CARTOGRAPHIE PAR SONDEURS MULTIFAISCEAUX - BATHYMÉTRIE ET IMAGERIE DE LA MÉDITERRANÉE OCCIDENTALE

Par B. LOUBRIEU, R. LE SUAVÉ, A. NORMAND, E. LE DREZEN
Département Géosciences Marines - IFREMER Centre de Brest,
BP 70 - 29280 Plouzané Cedex

RÉSUMÉ

Dès 1977, le CNEXO (Centre National pour l'Exploitation des Océans) se dote d'un sondeur bathymétrique multifaisceaux et développe ses compétences dans les domaines de l'acquisition et du traitement de données bathymétriques.

Depuis 1990, les navires de l'IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer, qui a succédé au CNEXO), en particulier L'Atalante, mettent en oeuvre de nouveaux sondeurs multifaisceaux qui permettent l'acquisition simultanée de données de bathymétrie et d'imagerie au cours des missions à la mer.

Les documents cartographiques de bathymétrie et d'imagerie sont essentiels à la réalisation de nombreux programmes de recherches fondamentales et appliquées, menés au Département Géosciences Marines.

La carte bathymétrique résulte de la production d'un modèle numérique de terrain qui est une grille de valeurs de profondeur.

Les opérations principales du traitement qui sont présentées sont le contrôle des sondes brutes enregistrées, le choix du pas de grille du modèle numérique et les méthodes de lissage des modèles destinées à corriger certains artefacts.

Présenté de manière générale, le traitement des données d'imagerie a pour objectif la constitution d'une mosaïque qui représente la réflectivité du fond marin.

Ces méthodologies de traitement ont été appliquées à la cartographie de la Méditerranée occidentale, dans les eaux territoriales françaises étendues à la mer Ligure ainsi qu'aux zones ouest et est de la Corse.

Les travaux sont réalisés dans le cadre du programme « Cartographie de la Zone Économique Exclusive Française » géré par le Département Géosciences Marines de l'IFREMER.
Les cartes bathymétriques produites sur cette zone synthétisent les données des différents sondeurs multifaisceaux de l'IFREMER.

1 Les données de sondeurs multifaisceaux

Les données de bathymétrie et d'imagerie collectées et traitées au Département des Géosciences Marines proviennent essentiellement des sondeurs multifaisceaux dont sont équipés les navires de l'IFREMER.

Le sondeur multifaisceaux Seabeam assurant l'acquisition de données bathymétriques fut le premier sondeur de l'IFREMER [1].
Dans les années 1990, deux sondeurs Simrad lui ont succédé : le sondeur EM1000, pour les profondeurs de 0 à 800 mètres, et le sondeur EM12D, pour les profondeurs de 70 à 11000 mètres [2].

L'évolution technologique a permis d'augmenter les surfaces couvertes par les sondeurs. Alors que le Seabeam permettait une couverture des 2/3 de la hauteur d'eau, la couverture maximale de l'EM12D est de sept fois la hauteur d'eau.
L'EM12D est actuellement la source principale des données : ses caractéristiques permettent la reconnaissance rapide des fonds marins.
Par exemple, trois mois d'opération à la mer seraient suffisants pour cartographier une plaine océanique de surface équivalente à la France et avec une profondeur d'eau de l'ordre de 2000 mètres.
En effet, un profil d'acquisition couvre une largeur de 14 km, et à une vitesse de 10 noeuds, le navire parcourt 450 km par jour : la surface couverte quotidiennement est ainsi de 6300 km^2.

Les sondes enregistrées correspondent à la formation de 162 faisceaux, résultant du traitement du signal acoustique à chaque cycle d'émission et réception, et repérés par rapport à la verticale du navire (voir Figure 1).

Dans un tel mode d'acquisition, la répartition des sondes est régulière :

- transversalement au navire, 162 sondes régulièrement réparties sur la couverture, soit une sonde tous les 80 mètres environ,
- et le long de la route du navire, une acquisition toutes les 20 secondes, soit tous les 100 mètres à une vitesse usuelle de 10 noeuds.

