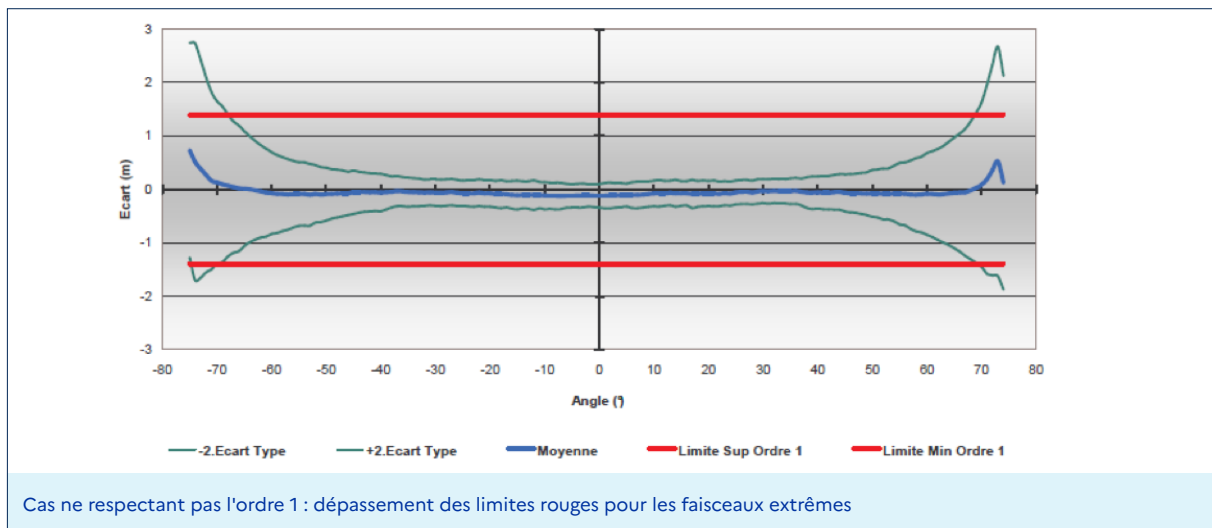
- réalisation d'un levé sur une zone de référence 1 ;
- les sondes aberrantes sont enlevées (le pourcentage de sondes rejetées doit rester inférieur à 1%) ;
- comparaison du levé réalisé avec le modèle de référence (module du logiciel de traitement) ;
- évaluation des écarts verticaux pour chaque angle de dépointage entre la référence et le levé ;
- validation de l'ouverture utile du SMF en fonction de l'ordre choisi pour le levé en vérifiant que la moyenne des écarts ± 2 fois l'écart type reste entre des limites de l'ordre sélectionné.

1 - Pour définir une zone de référence, il faut :

- la proximité d'un marégraphe ou une bonne connaissance de la marée dans la zone ;
- que la zone ait été sondée plusieurs fois par des porteurs et/ou sondeurs différents ;
- que l'analyse statistique des différences entre les surfaces montrent que :
 - pour chaque porteur, les écarts moyens entre les levés d'un même porteur restent dans l'ordre de grandeur de l'incertitude des mesures ;
 - les écarts moyens entre les surfaces générées par les sondes issues de porteurs différents restent dans l'ordre de grandeur de l'incertitude des mesures.

Les écluses et les bassins de radoub dont la profondeur est connue précisément à tout moment (jauge de profondeur...) peuvent servir de zone de référence bien que dans ce cas les mesures se fassent en statique.

Si aucune zone de référence n'est disponible, une comparaison avec les levés précédents ou cartes marines est indispensable (dans une zone où les fonds sont stables) afin de garantir de l'absence d'un biais vertical.



Capacité de détection :

Il s'agit de contrôler si le système est capable de détecter un objet dont la taille correspond aux spécifications (par exemple : objet cubique de taille 1 m pour l'ordre spécial) à la plus grande profondeur d'emploi prévu. Il se réalise suivant le protocole :

- réaliser une ligne au-dessus d'un objet ou d'une structure dont la taille est connue et compatible avec les spécifications ;
- vérifier au traitement que l'objet est parfaitement identifiable.

Ce test peut être répété autant de fois que nécessaire avec différentes gammes de faisceaux (centraux, intermédiaires, extrêmes) dans les configurations du sondeur adoptées pour le levé.

Autres vérifications :

- test de portée : Il s'agit de déterminer occasionnellement les limites du système (portée, fauchée) et de les comparer avec les spécifications du constructeur ;
- contrôle d'interférence : permet d'identifier d'éventuelles interférences créées par d'autres systèmes acoustiques, par un phénomène de bullage (des bulles d'air passent sous le transducteur) ou par des perturbations électriques ;
- contrôle de la cadence d'acquisition : il s'agit de contrôler occasionnellement la cadence d'acquisition du sondeur et de la comparer avec les spécifications du constructeur ;
- mode d'utilisation : un levé hydrographique au sondeur multifaisceaux doit être réalisé en utilisant un mode « Equidistant ». Les modes « Equiangle » sont destinés aux recherches d'objet ou suivi de structures particulières (ex : pipeline).

ANNEXE 5

Rappel sur le fonctionnement d'un système GNSS

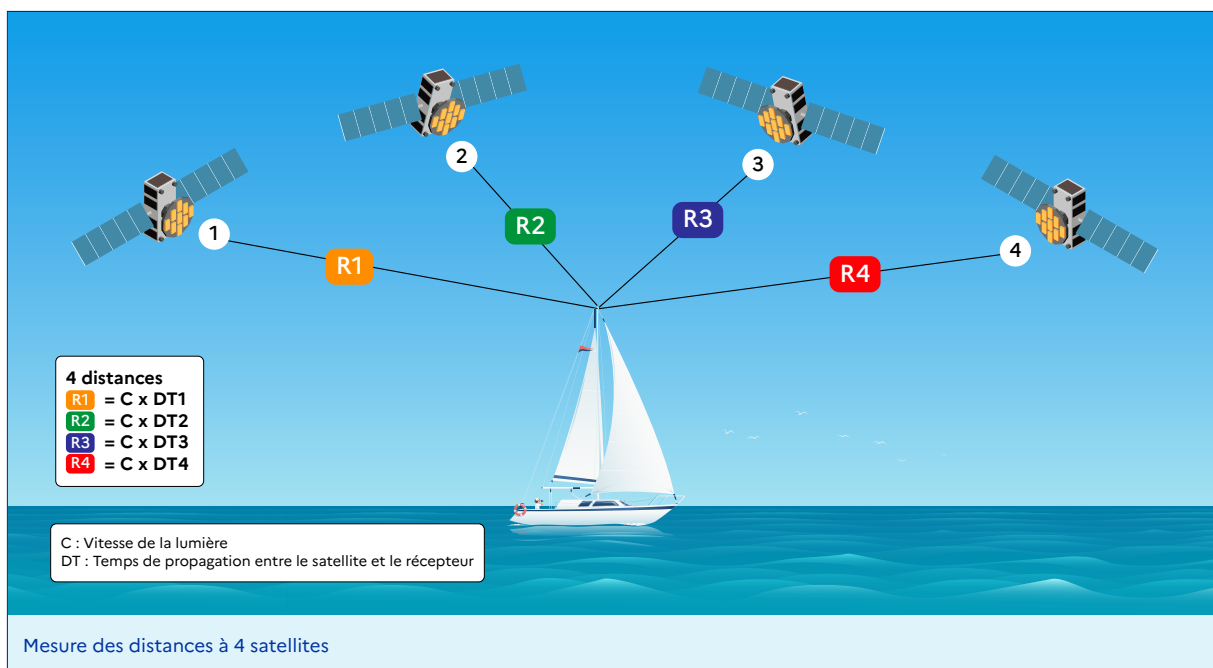
Un système GNSS permet aux utilisateurs de disposer d'une information de positionnement décimétrique quasiment partout sur la surface terrestre. Parmi ces systèmes avec une couverture globale on peut citer : le GPS (USA), GLONASS (Russie), Galileo (Europe), Compass (Chine), Beidou (Chine), IRNSS (Inde) et QZSS (Japon). Certains systèmes d'augmentation et de fiabilisation de portée régionale ou mondiale, gratuits ou payants, permettant de fiabiliser et d'améliorer encore l'incertitude disponible.

