

CHAPITRE 1 PRINCIPES DES LEVES HYDROGRAPHIQUES

1. INTRODUCTION

Un levé hydrographique traite de la configuration du fond marin et des aires terrestres adjacentes aux mers, océans, lacs, rivières, bassins portuaires, et autres étendues d'eau existant sur la terre. Au sens strict, il est défini simplement comme un levé des régions aquatiques; cependant, il peut inclure une large variété d'autres objectifs, comme la mesure des marées, des courants, de la gravité, du magnétisme terrestre et la détermination des propriétés physiques et chimiques de l'eau. L'objectif principal de la plupart des levés hydrographiques est d'obtenir les données essentielles pour la compilation des cartes marines avec un accent sur les détails qui peuvent affecter la sécurité de la navigation. Les autres objectifs incluent l'acquisition des informations nécessaires à l'établissement des produits nécessaires à la navigation, à la gestion des zones côtières, à l'ingénierie et à la science¹.

Le but d'un levé hydrographique est :²

- de recueillir des données géoréférencées, lors des levés réguliers en mer, le long des côtes et à terre. Ces données sont relatives à :
 - ◆ la configuration de la côte, y compris les infrastructures artificielles pour la navigation maritime, c.-à-d. tous les objets remarquables sur la côte qui intéressent les marins ;
 - ◆ les profondeurs dans la zone, présentant de l'intérêt en regard des risques encourus par la navigation et de toutes les autres activités marines ;
 - ◆ la nature des fonds marins ;
 - ◆ les marées et les courants ;
 - ◆ les propriétés physiques de la colonne d'eau ;

- de traiter l'information recueillie pour créer des bases de données permettant la production de cartes thématiques, de cartes marines et autres types de documents nécessaires à la satisfaction des besoins les plus courants cités ci-après :
 - ◆ navigation et gestion du trafic maritime ;
 - ◆ opérations navales ;
 - ◆ gestion intégrée des zones côtières ;
 - ◆ protection de l'environnement marin ;
 - ◆ exploitation des ressources marines et pose de câbles et conduits sous-marins ;
 - ◆ délimitation des frontières maritimes (mise en pratique de la convention UNCLOS) ;
 - ◆ études scientifiques.

Les marins font une entière confiance aux cartes marines et si aucun danger n'est indiqué, ils considèrent qu'il n'en n'existe pas, aussi la carte marine est-elle le produit final principal d'un levé hydrographique. Sa précision et son adéquation dépendent de la qualité des données recueillies pendant le levé³. Une carte marine est une représentation graphique de l'environnement marin illustrant la nature et la forme de la côte, les profondeurs des eaux, le caractère général et la configuration des fonds, les emplacements des dangers pour la navigation, l'état de la marée, les avertissements relatifs aux aides artificielles à la navigation et les caractéristiques du champ magnétique terrestre. Les cartes marines actuelles peuvent être présentées sous la forme d'une carte papier traditionnelle ou d'une ENC (carte électronique de navigation).

¹ NOAA Hydrographic Manual Part-1, Edition July 4, 1976, P-1-3, www.thsoa.org/pdf/hm1976/part1ch123.pdf

² Organisation Hydrographique Internationale, Monaco, *Les politiques maritimes nationales et les services hydrographiques* (M-2), P-13

³ NOAA Hydrographic manual Part-1, Edition July 4, 1976, P-1-3, www.thsoa.org/pdf/hm1976/part123.pdf

Une ENC n'est pas simplement la version numérique d'une carte papier; elle introduit une nouvelle méthode de navigation avec des capacités et des limitations très différentes de celles de la carte papier. Elle est devenue l'équivalent légal de la carte papier tel qu'approuvé par l'Organisation Maritime Internationale. Les divergences d'objectifs ont conduit à la publication de plusieurs « nouvelles générations » de cartes. Les cartes bathymétriques développées à partir des données numériques ou créées à partir des données obtenues par sondeurs–multifaisceaux permettent la visualisation du relief sous-marin en utilisant des teintes bleues variables et des isobathes. De la même façon, les mosaïques du sondeur latéral ont été publiées sous forme de cartes ou d'atlas pour caractériser les larges structures géomorphologiques. Ces cartes n'ont plus comme objet la sécurité de la navigation, mais plutôt, la connaissance de l'environnement exigée pour la navigation sous-marine, les recherches océanographiques ou les applications à but économique, telles que la pose de câbles sous-marins, la prospection minière des fonds marins et l'exploitation des hydrocarbures.

Les techniques de levés hydrographiques connaissent des innovations fondamentales dans le domaine du recueil des données. Les sondeurs acoustiques multifaisceaux (SMF) et les lasers aéroportés assurent maintenant une couverture presque totale du fond comparé aux sondages réalisés auparavant au moyen de profils bathymétriques obtenus par sondeur à faisceau vertical. La possibilité de pouvoir positionner précisément les données dans le plan horizontal s'est énormément accrue grâce à la disponibilité de systèmes de positionnement par satellites, tout particulièrement lorsque ceux-ci sont renforcés par des techniques différentielles. Ces développements technologiques ont été particulièrement significatifs et les navigateurs peuvent maintenant déterminer eux-mêmes leurs positions avec une précision plus grande que celles indiquées sur les cartes anciennes.⁴

2. LEVÉS HYDROGRAPHIQUES

2.1 Spécifications des levés

La décision d'effectuer un levé est le résultat d'un ensemble de considérations d'opportunité, de demandes ou de rapports des usagers, de besoins de défense et de toute autre expression de besoin. L'inscription au programme d'un levé spécifique suit une évaluation de tous ces besoins classés en fonction de priorités. Parmi les nombreux facteurs objectifs et subjectifs qui influencent ces priorités se trouvent la stratégie interne du SH, l'appréciation qualitative et quantitative de la fréquentation et du trafic maritime, l'état des levés dans la zone et la nature évolutive des fonds⁵.

Afin de répondre de manière systématique aux spécifications des différents besoins exprimés dans la zone à lever, quatre ordres de précision ont été définis dans la publication S-44 de l'OHI, édition 2008. Ces ordres sont décrits dans les paragraphes qui suivent. Le tableau 1 en donne un aperçu général, mais elle doit être consultée en regard des normes complètes.⁶

2.1.1 Ordre spécial C'est le plus rigoureux de tous les ordres et son usage est réservé aux parages pour lesquels la profondeur disponible sous la quille revêt une importance critique. La sensibilité de ce critère fait qu'une couverture complète des fonds est exigée et que la taille des objets à détecter au cours du levé est intentionnellement très petite. Par suite de la criticité du tirant d'eau, il n'est pas envisagé d'appliquer cet ordre aux fonds de plus de 40 mètres. Des exemples de zones pour lesquels une couverture complète doit être envisagée sont les aires de mouillage, les ports et les seuils critiques des chenaux empruntés par le trafic maritime.

2.1.2 Ordre 1a Cet ordre est réservé aux zones pour lesquelles les fonds sont suffisamment faibles pour que des obstructions naturelles ou artificielles constituent des dangers potentiels pour la

⁴ Organisation Hydrographique Internationale, Monaco, *Les politiques maritimes nationales et les services hydrographiques* (M-2), P-24

⁵ NOAA Hydrographic manual Part-1, Edition July 4, 1976, P-2-1, www.thsoa.org/pdf/hm1976/part1ch123.pdf

⁶ Organisation Hydrographique Internationale, Monaco, *Normes de l'OHI pour les levés hydrographiques (5e édition)*

navigation de surface, mais où la profondeur disponible sous la quille est moins critique que pour l'ordre spécial décrit ci-dessus. Du fait de la présence possible d'obstructions naturelles ou artificielles dangereuses pour la navigation, une couverture complète des fonds est également exigée, mais la taille des objets est plus grande que pour l'ordre spécial. L'importance du facteur tirant d'eau décroît avec l'augmentation des profondeurs, aussi la taille des objets à détecter augmente-t-elle par fonds de plus de 40 mètres. L'ordre la peut être limité aux fonds de moins de 100 mètres.

2.1.3 Ordre 1b Cet ordre est destiné aux fonds de plus de 100 mètres pour lesquels une représentation générale des fonds peut être considérée comme suffisante pour les besoins de la navigation commerciale transitant dans la zone. Une couverture complète n'est pas requise, ce qui peut se traduire par le fait que des détails peuvent échapper aux investigations bien que l'espacement maximum entre profils soit choisi afin de limiter la taille des structures non détectées. Cet ordre n'est recommandé que quand la profondeur disponible sous la quille n'est plus un critère. Un exemple sera une zone où la morphologie des fonds est telle que la présence d'une remontée de fond naturelle ou artificielle dangereuse pour les navires transitant dans la zone soit improbable.

2.1.4 Ordre 2 Cet ordre est le moins exigeant de tous ; il est destiné aux parages pour lesquels la profondeur est telle qu'une représentation générale des fonds est suffisante. Une couverture complète des fonds n'est plus nécessaire. Il est recommandé de limiter l'ordre 2 aux profondeurs de plus de 100 mètres car on peut estimer qu'au-delà de cette valeur, l'existence de remontées de fond naturelles ou artificielles qui auraient échappées au levé d'ordre 2, bien que suffisamment importantes pour représenter un danger pour la navigation, est peu probable.

2.2 Planification des levés

La planification des levés couvre une large gamme d'activités partant de l'instruction du levé au sein du Service hydrographique, incluant la rédaction des Instructions Techniques (IT) et la planification détaillée des travaux et se concluant par l'inscription du levé à la programmation d'un navire hydrographique ou d'une mission embarquée. Elle comprend des échanges au niveau central avec les administrations concernées, la recherche d'autorisations par la voie diplomatique et l'allocation de nombreuses ressources coûteuses. Elle inclut également des choix quant à l'affectation des moyens et le management au jour le jour des activités hydrographiques à la mer. La planification des levés consiste à prendre en compte toutes ces activités pour en faire un ensemble cohérent, ayant pour but la réalisation des travaux programmés.

Un levé commence longtemps avant le début du recueil des données. Parmi les décisions à prendre, on trouve notamment⁷ :

- les limites exactes de la zone à lever ;
- le type de levé (reconnaissance ou levé classique) et l'espacement des profils choisi en fonction de l'échelle de la carte qu'ils contribueront à établir ;
- la durée des travaux (court ou long terme) ;
- le type de plateforme (navires hydrographiques, vedettes, aéronefs, navires affrétés ou fournis au titre d'accords de coopération) ;
- les données complémentaires (couvertures photographiques aériennes ou satellitaires, géodésie, marée) ;
- les facteurs limitatifs (budget, contraintes diplomatiques ou opérationnelles, limites des systèmes de positionnement, logistique).

