

121
UL
1990
P374

APPROCHE INTÉGRÉE DE TRAITEMENTS NUMÉRIQUES
DES DONNÉES BATHYMÉTRIQUES ACOUSTIQUES ET OPTIQUES
EN VUE DE RÉDUIRE L'INTERVENTION HUMAINE

Jacynthe Pouliot

Mémoire
présenté
à l'École des gradué(e)s
de l'Université Laval
pour l'obtention
du grade de maître ès sciences (M.Sc.)

Faculté de Foresterie et de Géomatique
Université Laval
Québec

Décembre 1990

© droits réservés de Jacynthe Pouliot 1990



RÉSUMÉ

Les problèmes occasionnés par la quantité et variété de données enregistrées par les nouveaux systèmes de levés bathymétriques obligent les hydrographes à modifier leurs opérations. L'imagerie numérique et les techniques s'y rattachant apparaissent être des outils nouveaux de manipulation, de traitement et de représentation des données permettant de faciliter ou même d'améliorer ces opérations. Le mémoire avait pour objectif général d'expérimenter ces nouveaux outils. Les données utilisées proviennent de levés bathymétriques effectués par le Service hydrographique canadien à l'aide du F.C.G. Smith et du Larsen 500 dans la région de l'île du Havre St-Pierre. La première partie du travail consiste à sélectionner les sondages critiques pour la réduction. Premièrement, un seuil d'acceptation élimine les profondeurs extrêmes et erronées s'éloignant de la profondeur moyenne de plus de K fois l'écart-type. Deuxièmement, la compression sélective à l'aide d'un opérateur laplacien et d'une structure hiérarchique réduit le nombre de points en éliminant les profondeurs redondantes. La compression sélective est basée sur des mesures bien définies et objectives permettant d'éliminer l'élément subjectif apporté par le jugement de l'hydrographe. La deuxième partie du travail conduit à l'étude des relations existant entre les facteurs influençant l'exactitude des modèles numériques de terrain. Des images construites à partir des profondeurs minimums, de la moyenne pondérée, d'une surface polynômiale et par la différence finie permettent de mettre en évidence les avantages et inconvénients de chaque méthode en hydrographie. Les traitements sont effectués sur un système d'analyse numérique d'images (PCI), un système d'information géographique (PAMAP) et à l'aide d'algorithmes personnels.

845653
Jacynthe Pouliot
Etudiante maîtrise

Dr. Alfonso Condal
Directeur

AVANT-PROPOS

C'est avec beaucoup d'émotions et d'enthousiasme que je mets un point final à une recherche débutée depuis plus de 2 ans. Si on pouvait exprimer sur papier toutes les joies, déceptions, angoisses, ... rencontrées durant ce travail, ce manuscrit serait largement plus volumineux. La réalisation des objectifs est possible en conservant une attitude positive même lorsque la motivation fait défaut.

Un gros merci à Johanne Caron et à une amie spéciale pour leur participation à la transcription et correction de ce travail. Je ne peux oublier mes parents et amis (es) pour leur soutien moral tout au long de mon cheminement.

Un merci sincère à Robert Landry pour avoir su prêter une oreille attentive à mes problèmes tout en me donnant de précieux conseils.

Je voudrais remercier M. Patrick Hally et les informaticiens du Service hydrographique canadien de Ste-Flavie pour leur collaboration (prêt gratuit des données bathymétriques) et leurs conseils pour la mise à terme de cet ouvrage.

Finalement, merci à mon directeur Dr. Alfonso Condal et mon codirecteur Dr. Paul-André Gagnon pour leur suivi et la confiance qu'ils ont su me transmettre pour la réalisation de ce présent travail.

TABLE DES MATIERES

	Pages
Résumé.....	i
Avant propos.....	ii
Table des matières.....	iii
Liste des tables.....	vii
Liste des figures.....	viii

CHAPITRE I - INTRODUCTION

1.1 Introduction.....	2
1.2 Problématique.....	3
1.3 Objectifs.....	6

CHAPITRE II - REVUE DES TECHNIQUES ACTUELLEMENT

UTILISÉES EN HYDROGRAPHIE

2.1 ACQUISITION DES DONNÉES.....	11
2.1.1 Introduction.....	11
2.1.2 Méthodes acoustiques.....	13
2.1.2a Principe de la mesure.....	13
2.1.2b Systèmes à faisceaux étroits.....	17
2.1.2c Systèmes multifaisceaux.....	19

2.1.2d	Sondeur latéral.....	21
2.1.3	Méthodes optiques.....	22
2.1.3a	Configuration et caractéristiques du système.....	22
2.1.3b	Précision et limitations du système.....	28
2.2	TRAITEMENTS DES DONNÉES BATHYMÉTRIQUES (SHC).....	31
2.2.1	Introduction.....	31
2.2.2	Revue littéraire.....	32
2.2.2a	Canada.....	32
2.2.2b	Etats-unis.....	35
2.2.3	Présentation de l'information de profondeur....	37
2.2.4	Modèles Numériques de Terrain.....	44
2.2.4a	Introduction.....	44
2.2.4b	Techniques d'interpolation.....	45
2.2.4c	MNTs utilisés en hydrographie.....	48

CHAPITRE III - TRAITEMENTS ET TECHNIQUES EMPLOYÉS

3.1	INTRODUCTION	53
3.1.1	Région à l'étude.....	53
3.1.2	Appareils bathymétriques.....	53
3.1.2a	F.C.G.Smith.....	53

3.1.2b Larsen 500.....	55
3.2 RÉDUCTION DES DONNÉES ORIGINALES.....	58
3.2.1 Seuil d'acceptation.....	59
3.2.2 Compression sélective.....	64
3.3 REPRÉSENTATION DES DONNÉES.....	73
3.3.1 Images de minimum.....	74
3.3.2 Moyenne pondérée.....	77
3.3.3 Surface polynômiale.....	78
3.3.4 Différence finie.....	79
3.4 FILTRAGES.....	81

CHAPITRE IV - INTERPRÉTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS

4.1 RÉDUCTION DES DONNÉES.....	90
4.1.1 Analyse quantitative de la réduction.....	94
4.2 MODELES NUMÉRIQUES DE TERRAIN.....	108
4.2.1 Analyse quantitative des MNTs.....	109
4.2.2 Analyse qualitative des MNTs.....	117

4.2.3.Optimisation de la largeur de la cellule..... 129

4.3 FILTRES..... 133

CHAPITRE V - CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS..... 139

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... 145

LISTE DES TABLES

Table 1a - Comparaison des modèles numériques de terrain utilisés en hydrographie (1ère partie).....	50
Table 1b - Comparaison des modèles numériques de terrain utilisés en hydrographie (1ère partie).....	51
Table 2 - Divers polynômes employés pour une surface.....	79
Table 3 - Statistiques des images Smith réduites par le seuil d'acceptation.....	96
Table 4 - Statistiques des images Smith réduites par la compression sélective.....	97
Table 5 - Statistiques de base et erreurs d'interpolation des images minimum des données Smith.....	110
Table 6 - Statistiques de base et erreurs d'interpolation des divers MNTs des données Smith.....	111
Table 7 - Statistiques de base et erreurs d'interpolation des MNTs des données Larsen.....	112
Table 8 - Appréciation de la performance des MNTs en hydrographie.....	128
Table 9 - Statistiques de base et erreurs d'interpolation des MNTs filtrés.....	134

LISTE DES FIGURES

Figure 1	- Atténuation de la propagation de l'onde acoustique dans l'eau.....	14
Figure 2	- Dispositif de visualisation et d'enregistrement.....	16
Figure 3a	- Système à faisceau étroit.....	18
Figure 3b	- Exemple du tracé bathymétrique du F.C.G.Smith..	18
Figure 4	- Géométrie de balayage du faisceau du transducteur.....	20
Figure 5	- Sondeur à balayage latéral à l'aide d'un poisson remorqué.....	21
Figure 6	- Différentes sources de laser dans le spectre...	23
Figure 7	- Sondage au laser.....	24
Figure 8	- Réflexion du faisceau laser à la surface et sur la surface de l'eau.....	25
Figure 9	- Exemple d'un tracé bathymétrique.....	26
Figure 10	- Principales composantes du lidar.....	27
Figure 11	- Chaîne de traitement des données hydrographiques du Canada.....	34
Figure 12	- Chaîne de traitement des données hydrographiques des Etats-Unis.....	36
Figure 13	- Carte bathymétrique.....	38
Figure 14	- Carte de contours.....	39

Figure 15 - Carte en teintes colorées.....	41
Figure 16 - Carte d'ombrage en perspective.....	42
Figure 17 - Paramètres influençant l'exactitude d'un MNT...	45
Figure 18 - Différentes fonctions possible pour l'interpolation.....	46
Figure 19 - F.C.G.Smith.....	54
Figure 20 - Larsen 500.....	56
Figure 21 - Réduction par le seuil d'acceptation.....	60
Figure 22 - Partitionnement des données Le carroyage ou maillage.....	62
Figure 23 - Réduction par la compression sélective.....	66
Figure 24 - Structure hiérarchique des données.....	67
Figure 25 - Structure permettant le calcul de la différence seconde.....	68
Figure 26 - Opérateur laplacien modifié.....	70
Figure 27 - Sélection des profondeurs à l'intérieur d'une cellule.....	74
Figure 28 - Histogramme des profondeurs situées à l'intérieur de la cellule.....	75
Figure 29 - Profil de la distribution des profondeurs à l'intérieur de la cellule.....	76
Figure 30 - Polynôme de 2e degré.....	78
Figure 31 - Déplacement d'une fenêtre sur une image.....	83
Figure 32 - Principe de la convolution.....	84

Figure 33 - Effets des filtres sur un histogramme d'une image.....	86
Figure 34 - Zone à l'étude issue de la carte bathymétrique du SHC.....	92
Figure 35 - Erreur d'interpolation des données Smith pour différentes valeurs de K.....	98
Figure 36 - Indice de compression des données Smith pour différentes valeur de K.....	100
Figure 37 - Sous région représentant les résultats de la compression sélective en modifiant le niveau hiérarchique.....	102
Figure 38 - Sous région représentant les résultats de la compression sélective en modifiant la valeur de K.....	103
Figure 39 - Rapport c/e des données Smith pour différente valeur de K.....	104
Figure 40 - Patron de sondage des données Smith.....	107
Figure 41 - Erreur d'interpolation des données Smith en fonction de la largeur de la cellule pour divers MNTs.....	113
Figure 42 - Erreur d'interpolation des données Larsen en fonction de la largeur de la cellule pour divers MNTs.....	116
Figure 43 - Image bathymétrique des données Smith	

	Résolution: 2mx2m.....	118
Figure 44 - Rehaussements d'images Smith		
	Résolution: 10mx10m.....	120
Figure 45 - Modèles bathymétriques des données Smith		
	Résolution: 5mx5m.....	122
Figure 46 - Modèles bathymétriques des données Larsen		
	Résolution: 5mx5m.....	124
Figure 47 - Images de différences des MNTs des données Smith		
	Résolution: 5mx5m.....	126
Figure 48 - Images de différences des MNTs des données Larsen		
	Résolution: 5mx5m.....	127
Figure 49 - Régression linéaire entre l'erreur d'interpolation d'un MNT et la largeur de la cellule pour différents types de terrain.....		130
Figure 50 - Relation entre l'écart-type normalisé et le coefficient a_1 de la régression linéaire entre l'erreur d'interpolation et la résolution.....		132
Figure 51 - Erreurs d'interpolation des filtres pour différentes largeurs de fenêtre.....		135
Figure 52 - Images bathymétriques après filtrage.....		137

CHAPITRE I

INTRODUCTION

1.1 INTRODUCTION

L'application de la télédétection à l'océanographie est de nos jours une composante intégrale et nécessaire pour la surveillance des phénomènes océaniques. Cependant, la télédétection ne perçoit les caractéristiques en profondeur que par leur influence à la surface. La production de cartes bathymétriques à partir d'images satellites s'avère, encore aujourd'hui, plus ou moins sécuritaire pour la navigation. En général, le signal électromagnétique émis par le satellite peut pénétrer l'eau entre 10 et 15 mètres dans la région verte du spectre. Cette limite empêche d'obtenir la précision requise pour les travaux hydrographiques. Néanmoins, les techniques d'analyse d'images numériques, actuellement utilisées en télédétection, peuvent apparaître comme des outils intéressants pour les hydrographes. On peut mentionner par exemple des rehaussements couleurs, des corrections géométriques, des filtrages, etc... Pour faciliter ou même améliorer les opérations de visualisation et d'analyse exécutées par l'hydrographe et le cartographe lors de la production d'une carte marine, pourquoi n'utiliserions-nous pas ces techniques directement avec les données issues des levés bathymétriques conventionnels? En effet, l'imagerie et les techniques s'y rattachant pourraient servir lors de la réduction, de la validation et de l'interprétation des données bathymétriques.

1.2 PROBLÉMATIQUE

La venue de technologies modernes permettant l'acquisition de données, à des rythmes de plusieurs fois supérieurs à ceux des anciens systèmes, place un nouveau fardeau sur les épaules des hydrographes et des cartographes. Elle oblige ceux-ci à modifier les opérations habituellement exécutées sur le bateau ou au sol.

Des systèmes de sondage comme le Lidar et le balayeur multifaisceaux augmentent de façon significative le volume et le type d'information caractérisant l'environnement marin. Le système à balayage F.C.G. Smith peut, par exemple, capter environ 2 millions de sondes à l'heure. Cependant, des limites liées aux matériels et aux logiciels empêchent l'utilisation de toutes ces profondeurs. Habituellement, à des échelles de 1/1000, 0.5% à 0.8% environ de toutes les profondeurs enregistrées sont sélectionnées pour la construction de la minute terrain [Midthassel et al., 1988]. Par conséquent, la réduction du nombre de profondeurs s'avère être une opération préliminaire indispensable. Les hydrographes doivent donc déterminer la quantité de données à retenir et à rejeter pour que la carte finale soit en même temps lisible, exacte et pertinente. Pour que la sélection des profondeurs soit d'utilité pratique, il est évident qu'elle doit s'effectuer automa-

ordinateur.

La structure du carroyage est quelquefois employée pour la réduction des données surabondantes [Botman and Kubik, 1979; Claussen, 1987; Greenberg, 1987; Grim, 1988; Herliky et al., 1988; Leberl, 1973; Midthassel et al., 1988]. Généralement, la largeur de la cellule est déterminée en considérant seulement l'échelle graphique de la carte finale et l'échelle du levé. Cet intervalle est néanmoins dépendant de l'homogénéité de la région, du patron de sondage et de la densité des points. Par conséquent, nous pourrions vérifier les effets de la variation de cette largeur de cellule sur la réduction, la validation et l'interprétation.

En raison de cette augmentation continue des données hydrographiques, la gestion et la présentation des données deviennent de plus en plus un champ intéressant et important d'étude pour les hydrographes et les cartographes. Cet état de fait amène les hydrographes à s'intéresser aux modèles numériques de terrain (MNTs). Ceux-ci apparaissent comme étant des éléments fondamentaux pour le développement d'outils permettant la visualisation, l'édition et l'analyse. La littérature nous montre que les modèles numériques de terrain ont trouvé diverses applications en cartographie [Botman and Kubik, 1979;

Burrough, 1986; Leberl, 1973; Leberl, 1975; Mark, 1978; Schenke, 1989], en télédétection [Gratton, 1989; Grieve and Simard, 1984], en photogrammétrie [Chapman, 1987; Doyle, 1978; Ghazalli, 1974; Makarovic, 1973; 1976; 1977a; 1983; Tempfli, 1980] et en géologie [Chorowicz et al., 1989; Simard and Slaney, 1986]. Cependant, cet outil a été très peu testé en hydrographie. Un modèle numérique de terrain doit utiliser un algorithme d'interpolation approprié dans le but de faciliter les opérations subséquentes de densification et de compression des données. Le présent travail tente d'attirer l'attention sur le fait que l'interpolation en hydrographie est une opération trop importante pour simplement dire que "l'interpolation linéaire est assez bonne" ou "qu'une méthode est la meilleure pour toutes les applications" ou bien que "la meilleure méthode d'interpolation est celle qui coûte le moins d'efforts". Ainsi, il est important de bien déterminer quelle méthode d'interpolation est la plus appropriée en hydrographie [Casey and Monahan, 1986; Leberl, 1973; Monahan and Casey, 1985]. La méthode d'interpolation devra aussi être établie en tenant compte du fait que l'hydrographe doit également manipuler des données ayant des origines diverses (acoustique, optique, magnétique) tout en cherchant à combiner ces données pour améliorer la construction de la carte.

Finalement, il faut mentionner que, présentement, l'interprétation des données de profondeurs est encore grandement influencée par les décisions de l'hydrographe lors du processus de traitement des données bathymétriques. Le jugement du cartographe lors de la production de la carte est très subjectif également [Burrows, 1988]. En effet, les opérations de sélection des profondeurs s'effectuent manuellement par l'hydrographe sur copie papier [DeMoustier, 1988; Lambert, 1988; Varma, 1984]. L'interprétation s'effectue au moyen de chiffres de profondeur et de courbes de niveau. Avec les techniques actuelles qui consistent en de multiples opérations d'impression et d'élimination des profondeurs surabondantes, une journée type de levé entraîne de 3 à 5 jours de traitement [Midthassel et al., 1988]. Toutes ces opérations doivent changer pour permettre d'optimiser le processus de traitement des données bathymétriques.

1.3 OBJECTIFS

Les principaux objectifs de ce travail consistent donc à élaborer des techniques permettant notamment la réduction automatisée et de valider les données originales pour la production de la carte en utilisant une information sous forme numérique. Cette forme numérique permet d'éliminer les erreurs

humaines (numérisation, vérification) et celles liées à l'équipement. Cette réduction des profondeurs est basée sur l'hypothèse qu'aucune mesure n'est exacte mais que la profondeur en un point n'est mesurée qu'une fois. Ce point représente ainsi le meilleur estimé pour la vraie profondeur. Les sondages sélectionnés doivent donc être validés pour représenter une profondeur non-ambiguë et sécuritaire pour le navigateur. L'élaboration de ces techniques a donc pour objectif pratique de réduire l'intervention de l'hydrographe lors du traitement des profondeurs.