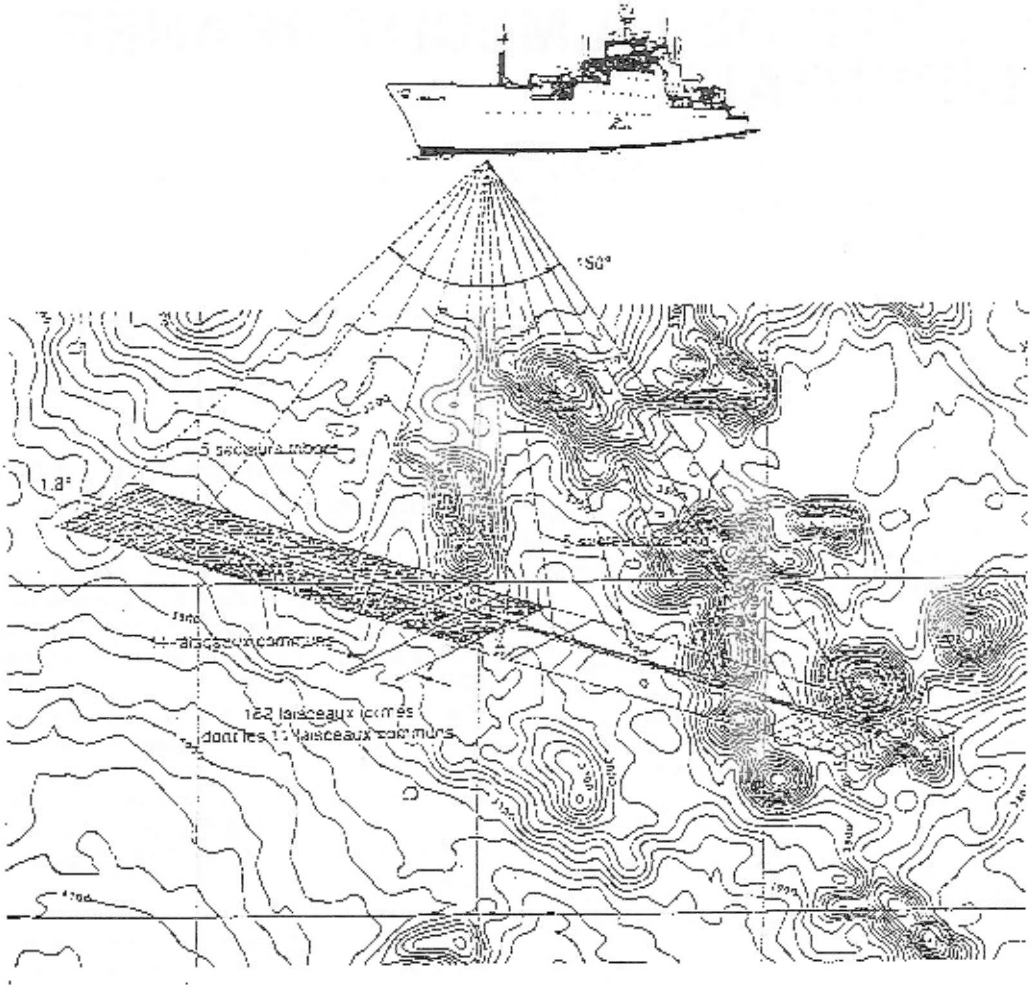

Figure 1 : Principe et géométrie des faisceaux de l'EM12D
Le sondeur multifaisceaux Simrad EM12D de l'Atalante produit la bathymétrie et l'imagerie des fonds de 70 à 11 000 mètres
Il couvre une largeur allant jusqu'à 7 fois la profondeur d'eau.

De plus, les sondeurs multifaisceaux de type Simrad permettent l'acquisition de données d'imagerie.
Cette information qui n'existait pas avec le Seabeam, fournit une image du fond marin en fonction de l'énergie acoustique réfléchie sur la surface insonifiée par le sondeur.

Ces données d'imagerie sont désormais essentielles pour l'interprétation de la nature des fonds et l'étude de la morphobathymétrie.