⁷ Cf. Bowditch -The American Practical Navigator, P-411, <http://www.irbs.com/bowditch/>

TABLEAU 1

Normes minimales applicables aux levés hydrographiques

(Liste à consulter en regard des normes complètes de la publication S-44 de l'OHI, 5^{ème} édition 2008 - <http://www.iho-ohi.net>)

Ordre	Spécial	1a	1b	2
Description des zones à lever	Zones pour lesquelles le tirant d'eau est un facteur critique	Zones de fonds inférieurs à 100 mètres, mais où la profondeur disponible sous la quille est moins critique quoique des remontées de fonds significatives pour la navigation puissent exister.	Fonds de plus de 100 mètres, mais où la profondeur disponible sous la quille n'est plus un facteur sensible pour la navigation de surface.	Zones de profondeurs supérieures à 100 mètres et où une représentation générale des fonds est considérée comme suffisante.
Niveau de confiance maximum admissible: Incertitude horizontale totale : 95%	2 mètres	5 mètres + 5% de la profondeur	5 mètres + 5% de la profondeur	20 mètres + 10% de la profondeur
Niveau de confiance maximum admissible: Incertitude verticale totale : 95%	a = 0.25 mètre b = 0.0075	a = 0.5 mètre b = 0.013	a = 0.5 mètre b = 0.013	a = 1.0 mètre b = 0.023
Couverture totale du fond	Exigée	Exigée	Non requise	Non requise
Détection des objets	Objet cubique d'arête > 1 mètre	Objet cubique d'arête > 2 mètres, par profondeurs inférieures à 40 mètres; 10% de la profondeur au-delà de 40 mètres	Sans objet	Sans objet
Espacement maximum des profils	Sans objet (couverture totale)	Sans objet (couverture totale)	3 fois la profondeur moyenne, ou 25 mètres, en prenant celui des deux qui est le plus grand. Pour les levés lidar, espacement des spots : 5 x 5 mètres	4 fois la profondeur moyenne
Positionnement du balisage fixe et des détails topographiques utiles pour la navigation. (degré de confiance à 95%)	2 mètres	2 mètres	2 mètres	5 mètres
Positionnement du trait de côte et des détails topographiques moins utiles pour la navigation. (degré de confiance à 95%)	10 mètres	20 mètres	20 mètres	20 mètres
Positionnement moyen du balisage flottant (degré de confiance à 95%)	10 mètres	10 mètres	10 mètres	20 mètres

Notes :

- 1: Notant que l'incertitude affectant les sondes comporte un terme constant et un terme fonction de la profondeur, la formule ci-dessous sera utilisée pour calculer l'incertitude verticale totale avec un degré de confiance de 95%. Les paramètres « a » et « b » pour chaque ordre indiqué sur le tableau ainsi que la profondeur « d » doivent être introduits dans la formule afin de calculer l'incertitude maximale admissible pour une profondeur donnée :

$$\pm \sqrt{a^2 + (b \times d)^2}$$

où :

- a est le terme de l'incertitude qui est indépendant de la profondeur
 b est le terme de l'incertitude qui varie avec la profondeur
 d est la profondeur
 (b x d) est le facteur de l'incertitude qui varie avec la profondeur
- 2: Pour répondre aux besoins de la sécurité de la navigation, la mise en œuvre d'un système mécanique de dragage hydrographique peut être envisagée pour garantir une profondeur d'eau sous la quille suffisante pour les ordres spéciaux et 1a.
- 3: Par objet cubique, on entend un cube de 1 mètre de côté. Il convient de noter que les critères de détection requis pour les ordres spéciaux et 1a de l'OHI correspondent à des exigences minimales. Dans certaines circonstances, les services ou bureaux hydrographiques peuvent estimer qu'il est nécessaire de détecter des objets de plus faible dimension susceptibles de représenter un danger pour la navigation. Pour l'ordre 1a, le seuil de 40 mètres fixé pour assouplir les critères de détection correspond à un majorant du tirant d'eau des navires.
- 4: L'espacement des profils peut être augmenté si des dispositions particulières destinées à assurer une densité de sondages suffisante sont mises en œuvre.
 « L'espacement maximum des profils » doit être interprété comme:
 - l'espacement des profils pour les sondeurs monofaisceaux, ou
 - la distance séparant les fauchées dans le cas de systèmes multifaisceaux.
- 5: Ces remarques ne s'appliquent que quand ce type de mesures est requis pour le levé.

Planification des levés (suite du § 2.2)

Une fois ces questions réglées, toutes les informations disponibles dans la zone du levé sont rassemblées et examinées. Une telle collecte peut inclure des couvertures photographiques aériennes, des données satellitales, des cartes topographiques, des cartes marines en service, de l'information géodésique, de l'information sur la marée et tout autre élément qui peut affecter le levé. La direction du SH entreprendra normalement cette planification stratégique en liaison avec d'autres services à la suite de quoi des IT seront rédigées et transmises pour exécution. Les détails fournis dans les IT pourront inclure tout ou partie des points suivants, selon le type de levé :⁸

- les limites du levé ;
- les données requises et leur résolution ;
- la méthode de contrôle du positionnement et la précision recherchée ;
- l'utilisation du sondeur latéral ou de tout autre capteur ;
- si nécessaire, des détails sur les éléments à faire figurer dans le rapport particulier et la date limite d'achèvement des travaux ;

⁸ Admiralty, General Instructions for Hydrographic Surveys (GIHS), Sixth Edition, 1992, P-5-3

- une justification parfois détaillée des priorités du levé, des méthodes à employer, des observations particulières à prendre en compte et toute autre indication pertinente.

De plus, les annexes des IT donnent des instructions ou des recommandations sur les points suivants :

- système géodésique, projection et carroyage à utiliser;
- extrait du fichier d'épaves de la région;
- références de nivellement et observations requises de la marée;
- instructions particulières pour la collecte des données concernant l'océanographie, la géophysique, les instructions nautiques, la photographie aérienne, etc.

À la réception des IT, les hydrographes chargés de l'exécution du levé compilent alors les informations relatives à la célérité du son, la climatologie, la transparence de l'eau, toutes les données des levés antérieurs, les informations provenant des livres des feux, les instructions nautiques et les avis aux navigateurs. L'information sur la marée est examinée en détail et les emplacements des marégraphes sont choisis. Les données de nivellement local sont examinées pour s'assurer qu'elles permettent de satisfaire à la norme de précision attendue et que le marégraphe peut être rattaché à la référence verticale utilisée pour le levé. Le canevas géodésique local est vérifié afin d'en connaître la précision et les anomalies et pour déterminer l'emplacement des stations utilisées par les systèmes de positionnement utilisés au cours des travaux.

L'établissement d'une planification de levé régulier et de la planification détaillée des travaux qui la complète doit permettre de réunir les conditions nécessaires à l'exécution d'un levé dans de bonnes conditions d'efficacité. La planification systématique traite de la façon dont le levé doit être préparé, exécuté et exploité. Cette planification doit être pesée avec soin et tenir compte de tous les imprévus possibles. Elle doit inclure la formation, les logiciels, l'entretien et les mises à niveau des équipements, la logistique, les demandes de données, le calendrier d'exécution, la sécurité et les conditions météorologiques. La planification détaillée s'intéressera aux caractéristiques locales, à la préparation des profils à sonder, au zéro des sondes, à la densité des données, aux équipements spécifiques et à la répartition du personnel chargé d'exécuter les travaux inscrits dans la planification du levé régulier. Quelques aspects de la planification sont évoqués ci-dessous :

- La formation des hydrographes devrait être faite durant les opérations de levé pour s'assurer que les compétences appropriées sont maintenues.
- Les logiciels d'acquisition et de traitement des données sont essentiels dans un levé. Ils doivent être d'emploi facile et le personnel qui les utilise doit être familier avec leurs diverses fonctionnalités.
- Les équipements et les plateformes doivent être choisis en fonction du travail à faire. Certains équipements sont adaptés à des types de levés particuliers alors que d'autres seront plus généraux dans leur utilisation. Il est capital de procéder à un choix d'équipements judicieux.
- Les objectifs du levé vont toujours permettre de décider des besoins en données (densité, couverture et précision). Cependant, s'il n'y a pas de restriction au niveau des coûts et du programme de travail, il est souhaitable de procéder à la mise en œuvre d'un maximum de senseurs.
- Le calendrier d'exécution des travaux est souvent un élément critique dans un levé hydrographique. La demande de données est presque toujours associée à un délai de livraison qui impose de procéder au recueil et au traitement des données à l'intérieur d'un créneau spécifique. Ceci nécessite que les ressources en personnel et en équipements soient disponibles en temps utile. Dans certains cas, si le calendrier de travail ne peut pas être respecté, le levé ne sera pas prescrit et d'autres sources

d'information seront envisagées. Cela étant, il est important de planifier et d'analyser tous les aspects de la planification du levé régulier avec comme premier objectif, le respect du calendrier.

- La Sécurité est la principale considération. Il est primordial que la personne responsable sur le site fasse une évaluation de chaque situation pour parer aux dangers potentiels et s'il y a des risques, prenne des dispositions avant de poursuivre.
- L'information des autorités locales et des administrations portuaires doit être faite suffisamment tôt pour leur permettre d'alerter les pratiques.
- Les profils de sonde réalisés au moyen de sondeurs multifaisceaux doivent être parallèles aux isobathes de la zone à sonder, ce qui a pour effet de réduire les problèmes de recouvrement résultant des différentes tranches de profondeurs. A l'inverse, avec les sondeurs verticaux monofaisceaux, les profils doivent être perpendiculaires aux isobathes pour faciliter la détermination des changements de profondeurs. Les profils d'un sondeur multifaisceaux doivent être espacés de façon à obtenir un bon recouvrement ou une bonne densité de données afin de satisfaire aux normes de la publication S-44.
- L'indication des références géodésiques fait partie des données fondamentales du levé. Suivant les règles de l'art, il faut préciser clairement dans le rapport particulier du levé les références verticales et horizontales et les procédures de contrôle utilisées pour les confirmer. Le système WGS-84 est d'un emploi généralisé dans le monde.
- La densité des données variera selon les méthodes de levé, les profondeurs et le besoin. Les méthodes de levé seront déterminées en fonction des équipements disponibles, du personnel et des conditions locales. Si l'on ne dispose que d'un sondeur vertical monofaisceau, la densité des données sera plus faible. Avec un système multifaisceaux, plus la profondeur est grande, moins dense seront les données, à moins d'effectuer plusieurs profils. Le type de levé conditionnera la redondance des données ou les recouvrements.
- Il est important de standardiser autant que possible les équipements afin d'optimiser la formation, l'entretien et les frais généraux.