Principe de fonctionnement :

Le récepteur mesure les distances le séparant des satellites à l'aide du code (ou de la phase du signal) puis calcule sa position à l'intersection des sphères centrées sur les satellites (lieux de l'espace se situant à une distance donnée de chaque satellite).

Les satellites ont une position connue grâce aux éphémérides : connaissant les instants d'émission des codes par les satellites et de réception par l'utilisateur, on en déduit le temps de propagation du signal, et donc la distance entre la position des satellites à l'instant d'émission et celle du récepteur au moment de la réception.

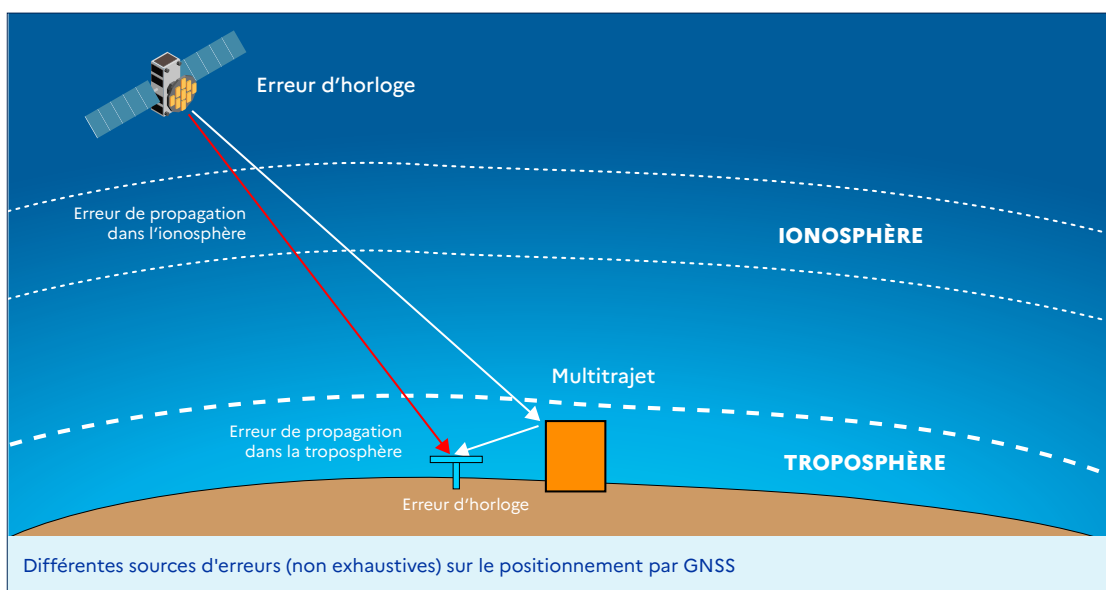
La détermination du point nécessite au moins 4 satellites (3 pour les dimensions x, y, z et 1 pour le temps afin de calculer l'erreur de synchronisation de l'horloge du récepteur).



Les causes possibles de dégradation du point et sources d'erreur sont les suivantes :

- les erreurs de propagation : effet de l'ionosphère et de la troposphère. Elles interviennent lors de la transformation du temps de parcours en distance entre le récepteur et le satellite. Pour les quantifier, il faut utiliser soit un modèle de l'ionosphère soit un GNSS qui opère avec deux fréquences différentes et qui réagissent donc différemment au passage de l'ionosphère. Les satellites trop bas sur l'horizon doivent être proscrits car les signaux sont alors plus soumis aux phénomènes de réfraction dans les différentes couches de l'atmosphère ;
- erreur de multitrajet : réflexion du signal sur des obstacles réfléchissants près de la station. Ces réflexions sont également reçues par le récepteur et perturbent la mesure du temps de trajet. Pour limiter ces erreurs, il faut éviter de se placer près d'une surface réfléchissante. Il est possible aussi de limiter physiquement l'angle de réception de l'antenne (par exemple, pour ne plus recevoir les signaux venant du bas car ils proviennent forcément d'une réflexion) ;

- erreur de synchronisation de l'horloge au niveau du satellite ;
- erreur de synchronisation de l'horloge au niveau du récepteur. Cette erreur est calculée en même temps que la position du récepteur. C'est pourquoi il faut 4 satellites et pas seulement 3 pour se positionner correctement à l'aide du GNSS ;
- effets de masquage près des côtes, obstacles flottants importants ou dans les ports ;
- effets de masquage d'antenne ;
- brouillage intempestif de l'environnement radioélectrique ;
- messages erronés qui peuvent être fournis par un satellite défectueux. Les nouveaux systèmes de navigation par satellite comme GALILEO possèdent un message d'intégrité (diagnostic) qui permettra d'identifier les satellites défectueux et de ne pas les utiliser.

