

CHAPITRE 7

LEVÉS HYDROGRAPHIQUES

1. INTRODUCTION

L'exécution d'un levé hydrographique, de la programmation jusqu'à la transmission des résultats finaux, est un processus continu dont chaque partie doit être traitée avec méthode et minutie si on veut en retirer leur pleine valeur. Les données les plus exactes recueillies avec le plus grand soin seront gaspillées si elles ne sont pas traitées et classées avec rigueur, et livrées sous une forme claire et exploitable.

Toute information doit être recueillie, vérifiée, validée et livrée de façon logique et uniforme en utilisant des termes clairs afin que les données puissent être récupérées et comprises immédiatement après le levé et dans le futur.

La généralisation de systèmes informatiques et d'instruments sophistiquée n'amoindrit pas la responsabilité de l'hydrographe. La gestion rigoureuse de la qualité est plus importante que jamais, mais rendue plus difficile par la croissance rapide et la complexité du volume de données acquises. L'hydrographe doit comprendre les principes de ses équipements et s'assurer méticuleusement de la qualité des données entrées et sorties avant de passer à l'étape suivante. C'est seulement en procédant ainsi que les données finales auront la qualité requise pour répondre aux attentes et permettre de répéter l'opération dans les décennies, voire les siècles, plus tard.

Pour passer de la théorie à la pratique, il n'y a pas de substitut à l'expérience. Le temps passé sur le terrain à collecter les données sur les conseils d'un hydrographe expérimenté fera ressortir les obstacles à surmonter pour que le produit satisfasse à la spécification initiale. L'usage et la pratique d'équipements complexes ne peuvent être maîtrisés que lors de l'exécution des différentes tâches du levé hydrographique, décrites dans les paragraphes qui suivent. L'hydrographe devra faire appel à son jugement et à son expérience pour développer ou réduire la liste non exhaustive des points abordés.

Le présent chapitre expose les principes généraux applicables à tout levé hydrographique.

2. PLANIFICATION D'UN LEVÉ HYDROGRAPHIQUE

Comme on le verra, la planification* d'un levé hydrographique est un processus complexe qui se concentre sur les détails et demande souplesse et efficacité dans la préparation, la gestion et la prise de décision. Le soin avec lequel elle sera conduite conditionnera les chances de réussite du levé.

2.1 Programmation des levés hydrographiques

La programmation a pour objet de définir les levés par la direction des opérations, de leur conception à leur attribution à une mission hydrographique et à la planification des travaux par cette dernière, jusqu'à soumission finale des résultats à l'établissement chargé de les exploiter.

C'est par conséquent une démarche logique qui comporte les étapes suivantes :

- a. instruction de la demande de travaux ;
- b. préparation des instructions techniques (IT) incluant la révision des documents existants ;
- c. attribution des IT à la mission hydrographique désignée ;
- d. planification générale des travaux par la mission ;
- e. estimation du volume de travail ;
- f. planification des travaux de reconnaissance ;

* NdT : Selon les pratiques en usage en France, la **programmation** est faite par la direction du Service hydrographique sur une base annuelle tandis que la **planification** relève de l'organisation des travaux par les missions hydrographiques.

- g. allocation des moyens ;
- h. planification détaillée du levé ;
- i. estimation du temps nécessaire ;
- j. programme définitif et approbation ;
- k. liaison avec les autorités extérieures ;
- l. dispositions administratives ;
- m. organisation du programme quotidien ;
- n. organisation du recueil et de la vérification des données ;
- o. planification de la rédaction.

Le traitement de la demande de travaux varie beaucoup d'un pays à l'autre. Des IT finalisées sont prescrites à une mission hydrographique désignée qui est responsable de la planification détaillée du levé. La « mission désignée » peut mettre en œuvre un navire d'État, ou opérer indépendamment à bord d'un navire affrété et/ou d'embarcations, ou encore être une société privée travaillant sous contrat. Chaque pays a sa propre méthode de programmation.

2.2 Instruction des demandes de travaux

Avant de procéder à la planification détaillée, l'hydrographe doit avoir les idées claires sur le but du levé et la requête de l'utilisateur principal. En général chaque levé doit répondre au besoin immédiat de l'utilisateur et également bénéficier à d'autres.

Ayant étudié le besoin ainsi que les données et graphiques disponibles dans la zone, l'hydrographe doit décider en premier lieu s'il faut recueillir des informations supplémentaires et proposer les changements qu'il considère comme nécessaires pour effectuer le levé.

Une fois les données fondamentales rassemblées et les limites et l'échelle du levé fixées, les spécifications principales peuvent être définies. Ces spécifications sont indiquées dans les IT qui doivent inclure l'ordre du levé, en conformité avec la publication S-44 de l'OHI.

Les spécifications d'un levé comprennent les rubriques suivantes :

- a. réseau géodésique ;
- b. contrôle du positionnement et étalonnage des instruments ;
- c. sondages, comprenant la gestion des densités de profils ;
- d. exploration au sonar latéral ;
- e. niveaux de référence et observation de la marée ;
- f. épaves et obstructions ;
- g. nature du fond ;
- h. océanographie ;
- i. courants de marée ;
- j. géophysique ;
- k. trait de côte et topographie ;
- l. feux et marques de balisage ;
- m. Instructions nautiques (IN) et vues de côte ;
- n. radiosignaux ;
- o. observations complémentaires (photographies aériennes, singularités hydrologiques, distances mesurées, alignements, magnétisme, phénomènes naturels, etc.) ;
- p. observations des pratiques.

Données existantes. L'hydrographe doit disposer de copies des cartes à grande échelle et de toutes les minutes des levés antérieurs et des rapports particuliers*. Ceux-ci doivent être étudiés attentivement, notamment les parties relatives à la marée, aux instructions nautiques, aux photographies aériennes et aux relevés topographiques.

Allocation des moyens. Le volume des travaux sera estimé à partir des rubriques listées plus haut et des données antérieures. Une planification détaillée interviendra après cette estimation qui permettra de définir les moyens nécessaires à l'exécution du levé en fonction des considérations suivantes :

- Conditions météorologiques et état de la mer, qui conditionnent le type de navire et l'utilisation des vedettes pour les sondages côtiers et les recherches.
- Étendue des zones peu profondes à sonder en vedettes. Si celles-ci sont mises en œuvre, la durée du levé dépendra de l'état de la mer et les § 2.7 et 2.8 seront traités conjointement.
- Hélicoptère : si le navire hydrographique n'embarque pas d'hélicoptère, faut-il s'assurer du concours d'un tel moyen pour accéder aux sites éloignés ?
- Logistique : l'autonomie des moyens de la mission hydrographique doit permettre de définir les besoins en combustible, eau et approvisionnements. L'entretien des équipements est une autre considération pertinente.
- Personnel : le nombre et la qualification du personnel nécessaire à l'exécution de chaque tâche doivent être déterminés en tenant compte des facteurs suivants : relèves de personnel, desserte postale et communications, repos et permissions, soutien médical à terre et à bord, bases à terre, transport et moyens de paiement.
- Topographie : moyens des équipes à terre et accès aux sites terrestres.
- Détachements autonomes : selon la nature des travaux côtiers et des recherches, il peut être prescrit de détacher des équipes et des vedettes autonomes opérant à partir d'un port ou d'un mouillage abrité, auquel cas on leur appliquera la même *check-list*. Le temps consacré à la mise à l'eau et au ramassage des vedettes est improductif.

Les facteurs extérieurs susceptibles d'affecter les travaux doivent également être pris en considération tels que, par exemple, les activités de pêche ou les restrictions imposées par les zones de tir ou les secteurs d'entraînement, les rails de navigation et les zones de trafic maritime intense.

Une reconnaissance du terrain peut être requise pour faciliter le levé, cf. § 3.

2.3 Planification détaillée du levé

Une fois que les travaux ont été dégrossis et que l'allocation des moyens a été décidée, la planification détaillée du levé peut commencer. Un certain nombre d'activités peuvent être exécutées en parallèle et un bon hydrographe s'efforcera d'optimiser la durée totale des travaux. Une liste complète d'actions figure dans les paragraphes suivants, mais il faut garder à l'esprit que chaque levé est différent et se donner la capacité d'inscrire ou de supprimer certains items.

2.4 Réseau géodésique

Les IT précisent le système géodésique et fournissent une liste de points avec leurs attributs.

Le Directeur technique doit décider de la meilleure façon de parvenir au niveau de précision horizontale prescrit et les IT indiquent en principe le choix du ou des systèmes de positionnement,

* NdT : ainsi que, pour la France, des extraits des Annales hydrographiques.

mais dans les rares cas où il ne sera pas possible d'atteindre la précision requise, la direction des opérations devra être invitée à réduire ses exigences.

Une fois le système de positionnement défini, les sites seront choisis en utilisant toute méthode d'analyse des réseaux disponible afin de coordonner les nouvelles stations et de tenir compte des conditions d'accès aux sites et des résultats de la reconnaissance. Il conviendra de penser à l'alimentation électrique et à la maintenance sur site et d'obtenir les autorisations d'occupation des sols, d'émissions radioélectriques, d'accostage des navires et de posé de l'hélicoptère, sans oublier l'implantation des signaux de sonde si une méthode de positionnement optique est utilisée.

Les procédures d'étalonnage du système de positionnement avant et pendant les travaux devront être arrêtées.

La plupart des levés modernes utilisent le GPS pour le positionnement à terre et en mer. En mode différentiel à la mer, le DGPS doit être validé dans la zone du levé et à terre ; pour les stations éloignées, un positionnement ponctuel de 20 cm d'incertitude doit pouvoir être réalisé dans les 24 heures suivant une observation par l'établissement hydrographique de soutien, par comparaison avec la référence ITRF la plus proche. Il faut, sinon, rattacher la nouvelle station au canevas existant.

2.5 Niveaux de référence et observation de la marée

Le zéro de réduction des sondes et sa relation au nivellement terrestre ainsi qu'une liste des repères de nivellement existants sont fournis par les IT. La planification se déroule dans l'ordre suivant :

Choix des observatoires de marée, si les IT ne les précisent pas déjà. Au besoin, il peut être décidé d'implanter des échelles de marée et des marégraphes supplémentaires et de prévoir le mouillage et le relevage de marégraphes plongeurs. On s'assurera que les puits de marégraphes et les échelles de marée n'assèchent pas à marée basse et on préparera si nécessaire des marégraphes et des échelles de marée supplémentaires.

Adoption d'un zéro de réduction des sondes rapporté à l'échelle de marée et au marégraphe, soit à partir des repères existants, soit par transport de la référence, soit par analyse des observations. Rattachement au réseau de nivellement terrestre si nécessaire.

Détermination du type de marée, du marnage prévu et de leurs conséquences sur la conduite des travaux. Si un zéro instrumental découvre à marée basse, prévoir des marégraphes et/ou des échelles supplémentaires afin d'observer la marée en continu pendant toute la durée du levé.

Procéder si besoin à l'ajustement de la carte cotidale. Si tel est le cas, déterminer les facteurs correctifs à partir des tables et cartes cotidales appropriées ou les produire *in situ* à partir des meilleures observations disponibles. Rechercher, le cas échéant, l'avis de l'établissement hydrographique.

2.6 Courants de marée

Établir le module maximal et la direction du courant de marée anticipé dans la région du levé.

Préciser le besoin en mesures de courant et le mode de mise en œuvre des courantomètres.

Identifier les raz, les zones tourbillonnaires et les sources d'eau douce cartographiées afin d'en planifier l'observation.

2.7 Sondages et densité de profils

Les considérations générales suivantes doivent être prises en compte lors de la planification initiale :

Reporter sur un calque toutes les sondes critiques ou caractéristiques issues des cartes à grande échelle de la zone de travail et des minutes des levés antérieurs afin de comparer les profondeurs.

Planifier l'espacement des profils ainsi que la direction et la vitesse du sondage régulier. Les profils de sondeur monofaisceau doivent être si possible perpendiculaires à la direction générale des isobathes.

Planifier dès le début du levé les profils de vérification qui sont normalement perpendiculaires à la direction du sondage régulier et qui sont cruciaux pour le contrôle de qualité.

Anticiper les variations spatio-temporelles de célérité et programmer une couverture CTD initiale.

Préparer un budget d'erreurs de sondage et le comparer aux spécifications des IT.

La vitesse du navire doit être adaptée aux profondeurs rencontrées dans la zone du levé et au type de sondeur. Les vitesses optimales et maximales de sonde seront déterminées par comparaison de la vitesse du porte-sondeur et des vitesses requises pour le remorquage du sonar latéral.

La préparation des sondages et de l'exploration au sonar latéral doit comporter une liste de profils qui constitue une référence à conserver.

Les levés au sondeur vertical doivent comporter un doublement des profils à l'intérieur de l'isobathe 10 m. Des profils supplémentaires doivent être exécutés parallèlement aux jetées ou aux quais.

Des profils doivent être prévus et exécutés le long des routes recommandées, des alignements, dans les zones de mouillage et à proximité des caps doublés régulièrement par les navires en transit.

Si le sondeur monofaisceau est utilisé pour les levés côtiers, une attention particulière doit être accordée aux profondeurs < 40 m, où la cote minimale des structures remarquables doit être recherchée. La densité des profils doit être doublée par fonds < 40 m à moins que les fonds ne soient monotones et qu'aucun danger n'ait été détecté lors d'une exploration complète au sonar latéral. La décision de ne pas doubler la densité du sondage régulier par fonds < 40 m doit faire l'objet d'une justification convaincante dans le rapport particulier.

2.8 Exploration au sonar latéral

Les considérations générales suivantes doivent être prises en compte lors de la préparation :

Le courant de marée influe fortement sur la direction du câble électro-tracteur et un compromis devra souvent être recherché entre l'optimisation de la couverture et la dérive du sonar latéral. Dans certains cas, le sondage et l'exploration devront être exécutés séparément.

Les épaves dont la liste est fournie par les IT doivent être investiguées et celles qui sont classées douteuses ou en position approchée doivent être recherchées tout particulièrement, même s'il faut sortir des limites du levé. Voir à ce propos le chapitre 6 de la publication S-44 de l'OHI.

Les épaves et autres dangers listés ainsi que les isobathes doivent être reportés sur la minute de préparation des profils.

Quand les sondages sont effectués à l'intérieur, ou à proximité, de champs d'hydrocarbures ou de zones de prospection, une prudence particulière doit être exercée dans un rayon de 500 mètres autour des installations ou aires de poser de pipelines afin d'assurer la sécurité du poisson remorqué.

Les profils de sonar latéral doivent être exécutés dans une direction située à moins de 20 degrés du courant de marée dominant. Dans les régions à fort courant, un écart très inférieur à 20 degrés doit être adopté pour s'assurer que le poisson ne s'écarte pas de la route du navire.

L'espacement entre profils explorés doit être conforme aux spécifications.

Les zones de recherche destinées à confirmer ou à réfuter l'existence d'une structure doivent être entièrement couvertes, même si elles sont en bordure de zone, et des profils supplémentaires doivent être construits pour assurer une insonification complète et un recouvrement approprié.

Tout chenal, route recommandée ou alignement situé dans des eaux resserrées doit être exploré au sonar latéral. Lors de la préparation des profils, un pied de pilote doit être pris pour tenir compte des plus grands navires susceptibles d'emprunter ces routes, particulièrement dans les coudes et quand la route change de direction.

2.9 Nature du fond

Des échantillons de fond doivent être prélevés dans toute la zone du levé, cf. S-44, § 4.2.

Les IT peuvent prescrire de conserver un certain pourcentage d'échantillons et des dispositions matérielles doivent être prises dans ce sens.

2.10 Trait de côte et topographie

Les consignes relatives au relevé du trait de côte et à la topographie sont précisées dans les IT.

La laisse de haute mer portée sur les cartes n'est pas toujours représentative du trait de côte issu d'un levé hydrographique.

À l'aide des cartes et des photos aériennes mentionnées dans les IT, identifier les zones convenablement couvertes et celles qui demandent un travail supplémentaire. Si aucune carte marine moderne, plan ou photo aérienne n'existe, tout détail du trait de côte et de la topographie utile pour le navigateur doit être déterminé précisément.

L'hydrographe essayera de recueillir tous plans locaux, cartes modernes et données géodésiques complémentaires à celles mentionnées dans les IT et les remettra à l'établissement en fin de levé.

Il identifiera les zones impraticables et les équipements à utiliser pour préciser leurs contours à l'échelle du levé.

2.11 Observations complémentaires

Géophysique : Les IT détaillent les travaux géophysiques à réaliser, en général magnétisme et gravimétrie, qui sont exécutés simultanément avec la bathymétrie ; elles prescrivent un espacement des profils. Les anomalies magnétiques signalées sur les cartes seront contrôlées et commentées et les observations magnétiques à terre spécifiées dans les IT seront planifiées.

Feux et marques de balisage :

Établir la liste des feux visibles dans la zone du levé et planifier la vérification de leurs caractéristiques. Procéder de même avec le positionnement des marques de balisage.

Photos aériennes : Si une couverture photographique aérienne est prescrite, les vols seront programmés à marée basse et par conditions météorologiques favorables. Les clichés seront utilisés pour déterminer le trait de côte et la topographie.

Instructions nautiques (IN) et vues de côte : Les corrections aux IN sont établies parallèlement au levé et ne doivent normalement pas nécessiter un allongement de la durée des travaux. Vérifier les vues de côtes existantes et en photographier de nouvelles comme prescrit dans les IT. Vérifier les installations portuaires et les installations pour petites embarcations.

Radiosignaux : Contrôler les données publiées.

Jetées, quais et débarcadères : Procéder, pendant la durée des sondages, à une vérification détaillée des jetées, quais et débarcadères.

2.12 Organisation des équipes

Normalement, le Directeur technique prépare des instructions planifiant les travaux et détaillant les responsabilités confiées à chacun. Ces instructions sont mises à jour régulièrement pour informer l'ensemble des équipes des priorités à court terme et détailler le cadre général au sein duquel l'activité quotidienne est programmée. Quand le navire et les vedettes travaillent simultanément, celle-ci devient particulièrement intensive et complexe aussi est-il nécessaire d'adopter des dispositions souples permettant de coordonner les mises à l'eau des embarcations, les relèves, le ravitaillement et les *briefings* des chefs d'équipes.

La pénurie de main-d'œuvre est toujours un problème en début de levé, qui cumule installation des marégraphes et des stations, débarquement des équipes à terre, mise à l'eau des vedettes, etc. Une bonne organisation des mouvements et/ou de l'hélicoptère est essentielle pour un démarrage réussi.

La passerelle et la salle de dessin doivent être structurées soigneusement afin d'assurer dans les meilleures conditions le recueil et le traitement des données.

La recherche de productivité accroît la pression sur toutes les équipes aussi une planification détaillée, une bonne gestion et une direction inspirée, sont-elles fondamentales pour le succès du levé.

2.13 Compilation et vérification des données

Le contrôle de qualité doit faire partie intégrante de la planification à tous les niveaux, avec des contrôleurs désignés pour chaque opération.

La vérification des tracés et de la compilation consiste à valider les enregistrements au fur et à mesure de la progression du levé.

Pour les levés étendus, il sera généralement préférable de procéder à l'acquisition exhaustive d'une zone avant de passer à la suivante afin de disposer d'un ensemble complet au cas où le levé serait interrompu pour une raison ou pour une autre.

Il peut être indiqué d'individualiser la rédaction des différentes parties du rapport particulier.

Les enregistrements et les notes doivent être compilés au fil du levé sans attendre la fin des travaux.

La comparaison des données nouvelles avec celles des levés antérieurs est une étape de la plus haute importance ; elle doit se faire au fur et à mesure de la progression du levé et la planification doit tenir compte des investigations supplémentaires nécessitées pour confirmer ou réfuter les différences.

2.14 Transmission des résultats à l'établissement hydrographique

Le format des résultats requis par l'établissement hydrographique varie beaucoup d'un pays à l'autre selon les spécifications et les habitudes nationales. En général la transmission comporte :

- a. les données bathymétriques sous forme numérique ou graphique (minutes B) ;
- b. les données de localisation sous forme numérique ou graphique (minutes de construction) ;
- c. les mosaïques du sonar latéral (minutes MOSA) ou leurs équivalents numériques ;

- d. les natures de fond sous forme numérique ou graphique (minutes N);
- e. le rapport particulier*.

L'établissement hydrographique doit valider les résultats du levé et rédiger une fiche critique dans les deux mois suivant la réception des données. La réponse aux questions posées par l'établissement doit intervenir aussi rapidement que possible, tant que les travaux sont encore frais à l'esprit.

2.15 Établissement du programme d'activités

La durée planifiée d'un levé doit inclure les temps consacrés aux escales, à l'entretien programmé, aux transits, à l'entraînement, etc. Chaque navire possède son propre régime de disponibilité et à partir de ces grandes lignes, un cycle d'activités hydrographiques peut être élaboré et soumis pour approbation si nécessaire. Si les estimations montrent que le levé ne peut pas être effectué dans les temps, un nouveau programme doit être établi ou le volume des tâches du levé doit être réduit.

2.16 Durée des travaux et estimation des coûts

Il n'existe pas de règles absolues pour calculer la durée d'un levé. Après étude des IT, un hydrographe expérimenté saura parvenir à une bonne estimation sans recourir à des calculs complexes. Cependant, l'appendice 1 du présent chapitre fournit un mode de calcul raisonnable et applicable à tout type de levé. Pendant la planification détaillée, l'hydrographe doit tenir à jour un décompte des distances parcourues sur profil, des épaves, des échantillons, etc. Ces données peuvent lui servir ensuite pour calculer des durées.

2.17 Liaisons avec les autorités extérieures

Dès que les IT ont été reçues, les caractéristiques générales du levé sont communiquées aux autorités locales, selon la liste fournie ci-dessous à titre indicatif, accompagnées d'une demande d'autorisation d'accès aux emplacements prévus. Cette information peut être complétée si la planification détaillée le requiert. Les IT sont souvent diffusées par l'établissement hydrographique, avec une lettre de couverture indiquant les organismes déjà informés :

- a. Quartier des Affaires maritimes ;
- b. propriétaires des terrains utilisés ;
- c. Préfecture maritime (opérations et action de l'État en mer) ;
- d. Phares & balises ;
- e. Gendarmerie maritime ou Gardes-côtes, selon l'organisation en vigueur ;
- f. compagnies pétrolières responsables des champs d'hydrocarbures ;
- g. préfecture ou représentants locaux du gouvernement ;
- h. attachés navals ;
- i. service géographique et/ou hydrographique du pays concerné par les travaux ;
- j. autorités opérationnelles dont dépendent l'/les hélicoptère(s) mis à disposition ;
- k. autorités ecclésiastiques (occupation de clochers, minarets, etc.).

De plus, s'il est prévu d'opérer avec des vedettes ou un détachement hydrographique à partir d'un port ou d'une installation locale, les responsables ci-dessous doivent également être contactés :

- a. police locale ;
- b. mairie et services municipaux ;
- c. autorités portuaires ;
- d. représentants locaux des services publics.

* NdT : Rappel : Terminologie en usage en France pour désigner le compte rendu technique d'un levé.

Des visites officielles peuvent être effectuées pendant la reconnaissance ou en début de levé. Les considérations de sécurité doivent être toujours présentes à l'esprit.

3. LA RECONNAISSANCE DU LEVÉ

3.1 Reconnaissance générale

Chaque levé doit être précédé par une reconnaissance destinée à rassembler les informations nécessaires à la conduite des travaux dans les meilleures conditions économiques. Ces informations concernent la conception, la planification et l'organisation des tâches ainsi que les observations. La reconnaissance peut être faite immédiatement avant le levé ou quelques mois en avance.

La reconnaissance est importante ; si elle est mal faite, elle engendrera un gaspillage de temps et d'efforts quand des moyens lourds seront engagés plus tard. Elle doit être aussi complète que possible, car une mauvaise reconnaissance entraînera inévitablement une mauvaise planification.

L'hydrographe appelé à faire la reconnaissance doit avoir de l'expérience, du jugement, une bonne connaissance des équipements disponibles et ne doit pas avoir d'idées préconçues quant à la méthode utilisée pour l'exécution du levé. Une fois les grandes décisions prises, les observations proprement dites peuvent être confiées sans risques aux hydrographes moins expérimentés.

3.2 Reconnaissance géodésique

Les objectifs de la reconnaissance géodésique peuvent être résumés comme suit :

- a. établir personnellement des contacts locaux ;
- b. visiter tous les sites envisagés et sélectionner les stations. Retrouver les repères existants ;
- c. confirmer le dégagement des champs de visées ;
- d. fixer la configuration définitive du réseau (avec itérations, si nécessaire) ;
- e. équiper les stations de repères géodésiques durables ;
- f. établir les fiches géodésiques ;
- g. établir un plan détaillé des observations (instruments/signaux) et en vérifier la faisabilité ;
- h. vérifier la faisabilité administrative du levé principal et l'améliorer si nécessaire.

Les informations suivantes seront requises pour chaque nouvelle station géodésique :

- a. accessibilité par voie de terre, de mer ou aérienne par hélicoptère ; temps requis pour atteindre la station (par exemple à pied en partant de la route) et itinéraire recommandé ;
- b. secteurs de visibilité de la station et besoin éventuel de création de secteurs dégagés ;
- c. description de la station, relèvements à la boussole des autres stations visibles ;
- d. photos de la station et de son environnement ; vues panoramiques prises de la station ;
- e. facteurs locaux, usages, etc. ;
- f. visibilité horizontale probable et conditions météorologiques.

3.3 Reconnaissance de la marée

Il est recommandé d'implanter les observatoires de marée en des emplacements déjà utilisés. La sélection des sites de marégraphes et d'échelles de marée s'appuiera sur les considérations suivantes :

- commodité d'installation et d'observation – certains emplacements sont plus faciles que d'autres et il en est de carrément inaccessibles ;
- la station ne doit jamais assécher, en particulier les zéros instrumentaux doivent être toujours dans l'eau. Le cas échéant, implanter un second marégraphe sous le premier ;

- facilité de lecture - le marégraphe et l'échelle de marée doivent être installés de manière à pouvoir être lus à tout moment ;
- sécurité - éviter de créer des situations où les instruments risquent d'être vandalisés ou détériorés, par exemple, amarrage de bateaux de pêche sur le puits du marégraphe ;
- emplacement abrité – l'échelle de marée ou le capteur doivent être mis à l'abri des conditions météorologiques ou des états de mer extrêmes ;
- protection – idéalement, l'enregistreur doit être placé dans un local fermé à clé ;
- lagon ou bassin séparé – les niveaux en de tels emplacements sont décalés par rapport à ceux de la mer ouverte et le marégraphe doit pouvoir observer des hauteurs d'eau vraies ;
- nivellement et repères - choisir un emplacement proche de deux repères afin d'éviter les pertes de temps en nivellement sur de trop longues portées ;
- proximité - si la surveillance est assurée par un observateur, il doit être logé à proximité. Si elle est confiée à une vedette, l'observatoire doit être proche du mouillage ou du campement.