La structure du carroyage qui représente un réseau de lignes en X et Y avec un intervalle régulier a été choisie dans le présent travail pour les raisons suivantes:

- format compatible pour l'imagerie,
- simplicité,
- format le plus utilisé pour les MNTs.

Généralement, la largeur de la cellule est déterminée en considérant l'échelle graphique de la carte finale ainsi que l'échelle du levé. Cette largeur est néanmoins dépendante de l'homogénéité de la région, du patron de sondage et de la densité de points. Il pourrait être intéressant de vérifier l'établissement d'un critère pour déterminer la résolution

optimale en fonction de l'homogénéité du terrain. Par la résolution optimale, on veut dire le nombre de profondeurs qui serait idéal pour adéquatement représenter la topographie du fond marin.

Dans le même ordre d'idée, l'utilisation de nouveaux produits devrait permettre de faciliter les opérations de visualisation et d'interprétation pour l'hydrographe. C'est, en tous cas, ce que vise l'introduction récente de produits tels que la projection orthographique en 2 dimensions par la codification en couleur, la vue en 3 dimensions, la vue en 2 dimensions de chaque cellule et finalement, les fichiers statistiques pour chaque cellule. Notre travail nous amène à analyser brièvement ces produits par rapport à l'objectif visé.

La comparaison des différentes méthodes d'interpolation mettra en évidence les avantages et les inconvénients de l'utilisation de celles-ci en hydrographie. A la fin de ce travail, nous devons être capable de répondre à la question: jusqu'à quel degré les modèles numériques de terrain peuvent atteindre les standards de sécurité et de précision demandés dans les applications en hydrographie?

Enfin, l'ensemble du travail nous permettra d'évaluer le potentiel d'utilisation d'un système d'information géographique (PAMAP) et d'un système d'analyse numérique (PCI) lors des traitements des données bathymétriques.

CHAPITRE II

REVUE DES TECHNIQUES ACTUELLEMENT UTILISÉES EN HYDROGRAPHIE

2.1 ACQUISITION DES DONNÉES

La science de l'hydrographie a comme objectif la connaissance et la description des eaux marines, des cours d'eau et des lacs. Au Canada, l'organisme qui s'occupe de la gestion de l'information marine des eaux navigables se nomme le Service Hydrographique Canadien (SHC). Son mandat est principalement axé vers la sécurité de la navigation pour le transport commercial, les services de traversiers, les plaisanciers et les pêcheurs.

On peut diviser grossièrement les opérations des hydrographes en deux parties: l'acquisition et le traitement des données hydrographiques.

2.1.1 Introduction

L'acquisition des données hydrographiques s'effectue par des levés terrain. Dans ce travail, nous considérons plus spécifiquement la portion de l'hydrographie qu'on nomme bathymétrie. La bathymétrie a pour objet la collecte de l'information de profondeurs pour fournir une première représentation de la topographie du fond. Ces levés bathymétriques peuvent être exécutés de façon traditionnelle en utilisant des navires ou des vedettes qui se déplacent le long de lignes pré-établies, habituellement parallèles et également espacées. Le SHC a, de

plus, mis à l'essai deux autres systèmes d'acquisition. Premièrement, le capteur Thematic Mapper du Satellite Landsat 4, avec plus d'une bande de pénétration dans l'eau et une haute résolution spatiale, est présentement une source possible de données hydrographiques [Doak et al., 1979; Naylor et al., 1983]. L'information provenant des satellites peut servir, entre autre, à la détection de brouillards, à l'estimation de la profondeur d'eau, à l'identification de passages sécuritaires, à la planification de levés hydrographiques et finalement à la mise à jour de cartes.

Deuxièmement, l'utilisation d'un avion pour améliorer ou remplacer les bateaux est présentement à l'étude par plusieurs nations. La majorité des systèmes aéroportés emploie un laser bleu-vert pour des profondeurs entre 2-50 m. [Banic et al., 1986; Casey and Vosburgh, 1987; Till, 1987]. La bathymétrie aéroportée offre une mobilité et une souplesse bien supérieure à la bathymétrie sur bateau dans les endroits éloignés. Les méthodes d'acquisition des données bathymétriques acoustiques et optiques seront vues plus en détail dans les sections suivantes.

2.1.2 Méthodes acoustiques

L'acoustique est la science qui étudie la génération, la propagation et la réception de l'énergie sous forme d'ondes vibratoires dans un milieu matériel. Cette énergie qui se nomme le son se propage dans l'eau (particulièrement bien dans l'eau de mer). La caractéristique principale de l'onde sonore est la célérité (vitesse de l'onde). La valeur réelle de la propagation dans l'eau varie quelque peu autour de la valeur moyenne de 1500 m/s + ou - 40 m/s. Ces variations sont en fonction de la température, de la salinité et de la profondeur d'immersion (pression).

2.1.2a Principe de la mesure

Les sondeurs mesurent l'intervalle de temps (Δt) entre l'émission d'une impulsion émise par une source et sa réception après réflexion sur le fond. [Habert, 1982; Hally, 1987]. Connaissant la vitesse de propagation du son (c) dans l'eau, on peut déterminer la profondeur (d) à l'aide de l'équation 2.1:

$$d = (c \Delta t) / 2. \quad (2.1)$$

La réflexion des ondes dépend de la puissance émise, de l'angle d'incidence, de la largeur du faisceau et du pouvoir réflecteur du fond. La propagation des ondes acoustiques est

assujettie aux phénomènes d'atténuation et d'extension. L'atténuation est liée à la dégradation de l'énergie et varie avec la fréquence et la distance. Elle est exprimée en décibel par unité de distance. L'extension, quant à elle, répartit l'énergie sur une plus grande surface à mesure que l'on s'éloigne de la source et est dépendante de l'ouverture du cône d'insonorisation. La figure 1 nous montre schématiquement l'atténuation de l'onde en fonction de la profondeur.

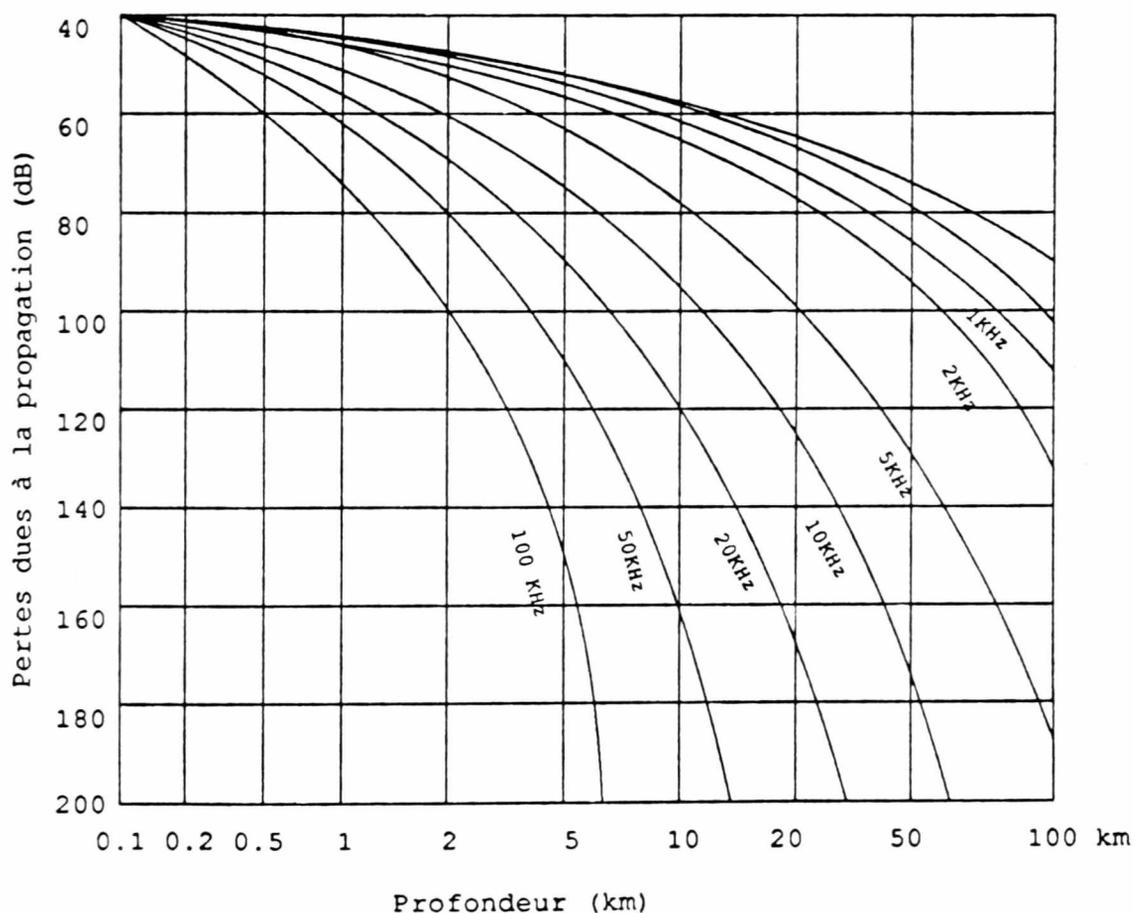


Figure 1 - Atténuation de la propagation de l'onde acoustique dans l'eau

Il faut mentionner que l'énergie est également absorbée ou diffusée par les particules en suspension dans l'eau, les bulles d'air, la vase en suspension, la vie marine (couche de plancton), etc.... .

Comme nous l'avons vu précédemment, la capacité de pénétration de l'onde dans l'eau est principalement fonction de la fréquence acoustique. Ainsi nous savons que les basses fréquences (10-15 KHz) sont utilisées pour les grandes profondeurs océaniques, les fréquences moyennes (30-90 KHz) sont utilisées pour des profondeurs entre 500 et 1500 m et finalement, les hautes fréquences sont employées dans les eaux peu profondes.

Si l'on revient à l'instrument principal de la bathymétrie qu'est le sondeur, il est bon de mentionner les diverses composantes de l'instrument:

1. une horloge,
2. un générateur d'impulsions,
3. un transducteur émetteur-récepteur; le premier transforme l'énergie électrique en énergie sonore à l'émission et le second transforme l'énergie sonore en énergie électrique à la réception. L'angle du faisceau est

d'autant plus faible que la fréquence est haute et que le diamètre est élevé.

4. Un dispositif de visualisation et d'enregistrement; voir la figure 2 qui montre une bande de papier enregistreur défilant à vitesse constante devant le style. Ce graphique d'enregistrement continu des profondeurs s'appelle un échogramme.

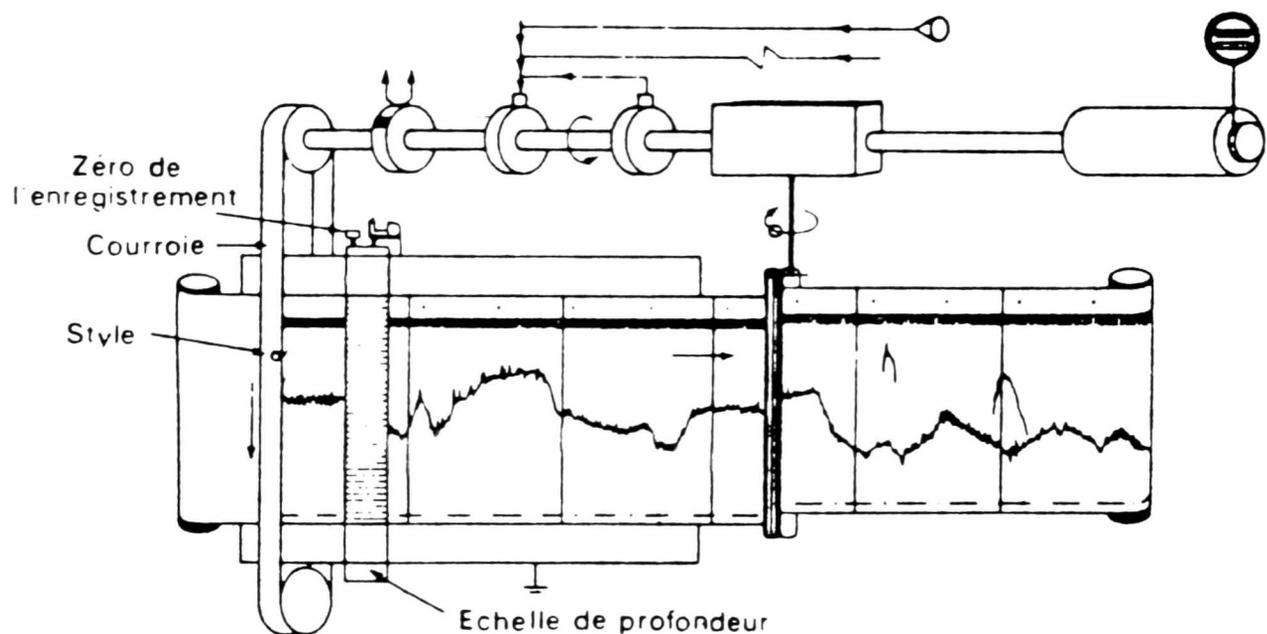
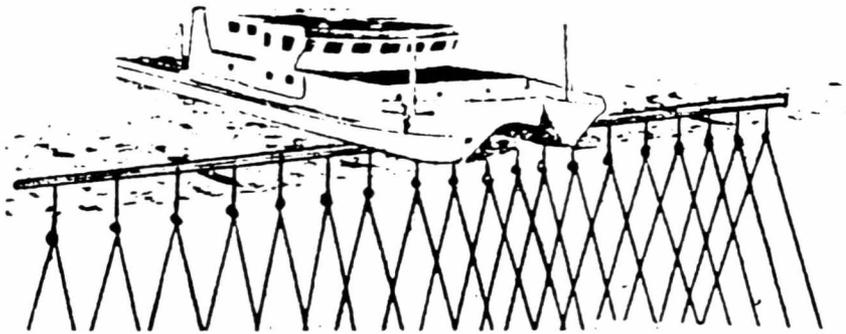


Figure 2 - Dispositif de visualisation et d'enregistrement

[Habert, I.P.A. 1982]

2.1.2b Systèmes à faisceaux étroits

Jusqu'aux années 1920, la ligne à plomb était l'outil principal pour mesurer la profondeur. L'insuffisance d'échantillonnage du relief a amené l'apparition des échosondeurs. Cependant, des carences d'échantillonnage dans la direction transverse à la route du navire ont obligé les hydrographes à modifier leur stratégie. C'est ainsi que l'on vit l'apparition de différentes méthodes de sondes parallèles [Engelmann, 1967; Farentholz, 1963; Stenborg, 1987]. Les figures 3a et 3b nous donnent un exemple de système à faisceaux étroits communément appelé SWEEP en anglais.



F.C.G.Smith, Balayage acoustique

Figure 3a - Système à faisceaux étroits

[Casey, M.A. 1987]

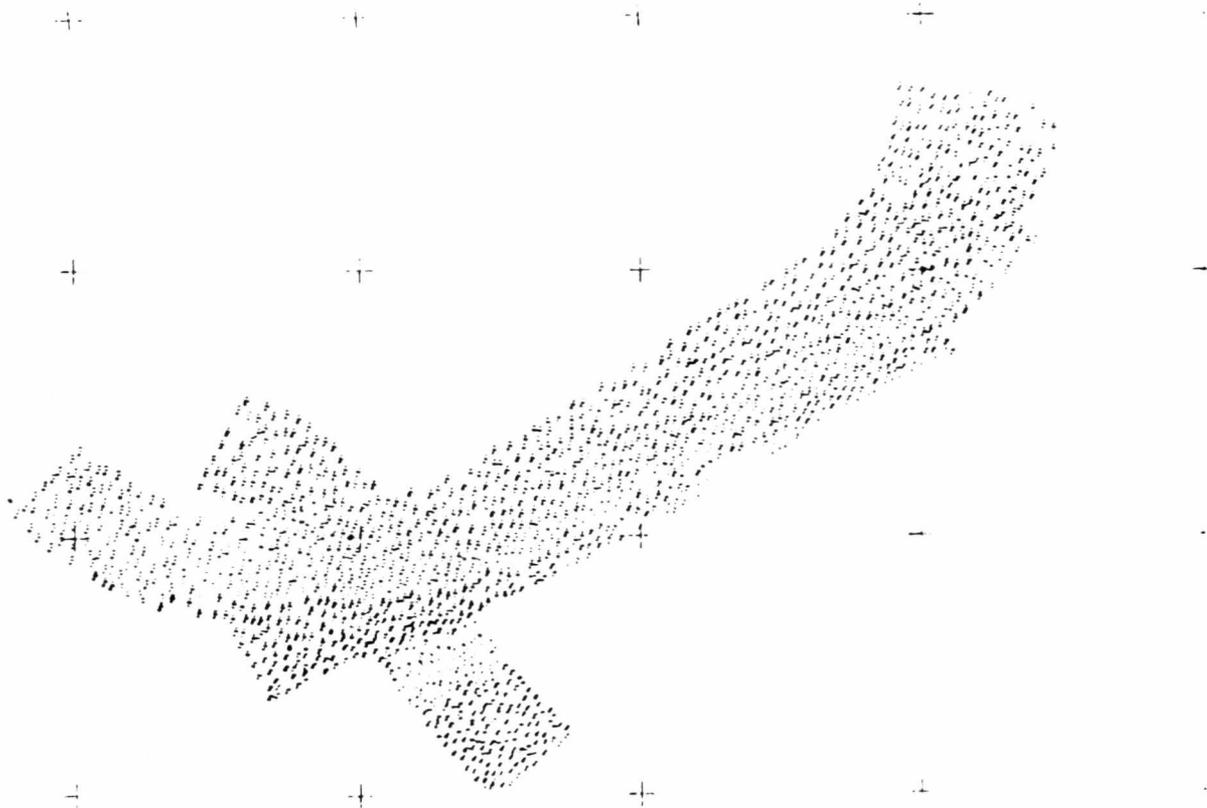


Figure 3b - Exemple du tracé bathymétrique du F.C.G.Smith

[Midthassel A.E. et al., 1988]

Ces systèmes, que l'on nomme également appareils à balayage vertical, sont composés de plusieurs transducteurs indépendants, disposés dans l'axe transverse du navire et dans ses extensions latérales (bras amovibles). L'espacement entre les transducteurs est établi de manière à obtenir un chevauchement des faisceaux [Bourgoin, 1981; Casey, 1988; Kerr, 1987]. Ce type de système a l'avantage de produire une couverture complète. Cependant l'équipement est complexe, coûteux et, en général, doit être installé en permanence sur les navires. De plus, le levé de chenaux étroits est difficile.