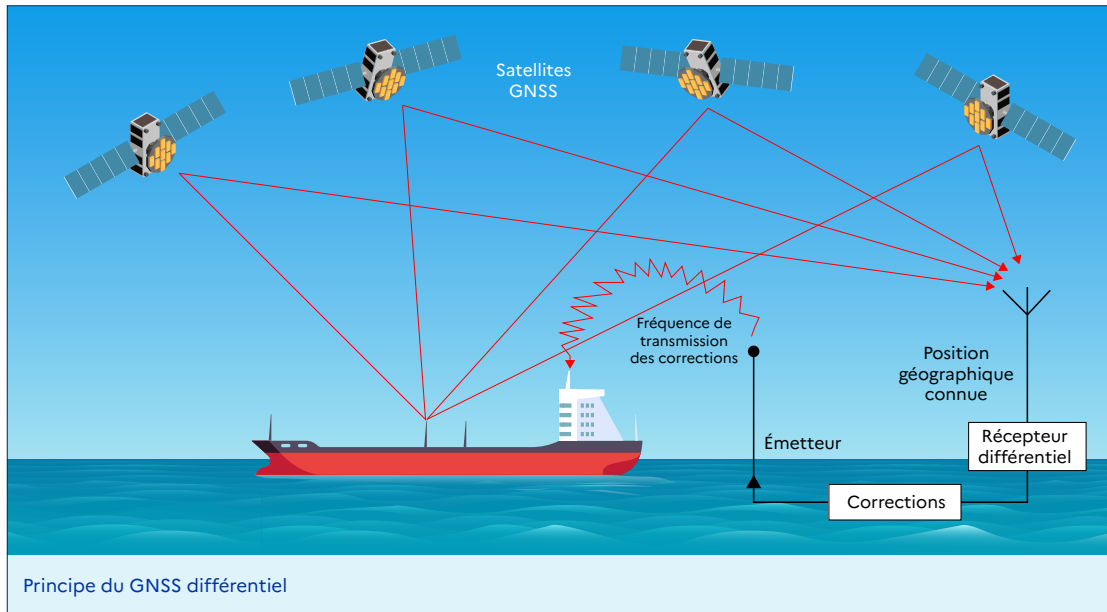


Modes de fonctionnement :

Un système GNSS peut être utilisé en réception de données de positionnement absolu (on parle alors de mode naturel) ou relatif (mode différentiel, statique, cinématique...) selon le type de mesures effectuées.

- **Le mode absolu** (ou naturel) : il s'agit de l'établissement d'une position connue à partir des seules informations de la constellation satellitaire (éphémérides) sans aucune correction. Le mode naturel fournit une incertitude meilleure que 20 m en horizontal et 30 m en vertical ;
- **Le mode différentiel** : des services ont été développés en réponse aux limites inhérentes au système présentées précédemment. Le principe est le suivant : les mesures effectuées en un lieu de position connue sont comparées aux valeurs théoriques; leurs différences fournissent une correction qui est retransmise vers l'utilisateur (par radio, téléphone...), qui l'intègre dans le calcul de sa position, améliorant ainsi son incertitude de positionnement.

L'hypothèse de base du GNSS différentiel est que l'erreur mesurée à la station de référence est identique à l'erreur au niveau de la station de position inconnue. Les principales sources d'erreur éliminées par le système différentiel sont : les erreurs d'horloge du satellite, les erreurs ionosphériques et les erreurs troposphériques dans une moindre mesure. Les erreurs subsistantes sont les erreurs de multi-trajets principalement.



Les stations de référence pour du GNSS différentiel sont soit :

- installées en permanence : leurs corrections sont reçues par des récepteurs adaptés ;
- installées par l'utilisateur lui-même sur des points connus (pour la durée d'un levé par exemple).

En fonction de l'éloignement entre le récepteur et la station de référence (et donc du mode de transmission des corrections), le mode différentiel fournit une incertitude comprise entre quelques mm et 5 m en horizontal et vertical.

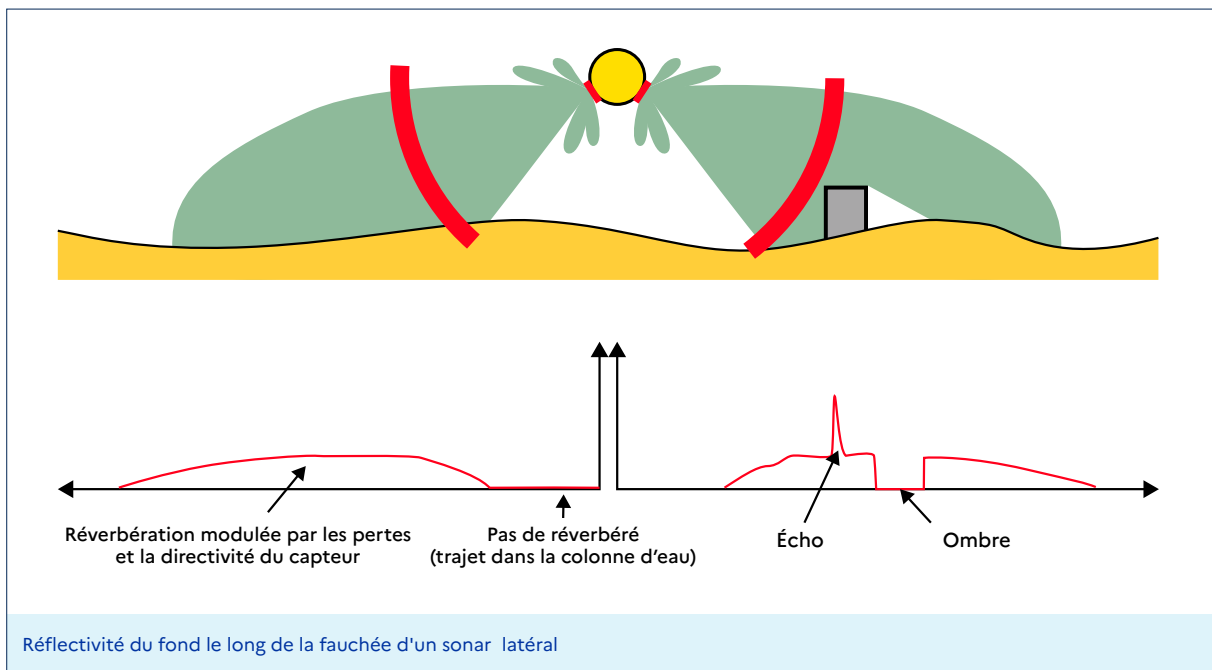
Le mode PPP (Precise point positioning) :

- Le système SBAS (augmentation spatiale) est un système GNSS différentiel amélioré. Au lieu d'utiliser une seule station de référence et de transmettre la correction brute au récepteur, un centre de contrôle centralise les erreurs mesurées sur un réseau de stations de référence réparties sur le globe et calcule par interpolation un modèle de correction. La correction adéquate est ensuite transmise au récepteur DGPS par satellite. Le mode PPP-SBAS fournit une incertitude d'environ 3 m en horizontal et 5 m en vertical.
- Le système RTG (Real Time GIPSY) fonctionne de façon similaire au système SBAS, excepté qu'il n'y a plus d'interpolation dans le modèle car la correction se fait pour une zone géographique précise via l'utilisation d'un satellite géostationnaire. Le mode PPP-RTG fournit une incertitude d'environ 15 cm en horizontal et 30 cm en vertical.