La qualité des données en milieu marin est liée également à une bonne connaissance :

- du positionnement du navire; les systèmes ont évolué, parallèlement au sondeur : le système GPS, qui est utilisé couramment, offre une précision maximale de l'ordre de 20 mètres ;
- des paramètres de comportement du navire (tangage, roulis, pilonnement), qui sont pris en compte par les sondeurs ;
- de la propagation du son dans l'eau ; actuellement, des profils de célérité sont mesurés régulièrement et utilisés en opération, alors que le sondeur Seabeam opérait avec une célérité constante de 1500m/s.

L'acquisition en mer résulte donc de l'enregistrement d'un ensemble complexe d'informations.

Pour traiter ce type de données, l'IFREMER a développé ses propres logiciels de cartographie automatique.

La finalité du traitement est la représentation des fonds marins, sous la forme de cartes bathymétriques ou de cartes d'imagerie.

2 Traitement des données de bathymétrie

Le logiciel de traitement automatique des données bathymétriques de sondeurs multifaisceaux, réalisé par

le Département Informatique de l'IFREMER, est le logiciel TRISMUS [3].

Les fichiers de sondes et de navigation sont les deux fichiers d'entrée du logiciel.

La fusion de ces deux fichiers crée un fichier de sondes positionnées géographiquement.

La finalité du traitement est un modèle numérique de terrain fournissant une représentation bathymétrique de la zone étudiée.

Un modèle numérique de terrain est une grille régulière de valeurs bathymétriques interpolées à partir des données brutes : chaque point de grille est la moyenne simple ou pondérée des sondes brutes dans le voisinage.

Trois opérations essentielles conditionnent les traitements :

- le contrôle et le filtrage de la donnée brute ;
- le choix du pas de grille du modèle numérique et des échelles de travail ;
- le lissage des modèles numériques de terrain.

Il s'agit en effet de corriger les données brutes des erreurs d'acquisition existantes, d'adapter le modèle à la densité des sondes et au degré de précision recherché et enfin de finaliser le modèle numérique pour corriger certains artefacts persistants.

2.1 Contrôle et filtrage des sondes brutes

Cette opération est essentielle : le modèle numérique de terrain est calculé sur les sondes brutes, par conséquent, la qualité du modèle numérique est directement liée à la qualité du jeu de sondes.

Les données sont dégradées soit par des sondes aberrantes, soit par des bruits sur les sondes.

Les bruits peuvent être dûs à un mauvais état de la mer. Ils sont aussi causés par des mesures moins précises sur les faisceaux les plus éloignés de la verticale du navire : en effet, lorsque l'angle d'incidence d'émission et réception du signal acoustique s'accroît, l'influence des paramètres d'environnement (roulis, célérité,..) augmente et peut engendrer des imprécisions sur la mesure et le positionnement des sondes.

Le logiciel TRISMUS permet deux types de filtrage de sondes brutes.

La première méthode est automatique, basée sur la comparaison du fichier de sondes à un modèle numérique de référence : toutes les sondes bathymétriques sont comparées à ce modèle de référence et sont annulées si l'écart dépasse un seuil fixé par l'opérateur (filtre type passe-bande).

Le modèle de référence est calculé à partir des données brutes : ce modèle est moyenné et lissé, de manière à isoler les sondes aberrantes à l'étape de comparaison.

Le choix du seuil de tolérance est guidé par le souci de ne pas éliminer des sondes réellement valides. Cependant, il peut être préférable de réduire le seuil de tolérance pour bien éliminer les sondes aberrantes, quitte à perdre une faible quantité de sondes valides : en effet, la densité et la quantité de sondes est en général suffisante pour permettre une élimination de données valides sans préjudice pour la précision du document cartographique final.

Dans un souci de perfectionner les moyens de filtrage des données brutes, un logiciel spécifique a également été développé [4].

D'une part, l'opérateur peut visualiser les données et éliminer manuellement les sondes invalides.

D'autre part, des algorithmes de détection de sondes fausses peuvent être appliqués : le positionnement sur ces sondes est automatique et l'opérateur confirme ou non leur élimination.