4. ACQUISITION DES DONNÉES

Les profondeurs sont les informations les plus importantes de la carte marine et le navigateur doit pouvoir leur faire confiance pour éviter les dangers. Il faut s'assurer que les sondes sont portées avec précision, car une erreur de positionnement est souvent plus trompeuse qu'une erreur de profondeur, le marin préférant généralement passer à côté d'un danger porté sur une carte plutôt que de naviguer au-dessus en se fiant à la profondeur cartographiée.

Les automatismes en matière de maîtrise des erreurs de sondage, de validation des données et de contrôle de qualité (QC) doivent être acquis à toutes les étapes du levé hydrographique. Dans le même esprit, la rédaction du rapport particulier doit être commencée dès la fin de la planification et poursuivie pendant tout le levé, sans attendre la fin des travaux sur le terrain pour l'entreprendre.

4.1 Réseaux géodésiques et étalonnage

4.1.1 Introduction

Les IT précisent le système géodésique à utiliser pendant le levé. Si, à l'issue de la planification et de la reconnaissance (§ 2.4), il est jugé que le canevas géodésique ne comporte pas suffisamment de points principaux et secondaires, de repères et de stations de radionavigation, il sera nécessaire de le densifier dans la zone du levé pour satisfaire aux précisions requises par le positionnement à la mer.

Les méthodes choisies pour le positionnement en mer conditionneront le volume de travail à effectuer à terre. De nombreuses stations côtières peuvent être nécessitées pour un positionnement visuel dans de petites zones proches, alors que deux stations suffiront pour un levé au DGPS. Dans tous les cas, les stations doivent être implantées le plus près possible de la limite de pleine mer afin d'éviter les perturbations électromagnétiques causées par les trajets terrestres.

Les techniques de positionnement satellital différentiel permettent d'atteindre une grande précision avec le DGPS (par phase du code) et le RTK (cinématique temps réel par phase de la porteuse), avec une seule station de référence GPS, ce qui donne une plus grande souplesse de choix du site et de déploiement que les méthodes terrestres. Les corrections DGPS peuvent être obtenues auprès de l'Association internationale de signalisation maritime (AISM), des divers services commerciaux (Landstar, Seastar, Omnistar, Skyfix, etc.) du système WAAS (*Wide Area Augmentation Systems*) et des services en accès libres (EGNOS). Ces systèmes fournissent de bonnes précisions sans station de référence terrestre, mais nécessitent un étalonnage des récepteurs et des mesures en temps réel de la géométrie du système (GDOP) pendant le levé.

4.1.2 Contrôle du positionnement horizontal à terre

Le contrôle du positionnement en levés côtiers se fait habituellement par extension du réseau géodésique existant. À défaut, il faudra définir un système de référence local doté d'un azimut et d'une ligne de base afin de positionner les nouvelles stations les unes par rapport aux autres.

Les étapes classiques à franchir sont listées ci-dessous et des explications détaillées peuvent être trouvées au chapitre 2 et dans les références bibliographiques du chapitre en question :

- a. détermination des coordonnées absolues du point fondamental A ;
- b. orientation du réseau par observation de l'azimut astronomique de la ligne de base AB ;
- c. détermination de l'échelle par mesure de la longueur de la ligne de base AB ;
- d. extension du réseau aux stations du levé par cheminement, triangulation ou trilatération, avec points intermédiaires déterminés par relèvements directs et inverses.

Les opérations a, b et c ne sont requises que dans les cas assez rares où il n'existe pas de réseau géodésique ; d'autre part, les techniques d'observations astronomiques ou satellitaires GPS exécutées au titre des levés géodésiques sortent du cadre de ce manuel.

Les observations angulaires sont réalisées au théodolite ou au cercle hydrographique et les distances sont mesurées par moyens mécaniques, optiques ou électromagnétiques, ou combinées par une station totale. Les latitudes et longitudes (λ, φ) sont rapportées à l'ellipsoïde de référence ou exprimées en projection sous forme de coordonnées cartésiennes (x,y).

Les observations GPS, réalisées avec des récepteurs géodésiques double-fréquences ou en mode RTK-DGPS, permettent de déterminer une ligne de base plus précise (cf. chapitre 2, § 6.1) et des coordonnées dans un système de projection compatible, associé à l'ellipsoïde WGS 84. Une transformation de coordonnées doit être effectuée si le levé hydrographique est exécuté dans un système local et non en WGS 84 (cf. chapitre 2, § 2.2.3). Les précisions de positionnement des aides à la navigation et des détails topographiques sont indiquées dans la publication S-44 de l'OHI.

4.1.3 Contrôle du positionnement à la mer

Description générale des systèmes de positionnement

Les méthodes de positionnement à partir de la terre incluent des procédés classiques tels que :

- a. le positionnement par relèvements inverses au cercle hydrographique ;
- b. la triangulation et le positionnement par relèvements directs ;
- c. les méthodes de positionnement à vue ;
- d. les méthodes de positionnement par ligne graduée (sondage à la cordelle) ;
- e. les méthodes de positionnement par azimut/distance ;
- f. les systèmes de radiolocalisation.

Depuis le début des années 1990, la plupart de ces méthodes ont été remplacées par les systèmes de positionnement satellitaires tels que le GPS et ses versions différentielles plus précises (DGPS) dont la cinématique temps réel (RTK) avec mesure de phase de porteuse. Dans les régions isolées où les méthodes satellitaires sont inaccessibles ou impraticables, le positionnement du levé doit être assuré par techniques traditionnelles, comme par exemple :

- a. dans les zones draguées ou pour les chantiers navals, dont les surfaces à lever sont réduites ;
- b. sous les ponts, le long des postes d'amarrage à fort tirant d'eau, près des barrages, où les satellites GPS sont masqués ;

- c. pour les levés occasionnels à faible budget, où il est plus économique de recourir à une technique traditionnelle qu'à un système hydrographique automatisé avec GPS ;
- d. pour les reconnaissances rapides où la norme de précision hydrographique n'est pas requise.

Les procédures applicables à certaines de ces méthodes traditionnelles et à leurs critères de qualité (QC) sont détaillées dans ce chapitre à titre de référence.

Précision du positionnement horizontal

Toutes les méthodes de positionnement horizontal citées au tableau 1 de l'appendice 2 : *Systèmes de positionnement horizontal et critères de sélection*, satisfont aux normes minimales de précision pour les ordres de levé de la S-44, à condition d'opérer à une distance du point géodésique de référence compatible avec les limites normales d'utilisation qui varient en fonction du type de système, des procédures et de l'environnement. En général, les précisions de positionnement de tous les systèmes se dégradent en fonction de la distance à la ligne de base, certains plus rapidement que d'autres. Les utilisateurs doivent déterminer et évaluer la précision résultante de toutes les méthodes de positionnement, DGPS compris, afin de garantir leur validité pour l'exécution du levé.

Choix des systèmes de positionnement

Les précisions des systèmes de positionnement utilisés en hydrographie sont généralement fournies pour une utilisation normale et en fonction des différents ordres de levés. Le tableau 1 de l'appendice 2 indique les précisions estimées pour différents systèmes en regard des ordres de levés de la S-44. Le choix d'une technique de levé particulière par l'autorité prescriptrice doit être guidé par ces considérations, qui sont valables pour une zone standard située à 25 milles environ du trait de côte ou du point géodésique de référence et pour des profondeurs allant jusqu'à 200 mètres. Les critères de réalisation des levés à ces distances doivent se conformer aux normes de la S-44 et au présent manuel.

Des informations générales sur les précisions en distance offertes par chaque type de système sont indiquées dans les manuels tels que celui-ci ou les notices d'équipements. Les variations extrêmes résultent de facteurs discutés ailleurs dans cet ouvrage et dans les chapitres pertinents de ces notices. La gamme de précision maximale indiquée correspond généralement à celle d'un instrument utilisé dans ses limites de fonctionnement et par conditions normales. Selon les cas, cette précision satisfera aux normes des levés de 1^{er} et/ou de second ordre et/ou d'ordre spécial, ce qui renvoie à la sélection de l'équipement le mieux adapté aux circonstances du levé (géométrie, distance à la côte, etc.) pour obtenir l'ordre de précision requis.

Contrôle de suivi des profils

Les méthodes énumérées plus haut fournissent le positionnement à la mer, mais l'hydrographe doit s'assurer en plus que son navire suit le profil prévu en tenant compte de la dérive due au vent et aux courants dont les effets doivent être pris en compte lors des contrôles de positions. Souvent, le système de positionnement choisi fournira des informations sur le cap à suivre par l'intermédiaire d'un indicateur gauche/droite ou d'un écran spécial relié au système automatique d'acquisition et de traitement de données ; de plus, des aides supplémentaires au pilotage seront parfois fournies, notamment pour les travaux à courte portée.

Dans les méthodes visuelles traditionnelles ou radioélectriques anciennes (EPS), la position du navire était construite en temps réel, soit manuellement soit par table traçante, sur un plot qui pouvait même être superposé aux sondes réduites lors de la phase de traitement. Des projections de construction devaient alors être préparées ainsi que des calques pour reporter la progression du levé.

Quelle que soit la méthode utilisée, le positionnement aura un impact sur la planification et l'exécution du levé et devra être pris en compte dès le début des travaux.

4.1.4 Reconnaissance préalable

Description générale

La reconnaissance préalable de la zone réduit considérablement la durée du levé proprement dit. Les emplacements sélectionnés pour les stations de contrôle sont visités, confirmés et décrits dans des fiches. Quand l'équipe d'hydrographes arrive sur zone, les instruments sont installés à terre et à bord où ils sont testés et étalonnés.

Appliquant la stratégie élaborée par la direction des opérations, le Directeur technique finalise la programmation et si nécessaire, modifie le déploiement du personnel et du matériel afin d'optimiser l'utilisation durant tout le levé. Tout changement par rapport à la programmation doit être négocié avec l'établissement hydrographique et une méthode efficace de suivi de la progression des travaux et des principaux jalons doit être mise en place.

Exécution des observations

Lors de la phase d'observations, toutes les occasions doivent être saisies pour vérifier le canevas géodésique et détecter les faiblesses des méthodes d'observations, des observateurs et des instruments de mesure. Tous les calculs doivent être complétés et entièrement vérifiés avant d'attaquer les travaux qui dépendent de la précision des coordonnées obtenues à l'issue de cette étape primordiale.

L'hydrographe doit repérer dans la planification les périodes favorables aux observations afin de satisfaire aux spécifications du levé. Les instruments doivent être sélectionnés de façon à réaliser des observations du type et de la qualité appropriés. Les étalonnages doivent être mentionnés dans le rapport particulier et leurs données doivent être vérifiées et incluses dans les documents du levé.

Sélection du site

Une attention particulière doit être accordée, lors de la création du canevas géodésique, au choix et à la densité des sites, à l'installation des stations de références et aux techniques de mesures requises pour assurer l'ordre du levé. Les facteurs à prendre en compte sont notamment le type de levé (port et approches, littoral, levé côtier ou au large), le système de positionnement (visuel, radioélectrique, satellital), le nombre et la géométrie des lieux de position (LOP) dans la zone du levé.

La sélection du site doit être basée sur :

- a. son accessibilité, par terre ou par mer ;
- b. la capacité d'occuper la station ou la nécessité de créer une station excentrée ;
- c. la proximité du rivage ou du trait de côte et le secteur de visibilité vers la mer ;
- d. l'intervisibilité avec les sites adjacents et l'absence d'obstacles susceptibles d'interférer avec la réception des signaux radioélectriques ou satellitaires ;
- e. le raccordement au réseau électrique ou l'espace disponible pour installer une alimentation propre (batteries, panneaux solaires et générateurs) ;
- f. la sécurité du site et la possibilité de laisser du matériel sans surveillance ;
- g. l'altitude du site et la possibilité de l'utiliser pour le système de positionnement choisi.

Mise en œuvre et visites de bon fonctionnement des stations

Des *check-lists* doivent être créées par le Directeur technique à partir des notices afin de s'assurer que les équipements des stations de référence (système radioélectrique, GPS différentiel ou RTK) ou les instruments de mesure d'angles et de distances (cercle, théodolite, distancemètre, station totale) sont utilisés correctement et que les techniques mises en œuvre sont les mêmes partout pendant le levé.

Le type de stations de référence terrestres (radioélectrique, DGPS ou RTK) déterminera la fréquence des visites de contrôle de bon fonctionnement des équipements laissés sans surveillance. Cette remarque est également valable pour les stations totales opérant en mode automatique.

4.1.5 Étalonnage des systèmes de positionnement

Généralités

Le type de système ou d'équipement retenu déterminera les procédures à adopter pour vérifier l'adéquation des performances obtenues aux ordres de précisions du levé telles qu'énoncées au tableau 1 de l'appendice 2.

Les procédures et techniques d'étalonnage détaillées dans la notice ou le manuel de l'utilisateur doivent toujours être suivies en début et fin de levé et quand il est jugé nécessaire de vérifier les performances du système en cas de doute. Ces contrôles doivent être effectués autant que possible aux distances prévues dans la zone du levé et par comparaison avec un système plus précis, ou une aide à la navigation, ou entre stations de contrôle coordonnées. Toutes les stations totales, les distancemètres et les prismes utilisés pour les contrôles primaires doivent être entretenus régulièrement, vérifiés fréquemment sur des bases connues et renvoyés en usine aux dates d'étalonnage périodique prévues.

Mesure d'angles

Les procédures de mesures d'angle doivent être suivies avec soin (cercles, théodolites, stations totales) et les instruments doivent être réglés de façon à minimiser les erreurs et être à jour de leurs révisions et étalonnages. Le limbe doit être calé à zéro avant d'effectuer le tour d'horizon et les vis micrométriques doivent être manipulées avec délicatesse pour éviter les erreurs grossières.

À chaque visite d'une station, celle-ci doit être comparée soigneusement à sa fiche descriptive. Les distances aux points géodésiques de référence doivent être contrôlées afin de s'assurer que la borne n'a pas été déplacée. Toute nouvelle station doit être rattachée à trois points connus ; son secteur de visibilité par rapport à la zone du levé et autres stations doit être vérifié ; l'utilisation d'une station excentrée doit être évitée autant que possible. Tout changement dans le programme d'observations dû à la non-stationnabilité d'un site doit être analysé afin de s'assurer que l'ordre du levé sera satisfait. Les stations utilisées doivent être bornées et faire l'objet d'une fiche géodésique complète.

Les mesures angulaires de hauteurs seront déterminées autant que possible par visées réciproques. Avant de déplacer un instrument, on s'assurera que les angles et les distances observés respectent la norme prescrite. A défaut, la série complète de mesures devra être observée de nouveau.

Les observations validées d'angles et de distances seront réduites à la projection au moyen d'un programme informatique approuvé afin de calculer la position la plus probable et l'ellipse d'incertitude. Celles des nouvelles stations seront examinées attentivement afin de déterminer la qualité des positions finales. Une analyse critique du canevas géodésique sera faite.

Mesures de distances

Les procédures décrites dans les manuels d'opérateur et les notices des distancemètres et stations totales seront appliquées et les instruments seront contrôlés sur une base géodésique connue ou par comparaison avec un système de précision supérieure ou égale à celle de l'ordre du levé.

Positionnement 2D

Comme pour les mesures de distance, les conseils des manuels d'opérateur et des notices des systèmes de positionnement 2D seront appliqués et complétés par des étalonnages sur base géodésique ou comparaisons avec des systèmes de précision supérieure.

Quand il est prévu de valider le GPS par comparaison avec un système de positionnement radioélectrique préalablement au levé, on s'assurera que toutes les stations sont bien rattachées au même système géodésique. Les étalonnages des systèmes de navigation et comparaisons avec un autre système de positionnement précis doivent être effectués au début et à la fin des travaux.

Positionnement satellital (3D)

Quand le GPS est mis en œuvre, les procédures établies par le Service hydrographique national et détaillées dans les guides d'utilisation doivent être suivies rigoureusement pour s'assurer que l'équipement est utilisé à sa capacité maximale dans les différents modes disponibles, standard, précis, différentiel et RTK. Tous les récepteurs doivent être vérifiés en début et en fin de travaux sur une base géodésique connue, ou sur un réseau géodésique précis, ou par comparaison avec un système de précision supérieure ou égale à l'ordre du levé.

4.1.6 Méthodes de positionnement et instrumentation

4.1.6.1 Positionnement par relèvements inverses au cercle hydrographique

Description générale

Le positionnement au cercle hydrographique consiste à observer simultanément deux angles horizontaux entre trois signaux connus et à construire leurs segments capables, dont l'intersection détermine la position (figure 7.1). Le positionnement au cercle est entièrement réalisé à bord du navire hydrographique et ne dépend ni de l'électronique, ni des communications, ni des stations à terre. Sous certaines conditions (c.-à-d., près des signaux ou en quasi immobilité) il peut être relativement précis s'il est exécuté par une équipe expérimentée, mais en général, il n'est plus considéré comme suffisamment précis pour un navire en route dans la plupart des applications.

Les signaux hydrographiques utilisés pour les levés au cercle sont eux-mêmes localisés au cercle. Des cheminements inférieurs au 3^{ème} ordre peuvent être utilisés si la distance du point géodésique de référence ou complémentaire ne dépasse pas 4 km pour les levés à 1: 10 000 ou 2 km pour les levés à plus grande échelle.

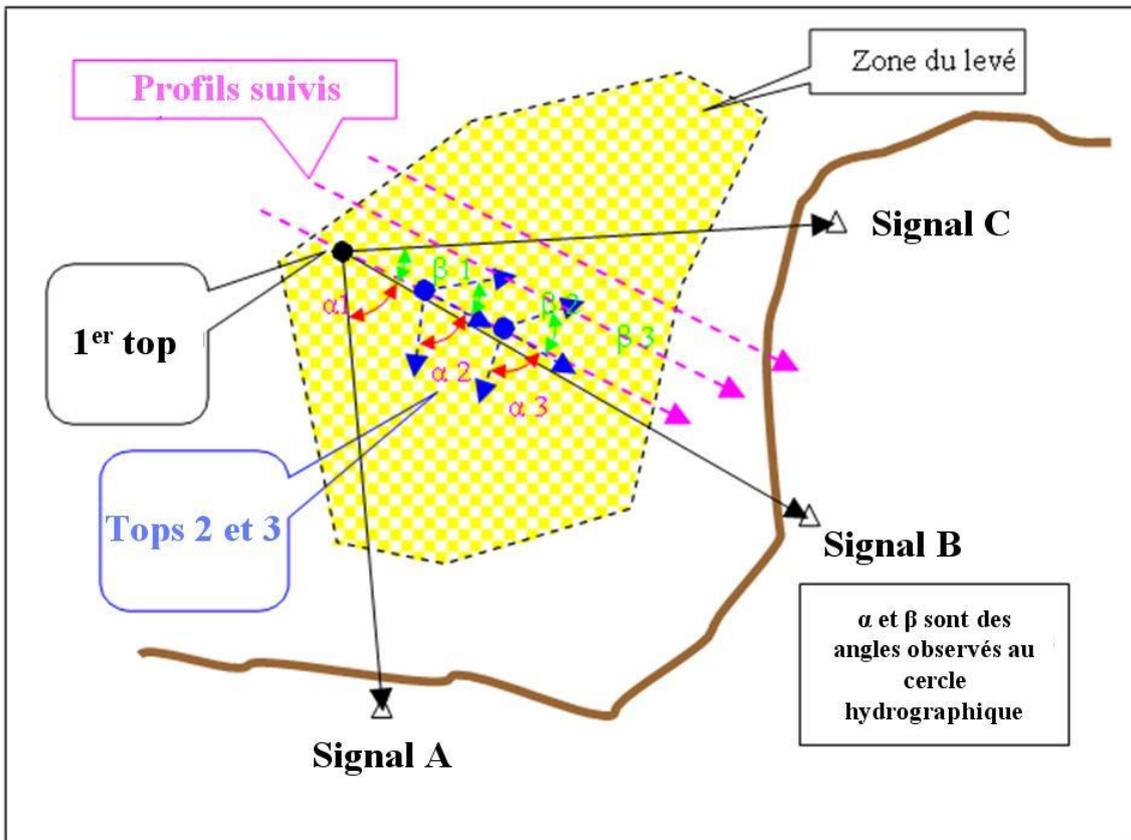


Fig. 7.1 Positionnement par relèvements inverses au cercle hydrographique

Un seul angle au cercle peut être combiné à une distance comme dans la figure 7.2 qui correspond à la méthode traditionnelle de localisation des dragues suceuses-porteuses.

À bord des navires ou des plates-formes offshore stables, un nombre redondant d'angles peut être observé au cercle hydrographique. Le point qui en résulte peut être calculé par moindres carrés avec une assez bonne exactitude (meilleure que ± 1 m dans certains cas précis).

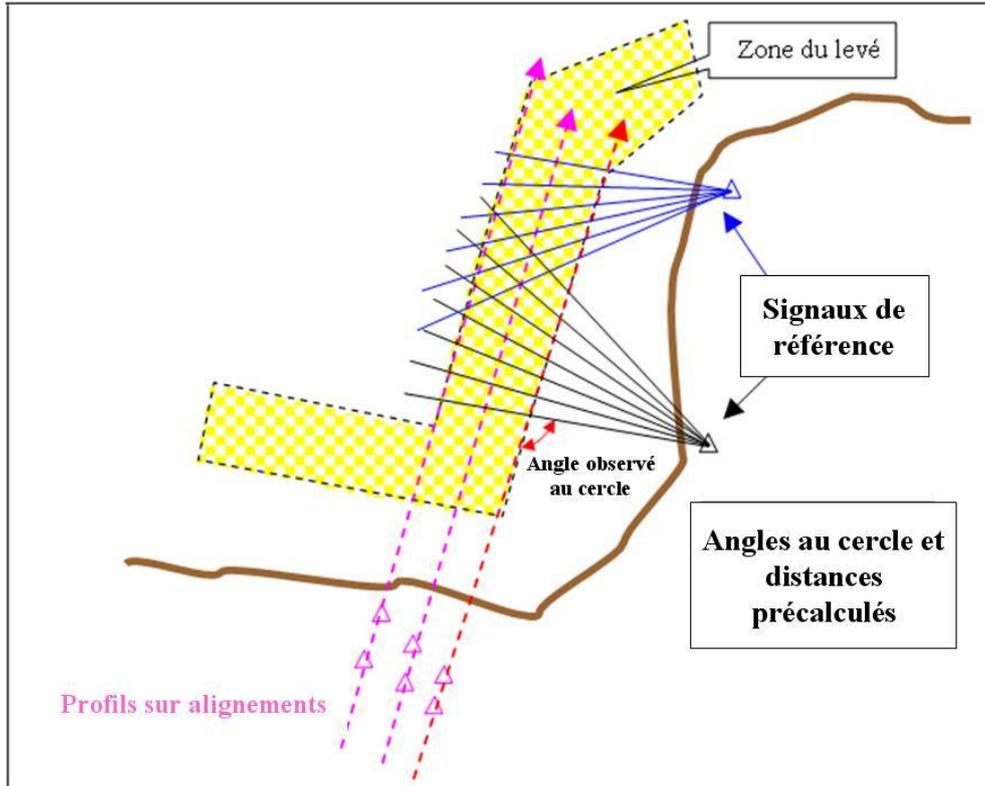


Fig. 7.2 « Positionnement d'une drague suceuse »

Précision et contrôle de qualité

Les angles observés au cercle hydrographique sont à l'intersection de deux arcs capables formés par trois points : les signaux observés pris deux à deux et la position du navire. La géométrie de l'intersection est un facteur fondamental pour estimer la qualité des relèvements inverses qui sera d'autant plus médiocre que les cercles se rapprochent l'un de l'autre. Dans les meilleures conditions, la précision d'une position dynamique est rarement meilleure que ± 5 m (EMQ 95%) et se situe en moyenne autour de 10 à 20 mètres.

La méthode la plus simple pour estimer la précision de l'intersection est de déplacer chaque lieu d'un petit angle correspondant à l'incertitude de la mesure et d'observer le changement de position résultant. Cette opération est réalisée facilement par un logiciel ou par construction au moyen d'un rapporteur à alidade. La précision du positionnement au cercle doit être vérifiée en plusieurs points de la zone du travail en tenant compte des facteurs de qualité suivants :

- précision des angles au cercle hydrographique ;
- synchronisation des observateurs ;
- déplacement et vitesse du navire ;
- expérience et fatigue des observateurs ;
- types de signaux.

En raison de leur conception et de leur manipulation, les étalonnages internes des cercles ne sont pas particulièrement stables aussi les observateurs doivent-ils les contrôler de façon continue et

régulièrement au cours du levé, généralement en fin de profil. Il y a peu d'occasions de contrôler la qualité du positionnement au cercle. Quand il y a plus de trois signaux visibles, cette qualité peut être estimée par des observations au mouillage (point fixe).

Les observations au cercle à des distances approchant des limites de visibilité des signaux seront peu précises parce que les sensibilités des angles sont faibles. Le cercle doit être parfaitement ajusté, les angles bien observés et lus avec une bonne précision de l'ordre de 30 secondes si nécessaire. Si la somme des deux angles est fréquemment voisine de 180° avec un angle très grand et l'autre très petit, le taux de variation angulaire sera rapide quand le navire se déplace, aussi, un soin particulier devra-t-il être apporté à la simultanéité des observations. Les erreurs résultant de la non-simultanéité des observations seront minimisées quand la distance des observateurs aux signaux est faible.

4.1.6.2 Positionnement par triangulation/relèvements directs

Principes généraux

Un navire ou une plate-forme offshore peuvent être localisés par visées de théodolites stationnés sur des points géodésiques. Cette technique peut s'appliquer dans les zones dépourvues de systèmes de positionnement radioélectrique ou quand une précision accrue est prescrite. Comme indiqué à la figure 7.3, il faut disposer de deux observateurs à terre ou davantage. Du fait de la haute sensibilité et de la stabilité des théodolites, qui doivent satisfaire aux normes de précision du 1^{er} ordre ou de l'ordre spécial, la position résultante peut être assez précise. L'intersection des relèvements doit être telle qu'une erreur de visée d'une minute ne doit pas entraîner d'erreur de positionnement supérieure à 1 mm à l'échelle du levé, ce qui est généralement obtenu pour des angles d'intersection compris entre 30° et 150° . Les techniques de triangulation sont souvent utilisées en complément des mesures électroniques de distances ou de GPS différentiel au cours de la construction des structures côtières (jetées, ponts, plates-formes offshore, etc.) et pour assurer un suivi de leur déformation.