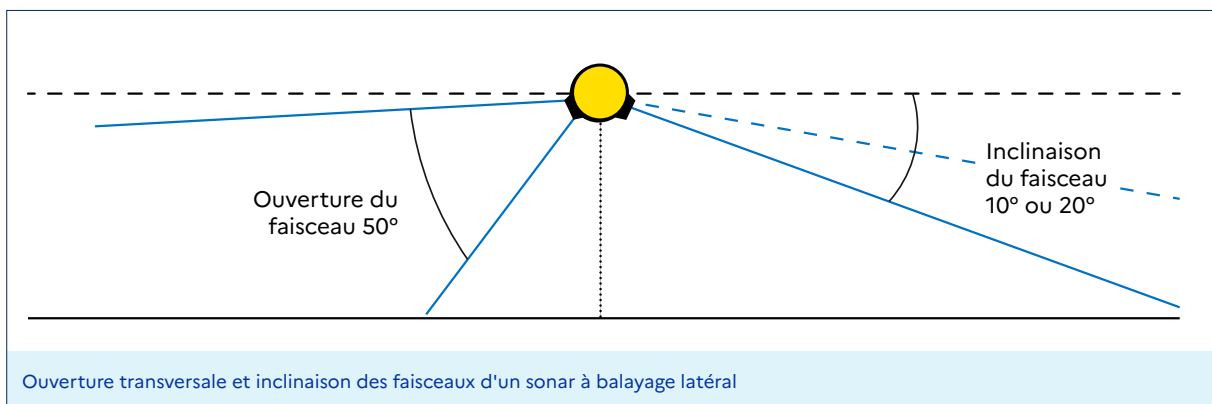
ANNEXE 6

Rappel sur le fonctionnement d'un sonar à balayage latéral

Le principe de fonctionnement du sonar à balayage latéral est le suivant : un faisceau sonore étroit est émis avec une incidence rasante, et intercepte le fond. L'écho recueilli au cours du temps est une représentation de la réflectivité du fond le long de la fauchée, et surtout de la présence d'irrégularité ou de petits obstacles qui sont « vus » par le signal très résolvant. Ce signal, enregistré perpendiculairement à la direction d'avancée du sonar est juxtaposé aux signaux successifs déjà obtenus pendant son avancée, constituant ainsi, ligne après ligne, une « image acoustique du fond ».



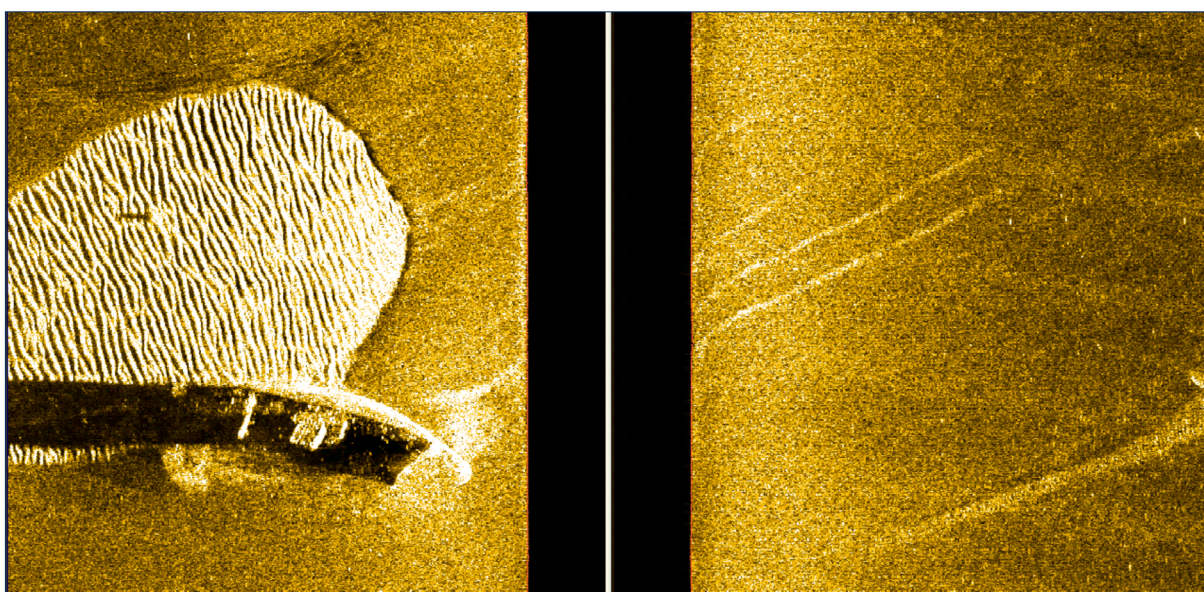
Le sonar à balayage latéral possède deux transducteurs latéraux qui émettent chacun une onde dans un faisceau de largeur 50° , incliné de 10° ou 20° par rapport à l'horizontale. Les faisceaux sont très fins dans la direction longitudinale.



L'onde se réfléchit sur le fond et une partie de l'énergie revient vers les antennes du poisson. Le sonar à balayage latéral enregistre alors **l'intensité du signal retour en fonction du temps**. Les résultats sont présentés sous forme d'un graphique de type « waterfall ». Chaque ping est juxtaposé au précédent. Au centre du graphique se trouve le signal reçu à partir de l'instant d'émission, puis plus on s'éloigne du centre plus le signal représenté a été reçu tard.

Selon la nature du fond rencontré par l'onde, l'intensité du signal et donc les nuances de couleur varient : en général un substrat dur sera foncé (ex : roche) et un sédiment meuble sera plus clair (ex : vase). Il en résulte une **imagerie** représentant la nature du fond. Le sonar à balayage latéral permet une bonne reconnaissance des structures rocheuses et sédimentaires (champ de mégarides, dunes de sable, rubans sableux...) mais ne permet pas une identification précise de la nature des sédiments.

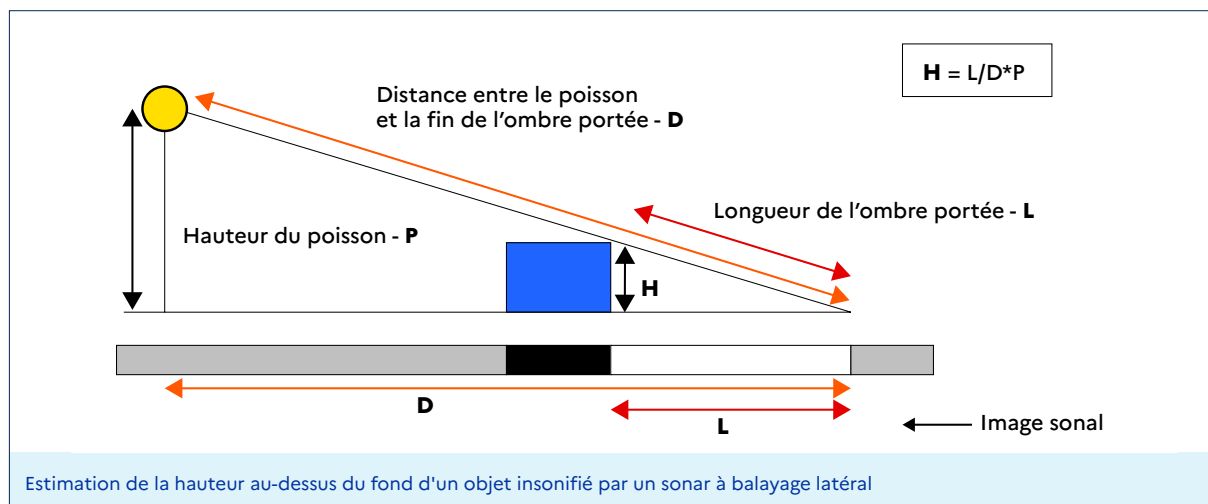
Le sonar à balayage latéral, en plus de produire une imagerie du fond, est utilisé pour ses **capacités de détection**. Etant remorqué près du fond, les faisceaux émis sont plus rasants que ceux émis par un SMF et vont donc se réfléchir plus clairement sur les obstructions, même petites. Une ombre portée importante est également observée du fait de l'inclinaison des faisceaux (rasance). L'imagerie SMF ne permet en général pas de visualiser d'ombres car les faisceaux ne sont pas assez rasants par rapport au fond.