L'un de ces algorithmes, nommé «détection par méthode de variation de pente interne», opère sur chaque cycle d'acquisition : les variations de pente et les dénivelés mesurés entre trois faisceaux successifs sont comparés à des seuils de tolérance fixés par l'opérateur. Si ces seuils sont dépassés, le faisceau est détecté comme invalide.

L'intérêt opérationnel de cette méthode est la rapidité d'exécution et le repérage des sondes par leur numéro de cycle et de faisceau.

L'algorithme est en cours d'évaluation : comparaison des sondes détectées par l'algorithme avec les sondes réellement invalides repérées par le cartographe (voir Figure 2).

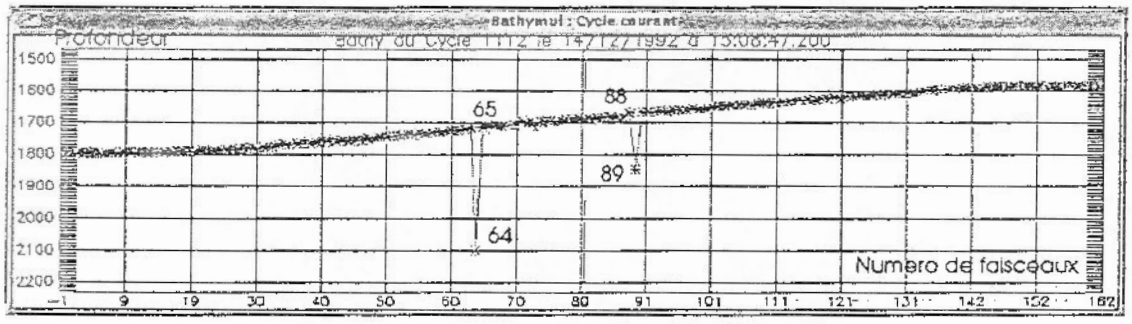

Figure 2 : Visualisation et détection de sondes erronées.
La figure présente la coupe bathymétrique le long d'un cycle d'acquisition EM12D.
Les faisceaux sont numérotés de babord vers tribord.
La méthode de «variation de pente interne» détecte sur ce cycle visualisé :
les faisceaux n°64, 65, 88 et 89
Le cartographe élimine les faisceaux n°64 et 89 qui sont réellement invalides

2.2 Choix du pas de grille du modèle numérique et de l'échelle de travail

Le choix de l'échelle de travail et du pas de grille du modèle numérique conditionne le traitement des données bathymétriques.

Le modèle numérique de terrain et la carte bathymétrique ne sont pas une finalité : ces documents sont destinés aux études géologiques ou morphologiques. La nature de ces études détermine l'échelle des documents cartographiques, une échelle 1/250 000ème ou 1/500 000ème peut convenir à l'étude d'une marge ou d'une ride océanique, une échelle 1/50 000ème à l'étude d'un champ de dunes sur le plateau continental.

Le cartographe choisit alors le pas de grille pour l'adapter à l'échelle requise : un pas de grille égal au 1:1000 du dénominateur de l'échelle (exemple : 100 mètres pour une échelle 1/100 000ème) est considéré comme une «pseudo-norme» pour reproduire à l'échelle fixée un niveau de détail satisfaisant.

La densité et la qualité des données doivent être également prises en compte.

Le pas de grille du modèle ne peut être inférieur à l'espacement moyen des sondes, pour rester cohérent avec la densité des données.

Par ailleurs, en fonction de la qualité des données, en particulier du niveau de bruit, le pas de grille peut-être réduit ou augmenté pour respecter au mieux le détail de l'information ou minimiser l'influence du bruit.

Le choix du pas de grille influence de toute manière la finesse des opérations de traitement.

Il est peu logique de choisir un pas de grille faible et d'appliquer des procédures de moyenne et/ou lissage forts au modèle numérique.

2.3 Lissage avec pondération selon la pente

Certains artefacts de la donnée brute sont quasiment impossibles à corriger par une opération de filtrage automatique. Ils apparaissent comme un bruit sur la donnée.