2.3 Acquisition des données

L'acquisition des données dépend de plusieurs facteurs. Les besoins du levé, les plateformes utilisées, les équipements disponibles et le temps alloué à une tâche particulière détermineront la quantité de données acquises. Une quantité importante de données peut être acquise en utilisant les derniers logiciels hydrographiques et des capteurs tels que les sondeurs multifaisceaux. En fait, le but du levé dictera toujours le besoin en données (densité, recouvrement et précision). Cependant, s'il n'y a pas de contraintes au niveau des coûts et du calendrier, le plus grand nombre de données possible devra être acquis durant les travaux sur le terrain. La collecte des données devra être faite de façon méthodique en commençant par une extrémité de la zone et en terminant par l'autre.

Il convient de faire la différence entre le recouvrement et la densité des sondages. La densité des sondages est le nombre de sondes par unité de surface alors que le recouvrement est relatif à la redondance des données ou au recueil de données à différents moments au même emplacement. Le type de levé définit les besoins en recouvrements. La couverture totale du fond sera fonction de la densité des données, laquelle permettra de s'assurer que toutes les obstructions existantes ont bien été localisées. Ces notions doivent être clairement comprises par ceux qui prescrivent un levé et par ceux qui l'exécutent afin d'assurer la conformité avec les normes de la S-44.

2.4 Traitement des données

Le traitement des données doit être réalisé selon des critères de contrôle de qualité sévères. Les données hydrographiques sont collectées par des systèmes automatisés ou converties dans un format automatisé. Les données finales sont traitées et tracées à l'aide de systèmes informatiques à bord du navire ou dans un bureau à terre. La méthode « acquisition-traitement-acquisition »⁹ est une approche standard pour effectuer un levé hydrographique. Les données collectées sont traitées au fur et à mesure et dans un deuxième temps, les trous dans la couverture et les données douteuses sont resondées. La plupart des systèmes hydrographiques sont capables d'opérer en « *field-finish* » et d'aboutir à un traitement final où les données de levé sont acquises, traitées, tracées et analysées sur le terrain. La planification du levé doit être suffisamment exhaustive pour parvenir à une approche intégrée qui inclue à la fois le traitement des données en temps réel et leur traitement en temps différé. Un exemple d'un tel modèle est donné ci-dessous.¹⁰

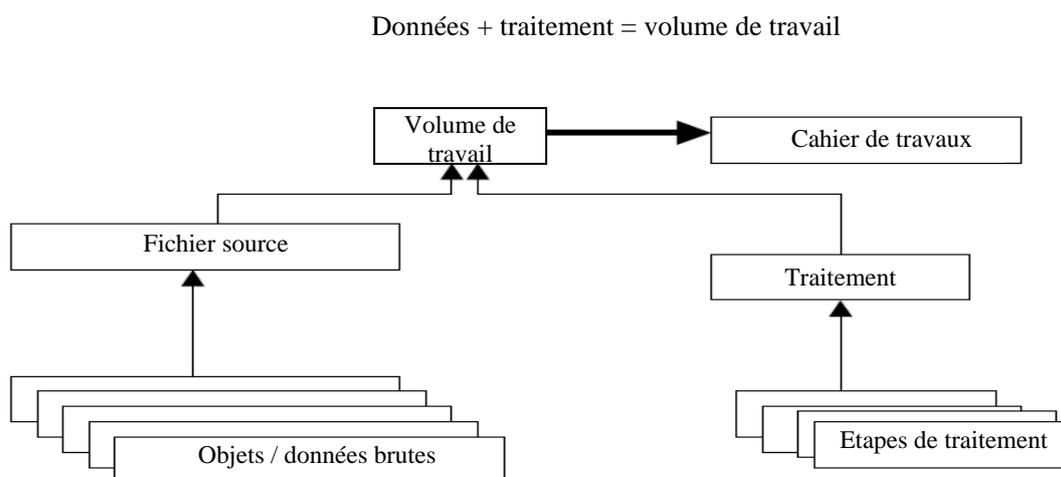


Fig. 1.1 « Modèle de traitement des données »

Ce modèle décrit les différentes procédures pour traiter l'information hydrographique de façon idéale. Ces dernières comprennent plusieurs étapes. Les commentaires sur les résultats et les statistiques relatives à l'exécution de chacune de ces étapes doivent être enregistrés dans un cahier de travaux. De plus, l'origine et les informations générales de qualité pour toutes les nouvelles données doivent être décrites dans un fichier source qui est stocké dans la base de données.

Le but fondamental du traitement des données est la production de données validées, lesquelles ont été suffisamment traitées, c.-à-d., ont subi des transformations au moyen de différentes procédures et à différentes stades, ou ont été suffisamment visualisées pour permettre une évaluation. Les différentes étapes de traitement peuvent être appliquées en temps réel ou en temps différé, mais il faut s'assurer que le produit final répond aux normes et spécifications de l'OHI.

⁹ cf. B. Bourgeois, F. Petry, M. Harris & P. Alleman, "A GIS Integration Approach for Dynamically Reconfigurable Surveys", The Hydrographic Journal, January 1999, P 3-10

¹⁰ cf. Pentti Junni & Ralf Lindgren, "The Hydrographic System – Co-operation, Concept and Future", Finish Maritime Administration, <http://www.esri.com/library/userconf/proc97/proc97/pap619/pap619.html>

Les données brutes doivent être traitées avec soin. Il faut s'assurer que toutes les erreurs ont été éliminées et que toutes les corrections ont été faites, par exemple, l'application des coefficients d'étalonnage et de calage du système et des senseurs ainsi que l'application des corrections variables telles que les profils de célérité ou la marée pour la réduction des sondes. Le processus de traitement doit s'efforcer d'utiliser toutes les sources d'information disponibles pour confirmer qu'aucune sonde pertinente pour la navigation n'a été omise et que les données sont de bonne qualité. Quelques étapes de traitement ont été décrites plus bas à titre indicatif, mais elles ne sont en rien exhaustives.¹¹

- **Position** : Fusion des données de positionnement des différents senseurs (si nécessaire), qualification des données et élimination des sauts de positionnement.
- **Correction des profondeurs** : Les corrections doivent être appliquées pour les variations de hauteurs d'eau, les paramètres des centrales d'attitude et les variations de tirant d'eau du porte-sondeur (changement d'assiette due à la vitesse et changement progressif causé par la consommation de carburant). Il doit être possible de rejouer le traitement des données corrigées en temps réel.
- **Correction d'attitude** : Les données d'attitude (lacets, tangage, roulis) doivent être qualifiées et les sauts de données éliminés.
- **Vitesse du son** : Les corrections dues à la réfraction doivent être calculées et appliquées; si ces corrections ont été déjà appliquées en temps réel lors du recueil des données, il doit être possible de revenir en arrière et d'utiliser un profil de célérité différent. Avec l'apparition des SMF, les corrections de célérité sont devenues critiques.
- **Fusion des positions et des sondes** : Le décalage en temps et le décalage géométrique dû à l'implantation des senseurs doivent être pris en considération.

2.5 Analyse des données

La précision des mesures du levé doit toujours être détaillée afin de démontrer leur fiabilité, car aucun équipement n'est entièrement sans défaut et les erreurs sont présentes dans toutes les observations. De plus, des erreurs sont introduites dans les calculs du fait des approximations ou des arrondis. Les techniques d'observations sont conçues pour éliminer toute les erreurs aléatoires significatives qui peuvent être analysée au moyen de méthodes rigoureuses afin de quantifier la précision des observations. Quelques sources d'erreurs sont présentées ci-dessous avec leur modules et mesures correctives:

ERREUR	MODULE	ACTION CORRECTIVE
Faute opératoire	Grand	Formation, amélioration des méthodes
Constante	Généralement petit, mais fixe	Étalonnage ou procédures
Périodique	Généralement petit, mais variable	Répétition des procédures, même pour les erreurs importantes
Aléatoire	Généralement petit	Elimination par répétition des observations

Les erreurs constantes, systématiques et périodiques sont fréquemment regroupées ensemble sous l'appellation « d'erreurs systématiques ». Les erreurs constantes et systématiques sont cumulatives et ne peuvent pas être réduites par répétition des observations. Les erreurs aléatoires sont présentes dans

¹¹ cf. L.C. 5/2001 de l'OHI: "Guidelines for the Processing of High Volume Bathymetric Data", Para-3.2, datée du 5 oct. 2001.

toutes les observations et le résultat ne peut jamais être exact. Ces erreurs peuvent être positives ou négatives et généralement de petites dimensions.

Il est important de noter qu'aucune méthode de compensation ne pourra donner une solution précise à partir d'observations imprécises. Toutes les erreurs autres que les petites erreurs aléatoires doivent être éliminées avant la compensation. Cependant, il peut être possible d'isoler une erreur « systématique » par analyse, pourvu que les données soient disponibles en nombre suffisant. Il est clairement souhaitable de savoir quand les erreurs constantes et/ou systématiques sont présentes dans les observations. Les erreurs constantes sont souvent difficiles à détecter et peuvent n'apparaître que lors des calculs ou au cours de vérifications spéciales; par exemple un quartz de telluromètre incorrectement étalonné pourra être détecté par comparaison avec un autre telluromètre. Cependant les erreurs périodiques et aléatoires peuvent être détectées par analyse de séries d'observations. La différence algébrique entre chaque observation et la moyenne de toutes les observations d'une série se nomme résidu. S'il n'y a que des erreurs aléatoires, les écarts résiduels varieront aléatoirement en module et en signe (+/-). Si les erreurs sont systématiques, les modules et/ou les signes des résidus reflèteront cette tendance systématique. Pour faciliter l'analyse des données, les attributs des données brutes ainsi que les métadonnées doivent être enregistrés pour évaluation ultérieure.