2.1.2c Systèmes multifaisceaux

Les systèmes acoustiques à balayage multifaisceaux (SWATH) ne comportent qu'un seul transducteur installé sous la coque du navire hydrographique [Bourgoin, 1981; Casey, 1987; Claussen et al., 1988; Cloet et al., 1986; DeMoustier, 1988; Kielland and Hally, 1989; McCaffrey, 1981; Midthassel et al., 1988; Perry, 1982]. La figure 4 illustre la géométrie d'un tel système.



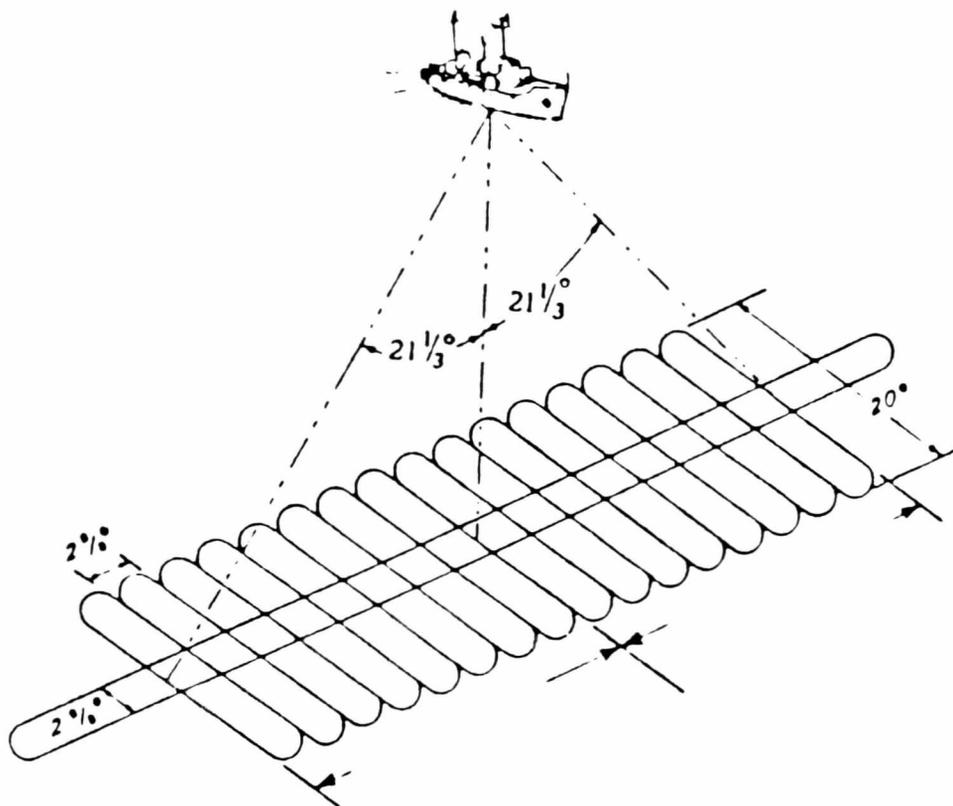


Figure 4 - Géométrie de balayage du faisceau du transducteur

[DeMoustier, C. 1988]

Le transducteur émet des impulsions vers le fond de l'océan suivant des angles pré-établis. Par conséquent, le système mesure des distances obliques, ce qui implique des corrections précises et supplémentaires pour le roulis et le tangage. Le diagramme de directivité peut couvrir plus de 40° sur le travers du bateau et environ 2.5° sur l'axe. Ces systèmes sont surtout utilisés pour sonder les eaux profondes. Une difficulté réside dans la mémorisation et le traitement des nombreuses données obtenues.

2.1.2d Sondeur latéral

Un sondeur latéral se compose d'un poisson remorqué contenant deux transducteurs, l'un étant orienté vers bâbord et l'autre à tribord [Bourgoin, 1981; Cloet et al., 1982; DeMoustier, 1988; Hally, 1987; Kolough, 1984]. La figure 5 illustre le principe de fonctionnement de ce système.

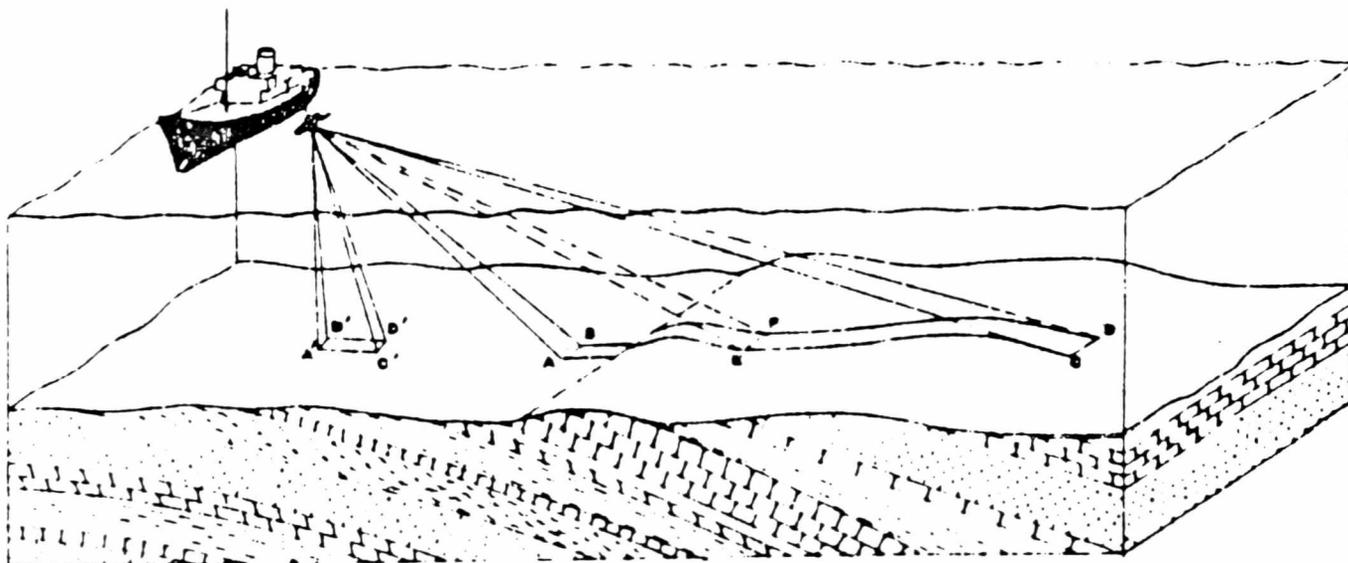


Figure 5 - Sondeur à balayage latéral à l'aide
d'un poisson remorqué

[Hally, P. 1987]

Le sonde latéral est utilisé pour l'interpolation des relevés entre les lignes des sondes car il ne permet pas, jusqu'à présent, une mesure précise de la profondeur. Il a cependant l'avantage d'être transportable, simple à construire et permet d'obtenir une imagerie acoustique pour de vastes zones du fond marin.

2.1.3 Méthodes optiques

Les besoins de plus grandes vitesses et de techniques plus efficaces pour la cartographie des côtes ont amené le développement d'un système optique au laser aéroporté pour déterminer la profondeur de l'eau. La faisabilité de la mesure de la profondeur de l'eau avec un système optique a été démontrée en premier, en 1968, par Hickman et al. (1969).

2.1.3.a- Configuration et caractéristiques du système lidar

Le lidar (LIght Detection And Ranging) est un système de détection et de localisation réalisé à partir d'un laser émettant dans la partie "optique" du spectre. Le mot laser est constitué par les initiales de "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation". Le laser est une source exceptionnelle de rayonnement capable de produire, dans des bandes

spectrales extrêmement fines, d'intenses champs électromagnétiques cohérents dans l'intervalle spectral s'étallant de l'intervalle (200 nm) à l'infrarouge lointain (10 m) [Maillet, 1984; Measures, 1984; Siegman, 1986]. La figure 6 montre une fenêtre du spectre avec une indication de différentes longueurs d'onde utilisées par des lasers.

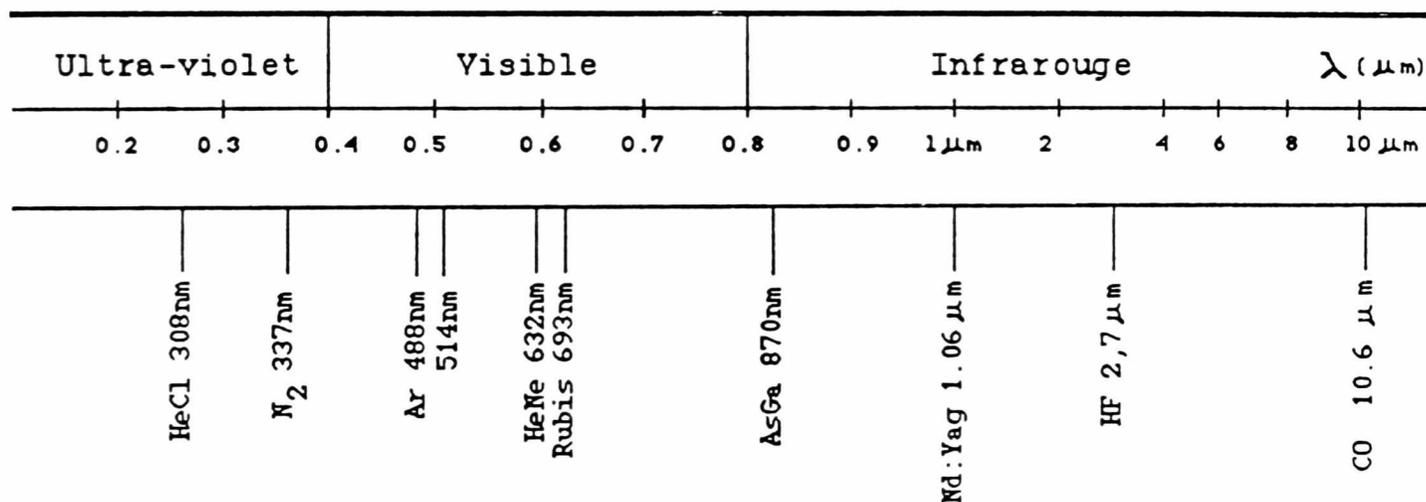


Figure 6 - Différentes sources de laser dans le spectre

Le système de sondage au laser mesure la profondeur relative de l'eau par rapport à la surface locale de la mer. La largeur maximale de la structure des sondages est limitée par l'angle de balayage et par la hauteur de l'avion, lesquels sont en fonction des exigences pour la capacité et la précision

de la mesure. La figure 7 montre le principe de fonctionnement de la bathymétrie laser.

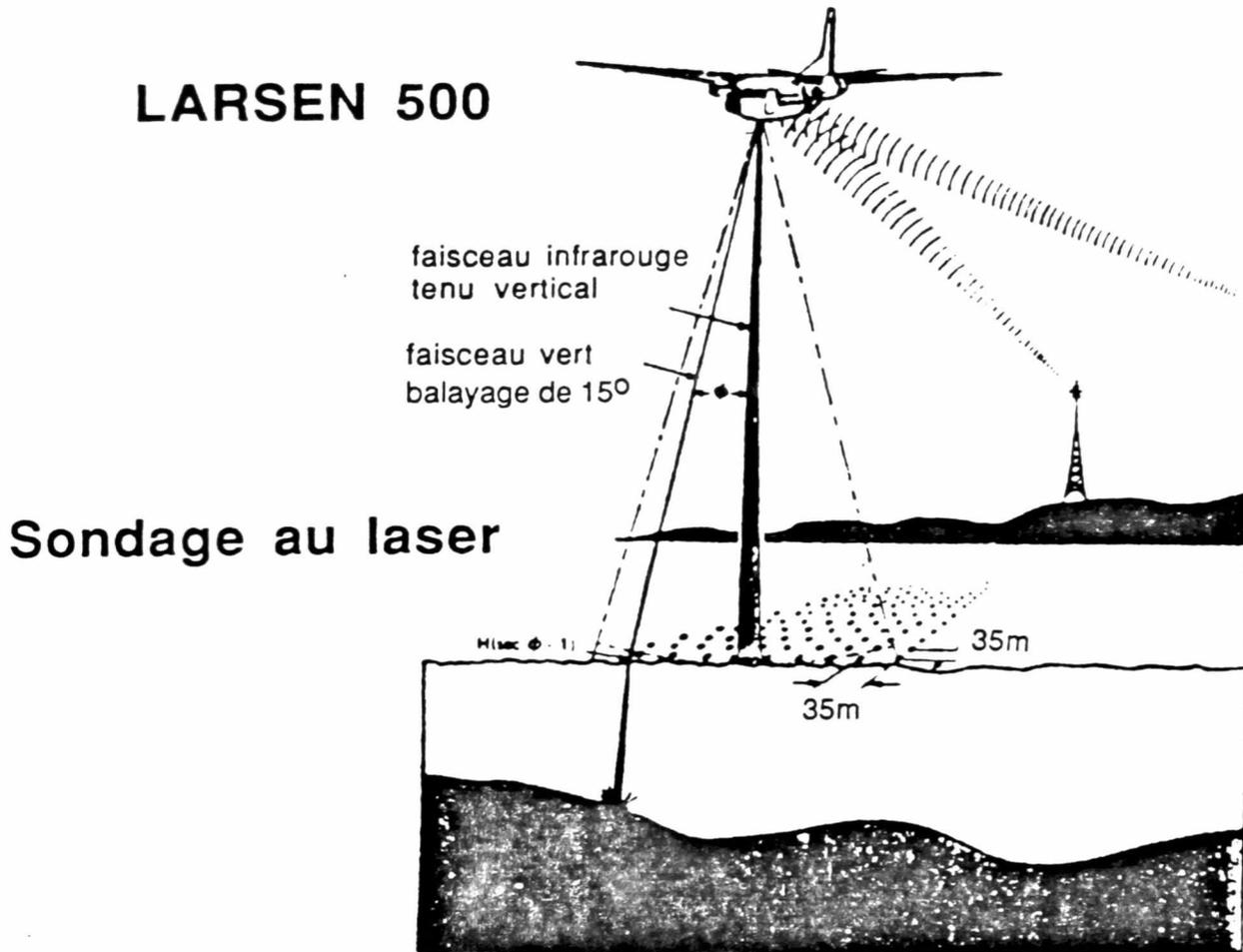


Figure 7 - Sondage au laser

[Applied Optics 1986]

Le laser émet de courtes impulsions infrarouges et vertes. On utilise le rayon infrarouge stabilisé verticalement pour l'établissement d'un niveau de référence fiable de la surface de la mer. Le faisceau vert, quant à lui, explore

transversalement la route de l'aéronef pour obtenir des réflexions du fond [Casey, and Vosburgh, 1987; Compton and Hudson, 1988]. La figure 8 montre un exemple de réflexion d'une onde pouvant être captée au récepteur.

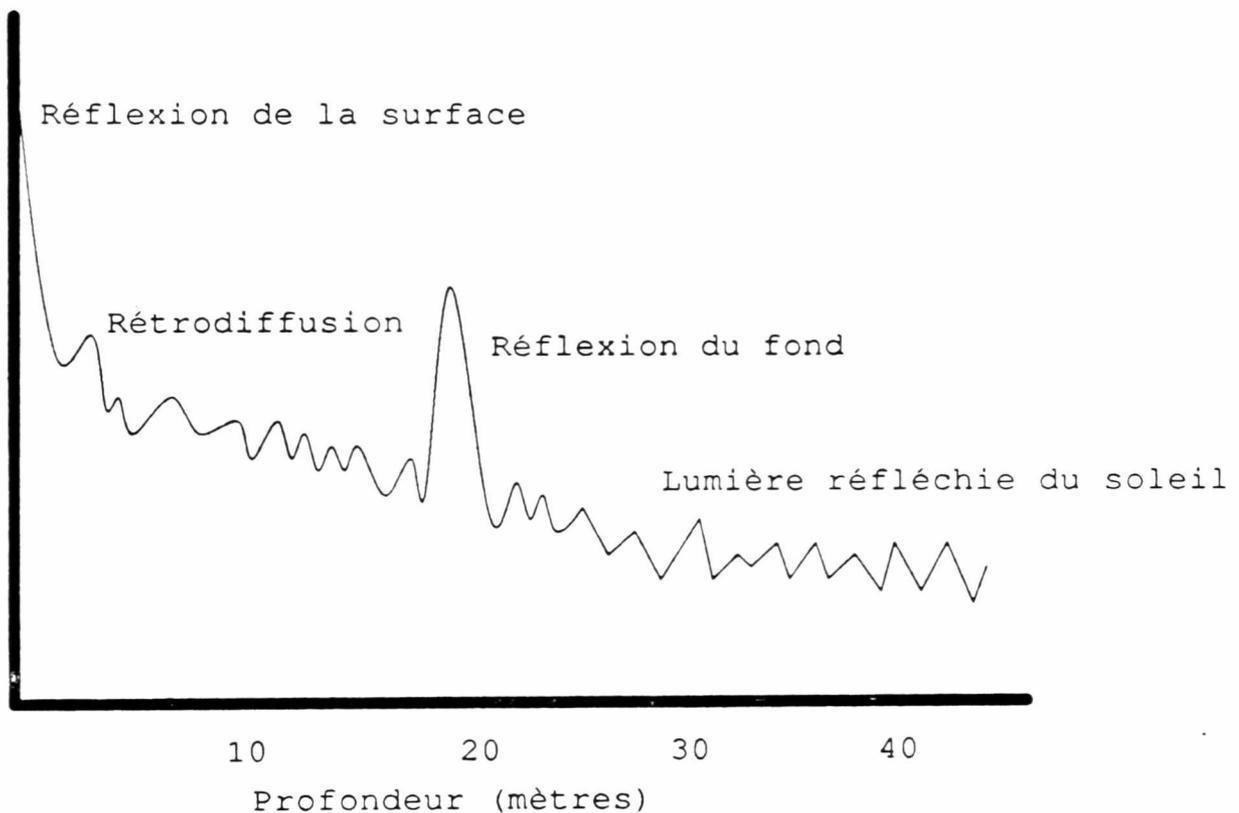


Figure 8 - Réflexions du faisceau laser à la surface
et sur le fond de l'eau

On étalonne le modèle de surface au moyen des réflexions du faisceau vert à partir de la hauteur moyenne, en fonction des inclinaisons du faisceau et de l'inégalité du plan d'eau.