Ces anomalies peuvent apparaître entre autres au recouvrement entre deux profils, ou bien dans le cas de bruit généré par un mauvais état de mer.

Ces défauts sont essentiellement visibles sur les fonds à faibles pentes : en effet, dans les zones à fortes pentes, le bruit devient négligeable par rapport aux variations de bathymétrie.

La correction de ces artefacts procède du lissage de modèle numérique de terrain en tenant compte de la pente aux noeuds de grille (voir figure 3).

Un faible lissage est utilisé pour les fortes pentes, un fort lissage pour les faibles pentes, et un lissage pondéré pour les pentes intermédiaires afin d'assurer la continuité de l'opération.

Le modèle numérique de terrain (mnt) résulte de l'opération suivante :

si pente<pmin, mnt=mnt1 (modèle fortement lissé)
si pente>pmax, mnt=mnt2 (modèle faiblement lissé)
si pmin<pente<pmax, mnt=((pente-pmin)mnt2+(pmax-pente)mnt1)/(pmax-pmin)

Le modèle numérique de terrain mnt1 est obtenu par un lissage spline bicubique, et le modèle mnt2 par un lissage pondéré des noeuds de grille avec leurs voisins.

Les seuils de pente, pmin et pmax, sont déterminés par l'opérateur à l'aide d'une étude statistique des pentes et d'une comparaison de la carte bathymétrique avec la carte des pentes.

Les pentes sont calculées sur le modèle numérique de terrain le plus lissé : la pente à chaque noeud est la valeur maximale des pentes calculées avec les huit voisins les plus proches.

Les modèles numériques de terrain qui résultent de l'ensemble des traitements sont utilisés pour des représentations graphiques, contourage bathymétrique ou bloc diagramme 3D, ou pour des études numériques, étude des pentes ou cartographie de réseau hydrographique par exemple.

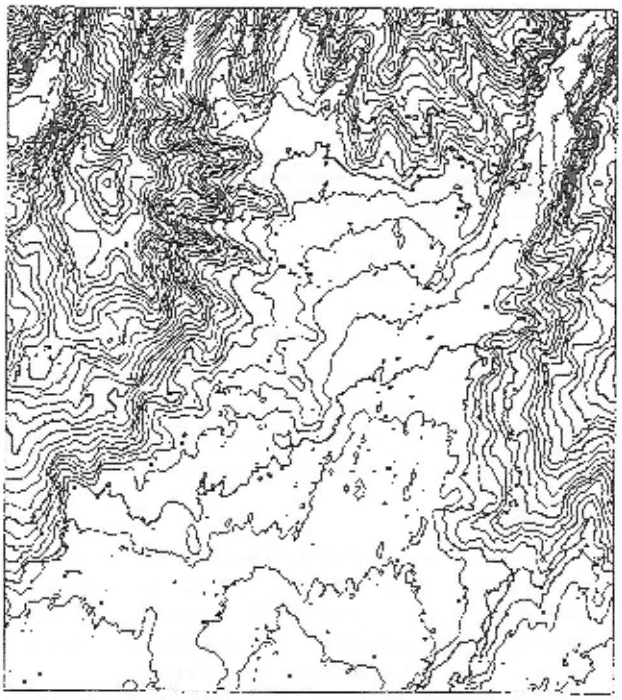

Figure 3a : Modèle numérique de terrain sans lissage

Figure 3b : Modèle numérique de terrain avec lissage
Un lissage fort par méthode spline bicubique est appliqué sur les zones de pentes inférieures à 6%
Un lissage faible par pondération des valeurs aux noeuds de grille avec les valeurs voisines est appliqué sur les zones de pentes supérieures à 10 %.
Sur les zones de pentes intermédiaires un lissage pondéré est utilisé.

3 Imagerie

3.1 Principe du traitement de l'imagerie

Le logiciel de traitement automatique des données d'imagerie est le logiciel IMAGEM, également développé au Département Informatique de l'IFREMER [5].

Les données utilisées sont les données d'imagerie calculées par le sondeur, les données de navigation et le fichier de sondes.