2.6 Qualification des données

La qualité d'une donnée implique son « adaptation à l'utilisation ». C'est la capacité d'un ensemble de données ou de sa représentation graphique de satisfaire l'opérateur chargé de la validation. L'erreur est la différence entre les données mesurées et la vérité terrain ; son appréciation est l'enjeu principal de la qualification. Le terme erreur est souvent utilisé globalement pour décrire toutes les causes qui font dévier les données de ce qu'elles devraient être¹². Pour permettre une évaluation complète de la qualité des données d'un levé, il est nécessaire d'enregistrer ou d'instruire certaines informations relatives aux données recueillies ; ce type d'information est important pour permettre l'exploitation des données du levé par toutes sortes d'utilisateurs ayant des besoins différents, et *a fortiori* si les besoins en question ne sont pas connus quand les données sont collectées. Le processus de qualification des données consiste à leur adjoindre des attributs dont l'ensemble se nomme métadonnées. Les métadonnées doivent comprendre, au minimum, les informations concernant :¹³

- le levé en général ; par exemple la date, la région, les équipements utilisés, le nom du navire ou de la mission hydrographique ;
- le système de référence géodésique c.-à-d. les références verticales et horizontales, y compris les paramètres de rattachement au WGS84 si un système local est utilisé ;
- les procédures d'étalonnage et leurs résultats ;
- la célérité du son ;
- les données de marée et le processus de réduction des sondes ;
- la précision acquise et les niveaux de fiabilité respectifs.

Les métadonnées doivent être de préférence dans un format numérique et faire partie intégrante des enregistrements du levé. Si ce n'est pas faisable, une information similaire doit être incluse dans les documents du levé. La qualité des données peut être obtenue au moyen d'un contrôle de qualité efficace, par procédé automatique ou manuel.¹⁴

- **Contrôle de qualité automatique (non interactif)** : Les coordonnées (c.-à-d. positions et profondeurs) obtenues sont contrôlées automatiquement par un programme utilisant des

¹² Patrick McGlamery, "Issues of Authenticity of Spatial data", University of Connecticut USA, 66th IFLA Council and General Conference, <http://magic.lib.unconn.edu>

¹³ Organisation Hydrographique Internationale, Monaco - Normes de l'OHI pour les levés hydrographiques (S-44, 5e édition 2008) - Section 5.2.

¹⁴ cf. LC 45/2001 de l'OHI, "Directives pour le traitement d'importants volumes de données bathymétriques", Para-3.3, du 5 oct. 2001.

algorithmes de statistiques convenablement documentés, testés et ayant démontré leur capacité à produire des résultats répétables et précis.

- **Contrôle de qualité manuel (interactif) :** L'utilisation de la visualisation en 3-D est fortement recommandée. Ces outils doivent permettre la visualisation des données avec la possibilité d'agrandir l'image produite. Le système de processus interactif doit aussi offrir différents modes de visualisation, par exemple : les tracés de profondeurs, les tracés d'erreurs, un profil unique, un faisceau unique, la rétrodiffusion, etc. et permettre la visualisation des données du levé conjointement avec les autres informations utiles comme par exemple le trait de côte, les épaves, les aides à la navigation, etc. L'édition des données doit être possible dans tous les modes et inclure un relevé des contrôles effectués en vue d'un audit ultérieur. La visualisation des données doit si possible être géoréférencée. Les *flags* programmés durant l'étape automatique qui correspondent aux sondes minimum distinctes du fond moyen doivent faire l'objet d'une intervention de l'opérateur, au moins pour les levés d'ordre spécial ou d'ordre 1. Si l'opérateur annule ces *flags* durant l'étape automatique, les raisons doivent en être expliquées. Si un *flag* est programmé par l'opérateur, le type choisi doit permettre d'en connaître la raison.

2.7 Qualification des données – Présentation

2.7.1 Diagramme des sources

Traditionnellement, la qualité des données bathymétriques était une procédure subjective. Pour un utilisateur, la qualité des données présentées était portée sur le diagramme des sources (carton de données) de la carte. Ce diagramme est affiché sous forme d'un cartouche inséré dans la carte et qui indique l'origine des levés avec certains détails, par exemple l'échelle, l'espacement des profils, l'année du levé. Malheureusement, la nature de l'information affichée sur un diagramme des sources limite sérieusement l'appréciation de la qualité des données. Par exemple, si l'utilisateur de la carte ignore les caractéristiques d'un balayage au sondeur latéral effectué avant 1970 ou s'il ne comprend pas ce que veut dire un espacement de profils de « n » mètres, le diagramme de sources ne lui sera pas utile pour déterminer la qualité des sondes représentées.

Le concept original du diagramme des sources était de qualifier les données des levés et de représenter les différentes classifications sur un diagramme en termes de : « bonne », « acceptable » ou « mauvaise » qualité. L'intention du diagramme était de fournir au marin une indication sur le danger encouru s'il s'écartait de la route recommandée. Cependant, une inquiétude croissante se fit jour quant à la complexité du diagramme des sources et la difficulté de le maintenir sous une forme accessible à l'utilisateur de la carte. S'ils étaient trop compliqués, les diagrammes des sources devenaient trop difficiles à préparer par les cartographes et pouvaient donner lieu à des erreurs de construction. En définitive, leur utilisation fut négligée par les navigateurs.

Les diagrammes des sources ne sont pas à même de répondre à l'intention première qui était de fournir au marin une indication sur la qualité des données sous une forme très simple. En outre, pour tirer parti des capacités de navigation précise offertes par les ENC et les ECDIS, les utilisateurs avaient besoin d'un classement beaucoup plus accessible de la qualité des données en vue d'une utilisation prudente des informations disponibles. En conclusion, il convient de trouver une alternative au diagramme des sources existant comme indicateur final de qualité.

Les diagrammes des sources et leurs variantes portées sur les cartes sont tous considérés comme présentant les mêmes insuffisances.

2.7.2 Zones de confiance (ZOC)

Le concept des zones de confiance (ZOC) a été développé par l'OHI pour fournir un moyen de classification des données bathymétriques. Les ZOC fournissent un moyen simple et logique pour

faire connaître au navigateur la confiance que l'autorité nationale de cartographie marine accorde à chaque sélection particulière de données bathymétriques. Les zones navigables sont classées en fonction des niveaux de confiance accordés aux données correspondantes en utilisant une combinaison des critères suivants :

- précision de la sonde et de la position,
- exhaustivité des recherches,
- conformité à un plan de qualité approuvé.

Sous ce concept, six ZOC ont été développées et par la suite, approuvées pour être introduites dans la publication S-57 de l'OHI. Les ZOC A1, A2 et B sont générées à partir des levés modernes et futurs, les ZOC A1 et A2 correspondant notamment à une couverture complète des fonds. Les ZOC C et D caractérisent une précision moindre et une qualité médiocre des données, alors que la ZOC U représente des données non encore évaluées au moment de la publication. Les ZOC sont conçues pour être représentées sur les cartes papier sous forme de diagrammes insérés à la place des diagrammes des sources actuels, ainsi que sur les consoles de visualisation.

Il faut préciser que les ZOC sont des normes cartographiques qui n'ont pas pour objet de servir à l'établissement de normes spécifiques pour les levés ou à la gestion de la qualité des données. Les précisions des profondeurs et des positions spécifiées pour chaque ZOC font référence aux erreurs des sondes représentées et n'incluent pas seulement les erreurs de levés mais aussi toutes les autres erreurs introduites au cours du processus de production des cartes. Les paragraphes suivants résument les spécifications propres à chaque ZOC.

2.7.2.1 ZOC A1 : Les données de position et la profondeur sont acquises conformément aux procédures et aux précisions spécifiées. Les levés sont exécutés au moyen de technologies reconnues, capables d'assurer une couverture totale de la zone et de garantir la détection de tous les objets significatifs lors de la mesure des profondeurs. Typiquement, le levé sera rapporté au WGS84, utilisera le DGPS ou un minimum de trois lieux de positionnement et un système multifaisceaux, un sondeur multifréquences ou une drague hydrographique. En raison de la densité des données collectées et du temps considérable nécessaire pour satisfaire à cette norme, il faut considérer que les données de qualification A1 doivent être réservées aux seuils, aux zones de mouillage, aux zones où la hauteur d'eau sous la quille revêt une importance critique, aux chenaux de navigation, aux routes recommandées et aux ports et approches.

2.7.2.2 ZOC A2 : Les données de position et la profondeur sont acquises conformément aux procédures et aux précisions spécifiées. Les levés sont exécutés au moyen de technologies reconnues, capables d'assurer une couverture totale de la zone et de garantir la détection de tous les objets significatifs lors de la mesure des profondeurs. Typiquement, le levé sera exécuté au moyen d'un sondeur moderne associé à un sondeur latéral ou à une drague hydrographique. Bien que les précisions des positions et des profondeurs ne soient pas de la même importance que pour la ZOC A1, la couverture du fond doit être suffisante pour justifier un haut niveau de confiance de la part du navigateur quant à la qualité des données.

2.7.2.3 ZOC B : Les données de position et de profondeur sont acquises conformément aux procédures et aux précisions spécifiées. Cependant, la couverture totale de la région n'a pas été réalisée et certains obstacles non cartographiés, imprévisibles mais potentiellement dangereux pour la navigation, peuvent exister. Ce critère indique au navigateur qu'il peut accorder un degré raisonnable de confiance dans la qualité des données. La ZOC B a la même précision en position et en profondeur que celle de la ZOC A2 et sera attribuée, par exemple, aux levés modernes qui n'ont pas permis d'assurer une couverture surfacique totale et une recherche exhaustive des hauts-fonds. Le marin prudent prendra un pied de pilote plus important dans cette ZOC que dans les ZOC A1 et A2.

2.7.2.4 ZOC C : Les précisions de position et de profondeur sont inférieures à celles acquises pour la ZOC B ci-dessus. Les données de profondeur peuvent provenir d'autres sources que d'un levé

hydrographique régulier contrôlé par des professionnels (par ex. des sondages en route). Il n'y a pas de couverture totale de la zone et des anomalies de profondeur peuvent exister. La ZOC C indique que le marin doit naviguer prudemment et prendre les mesures de sécurité appropriées en portant une attention particulière aux profondeurs dans lesquelles il navigue.

2.7.2.5 ZOC D : Les données de position et de profondeur sont très médiocres ou leur qualité ne peut pas être appréciée faute d'informations. Il n'y a pas de couverture totale de la zone et des anomalies de profondeur peuvent exister.