L'impulsion laser est dirigée à travers un système de miroirs pivotants pour former un échantillon rectangulaire sur la surface de la mer. Le modèle de conception du balayeur est basé sur les besoins de générer un patron d'échantillonnage uniforme, compatible avec un angle d'incidence constant sur la surface de l'eau [Muirhead and Cracknell, 1986]. La figure 9 nous fait voir un exemple de balayage produit par un système au laser.

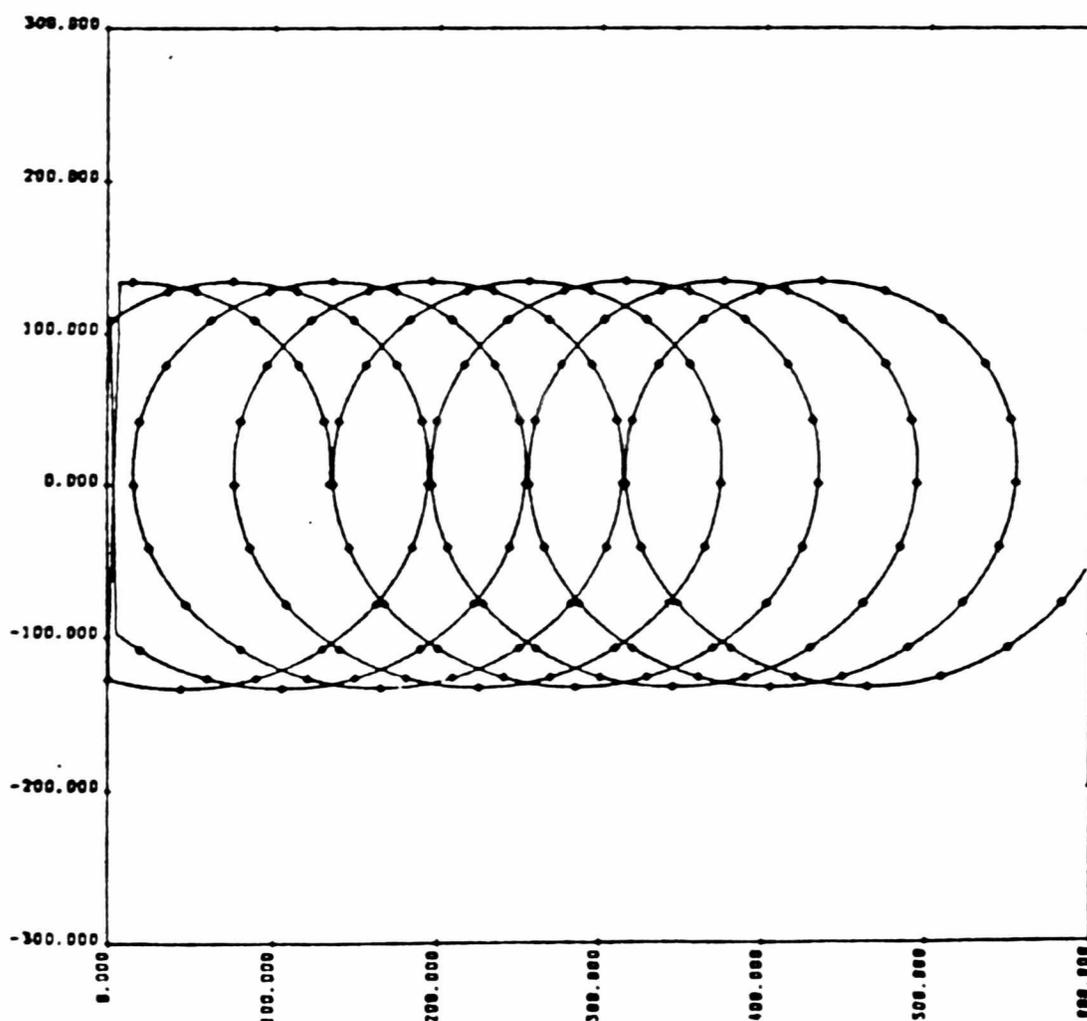


Figure 9 - Exemple d'un tracé bathymétrique

Un balayage uniforme est requis dans le but de produire une couverture au sol efficace avec un débit relativement bas. De plus, un angle constant de balayage est nécessaire dans le but de minimiser la quantité de corrections.

Pour bien comprendre le système d'acquisition, il est bon de visualiser l'ensemble des composantes du système lidar (voir figure 10) [Compton and Hudson, 1988].

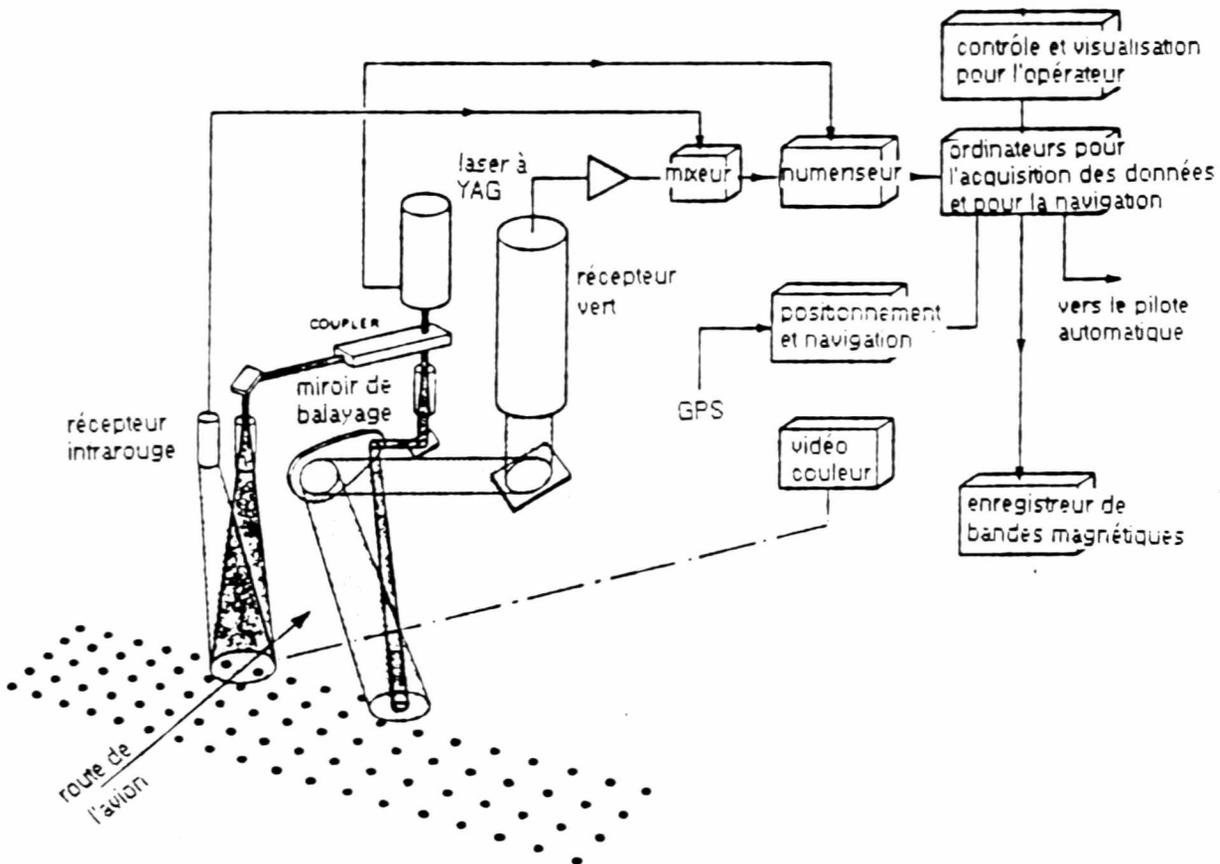


Figure 10 - Principales composantes du lidar

[Compton, J.S. and M.A. Hudson 1988]

Une première approximation de l'estimé initial de la profondeur (D) peut être obtenue à partir du délai du temps (T) par l'expression simplifiée:

$$D=cT/2n$$

Où "c" est la vitesse de la lumière dans le vide ($3 \cdot 10^8$ m/s) et "n" est l'indice de réfraction de l'eau (pour l'eau pure, $n= 1.33$). En réalité, des mesures bathymétriques précises demandent que les variations géométriques, la qualité de l'eau et les effets des vagues soient corrigés [Gluch et al., 1983; Guenther and Thomas, 1981 a et b; Steinvall et al., 1984]. Pour une description mathématique et physique plus avancée, on peut se référer à Svanberg (1980) et Measures (1984).

2.1.3 b- Précision et limites du système lidar

Les profondeurs calculées à partir des signaux bruts numérisés sont corrigées pour la géométrie du système et les erreurs de déviation de profondeur. Parmi ceux-ci, on peut mentionner [Compton and Hudson, 1988; Measures, 1984]:

1- Les paramètres du système: la source (stabilité du laser), l'angle de divergence du laser, l'angle de balayage, le filtre, le champ d'observation du récepteur et l'altitude de l'aéronef.

2- Les paramètres environnementaux: la profondeur, la propagation du signal, la turbidité, l'irrégularité de la surface et le bruit de radiation du fond.

Le système de sondage au laser a été conçu pour opérer, de jour comme de nuit, dans les petits fonds du plateau continental et pour mesurer des profondeurs allant de 2 à 50 mètres.

Le système est très sensible aux propriétés optiques de l'air et de l'eau traversés. Le facteur le plus restrictif de la pénétration et de la précision de la mesure au laser est la qualité de l'eau. Les matières en suspension peuvent causer de la diffusion et de l'absorption de la lumière du laser [Phillips, 1981; Steinvall et al., 1984]. Elles peuvent également causer un élargissement du faisceau ce qui amène une confusion lors de la détermination du vrai fond [Guenther and Thomas, 1984].

La composition du fond peut également influencer le levé de profondeur en entraînant une différence dans la qualité des impulsions de retour. De manière générale, on obtiendra les meilleurs échos avec les fonds solides et sans irrégularités.

Tandis que les zones d'algues épaisses, de vases fluides et les autres surfaces de médiocre définition dégraderont les réflexions du fond. La mauvaise température, en plus de restreindre les opérations de l'avion et de donner une pauvre visibilité, atténuera aussi le signal du laser. Les vents forts causeront de petites vagues crêtées d'écume et une remontée des sédiments du lit, limitant ainsi la pénétration du faisceau.

Des angles solaires importants peuvent également causer des réflexions parasites de la lumière du soleil sur la surface dégradant ainsi la réception des données. La présence de nuages à basse altitude ou de brume peuvent pareillement nuire à la capacité de mesurer la profondeur.

La précision en profondeur du système se situe à 1 mètre pour des profondeurs comprises entre 2 et 30 mètres. La précision pour la position est d'environ 11 mètres. Ces chiffres rencontrent les standards de précision de l'hydrographie internationale. Ces standards sont valides pour les erreurs dans la mesure de la profondeur et dans celles associées à la réduction des mesures sur le datum.

2.2 TRAITEMENTS DES DONNÉES BATHYMÉTRIQUES

2.2.1 Introduction

Le traitement des données hydrographiques comprend la validation, la correction des marées, la sélection des profondeurs significatives, la production de cartes et d'images graphiques et finalement, l'archivage de l'information traitée. La validation des données doit être vue comme une opération essentielle procurant à l'opérateur un estimé de l'exactitude des profondeurs. La sélection des sondes consiste à choisir dans les profils bathymétriques les données permettant d'indiquer les dangers pour la navigation tout en délimitant clairement les chenaux étroits. Les cartes doivent contenir suffisamment d'informations pour permettre à l'utilisateur d'évaluer la profondeur à n'importe quel point. La carte doit être facile à utiliser, claire et donner une image de fond sans ambiguïté.

A cause de l'augmentation du volume de données bathymétriques recueillies par les systèmes d'acquisition, les techniques de traitements actuellement utilisées doivent être examinées avec soin. En effet, un traitement efficace de l'ensemble des données hydrographiques est crucial pour la réussite du projet.

2.2.2 Revue littéraire

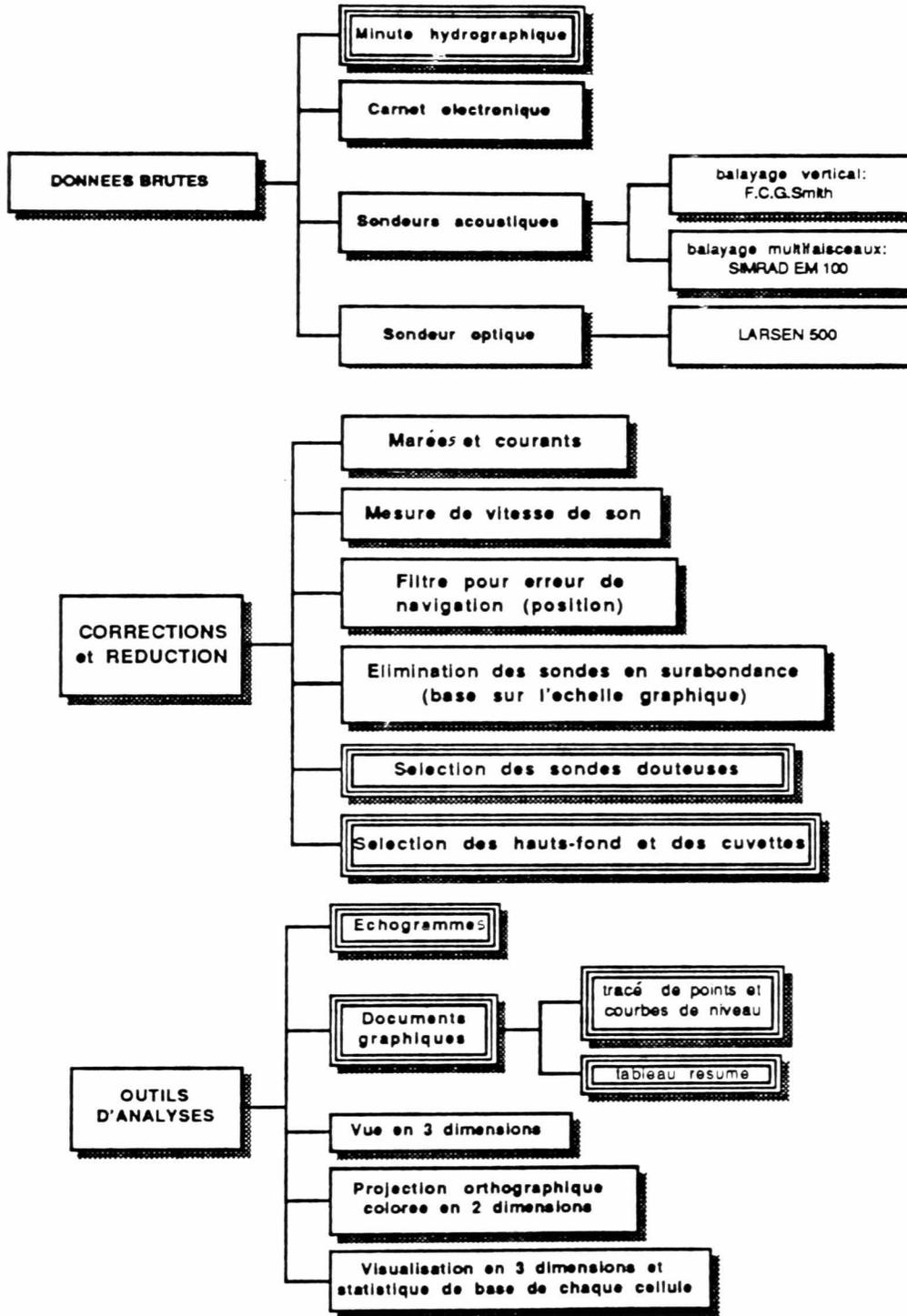
Les sections suivantes nous permettront de connaître les divers traitements actuellement en place dans les services hydrographiques du Canada et des Etats-Unis. Cette étude nous permettra de mieux comprendre l'origine de l'approche utilisée dans ce travail.

2.2.2a Canada

Les techniques présentement utilisées par le Service Hydrographique Canadien (SHC) pour le traitement et la validation des données se rattachent à la méthode traditionnelle. Cette méthode consiste dans un premier temps à convertir les données de navigation pour l'impression dans un système de projection connu et dans un deuxième temps, à corriger les données de profondeur pour la marée et l'étalonnage des sondes. La minute hydrographique est produite à partir de l'information de profondeur dont on aura préalablement éliminé les points surabondants pour éviter les chevauchements à l'impression. L'étape suivante est le calcul des lignes de contours et finalement un examen visuel permettra d'écarter les anomalies majeures. Cette marche à suivre mène à de multiples opérations d'élimination et d'impression des profondeurs. De nouvelles techniques pour le traitement ont été évaluées afin de permettre, entre autres, de réduire l'intervention humaine et

d'améliorer le rendement de la production cartographique. Voici une présentation schématique (figure 11) de la chaîne de traitement des données bathymétriques que l'on retrouve sur le marché de l'hydrographie canadienne.