Mosaïque d'un sonar à balayage latéral

Une obstruction est donc facilement identifiable sur l'imagerie sonar grâce à l'ombre créée par l'objet.

En revanche, les données recueillies par le sonar à balayage latéral ne sont pas positionnées précisément (représentation temporelle et engin remorqué en général) et ne permettent pas la cotation et le positionnement corrects de l'obstruction repérée. On peut cependant les estimer.



Estimation de la hauteur au-dessus du fond d'un objet insonifié par un sonar à balayage latéral

Une estimation de la hauteur de l'objet au-dessus du fond (H) est : $H = L/D * P$

En utilisant une vitesse de propagation constante en première approximation et avec

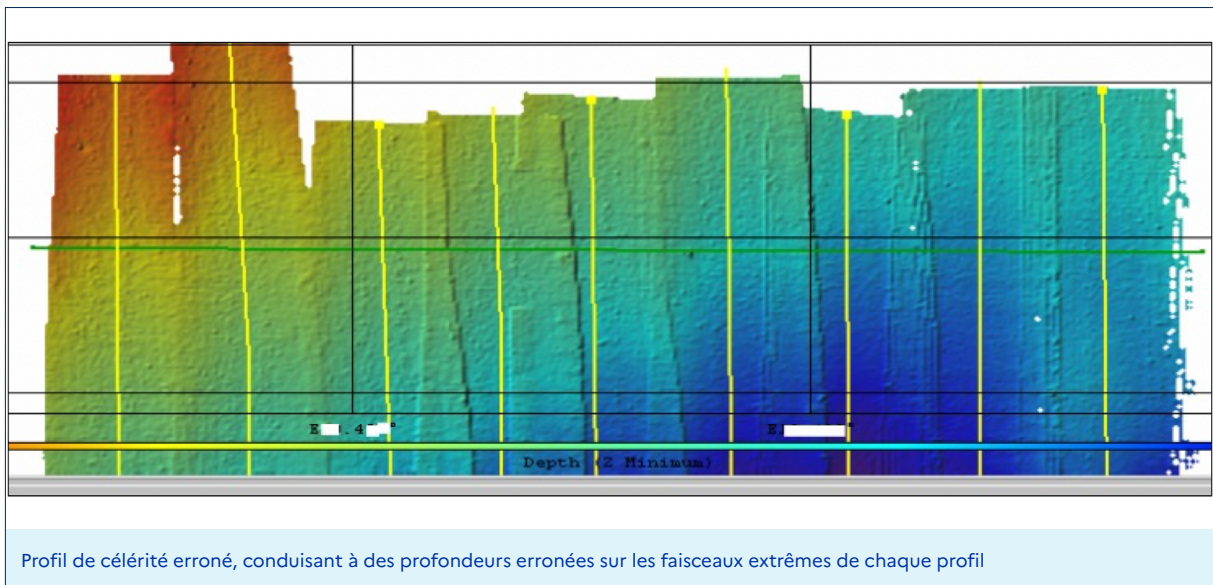
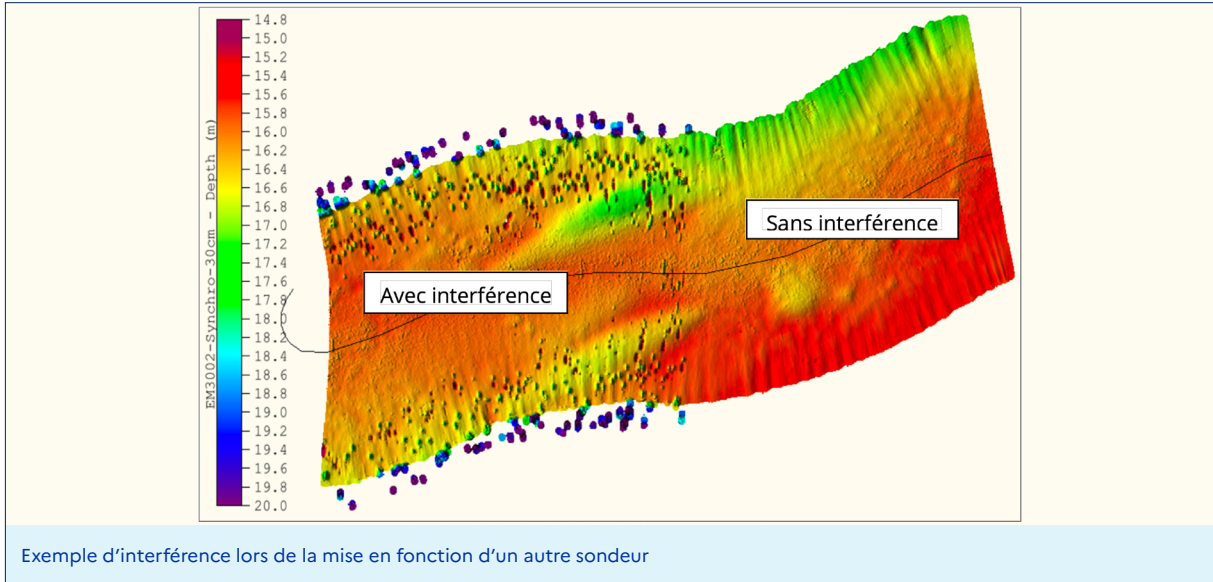
- L : la longueur de l'ombre portée qui peut être mesurée sur l'imagerie (le temps de parcours est transformé en distance) ;
- D : la distance entre le poisson et la fin de l'ombre portée (estimée sur l'imagerie) ;
- P : la hauteur du poisson au-dessus du fond (estimée également).