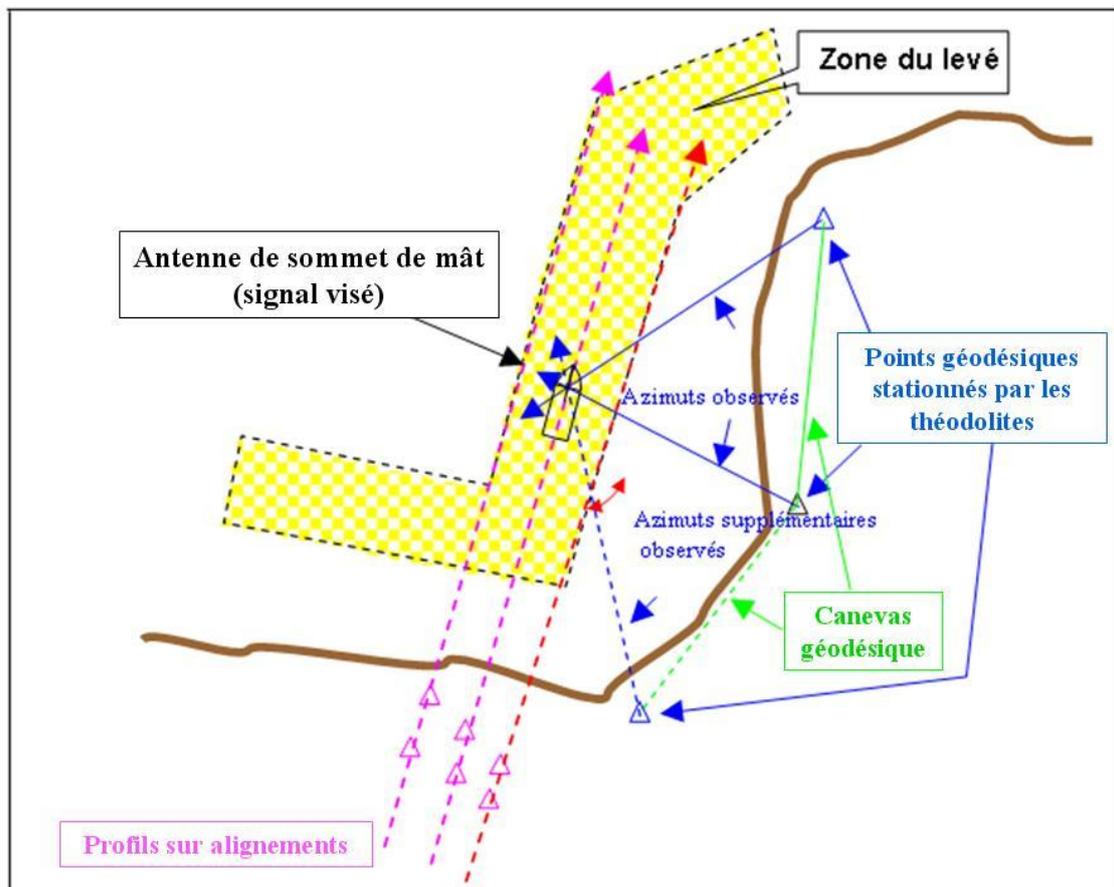


Fig. 7.3 « Positionnement par relèvements directs »

Précision

La précision du positionnement par triangulation ou relèvements directs dépend de la géométrie des stations dont dépend la sensibilité des intersections des angles de visée ou des azimuts ; elle varie dans la zone car l'erreur angulaire standard pour chaque instrument est fonction de la distance entre l'observateur et le navire hydrographique. L'incertitude moyenne des mesures d'angle et la distance du navire aux stations permettent d'estimer la précision du positionnement.

Les techniques d'intersections multiples, avec trois observations angulaires ou plus, permettent d'augmenter la précision en faisant intervenir des observations surabondantes.

Souvent les profils sur alignements sont combinés avec des mesures de distance ou GPS, et associés à une compensation automatique par moindres carrés pendant l'acquisition.

Contrôle de qualité (QC) et assurance qualité (QA)

Le contrôle de qualité (QC) consiste en vérifications périodiques en cours de levé. Une assurance qualité (QA) indépendante devrait en principe être exécutée au moyen d'un troisième instrument, mais ce n'est pas toujours réalisable en pratique. On l'effectue normalement par distancemètre ou GPS.

4.1.6.3 Positionnement à vue

Description générale

Cette méthode traditionnelle était utilisée pour localiser une drague suceuse par rapport à des pavillons ou à des détails de la côte et est encore utilisée pour certaines applications, telles que les alignements horizontaux et verticaux de constructions offshore, de plates-formes, de barges, etc.

De nos jours, les techniques de positionnement à vue sont rarement utilisées du fait de l'existence de méthodes électroniques de positionnement par azimuth/distance et GPS. Généralement le positionnement à vue ne s'applique qu'aux reconnaissances, quand la position des détails (phares, balises, signaux de jour, ponts et autres amers remarquables) identifiables sur les schémas fournis ou sur les cartes marines est jugée suffisamment précise pour ce type de levé.

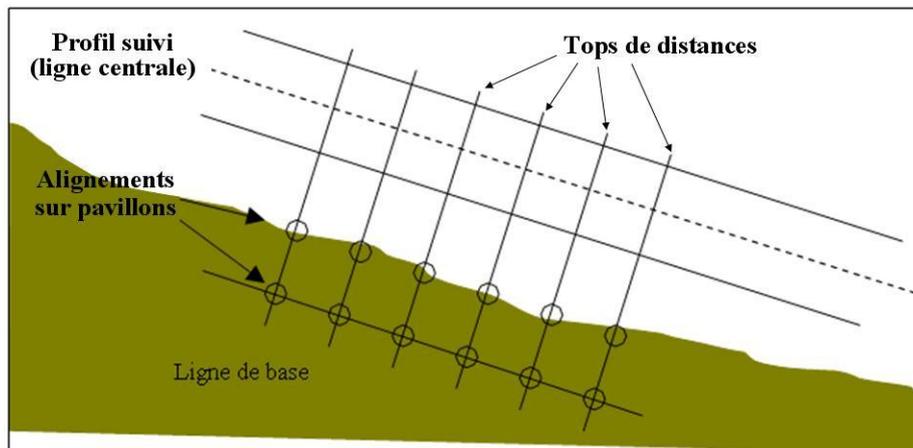


Fig. 7.4 « Positionnement à vue avec alignements sur pavillons »

Les principes de cette méthode sont les suivants :

- le navire hydrographique maintient une vitesse constante entre les alignements ;
- un top est effectué à chaque passage du navire devant un alignement ;
- les positions sont interpolées entre les tops ;
- la vitesse du navire est supposée constante entre les observations qui sont présumées exactes ;

- e. la position est déterminée par l'intersection du profil et des alignements ;
- f. les résultats doivent être utilisés avec prudence, vu le caractère approximatif d'un tel levé.

Précision et contrôle de qualité

La précision est difficile à estimer et le contrôle de qualité est rarement effectué quand on utilise une méthode de positionnement à vue.

4.1.6.4 Positionnement par ligne graduée (sondage à la corde)

Description générale

Cette méthode traditionnelle fut souvent utilisée avant les années 1970 pour contrôler les zones draguées, les profils de chenaux et les recherches de hauts-fonds et d'obstructions dans les voies d'eau navigables. Elle fut remplacée par les systèmes de positionnement radioélectriques et les appareils de mesure par azimuth/distance qui, à leur tour, furent détrônés par le GPS.

Bien exécuté, avec de courtes distances à la ligne de base, le sondage à la corde est une méthode simple et précise applicable aux divers travaux maritimes, dont les principes sont décrits ci-après :

- a. une corde graduée dont une extrémité a été fixée à un point de la ligne de base est déroulée perpendiculairement à cette dernière au moyen d'un treuil installé à bord du porte-sondeur ;
- b. la méthode est utilisée pour investiguer les zones d'accostage qui ne peuvent recevoir le GPS. On lui préfère néanmoins le positionnement par station totale ;
- c. la méthode ne nécessite pas d'appareillage électronique ou de communication.

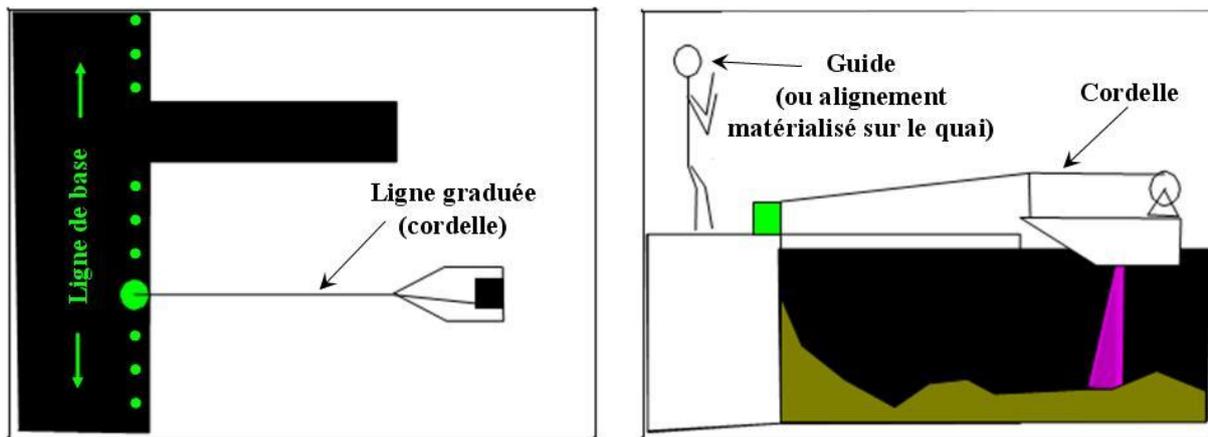


Fig. 7.5 « Sondage à la corde »

Pratique de la méthode

La corde est une méthode simple pour sonder perpendiculairement à une ligne de base fixe.

On pourra choisir parmi les variantes suivantes, selon le type d'opération et les instruments utilisés :

- a. mode statique : les observations sont faites quand le navire est positionné correctement sur son profil et la corde tendue afin de minimiser son affaissement ;
- b. mode dynamique ou continu : la corde est associée à un sondeur analogique ;
- c. extension de la ligne de base à un navire : la corde est fixée sur un navire prépositionné et utilisé comme ligne de base ;
- d. distance constante : la corde est réglée à une longueur constante et l'embarcation parcourt des segments circulaires autour d'un point de base ;

- e. matérialisation de la ligne de base : les points intermédiaires le long de la ligne de base sont construits par méthode d'arpentage standard ;
- f. alignement du porte-sondeur : l'alignement de l'embarcation sur son profil est réalisé par signaux visuels de type pavillons, ou par guidage optique (prisme à angle droit, transit-niveau, théodolite, cercle hydrographique ou station totale) ;
- g. procédures d'enregistrement des données : les distances et les profondeurs sont enregistrées sur un cahier d'observations puis tracées sur une minute ou un plan de site ;
- h. porte-sondeur : tout type d'embarcation équipée d'un treuil manuel ou électrique et armée par un opérateur compétent. On utilisera généralement une vedette de 5 à 8 mètres à faible tirant d'eau, de l'ordre de 40 cm, pour sonder dans les eaux peu profondes et débarquer facilement.

Précision et étalonnage

La précision du positionnement dépend de la sensibilité de l'alignement et de la mesure de distance, comme pour un azimut/distance.

La cordelle graduée doit être étalonnée tous les 3 à 6 mois ou après rupture, par comparaison avec une chaîne d'arpenteur ou à l'aide d'un distancemètre.

4.1.6.5 Positionnement par azimut/distance

Description générale

Cette méthode de positionnement, largement utilisée autrefois, est basée sur l'intersection d'azimuts/distances généralement observés à partir d'une même station de référence à terre (cf. figure 7.6). De nos jours, elle n'est employée que quand le GPS est indisponible, par suite du masquage des satellites. Les caractéristiques en sont les suivantes :

- a. les angles (azimuts) sont observés au moyen d'un transit-niveau, d'un théodolite ou d'une station totale ;
- b. les distances sont mesurées par un appareil de positionnement radioélectrique (distancemètre laser ou infrarouge, système par signaux micro-onde ou station totale) ;
- c. les données sont notées sur un cahier d'observation et transmises au navire par radio ou enregistrées automatiquement et transmises par modem ;
- d. la méthode est utilisée pour les distances inférieures à 5 km de la côte et/ou de la station de référence ;
- e. une bonne précision relative peut être atteinte selon les instruments utilisés (les meilleures précisions sont obtenues par les théodolites/distancemètres automatisés ou par les stations totales) ;
- f. un étalonnage périodique ou un troisième lieu (angle ou distance) sont essentiels pour garantir la fiabilité du système ;
- g. il suffit d'une petite équipe pour réaliser ce type de positionnement qui est assez efficace ;
- h. les sondages sont réalisés par une embarcation de 5 à 8 mètres ;
- i. les théodolites avec distancemètres laser ou infrarouge et les stations totales sont des instruments très précis, utilisables pour assurer l'ordre spécial de la S-44 à moins de 2 km du point de référence ;
- j. les systèmes de positionnement par signaux haute fréquence (UHF) atteignent difficilement le niveau de précision requis pour le 1^{er} ordre (2 m ou 5 m) ;
- k. les alidades dynamiques ou les stadias permettent d'atteindre le 1^{er} ordre de précision (5 mètres) pour des portées ne dépassant pas 30 à 50 mètres, selon les conditions.

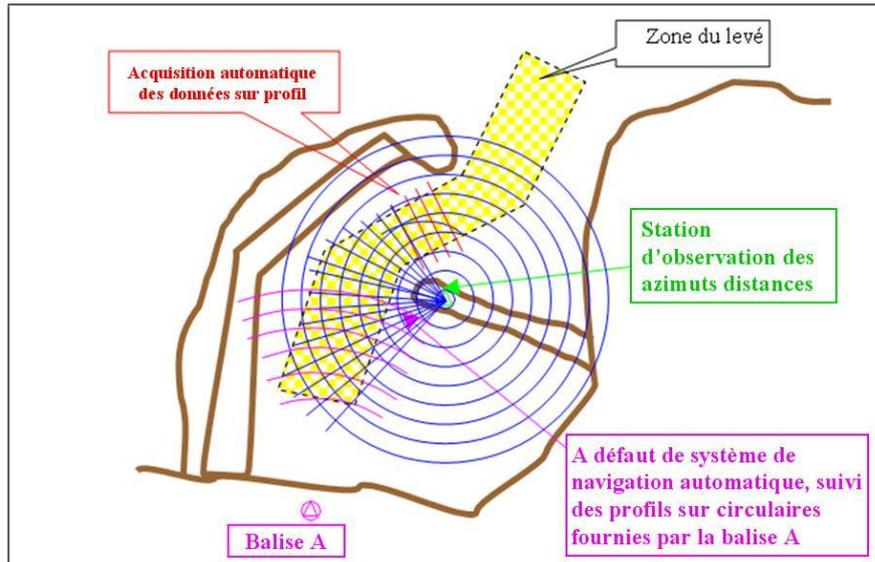


Fig. 7.6 « Positionnement par azimuth/distance »

Procédures et contrôle de qualité

Calage angulaire :

- Le zéro de l'instrument doit être initialement calé sur l'azimut de la visée origine (V_0) ;
- des visées supplémentaires doivent être effectuées comme références secondaires ;
- les points géodésiques de référence choisis pour le V_0 doivent être les plus éloignés et les plus fiables possibles ; les erreurs relatives doivent être résolues sur place ;
- toutes les mesures d'orientation et les calculs de l'azimut en projection doivent être enregistrés sur un cahier d'observation.

Contrôles périodiques du V_0 :

- des contrôles périodiques de la visée origine (V_0) doivent être exécutés au cours des travaux (normalement toutes les 20 ou 30 observations, ou toutes les 5 à 10 minutes, ou à la fin de chaque profil) pour s'assurer que les références horizontales et verticales de l'instrument ne sont pas dérégées ;
- des visées supplémentaires doivent être effectuées, normalement en début et en fin de séance ;
- à la suite de ces vérifications, et si nécessaire, l'instrument doit être recalé et renivelé ;
- les contrôles périodiques et les renouvellements doivent être notés sur le cahier d'observations ;
- si une vérification fait apparaître un fort désalignement, toutes les observations effectuées depuis la dernière vérification correcte doivent être rejetées et les mesures recommencées.

Vérifications au titre de l'assurance qualité :

- comme pour la plupart des méthodes visuelles, les vérifications indépendantes du positionnement sont rarement réalisables ;
- en GPS différentiel avec mesure de phase de la porteuse (RTK), ces vérifications sont réalisables par récepteurs géodésiques en mode statique et avec la précision topographique ;
- pour les levés critiques en matière de sécurité de la navigation, les vérifications de position doivent toujours être faites le plus près possible d'un point géodésique de référence.

4.1.6.6 Systèmes de radiolocalisation

Description générale

De nombreux systèmes de radiolocalisation terrestres ont été développés, dont la plupart sont devenus désuets depuis que le GPS est opérationnel. Cependant, leurs concepts fondamentaux d'exploitation ainsi que ceux du positionnement 3D, GPS compris, ont peu changé. Ces systèmes utilisent les différences de temps et les mesures de distance pour déterminer une position.

Classement des systèmes selon la fréquence

En général les systèmes de radiolocalisation (en anglais EPS) sont classés d'après leurs fréquences d'exploitation ou leurs bandes passantes (voir tableau 2 de l'appendice 3 du présent chapitre), lesquelles déterminent leur couverture et leur précision, et donc leur domaine d'application (tableau 3 de l'appendice 3). En général, plus la fréquence du système est élevée ou la longueur d'onde plus courte, meilleure sera la précision.

Systèmes de radiolocalisation à moyenne fréquence (RAYDIST/DECCA, TORAN) :

- a. ces systèmes qui furent développés dans les années 1950 ne sont plus utilisés ;
- b. ils fonctionnaient par différences de phase déterminant des réseaux circulaires ou hyperboliques (correspondant à des différences du temps) ;
- c. ces systèmes nécessitaient des étalonnages répétés pour lever les ambiguïtés de longueurs d'ondes entières et une réception continue pendant le levé pour éviter les sauts d'hyperboles ou de cycles, analogues au lever d'ambiguïté du DGPS ;
- d. l'étalonnage sur site était essentiel pour maintenir la précision, mais pour les levés très au large, cet étalonnage était impossible* ;
- e. le positionnement optique était utilisé pour l'étalonnage de ces systèmes.

Systèmes de radiolocalisation à basse fréquence (LORAN-C) :

- a. système de radiolocalisation maritime et aérienne de base, utilisé depuis plus de 60 ans ;
- b. système de type hyperbolique à basse fréquence ;
- c. utilisable en navigation générale ou pour les levés de reconnaissance (précision du 3^{ème} ordre pour un système étalonné) ;
- d. étalonnage quotidien sur site indispensable pour maintenir un minimum de précision absolue ;
- e. précision absolue sans étalonnage local de l'ordre de 450 mètres (0,25 mille).

Systèmes de radiolocalisation UHF (systèmes circulaires)

Les systèmes de radiolocalisation UHF (hyperboliques ou circulaires) ont été introduits dans les années 1970 et ont assuré l'essentiel du positionnement en mer jusqu'au milieu des années 90. Leur utilisation a par la suite décliné quand le GPS différentiel est devenu accessible pour les grandes couvertures, mais ils peuvent être encore déployés dans les régions où les signaux GPS sont faibles.

- a. Les systèmes de radiolocalisation UHF utilisent le principe des mesures de distance à partir de deux stations connues ou plus, pour déterminer les coordonnées d'un point par intersection :
 - i. à chaque distance d'une station terrestre est associé un lieu de position circulaire ;
 - ii. deux circulaires se coupent en deux points situés de part et d'autre de la ligne de base formée par les deux stations terrestres ;

* NdT : Les missions hydrographiques françaises mouillaient des bouées de recalage et pratiquaient le « transport de phase » entre navires.

- iii. chaque système utilise sa méthode de levé d'ambiguïté par référence aux coordonnées des points initiaux ou à l'azimut de la ligne de base ;
- iv. à l'origine, les lieux circulaires étaient visualisés et suivis par la vedette de sonde ; les données étaient enregistrées manuellement sur un cahier d'observation ;
- v. les systèmes modernes acquièrent les distances automatiquement et calculent les positions relatives qui sont ensuite transmises à l'indicateur gauche-droite de l'homme de barre ainsi qu'à un traceur de route ;
- vi. aujourd'hui, les systèmes circulaires, tout comme le GPS, transmettent leurs données brutes à un micro-ordinateur muni d'un logiciel d'acquisition et de contrôle temps réel qui enregistre simultanément les positions et les sondes dans des fichiers numériques tout en les visualisant sur les écrans de l'homme de barre et du chef d'équipe.

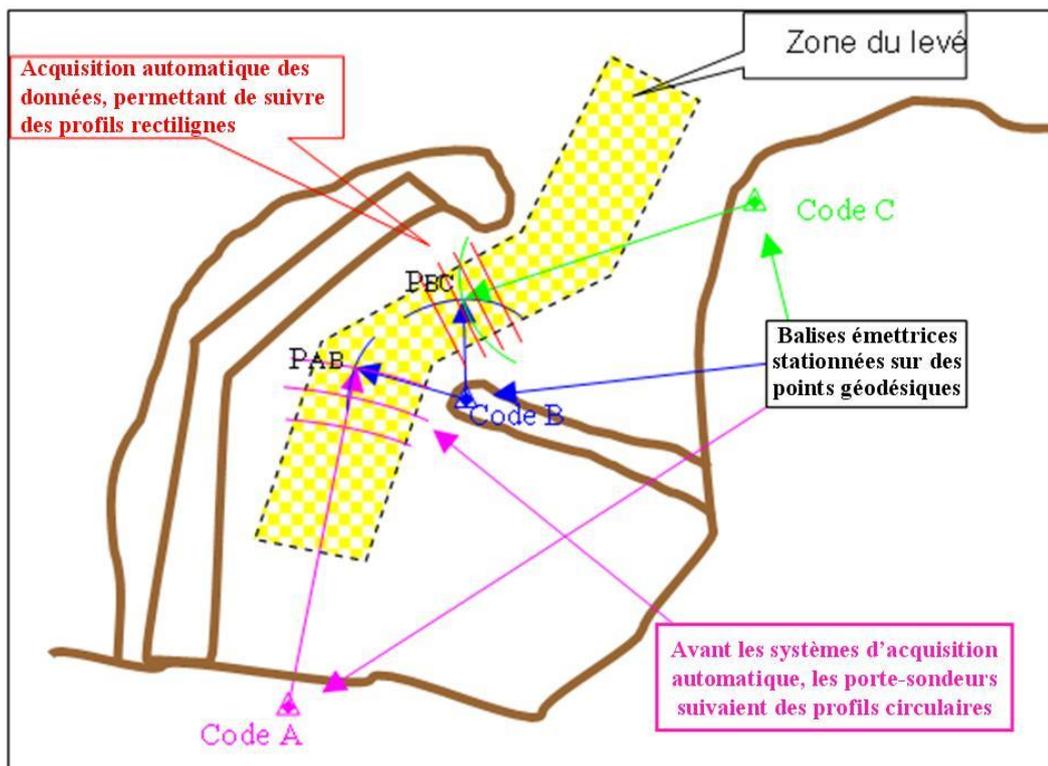


Fig. 7.7 « Positionnement par système circulaire à deux distances »

- b. A défaut de système automatique de positionnement et de guidage, le porte-sondeur suit un profil circulaire dans les conditions suivantes :
 - i. le profil est à distance constante d'une balise de référence ;
 - ii. les positions de la vedette sont calculées par intersection avec l'autre distance ;
 - iii. la vitesse de sonde doit être faible afin d'obtenir une meilleure précision et de faciliter la tâche du barreur qui doit suivre une courbe ;
 - iv. les profils sont circulaires, et non rectilignes dans le système de projection du levé ; ils sont rarement orthogonaux aux isobathes.
- c. Sondage automatisé sur profil rectiligne :
 - i. la position est calculée automatiquement par intersection de distances à des balises dont les coordonnées précises sont connues ;
 - ii. les coordonnées du point sont exprimées sous forme d'écart par rapport au profil ;
 - iii. le pilote automatique analogique/numérique, ou l'indicateur gauche-droite, reçoit ces écarts, qui lui permettent de revenir sur le profil;

- iv. au top, les positions fournies par le récepteur ou le traceur de route sont notées manuellement par l'opérateur sur un cahier d'observations ;
- v. un top de marquage est tracé au même moment sur la bande de sonde et la profondeur est notée dans le cahier d'observations ;
- vi. le rapprochement entre le positionnement et la sonde est réalisé en traitement différé ;
- vii. les sondes numériques et le positionnement temps réel sont corrélés à intervalles réguliers, prédéterminés par le logiciel d'acquisition de données.

Précision des systèmes circulaires

La précision de l'intersection est fonction de deux facteurs :

- a. la précision des mesures de distances (caractérisée par un écart type σ) ;
- b. l'angle d'intersection, qui dépend de la position du navire par rapport à la ligne de base et qui varie dans la zone du levé.

Contrôle de qualité

Les critères principaux du contrôle de qualité des systèmes de radiolocalisation UHF sont :

- a. l'angle d'intersection α , qui exerce un effet majeur sur la détermination de la position et doit être compris entre 45° et 135° ;
- b. le σ , qui varie avec la distance de la station. Il se situe aux environs de ± 3 m et non des ± 1 m ou ± 2 m indiqués par les fabricants dans des conditions d'étalonnage idéales ;
- c. la précision moyenne d'un positionnement avec σ de ± 3 m sera de l'ordre de 5 à 10 mètres.

Mise en œuvre des systèmes circulaires

Les systèmes de radiolocalisation UHF suivants fonctionnent (ou fonctionnaient) par mesure de distances : Racal Micro Fix, Syledis de Sercel, Falcon VI de Motorola, Trident de Thomson-CSF.