Références: [Bell et al., 1989; Burke et al., 1988; Lambert, 1988; Varma, 1984; Varma et al., 1989]



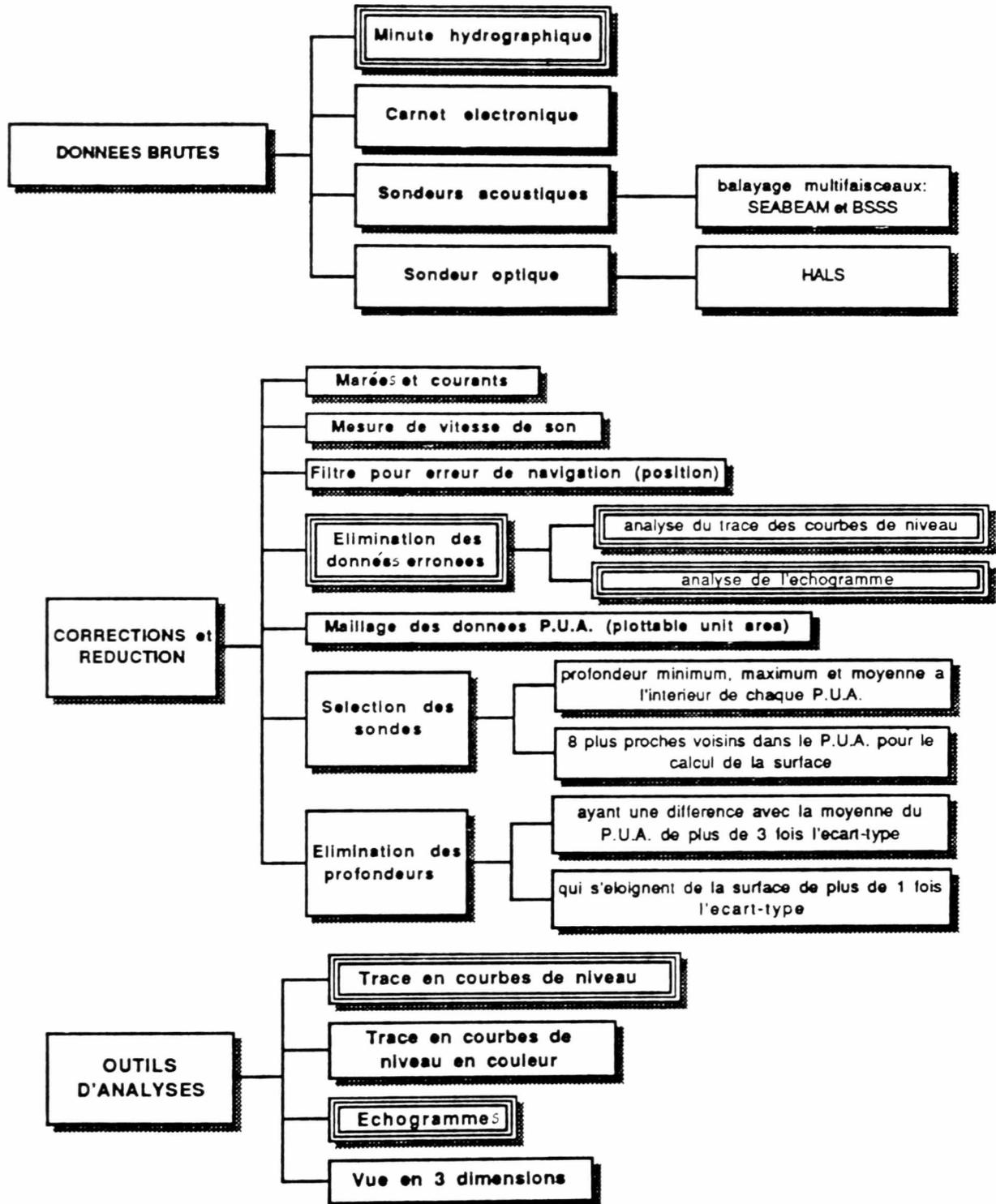
 Représente des opérations directement effectuées par l'hydrographe

Figure 11 - Chaîne de traitement des données hydrographiques du Canada

2.2.2b Etats-Unis

Aux Etats-Unis, l'hydrographie s'effectue notamment par la DMA (Defense Mapping Agency) qui a la mission de produire et de distribuer des cartes nautiques pour le département de la défense et par la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) qui, elle, a pour mission de couvrir la zone économique. L'"Ocean Mapping Section", quant à elle, est chargée de recevoir, de contrôler et de procéder au traitement des données bathymétriques. La figure 12 nous montre les différentes opérations effectuées par ces organismes.

Références: [Bourquin and Van Norden, 1980; Greenberg, 1987; Grim, 1988; Guenther and Green, 1982; Herliky et al., 1988]



 Représente des opérations directement effectuées par l'hydrographe

Figure 12 - Chaîne de traitement des données hydrographiques des Etats-Unis

2.2.3 Présentation de l'information de profondeur

La recherche bibliographique a permis d'établir qu'une carte doit posséder trois principaux attributs [Monahan and Casey, 1985]. Premièrement, elle doit contenir suffisamment d'informations pour permettre à l'utilisateur d'évaluer une profondeur à n'importe quel endroit sur la carte. Deuxièmement, elle doit donner une image globale du fond, rapidement et de façon non-ambiguë. Finalement, la carte doit être facile à utiliser, claire et exacte. Il est bon de résumer et de décrire brièvement chaque produit:

1- La carte bathymétrique est constituée de points de profondeur évalués au décimètre (voir figure 13). C'est souvent la densité de sondage qui guidera l'oeil à travers le danger. Cette carte est très fréquemment utilisée pour la navigation.

PUBLISHED BY THE CANADIAN HYDROGRAPHIC SERVICE
© Minister of Fisheries and Oceans Canada 1987

PUBLIÉE PAR LE SERVICE HYDROGRAPHIQUE DU CANADA
© Ministère des pêches et des océans Canada 1987

MÉTRIQUE/METRIC

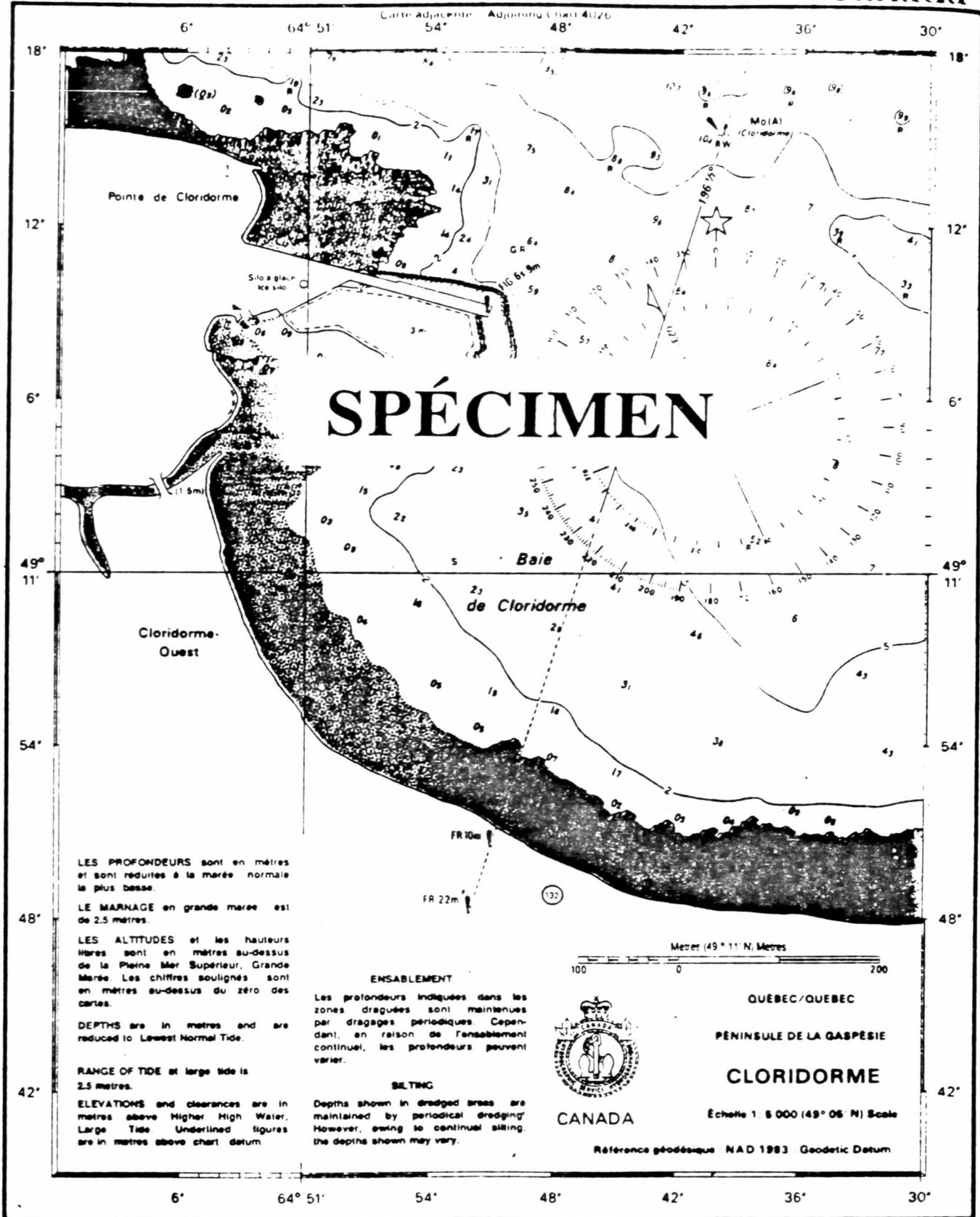


Figure 13 - Carte bathymétrique

[Journault, M. 1987]

2- La carte de contours est un outil plus moderne montrant le danger à l'aide de lignes directrices construites à partir des sondages critiques (voir figure 14). L'algorithme d'interpolation employé joue un rôle important pour la précision des lignes de contours.

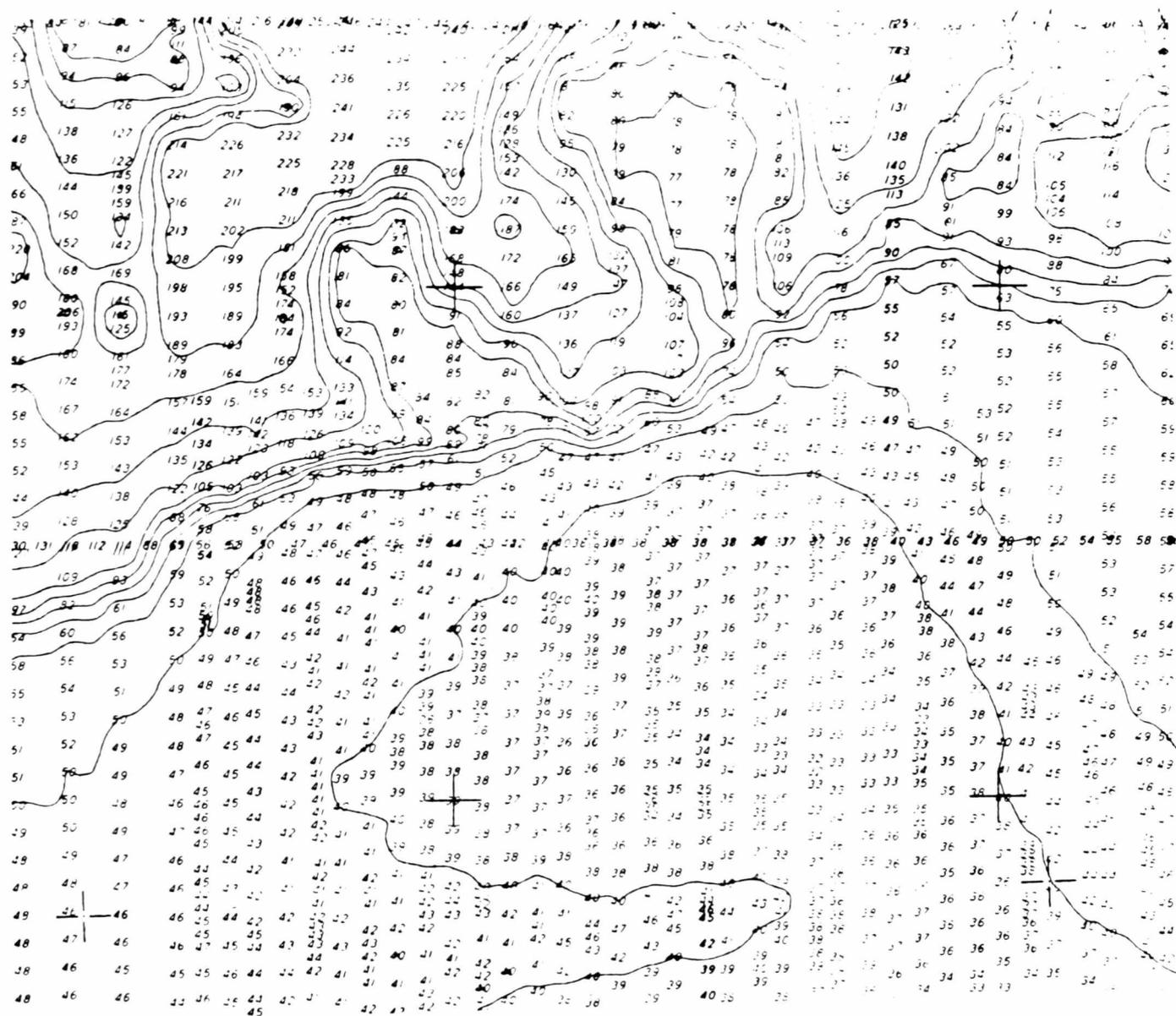


Figure 14 - Carte de contours

[Warren, J. et al. 1990]

3- Les teintes colorées pour des intervalles de profondeur spécifiés procurent à l'utilisateur une image globale du fond (voir figure 15). L'utilisation de la couleur permet, entre autres, de faciliter l'interprétation. Certaines couleurs peuvent être utilisées pour rehausser les hauts-fonds, les cuvettes, les crêtes et les fossés.

IMAGE



REGION:

NORD DE L'ILE DU
HAVRE ST-PIERRE

ORIGINE:

PAMAP:WEIGHTED AVER.
filtre mode

Lab.Teledetection

Figure 15 - Carte en teintes colorées

BATHYMETRIQUE



LEGENDE

Profondeur (metres)

	1-18
	19
	20
	21
	22
	23
	24
	25
	26
	27
	28-50

Résolution: 2mx2m

4- Les cartes d'ombrage sont construites en variant l'angle d'illumination produisant ainsi des images de tons de gris (voir figure 16). Elles sont souvent utilisées pour montrer le relief.

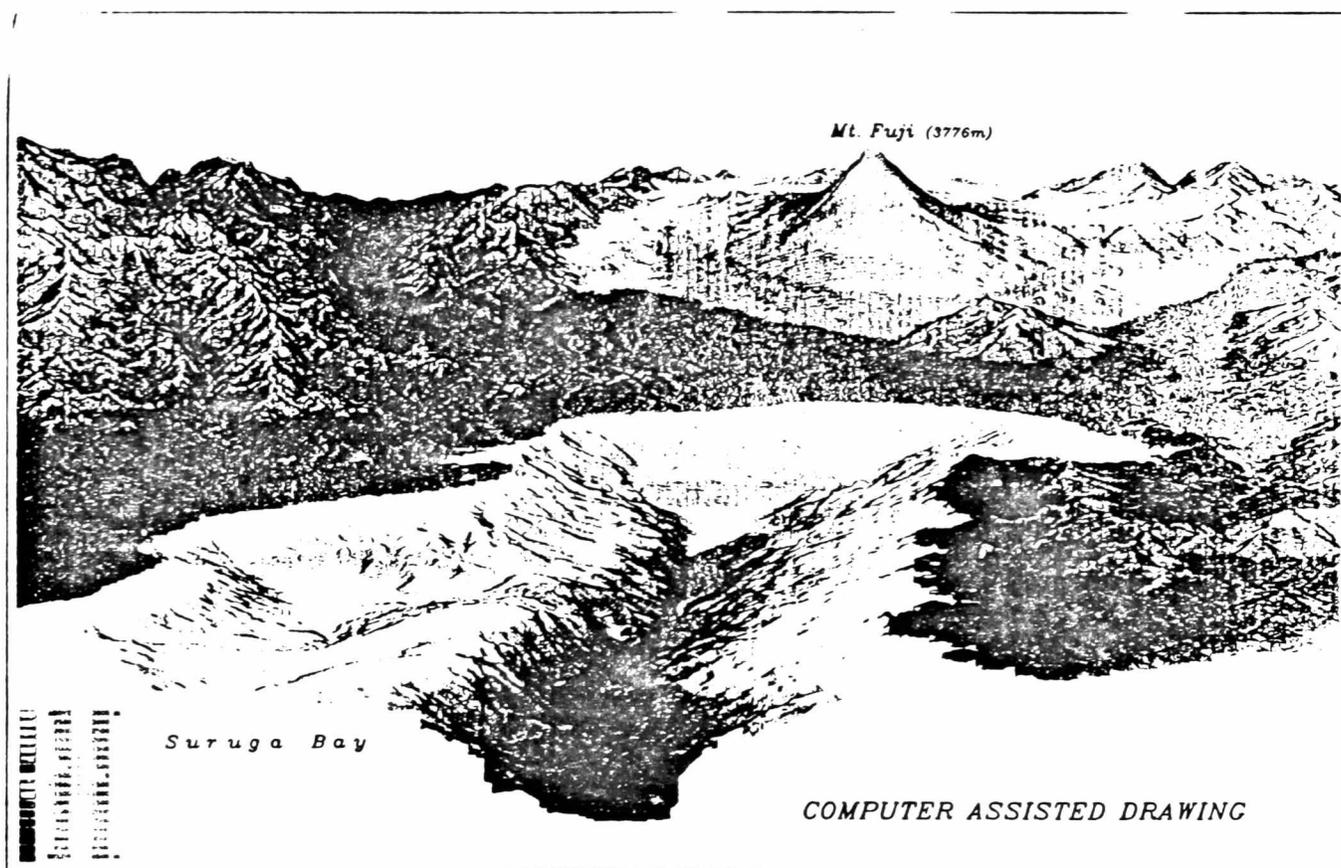


Figure 16 - Carte d'ombrage en perspective

[Varma, H. et al. 1989]

5- La *vue en perspective* présente la surface à partir d'un point éloigné (point de fuite) (voir figure 16). La vue en perspective fait coïncider la représentation de la surface suivant la perception visuelle qu'on pourrait en avoir de l'image. Elle permet d'obtenir une image globale du fond facilitant la visualisation des surfaces complexes.