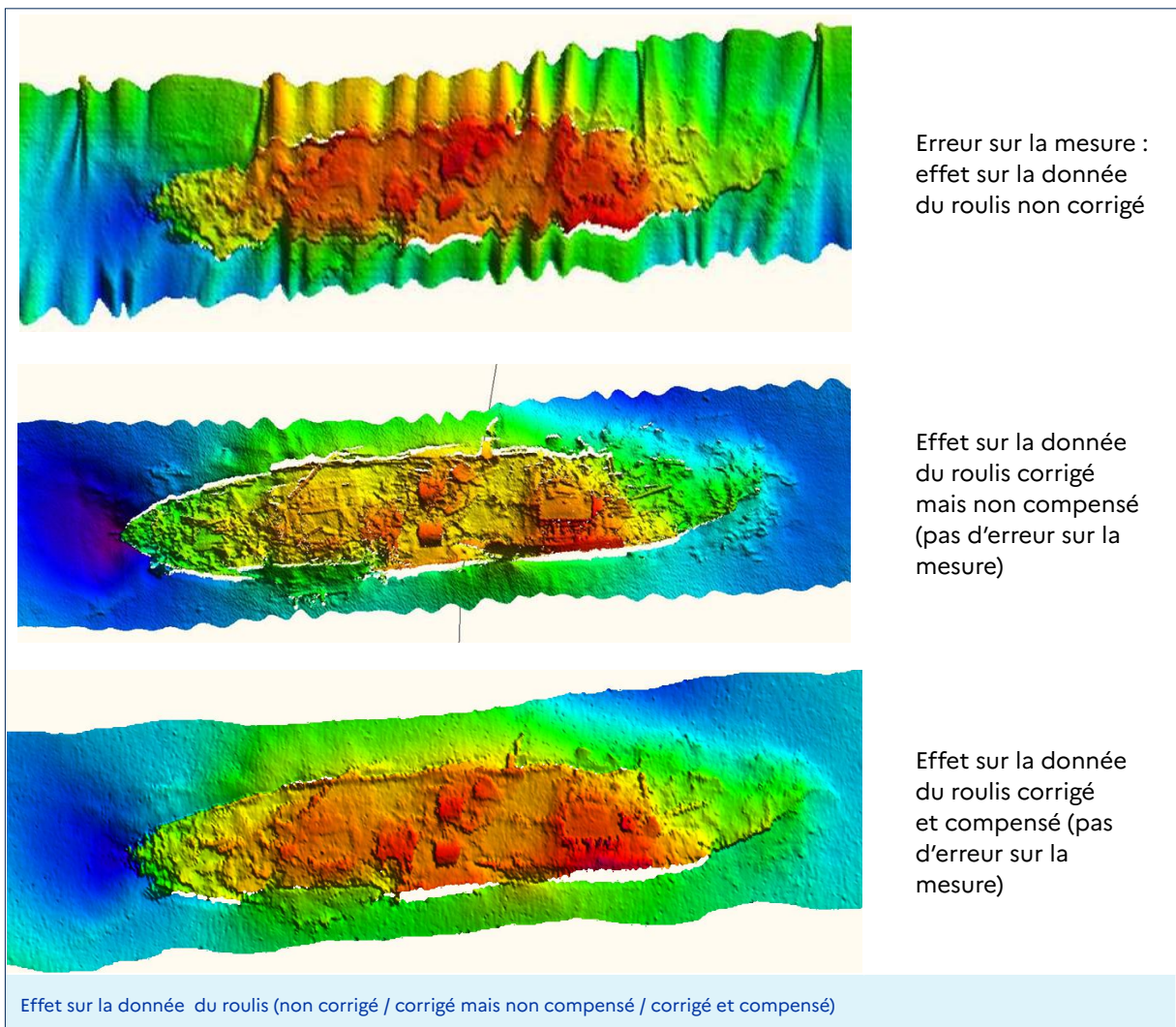
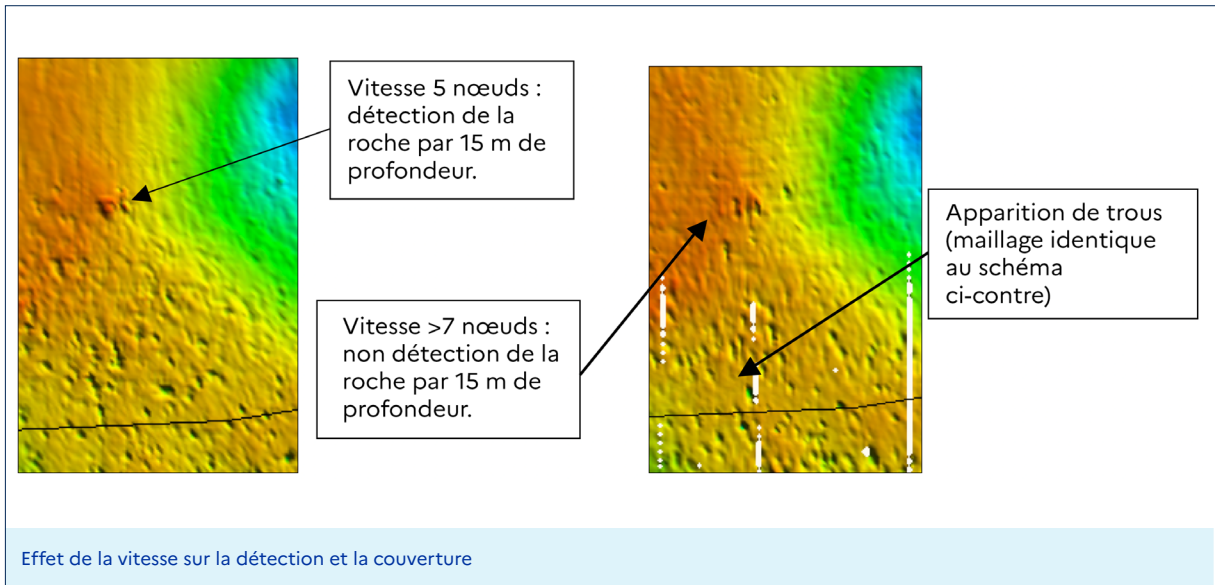
Cette méthode donne une estimation et non la valeur précise de la hauteur de l'obstruction au-dessus du fond. De même, la position de l'obstruction peut être estimée en transformant les temps de parcours du poisson à l'obstruction en distance et en connaissant la position approximative du poisson.