La position était déterminée par intersection de trois lieux circulaires ou plus (*CLOPs* en anglais) observées simultanément.

Les circulaires ne se croisent pas exactement au même point parce que chaque distance est affectée par des erreurs instrumentales :

- a. trois distances observées aboutissent à trois jeux de coordonnées différentes ; quatre distances observées en déterminent huit ;
- b. ces coordonnées sont compensées normalement à chaque fin de cycle d'interrogation, permettant d'obtenir une position finale par moindres carrés ou plus simplement, par choix du meilleur angle d'intersection sans pondération des autres distances.

Les données de positionnement sont exprimées dans le système de projection du levé, comme pour un système à deux distances :

- a. l'emploi de plusieurs distances minimise les incertitudes de positionnement du navire, lequel est obtenu par compensation. Une estimation instantanée de la précision est réalisée par analyse du « chapeau » formé par les intersections des circulaires affectées par des erreurs de mesure (voir figure 7.8) ;
- b. une évaluation de la précision des mesures de distances peut être obtenue par calcul automatique des résidus (v_i) en chaque point (le logiciel de compensation par moindres carrés peut fournir une évaluation de l'EMQ à chaque mise à jour de la position) ;

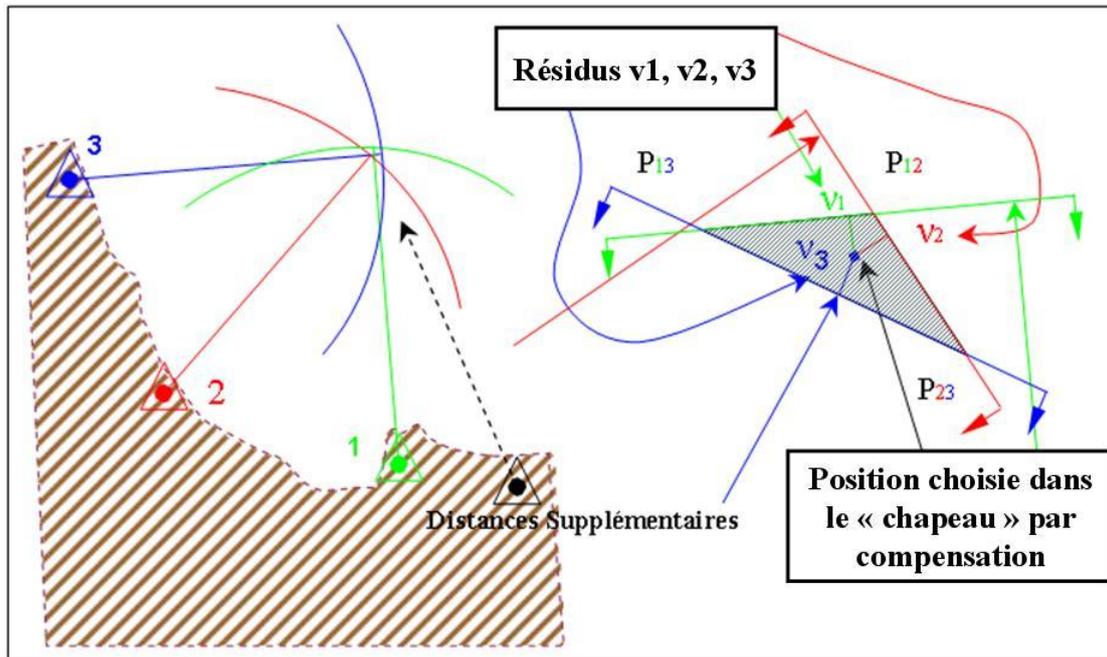


Fig. 7.8 « Intersection de plusieurs lieux circulaires »

- c. dans les systèmes automatisés, une alarme se déclenche normalement quand l'EMQ dépasse une limite fixée, en supposant que l'écart-type est constant dans la zone du levé.

Étalonnage et contrôle de qualité

L'étalonnage des systèmes de radiolocalisation UHF est exécuté de la façon suivante :

- a. détermination indépendante de l'emplacement de l'antenne du navire ;
- b. comparaison des distances mesurées par le système et observées indépendamment ;

ou

- b. comparaison d'une série de distances mesurées par le système circulaire et d'observations indépendantes (étalonnages répétitifs) ;
- c. calcul d'une correction moyenne. Cette correction est intégrée dans la console du système circulaire et dans le logiciel de calcul de la position.

Les systèmes et méthodes utilisés pour exécuter un étalonnage indépendant incluent :

- a. l'étalonnage par distancemètre – une série de lectures au distancemètre est comparée aux distances observées simultanément par le système circulaire. On en déduit les corrections d'étalonnage ;
- b. l'étalonnage par franchissement de la ligne de base – Cette méthode très simple consiste à faire couper la ligne de base par le navire et à comparer la somme des distances aux deux stations à leur valeur théorique. On en déduit la correction d'étalonnage. Cette méthode peut être répétée en plusieurs points de la ligne de base et appliquée à tout couple de stations ;
- c. l'étalonnage par station totale - les coordonnées calculées par le logiciel de positionnement associé au système circulaire sont comparées directement aux coordonnées plus précises obtenues par une station totale ;
- d. l'étalonnage par visées optiques - cette méthode, qui est la plus exacte, consiste à faire exécuter une série de 5 à 10 visées optiques sur le navire en route par trois théodolites opérant simultanément. À chaque séquence de visées, la position du navire est calculée par

triangulation précise et les distances en projection sont alors comparées aux distances observées simultanément par le système circulaire. La moyenne des différences de distances permet d'estimer la précision statistique de l'étalonnage, comme précédemment ;

- e. l'étalonnage par relèvements inverses - celui-ci n'est valable que pour une configuration géométrique favorable, près de la côte et avec un navire très lent. Un certain nombre d'angles (5 à 10) est mesuré par trois cercles hydrographiques situés près de l'antenne afin de minimiser les erreurs d'excentricité ; les distances fournies par le système sont relevées simultanément. Le calcul de la position doit être effectué avec un logiciel capable d'apprécier la qualité de la mesure en se basant sur la configuration géométrique et l'erreur angulaire moyenne, et de valider la correction d'étalonnage si celle-ci est statistiquement justifiée.
- f. Critères généraux de contrôle de qualité pour les systèmes circulaires :
 - i. l'étalonnage au point fixe n'est pas représentatif des conditions dynamiques du levé ;
 - ii. l'étalonnage doit être effectué aussi près que possible de la zone du levé afin d'être représentatif des conditions rencontrées dans la réalité ;
 - iii. la précision du système de contrôle indépendant doit être meilleure ou au moins égale à celle du système circulaire étalonné ;
 - iv. les effets résiduels des trajets multiples peuvent être réduits mais pas éliminés à l'étalonnage, car ils dépendent de la position et de l'orientation de l'antenne de réception du navire hydrographique ;
 - v. l'étalonnage d'un système de radiolocalisation UHF à train d'impulsions n'est valable que dans la gamme de mesure du système utilisé ;
 - vi. l'instrument plus précis utilisé pour étalonner le système circulaire doit, lui aussi, être vérifié indépendamment pour éviter les erreurs (GPS, station totale, théodolites, etc.) ;
 - vii. les procédures d'étalonnage ne doivent pas changer en cours de levé.

Certains critères de base décrits pour l'étalonnage des systèmes circulaires sont également valables pour le GPS.

4.1.6.7 Le GPS (système de positionnement global ou *Global Positioning System*)

Description générale

Le GPS est devenu la référence mondiale en matière de positionnement et de navigation depuis les années 90, date à laquelle il a remplacé presque toutes les autres techniques. Il ne présente que de rares trous de couverture, dans des zones relativement petites pour lesquelles il conviendra de recourir aux méthodes traditionnelles. Les systèmes GPS différentiels ont une couverture mondiale et ne demandent pas le même travail de choix de stations et d'installation que les systèmes traditionnels, cependant des étalonnages avant levé et des validations après levé sont encore nécessaires. La précision du GPS dépasse celles de tous les autres systèmes de positionnement hydrographiques.

Le GPS comporte deux modes de positionnement absolus : le positionnement standard (SPS) et le positionnement précis (PPS) :

- a. le service SPS, accessible aux utilisateurs civils, correspond au code *C/A* (*coarse acquisition*) émis sur la porteuse L1 et fournit des précisions absolues de 10 à 30 mètres ;
- b. le service PPS a été développé pour l'armée américaine et les autres utilisateurs autorisés ; il correspond au code *P(Y)* qui module les porteuses L1 et L2 et fournit une précision de 5 à 15 mètres en mode de positionnement absolu.

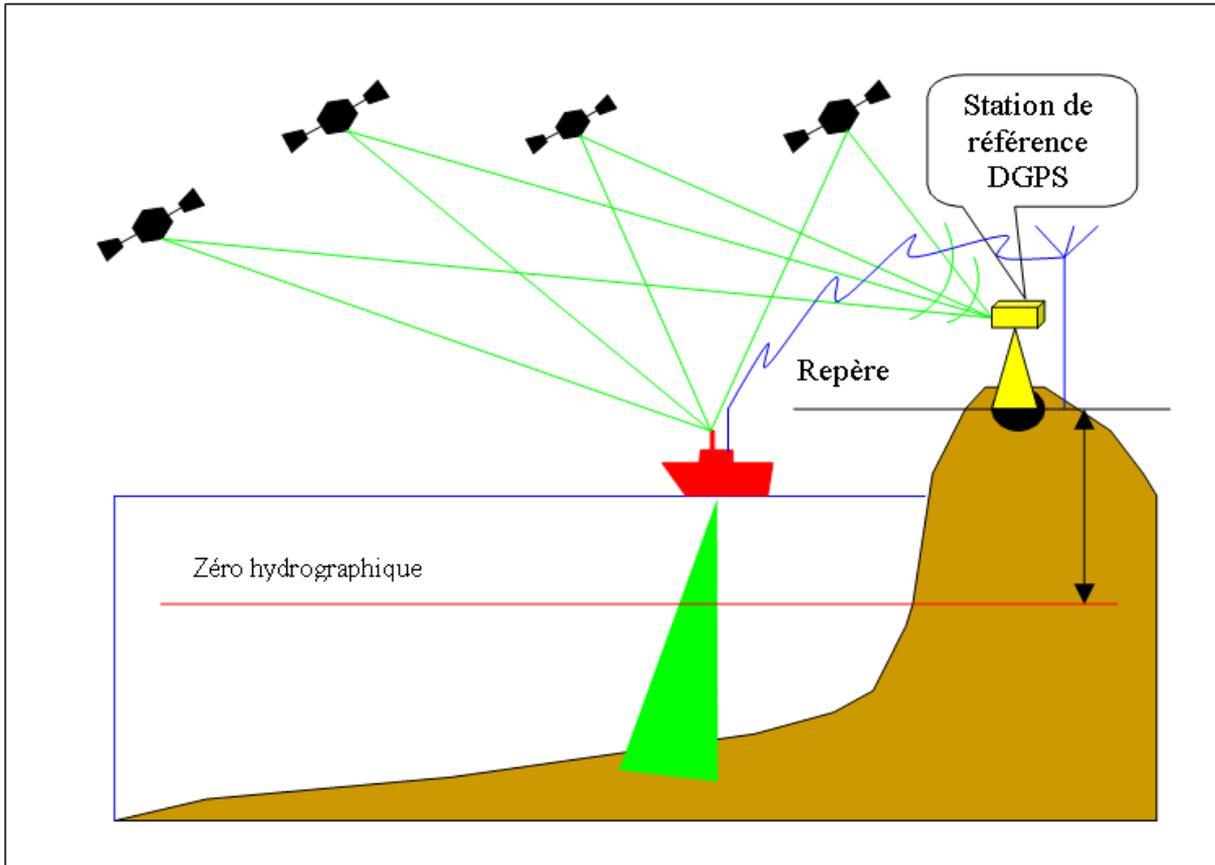


Fig. 7.9 « Positionnement d'un navire hydrographique par GPS différentiel »

Pour beaucoup d'applications, ce positionnement absolu ne fournit pas une précision suffisante. Le GPS différentiel (DGPS) est une technique qui peut fournir une position relative à quelques mètres près, en mesurant la phase modulée par le code avec une précision de quelques millimètres. Le DGPS nécessite deux récepteurs ou plus pour enregistrer simultanément les mesures et un logiciel de traitement pour réduire ou éliminer les erreurs communes. Avec un récepteur de référence stationné sur un point géodésique, les données DGPS peuvent être utilisées pour déterminer des lignes de base entre stations et calculer les coordonnées des autres récepteurs dans le même système de référence. Un GPS différentiel capable de mesurer le code et la porteuse peut positionner en temps réel des mobiles tels que dragues, navires hydrographiques et vedettes de sonde (voir figure 7.9), avec la précision requise pour les levés hydrographiques et/ou le dragage.

Techniques de poursuite (voir chapitre 2, § 6.1.4.1)

Les techniques de poursuite de phase concernent :

- a. l'onde porteuse ;
- b. le code utilisé pour la modulation.

Précisions

Les précisions des mesures absolues de distance ou l'écart-type réalisable avec le GPS dépendent :

- a. du type de code utilisé (C/A ou P) ;
- b. de l'ellipsoïde tridimensionnel de confiance décrivant les incertitudes des trois coordonnées géocentriques associées au GDOP (*Geometric Dilution of Precision*) des satellites pendant la détermination de la position ;

- c. de la mesure du temps et des changements de configuration géométrique des satellites.

Les statistiques de précision nominale pour un utilisateur GPS sont définies par les techniques de propagation d'erreurs. Les précisions de mesures de distance font référence à des coordonnées géocentriques, qui peuvent être exprimées dans un système local, et à la matrice de covariance 3-D définissant et répartissant les caractéristiques (direction ou coordonnées) de l'ellipse d'erreur dans le même système de référence.

Les méthodes en usage pour décrire les erreurs de mesure sont listées ci-dessous :

- a. les précisions horizontales du GPS 2-D sont normalement estimées en utilisant la moyenne quadratique (EMQ) de l'erreur radiale statistique ;
- b. les précisions du GPS 3-D sont exprimées généralement sous forme d'une erreur sphérique probable ou ESP. Cette erreur correspond au rayon d'une sphère de niveau de confiance ou de probabilité de 50%, qui n'est qu'une approximation de l'ellipsoïde 3-D représentant les incertitudes réelles des coordonnées dans le système géocentrique ;
- c. en positionnement horizontal 2-D, on utilise l'erreur circulaire probable ou ECP comme mesure de l'erreur statistique. L'ECP correspond au rayon d'un cercle de niveau de confiance ou de probabilité de 50%.

Comparaisons de précisions

Il est important que les précisions des mesures GPS identifient clairement les statistiques dont elles sont issues. Une précision statistique de « 20 mètres » ou « 5 mètres » n'a de sens que si elle est exprimée en 1-D, 2-D ou 3-D et associée à un niveau de probabilité. De plus, les précisions absolues du GPS sont rapportées à un système de coordonnées géocentriques qui diffère sensiblement des caractéristiques locales. Les précisions nominales du GPS peuvent être aussi considérées comme des tolérances indicatives dont les précisions réelles diffèrent parfois largement.

Précision des mesures relatives

Les levés hydrographiques conformes à la norme S-44 de l'OHI visent une précision de positionnement à 95% de confiance dans un système mondial (ϕ , λ , h), tandis que les travaux de génie côtier et de dragage sont exprimés dans un système local (X, Y, h) et recherchent une grande précision relative. Cette dernière est habituellement exprimée en parties par million (ppm) d'une distance mesurée entre deux points, ou récepteurs, et caractérisée par un écart type de 1σ , soit une probabilité de 68%.

Dilution de la précision (DOP)

Les erreurs GPS résultant de la configuration géométrique des satellites peuvent être exprimées en termes de dilution de précision (DOP), qui caractérise la configuration géométrique des satellites observés. En termes mathématiques, le DOP est un scalaire utilisé pour exprimer un ratio de précision du positionnement (ou l'écart-type d'une mesure de coordonnées). Le DOP représente la contribution géométrique d'un certain facteur scalaire à l'incertitude (c-à-d. l'écart-type) d'une mesure GPS. En positionnement 2-D, il se réfère au facteur HDOP.

Système de référence

En général, les levés s'intéressent aux différences relatives de coordonnées, mais, en positionnement absolu et pour les besoins de la navigation, ces valeurs doivent être exprimées dans le système de référence global utilisé par le GPS NAVSTAR. Donc, toutes les différences de coordonnées mesurées dans un système local doivent être transformées en coordonnées GPS dans le système WGS 84 (*World Geodetic System 84*). En Amérique du nord, le WGS 84 est compatible avec le NAD83 (*North American Datum 1983*) tandis que l'ETRF89 (*European Terrestrial Reference Frame 1989*)

est une réalisation du WGS 84 pour l'Europe. Chaque pays européen a défini le rattachement de sa propre référence locale à l'ETRF89.

Sources d'erreurs (voir chapitre 2, § 6.1.3) et étalonnage

La précision du GPS dépend des erreurs et des interférences affectant le signal et du traitement utilisé pour les réduire et les supprimer. Comme pour les systèmes circulaires, les signaux GPS sont sensibles à l'humidité et aux trajets multiples, et des erreurs supplémentaires sont causées par le trajet de 20 000 km à travers les couches de l'ionosphère et de la troposphère. On doit se souvenir que les signaux du satellite peuvent être brouillés pour raison de sécurité par les Américains au moyen du dispositif *Anti Spoofing* (SAASM). Le GPS différentiel permet d'éliminer la plupart des erreurs, toutefois, plus le mobile sera éloigné de la station de référence, plus les erreurs seront différentes.

Contrairement aux systèmes circulaires ou à azimuth/distance, le DGPS ne dispose pas de check-list d'étalonnage ; les principales erreurs à éviter sont :

- a. un *datum* ou un système géodésique du levé erroné ;
- b. des coordonnées incorrectes de la station de référence ;
- c. une mesure inexacte des hauteurs d'antenne ;
- d. la non sélection du mode DGPS sur le récepteur ;
- e. la non sélection du format d'entrée/ sortie RTCM-104.

Méthodes de positionnement

Les deux modes opératoires du GPS utilisés en positionnement horizontal dynamique ont de nombreuses applications hydrographiques pour les levés en mer ; ce sont :

- a. le positionnement absolu ;
- b. le positionnement relatif (GPS différentiel ou DGPS).

Le positionnement absolu ne nécessite qu'un récepteur passif et n'est pas suffisamment précis pour la géodésie ou les levés hydrographiques ; c'est néanmoins le plus utilisé sous sa forme militaire (PPS) ou civile (SPS). Le positionnement relatif (différentiel) qui nécessite au moins deux récepteurs fournit en revanche les précisions requises pour la topographie et le positionnement à la mer.

Le positionnement absolu (pseudo-distances)

Le récepteur GPS offre une solution pour la navigation en mesurant des distances approximatives (pseudo-distances) entre l'antenne et le satellite par comparaison d'un code émis par le satellite et d'une référence créée par le récepteur. Aucune correction n'est faite pour les erreurs de synchronisation entre les horloges de l'émetteur et du récepteur. La distance parcourue par le signal est égale à la vitesse de transmission multipliée par le temps écoulé, les délais supplémentaires (erreurs) affectant la précision de la position étant causés par les conditions troposphériques et ionosphériques. Pour calculer une position 3-D, quatre pseudo-distances au moins sont nécessaires pour éliminer le décalage constant de temps (t) entre les horloges du satellite et du récepteur GPS.

La solution de quatre équations d'observation à quatre inconnus (X, Y, Z, t) est la position 3-D (trois pseudo-distances sont suffisantes pour une position 2-D). Ces solutions sont très dépendantes de la précision des facteurs suivants:

- a. coordonnées de chaque satellite (X_s, Y_s et Z_s) ;
- b. modélisation du délai de transmission atmosphérique (d) ;
- c. qualité de la mesure du temps réel exécutée par le récepteur GPS (synchronisation d'horloge, traitement du signal, rapport signal sur bruit, etc.);
- d. mesure des distances et géométrie des satellites (DOP).

La dilution de précision (DOP) est la contribution géométrique à l'incertitude de la position GPS. Elle dépend, en gros, de l'orientation physique des satellites par rapport au récepteur terrestre et de la précision des mesures de distance.

Solution statique - comme pour tout type de mesures, les observations répétées de distances, sous des incidences satellitaires variables, améliorent la précision et la fiabilité du positionnement. Au point fixe, les distances peuvent être mesurées de façon continue sur des orbites satellitaires variables. Les changements d'orbites créent des géométries d'intersection différentes pour une même position. De plus, des observations simultanées de distance sur plusieurs satellites peuvent être pondérées en fonction de la qualité des intersections et de la fiabilité des pseudo-distances.

Solution dynamique - en mode dynamique, avec une antenne GPS qui se déplace avec le mobile, les mesures de distance sont ponctuelles en raison du déplacement des satellites sur leurs orbites. Ces déplacements et la vitesse du navire créent une géométrie d'intersection à chaque fois différente.

Le système satellite GPS NAVSTAR possède deux niveaux de précision de positionnement absolu :

- a. Le positionnement standard (SPS) - En mode standard, la position absolue 3-D temps réel est de l'ordre de 10 à 30 m (95% de fiabilité en précision horizontale). Le département US de la défense (DOD) a implanté le dispositif *anti-spoofing* (AS) qui change le code P en un code Y classifié, empêchant l'utilisateur de bénéficier de la haute précision du code P.
- b. Le positionnement précis (PPS) - Certains utilisateurs civils, dont les ingénieurs de l'USACE, sont autorisés par l'agence nationale de sécurité (NSA) à disposer d'un système capable de décrypter les signaux GPS codés, moyennant diverses contraintes de sécurité. Les utilisateurs du PPS peuvent obtenir une précision, en position absolue 3-D temps réel, de l'ordre de 16 m SEP (ou 5 à 15 m en précision horizontale avec un niveau de fiabilité de 95%).

Les actions du DOD en matière de sécurité n'impactent pas significativement l'hydrographe qui travaille en mode différentiel.

Le positionnement absolu temps réel (SPS/PPS) ne satisfait pas aux normes de précision de l'ordre spécial ou du 1^{er} ordre de la S-44 de l'OHI. Il répond aux besoins de la navigation générale et est destiné à remplacer le LORAN-C et les autres systèmes de navigation maritime et aérienne.

Positionnement GPS différentiel (DGPS)

Le mode différentiel est utilisé pour positionner un point par rapport à un autre quand deux stations de réception observent simultanément les mêmes satellites. Les erreurs de position du satellite (X_s , Y_s et S_s) et les délais atmosphériques estimés (d) étant les mêmes en ces deux stations, ils peuvent être éliminés en grande partie. Cette méthode procède par mesures de code ou de porteuse de phase et peut fournir des résultats en temps réel ou en traitement différé.

- a. DGPS avec mesures de code. La méthode consiste à comparer deux récepteurs GPS dont l'un est installé sur un point géodésique et l'autre est installé sur un mobile ou à bord d'un navire hydrographique. Les deux récepteurs mesurent simultanément des pseudo-distances à quatre satellites communs au moins. Les positions des satellites étant connues et l'un des récepteurs étant sur un point fixe connu, une « distance connue » peut être calculée pour chaque satellite observé et comparée à la « pseudo-distance mesurée » afin d'obtenir une correction valable pour chaque satellite et applicable aux distances mesurées par le récepteur mobile. Les premiers bénéficiaires des mesures de code sont les systèmes de positionnement temps réel de précision métrique, qui sont compatibles avec les normes de la S-44 pour les levés hydrographiques du 1^{er} ordre et conviennent à la majorité des besoins.
- b. DGPS avec mesures de phase. C'est la technique GPS la plus précise pour un levé. Sa précision relative est de l'ordre de deux à cinq ppm entre deux récepteurs GPS installés, l'un sur un point connu et l'autre sur un mobile. La méthode de poursuite est semblable, quoique

plus complexe, à celle des pseudo-distances décrite précédemment. La longueur d'onde (19 cm seulement) nécessite d'ajouter un lever d'ambiguïté aux équations d'observation pour tenir compte du nombre inconnu de cycles entiers parcourus par la porteuse des pseudo-distances. La mesure de phase permet d'obtenir une meilleure résolution en raison de la courte longueur d'onde et de la capacité des récepteurs à discriminer les phases jusqu'à 2 mm approximativement. Cette méthode de positionnement cinématique est connue sous le nom de «*Real Time Kinematic*» ou RTK et permet d'atteindre une précision de quelques cm à 20 km environ de la référence. Elle satisfait aux normes de l'ordre spécial de la S-44 pour les levés hydrographiques et peut être utilisée avec des récepteurs statiques ou cinématiques.

- c. Avantage des mesures de code (DGPS) sur les mesures de phase (RTK) :
 - i. les longueurs d'onde étant beaucoup plus longues, il n'y a pas de levé d'ambiguïté.
- d. Inconvénients des mesures de code (DGPS) sur les mesures de phase (RTK) :
 - i. les plus grandes longueurs d'onde diminuent la précision du système,
 - ii. ...qui est davantage affecté par les trajets multiples.

Positionnement DGPS dynamique temps réel (avec mesure de phase)

En général le système inclut :

- a. une station de référence (station maître) ;
- b. des liaisons de télécommunications ;
- c. une station mobile (utilisateur à distance).

Plusieurs services DGPS fournissent des corrections de pseudo-distance en temps réel :

- a. les services de radionavigation maritime (Système IALA/AISM) ;
- b. des services d'abonnement satellital commerciaux ;
- c. des services commerciaux DGPS terrestres (liaisons téléphoniques ou par téléphone GSM) ;
- d. des systèmes locaux DGPS.

Les systèmes locaux DGPS sont normalement installés ou utilisés par le service responsable du levé, quand la couverture existante n'a pas la précision requise pour les travaux.

La station de référence

La station de référence comprend un récepteur GPS, une antenne, et un processeur.

- a. Le récepteur est stationné sur un point de coordonnées connues, disposant d'une vue dégagée sur le ciel à partir de 10° au moins au-dessus de l'horizon ;
- b. son antenne est éloignée de tout ce qui favorise les trajets multiples ou les interférences (éviter les antennes, les pylônes, les lignes à haute tension, et les surfaces réfléchissantes) ;
- c. il reçoit les informations de distances et de temps émises par les satellites ;
- d. il calcule et formate toutes les 1 à 3 secondes les corrections de pseudo-distances (PRC) qu'il retransmet par la liaison terre-navire au bâtiment à la mer. Le format des données est la version 2.0 recommandée par la commission spéciale 104 de la RTCM ;
- e. il exécute un contrôle de qualité et valide les corrections de pseudo-distances.