2.7.2.6 ZOC U : La qualité des données bathymétriques n'a pas encore été déterminée.

TABLE 1.2

Catégories des zones de confiance des données - Table ZOC

1	2	3		4	5
ZOC ¹	Précision de la position ²	Précision de la profondeur ³		Couverture des fonds ⁴	Caractéristiques du levé ⁵
A1	± 5 m	= 0,50 m + 1% de la profondeur		Recherches exhaustives dans la zone. Tous les hauts-fonds significatifs détectés ont été cotés.	Contrôle géodésique et mesure de haute précision des positions et des profondeurs du levé régulier effectués au moyen d'un DGPS ou d'un minimum de trois lieux de positionnement et d'un système multi-faisceaux ou multi-fréquences ou d'une drague hydrographique.
		Profondeur d (m)	Précision (m)		
		10	± 0,6		
		30	± 0,8		
		100	± 1,5		
		1000	± 10,5		
ZOC¹					
A2	± 20 m	= 1,00 m + 2% d		Recherche exhaustive dans la zone. Tous les hauts-fonds significatifs détectés ont été cotés.	Contrôle géodésique et mesure des positions et des profondeurs du levé régulier moins précis que pour la zone 1. Utilisation d'un sondeur moderne couplé à un sondeur latéral ou à une drague hydrographique.
		Profondeur d (m)	Précision (m)		
		10	± 1,2		
		30	± 1,6		
		100	± 3,0		
		1000	± 21,0		
B	± 50 m	= 1,00 m + 2% d		Recherches dans la zone conduites de manière non-exhaustive. Des remontées de fond inattendues, mais non détectées et susceptibles de présenter un danger pour la navigation peuvent subsister.	Contrôle géodésique et mesure des profondeurs du levé régulier similaires à ceux de la ZOC A2 mais moins précis en position. Utilisation d'un sondeur acoustique moderne mais pas d'un sondeur latéral ni d'une drague hydrographique.
		Profondeur d (m)	Précision (m)		
		10	± 1,2		
		30	± 1,6		
		100	± 3,0		
		1000	± 21,0		

C	± 500 m	= 2,00 m + 5% d		Recherches dans la zone conduites de manière non exhaustives. Des anomalies de profondeur peuvent être rencontrées.	Levé de faible précision ou données recueillies de manière occasionnelle telle qu'un sondage en route.
		Profondeur d (m)	Précision (m)		
		10	± 2,5		
		30	± 3,5		
		100	± 7,0		
		1000	± 52,0		
D	Moins bonne que pour la ZOC C	Moins bonne que pour la ZOC C			Qualité médiocre ou données qui ne peuvent pas être qualifiées par manque d'informations.
U		Précision non appréciée			

Notes :

Pour choisir une catégorie ZOC, toutes les conditions résumées dans les colonnes 2 à 4 du tableau doivent être satisfaites. Les renvois figurant dans le tableau ont les significations suivantes :

1. L'allocation d'une ZOC indique que les données satisfont aux critères minimaux de précision en position et en profondeur et que la couverture des fonds est conforme aux définitions du tableau. Les catégories de ZOC reflètent une norme cartographique et pas seulement une norme de levés hydrographiques. Les précisions de profondeur et de position spécifiées pour chaque catégorie de ZOC s'appliquent aux sondes portées sur les cartes ; elles incluent non seulement les erreurs du levé mais aussi celles introduites dans le processus de préparation finale de la carte. Les données peuvent également être qualifiées au moyen de la classe d'objet « qualité des données » (M_QUAL) des sous attributs comme suit :
 - Les précisions de position (POSACC) et de sondes (SOUACC) peuvent être utilisées pour indiquer qu'une précision de position et de profondeur meilleure que celle définie dans le tableau a été atteinte (par exemple, cas d'un levé non-surfacique qui ne peut être classé mieux que ZOC B, mais dont la précision des positions serait par exemple de ±15 mètres, le sous attribut POSACC peut être utilisé pour indiquer cette information).
 - Les zones draguées, dont la cote du seuil de dragage est connue avec précision mais dont les profondeurs moyennes sont moins précises, peuvent recevoir un niveau de ZOC plus élevé (c.-à-d. A1 ou A2) pourvu que les précisions en position et en profondeur du contour dragué concordent avec les critères de ce tableau. Dans le cas présent, la gamme de profondeur 1 (DRVAL 1) pourra être utilisée pour spécifier la cote draguée tandis que les critères de précision en position s'appliqueront aux limites du contour.
 - SURSTA, SUREND et TECSOU peuvent être utilisés pour indiquer les dates du début et de fin de levé ainsi que les techniques de sondage mises en œuvre.
2. Le critère de précision de positionnement à 95% d'incertitude (2 sigmas) pour une référence horizontale donnée est la somme de toutes les erreurs de levé, de transformation, de numérisation, etc. La précision de positionnement n'a pas à être calculée rigoureusement pour les ZOC B, C et D mais elle peut être estimée en se basant sur le type d'équipement, les courbes d'étalonnage, la précision historique, etc.

3. La précision des sondes à 95% d'incertitude (2 sigmas) représentée, par exemple, pour la ZOC A1 = 0,50 mètre + 1 %·d où d est la profondeur de la sonde en mètres. La précision en profondeur n'a pas besoin d'être calculée rigoureusement pour les ZOC B, C et D mais peut être estimée en se basant sur le type d'équipement, les courbes d'étalonnage, la précision historique etc.
4. Les hauts-fonds significatifs sont ceux qui dépassent les profondeurs environnantes de plus que :

Profondeur	Objet significatif
< 10 mètres	>0,1 fois la profondeur
10 à 30 mètres	>1,0 mètre
>30 mètres	>0,1 fois la profondeur moins 2,0 mètres

Note : les marins doivent tenir compte des limites de leur sondeur en appliquant les marges de sécurité.

5. Caractéristiques du levé - ces descriptions ne sont fournies qu'à titre d'exemple.
6. Les contrôles géodésiques mentionnés à la colonne 5 (ZOCs A1, A2 et B) sont relatifs à une préparation du levé régulier selon des profils définis dans un système géodésique qui peut être transformé en WGS 84.
7. Sondeur acoustique moderne : sondeur vertical monofaisceau de précision hydrographique correspondant généralement à tous les sondeurs conçus après 1970.

2.8 Production des données

La production finale des données peut être faite sous forme analogique ou numérique. Un diagramme schématique de cette production figure ci-dessous :

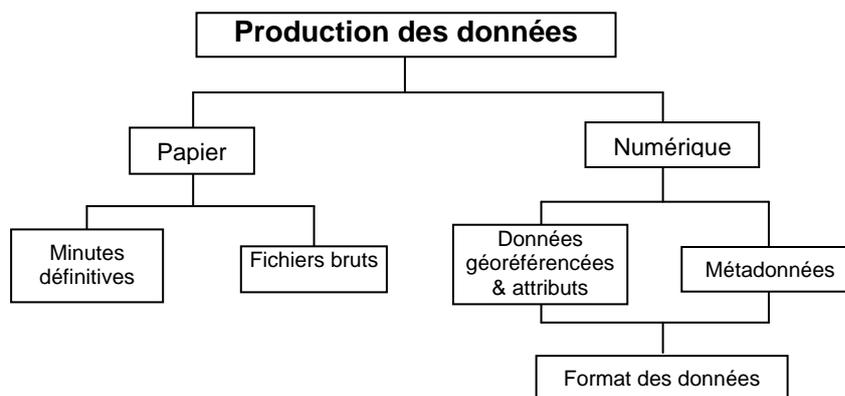


Fig. 1.2 « Diagramme schématique de la production numérique »

Les données **numériques** doivent être traitées dans un format défini afin d'être importées directement dans une base de données principale. Comme chaque dossier de levé inclut de nombreuses annexes techniques et fichiers de données numériques, les éléments livrés doivent être clairement renseignés de façon à pouvoir être compris sans ambiguïté par le personnel du Service hydrographique chargé de les exploiter. Concrètement, les procédures opérationnelles standards de l'OHI qui couvrent de tels documents et fichiers de données numériques doivent être appliquées par les équipes de terrain.

Les données **manuscrites** ou **analogiques** doivent être claires, concises, exprimées lisiblement et proprement étiquetées et identifiées.¹⁵

Une fois les données collectées, traitées et tracées sous forme de minutes d'écriture définitives (ou fichier numérique équivalent), l'inventaire définitif des éléments livrés est adressé au Service hydrographique. Cet inventaire doit généralement inclure¹⁶ :

- des minutes d'écriture ;
- les fichiers numériques de ces minutes avec leurs attributs;
- des fichiers de données bathymétriques brutes et traitées;
- des fiches d'observatoires de marée, de célérité du son et de configuration des porte-sondeurs;
- des fichiers de données du sondeur latéral;
- un rapport particulier et des rapports supplémentaires;
- des cahiers d'observations et une documentation sur le traitement;
- des relevés d'étalonnages.

2.9 Traitement des données à des fins cartographiques

Le traitement des données à des fins cartographiques requiert une combinaison d'opérateurs qualifiés, de données spatiales et descriptives, de méthodes analytiques, de logiciels et d'équipements informatiques – organisés pour automatiser, gérer et livrer l'information sous la forme de cartes papier et de cartes numériques. Précédemment, l'utilisation principale des bases de données était la production de cartes papier. L'évolution des technologies de navigation a nécessité de nouveaux besoins en termes de précision, de fiabilité et de format des cartes marines. La précision des cartes doit être compatible avec la précision croissante des systèmes de positionnement. Afin de bénéficier de la dynamique des méthodes de positionnement modernes, la demande en cartes numériques s'est développée parallèlement aux cartes papier traditionnelles. Une norme internationale pour les données hydrographiques numériques a été développée par l'Organisation hydrographique internationale. La version validée de la norme S-57 version 3.1 a été adoptée comme norme officielle de l'OHI en novembre 2000 et a également été retenue par l'Organisation maritime internationale (IMO) comme étant la norme de performance pour les ECDIS (*Electronic Chart Display and Information Systems*). Le S-57 décrit les normes à utiliser lors de l'échange de données numériques entre services hydrographiques nationaux et lors de la distribution des données numériques et des produits aux industriels, aux marins et autres utilisateurs de données. Le produit numérique le plus important livré dans le format S-57 est la carte électronique de navigation (ENC). La demande croissante et rapide d'ENC a conduit plusieurs Services hydrographiques à établir deux chaînes de production distinctes, l'une pour les ENC et l'autre pour les cartes papier. Il est essentiel pour la sécurité de la navigation que ces produits soient cohérents. Un service standard de traitement des données à des fins cartographiques est structuré autour des quatre sous-systèmes fonctionnels suivants¹⁷ (Figure 1.3) :

- **Acquisition des données** : Le sous-système d'acquisition permet à l'opérateur de saisir, collecter et transformer les données spatiales et thématiques sous une forme numérique. Les données saisies sont toujours issues d'une combinaison de cartes papier, de photographies aériennes, d'images satellite, de rapports, de documents de levé, etc.
- **Base de données – sauvegarde et récupération** : Le sous-système de sauvegarde et de récupération organise les données spatiales et leurs attributs sous une forme qui permette

¹⁵ <http://www.hydro.navy.gov.au/news/htf/htf.pdf>

¹⁶ Cf. Lieutenant Eric J. Sipos et Castle Parker, spécialiste en sciences physiques, "NOAA AHB Quality Assurance Inspections for Contract Hydrographic Surveys", NOAA Hydrographic Survey Division, USA

¹⁷ cf. Dan Sherrill et Asa Carlsson, "The JANUS Solution for Hydrographic Information", T-Kartor AB Sweden-Box 5097 – S-291 05 Kristianstad – Sweden, ds@t-kartor.se & ac@t-kartor.se

une récupération rapide par l'opérateur à des fins d'analyse et lui permette également de procéder à une mise à jour rapide et précise de la base de données.