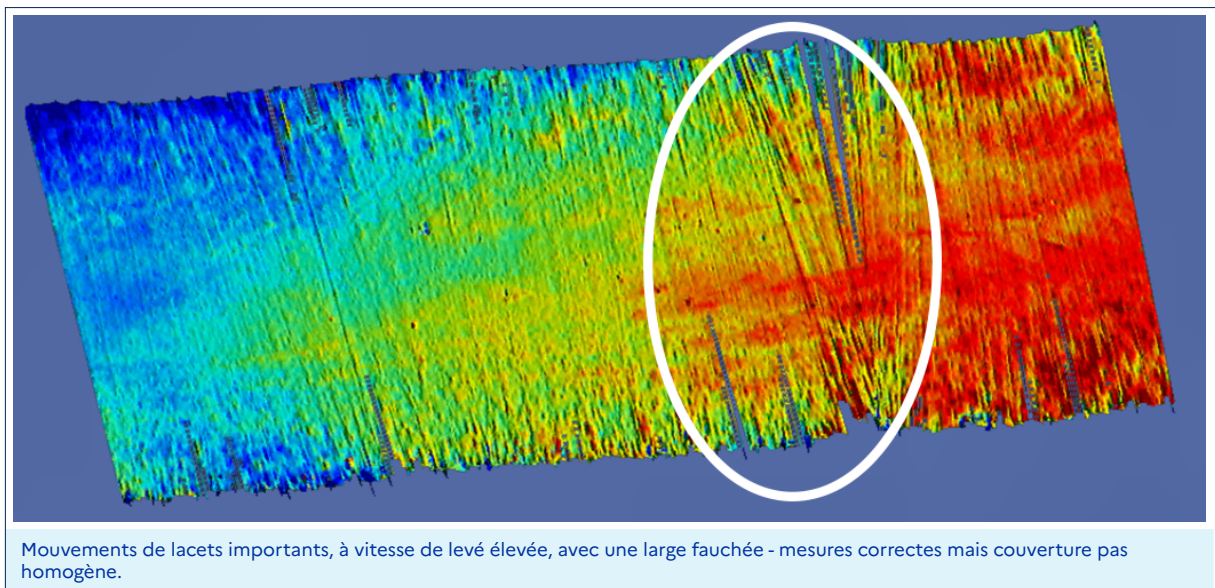
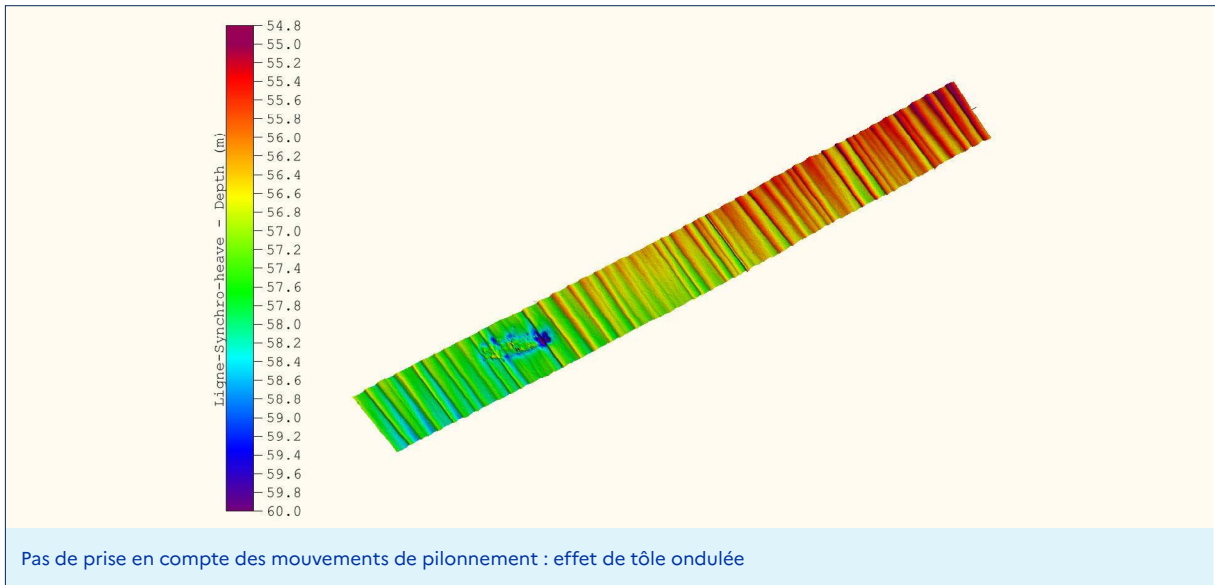
Pour obtenir une position précise et une cotation de l'obstruction il faut utiliser le SMF. Les deux systèmes sont donc complémentaires. Lors d'un levé on les utilise en parallèle. Lors du traitement, les obstructions sont repérées sur l'enregistrement et leur position estimée est reportée dans les données de bathymétrie du SMF. Les données de bathymétrie sont traitées pour obtenir la position et la cotation effective de l'obstruction. Si l'obstruction n'avait pas été identifiée par le sonar à balayage latéral, il se peut qu'elle ait été supprimée ou ignorée lors du traitement de la bathymétrie apparaissant comme du « bruit » ou un décrochement du sondeur.

ANNEXE 7

Exemples d'erreurs de fonctionnement et de mise en œuvre d'un SMF









ANNEXE 8

Sommaires des documents rédactionnels

Une instruction technique :



Direction des opérations, de la production et des services
Division « sciences et techniques marines »

BREST, le 7 juillet 2023

N° 89/Shom/DOPS/STM/NP

INSTRUCTIONS TECHNIQUES

- OBJET** : caractérisation de dunes dans le Goulet de Brest et suivi de dunes en mer d'Iroise.
- REFERENCES** : a) NR2020-018 : norme sur les levés bathymétriques ;
b) PS2022-024 : diffusion des informations nautiques révélées lors d'un levé.
c) instructions techniques N° 29/Shom/DOPS/STM/NP du 23 février 2022.
- ANNEXES** : deux annexes.

Shom – 13, rue du Chatellier – CS 92803 – 29228 Brest CEDEX 2

BRCM – Shom – CC08 – 29240 Brest CEDEX 9

Dossier suivi :

Courriel :

Tél :

www.shom.fr

SOMMAIRE

1 GÉNÉRALITES

1.1 PRÉSENTATION GÉNÉRALE

1.2 OBJECTIFS

1.3 LISTE DES TRAVAUX

2 COMPTABILITE

3 GÉODESIE – LOCALISATION

3.1 SYSTEME GEODESIQUE, PROJECTION

3.2 LOCALISATION

4 BATHYMETRIE

5 OCÉANOGRAPHIE

6 COURANTS

7 MARÉE

7.1 OBSERVATIONS

7.2 RÉDUCTION DES SONDAGES

8 SÉDIMENTOLOGIE

8.1 IMAGERIE SONDEUR MULTIFAISCEAU

8.2 SONDEUR DE SEDIMENTS

8.3 SYSTEME DE CLASSIFICATION DES FONDS

8.4 PRELEVEMENTS SEDIMENTAIRES

9 GÉOPHYSIQUE

10 INFORMATION NAUTIQUE

10.1 DOCUMENTATION NAUTIQUE

10.2 MISE À JOUR DES ELEMENTS DE LA BDGS

11 RÉSULTATS ET RÉDACTION

12 TRANSMISSION DES DONNÉES

ANNEXES

Une instruction particulière :



Direction des opérations, de la production et des services
Division « sciences et techniques marines »

BREST, le 17 juillet 2023

N° 134/Shom/GHOA/NP

INSTRUCTION PARTICULIÈRE

- OBJET** : Travaux à effectuer par les BH *La Pérouse* et *Laplace* entre juillet et décembre 2023 pour la caractérisation de dunes dans le goulet de Brest et en mer d'Iroise.
- REFERENCES** : Annexe 5
- ANNEXES** : cinq annexes.

Cette instruction particulière décrit les travaux à réaliser par un détachement du groupe hydrographique et océanographique de l'Atlantique (GHOA) à bord des BH2 *Laplace* et *La Pérouse* en juillet et décembre 2023. Ces travaux sont inscrits au programme d'activité du GHOA en 2023 (cf. référence a)).