Les liaisons de télécommunications

- a. Les liaisons sont utilisées pour transmettre les corrections différentielles. Leur type dépend du besoin des utilisateurs et leur débit minimal doit être de 200 bps (bits par seconde).
- b. Les liaisons VHF, UHF et HF conviennent à l'émission des corrections DGPS, avec des portées allant de 20 à 50 km (VHF/UHF) jusqu'à 200 km (HF), selon les conditions de

propagation et la hauteur du site. L'inconvénient des liaisons UHF et VHF est qu'elles ont une portée optique et que leur signal peut être masqué par les îles, les structures et les bâtiments, qu'elles sont sujettes aux trajets multiples et enfin, qu'elles sont soumises à autorisation.

- c. Les liaisons ne peuvent opérer que dans les fréquences autorisées afin d'éviter les interférences avec les autres émissions. La gestion des fréquences est assurée par le pays responsable de la région géographique.
- d. De nombreuses compagnies privées proposent des abonnements pour les communications par satellite, téléphone ou téléphone mobile, capables de transmettre les corrections PRC.
- e. Les systèmes satellitaires et de communications téléphoniques sont moins limités par la distance que les systèmes UHF/VHF, mais ils sont généralement plus coûteux.

La station mobile

La position d'un navire hydrographique relativement à la station de référence est calculée par pseudo-distances au moyen d'un récepteur DGPS qui mesure la phase du code en temps réel. Cet équipement d'utilisateur, muni d'une antenne et d'un processeur :

- a. est un récepteur GPS multicanaux utilisant le code C/A à une seule fréquence (L1) ;
- b. doit être capable de recevoir des corrections différentielles au format RTCM SC 104 version 2.0 et d'appliquer ces corrections aux pseudo-distances observées ;
- c. doit supporter une fréquence de mise à jour de 1 à 3 secondes ;
- d. doit disposer d'une sortie au format NMEA-183, qui est celui des logiciels les plus utilisés en hydrographie ;
- e. doit maintenir sa capacité de positionnement pour des vitesses atteignant 10 nœuds ;
- f. ne doit pas dégrader le positionnement pendant les virages, par suite d'un filtrage excessif.

Distance séparant la station mobile de la station de référence

- a. les corrections troposphériques et ionosphériques différentielles ne sont pas prises en compte par la plupart des récepteurs GPS. Leurs erreurs s'ajoutent aux erreurs de positionnement horizontales, à raison de 0,7 m en moyenne pour chaque 100 km ;
- b. le type de liaison de données est un facteur limitatif pour la distance séparant la station mobile de la station de référence ; il peut être nécessaire de déplacer la station de référence d'un point à un autre afin de maintenir la distance minimale de séparation requise.

Géométrie des satellites

Le coefficient HDOP d'affaiblissement de la précision horizontale est un facteur critique.

- a. Dans les levés d'ordre 1 et 2, HDOP est < 5 ;
- b. la constellation du Bloc II des 24 satellites GPS maintient la plupart du temps un HDOP approximativement de 2 ou 3.

Autres services DGPS (Services d'aide à la navigation par radiophares et WAAS Commercial)

Services de navigation par radiophares

La fonction principale des Services de navigation par radiophares est de fournir des aides à la navigation dans les eaux navigables couvertes par le service. Ils visent à remplacer le Loran-C et l'Oméga, qui étaient les systèmes de navigation de base par une couverture GPS totale, afin d'obtenir un positionnement plus précis. Plusieurs pays ont commandé des systèmes de positionnement temps réel pour leurs régions côtières, leurs rivières et leurs lacs, en utilisant le DGPS et la technologie des radiophares maritimes ; les autres pays ont l'intention d'étendre la couverture à toutes les voies navigables et finalement d'assurer une couverture mondiale.

- a. Installation et configuration du système :
- i. Radiophares GPS :
 - 2 récepteurs GPS L1/L2 pour station géodésique de référence, avec antennes indépendantes redondantes, et radiophare maritime avec antenne de transmission ;
 - 2 récepteurs combinés GPS-L1 avec modulation MSK, utilisés pour le contrôle d'intégrité ; chacun utilise une antenne GPS indépendante et une antenne boucle passive MSK de champ proche.
- b. Configuration des sites :
- i. Les antennes de la station GPS de référence sont implantées sur des points géodésiques connus, basés sur le système de référence ITRF, à savoir ETRS 89 pour l'Europe et NAD 83 pour les États-Unis et le Canada.
 - ii. Les corrections de pseudo-distances du GPS, code C/A, sont calculées et transmises par un radiophare maritime.
 - iii. Le système embarqué consiste en un récepteur pour radiophare et un récepteur GPS (ou un récepteur radiophare avec GPS intégré) capable de recevoir et d'appliquer des corrections de pseudo-distances. Les précisions seront de moins de 5 m selon le type et la qualité du récepteur, la distance à la station de référence et la géométrie des satellites.
- c. Transmission des données (types de données) :
- i. les corrections et autres informations sont transmises au format RTCM SC-104 version 2.1 ;
 - ii. les types de message radiodiffusés sont détaillés dans les notices des Service d'aide à la navigation par radiophare de chaque pays ;
 - iii. les corrections sont calculées pour un maximum de neuf satellites visibles de la station GPS de référence pour des angles de site $> 7,5^\circ$. S'il y a plus de neuf satellites, ceux dont la hauteur au-dessus de l'horizon est la plus grande sont retenus ;
 - iv. les satellites dont l'angle de site est $< 7,5^\circ$ sont masqués en raison de leur propension aux trajets multiples et à la décorrélation-spatiale ;
 - v. les corrections sont transmises normalement à un débit de 100 ou 200 bauds ;
 - vi. les corrections sont valides jusqu'à 15 secondes après leur génération ;
 - vii. l'utilisation de corrections de plus de 30 secondes, en particulier pour le positionnement d'un mobile, peut causer des pics.
- d. Disponibilité et fiabilité du système :
- i. le système maintient une disponibilité d'émission de plus de 99,7% dans les régions couvertes, à condition de disposer d'une constellation GPS robuste et complète ;
 - ii. dans la plupart des régions, la fiabilité du signal sera plus grande en raison du recouvrement entre stations d'émission ;
 - iii. chaque site dispose de deux contrôleurs d'intégrité (c.-à-d. deux récepteurs GPS avec modulation MSK) stationnés sur des points connus et qui calculent leur propre position à partir des corrections de pseudo-distances. Les positions calculées sont comparées aux points connus afin de déterminer si les corrections sont dans la tolérance prévue ;
 - iv. les positions calculées par les contrôleurs d'intégrité sont transmises par téléphone aux stations de contrôle qui avertissent les utilisateurs, par message de type 16, de tout dysfonctionnement du radiophare dans les 10 secondes suivant l'anomalie.
- e. Zone couverte :
- i. une carte à jour de la zone couverte peut être trouvée sous la rubrique DGPS du site web du Service de navigation de chaque pays participant.

f. Besoins et équipement de l'utilisateur

- i. pour recevoir et appliquer les corrections de pseudo-distances de la station de référence, l'utilisateur doit disposer au minimum d'un récepteur radiophare MSK avec antenne associé à un récepteur GPS L1 code C/A avec antenne, ou en version moins économique, d'un récepteur radiophare avec GPS intégré et antenne MSK/GPS combinée.

Le récepteur MSK sélectionne, en général automatiquement, la station de référence ayant le plus fort signal qu'il démodule, ou il permet à l'utilisateur de sélectionner une station de référence spécifique. Comme la station GPS de référence ne produit de corrections que pour les satellites d'angle de site $> 7,5^\circ$, les satellites observés par l'utilisateur au-dessous de $7,5^\circ$ ne seront pas corrigés.

g. Contrôle de qualité des positions et étalonnages :

- i. la plupart des systèmes DGPS précis sont capables de fournir des précisions sub-métriques à des distances raisonnables de la station de référence la plus proche. Cependant, quand la distance augmente, les erreurs de décorrélation spatiale (dues aux conditions ionosphériques et troposphériques) peuvent induire des biais systématiques ;
- ii. en général, par conditions atmosphériques nominales, une précision de position de σ inférieur à 5 m (95%) peut être obtenue à des distances de plus de 200 milles ;
- iii. pour confirmer que la précision est meilleure que la tolérance de 5 m, un contrôle statique de position sera réalisé en occupant un point connu, près de la zone du levé ;
- iv. quand on travaille avec un Service de navigation, des contrôles statiques de position doivent être effectués avec les différents radiophares de référence afin de vérifier les biais de positionnement, sachant qu'en pratique, le radiophare le plus proche est le moins biaisé ;
- v. quand des biais significatifs ou des ambiguïtés sont observés dans la zone du levé, il peut être nécessaire d'établir un réseau DGPS local (par mesure de code ou de phase RTK) afin de procéder à des comparaisons statiques des différents balises ;
- vi. la même procédure s'applique aux systèmes DGPS commerciaux (WAAS, GLONASS, EGNOS, GALILEO, MSAS etc.).

Cinématique temps réel RTK (mesure de phase des ondes porteuses)

Généralités

Le DGPS à mesure de phase est capable de fournir une précision décimétrique horizontale et verticale à un navire en route dans une zone géographique de 20 km. Cette méthode de positionnement « à la volée » (*On The Fly* en anglais), peut fournir des altitudes du navire hydrographique en temps réel.

Les techniques cinématiques actuelles résolvent les ambiguïtés d'un récepteur mobile et offrent des précisions de 2 à 5 centimètres. Cette méthode de positionnement par mesure de phase des ondes porteuses est connue sous le nom de cinématique temps réel ou levé RTK (*Real Time Kinematic*).

Le système de positionnement RTK est basé sur la même technologie DGPS de mesure de phase que pour les levés géodésiques en GPS statique où une précision de niveau millimétrique était obtenue. La procédure RTK autorise les déplacements du récepteur GPS, après levé de l'ambiguïté initiale du nombre de cycles entre les satellites et le récepteur, tel qu'indiqué au chapitre 2.

Des altitudes ellipsoïdales précises (et les profondeurs rapportées à l'antenne GPS) peuvent être mesurées directement en temps réel sans avoir à observer la marée, avec des capteurs d'attitude et une modélisation de la marée appropriés (figure 7.10).

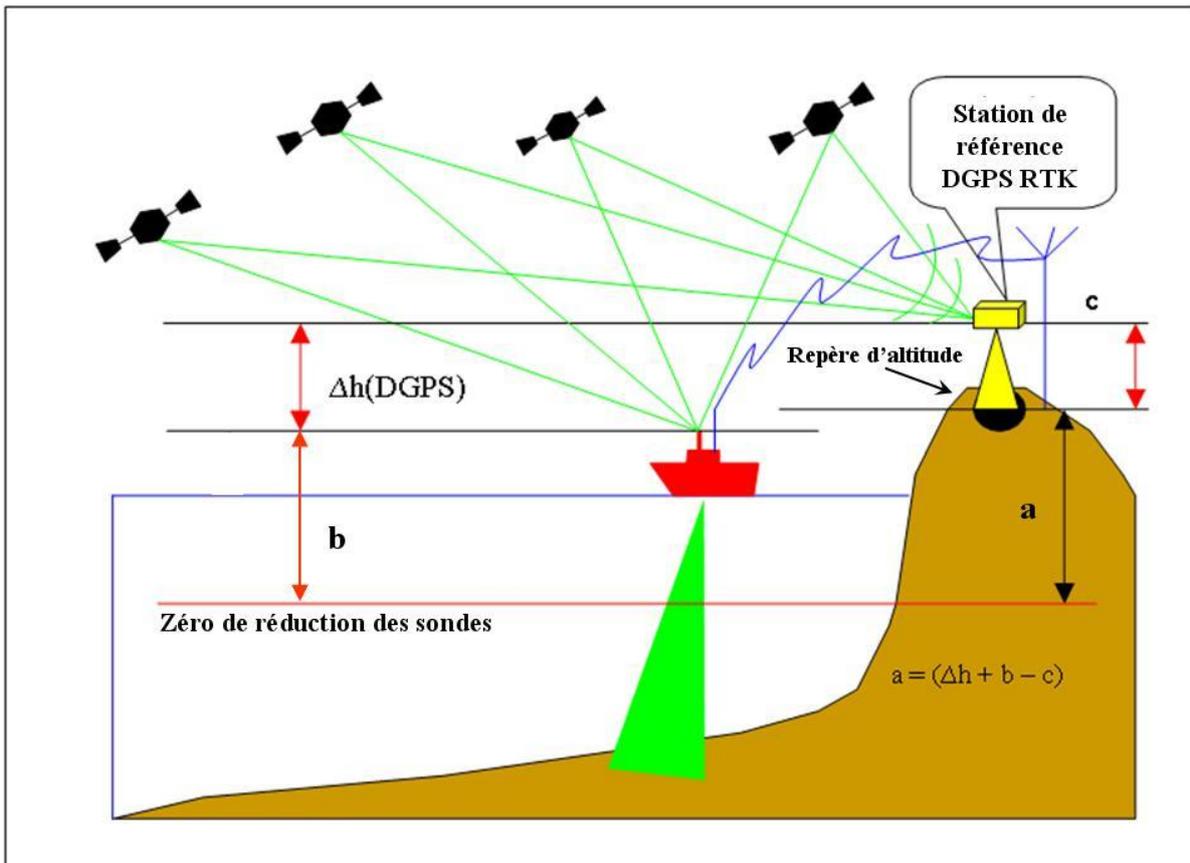


Fig. 7.10 « Mesures d'altitudes ellipsoïdales en mode RTK »

Si les altitudes sont mesurées par DGPS/RTK, les modélisations de la relation géoïde-ellipsoïde et de la marée doivent être réalisées impérativement avant d'entreprendre le levé en mode RTK.

Station de référence

Le système de positionnement par mesure de phase de la porteuse est semblable à celui par mesure de code. Le récepteur de référence, stationné sur un repère de coordonnées horizontales et verticales connues dans le système géodésique local, doit observer les pseudo-distances ainsi que les données de la porteuse de phase des satellites GPS ; ses équipements et ses caractéristiques comprennent :

- un récepteur bi-fréquence L1/L2 à porteuse modulée, utilisant la technique de cross-corrélation pendant la séquence de poursuite du code-P crypté ;
- un récepteur GPS mobile avec son antenne, ses câbles et son processeur rapide et une liaison radio supportant une fréquence de mise à jour d'au moins une seconde ;
- la mise en station est la même que pour le DGPS à mesure de code ;
- le processeur calcule les pseudo-distances et les corrections de phase de la porteuse. Il transmet les données au récepteur mobile par la liaison radio ;
- les corrections sont codées au format RTCM SC 104 version 2.1 (CMR).

Liaison radio

- le DGPS par mesure de phase nécessite une vitesse minimale de transmission de données de 4 800 bauds, qui diffère de celle du système à mesure de code qui n'est que de 300 bauds ;
- cette cadence élevée limite la couverture des systèmes de radiodiffusion à haute fréquence ;
- en revanche, les fréquences VHF et UHF sont bien adaptés à cette vitesse de transmission.

Équipement de l'utilisateur

La composition et les caractéristiques des équipements embarqués sont les suivantes :

- a. un récepteur bi-fréquence L1/L2 à porteuse modulée, équipé d'un processeur de levé de doute sur le nombre entier de longueurs d'ondes pendant que le navire fait route ;
- b. une antenne géodésique, qui réduit les effets des trajets multiples du signal GPS ;
- c. une liaison radio, pour recevoir les données de la station de référence;
- d. la fréquence de mise à jour par la station de référence doit être d'une seconde au moins ;
- e. les performances du DGPS avec mesure de phase (NMEA 183*) doivent permettre de naviguer en temps réel et d'enregistrer la position vraie du navire pour les besoins du levé.

Le mode RTK n'est pas conçu pour les levés situés au-delà de 20 km de la station de référence.

Lever de doute sur le nombre entier de longueurs d'ondes

- a. En mode RTK, un positionnement 3-D temps réel avec précision sub-décimétrique doit pouvoir être réalisé par le récepteur mobile ;
- b. la station de référence et les récepteurs mobiles doivent maintenir une liaison ininterrompue sur quatre satellites au moins (données GPS continues) ;
- c. si le nombre de satellites tombe en dessous de quatre, le lever de doute ne sera réactivé que quand le système aura rétabli une liaison continue sur un nombre suffisant de satellites ; le système fonctionnera en mode DGPS ou en mode autonome pendant l'interruption.

4.2 Mesures d'altitude (contrôle vertical) et étalonnage

4.2.1 Description générale

La connaissance du niveau de réduction des sondes est fondamentale pour tout levé bathymétrique. Il sera décrit dans les IT avec des détails sur les repères de nivellement. A défaut, il conviendra d'utiliser le zéro de la carte marine existante.

La décision d'établir un nouveau système de référence, ou de transférer un système de référence historique, doit être prise avec prudence. Toute référence nouvelle ou transférée doit être rapportée au système géodésique du levé et rattachée aux repères existants, ou nouvellement établis. Toutes les informations afférentes doivent être renseignées et soumises à l'établissement hydrographique de soutien. Une attention particulière doit être apportée aux levés fluviaux ou d'estuaires ; on pourra consulter à ce sujet le volume « *The Admiralty Tidal Handbook Volume 2* »*.

Les observatoires de marée sont implantés conformément aux prescriptions des IT. S'il s'agit d'un levé de réfection, ils doivent, si possible, réoccuper les anciennes positions et s'il y a plusieurs observatoires, ceux-ci ne doivent pas, dans tous les cas, être espacés de plus de 10 miles.

La manière d'accéder aux données utilisées pour créer les cartes cotidales est précisée dans les IT. Les cartes cotidales et d'isomarnage sont construites selon les procédures décrites au chapitre 5.

Les échelles de marées et les marégraphes pré-étalonnés doivent être installés aux emplacements choisis. Les échelles de marée seront rattachées au zéro des sondes par nivellement et un marquage sera réalisé pour les contrôles rapides ultérieurs. S'il n'y a pas déjà des repères de nivellement, 2 nouveaux repères au moins seront implantés, dont les détails seront notés dans la fiche de marée.

* NdT : Spécification pour la communication entre équipements embarqués, utilisée par le GPS.

* NdT : La France utilise les normes du SHOM (<http://www.shom.fr/>), et notamment la NR 2010-016 : Mesure des hauteurs d'eau

Une comparaison du marégraphe et des lectures à l'échelle de marée sera effectuée pendant une période de 25 heures pour caler le marégraphe sur le zéro des sondes et assurer son bon fonctionnement. Par la suite des contrôles réguliers seront effectués pendant le levé.

Un calcul de niveau moyen, basé sur 39 heures d'observations, sera effectué en début et fin de levé. En raison de l'influence des facteurs météorologiques quotidiens, un résultat situé à $\pm 0,3$ m du niveau moyen de l'annuaire des marées suffira pour confirmer la fiabilité de l'observatoire.

Quand un marégraphe permanent est utilisé, on vérifiera toujours par procédé indépendant que son calage correspond bien aux valeurs énoncées.

Les données marégraphiques doivent être contrôlées chaque jour pour s'assurer qu'elles satisfont aux normes des IT. Des observations continues doivent être réalisées, si possible pendant toute la durée du levé ; si ce n'est pas le cas, on s'assurera tout particulièrement en début et fin de travaux, au moyen des différences de temps des cartes cotidiales, que la période de sonde a bien été couverte.

4.2.2 Modélisation de la marée pour les levés en mode RTK

Conformément aux spécifications des IT, un zéro hydrographique (ou zéro des cartes), calé sur le niveau de la basse mer astronomique extrême (LAT) et éventuellement actualisé, sera défini dans la zone. Les sondes du levé lui seront rapportées, sans utilisation des marégraphes, grâce au mode RTK.

Les principales spécifications de cette méthode sont énoncées ci-après :

- a. des contrôles statiques à couverture étendue doivent être effectués dans la zone sélectionnée ;
- b. un nombre suffisant de marégraphes doit être implanté afin déterminer un zéro hydrographique basé sur une longue période d'observation ;
- c. des hauteurs d'eau GPS doivent être recueillies simultanément, afin de les comparer aux observations conventionnelles des marégraphes ;
- d. un nombre suffisant d'observations RTK doit être réalisé au mouillage, pendant des périodes de 25 heures, afin de constituer un réseau intermédiaire de référence dans la zone permettant de corréler les mesures GPS et les hauteurs d'eau marégraphiques conventionnelles et de déceler tout changement de hauteurs ellipsoïdales intervenant entre les stations RTK et les observatoires de marée, pendant un cycle complet de 28 jours ;
- e. un logiciel de traitement intégrant les modèles de géoïde et de marée (LAT), ainsi que le tirant d'eau du navire, doit être utilisé afin de rapporter les sondes à l'ellipsoïde.

La zone du levé doit être entièrement rattachée à l'observatoire du port de référence le plus proche, utilisé pour déterminer la basse mer astronomique extrême (LAT) de la région ; de plus, les hauteurs d'eau doivent être rapportées à une même référence de nivellement. L'ellipsoïde associé au GPS et la référence de nivellement locale doivent être utilisés dans toute la région du levé.

Méthodes de réduction de la marée

En définitive, deux méthodes de réduction de la marée peuvent être utilisées :

- a. la méthode traditionnelle, consistant à rapporter les sondes au zéro hydrographique de la zone (LAT) rattaché au réseau de nivellement géodésique, avec une tolérance compatible avec les normes de la S-44. En l'absence de courants, la surface locale de ce zéro est théoriquement parallèle à la surface géodésique de référence ;
- b. la technique d'altimétrie spatiale, consistant à rapporter les sondes à un zéro hydrographique (LAT), dont la hauteur ellipsoïdale a été déterminée par mesures GPS cinématiques.

La connaissance des hauteurs de l'ellipsoïde et de la station GPS de référence, utilisée pour mesurer les différences entre l'ellipsoïde et la surface du zéro hydrographique (LAT), permettent d'exécuter des levés hydrographiques en mode GPS cinématique, sans utiliser de marégraphes.

Station GPS permanente de référence

Une station GPS permanente de référence (Fig. 7.11), dont la hauteur d'antenne h_1 (négative dans le cas de la figure) aura été entrée dans le récepteur, sera implantée près du trait de côte pour les levés RTK des ports et chenaux d'accès. Si la station est déplacée, l'écart ΔH entre la base de l'antenne et le repère de référence, de hauteur ellipsoïdale h_2 , sera de nouveau déterminé et un nivellement géométrique sera effectué entre l'ancien et le nouvel emplacement.

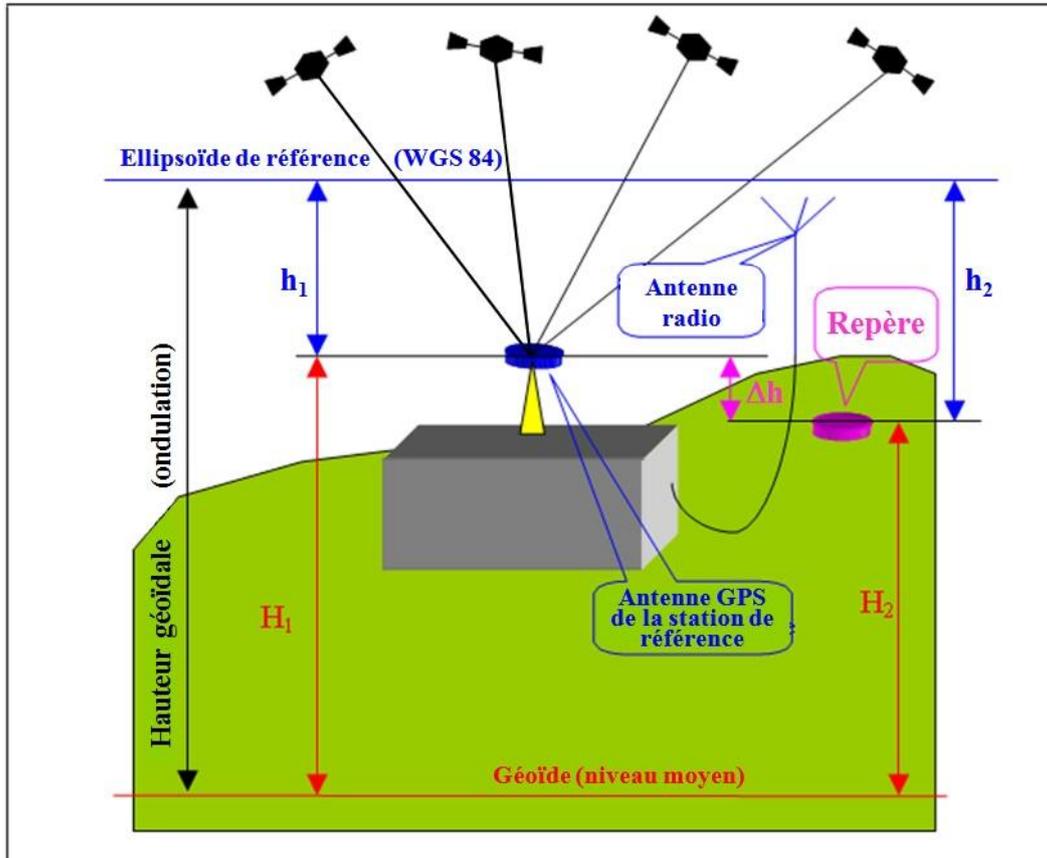


Fig. 7.11 « Station DGPS de référence dans un levé RTK »

- h_1 = hauteur ellipsoïdale de l'antenne GPS
- h_2 = hauteur ellipsoïdale du repère
- H_1 = hauteur orthométrique de l'antenne GPS
- H_2 = hauteur orthométrique du repère
- ΔH = écart entre la base de l'antenne GPS et le repère, mesuré par nivellement géométrique

Précision altimétrique résultante, en mode RTK

La précision absolue résultante du levé est estimée meilleure que 10 centimètres. Cette précision absolue concerne les sondes réduites au zéro hydrographique (LAT), rattaché au système de référence vertical. Avec un logiciel approprié, il est possible d'entrer avec les coordonnées des points du levé dans le modèle d'écart ellipsoïde-géoïde de la zone et de calculer les valeurs de séparation entre la référence géodésique locale et l'ellipsoïde WGS 84.

Mesures cinématiques temps réel à la mer

La hauteur du centre de phase de l'antenne GPS rapportée à la flottaison est la mesure la plus importante à réaliser à bord du navire hydrographique. Avec un navire stoppé, sa détermination est telle qu'indiquée à la figure 7.12 ; en route, sa valeur est modifiée par les mouvements de plateforme, mais l'accroupissement n'est pas corrigé car il affecte tout autant la profondeur du transducteur et la hauteur de l'antenne.