- **Base de données – manipulation et analyse** : Le sous-système de manipulation et d'analyse permet à l'opérateur de définir et d'exécuter des tâches à partir de l'information spatiale et des attributs afin de générer de l'information dérivée. Ce sous système est communément considéré comme étant le cœur d'un système d'information géographique (GIS) et par conséquent se démarque des autres systèmes d'information de base de données et des systèmes informatisés assistés par ordinateur (CAD).
- **Données extraites** : Le sous-système d'extraction de données permet à l'opérateur de générer des visualisations graphiques, normalement sous forme de cartes et de tableaux de produits dérivés.

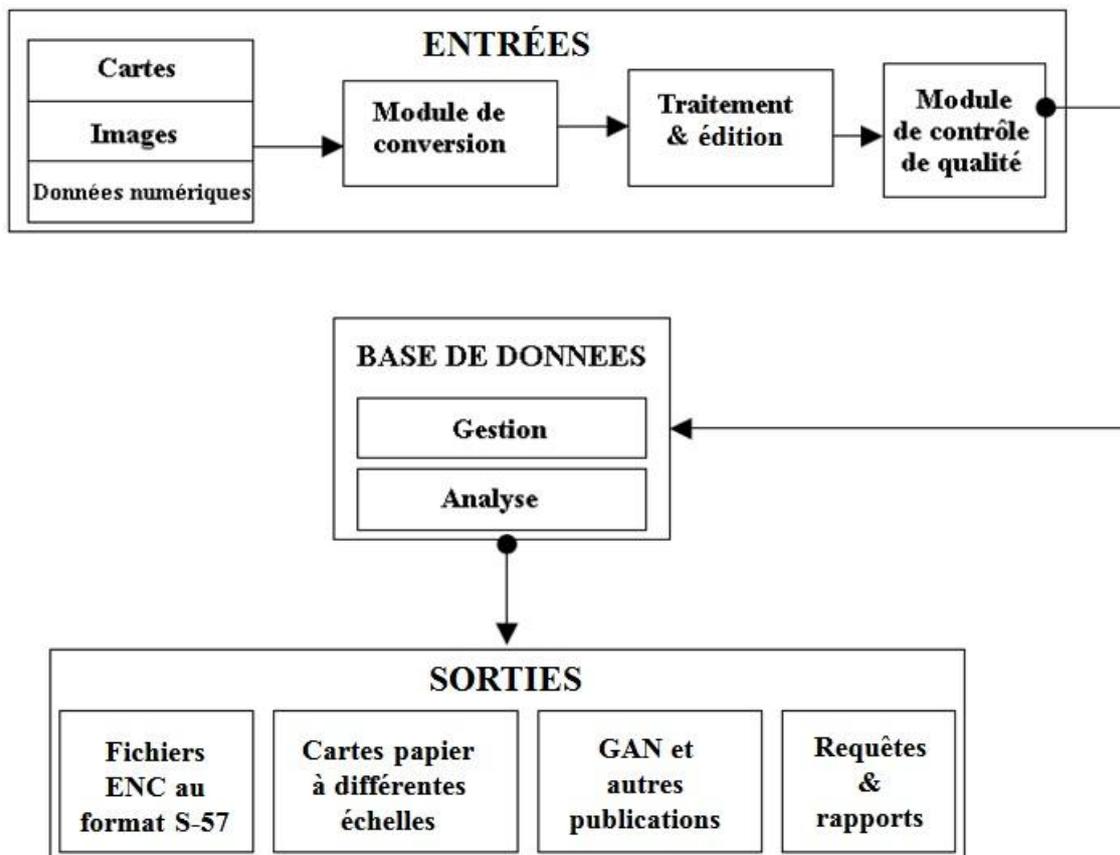


Fig. 1.3 « Sous-système fonctionnel de traitement des données »

On retrouve quatre composants/acteurs dans un système de traitement des données, les données proprement dites, l'équipement informatique, les logiciels, et les opérateurs.¹⁸ Tel qu'illustré dans la figure 1.4, ces composants doivent être intégrés ; ils sont reliés entre eux et doivent progresser de concert afin d'assurer la gestion et l'analyse des données spatiales ou cartographiques.

¹⁸Cf. Lloyd P. Queen et Charles R. Blinn, "The Basics of geographic Information Systems", lqueen@mercury.forestry.umn.edu and cblinnlqueen@mercury.forestry.umn.edu

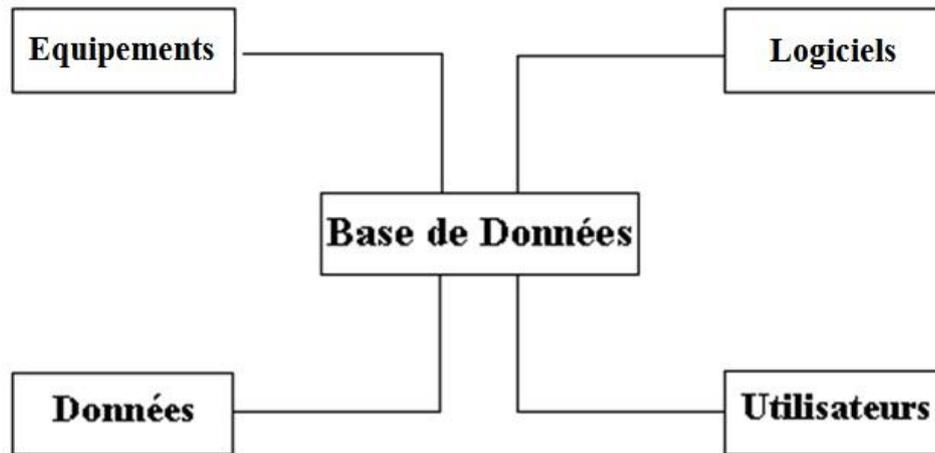


Fig. 1.4 Les quatre composants d'un système de traitement de données à fins cartographiques

- **Données** : Toutes les données contenues dans une base de données sont soit des données spatiales, soit des attributs. Les données spatiales indiquent le lieu où quelque chose se produit ; les attributs qualifient ce qui se produit, à savoir la nature ou les caractéristiques des données spatiales.
- **Équipement informatique** : Le poste informatique doit être capable de supporter la saisie, l'extraction, le stockage, le recouvrement, la visualisation et l'analyse des données.
- **Logiciel** : Le logiciel utilisé doit être dynamique et disposer d'une grande variété de capacités fonctionnelles.
- **Opérateur** : Le terme « opérateur » fait référence à tout individu ou cartographe qui utilise le système de traitement des données du levé en vue de réaliser un projet ou un programme spécifique, ou l'organisation qui les coiffe.

2.9.1 Processus de compilation

La compilation des données nécessite l'assemblage de toutes les données spatiales et de tous les attributs dans un système d'information géographique (SIG). Les données d'une carte avec les bonnes projections, les échelles et les systèmes de coordonnées doivent être rassemblés dans ce SIG afin de procéder au traitement cartographique. Les données doivent aussi être examinées sous l'angle de leur compatibilité en termes de contenu et d'époque d'acquisition. Finalement, les données seront stockées dans le SIG dans un format spécifique défini par l'opérateur en fonction de l'environnement des équipements informatiques et des logiciels qu'il a choisis.

Quand tous les besoins communs de données ont été fixés par l'utilisateur, « une carte de base » est établie. Cette carte de base est un ensemble de besoins standards en données. Elle fournit des normes précises pour le contrôle géographique et définit un modèle ou un gabarit qui est utilisé pour rendre toutes les données compatibles. Une carte de base n'est pas nécessairement une carte, mais plutôt un ensemble complet de normes établies et suivies pour assurer le contrôle de qualité des données spatiales et des attributs contenus dans le système de traitement.

Une fois les données collectées et les paramètres de la carte de base fixés, l'utilisateur doit transformer les données analogiques sous une forme compatible avec sa station de travail. Ce processus connu sous le terme de « conversion » ou de « numérisation », convertit les cartes papier en fichiers numériques qui peuvent être stockés dans l'ordinateur. La numérisation peut être faite selon plusieurs techniques parmi lesquelles le scannage. Une autre technique consiste à procéder à une

saisie ponctuelle au moyen d'une table à numériser équipée d'une tablette et d'un stylet de traçage. La numérisation transforme les données cartographiées manuellement en un ensemble de vecteurs (points, lignes, cellules...) qui peuvent être enregistrés dans le système de traitement de données. Chaque logiciel de traitement impose un format spécifique pour enregistrer et stocker cet ensemble de points, de lignes et de cellules en fichiers de carte numérique.