6- La *carte par thème* est produite à l'aide de deux couleurs comme, par exemple, le vert et le rouge. Le vert sera utilisé pour les régions sécuritaires à la navigation.

7- Le *modèle numérique de terrain* (MNT) est une représentation approchée basée sur l'interpolation. Parce que le fond marin n'est pas visible, l'analyse des MNTs est d'un grand intérêt en bathymétrie car plusieurs produits peuvent être dérivés de ceux-ci. De plus, les MNTs serviront pour l'avancement des cartes électroniques. La section suivante décrit plus en détails cet outil de visualisation.

2.2.4 Modèles numériques de terrain

2.2.4a- Introduction

Le concept du modèle numérique de terrain (MNTs) a été introduit aux environs de 1955 à l'Institut technologique du Massachusetts (U.S.A) [Leberl 1973]. Un MNT peut être défini comme étant une représentation numérique d'un ensemble de propriétés terrestres (topographie terrestre et marine) approprié pour le traitement par ordinateur. Dans la plupart des cas, la distribution spatiale est représentée par un système de coordonnées X et Y et la caractéristique du terrain (élévation, profondeur) [Doyle 1978,; Stefanovic et al., 1977].

La performance d'un MNT dépend de l'homogénéité du terrain, du patron d'échantillonnage, de la densité de points et finalement de la méthode d'interpolation employée. La figure 17 représente schématiquement les paramètres qui devraient être pris en considération lors de l'analyse de la performance d'un MNT [Leberl, 1973; Makarovic, 1976; Tempfli, 1980].

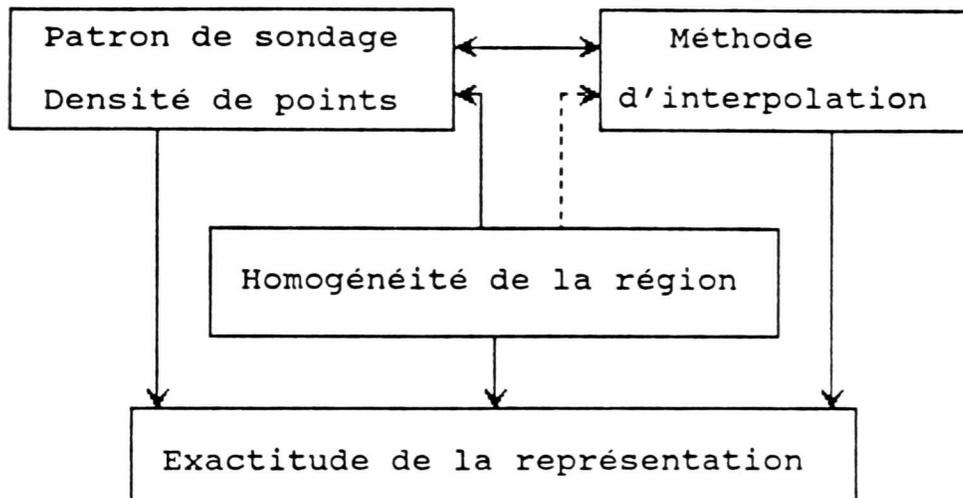


Figure 17 - Paramètres influençant l'exactitude d'un MNT

2.2.4b- Techniques d'interpolation

Les MNTs doivent utiliser un algorithme d'interpolation approprié. L'interpolation peut être définie comme étant la procédure d'estimation de la valeur d'un attribut d'un site non connu à l'intérieur d'une zone couverte par une série d'observations. Le concept de l'interpolation provient de l'hypothèse que les points qui se regroupent spatialement possèdent plus de caractéristiques similaires que les points éloignés.

Deux approches différentes sont possibles (voir figure 18): l'interpolation à l'aide d'une fonction globale ou à l'aide d'une fonction définie localement.

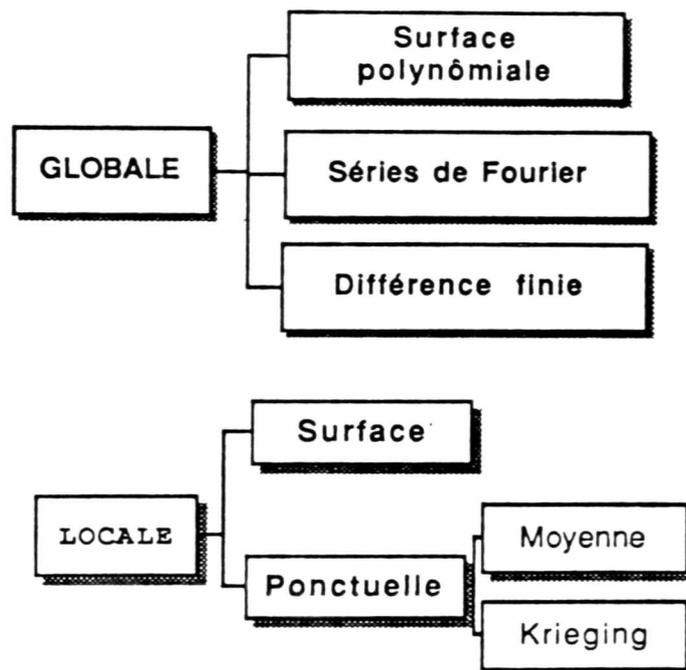


Figure 18 - Différentes fonctions possibles pour l'interpolation

Avec les méthodes globales, le modèle est construit à partir de toutes les observations de la zone à l'étude [Burrough et al., 1985; Frederiksen, 1981; Schiro and Williams, 1984]. Les méthodes locales évaluent, quant à elles, la valeur d'un point à partir seulement des points avoisinants [Burrough, 1986; Leberl, 1973; Leberl, 1975; Makarovic, 1976]. On retrouve

plusieurs études dans la littérature concernant la précision de l'interpolation [Botman and Kubik, 1979; Crain, 1970; Kubik and Botman, 1976; Schut, 1976].

La supériorité d'un algorithme d'interpolation ne doit pas seulement être appuyée sur une précision supérieure et/ou sur des efforts minimes. En fait, Rice (1970) et Leberl (1975) ont identifié une série de propriétés des algorithmes d'interpolation permettant ainsi une évaluation comparative:

- Vitesse (pour trouver les inconnus)
- Flexibilité (précision globale et possibilité de maintenir la forme des petits éléments.)
- Puissance de lissage (continuité, itération)
- Imposition de contraintes (les zones de coupures, les limites maximums et minimums)
- Besoin en espace mémoire
- Vitesse d'évaluation (fonction d'interpolation)
- Possibilité d'extrapolation
- Sécurité de fonctionnement (sensibilité au choix des paramètres)

En général, on considère que les fonctions globales dans les applications avec un MNT sont habituellement inappropriées. Le terrain est souvent trop irrégulier pour qu'une fonction s'y

rattache correctement et, très souvent, le nombre élevé de points inconnus déstabilise les coefficients de la fonction. Ces problèmes peuvent être diminués en employant une surface régionale. Parmi les difficultés d'une surface locale, on peut noter: les discontinuités aux arêtes, le temps de calcul et des problèmes dans l'ajustement pour des variations dans la densité des points. Parmi les méthodes locales se retrouvent les méthodes dites ponctuelles. Celles-ci sont plus rapides à calculer, sont plus flexibles et, généralement, elles produisent de bons résultats pour les zones homogènes et à densités constantes [Crain, 1970; Leberl, 1973]. La plupart des MNTs opérationnels fonctionnent avec des méthodes ponctuelles.

2.2.4c- MNTs utilisés en hydrographie

Un modèle bathymétrique est une des formes de modèle numérique de terrain. On retrouve dans la littérature différentes études sur l'utilisation des MNTs lors des traitements des données hydrographiques [Asada, 1988; Chiles and Chauvet, 1975; Claussen and Kruse, 1988; Greenberg, 1987; Midthassel et al., 1988; Miller and Kok, 1988; Sallaway, 1981; Schiro and Williams, 1984].

Les tables 1 et 2 présentent les caractéristiques principales que doit posséder une carte bathymétrique pour répondre

aux besoins des hydrographes. La comparaison de ces différents ouvrages littéraires servira plus tard pour l'analyse des résultats obtenus à l'aide des techniques que l'auteure emploiera.

Table 1a

Comparaison des modèles numériques de terrain utilisés en Hydrographie

Auteurs / Propriétés	Claussen and Kruse	Midthassel et al.	Greenberg	Schiro and Williams	Asada	Chiles and Chauvet
Objectifs	Génération de contours	Réduction de données et production de cartes.	Filtrage statistique	Modélisation d'un large volume de données et réduction de données.	Production de cartes de contours	Production de carte bathymétriques.
Technique interpolation	Polynôme de haut degré.	Surface mathématique (?)	Surface mathématique (?)	Surface quadratique	Surface linéaire, moyenne ou quadratique dépendant de la quantité de points.	Kriging
Type de données	Echo-sondeur multi-faisceaux	Echo sondeur multi-faisceaux (2 millions de sondes)	Sonar multi-faisceaux (85,000 sondes).	(2,000 à 100,000 sondes)	Echo sondeur multi-faisceaux	(6,265 sondes)
Validation des données	Seulement en utilisant un polynôme de plus haut degré	Elimination des points parasites avant le carroyage.	Aucune	Utilise les standards horizontaux et verticaux pour éliminer les points erronés.	Elimination des points parasites avant le carroyage	Minimise les résiduels sur les points.
Utilisation de toutes les données.	Utilise les plus proches voisins dans chaque octant	Utilise un rayon de recherche pour limiter le nombre de points.	Utilise les huit plus proches voisins.	Sélectionne les points de façon itérative. Maximum de 300 points par cellule.	Filtre les données avant de les utiliser.	Obligé de travailler sur des sous-régions.

Table 1b

Comparaison des modèles numériques de terrain utilisés en Hydrographie

Auteurs Propriétés	Claussen and Kruse	Midthassel et al.	Greenberg	Schiro and Williams	Asada	Chiles and Chauvet
Résolution	Dépend uniquement de l'échelle de la carte.	Dépend uniquement de l'échelle de la carte.	Variable	L'utilisateur spécifie le nombre approx. de cellule.	Le nombre de cellules est proportionnel à la quantité de points	Dépend seulement de l'échelle de la carte.
Réduction des données	Possibilité d'un programme de lissage des données pour adoucir les contours.	Elimine les points qui s'éloignent de plus de 2 fois l'écart-type. Réduction de 5 à 10%	Elimine les points qui s'éloignent de plus de 1 fois l'écart-type. Réduction de 1.5%	Réduction de 50 à 80%.	Compare l'écart-type et la surface quadratique.	
Flexibilité et utilité	Peu utilisé	Possibilité de plusieurs produits, garde profondeurs minimums, maximums et moyennes		Temps de calcul rapide pour les données ayant peu de bruits.	Possibilité de modifier chaque cellule. Peut remplir les trous de données. Utilise le traitement en 3 dimensions.	Procure un intervalle de confiance aux données. Possibilité de cartes optimums ou sécuritaires.

CHAPITRE III

TRAITEMENTS ET TECHNIQUES EMPLOYÉS

3.1 INTRODUCTION

3.1.1 Région à l'étude

Lorsque la problématique de base fut établie, nous avons procédé à la détermination de la zone d'étude. Cette zone devait posséder les caractéristiques suivantes:

- 1 - Avoir fait l'objet d'un levé hydrographique récent
- 2 - Etre couverte par différents systèmes d'acquisition des données bathymétriques
- 3 - Etre suffisamment étendue pour être représentative
- 4 - Avoir été représentée sur une minute hydrographique (ou carte) validée par le SHC.

Nous avons donc établi la région à l'étude au Nord de l'île du Havre St-Pierre au Québec. Elle a une dimension de 1.5 Km par 0.4 Km. Des levés bathymétriques ont été effectués à l'aide du F.C.G. Smith (1988) et du LARSEN 500 (1988). La combinaison de ces deux systèmes d'acquisition des données hydrographiques semble être idéale car elle permet de couvrir une zone complexe rapidement.

3.1.2 Appareils bathymétriques

3.1.2a F.C.G. Smith

Le F.C.G. Smith [Burke et al., 1988; Kerr et al., 1987; Kielland and Hally, 1989] est un catamaran construit exclusive-

ment à des fins de balayage acoustique. Il emploie 12 transducteurs installés sur 2 bras de chaque côté du bateau. Il utilise, de plus, un bras supplémentaire situé entre les deux coques (5 transducteurs) ainsi que deux transducteurs qui sont placés sous chacune d'elles pour une couverture totale d'environ 44 mètres. La figure 19 nous montre le catamaran et les bras supportant les transducteurs du système de balayage acoustique (le Seadig 201 de Navitronic).

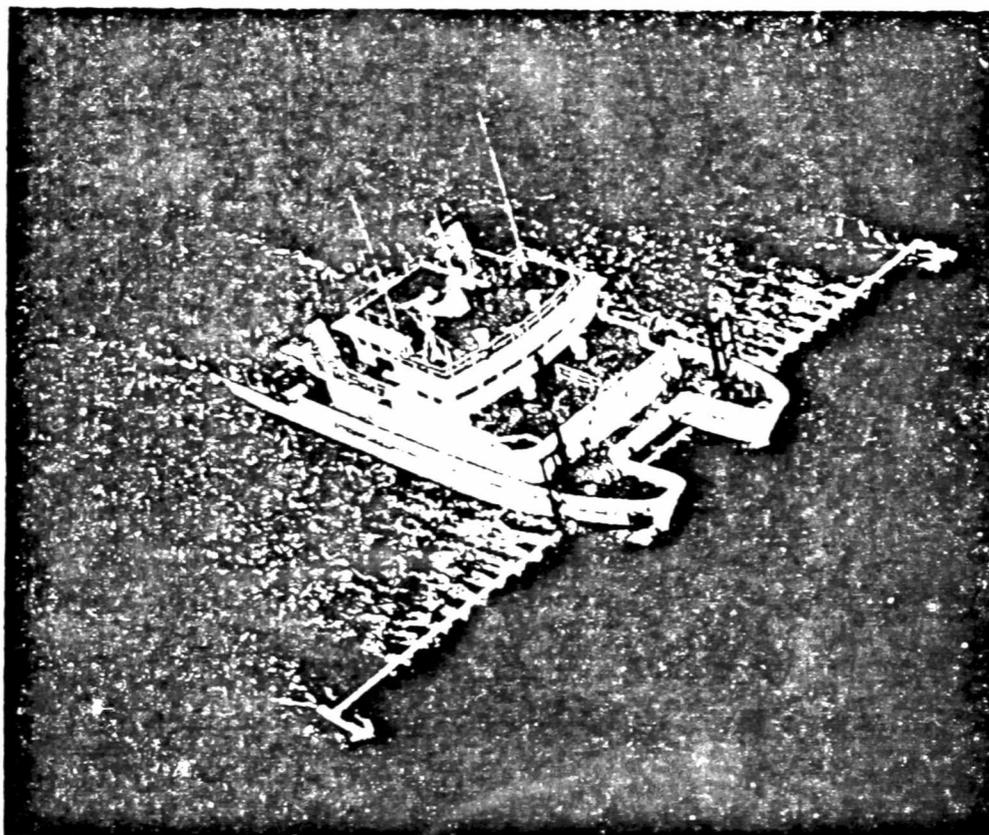


Figure 19 - F.C.G. Smith

[Kerr, A.J. et al., 1987]

La fréquence émettrice des transducteurs est de 210 KHz. Deux systèmes de positionnement sont disponibles pour la localisation de l'appareil (Motorola Mini-Rouge IV et Krupp Atlas Polarfix). L'exactitude de la lecture de positionnement est en fonction de la précision des systèmes de positionnement et est également dépendante de la stabilité du bateau et de l'unité de guidage de la timonerie. Des expériences ont démontré, jusqu'à date, que le système est capable de maintenir la route du bateau à l'intérieur de quelques mètres de la route prédéterminée [Burke et al., 1988; DeMoustier, 1988; Kerr et al., 1987].

3.1.2b Larsen 500

Le LARSEN 500 est un système de sondage aérien au laser qui a été conçu pour sonder les eaux peu profondes à une vitesse de plusieurs fois supérieures à celle que permet un navire hydrographique [Casey and Vosburg, 1987; Till, 1987]. Le LARSEN 500 a été construit au Canada pour cartographier les zones côtières [Banic et al., 1986; Casey, 1984; Gluch et al., 1983]. La figure 20 nous montre le système en opération.