SOMMAIRE

1 PRÉSENTATION

- 1.1 PRÉSENTATION GÉNÉRALE
- 1.2 PRINCIPAUX MOYENS
- 1.3 CHRONOLOGIE DES TRAVAUX

2 CONTRÔLE DE GESTION

- 2.1 CODES D'IMPUTATION

3 GESTION DE CONFIGURATION

- 3.1 MATÉRIEL
- 3.2 LOGICIEL

4 GÉODÉSIE

- 4.1 SYSTÈME DE COORDONNÉES DE RÉFÉRENCE (CRS)
- 4.2 POINT DE RÉFÉRENCE GÉODÉSIQUE
- 4.3 NIVELLEMENT

5 LOCALISATION

- 5.1 SYSTÈMES DE LOCALISATION
- 5.2 PROCÉDURE DE TRAITEMENT
- 5.3 INCERTITUDE DE LA LOCALISATION

6 MAREE

- 6.1 OBSERVATIONS
- 6.2 CORRECTIONS DES SONDAGES

7 BATHYCELERIMÉTRIE

- 7.1 OBSERVATIONS
- 7.2 CORRECTIONS DES SONDAGES

8 BATHYMÉTRIE

- 8.1 STRATÉGIE ET CONDITIONS DE LEVE
- 8.2 CORRECTIONS
 - 8.2.1 Tirant d'eau
 - 8.2.2 Attitude et cap
 - 8.2.3 Paramètres d'installation
- 8.3 TRAITEMENT ET VALIDATION DES SONDES

9 AIDES À LA NAVIGATION

10 Océanographie

- 10.1 HYDROLOGIE
- 10.2 COURANTOMÉTRIE
- 10.3 MAREE
- 10.4 VISIBILITÉ SOUS-MARINE
- 10.5 MOUILLAGES
- 10.6 AUTRES

11 SÉDIMENTOLOGIE

- 11.1 IMAGERIE SMF
- 11.2 IMAGERIE SONAL
- 11.3 PRÉLEVEMENTS DE SÉDIMENTS
- 11.4 SONDEUR DE SÉDIMENTS
- 11.5 SYSTÈME DE CLASSIFICATION DES FONDS

12 MAGNÉTISME

- 12.1 RÉFÉRENCE MAGNÉTIQUE
- 12.2 ACQUISITION
- 12.3 TRAITEMENT ET VALIDATION DES DONNÉES

13 MESURES MÉTÉOROLOGIQUES

14 CRITIQUE DES DONNÉES ANTÉRIEURES ET DE LA DOCUMENTATION EXISTANTE

- 14.1 INFORMATION URGENTE ET RAPIDE
- 14.2 INFORMATION DIFFÉRÉE
- 14.3 IMPACT SUR LES CARTES MARINES
- 14.4 AUTRES DOCUMENTS

15 DONNÉES ET DOCUMENTS PRODUITS

- 15.1 PROTECTION DES DONNÉES
- 15.2 ARCHIVAGE ET SAUVEGARDE DES DONNÉES À BORD

16 DIVERS

- 16.1 AUTORISATIONS DE TRAVAUX
- 16.2 ORGANISATION, RESPONSABILITÉS PARTICULIÈRES
- 16.3 COMPTE-RENDU

ANNEXES

Un rapport :



Groupe hydrographique et océanographique de l'Atlantique

RAPPORT PARTICULIER
RAP2023-014

- OBJET** : Levé Shom n°S202300200 - Levé bathymétrique de caractérisation de dunes dans le Goulet de Brest et en mer d'Iroise.
- REFERENCES** : Voir Annexe II.
- ANNEXES** : Deux annexes

BRCM BREST – SHOM/GHOA – CC 61 – 29240 Brest CEDEX 9

Dossier suivi :

Courriel :

Tél :

www.shom.fr

SOMMAIRE

1	OBJET DU DOCUMENT	10	RESULTATS DE L'EXPLOITATION BATHYMETRIQUE DU LEVE.
2	PRÉSENTATION	11	AIDES À LA NAVIGATION
2.1	OBJECTIFS – TRAVAUX DEMANDES – TRAVAUX REALISES ET RESTE A FAIRE	12	OCÉANOGRAPHIE
2.2	CONDITIONS METEO	12.1	MESURES HYDROLOGIQUES
2.3	DYSFONCTIONNEMENT DU MATERIEL	12.2	COURANTOMETRIE
2.4	CHRONOLOGIE DES TRAVAUX	12.3	VISIBILITE SOUS-MARINE
2.5	RETOUR D'EXPERIENCE	13	SÉDIMENTOLOGIE
3	CONTRÔLE DE GESTION	13.1	IMAGERIE SMF
3.1	CODES D'IMPUTATION	13.2	IMAGERIE SONAR LATERAL
3.2	UNITES D'ŒUVRE	13.3	PRELEVEMENTS DE SEDIMENTS
4	GESTION DE CONFIGURATION	13.4	SONDEUR DE SEDIMENTS
4.1	MATERIEL	13.5	SYSTEME DE CLASSIFICATION DU FOND
4.2	LOGICIEL	14	MAGNÉTISME
5	GÉODÉSIE	14.1	REFERENCE MAGNETIQUE
5.1	SYSTEME DE COORDONNEES DE REFERENCE (CRS)	14.2	ACQUISITION
5.2	POINT DE REFERENCE GEODESIQUE	14.3	TRAITEMENT ET VALIDATION DES DONNEES
5.3	NIVELLEMENT	15	GRAVIMÉTRIE
6	LOCALISATION	16	CRITIQUE DES DONNÉES ANTÉRIEURES ET DE LA DOCUMENTATION EXISTANTE
6.1	SYSTEMES DE LOCALISATION	16.1	INFORMATION URGENTE ET RAPIDE
6.2	PROCEDURE DE TRAITEMENT	16.2	INFORMATION DIFFEREE
6.3	INCERTITUDE DE LA LOCALISATION	16.2.1	Impact sur les cartes marines
7	MAREE	16.2.2	Autres documents
7.1	OBSERVATIONS	16.3	COMPARAISON AVEC LES LEVES ANTERIEURS
7.2	REDUCTION DES SONDAGES	16.4	CONCLUSION
8	BATHYCELERIMETRIE	17	DONNÉES ET DOCUMENTS PRODUIT
8.1	OBSERVATIONS	ANNEXES	
8.2	CORRECTIONS DES SONDAGES		
9	BATHYMÉTRIE		
9.1	STRATEGIE ET CONDITIONS DE LEVE		
9.1.1	Tirant d'eau		
9.1.2	Attitude et cap		
9.1.3	Célérité		
9.1.4	Paramètres d'installation		
9.2	TRAITEMENT ET VALIDATION DES SONDES		
9.3	INCERTITUDE, EXACTITUDE ET CONTROLE QUALITE		
9.3.1	Incertitude horizontale		
9.3.2	Incertitude verticale		
9.3.3	Exploration du fond.		
9.4	DONNEES VALIDEES		



13 rue du Chatellier - CS 92803
29 228 BREST Cedex 2
Tél. +33 (0) 2 56 312 312

www.shom.fr



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*