Le but du traitement est la constitution d'une mosaïque qui est une matrice dont chaque élément représente une surface rectangulaire du fond marin positionné géographiquement : l'image obtenue est la représentation en niveau de gris de la variabilité de la réponse acoustique des fonds marins.

L'enchaînement des traitements est le suivant [5]:

- Positionnement spatial des échantillons sonar ;
- Choix de l'échelle de travail et de la taille des pixels de la mosaïque ;
- Positionnement des pixels de la mosaïque ;
- Interpolation des pixels non renseignés.

La taille des pixels de la mosaïque est choisie en fonction de l'échelle de travail et de la résolution du restituteur qui est utilisé pour le tracé de l'image :

$$L=p/e$$

Pour une carte à l'échelle 1/250 000ème restituée sur un traceur thermique de 400 pixel/pouce, la taille du pixel image correspond à 62.5 mètres sur le terrain.

Cette taille peut être inférieure à l'espacement des cycles d'acquisition de l'EM12D : il est donc indispensable de disposer d'outils d'interpolation pour renseigner les pixels «blancs».

La méthode d'interpolation est le balayage de l'image par une fenêtre mobile : si le pixel central de la fenêtre n'est pas renseigné, il est calculé à partir des pixels connus à l'intérieur de cette fenêtre (moyenne simple ou pondérée, affectation du voisin le plus proche, ...).

Le logiciel IMAGEM offre les options suivantes :

- Habillage cartographique de la mosaïque ;
- Tracés superposés de l'imagerie et du contourage bathymétrique ;
- Assemblage de mosaïques.

L'utilitaire ANALIM (ANAlyse d'IMages) est associé au logiciel IMAGEM pour :

- La visualisation des images brutes et traitées;
- Le tracé des histogrammes ;
- Le réglage des contrastes de l'image pour une meilleure lisibilité de l'image en fonction de l'intérêt des géologues.

3.2 Intérêt géologique des cartes d'imagerie

La carte d'imagerie apporte aux géologues une information très intéressante, complémentaire de la bathymétrie. Elle guide l'interprétation de la nature des fonds marins. Le géologue peut repérer une zone à niveau de réflectivité homogène : par exemple, un fond de vases molles est peu réfléchissant et apparaît plus clair sur l'image qu'un fond rocheux très réfléchissant. Lorsqu'une zone homogène est ainsi repérée, la réelle nature du fond peut être déterminée par un prélèvement de terrain.

Par contre, une structure morphologique très abrupte peut apparaître également comme une zone très réfléchissante : il s'agit d'un effet dû aux fortes pentes sans être forcément lié à la nature du fond. Dans un tel cas, l'étude simultanée de la bathymétrie et de l'imagerie permet de lever le doute.

L'étude de l'imagerie peut également mettre en évidence des éléments morphologiques ou sédimentaires non visibles en bathymétrie lorsqu'ils sont liés à une variation très faible du relief.

4 Cas d'étude «La Méditerranée française»

Ces méthodologies ont été appliquées à la cartographie des eaux territoriales françaises en Méditerranée occidentale et leur extension vers le large.

Les travaux se traduisent par la production de six cartes à l'échelle du 1/250 000ème (voir Figure 4), comprenant soit la bathymétrie seule, soit la bathymétrie et l'imagerie acoustique selon le type de sondeur utilisé.

La reconnaissance du plateau continental n'est pas incluse dans ce programme.

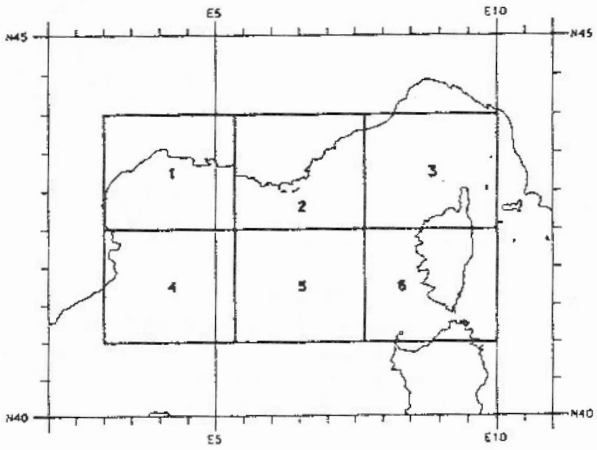

Figure 4 : Emplacement géographique des six cartes à l'échelle 1/250 000ème de la synthèse bathymétrique en Méditéranée occidentale

Les données de bathymétrie proviennent des données des sondeurs Simrad et Seabeam.
Les données d'imagerie sont issues des sondeurs Simrad uniquement.