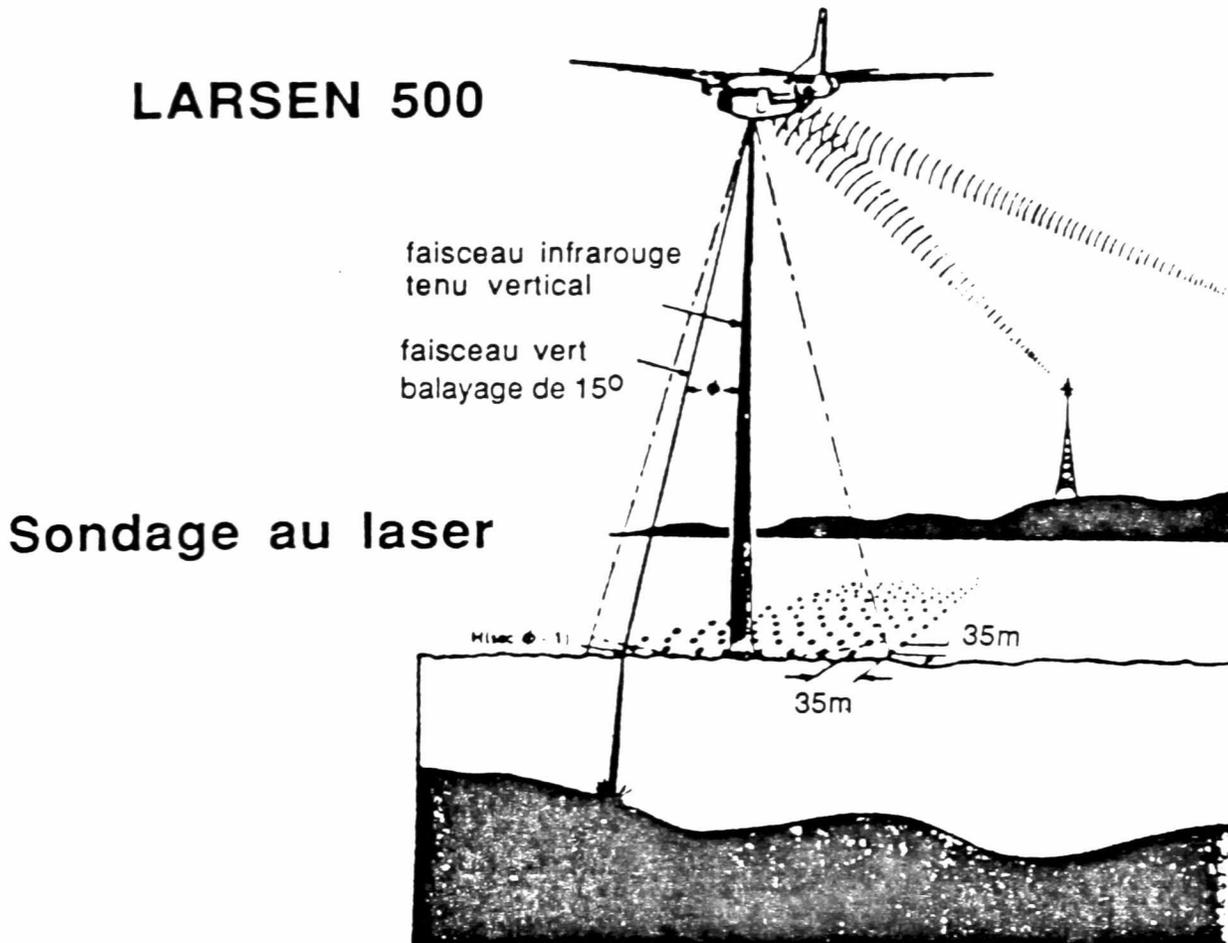


Figure 20 - Larsen 500

[Applied Optics 1986]

Pour atteindre la précision en profondeur et la possibilité de pénétration espérée, le LARSEN 500 utilise un laser Nd:Yag au néodyme avec un doublement de la fréquence opérant simultanément à 1064 nm et 532 nm. Le LARSEN 500 balaie la zone suivant un angle de 15 ° de chaque côté du nadir. Le

laser opère à un débit moyen répétitif d'environ 20 pps (partie par seconde). La couverture totale au sol est de 270 m. On estime, en général, qu'une profondeur à tous les 35 mètres sera échantillonnée. L'aéronef suivra les routes préalablement établies au-dessus de la zone d'opération, à 500 mètres d'altitude et à une vitesse de 70 mètres par seconde (approximativement 140 noeuds).

Pour chaque impulsion au laser, un système d'acquisition des données monté sur PDP 11/73, enregistre la forme de l'onde numérisée, les angles d'orientation du capteur optique, la position de l'avion et les mouvements de pente de la surface de l'eau. Les systèmes de positionnement utilisés sont le Del Norte Trisponder Model 540 et/ou un système de positionnement global par satellite (GPS). Un altimètre (OPTECH Model 501) est utilisé pour mesurer la hauteur de l'avion et les trois angles d'orientation du système optique sont déterminés par un système inertiel. Le Larsen 500 peut mesurer des profondeurs dans l'intervalle de 1.5 mètres à 31 mètres.

3.2 RÉDUCTION DES DONNÉES ORIGINALES

A la suite de la recherche bibliographique, nous avons constaté qu'un problème majeur de réduction du volume de données embarrassait de plus en plus les hydrographes pour le traitement des données bathymétriques. Depuis l'avènement des sondages systématiques, la réduction des données est devenue un problème classique sur lequel les hydrographes et cartographes doivent se pencher. La question suivante est devenue de première importance: quelle est la quantité de données à rejeter pour que la carte conserve suffisamment d'informations?

Pour ainsi éliminer les données redondantes, il faut choisir dans le profil bathymétrique les données qui permettent d'indiquer les dangers pour la navigation. Cette sélection des données significatives peut être effectuée manuellement en examinant le profil des échogrammes ou automatiquement par ordinateur en se basant sur les statistiques échantillonnales. La plupart des algorithmes de sélection des sondages qui ont été présentés dans la littérature [Lepage et Holaya, 1989; MacDonald, 1984; Zoraster, 1990] sont des algorithmes de lissage. Ceux-ci sélectionnent les profondeurs de manière à ce qu'il n'y ait pas de superposition sur la carte.

Les sections suivantes traitent de quelques considérations générales au sujet de la compression de données. Elles attirent l'attention sur deux techniques de réduction des données. Premièrement, l'auteure vérifiera l'utilisation d'un seuil d'acceptation basé sur la moyenne et l'écart-type des profondeurs représentées dans une structure de maillage. Deuxièmement, l'utilisation d'une structure hiérarchique et d'un opérateur Laplacien modifié permettra d'établir des critères pour obtenir une compression satisfaisante tout en conservant la précision des données originales.

Les données ainsi réduites permettront de réduire le temps de traitement, l'espace d'archivage, la manipulation, la diffusion et même de simplifier les traitements ultérieurs.

3.2.1 Seuil d'acceptation

L'approche utilisée pour la détermination d'un seuil d'acceptation pour les profondeurs s'apparente à celle de Greenberg (1987). La figure 21 montre l'ensemble des opérations effectuées pour la réduction des données par l'utilisation d'un seuil d'acceptation.

REDUCTION - SEUIL D'ACCEPTATION

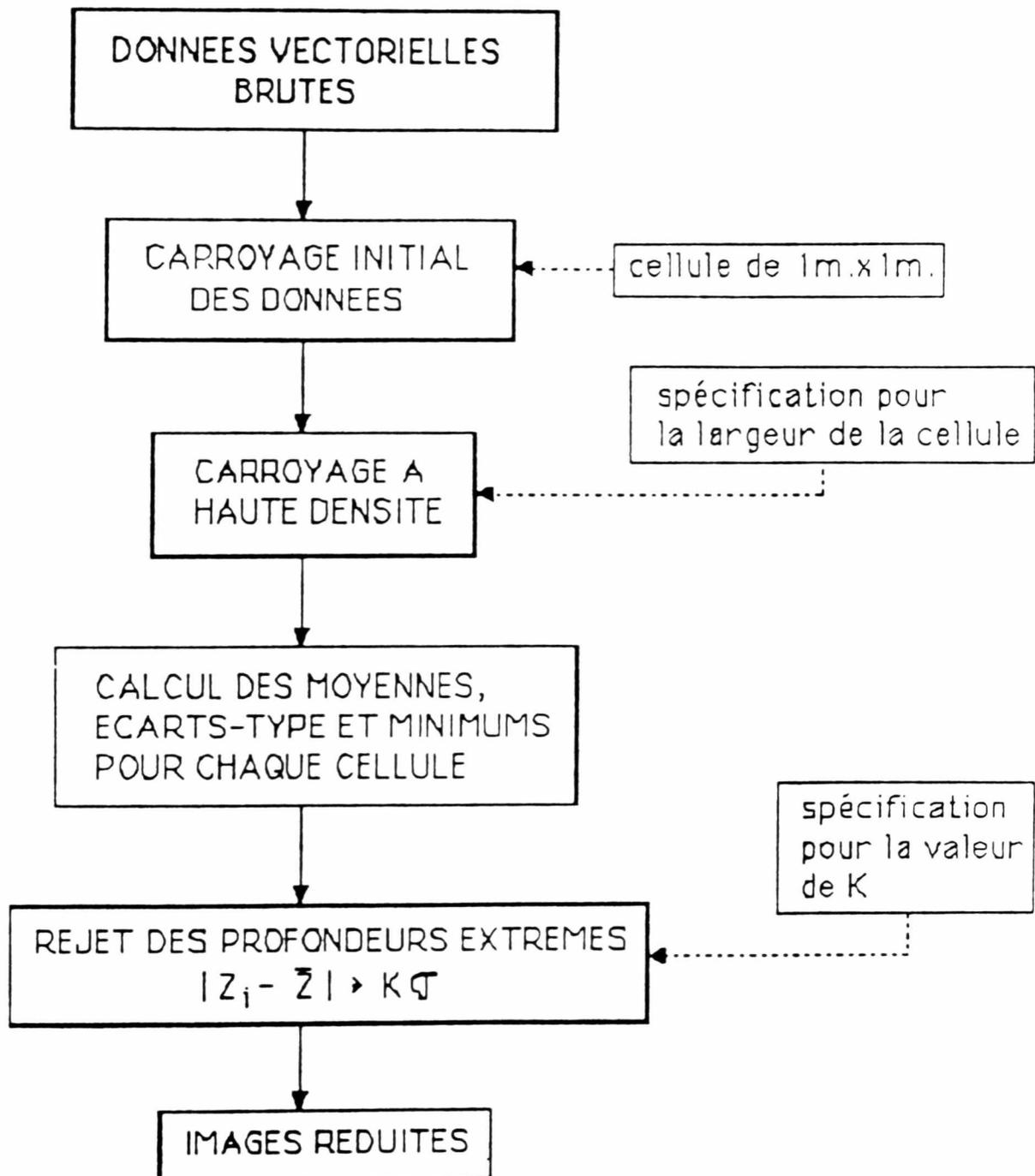


Figure 21 - Réduction par le seuil d'acceptation

L'opération première qui est celle du "carroyage" ou "maillage" apparait être une étape préliminaire très utile car elle facilite les calculs et les traitements ultérieurs. Le but de l'opération de maillage est d'arranger les données dans un quadrillage régulier pour:

- i- Permettre une analyse facile des données tout en rejetant les points redondants
- ii- Organiser les données dans un format compatible pour un traitement ultérieur.

Le carroyage divise la zone par un maillage rectangulaire. Une cellule est donc délimitée par les mailles distancées d'une largeur prédéterminée. A chaque cellule est associée une profondeur calculée à partir des sondages localisés à l'intérieur des limites de celle-ci. La définition des limites des cellules joue un rôle très important. Elle a une influence directe sur la précision du maillage. Voici en résumé les étapes du carroyage (voir figure 22).

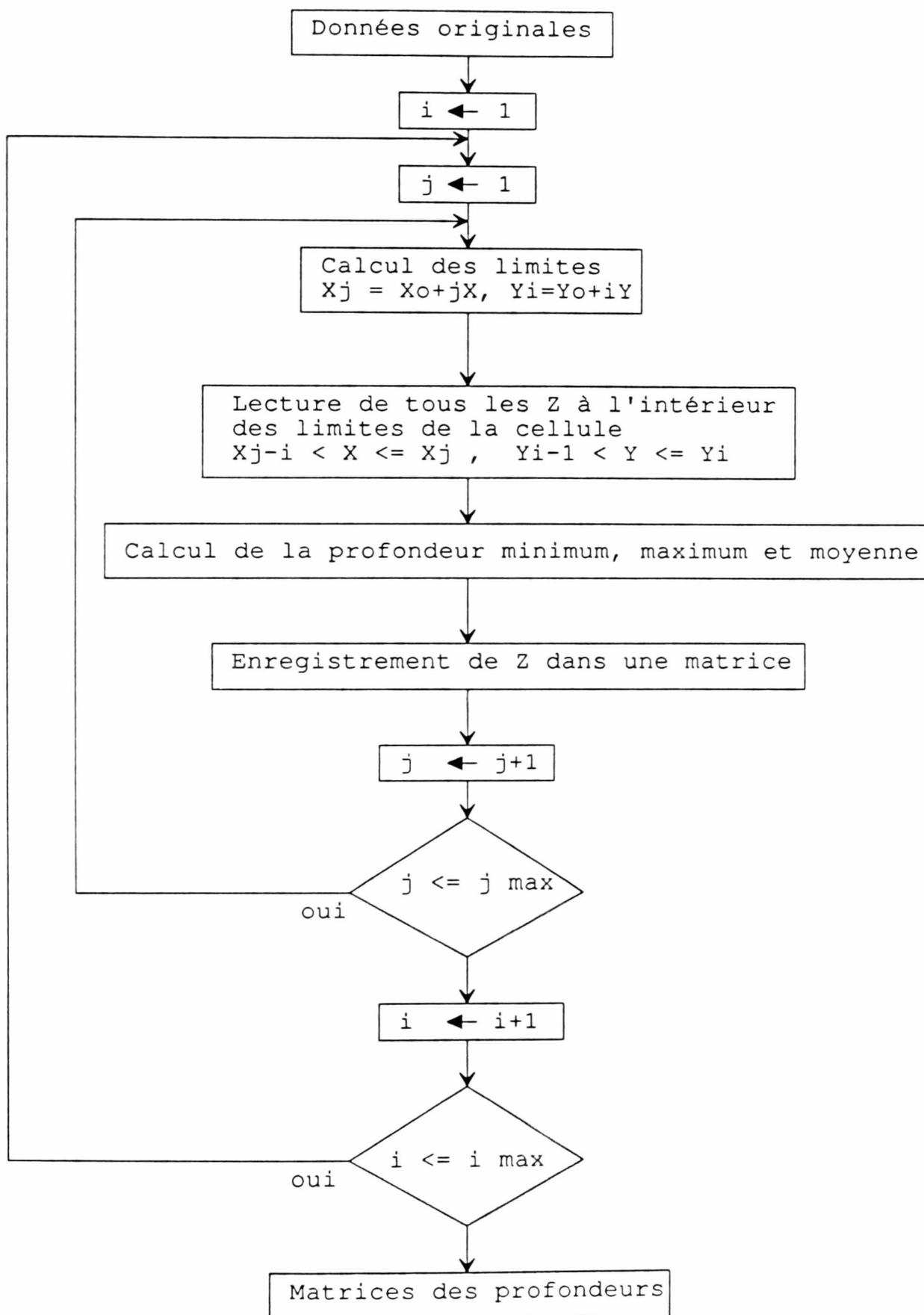


Figure 22 - Partitionnement des données

L'utilisation d'une cellule initiale de 1 mètre par 1 mètre permet d'accélérer la recherche des sondages à l'intérieur d'une cellule subséquente tout en conservant la précision originale en positionnement des profondeurs.

Pour chaque cellule, on aura la valeur de la profondeur minimum, maximum, moyenne ainsi que l'écart-type. Le rejet des profondeurs s'effectue donc lorsque la profondeur absolue de la différence entre la profondeur (Z_i) et la profondeur moyenne (\bar{Z}) est plus grande ou égale à K (constante) fois l'écart-type (σ).

$$|Z_i - \bar{Z}| \geq K \sigma \quad (3.1)$$

On fera varier la valeur de K suivant les spécifications pour la réduction et la précision. Dans les études précédentes, une valeur de K égale à 2 ou 3 a été utilisée. Le seuil d'acceptation appui donc sa réduction sur le rejet des profondeurs extrêmes à l'intérieur de la cellule à l'étude.

3.2.2 Compression sélective

Le rejet progressif des profondeurs est une technique de compression numérique des données basée sur des principes similaires à l'échantillonnage progressif. Le concept de l'échantillonnage progressif a été développé par Makarovic (1973). Cette méthode d'acquisition de points pour asseoir le modèle en photogrammétrie semble satisfaire les demandes pour une acquisition rapide, précise et compréhensive des données [Ghazalli, 1974; Makarovic, 1975; Tempfli, 1986].

La compression sélective de ce travail est construite de façon à extraire l'information pertinente d'une énorme quantité de données ayant une redondance considérable sans changer le domaine des données originales. Dans plusieurs études, on rencontre des algorithmes de réduction qui modifient le domaine d'étude. Par exemple, nous pouvons avoir la transformée de Fourier, la transformée d'Hadamard, la transformation en composantes principales, la transformation en coefficients des polynômes etc... . En hydrographie, il semble préférable de demeurer dans le domaine original permettant des traitements ultérieurs sans transformation inverse.

Le principe de base de la compression sélective est que le terrain dépend de la densification progressive du maillage.

Ce procédé a la capacité d'adapter la densité de points aux variations locales des données originales. La méthode proposée tente de réunir les caractéristiques du terrain et la précision recherchée à la densité de l'échantillonnage [Makarovic, 1977a; 1977b; 1983].

La figure 23 montre les différentes étapes par lesquelles on doit passer avant d'en arriver au fichier réduit.