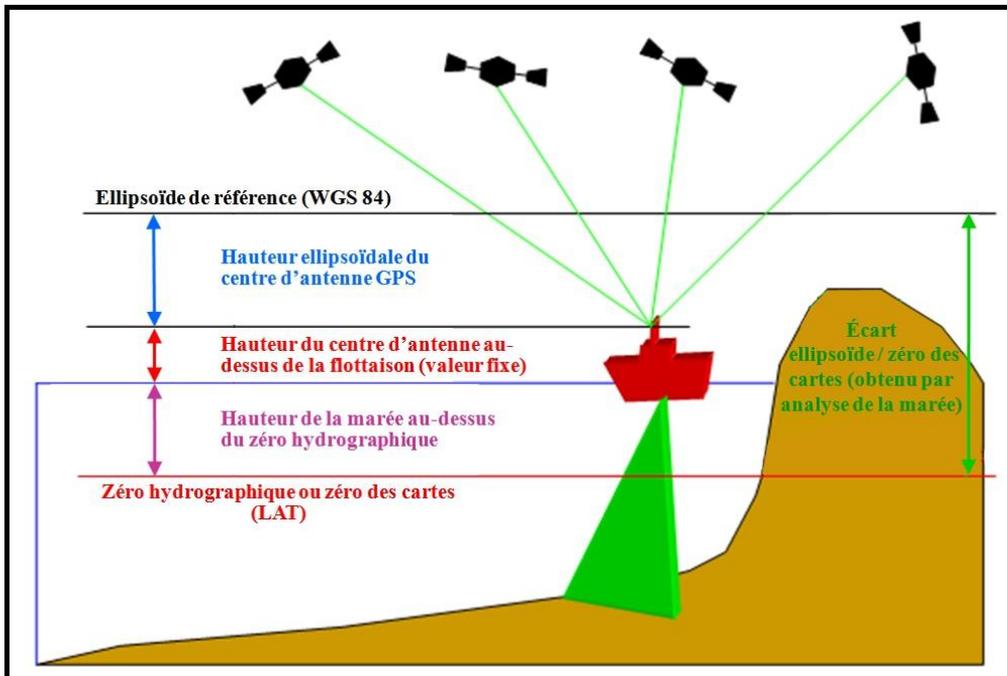


Fig. 7.12 « Mesures GPS cinématiques temps réel à bord d'un navire hydrographique »

Procédures de levé, tests et traitement

- a. Méthode traditionnelle :
 - i. un certain nombre de marégraphes, radar ou à ultrasons, doit être mis en œuvre et leurs données téléchargées pour produire des séries chronologiques référencées par leur numéro de station ;
 - ii. les données des marégraphes doivent être lissées entre elles pour éliminer les différences de temps observées dans la zone du levé ;
 - iii. l'erreur moyenne résultant de l'utilisation d'un marégraphe unique doit être évaluée ainsi que la distance maximale de validité des données en regard de la norme de la S-44 ;
 - iv. normalement, la distance séparant deux marégraphes ne doit pas dépasser le double de la distance de validité décrite au § iii précédent.
- b. Technique d'altimétrie spatiale par DGPS RTK à mesure de phase :
 - i. l'utilisation de marégraphes pendant le levé n'est pas requise ;
 - ii. une surface LAT doit être calculée par un logiciel adapté aux données marégraphiques ;
 - iii. le navire hydrographique doit être équipé d'un récepteur GPS mobile, capable d'appliquer les corrections OTF reçues de la station de référence ;
 - iv. les caractéristiques du navire hydrographique (assiette, tirant d'eau, accroupissement, etc.) doivent être obtenues à partir des observations d'attitude.

Les écarts dus à la marée observés par le GPS RTK doivent être testés au moyen d'un logiciel utilisant une matrice de différences ellipsoïde/LAT et un nombre suffisant de profils perpendiculaires doit être parcouru entre les emplacements des marégraphes les plus proches.

- c. Deux méthodes de traitement sont possibles :
 - i. la méthode traditionnelle n'utilise que les coordonnées horizontales du GPS et les sondes sont rapportées au LAT, par application des corrections de marée aux données brutes ;
 - ii. la méthode RTK fournit une mesure exacte des profondeurs comptées à partir de l'antenne GPS, sans observation de la marée. Les sondes GPS sont rapportées directement à la surface du LAT, déterminée par GPS cinématique. Quelques sondes choisies aléatoirement sur chaque profil doivent être comparées aux profondeurs réduites de la marée selon la méthode traditionnelle.

4.3 Observations environnementales

La direction et la vitesse du courant doivent être observées là où elles présentent de l'intérêt pour la navigation et où il apparaît qu'il n'y a pas déjà eu d'observations. Les caractéristiques des observations sont prescrites dans les IT, sachant que le Directeur technique peut décider d'effectuer des mesures supplémentaires s'il le juge nécessaire.

Les observations doivent être réalisées par conditions météorologiques normales, au moyen de courantomètres, de profileurs ou de flotteurs lagrangiens, à une profondeur adaptée à la moyenne des tirants d'eau des navires transitant dans la région ; elles peuvent être précisées dans les IT.

Dans les régions où le régime de marées semi-diurnes est prédominant, les observations doivent être effectuées en une seule période de 25 heures de vive-eau. Quand l'inégalité diurne est importante, 30 jours d'observations par courantomètre sont requis pour l'analyse harmonique. Si une telle durée n'est pas réalisable, les mesures doivent être néanmoins suffisantes pour couvrir les besoins des Instructions nautiques et des flèches de courant portées sur les cartes marines.

En complément des observations classiques, des renseignements plus qualitatifs seront recherchés auprès des pratiques, surtout s'ils affectent les petites bateaux ou les plaisanciers. Ils incluront les forces et les directions des courants de marée de vive-eau estimées le mieux possible. Dans les régions de fort courant, et particulièrement aux environs des bancs, plateaux rocheux et passages resserrés, des remous et tourbillons dangereux pour les petites embarcations peuvent se produire. La nature de ces phénomènes sera précisée pour les flots et les jusants d'équinoxe.

Des mesures initiales seront réalisées, afin de déterminer la variation spatio-temporelle de la célérité aux nœuds d'une grille couvrant méthodiquement la zone du levé. Ces données, et les autres paramètres d'environnement tels que la climatologie, les flux d'eau douce, les variations saisonnières et la topographie des fonds, détermineront la fréquence des relevés bathycélérimétriques. L'utilisation de capteurs en route, de flotteurs de subsurface et de capteurs de coque permettra d'éviter les observations statiques, mais les profondeurs rencontrées et les dimensions du navire peuvent limiter le déploiement de tels équipements.

Les mesures de célérité, dont on rappelle l'importance pour le SMF, seront effectuées aux intervalles synoptiques ou selon une périodicité définie par les IT ou par l'établissement hydrographique.

4.4 Préparation du plan de sondage

Description générale

La préparation du plan de sondage est résumée à la figure 7.13. Une fois la liste et les orientations des profils arrêtées, l'hydrographe doit être en mesure de déterminer sa position à tout instant.

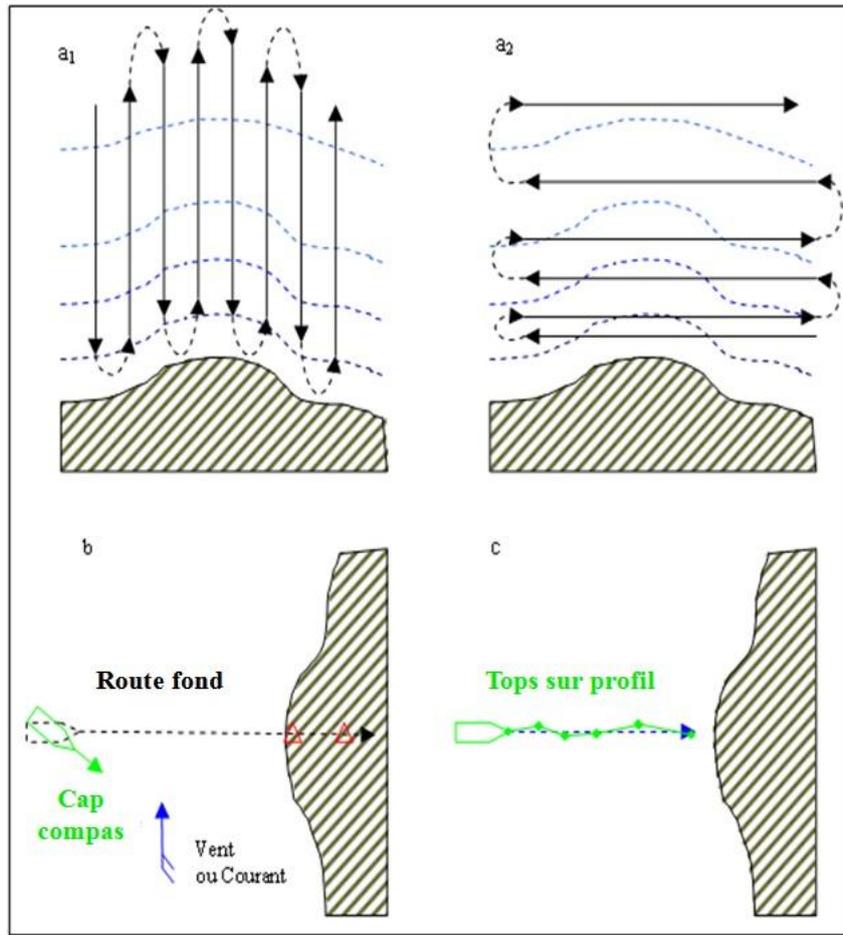


Fig. 7.13 « Plan de sondage et contrôle des profils suivis »

- Croquis a/ L'orientation et l'espacement des profils du sondage régulier sont définis en fonction de l'équipement utilisé. La préparation a_1 , caractérisée par des profils resserrés et perpendiculaires aux isobathes, s'applique aux sondeurs monofaisceaux tandis que la préparation a_2 , caractérisée par des profils espacés, parallèles aux isobathes et comportant un certain recouvrement, s'applique au SMF et au sonar latéral.
- Croquis b/ Suivi du profil tenant compte de la dérive due au vent et au courant.
- Croquis c/ Détermination du profil réellement suivi. La position du navire est calculée à chaque top et le profil suivi est présumé être la ligne brisée joignant les points.

Le positionnement continu par système de radiolocalisation traditionnel, associé à une table traçante ou à un indicateur gauche/droite, permet de corriger tout écart par rapport au profil choisi. De plus le tracé, faisant normalement apparaître les intervalles de temps, facilitera l'intégration des autres données. Les points à l'optique, par contre, sont des événements occasionnels et l'estime sera d'autant plus imprécise que l'intervalle entre deux observations consécutives est long. Pendant un levé portuaire, des observations au cercle, au théodolite ou avec une station totale sont effectuées à des intervalles de quelques secondes et les écarts par rapport au profil sont contrôlés par guidage ou toute autre méthode.

La cadence de tops des systèmes satellitaires ou de radiolocalisation moderne est d'une seconde ou moins et le positionnement continu injecté dans l'indicateur gauche/droite, ou dans le système d'acquisition automatique, permet de déterminer en temps réel la route et la vitesse fond du porte-sondeur, avec la précision du système de positionnement choisi.

Dans les levés de 25 km² ou moins, des balises acoustiques positionnées par méthodes conventionnelles peuvent être mouillées sur le fond et former un réseau utilisable conjointement avec le sondeur et le sonar latéral pour fournir le positionnement et le contrôle sur profil en continu.

Guidage optique

En positionnement optique, le profil suivi par le porte-sondeur est construit manuellement, avec des segments de droites reliant chaque point. La cadence des tops d'observation doit être adaptée à la vitesse du navire (approximativement tous les 3 ou 4 centimètres sur la projection de construction) de telle sorte que les erreurs d'interpolation sur la position soient graphiquement négligeables à l'échelle du levé. Le contrôle de la tenue de profil est normalement assuré indépendamment.

Pour un levé au large hors de portée optique, le suivi de profil sera assuré au compas, si possible gyroscopique, ce qui n'est satisfaisant que pour les levés à petite échelle, car il faut attendre d'avoir construit le point pour revenir sur le profil. Une méthode alternative de tenue de profil consiste à suivre un lieu circulaire ou hyperbolique fourni par un système de radiolocalisation traditionnel ou construit sur deux signaux visibles. Cette méthode est préférable au cap compas, mais peut s'avérer délicate pour les levés à grande échelle en raison de la courbure des lieux de position. De nos jours les techniques GPS ou de radiolocalisation sont exclusivement utilisées pour les sondages au large.

Les autres méthodes de suivi de profil optiques sont les suivantes :

- a. Profil sur alignement naturel – la direction du profil est matérialisée par l'alignement de deux détails de la côte, plus facile à suivre par l'homme de barre qu'un cap compas. Tout détail caractéristique peut être utilisé (buisson, clôture ou poteau, cabane ou partie de bâtiment, etc.). Pour offrir une sensibilité suffisante, les marques d'alignement doivent être espacées d'une longueur équivalente environ au tiers du profil.
- b. Profil sur alignement artificiel - mêmes principes que précédemment. Convenablement disposées, les marques artificielles sont plus faciles à suivre et conviennent notamment pour les levés à grande échelle d'une côte dénudée. Cette méthode est particulièrement utile pour les ports et les quais, quand des alignements à angles droits peuvent être construits pour matérialiser les profils et les traversiers à la précision requise.
- c. Prisme à 180° - cet instrument robuste et simple permet au barreur de visualiser simultanément des marques avant et arrière et de suivre un profil joignant des points situés sur les bords opposés d'un port ou d'une voie d'eau.
- d. Guidage à partir de la terre - l'orientation du profil à partir de la station guide ou du lieu fourni par la radiolocalisation est mesurée sur la préparation avec un rapporteur à alidade. Le profil est alors observé au théodolite ou au cercle par le guide, qui indique la tendance au porte-sondeurs en utilisant des signaux à bras, ou lumineux, ou radio. Quand le levé se déroule sur une voie d'eau, un bassin ou un mouillage, l'observateur à terre associe un détail de la rive opposée au profil suivi, ce qui lui permet de suivre à l'œil nu la progression du porte-sondeur.
- e. Profils en étoile - les profils à sonder sont construits radialement autour d'une marque à terre située au centre du maillage. L'homme de barre choisit des détails visuels (naturels ou artificiels) du côté opposé pour représenter l'extrémité des profils à sonder. Le même principe s'applique pour un guidage à partir de la terre à partir d'une station unique. Cette méthode est particulièrement bien adaptée aux sondages autour des caps et promontoires.

Guidage sur réseau de radiolocalisation

Le plan de sondage coïncide tout simplement avec les réseaux formés par les systèmes hyperboliques ou circulaires. Tout écart par rapport au profil du réseau guide ressort immédiatement et la position du navire est déduite de l'intersection avec le deuxième réseau. Avec les systèmes hyperboliques, les réseaux divergent ou convergent, mais les différences d'écartement sont généralement négligeables.

Des précautions seront prises néanmoins pour corriger les effets de cette dilatation, en ajustant l'écartement des profils ou en ajoutant des intercalaires, afin de respecter l'espacement requis. Un indicateur gauche/droite asservi au réseau guide aidera l'homme de barre à se maintenir sur le profil.

La plupart des fabricants de systèmes de radiolocalisation à courte et moyenne portée proposent une table traçante en sortie. Ce périphérique est particulièrement utile quand les profils ne correspondent pas aux réseaux, ce qui est souvent le cas pour les dragages ou les levés de conduites sous-marines. Le plan de sondage est introduit au préalable dans la table traçante, et le profil suivi est *plotté* par un porte-stylo. Les positions aux tops peuvent être *plottées* à titre de contrôle, mais il est plus courant de les noter séparément, car le traceur déforme souvent les réseaux qui apparaissent sous forme de grilles orthogonales dont les échelles sont rarement rigoureuses.

Suivi automatique de profil

Des diagrammes caractéristiques, représentant un système automatisé de navire hydrographique associé à un sondeur monofaisceau et à un SMF, ainsi qu'une configuration matérielle de vedette, figurent à l'appendice 4 du chapitre 7.

En général, les configurations matérielles des systèmes d'acquisition pour navire hydrographique et pour vedette sont identiques ; ils permettent d'acquérir, de contrôler, de gérer et de stocker les données au format numérique du levé, à partir des systèmes de positionnement et des différents capteurs (sondeurs vertical et multifaisceaux / sonar latéral). Les systèmes modernes comportent un dispositif de tenue de profil, par barre manuelle ou automatique, associé au plan de sondage.

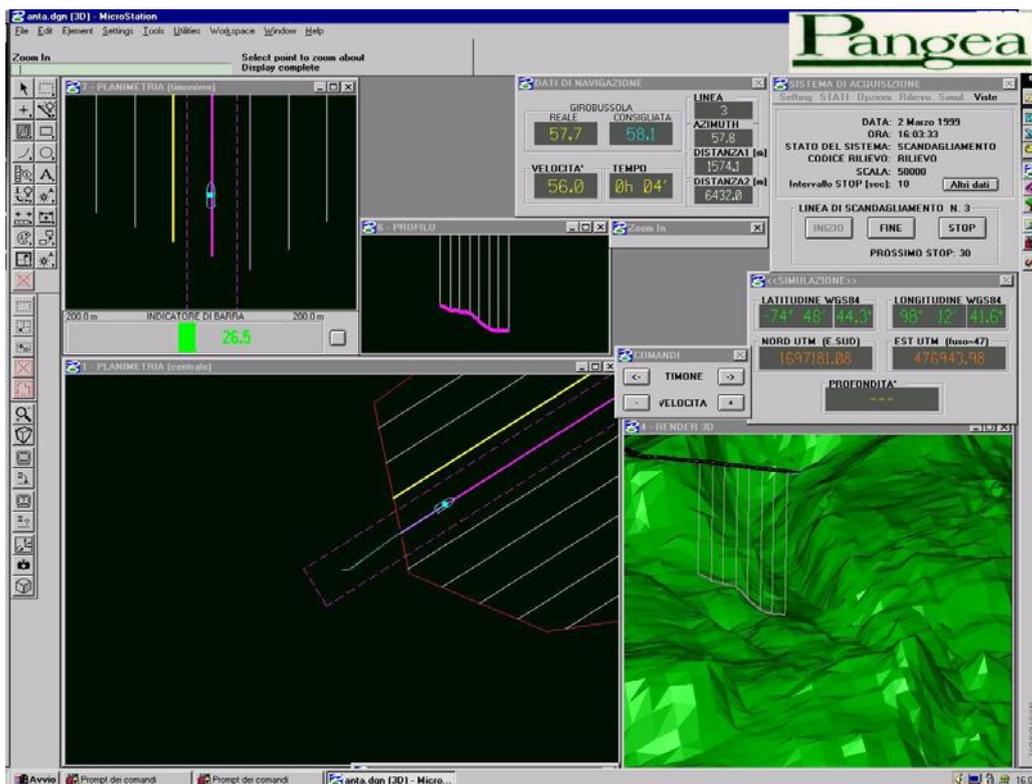


Fig. 7.14 « Copie d'écran de la console de l'homme de barre »

Les figures 7.14 et 7.15 représentent quelques images vidéo caractéristiques des informations présentées à l'homme de barre, à savoir :

- a. le profil de sonde géoréférencé suivi par le navire, avec mise à jour de la position en temps réel rafraîchie toutes les secondes ;

- b. un indicateur gauche/droite;
- c. les informations numériques gérées par le système d'acquisition (coordonnées, sondes, route et vitesse fond, cap, numéro de profil, tops, distances de début et de fin de profil, etc.).

Toutes ces informations permettent à l'homme de barre et à l'hydrographe chef de quart de maîtriser le processus de recueil de données sur profil, et d'assurer la couverture. Les notices de systèmes d'acquisition, qui sont toutes basées sur les mêmes concepts, contiennent les directives et procédures nécessaires au suivi automatique de profil.



Fig. 7.15 « Copie d'écran d'un système d'acquisition automatique »

4.5 Profils de vérification

Des profils, perpendiculaires si possible à la direction du sondage régulier, doivent être exécutés en début du levé, à différents stades de la marée, et par bonnes conditions de mer. Les informations recueillies par sonar latéral sur ces profils doivent permettre d'insérer dans le rapport particulier un commentaire relatif à l'étendue et la direction des rides de sable présentes dans la zone du levé.

Les sondes doivent être comparées, au fur et à mesure, aux points de croisement pour déceler les erreurs grossières, ou de modèle cotidal, ou les pannes d'équipements. Les écrans vidéo du SMF doivent être utilisés pour contrôler la répétabilité des mesures entre fauchées, la continuité de la couverture et les recouvrements. Des profils supplémentaires sont ajoutés pour boucher les trous.

4.6 Profils réguliers

Le type d'exploration au sonar latéral doit être spécifié dans les IT, avec le pourcentage de couverture et de recouvrement, et les critères de détection. Les limites de la zone à sonder doivent être comparées soigneusement à celles des autres levés récents afin d'éliminer les trous.

Lorsque le sondage et l'exploration au sonar latéral sont exécutés simultanément, l'équilibre doit être optimisé entre ces deux tâches, en évitant particulièrement les trous dans la couverture sonar, aussi

sera-t-il généralement nécessaire de subordonner la bathymétrie à l'exploration. Des profils sondeur supplémentaires seront exécutés pour préciser les isobathes et les contours critiques, dès que l'incertitude sera supérieure de 25% à l'espacement entre profils.

Une estimation *a priori* du budget d'erreur doit être établie et comparée aux spécifications du levé. Si des différences morphologiques significatives apparaissent ou si certains capteurs sont changés, cette estimation sera reprise et les nouveaux résultats seront utilisés comme base de comparaison.

L'espacement et la direction des profils réguliers, ainsi que la vitesse de sonde, seront définis en fonction des spécifications des IT. Les vitesses optimales et maximales seront déterminées en tenant compte des profondeurs rencontrées, ainsi que des cadences d'impulsions et des gammes des capteurs mis en œuvre. Selon qu'il s'agit d'un sondeur monofaisceau ou d'un SMF, les profils sont respectivement perpendiculaires ou parallèles aux isobathes, tandis que pour les sonars latéraux, ils doivent former un angle de 20° avec la direction du courant dominant. Dans les régions de forts courants de marée, un angle plus faible peut être adopté, afin de s'assurer que le poisson remorqué est bien dans l'axe de la route du navire.

L'orientation et l'espacement des sondages, au SMF exclusivement, seront prescrits par les IT selon les besoins des utilisateurs. L'espacement des profils, et les taux de couverture et de recouvrement entre fauchées, seront donc fonction des profondeurs, de la densité des données et des critères de détection des objets. Il est très probable que l'espacement entre profils variera dans la zone du levé, en particulier s'il y a des différences notables de profondeurs. Un suivi attentif des opérations permettra de s'assurer que les objectifs prescrits sont bien atteints.

L'intervalle entre les tops et les enregistrements sera déterminé en fonction de l'échelle du levé et du système d'acquisition de données.

Avec un sondeur monofaisceau, des profils supplémentaires perpendiculaires aux courbes de niveau et à un espacement standard seront exécutés, des fonds de 10 mètres jusqu'à la côte, afin de déterminer les isobathes 5 et 2 mètres et la laisse de basse-mer. Des profils supplémentaires seront également effectués parallèlement aux quais et jetées, à des distances de 2, 5 et 10 mètres.

Les sondages de dunes doivent être exécutés après des périodes de calme et de marées de morte-eau, quand les amplitudes des rides sont les plus grandes. Lorsque qu'une telle région est sondée de nouveau, les profils doivent être identiques aux précédents afin de détecter les changements.

Une attention particulière doit être accordée aux découvrants, en particulier pour les bancs isolés, les roches et les hauts-fonds, dont la position peut avoir une implication internationale en matière de délimitations. Les sondages des ports et mouillages doivent soigner la cotation des hauts-fonds et la délimitation des fonds malsains, impropres à l'échouage ou à l'ancrage des petits bateaux.

Les chenaux, routes recommandées et alignements en eaux resserrées doivent être explorés au sonar latéral, en veillant particulièrement à offrir aux grands navires qui les pratiquent un espace de manœuvre suffisant pour les points tournant et les changements de cap.

Des contrôles réguliers de performances du sonar latéral doivent être effectués, notamment :

- a. à la première mise à l'eau ;
- b. une fois par jour, dans les régions où les fonds ne présentent pas de traits marqués ;
- c. après un entretien ou une réparation ;
- d. après un changement de poisson ou d'aileron ;
- e. en cas de doute sur les performances.

S'il apparaît que la portée maximale n'est pas atteinte, par suite des conditions de propagation ou d'un mauvais réglage en atelier, les paramètres d'exploration devront être modifiés pour assurer une couverture complète.

Un magnétomètre doit être mis en œuvre concurremment, afin d'apporter une preuve supplémentaire de la présence éventuelle de métaux ferreux sur le fond ou enfouis.

Il est important de s'assurer que la couverture a été réalisée soigneusement, qu'elle ne comporte pas de trous et que chaque objet remarquable ou obstruction artificielle a été localisé.

4.7 Recherches et profils supplémentaires

Les épaves dont l'existence est à confirmer, ou à réfuter, seront recherchées dans un rayon de 2,5 milles autour de la position présumée, qui peut s'étendre au-delà des limites prescrites par les IT, car la présence d'une épave en position approchée à l'intérieur d'une zone complètement hydrographiée n'est pas acceptable. Des profils supplémentaires devront donc être exécutés en dehors des limites du levé, afin de s'assurer de l'insonification complète de la zone de recherche, avec les recouvrements appropriés.

Lors des sondages effectués à proximité des champs d'hydrocarbures ou des aires de prospection, des précautions particulières seront prises pour respecter une distance de sécurité de 500 mètres autour des installations sur le fond et des zones de pose de pipelines, ou de remorquage d'engins.

Pour un objet en position approchée (PA), l'exploration devra être conduite selon 2 directions à angle droit et étendue à 2,5 milles au moins de la position cartographiée. Si la recherche dans la 1^{ère} direction avec un sonar latéral bien réglé est considérée comme suffisamment probante, on pourra envisager de se passer de la deuxième direction.