La spécificité de cette étude est la synthèse de données bathymétriques provenant de sondeurs, navires et missions différents : les travaux de synthèse nécessitent des moyens d'homogénéisation des données, pour l'ajustement des profondeurs et du positionnement des sondes.

En fonction des moyens logiciels et de la connaissance des données, la méthodologie suivante a été adoptée pour le traitement bathymétrique :

- Les données EM1000 sont prises comme référence pour leur niveau de qualité.
- les données EM1000 et EM12D sont traitées séparément et groupées par une opération de complément de modèles numériques de terrain.

Cette opération est possible car le niveau de qualité du positionnement est relativement homogène entre l'EM1000 et l'EM12D, et les sondes sont calculées selon le même principe de prise en compte de profils de célérité mesurés.

- Le positionnement des données Seabeam est corrigé par recalage sur les données EM1000 ou EM12D.

Cette opération n'est pas systématique mais souvent nécessaire car l'acquisition des données Seabeam a été réalisée avec des systèmes de positionnement souvent moins précis que le système GPS actuel.

- Maillage des données Seabeam au pas de 125 mètres.
- Recalage en profondeur des données Seabeam sur les données Simrad.

Les données Seabeam ont été calculées pour une vitesse de propagation dans l'eau de 1500 m/s.

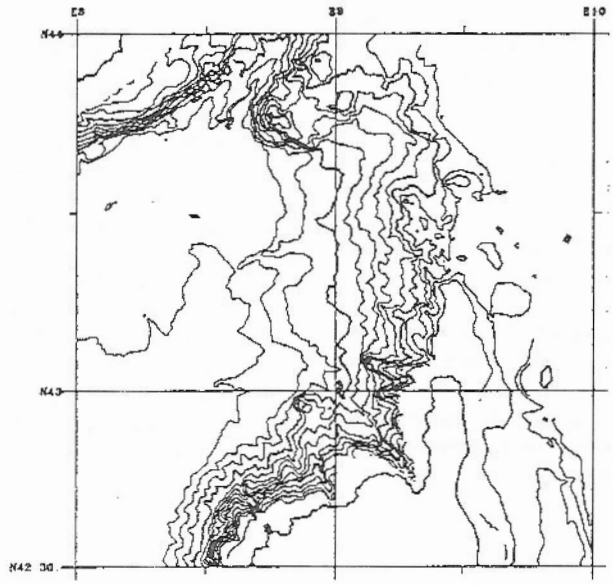

Figure 5 : Bathymétrie de la Méditerranée occidentale (secteurs mer Ligure et nord de la Corse)
Equidistance des isobathes : 200 mètres