La figure suivante représente les différents modes de compilation

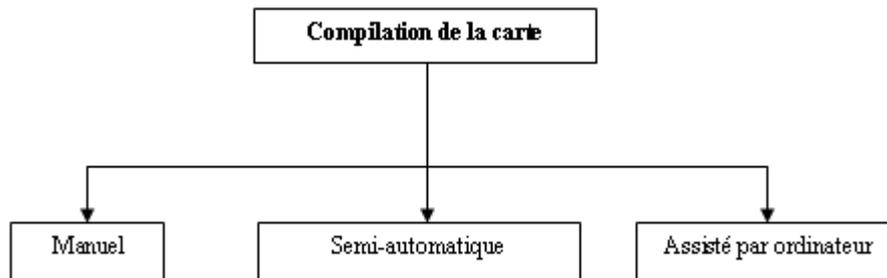


Fig. 1.5 « Modes de compilation des cartes »

2.9.1.1 Traitement manuel : Le travail cartographique traditionnel est basé sur la séparation des teintes et le traitement manuel. Le dessin est une méthode de représentation du trait, des symboles et de la toponymie conformément aux spécifications de la carte. Le dessin au trait de haute qualité est réalisé au moyen du processus de « tracé sur couche » où l'image est gravée sur un film plastifié en s'assurant que les spécifications cartographiques sont bien respectées. Chaque couleur utilisée sur une carte est tracée sur un film séparé et les symboles et les noms sont combinés par transfert photomécanique pour produire des teintes séparées pour l'impression. Le processus cartographique traditionnel comprend un ensemble des techniques manuelles utilisées pour la production d'une carte papier (avant l'avènement de l'ordinateur). Il peut être divisé en six étapes:¹⁹

- **Compilation :** Sélection des informations rassemblées en vue de la production d'une nouvelle édition de carte papier.
- **Génération de l'image :** Procédure consistant à affecter des types de symboles, des formes et des structures aux objets représentés sur la carte.
- **Enregistrement de l'image :** Technique consistant à s'assurer que les différents masques de teintes coïncident les uns avec les autres sur la carte.
- **Copie contact à l'échelle :** Opération utilisée pour produire des traits de même dimension, à demi-teinte et teintes continues sur positifs et négatifs, par processus de contact direct.
- **Séparation / combinaison d'images :** Techniques utilisées pour produire des cartes en plusieurs couleurs par surimpression des différentes couches de teintes.
- **Impression :** Les cartes sont imprimées par procédé offset.

Traitement semi-automatique : La cartographie semi-automatique combine la méthode manuelle et les techniques assistées par ordinateur utilisées pour la production des cartes papier. Bien que cette

¹⁹cf CC Luis Pais, "Production and Distribution of ENC – the Portuguese Experience", Portugal (IHPT)
hidrografia@hidrografico.pt, www.thsoa.org/pdf/h01/7_3.pdf

méthode reprenne les étapes utilisées dans la méthode manuelle, quelques opérations sont automatisées, par exemple, les contours sont tracés à la machine plutôt que manuellement.

2.9.1.2 Cartographie assistée par ordinateur : Pour améliorer le service et faire face aux demandes croissantes de cartes, les systèmes de production de cartes assistés par ordinateur sont aussi utilisés. L'introduction des SIG assistés par ordinateur a ajouté de nouvelles dimensions aux techniques cartographiques et à l'utilisation des données spatiales. Le processus de cartographie assistée par ordinateur est généralement réparti selon les six étapes énumérées ci-dessous.²⁰:

- **Acquisition et saisie.** Les informations numériques proviennent normalement de plusieurs sources, par exemple, des fichiers numériques ou d'anciennes cartes scannées.
- **Vérification.** Toutes les données sont vérifiées et validées pour confirmer les formats, l'échelle et le codage des objets, etc.
- **Édition et attribution.** Les tâches principales consistent à s'assurer que les objets de la carte sont topologiquement corrects et satisfont aux normes cartographiques numériques (CDS) relatives aux attributs et aux symboles. Les manuscrits originaux qui ont été scannés doivent être géoréférencés et édités interactivement ; les objets qu'ils contiennent doivent être codés correctement. Tout texte ou annotation de la carte est ajouté en mode interactif.
- **Contrôle de qualité.** Un rapport, dérivé d'un processus de filtrage, est utilisé pour vérifier le projet dans son intégralité et l'attribution correcte des objets. Les responsables du contrôle de qualité s'assurent que la carte respecte bien les spécifications du projet et que les informations numériques sont conformes à la norme cartographique. Toutes les cartes sont contrôlées par des cartographes avant leur publication.
- **Impression.** Un fichier final est créé pour l'impression. Les processus modernes d'impression par offset peuvent être réalisés au moyen d'une presse monochrome ou en polychromie avec plusieurs passages.

2.9.2 Représentation

Le monde réel est beaucoup trop complexe pour être décrit complètement, aussi, dans la pratique, la réalité devra-t-elle être représentée sous la forme d'une image simplifiée et hautement thématique, obtenue par modélisation de la réalité. La représentation d'informations hydrographiques peut varier pour s'adapter à une utilisation particulière ; elle peut par exemple être représentée graphiquement, ou par un symbole, ou par une description textuelle. Par conséquent, la présentation d'information doit être indépendante de son mode de stockage. Le principe de séparation du mode de stockage d'une information de sa représentation offre une souplesse et une capacité d'adaptation plus grandes. Il permet à une même donnée d'être utilisée à plusieurs fins sans avoir à changer sa structure ni son contenu. Si le style ou le support changent, il suffit de changer le mode de représentation. Ainsi, la réalité décrite peut être liée à plusieurs modèles de représentation différents. Par exemple, les ENC et les cartes papier présentent les mêmes données fondamentales, mais elles font appel à des méthodes différentes et utilisent différents modèles de représentation.²¹

2.9.2.1 Les cartes papier. Une carte marine est une représentation graphique qui montre la nature et la forme de la côte, les profondeurs de l'eau, l'allure générale et la configuration des fonds marins, les positions des dangers pour la navigation, l'état de la marée, le positionnement du balisage artificiel et

²⁰ Vic Dohar and Dave Everett, "Geological Map Production for Dummies", *Natural Resources Ottawa, Canada*, vdohar@nrcan.gc.ca, <http://pubs.usgs.gov/of/of00-325/dohar.html>

²¹ Cf. OHI, Monaco, Publication S-52 : Spécifications pour le contenu cartographique et les modalités d'affichage des ECDIS Edition 6.0, Mars 2010.

les caractéristiques du magnétisme terrestre.²² En plus de ses éléments de base, la carte est un document de travail utilisé par le marin comme une « feuille de route » et un document de travail ; elle est indispensable pour la sécurité de la navigation. Conjointement avec les aides à la navigation supplémentaires, elle est utilisée pour planifier les routes et aider les navires à naviguer en utilisant les routes les plus courtes, les plus sûres et les plus économiques.

Les cartes imprimées présentent des informations très importantes telles que les détails cartographiques représentés par une symbolique appropriée et des textes descriptifs d'informations cartographiques avec leurs symboles. Le volume d'information est limité en raison des dimensions de la carte et de son besoin de lisibilité. Un des aspects les plus importants de la préparation des données destinées à être publiées sur une carte imprimée est la généralisation cartographique et les annotations cartographiques associées aux données. Celles-ci incluent, par exemple, le déplacement, l'agrégation, la sélection, la rotation, la lettre, la largeur du texte et son positionnement.

2.9.2.2 Les cartes numériques. Les cartes numériques impliquent l'existence d'une base de données standard dont le contenu, la structure et le format, sont présentés sur la Figure 1.6.

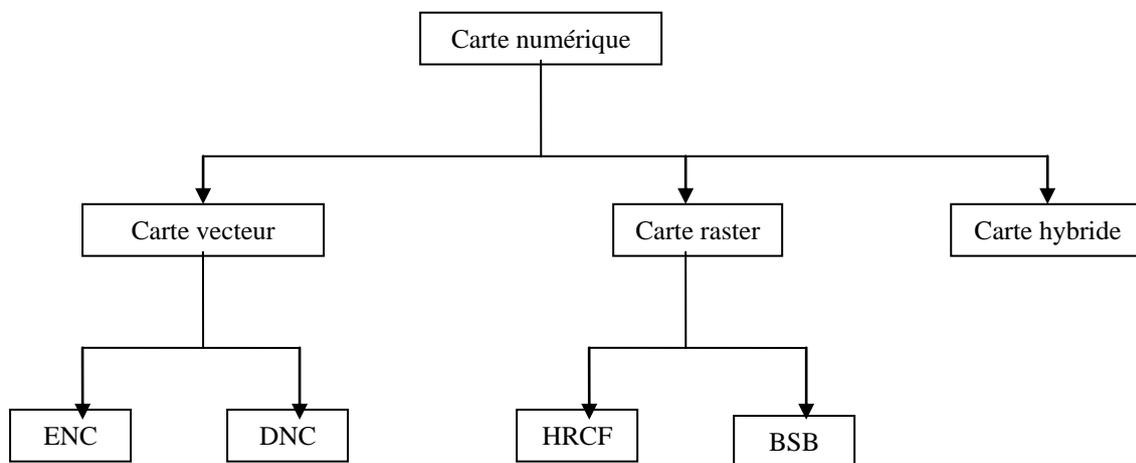


Fig.1.6 «Formats et types de cartes numériques »

Les cartes numériques²³ représentent une nouvelle aide à la navigation qui offre des avantages considérables pour la navigation maritime, la sécurité, et le commerce. Plus qu'une simple visualisation graphique sur ordinateur, les systèmes de cartes numériques combinent les données géographiques et textuelles dans un outil opérationnel simple et utile. En sa qualité d'aide à la décision automatisée, capable de déterminer en continu la position d'un bâtiment par rapport à la terre, aux objets cartographiés, aux aides à la navigation et aux risques non visualisés, l'ENC est un système de navigation en temps réel qui intègre et affiche une variété d'informations que le marin peut alors interpréter. Sous leurs formes les plus évoluées, ces systèmes de cartes numériques représentent une toute nouvelle approche de la navigation maritime.

2.9.2.3 Les cartes vecteurs

ENC (*Electronic Navigational Chart*) : Une carte électronique de navigation, ou ENC, est un ensemble de données vectorielles conformes aux spécifications de la publication S-57 de l'OHI dans son contenu, sa structure et son format. Publiée pour être utilisée avec un ECDIS sous l'autorité des Services hydrographiques officiels, une ENC contient toutes les informations cartographiques

²² <http://chartmaker.ncd.noaa.gov/ncd/whatis/html>

²³ Cf. Lee Alexander, Ph.D., "What is an ENC? It depends who you ask", Offshore Systems Ltd., Vancouver, BC, Canada, http://www.osl.com/Support/what_is_enc.htm

nécessaires pour une navigation sûre et peut contenir des renseignements supplémentaires en plus de ceux qui existent sur la carte papier (par exemple, des instructions nautiques). En général, une ENC S-57 est une base de données orientée-objet et structurée en couches, conçue pour supporter une gamme d'applications hydrographiques. Telles que définies dans la S-57 Édition 3.1, les données sont constituées d'une série de points, de lignes et d'objets. La dimension minimale d'une collection de données est définie par une « cellule » qui est un rectangle sphérique (c.-à-d. délimité par des méridiens et des parallèles). Les cellules adjacentes ne se recouvrent pas. L'échelle des données contenues dans la cellule est fonction du type de navigation (par exemple Générale, Côtière, Approches, Portuaire...). En dehors d'une quantité d'informations numériques limitée à 5 Mo par cellule, les spécifications ne précisent pas de dimensions minimales pour ces dernières.