Les objets dont les positions ont été établies précédemment, mais qui n'ont pas été retrouvés, devront être recherchés minutieusement avant d'être réfutés. S'ils se trouvent dans la zone du levé, une exploration dans un rayon de ½ mille autour de la position connue, avec magnétomètre, sera considérée comme suffisante. Si la position géographique d'une épave confirmée par des levés précédents ne fait aucun doute, le rayon précité pourra être réduit. Un dragage mécanique pourra être envisagé.

Chaque contact sera examiné attentivement au sonar latéral et s'il est confirmé, sa position et sa cote minimale seront déterminées par une série de passes au sondeur vertical. Un minimum de quatre profils probants et croisés deux à deux sera nécessaire. Dans le cas d'une épave, deux de ces profils devront être parallèles à l'axe de l'épave et deux autres perpendiculaires.

Les caractéristiques de l'objet pourront être obtenues par sondeur, sonar latéral, magnétomètre, drague hydrographique, plongeur ou par une combinaison de ces moyens ; elles porteront sur :

- a. la position de l'objet ;
- b. sa cote minimale ;
- c. sa nature ;
- d. sa longueur, sa largeur et son orientation ;
- e. la profondeur, la longueur et l'orientation de la souille ;
- g. l'anomalie du champ magnétique.

L'étude de la liste d'épaves pourra aider à l'identification de l'objet, mais le rapprochement d'une épave récemment découverte avec celles du fichier devra être fait prudemment. Des confirmations de non-existence peuvent être encore nécessaires pour des positions portées sur les cartes. L'utilisation de

plongeurs peut être utile pour identifier les épaves et rendre compte de leur état et de leur attitude, ainsi que pour localiser les points hauts qui auraient échappé au sondeur ou au sonar latéral.

La cote minimale des épaves et obstructions devra être établie ; elle nécessitera dans certaines cas l'emploi d'une drague hydrographique, qui ne sera déployée qu'après détermination de sa position, dimensions, orientation et profondeur les plus probables, par sondeur ou sonar latéral. L'emploi d'une drague hydrographique* pourra être envisagé dans les circonstances suivantes :

- a. dans les cas spécifiques pour lesquels il est prescrit par les IT ;
- b. s'il apparaît que la cote la plus faible est inférieure à 40 mètres ;
- c. si les profondeurs autour de l'épave sont très différentes de celles portées sur la carte ;
- d. si un travail de démantèlement est intervenu depuis le dernier levé ;
- e. si les sonogrammes suggèrent la présence de mâts et de protubérances ;
- f. par fonds cartographiés comme malsains à l'intérieur d'une zone de mouillage ;
- g. par fonds évolutifs ou soumis à de forts courants de marée ;
- h. si la position de l'épave est très différente de celle de la carte.

On s'assurera que la zone entière entourant l'épave est draguée, même en plusieurs passes, et qu'il n'y a pas de trous. Un simple dragage des points hauts figurant sur le sonogramme n'est pas suffisant.

Une attention particulière doit être accordée aux profondeurs < 40 mètres où la cote minimale de toutes les remontées de fond doit être déterminée. Des profils intercalaires doivent alors être exécutés, sauf par fonds plats et monotones et si aucun danger n'a été détecté lors de la couverture complète au sonar latéral ou au SMF.

4.8 Observations diverses et complémentaires

Des natures de fond seront déterminées à intervalles réguliers dans toute la zone du levé et des échantillons supplémentaires seront recueillis sur tous les mouillages, bancs, monts sous-marins et hauts-fonds, en particulier par fonds instables, et dans les chenaux qui les séparent. 10% des échantillons environ seront conservés et remis en fin de levé.

Les échantillons sont normalement recueillis dans la zone avant de commencer les explorations au sonar latéral, afin d'associer une vérité-terrain aux sonogrammes et de permettre une interprétation plus précise de la texture des fonds.

Avant d'arriver sur les lieux du levé, toutes les marques de balisage fixes et flottantes, et autres aides à la navigation*, doivent avoir été identifiées sur les cartes à grande échelle et Livres des feux et des radiosignaux. En arrivant sur zone, toutes les aides cartographiées ou listées doivent être identifiées.

Chaque nouvelle aide à la navigation, fixe ou flottant, ainsi que toute marque susceptible d'avoir été déplacée par rapport à la carte ou à la liste, doit être repositionnée quand le flot et le jusant sont au maximum. Cependant, si l'emplacement des ancres ou du corps-mort est déterminée sans ambiguïté lors du sondage surfacique, il pourra être retenu comme position cartographiée.

Les informations suivantes relatives aux feux doivent être enregistrées :

- a. la hauteur du foyer ;
- b. les caractéristiques des feux et des signaux sonores ;
- c. les secteurs à éclats et occultés ;

* NdT : Les dernières dragues hydrographiques utilisées en France ont été déclassées vers 1990. Les missions hydrographiques françaises utilisent des plongeurs ou des UUV/ROV jugés plus performants.

* NdT : *Navaid* ou *ATON* en anglais professionnel courant.

- d. la forme et la couleur de la tour ;
- e. la forme et la couleur de la lanterne.

Des photographies en couleur de toutes les aides à la navigation doivent être prises pour inclusion dans les Instructions nautiques.

Les autorités portuaires doivent être consultées pour toute modification constatée, afin de déterminer si elle est permanente ou temporaire. Les détails des changements prévus doivent être recueillis.

Les informations relatives aux services radiomaritimes portuaires, y-compris de suivi du trafic (VTS, VTM, VTIS, etc.), aux stations de pilotage, aux aides radio à la navigation (incluant les radiophares aéronautiques, les stations radar, etc.), aux sémaphores (liaisons publiques, avis urgents aux navigateurs, météo marine, etc.), au SMDSM, aux procédures SAR, doivent être recherchées.

Chaque opportunité doit être saisie pour recueillir des détails sur les phénomènes naturels observés au cours du levé. De tels phénomènes incluent :

- a. la DSL, couche composée de plancton et des petits organismes dont se nourrissent les poissons. Certains d'entre eux ont des vessies natatoires qui réfléchissent les ondes sonores et peuvent affecter considérablement les sondeurs et sonars latéraux. Ce phénomène important doit être signalé dans le rapport particulier ;
- b. la bioluminescence, causée par des animaux marins allant de l'organisme microscopique jusqu'à d'assez gros poissons, calmars et méduses, est rencontrée plus fréquemment dans les eaux chaudes, et intéresse particulièrement les biologistes marins et les océanographes militaires. Ce phénomène important doit être signalé dans le rapport particulier ;
- c. les eaux décolorées, qui sont généralement reconnues comme étant d'origine biologique. Des prélèvements d'eau et des observations au disque de Secchi présentent un grand intérêt et doivent être exécutées ;
- d. la vie marine, qui doit être observée pour suivre les mouvements de baleines et autres mammifères marins, lesquels sont d'un grand intérêt pour la lutte ASM et les biologistes marins. La présence de pêcheurs dans la région du levé est importante, car les sons produits par les moteurs et les équipements de pêche affectent fortement les niveaux de bruit ambiant. De plus, la présence d'une flotte de pêche peut indiquer celle de grandes populations de poissons, dont les effets de dispersion sur les ondes sonores peuvent inhiber les performances des sonars. Ces observations doivent être incluses dans le rapport particulier.

5. DÉTERMINATION DU TRAIT DE CÔTE

5.1 Généralités sur le trait de côte

La détermination exacte du trait de côte et des caractéristiques de la côte est une tâche essentielle d'un levé hydrographique, car le navigateur doit souvent déterminer sa position par relèvements et distances par rapport aux promontoires et autres détails remarquables du littoral. Dans un levé hydrographique, le trait de côte repose généralement sur le niveau des plus hautes mers astronomiques.

Sauf pour les levés expédiés, le trait de côte doit toujours être déterminé à pied quand la nature du rivage le permet. De nombreux petits cours d'eau sont manqués par la méthode consistant à utiliser de petites embarcations longeant la côte et ne débarquant qu'ici et là.

Dans certains cas, des cartes terrestres basées sur des photographies aériennes récentes ou des images satellitales fourniront des données utilisables pour le tracé du trait de côte. Parfois la couverture aérienne sera exécutée spécialement pour un levé et une préparation topo spéciale sera réalisée à l'échelle appropriée, ce qui ne supprime pas pour autant la nécessité de parcourir la côte à pied.

Toute carte topo ou de couverture aérienne devra être vérifiée sur le terrain avant d'être utilisée pour les minutes d'écriture. Si de telles préparations ne sont pas disponibles, le trait de côte devra être topographié par les méthodes traditionnelles et les détails positionnés correctement à l'échelle du levé.

Même quand il utilise une carte terrestre ou une photo, l'hydrographe chargé de définir le trait de côte devra toujours tracer la laisse de basse mer le mieux possible et noter la nature de l'estran. La meilleure façon de déterminer la laisse de basse mer est par la bathymétrie, mais chaque portion de l'estran devra, si possible, être inspecté au moins une fois à basse mer, pour vérifier qu'aucun danger n'a été oublié. Ceci est particulièrement vrai quand le marnage est fort.

5.2 Détails à rechercher sur la côte

L'hydrographe devra exécuter les tâches suivantes :

- a. déterminer et positionner le trait de côte par les meilleures méthodes disponibles ;
- b. positionner et décrire toutes les structures REMARQUABLES pour le navigateur, et qui ne sont pas déjà positionnées ; vérifier que les amers et détails figurant sur les cartes et ouvrages ont été positionnés et décrits correctement, même s'ils se trouvent un peu à l'intérieur des terres ;
- c. positionner, décrire et reporter sur la carte tous les objets et détails du littoral susceptibles d'aider le navigateur à faire le point et à identifier le trait de côte. Pour les levés à grande échelle, cela inclura des détails mineurs, qui ne peuvent être qu'examinés à terre et de près ;
- d. mesurer et estimer les hauteurs de tous les détails, dont certains peuvent être décrits en termes généraux tels que « falaise rouge, basse, hauteur : 5 à 6 mètres » ;
- e. positionner toutes les îles et dangers visibles ; déterminer leurs hauteurs ; positionner également le balisage flottant (bouées non cartographiées) ;
- f. décrire la composition de l'estran entre les lasses de basse mer et de pleine mer et immédiatement au-dessus, en utilisant les symboles réglementaires sur la minute ;
- g. indiquer les lieux de débarquement ; positionner et décrire les brise-lames, les égouts et tout ce qui peut constituer un danger pour le débarquement. Positionner également les quais et jetées avec une description complète des types de construction, des profondeurs, des hauteurs de la dalle à marée haute et des aménagements disponibles ;
- h. recueillir les détails portuaires, tels que postes d'accostage et possibilités de ravitaillement. Ces informations sont destinées aux Instructions nautiques ;
- i. vérifier la toponymie. Les noms de lieux seront recueillis auprès de sources locales fiables et comparés aux toponymes figurant sur les cartes et publications existantes.

De plus l'hydrographe s'intéressera à la topographie à l'intérieur des terres, avec un niveau de détail qui dépendra du temps disponible, de l'échelle du levé et de l'existence d'informations recueillies par d'autres équipes ou par d'autres moyens, tels que photographies aériennes.

5.3 Détails intéressant les navigateurs

Détails/amers REMARQUABLES - Les marins utilisent les relèvements sur les sommets, les clochers, les cheminées, les moulins à vent, les mâts, les bâtiments permanents, etc. qui sont visibles du large à grande distance.

Amers importants – Comme précédemment, mais les amers sont visibles à proximité de la côte.

Caps, îles, détails au large - Les marins utilisent les relèvements tangents aux bords droits et gauches, les sommets de falaises verticales, etc.

Aménagements portuaires – Les dimensions et hauteurs des jetées, orientations et profondeurs le long des quais, types de constructions, postes d'accostage et de mouillage, ports de plaisance, clubs de voile, marinas, postes de ravitaillement en carburant, etc. seront recueillis.

Principaux détails terrestres :

- a. objets naturels - sommets de collines, rivières, lacs, marécages, bois, contours, etc. ;
- b. objets artificiels - bâtiments, villes, mâts de pavillons, routes, voies ferrées, usines, etc. ;
- c. contours – doivent être suffisants pour représenter le relief et les formes de la région côtière ;
- d. nature de l'estran et topographie du rivage proche, afin d'aider à l'identification et au choix des plageages.

Feux - Les détails des Livres des feux doivent être vérifiés sur le terrain.

Instructions nautiques - Description exhaustive de la côte et des installations portuaires.

5.4 Topographie

Lorsque des cartes topographiques récentes, des photographies ou des couvertures aériennes sont disponibles, celles-ci doivent être vérifiées soigneusement sur le terrain et les différences commentées.

La topographie représentée sur les cartes à grandes échelles doit être aussi vérifiée sur le terrain pour mettre à jour les détails normalement non représentés et qui sont invisibles sur les photos aériennes, en prêtant une attention particulière aux détails côtiers, tels que balises, mâts de pavillons, brise-lames, etc. Les objets cartographiés qui n'existent plus doivent être supprimés, en utilisant de préférence une carte marine renseignée, qui sera jointe au dossier du levé.

Aucun détail topographique ne sera porté sur les minutes sans avoir été contrôlé sur le terrain, ou que son existence et sa position sur la carte, ou la couverture aérienne, aient été confirmées. Les détails nouveaux doivent être inclus ; ceux qui proviennent d'autres sources, et qui sont jugés corrects par l'hydrographe, peuvent être transférés sur les minutes afin de fournir une représentation plus complète et équilibrée, mais ils doivent être insérés avec soin afin d'éviter toute mise en cause de leur authenticité.

S'il n'existe aucune carte récente ou photographie aérienne, tout détail topographique utile au navigateur sera déterminé avec précision et porté sur la minute. En particulier, tous les détails utilisés pour faire les points par relèvements ou par radar doivent être reportés, si possible, avec leurs coordonnées. À moins de disposer de temps et de ressources, il est inutile de gaspiller de l'énergie pour enregistrer un détail mineur qui n'intéresse pas le marin, ou qui n'est pas visible de la mer.

Tout changement constaté doit être signalé.

5.5 Détermination de la laisse de basse mer

La laisse de basse mer le long des côtes, des îles et de tous les découvrants, sert en général à la délimitation de la mer territoriale et des lignes de base associées. Elle doit être déterminée avec soin car elle est très importante pour les zones de pêche, les règlements pour la prévention de la pollution ou l'autorisation d'extraction de granulats, ainsi que pour les frontières internationales. Les hydrographes doivent, par conséquent, lui apporter une attention particulière, même si elle présente peu d'intérêt pour le navigateur.

Sauf en cas d'instructions contraires, le levé d'une région comportant des découvrants sera considéré comme incomplet si la laisse de basse mer n'a pas été délimitée convenablement.

5.6 Hauteurs des détails topographiques

Tous les détails topographiques situés sur la côte, et en particulier les îlots ou rochers découvrants, doivent être cotés, même si leur hauteur est faible. Si un sommet n'est pas visible, la hauteur de la canopée ou des îles sera appréciée et notée. La hauteur de tous les grands objets artificiels tels que mâts, cheminées, etc. doit être déterminée.

Les hauteurs des falaises et leurs couleurs, si elles sont remarquables, doivent être notées.

Les altitudes des objets doivent être rapportées au niveau moyen (ou à son équivalent), et si ce n'est pas réalisable, leur hauteur au-dessus du sol peut être indiquée. Dans certains cas particuliers, ou pour les levés de voies d'eau, la référence verticale peut être exprimée par rapport à l'environnement.

5.7 L'estran

Lors du levé de l'estran, le souci principal est de déterminer la position de tous les dangers qui ont pu être omis lors du sondage régulier, tel que les affleurements rocheux ou les obstructions artificielles. Les objets situés en deçà de la laisse de basse mer doivent être positionnés, tels que les canalisations ou câbles visibles sur l'estran, qui se prolongent en mer et peuvent présenter un danger pour les mouillages. Et en définitive, la nature superficielle de l'estran doit être notée.

5.8 Calque de superposition du trait de côte

Un calque de superposition du trait de côte correctement préparé doit comporter :

- a. le titre du levé, la référence des IT, l'échelle, le nom de la mission hydrographique* et toute autre identification supplémentaire ;
- b. les positions de tous les amers à utiliser ;
- c. les attentes du carroyage géographique et de la projection, cerclées à l'encre et avec les valeurs numériques pour 2 d'entre elles au moins ;
- d. une échelle graphique ;
- e. les méridiens et la déclinaison magnétique ;
- f. une note sur la valeur de l'erreur graphique, qui est de 0,2 mm sur le papier quelle que soit l'échelle (soit 2 m à 1:10 000).

5.9 Utilisation des préparations photographiques aériennes

Une mosaïque de la région côtière, dans les limites du levé hydrographique, sera parfois préparée à partir des photos aériennes par l'établissement hydrographique lorsque :

- a. la topographie est ancienne, de mauvaise qualité ou même inexistante ;
- b. les détails hydrographiques, par exemple les hauts-fonds, sont insuffisamment ou non représentés sur les cartes topographiques alors qu'ils apparaissent sur les photographies ;
- c. les découvrants peuvent être définis précisément et efficacement par la photogrammétrie.

Quand une préparation photographique aérienne a été fournie à l'appui des IT, la procédure suivante pourra être adoptée :

- a. la préparation sera entièrement vérifiée *in situ* pour les erreurs de photo-interprétation, de formes et de positions. Les difficultés rencontrées dans la compilation et les contradictions avec les données existantes seront mises en évidence dans le rapport qui accompagne la préparation et une attention spéciale sera accordée à la résolution de ces différences ;

* NdT : ou du navire hydrographique, pour les pays organisés ainsi.

- b. les données qui n'ont pas été contrôlées sur le terrain ne doivent pas être reportées sur la minute de topographie. On notera que le trait de côte dérivé des photographies aériennes coïncide rarement avec le zéro de la carte, surtout dans les régions comportant des plages faiblement inclinées, et il peut être nécessaire de le corriger avant de l'insérer sur la minute ;
- c. les modifications à apporter à la préparation photo doivent être indiquées en rouge sur une copie de cette dernière ;
- d. si cette action est prescrite, la position des points de contrôle du levé aérien doit être piquée et renseignée au dos des photographies fournies avec la préparation.

Les couvertures aériennes sont très utiles pour la détermination du trait de côte, et leurs points de contrôle seront comparés au système de géodésique de référence, en ne perdant pas de vue que l'échelle des clichés doit être agrandie 4 ou 5 fois pour coïncider avec celle du levé et qu'en photogrammétrie, les erreurs verticales correspondent approximativement à 1/5 000 de l'altitude de vol tandis que les erreurs horizontales sont nettement plus faibles.

Quand la détermination du trait de côte est l'objectif recherché, des passes rectilignes parallèles au trait de côte seront programmées. Les recouvrements doivent inclure les points de contrôle et les vols doivent être effectués à marée basse.

Pour les levés à grande échelle (< 1:50 000) utilisant la photogrammétrie pour décrire le relief de la côte et les détails topographiques, un contrôle 3D supplémentaire sera requis. Les erreurs sur les coordonnées des points de contrôle doivent être inférieures à la moitié de celles de l'aérotriangulation.

Pour caler une bande par aérotriangulation, 4 points de contrôle planialtimétriques (3D) sont nécessaires. Des points de contrôle supplémentaires peuvent être ajoutés en milieu de bande.

Dans les vols plus complexes comportant un grand nombre de bandes parallèles, l'aérotriangulation permet de faire un ajustement par blocs. Le nombre de points de contrôle planialtimétriques sera alors de la forme $5 + 0,2M$, où M caractérise le modèle d'aérotriangulation. Des points de contrôle altimétriques supplémentaires peuvent être nécessaires dans les régions où une hauteur précise est requise.

Les levés à petite échelle (< 1:50 000) nécessiteront moins de points de contrôle, et pour certains d'entre eux, avec des coordonnées horizontales seulement. Il en va de même pour les images satellitales.

La photogrammétrie ou l'imagerie satellitale ne dispensent pas l'hydrographe de se rendre sur le terrain pour explorer la côte de manière exhaustive.

5.10 Méthode de topographie à pied pour la détermination du trait de côte

L'hydrographe répartit ses points d'observation par une méthode quelconque le long de la laisse de pleine mer, selon un espacement tel que tous les détails intermédiaires soient relevés sans ambiguïté. La place occupée sur le cahier dépendra, par conséquent, de la complexité du trait de côte.

Une séance classique de topographie à pied utilisant un cercle hydrographique et une perche de 3 mètres est représentée à la figure 7.16 ci-après. Les cahiers d'observations utilisés pour le positionnement par relèvements directs et inverses, ou combinant les deux méthodes, sont identiques. Noter que tous les angles et toutes les distances sont inscrits dans le cahier d'observations.

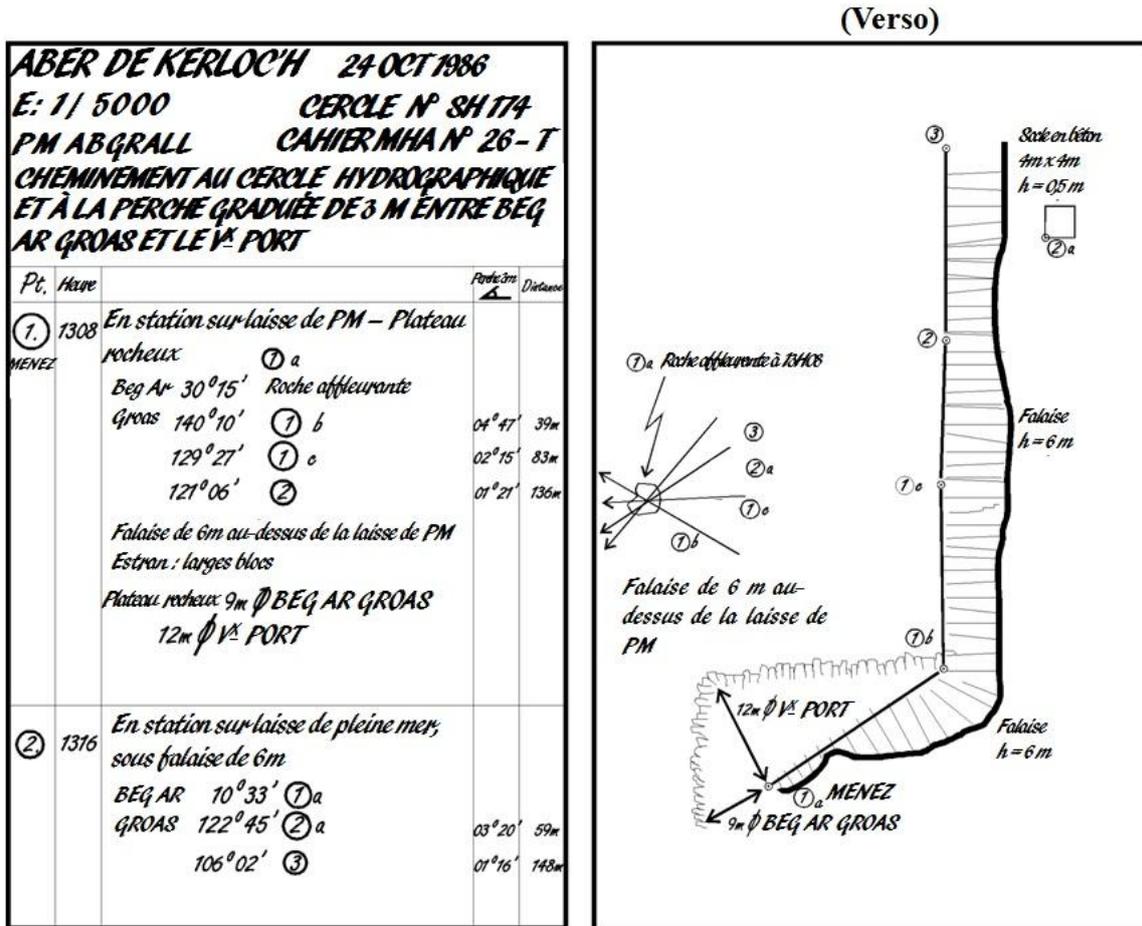


Fig. 7.16 « Cahier d'observations (détermination du trait de côte) »

5.11 Tracé du trait de côte

L'usage est de tracer le trait de côte directement sur un calque, en construisant les points observés par relèvements inverses ou par cheminement ; un graphique millimétré pourra aussi être utilisé. Les points tournants seront calculés et compensés avant d'être tracés, et les points de départ et de fermeture du cheminement seront piqués ; les autres détails de la côte seront tracés à la main.

La méthode graphique pour tracer un trait de côte est indiquée ci-dessous :

- Tracer à la « fourchette » les angles et distances. Il peut être plus pratique d'utiliser une grande règle Cras, un répartiteur, une pointe sèche et un crayon 4H bien taillé. Éviter l'emploi de « Ø » sur le graphique pour caler ces instruments. Les relèvements doivent être tracés plus longs que nécessaire et des piqûres d'épingle doivent être ajoutées le long de la règle et entourées afin de pouvoir être réutilisées. Ceci est important quand la référence est la visée arrière du cheminement, car la règle risque d'être trop courte si un seul point de calage est utilisé pour l'aligner. Si la fermeture est acceptable, le cheminement peut être compensé graphiquement. Si elle est trop grande, il faut suspecter une seule erreur grossière plutôt qu'une accumulation d'erreurs mineures, et le tracé doit être vérifié soigneusement avant de renoncer et de retourner sur le terrain.
- Les points intermédiaires, tangentes et visées, sont alors tracés à partir des points tournants corrigés ; une attention particulière doit être portée au calage de l'instrument sur les positions corrigées des repères arrière, marqués par des croix, afin de bien aligner le rapporteur.
- Les détails du trait de côte entre les points intermédiaires sont alors tracés à l'aide des croquis du cahier d'observation. Les photographies aériennes et les cartes existantes sont d'un grand secours, tout comme les informations notées en fin de profils par les équipes de sonde.

- d. Pour finir, le trait de côte sera tracé au Rotring en utilisant les couleurs et symboles de l'ouvrage 1-D (cf. publication S-4/INT1 de l'OHI). Dans le cas de falaises ou de côtes escarpées, le pied de la structure sera dessiné précisément, tandis que le sommet pourra être décalé pour permettre l'insertion du symbole. Des tolérances analogues sont nécessaires pour certains autres symboles, mais un soin particulier sera accordé aux détails apparaissant à marée basse, afin de s'assurer que la limite côté large est correctement représentée.