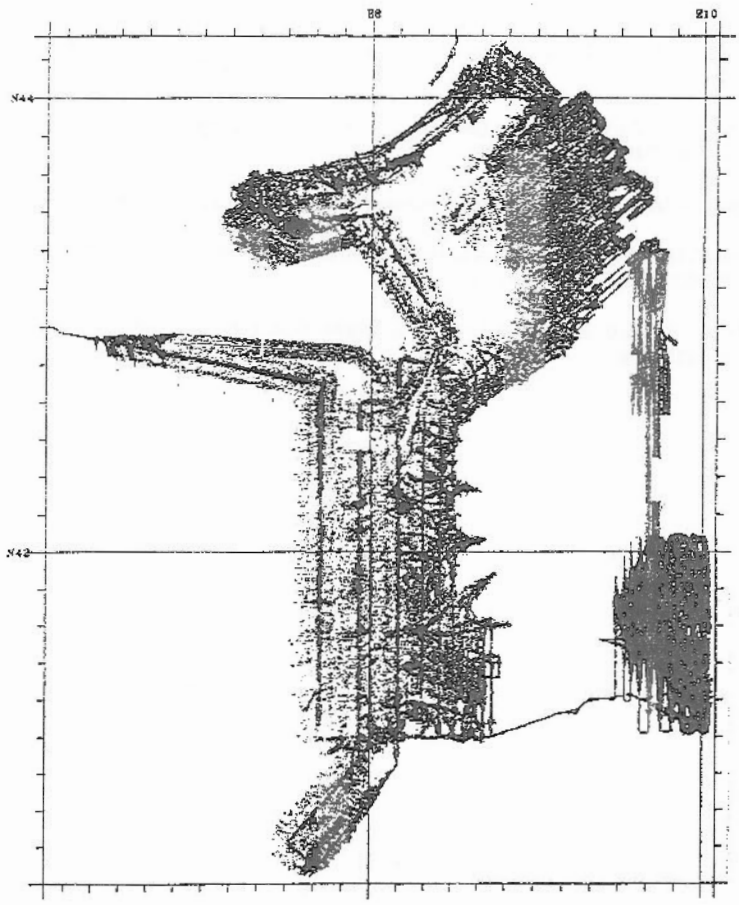

Figure 6 : Imagerie de la Méditerranée occidentale (secteurs mer Ligure et Corse)
Données de la mission Mesim (Ifremer DRO/GM, 1991)

Une étude de comparaison de grille SeaBeam et EM12D/EM1000 a permis d'établir qu'à l'échelle de travail du 1/250 000ème, l'application d'un facteur multiplicatif sur les valeurs bathymétriques des modèles numériques SeaBeam est suffisante et satisfaisante pour corriger le biais existant avec les données plus récentes.

Il s'agit donc d'une correction linéaire.

- Compléments des modèles Simrad par les modèles SeaBeam.

Cette procédure d'approche permet une synthèse bathymétrique satisfaisante à l'échelle choisie.

Les cartes d'imagerie sont le résultat d'un traitement classique des données du sondeur Simrad EM12D.

Les figures 5 et 6 présentent l'imagerie et le contourage bathymétrique en Méditerranée entre les côtes métropolitaines françaises et la Corse.

Conclusion

Les sondeurs multifaisceaux modernes permettent une reconnaissance rapide des fonds marins pour la production des documents cartographiques.

Les logiciels et les méthodologies de traitement évoluent de manière à tirer le meilleur parti de l'information enregistrée. Les développements actuels insistent sur le contrôle et le filtrage des données fausses de bathymétrie et sur l'interprétation des informations d'imagerie pour la détermination de la nature des fonds.

La précision des traitements conditionne la qualité des documents cartographiques, cartes bathymétriques et d'imagerie : cette qualité est recherchée pour aider les géologues à une interprétation approfondie.

Dans le cadre de programme de cartographie de zones étendues, l'origine des données peut être variée et la maîtrise des méthodes de synthèse bathymétrique devient essentielle.

Références

[1] Renard, V. and Allenou, J.P., 1979. Sea Beam, multi-beam echo sounding in «Jean Charcot». International Hydrographic Review, 56, pp.35-37.

[2] Hammerstad, E., Ohner, F., Parthiot, F. and Bennett, J., 1991. Field testing of a new deep water multibeam echosounder. Oceans'91, Vol.2, pp.743-749.

[3] Edy, C., 1994. TRISMUS, Manuel de référence. Document technique Ifremer DITI/DSI/SONDEURS-DT/CE/94-014.

[4] Maroni, C., 1994. TRISMUS Bathymul - Visualisation et analyse des données brutes - Manuel de référence. Document technique Ifremer DITI/DSI/MU-SONDEURS/CM/94-013.

[5] Augustin, J.M., Edy, C., Savoye, B. and Le Drezen, E., 1994. Sonar mosaic computation from multibeam echo sounder. Oceans'94, Vol.2, pp.433-438