DNC (*Digital Nautical Chart*) : La carte marine numérique DNCTM est une base de données vectorielle contenant des objets sélectionnés qui peut être utilisée avec des systèmes de navigation intégrés à bord d'un navire (par exemple, des systèmes de cartes électroniques) ou d'autres types de SIG. Comme pour une ENC S-57, la base de données DNC est constituée de points, de lignes et de polygones qui contiennent des informations concernant l'hydrographie, les aides à la navigation, les sites culturels, les détails topographiques terrestres, les profondeurs, les obstructions, etc. Chaque thème (par exemple, l'hydrographie) est stocké dans une couche spécifique géoréférencée. Le produit DNC est encapsulé conformément à la norme d'échange d'information géographique numérique *DIGEST Annex C* et au codage *Vector Relation Form (VRF)* qui consiste en un ensemble de tables de base de données relationnelles. Les données sont classées dans des séries de « bibliothèques » qui regroupent des ensembles cartographiques cohérents avec les couvertures et les échelles des cartes papier produites par la *National Geospatial-intelligence Agency (NGA)* (par exemple Général, Côtière, Approches, Portuaire). Dans le concept ECDIS, une DNC est un « système » de cartes de navigation électronique (SENC) qui contient des données spécifiques associées à leurs caractéristiques de visualisation.

2.9.2.4 Les cartes raster

Les formats des données matricielles sont des tables de pixels géoréférencés. Une table de pixels est un terme générique pour une image d'ordinateur composée d'une grille rectangulaire de très petits carrés colorés ou pixels (254 pixels par pouce est l'un des standards). Ces tables de pixels sont produites normalement par scannage de la carte originale pour en créer une image numérique. Une fois cette image créée, elle est géoréférencée, c'est-à-dire que les positions grille sont rapportées aux latitudes et aux longitudes correspondantes, de telle sorte qu'un ordinateur puisse exprimer la position d'un pixel en latitude et longitude. Cependant, le système n'a aucune intelligence des détails des objets (tel que le trait de côte) dans l'image matricielle affichée. Les cartes matricielles sont produites par balayage à haute résolution des couches originales de teintes utilisées pour l'impression des cartes papier. Les fichiers numériques sont géoréférencés afin de permettre au logiciel de navigation d'indiquer correctement les positions géographiques des différents points de l'image affichée sur l'écran. Des métadonnées sont ajoutées pour décrire la carte, ses références, sa projection et autres informations cartographiques ou relatives au fichier numérique.

Le format HRCF (*Hydrographic Raster Chart Format*) : Ce format matriciel développé par le Service hydrographique du Royaume-Uni (UKHO) est utilisé par le *Admiralty Raster Chart Service (ARCS)* et le Service hydrographique Australien (AHS) pour son *Seafarer Chart Service*. Les cartes raster ont les mêmes normes de précision et de fiabilité que les cartes papier. Elles sont utilisées avec des systèmes de carte électroniques compatibles et autorisés (ECS).

Le format BSB* : Le format BSB est obtenu par compression d'une ou de plusieurs images matricielles au sein d'un ensemble efficace comportant des détails de la carte. Ces détails incluent le géoréférencement requis pour déterminer la latitude et la longitude ainsi que d'autres détails tels que l'échelle, les unités de profondeur, le titre de la carte, etc. Le format BSB découpe la carte en sous-

* NdT : Acronyme non documenté par ses utilisateurs d'Amérique du Nord (NOAA, MapTech).

ensembles correspondants au nombre de blocs dont elle est composée, un bloc correspondant à la carte principale et à ses divers cartouches et compléments.

2.9.2.5 Les cartes hybrides

Idéalement, les versions de référence de toutes les données cartographiques discrètes d'un produit numérique devraient être disponibles sous forme vecteur. L'évolution des performances des systèmes informatiques depuis les dernières années a facilité le passage rapide en formats numériques par scannage des couches d'impression existantes et utilisation des techniques matricielles/vectorielles mixtes pendant la période de transition. La séquence de remplacement des versions raster maîtresses par des versions vecteur maîtresses sera conditionnée par les coûts et les priorités commerciales.

ANNEXE A**ACRONYMES**

ARCS	Admiralty Raster Chart Service
AHS	Australian Hydrographic Service
BHI	Bureau hydrographique international
CAD	Computer aided drafting
CDS	Cartographic Digital Standards
DIGEST	Digital Geographical Information Exchange Standard
DNC	Digital Nautical Chart
ECS	Electronic Charting System (NOAA)
ENC	Electronic Navigational Chart
ECDIS	Electronic Chart Display and Information System
GIS	Geographic Information System
IHO	International Hydrographic Organisation
IMO	International Maritime Organisation
IT	Instructions techniques
NGA	National Geospatial-intelligence Agency
OHI	Organisation hydrographique internationale
OMI	Organisation maritime internationale
SENC	System Electronic Navigation Chart
SIG	Système d'information géographique
SH	Service hydrographique
SOLAS	Safety Of Life At Sea
UKHO	United Kingdom Hydrographic Office
VRF	Vector Relational Format
WGS	World Geodetic System
ZOC	Zone of Confidence

REFERENCES

- | | | |
|--|---|---|
| D. Russom & H. R. W. Halliwell | <i>“Some Basic Principles in the Compilation of Nautical Charts”</i> | International Hydrographic Review, Vol. LV No. 2, July 1978 |
| William G. Swisher | <i>“National Ocean Survey Automated Information System”</i> | International Hydrographic Review, Vol. LVIII No. 2, July 1981 |
| N. M. Anderson | <i>“Computer Assisted Cartography in the Canadian Hydrographic Service”</i> | International Hydrographic Review, Vol. LVIII No. 2, July 1981 |
| Christer Palm | <i>“From Manuscript to Printed Chart”</i> | International Hydrographic Review, Vol. LX No. 2, July 1982 |
| Martin Joseph | <i>“Assessing the Precision of Depth Data”</i> | International Hydrographic Review, Vol. LXXVIII No. 2, July 1991 |
| E. C. Bouwmeester & A. W. Heemink | <i>“Optimal Line Spacing in Hydrographic Survey”</i> | International Hydrographic Review, Vol. LXX No. 1, March 1993 |
| H. Gorziglia | <i>“Computer Assisted Cartography at Hydrographic and Oceanographic Service of Chilean Navy”</i> | International Hydrographic Review, Vol. LXX N ^o , September 1993 |
| Adam J. Kerr | <i>“Conceptual Model of a Regionally Integrated Data Base For ECDIS”</i> | International Hydrographic Review, Vol. LXXI No. 2, September 1994 |
| Udo Laube | <i>“The Hydrographic and Wrecksearch Vessel “DENEK” as an Example for a Modern Survey Vessel”</i> | International Hydrographic Review, Vol. LXXII No. 2, March 1995 |
| B. Bourgeois, F. Petry, M. Harris & P. Alleman | <i>“A GIS Integration Approach for Dynamically Reconfigurable Surveys”</i> | The Hydrographic Journal, January 1999. |
| Patrick McGlamery | <i>“Issues of Authenticity of Spatial Data”</i> | 66 th IFLA Council and General Conference 2000. |
| Neal G. Millet & Simon Evans | <i>“Hydrographic Management using GIS Technologies”</i> | U.S. Hydrographic Conference 2001. |
| Lieutenant Eric J. Sipos | <i>“NOAA AHB Assurance Inspections for Contract Hydrographic Surveys”</i> | U.S. Hydrographic Conference 2001. |
| Lt Cdr Luis Pais | <i>“Production and Distribution of ENC – The Portuguese experience”</i> | U.S. Hydrographic Conference 2001. |

ADRESSES INTERNET

1. Ames Remote <http://www.amesremote.com>
2. Caris Marine <http://www.caris.com>
3. ESRI Software <http://www.esri.com/library/>
4. Federal Geographic Data Committee <http://www.fgdc.gov/>
5. Hydrographic Society of America <http://www.thsoa.org>
6. National Geo-spatial intelligence Agency <https://www1.nga.mil/>
7. International Hydrographic Organisation <http://www.iho.int/>
8. JANUS Technologies <http://www.janus-tech.com>
9. NOAA National Coast Survey <http://chartmaker.ncd.noaa.gov>
10. Offshore Systems Ltd. <http://www.osl.com/corporate>
11. Primar Organisation <http://www.primar.org>
12. SeaBeam Instruments <http://www.seabeam.com/>
13. Reson, Inc <http://www.reson.com>
14. Laser-scan Engineering Ltd <http://www.Laser-Scan.com/papers>
15. The GIS Primer <http://www.dtsagile.com/>

BIBLIOGRAPHIE

Admiralty	<i>“Manual of Hydrography”</i>	Vol I & Vol II
Bowditch	<i>“American Practical Navigator”</i>	U.S. Navy Hydrographic Office.
Admiralty	<i>“General Instructions for Hydrographic Surveyors”</i>	
Karl B. Jeffers	<i>“Hydrographic Manual”</i>	U.S. Department of Commerce
OHI - Publication S-44	<i>Normes de l'OHI pour les levés hydrographiques</i>	(5th edition) Edition française en préparation
OHI - Publication S-52	<i>“Spécifications pour le contenu cartographique et les modalités d'affichage des ECDIS”</i>	Edition 6.0, March 2010
OHI - Publication S-57	<i>“Normes de l'OHI pour le transfert de données hydrographiques numériques ”</i>	Edition 3.1, novembre 2000 - Document de base
OHI - Publication S-61	<i>“Spécification de produit pour les cartes marines matricielles (RNC)”</i>	1st Ed, January 1999
OHI - Lettre Circulaire 45/2001	<i>“ Directives pour le traitement d'importants volumes de données bathymétriques”</i>	5 Oct 2001.
	<i>“Map Compilation Color Separation and revision”</i>	Headquarters Department of Army, Washington.
Colonel Sir Charles Close & Colonel H. St. J. L. Winterbotham	<i>“Text Book of Topographical and Geographical Surveying”</i>	Her Majesty’s Stationery Office.

PAGE LAISSÉE INTENTIONNELLEMENT EN BLANC