5.12 Rapport sur la détermination du trait de côte

Il sera rendu compte du levé de trait de côte conformément à l'appendice 5 de ce chapitre ; cependant quelques aspects parmi les plus importants sont détaillés ci-dessous :

- a. Rappeler l'objet du levé, en précisant s'il s'agit d'une mise à jour, d'une nouvelle carte ou d'une autre raison. Indiquer les autres sources d'informations utilisées en complément des observations faites par l'hydrographe sur le terrain ;
- b. fournir un bref résumé des méthodes utilisées et des mesures exécutées pour déterminer la position du trait de côte, y compris les points de contrôle de la couverture aérienne ;
- c. signaler toutes les difficultés particulières rencontrées et tout travail supplémentaire requis. Fournir une indication de l'échelle de temps requise avant qu'il soit nécessaire de répéter l'opération ;
- d. fournir une estimation des erreurs de coordonnées des objets et amers positionnés ;
- e. décrire tous les nouveaux points géodésiques avec indications sur leur durabilité ; actualiser l'information relative aux points géodésiques réoccupés et à leur état de conservation. Une collection complète de fiches géodésiques doit être établie ;
- f. les résultats obtenus seront commentés ; tous les tracés, photos, vidéos, enquêtes portuaires, échantillons et enregistrements seront listés et joints au dossier du levé ;
- g. les sources utilisées pour l'enquête de toponymie seront mentionnées ; les cartes récentes utilisées pour confirmer les noms de lieu seront jointes au dossier du levé ;
- h. le rapport particulier se prononcera sur le caractère exhaustif du levé et signalera les travaux complémentaires à envisager.

Comme pour tous les enregistrements du levé, les cahiers relatifs à la détermination du trait de côte seront contrôlés afin de s'assurer qu'aucune anomalie ne subsiste et que les résultats sont cohérents. Toutes les informations et données contenues dans le dossier du levé seront listées et vérifiées avec soin, de telle sorte que l'établissement hydrographique en ait une compréhension claire.

6. TRAITEMENT DES DONNÉES

Le soin et l'attention consacrés aux travaux sur le terrain doivent s'étendre à tous les aspects du traitement des données et à l'annotation lisible de toutes les informations originales utilisées pour produire les enregistrements finaux. La règle de base à respecter en compilant les enregistrements est qu'ils doivent être parfaitement intelligibles pour toute personne ayant une bonne connaissance de ce type de levé. Le conditionnement soigné, précis et concis, de toutes des données dans la forme prescrite est primordial. La terminologie doit être conforme au dictionnaire hydrographique S-32.

6.1 Bathymétrie

Avec le SMF, chaque écho du fond est fonction de la précision du temps de parcours et de l'angle d'incidence mesurés. Ces deux paramètres et le profil de célérité entrent dans les algorithmes de calcul qui convertissent les rayons sonores en sondes précises, positionnées correctement et en temps quasi-réel par rapport à la route.

Le volume de données acquises par le SMF est tel que, seule, une méthode de traitement surfacique est réaliste, tandis que dans le cas du sondeur monofaisceau, le traitement par profil individuel avec comparaison directe avec la bande de sonde, quand elle existe, est généralement le plus approprié.

Les systèmes satellitaires ont réduit le volume de constructions et de traitements *a posteriori*, cependant un contrôle de qualité soigné, et en temps réel, des sorties et des statistiques du système de navigation est essentiel pour assurer une précision de positionnement conforme aux normes fixées.

Des mesures de bathycélérité (CTD) seront effectuées à intervalles réguliers au cours du levé, en particulier si les observations continues de célérité ne sont pas acquises, ni appliquées en continu. L'intervalle entre les bathy sera déterminé en fonction de la dynamique temporelle et spatiale de l'environnement, telle qu'étudiée initialement, conformément au § 4.3.

Tous les algorithmes utilisés pour le traitement des données doivent être notés et cités dans le rapport particulier pour permettre à l'établissement hydrographique de le comprendre clairement. Les méthodes de lissage et les paramètres des filtres peuvent être détaillés dans les IT, ou standardisées dans les instructions du Service hydrographique, tout écart devant être explicité dans le rapport particulier. Les filtrages et lissages excessifs doivent être évités.

Les procédures de traitement et d'édition respecteront une démarche logique et passeront par une phase de contrôle claire, permettant à toutes les actions et paramètres d'être vérifiés et validés. Un robuste contrôle de qualité sera mis en œuvre pendant toute la durée des travaux ; il inclura une comparaison avec les levés antérieurs et leurs données validées, les cartes publiées, ainsi qu'avec les données récentes des levés adjacents. Un examen scrupuleux des intersections et des profils de vérification sera effectué, dont les résultats seront mis sous forme d'un graphique statistique. Toutes les différences supérieures à $\sqrt{2}$ fois le budget d'erreur de sondage devront être investiguées.

Les observations de marée et les lectures à l'échelle doivent être réduites au zéro des sondes de l'observatoire, tel que déterminé lors de l'installation. Tous les facteurs de concordance en temps et en amplitude doivent être appliqués pour réduire la marée observée aux valeurs dans la zone du levé.

Une comparaison du marégraphe et de l'échelle de marée doit être faite quotidiennement par lectures simultanées, après réduction au zéro des sondes, afin de s'assurer que l'observatoire a correctement enregistré la marée.

Les lectures réduites seront tracées et la courbe résultante comparée à la marée prédite, afin de vérifier la cohérence des données et le bon fonctionnement de l'observatoire. Sauf si la marée présente des singularités, les courbes peuvent être lissées ; les sauts importants ou répétitifs seront signalés dans le rapport particulier et le marégraphe sera contrôlé pour tout fonctionnement défectueux.

Quand on utilise un marégraphe automatique, les valeurs réelles seront comparées aux valeurs transmises pendant la période de 25 heures du calage initial, puis régulièrement pendant le levé.

La densité des sondages dépendra des dimensions des objets à détecter, lesquelles détermineront l'échelle du levé. Pour la sécurité de la navigation par petits fonds, on privilégiera les profondeurs moindres tandis que dans certains cas, on utilisera des profondeurs moyennes. Les IT et les objectifs recherchés par le Service hydrographique seront précisés dans les spécifications.

Les IT doivent préciser sous quelle forme les résultats du levé doivent être rédigés, y compris les intervalles des isobathes. On tirera profit des nombreux outils de visualisation disponibles pour faciliter la vérification et le contrôle de qualité du levé, et notamment :

- a. des tracés bathymétriques ;
- b. des isobathes ;
- c. des colorations automatiques de sondes et d'isobathes ;

- d. des surfaces 3D en couleur ;
- e. des effets d'ombrage et de niveaux de gris.

Si des ombrages 3D sont créés, ils doivent être observés dans deux directions perpendiculaires, afin de faire ressortir les anomalies ou artefacts nécessitant une investigation supplémentaire.

Tous les détails et profondeurs moindres doivent être comparés aux enregistrements du sonar latéral et le cas échéant, donner lieu à une investigation supplémentaire.

6.2 Classification des fonds

Les textures déduites des sonogrammes et des données de rétrodiffusion seront fusionnées dans une mosaïque automatique, ou manuelle, de nature de fond (minutes N). Dans les deux cas, l'interprétation sera corrélée avec la grille d'échantillons prélevés en début de levé.

Les premiers détails à rédiger comporteront les dunes de sable avec leurs hauteurs de crête, les positions et les hauteurs des obstructions, les débuts et fins d'affleurements rocheux, et les têtes de roche. Les textures seront délimitées et leurs détails comparés avec ceux des levés précédents.

Il pourra être nécessaire de prélever des échantillons supplémentaires du fond pour clarifier les textures complexes. Il conviendra alors de recueillir des échantillons additionnels en nombre suffisant pour confirmer la classification.

La qualité et l'exhaustivité de la couverture du sonar latéral sera appréciée au vu :

- a. de la minute de construction. L'examen révélera les trous de couverture causés par un mauvais suivi de profil ou une vitesse excessive. Ces trous devront être resondés ;
- b. des données de contrôle de qualité des profils qui indiqueront si la vitesse maximale de remorquage a été dépassée ; les zones de vitesse excessive devront être reprises ;
- c. les sonogrammes seront contrôlés afin de s'assurer que le poisson a été remorqué à la bonne immersion au-dessus du fond et que des données de bonne qualité ont été enregistrées. Les zones comportant des données suspectes seront reprises.

6.3 Détection des structures sous-marines

Les épaves ou obstructions artificielles dépassant du fond, sur le plateau continental, peuvent constituer un danger pour la navigation de surface ou sous-marine. Tous ces objets doivent être localisés, examinés et enregistrés.

Pendant l'exploration initiale, les sonogrammes seront examinés avec soin et tous les contacts susceptibles d'indiquer une obstruction seront repérés méthodiquement comme suit :

- a. numéro du profil exploré ;
- b. date et heure ;
- c. numéro du contact (attribué à courir durant le levé) ;
- d. détails du positionnement ;
- e. voie droite ou voie gauche ;
- f. distance oblique ;
- g. longueur de ligne filée (*layback* du poisson) ;
- h. hauteur du poisson au-dessus du fond ;
- i. évaluation du contact ;
- j. action requise (soit : investigation, profil intercalaire, *quick look*, rien).

Les profils magnétométriques et les sondes doivent être examinés avec soin pour fournir une preuve d'existence supplémentaire.

À la fin d'une recherche, les enregistrements doivent être contrôlés attentivement afin de s'assurer qu'elle a bien été conduite de manière exhaustive. On vérifiera notamment les points suivants :

- a. aussi longtemps qu'une épave, un fond malsain ou une obstruction, constitueront un danger pour la navigation ou une autre activité marine, ils devront être représentés sur les cartes ;
- b. tous les échos classés *non-sub* ou anomalies doivent être retrouvés, classifiés, positionnés et enregistrés. Leur dangerosité pour la navigation doit être confirmée ou infirmée ;
- c. il y a obligation de classer ou de réfuter chaque épave cartographiée, fond malsain, obstruction ou contact précédemment classé *non-sub*. Sauf si leur non-existence est démontrée sans équivoque, ils doivent être maintenus sur les cartes.

Le caractère conclusif des recherches de tous les objets détectés au cours des travaux est un élément important pour apprécier l'exhaustivité du levé.

6.4 Observations diverses et complémentaires

Quelle que soit la méthode de mesure utilisée, la validité et la cohérence des courants de marée observés pendant le levé doivent être évaluées. Les nouvelles observations doivent être comparées aux données de courants antérieures, si elles existent, pour assurer la continuité et l'uniformité ; à défaut, il convient de s'assurer qu'elles concordent avec les courants de marée ressentis durant le levé, qui peuvent être déduits des comparaisons entre les caps et vitesses surface et fond.

Normalement l'établissement hydrographique se charge d'analyser les mesures de courants destinées à figurer sur les cartes.

Les positions du balisage flottant doivent être établies à partir de la moyenne des observations de flux et de jusant, sauf si la position des ancrs ou corps morts est détectée lors des sondages surfaciques.

À titre de contrôle sommaire, la position et la description physique ainsi que les caractéristiques et secteurs de toutes les aides à la navigation, fixes ou flottantes, situées dans la zone du levé, doivent être comparés à ceux des cartes marines, des Livres des feux et des Instructions nautiques. Le positionnement de ces aides doit satisfaire aux normes de précision en usage.

Après vérification *in situ*, la liste finale des aides à la navigation doit être comparée exhaustivement à la liste originale établie à partir des documents précédents, conformément au paragraphe 4.8.

En accord avec ce même paragraphe, toute différence, confirmée par les autorités responsables et constatée par rapport aux données publiées, doit être signalée immédiatement par message ou courriel à l'établissement hydrographique et suivie par un avis.

Toujours conformément au § 4.8, les détails sur les fréquences radio portuaires recueillis pendant le levé doivent être comparés aux ouvrages de radiosignaux et aux Instructions nautiques.

Les détails relatifs à la vie marine, la bioluminescence et la DSL doivent être reportés. Les autres singularités, telles que cratères et lacs de saumure sous-marins, ainsi que les échantillons de sédiments, doivent être transmis, accompagnés d'une description des méthodes d'acquisition.

Si des fronts océaniques, des *eddies* ou ondes internes ont été investigués, les détails sur leurs positions et caractéristiques ainsi que sur les méthodes et capteurs utilisés doivent être fournis et commentés avec les conclusions qui ont été retirées.

6.5 Conformité avec la programmation

L'exhaustivité du levé et sa conformité aux IT et à la programmation doivent être appréciées. Les zones incomplètement hydrographiées, ou qui nécessitent une investigation complémentaire et où les spécifications n'ont pas été satisfaites, doivent être identifiées, et accompagnées de propositions de rectification des lacunes qui peuvent être dues à des contraintes matérielles ou à des circonstances extérieures. Les compléments de travaux recommandés doivent être soulignés, et des propositions doivent être formulées quant à la manière de procéder avec succès à l'avenir.

7. RÉDACTION FINALE

7.1 Le rapport particulier

Quand un dossier de levé est transmis à l'établissement hydrographique, il doit être accompagné d'un rapport rédigé sous une forme ou une autre, expliquant comment il a été constitué. Dans certains cas, comme pour les notes techniques, les propos peuvent être relativement brefs, mais dans la plupart des cas, le rapport particulier est au cœur du levé et doit en expliquer tous les aspects, et commenter toutes les données. Pour les levés bathymétriques conventionnels, le rapport est souvent subdivisé en deux parties, dont des exemples sont fournis à l'appendice 5 du présent chapitre.

Le rapport particulier est l'outil par excellence par lequel le Directeur technique approuve le contenu de TOUS les enregistrements d'un levé. C'est donc un document très important dont l'hydrographe doit soigner tout particulièrement la présentation. Il doit fournir un compte rendu clair et complet de la manière dont le levé a été exécuté, des résultats acquis, des difficultés rencontrées et de ses lacunes. La 1^{ère} partie s'attache en priorité à analyser les précisions obtenues et leur conformité aux IT et à la norme S-44 de l'OHI. La 2^{ème} partie contient un argumentaire technique destiné à soutenir les opinions exprimées en 1^{ère} partie. Il convient de garder à l'esprit qu'il est souvent aussi important de rapporter ce qui n'a pas été fait et pourquoi, que de dire ce qui a été fait et comment.

Un rapport bien fait peut simplifier les échanges ultérieurs entre l'établissement hydrographique et la mission, destinés à élucider les points non couverts par un rapport insuffisamment exhaustif. L'appendice 5 fournit à titre d'exemple un aperçu des pièces à transmettre et un format de compte rendu recommandé pour un levé bathymétrique. Pour les rubriques non applicables, il est utile d'insérer un bref rappel du genre « *Aucune mesure den'a été faite* ».

Le rapport particulier est une pièce aussi importante que les données elles-mêmes et il doit être rédigé et présenté avec autant de soin, de clarté et de précision. La forme sous laquelle il est établi et la procédure de transmission à l'établissement hydrographique varie selon les pays.

Le rapport particulier et les données associées doivent être transmis à l'établissement hydrographique où ils sont évalués et validés rigoureusement. La mission hydrographique conservera une copie complète des données transmises jusqu'à ce qu'il ait été répondu à toutes les questions posées. On ne doit pas perdre de vue que le rapport et l'ensemble des données validées sont archivés, et demeurent la source définitive des informations utilisées pour l'élaboration des futurs produits.

7.2 Expression des besoins

Les IT expliquent l'objet du levé et les principales attentes des clients. Les levés relatifs à la sécurité de la navigation, ou à la pose de câbles sous-marins et de pipelines, sont axés sur la bathymétrie tandis que la guerre des mines et l'archéologie privilégient la découverte d'objets, et l'environnement s'intéresse à la texture des fonds et à la colonne d'eau. Le Service hydrographique précisera les données à transmettre en fin du levé ainsi que le temps alloué.

7.3 Format et densité des données

La plupart des Services hydrographiques disposent de normes détaillées en matière de format et de densité de données. Les IT les moduleront en fonction des systèmes utilisés pour le levé ainsi que pour le contrôle et la validation des données ; elles stipuleront également les densités à adopter.

Les outils modernes de visualisation ont énormément facilité le travail de présentation numérique et graphique des données. Il faut veiller à ce que les vertus de prudence des hydrographes ne soient pas éblouies par une imagerie multicolore créée avec un minimum d'effort et d'interaction humaine.

7.4 Supports d'enregistrements

Les IT préciseront les supports à utiliser pour transmettre les données au client, à savoir, formats entièrement numériques ou minutes d'écriture. Les supports les plus couramment utilisés sont :

- a. les DVD ;
- b. les CD-ROM ;
- c. les supports audio-numériques de type *DAT tape* ;
- d. les minutes d'écriture sur Mylar, Cronaflex, etc.
- e. les enregistrements sur papier.

Quel que soit le support, une attention particulière sera accordée à la transmission et à la manutention pour s'assurer que les données parviendront à destination en bon état. De nombreuses données sont uniques et forment la base des mises à jour et de l'entretien des cartes marines jusqu'au levé suivant, qui n'interviendra probablement pas avant de nombreuses années. Ces archives font dorénavant partie du patrimoine national et doivent recevoir une protection permanente en rapport avec leur importance, car toute perte serait irremplaçable en termes de temps, d'efforts et de matériel.

ACRONYMES UTILISES AU CHAPITRE 7

AISM	Association internationale de signalisation maritime (IALA en anglais).
ATON	<i>Aid to Navigation.</i>
AUV	<i>Autonomous Underwater Vehicle</i> (type de robot sous-marin).
CTD	<i>Conductivity, Temperature, Depth</i> (sondages bathycélérimétriques, Sippican et assimilés).
CLOP	Lieu de position circulaire (<i>Circular Line of Positioning</i>).
CMR	<i>Compact Measurement Record.</i>
CTD	<i>Conductivity, Temperature, Depth.</i>
DGPS	GPS différentiel.
DOP	Affaiblissement ou dilution de la précision (<i>Dilution of Precision</i>).
DSL	<i>Deep Scattering Layer</i> , moins connue sous le nom de « Couche profonde diffusante ».
EGNOS	Service européen de navigation par recouvrement géostationnaire (<i>European Geostationary Navigation Overlay Service</i>).
EMQ	Écart moyen quadratique (RMS en anglais).
EPS	<i>Electronic Positioning System.</i>
ETRS89	<i>European Terrestrial Reference System 1989.</i>
GDOP	Coefficient d'affaiblissement de la précision (<i>Global Dilution Of Precision</i>).
HDOP	Dilution horizontale de la précision.
IN	Instructions nautiques.
IT	Instructions techniques.
ITRF	<i>International Terrestrial Reference Frame</i> (Repère international de référence terrestre).
LOP	Lieu de position (<i>Line of position</i>).
MSK	<i>Minimum-shift keying</i> (type de modulation numérique par déplacement de fréquence à phase continue).
NMEA	<i>National Marine Electronics Association.</i>
OTF	<i>On the Fly</i> (technique GPS de positionnement à la volée).
PPS	<i>Precise Positioning Service.</i>
PRC	<i>Pseudo-range correction.</i>
QC	Contrôle de qualité.
RMS	<i>Root Mean Square.</i>
ROV	<i>Remotely operated vehicle.</i>
RTCM	<i>Radio Technical Commission for Maritime Services.</i>
RTK	<i>Real Time Kinematic</i> (Cinématique temps réel).
SAASM	<i>Selective Availability Anti-Spoofing Module.</i>
SAR	<i>Search & Rescue</i> (recherche et sauvetage en mer).
SEP	<i>Spherical Error Probable.</i>
SMDSM	Système mondial de détresse et de sécurité en mer.
SMF	Sondeur multifaisceaux.
SPS	<i>Standard Positioning Service.</i>
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers.</i>
UUV	<i>Unmanned Underwater Vehicle.</i>
VTM	<i>Vessel Traffic Management.</i>
VTIS	<i>Vessel Traffic Information System.</i>
VTS	<i>Vessel Traffic Services</i> ou <i>Vessel Traffic System.</i>
WAAS	<i>Wide Area Augmentation System</i> (système de renforcement à couverture étendue).

RÉFÉRENCES

Édition 1/04 2004	<i>Hydrographic Quality Assurance Instructions for Admiralty Surveys</i>	Service hydrographique du Royaume-Uni (UKHO)
17 ^{ème} édition 1996	<i>General Instructions for Hydrographic Surveys</i>	Service hydrographique du Royaume-Uni (UKHO)
11 ^{ème} section 1968	<i>Admiralty Manual of Hydrographic Surveying Volume 1</i>	Service hydrographique du Royaume-Uni (UKHO)
1969 à 1973	<i>Admiralty Manual of Hydrographic Surveying Volume 2</i>	Service hydrographique du Royaume-Uni (UKHO)
PP24 (1 ^{ère} & 2 ^{ème} partie) 1987	<i>The Use of Side-scan Sonar for Hydrographic Surveying and the Gathering of Bottom Texture Information</i>	Service hydrographique du Royaume-Uni (UKHO)
5 ^{ème} édition – 1994	<i>“Dictionnaire hydrographique” S-32</i>	Organisation hydrographique internationale, Monaco
5 ^{ème} édition – 2008	<i>“Normes de l’OHI pour les levés hydrographiques” S-44</i>	Organisation hydrographique internationale, Monaco
1 ^{er} janvier 2002	<i>EM 1110-2-1003 “Hydrographic Surveying”</i>	U.S. Army Corps of Engineers, Department of the Army, Washington.
1 ^{er} juillet 2003	<i>EM 1110-1-1003 “NAVSTAR Global Positioning System Surveying”</i>	U.S. Army Corps of Engineers, Department of the Army, Washington.
4 ^{ème} édition 4 juillet 1976	<i>“Hydrographic Manual”</i>	Melvin J. Umbach Rockville, Md. U.S. Department of Commerce National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) National Ocean Service (NOS)
Mars 2003	<i>NOS Hydrographic Surveys “Specifications and Deliverables”</i>	U.S. Department of Commerce National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) National Ocean Service (NOS)

A.A. 2002/2003	<i>“Lezioni di Idrografia teorica ed operativa”</i>	Luigi Sinapi Naples
1976	<i>“Electronic Surveying and Navigation”</i>	Simo H. Laurila John Wiley & Sons, Inc New York (USA)
Janvier 1983	<i>“Electronic Surveying in practice”</i>	Simo H. Laurila John Wiley & Sons, Inc New York (USA)
1991	<i>“Radionavigation system”</i>	Börje Forssell Prentice Hall International (Royaume-Uni) Ltd
Juillet 1974	<i>“Sea Surveying”</i>	Alam E. Ingham John Wiley & Sons, Inc New York (USA)

BIBLIOGRAPHIE

Édition 1/04 2004	<i>Hydrographic Quality Assurance Instructions for Admiralty Surveys</i>	Service hydrographique du Royaume-Uni (UKHO)
17 ^{ème} édition 1996	<i>General Instructions for Hydrographic Surveys</i>	Service hydrographique du Royaume-Uni (UKHO)
11 ^{ème} section 1968	<i>Admiralty Manual of Hydrographic Surveying Volume 1</i>	Service hydrographique du Royaume-Uni (UKHO)
1969 to 1973	<i>Admiralty Manual of Hydrographic Surveying Volume 2</i>	Service hydrographique du Royaume-Uni (UKHO)
PP24 (1 ^{ère} & 2 ^{ème} partie) 1987	<i>The Use of Side-scan Sonar for Hydrographic Surveying and the Gathering of Bottom Texture Information</i>	Service hydrographique du Royaume-Uni (UKHO)
PP25 1990	<i>The assessment of the Precision of Soundings</i>	Service hydrographique du Royaume-Uni (UKHO)
1998	<i>“La georeferenziazione delle informazioni territoriali”</i>	Luciano Surace Estratto dal "Bollettino di geodesia e scienze affini"
Prima Edizione – 2000	<i>“GPS Principi Modalità e Tecniche di Posizionamento”</i>	A. Cina Celid
Prima Ristampa – 2001	<i>“Topografia”</i>	L. Costa Cooperativa Libreria Universitaria – Gênes
Terza Edizione – 1949	<i>“Manuale di Idrografia per la costruzione delle carte marine</i>	Manoia G. Romagna Accademia Navale di Livorno
II 3100. Quinta Edizione – 1992/Prima Ristampa – 1998	<i>“Manuale dell’Ufficiale di Rotta”</i>	Istituto Idrografico della Marina, Gênes
NorMas FC 1028 Seconda Edizione – 1978	<i>“Norme di Massima per i Rilievi Idrografici”</i>	Istituto Idrografico della Marina, Gênes
5 ^{ème} édition – 1994	<i>“Dictionnaire hydrographique” S–32</i>	Organisation hydrographique internationale, Monaco
4 ^{ème} édition – 1998	<i>“Normes de l’OHI pour les levés hydrographiques” S–44</i>	Organisation hydrographique internationale, Monaco
29 avril 1998	<i>“Normes de l’OHI pour les levés hydrographiques” Supplement to S–44 Draft enclosed in letter IHB File N. S3/7198</i>	Organisation hydrographique internationale, Monaco
1 ^{er} janvier 2002	<i>EM 1110-2-1003 “Hydrographic Surveying”</i>	U.S. Army Corps of Engineers, Department of the Army,

		Washington.
1 ^{er} juin 2002	<i>EM 1110-1-1004 "Geodetic and Control Surveying"</i>	U.S. Army Corps of Engineers, Department of the Army, Washington.
1 ^{er} juillet 2003	<i>EM 1110-1-1003 "NAVSTAR Global Positioning System Surveying"</i>	U.S. Army Corps of Engineers, Department of the Army, Washington.
31 août 1994	<i>EM 1110-1-1005 "Topographic Surveying"</i>	U.S. Army Corps of Engineers, Department of the Army, Washington.
4 ^{ème} édition 4 juillet 1976	<i>"Hydrographic Manual"</i>	Melvin J. Umbach Rockville, Md. U.S. Department of Commerce National Oceanic and Atmos- pheric Administration (NOAA) National Ocean Service (NOS)
Mars 2003	<i>NOS Hydrographic Surveys "Specifications and Deliverables"</i>	U.S. Department of Commerce National Oceanic and Atmos- pheric Administration (NOAA) National Ocean Service (NOS)
A.A. 2002/2003	<i>"Lezioni di Idrografia teorica ed operativa"</i>	Luigi Sinapi Naplesi
1976	<i>"Electronic Surveying and Navigation"</i>	Simo H. Laurila John Wiley & Sons, Inc New York (USA)
Janvier 1983	<i>"Electronic Surveying in practice"</i>	Simo H. Laurila John Wiley & Sons, Inc New York (USA)
1991	<i>"Radionavigation system"</i>	Börje Forssell Prentice Hall International (Royaume-Uni) Ltd
Juillet 1974	<i>"Sea Surveying"</i>	Alam E. Ingham John Wiley & Sons, Inc New York (USA)