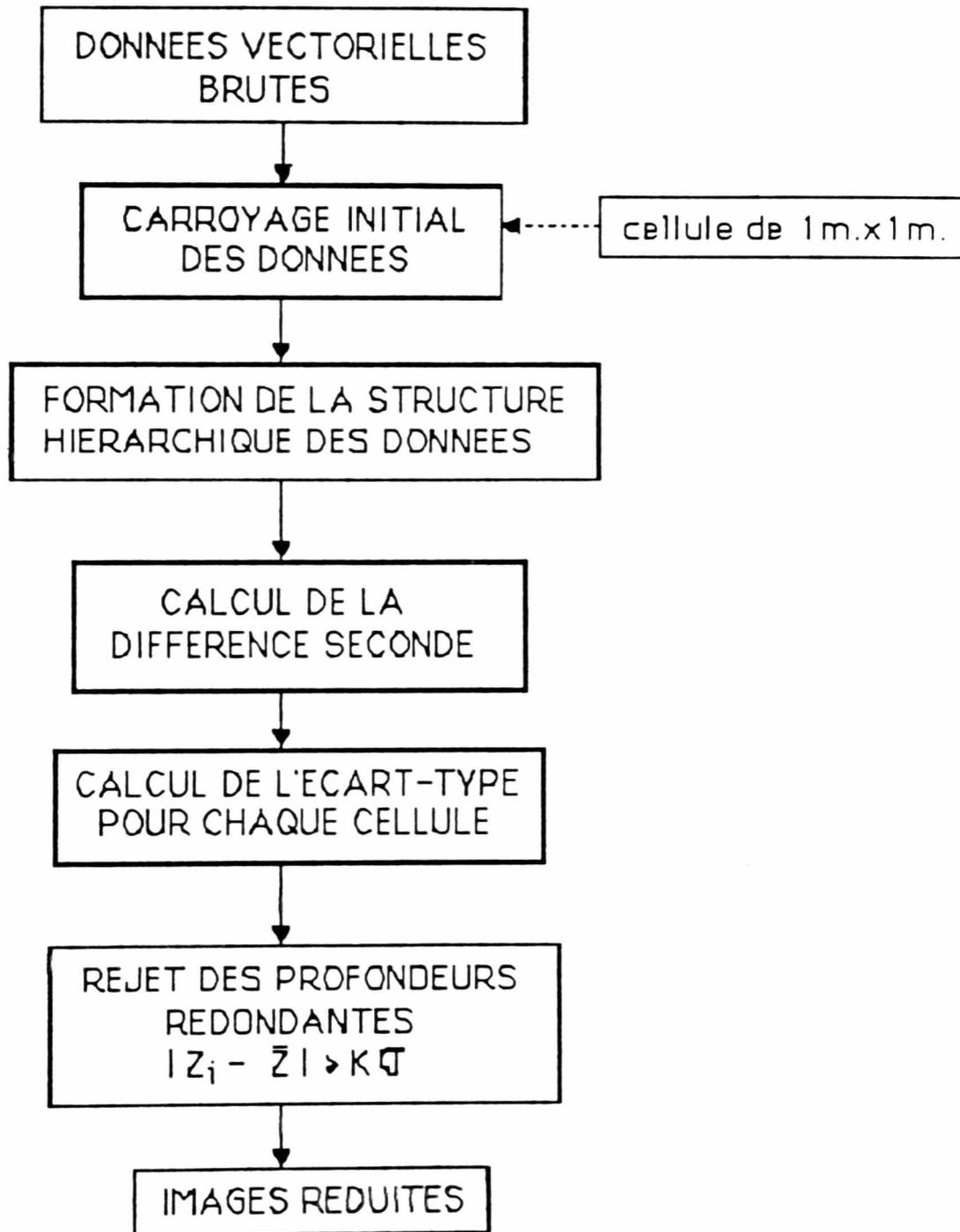


Figure 23 - Réduction par la compression sélective

La première étape est le carroyage initial des données à 1 mètre par 1 mètre qui s'effectue de la même façon que pour le seuil d'acceptation. L'opération suivante consiste à construire la structure hiérarchique des données. Celle-ci est représentée schématiquement par les figures 24 et 25.

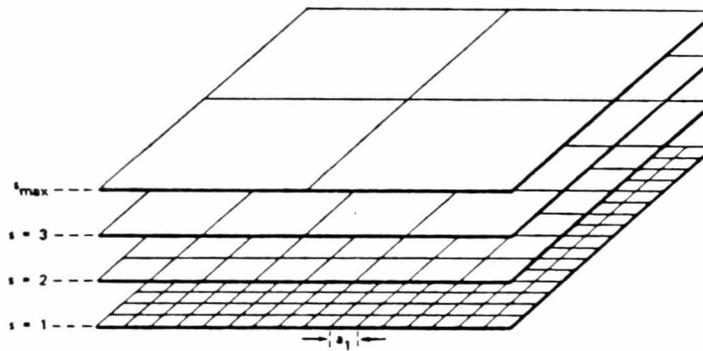


Figure 24 - Structure hiérarchique des données

[Makarovic, B., 1983]

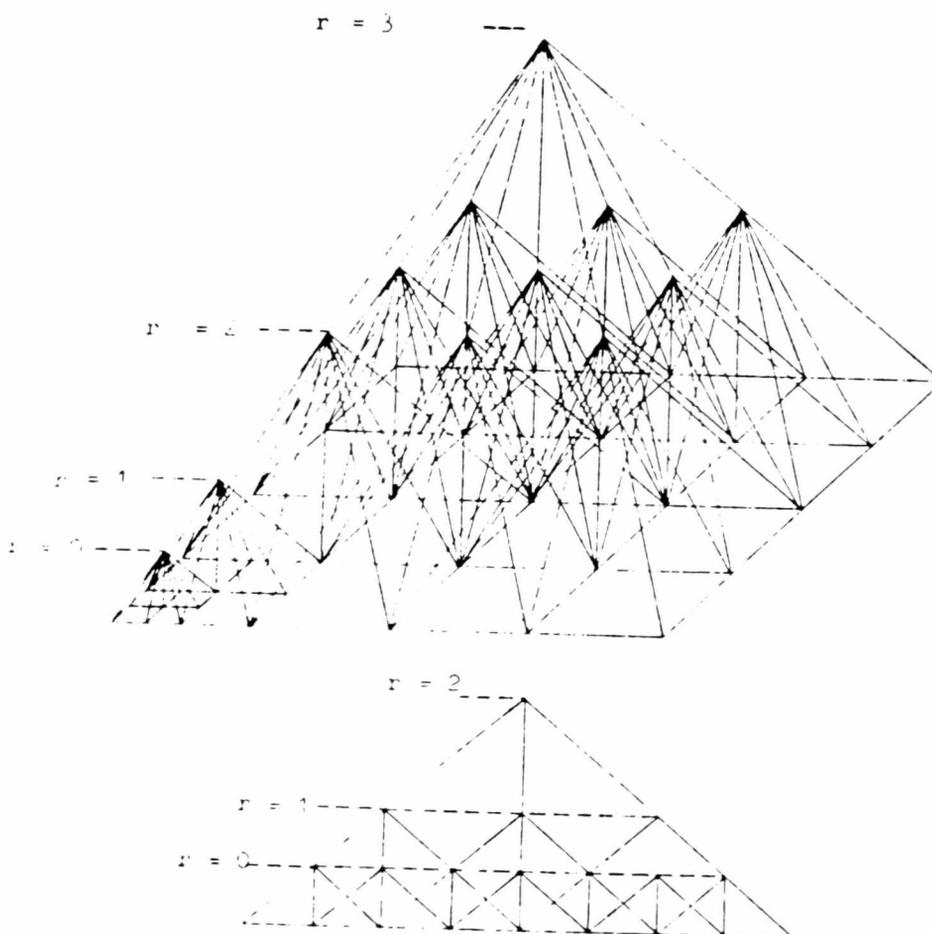


Figure 25 - Structure permettant le calcul de
la différence seconde
[Makarovic, B., 1977b]

La formation de la structure hiérarchique consiste à modifier progressivement la largeur de la fenêtre utilisée pour le calcul de la moyenne et l'écart-type.

Par la suite, pour chaque niveau, on calculera la différence seconde. Cette différence est calculée par convolution à l'aide d'un opérateur Laplacien modifié (L). Voici un opérateur laplacien 5 par 5 sous sa forme originale:

$$L(K, l) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -8 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

L'opérateur laplacien modifié utilisé se présente numériquement comme ceci:

$$L_2(K, l) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -8 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

On peut également représenter schématiquement l'opérateur laplacien modifié par la figure 26 (Niveau S=2).

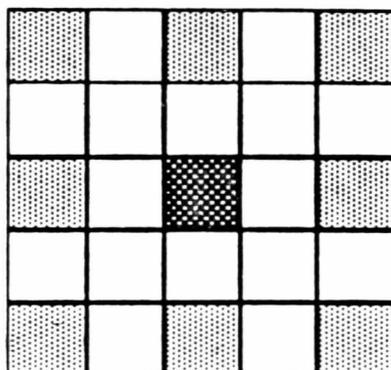


Figure 26 - Opérateur laplacien modifié

Dans la figure 26, chaque carré hachuré représente une valeur non-nulle.

Soit une matrice de données P_{pq} , l'application de l'opérateur L se dénote:

$$L_{1j} = P_{1+2,j} + P_{1+2,j+2} + P_{1+2,j-2} + P_{1-2,j} + P_{1-2,j+2} + P_{1-2,j-2} + P_{1,j+2} + P_{1,j-2} - 8P_{1j} \quad (3.2)$$

A chaque niveau, l'opérateur L sera déplacé d'un élément à l'autre, successivement le long des lignes dans la matrice

P_s . Nous obtenons donc différentes matrices P_s pour tous les niveaux (S) de la compression sélective qui serviront au calcul de la différence seconde de chaque cellule de l'image:

$$P_1 \begin{bmatrix} p_{i+1,j-1} & p_{i+1,j} & p_{i+1,j+1} \\ p_{i,j-1} & p_{i,j} & p_{i,j+1} \\ p_{i-1,j-1} & p_{i-1,j} & p_{i-1,j+1} \end{bmatrix}$$

$$P_2 \begin{bmatrix} p_{i+2,j-2} & p_{i+2,j} & p_{i+2,j+2} \\ p_{i,j-2} & p_{i,j} & p_{i,j+2} \\ p_{i-2,j-2} & p_{i-2,j} & p_{i-2,j+2} \end{bmatrix}$$

$$P_3 \begin{bmatrix} p_{i+3,j-3} & p_{i+3,j} & p_{i+3,j+3} \\ p_{i,j-3} & p_{i,j} & p_{i,j+3} \\ p_{i-3,j-3} & p_{i-3,j} & p_{i-3,j+3} \end{bmatrix}$$

Il est évident cependant que la différence seconde est incomplète pour les points situés sur les limites et les coins car ces points ne peuvent agir comme points de la matrice. Ces profondeurs seront donc conservées et représenteront la plateforme de la région.

Parallèlement au calcul de la différence seconde, un programme enregistre l'écart-type de la fenêtre d'observation pour chaque niveau. Le rejet des profondeurs se fait donc lorsque la différence est plus petite que K fois l'écart-type de la cellule.

$|L_{ij}| > K\sigma$ ceci signifie que les variations du terrain sont significatives au point i, j . La profondeur p_{ij} sera donc conservée.

$|L_{ij}| \leq K\sigma$ ceci signifie que le point i, j n'apporte aucune information supplémentaire. La profondeur p_{ij} sera donc rejetée.

La valeur $K\sigma$ est cruciale et jouera un rôle important sur la quantité d'informations retenues. Cette compression s'effectue donc en éliminant les points redondants de la région.

3.3 REPRÉSENTATION DES DONNÉES

Après le problème de la réduction du volume des données arrive pour l'hydrographe les problèmes de la gestion et de la présentation de l'information de profondeur. Comme nous l'avons vu dans les sections précédentes, la carte en points et courbes de niveaux est, de loin, l'outil le plus employé pour transmettre les données bathymétriques. Cependant, le monde des sciences parle de plus en plus de l'utilité des modèles numériques de terrain comme étant des éléments fondamentaux pour la visualisation, l'édition et l'analyse. Néanmoins, les MNTs ont encore très peu été traités en hydrographie. L'approche de la présente recherche consiste à évaluer la performance d'un MNT en comparant différentes techniques d'interpolation. L'évaluation des résultats de l'interpolation sera observée selon un carroyage à différentes largeurs de cellule. L'expérience numérique se base sur 4 modèles numériques de terrain. Ces modèles utilisent seulement la corrélation isotropique. On sait que la corrélation entre deux points peut être isotropique (corrélation dépend seulement de la distance (d)) ou anisotropique (corrélation dépend de la distance (d) et de la direction (α)) [Leberl, 1973].

3.3.1 Images de minimum

Les images sont construites à partir des données originales auxquelles on aura superposé un maillage rectangulaire. A chaque maille ou cellule est associée la profondeur minimum, maximum et moyenne retrouvée à l'intérieur des limites ou frontières. (Voir figure 27).

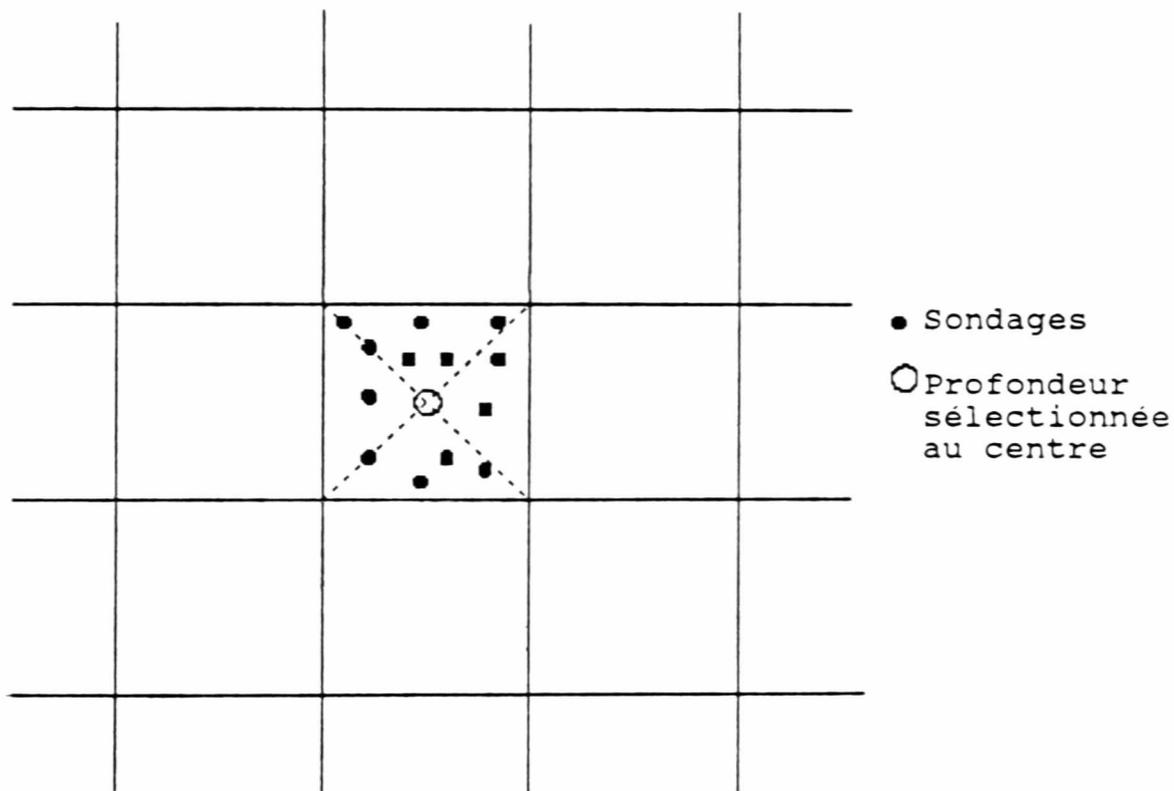


Figure 27 - Sélection des profondeurs à l'intérieur d'une cellule

Pour la cellule représentée, la valeur de la profondeur minimum, maximum et moyenne sera associée aux coordonnées du centre géométrique. Cette procédure n'implique aucune interpolation et est très rapide de calcul. Le choix de la profondeur minimum s'effectue automatiquement par ordinateur. Cependant, l'opérateur peut intervenir dans la sélection en visualisant chaque cellule douteuse par un histogramme et un profil en deux dimensions (Voir figure 28 et 29).

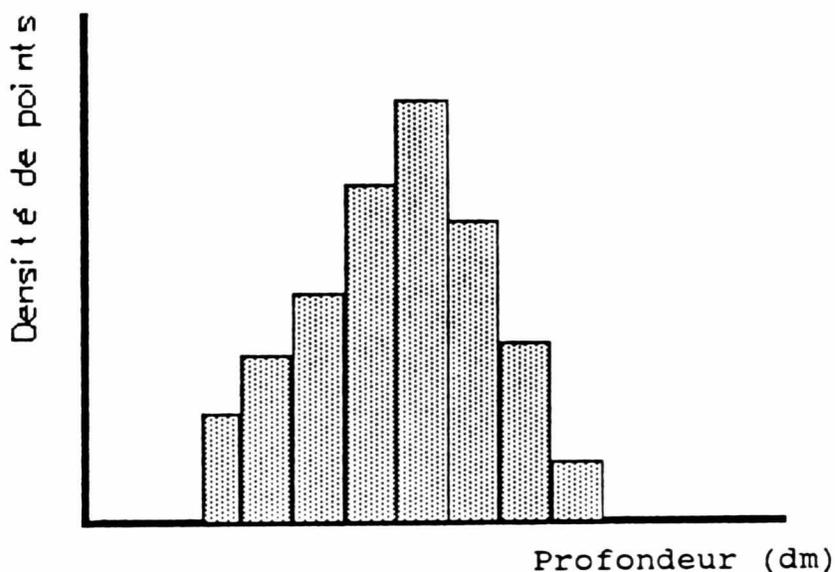


Figure 28 - Histogramme des profondeurs situées à l'intérieur de la cellule

Histogramme représentant la distribution des profondeurs à l'intérieur de la cellule. La profondeur minimum choisie sera signalée à l'utilisateur, lui permettant ainsi de modifier la sélection.

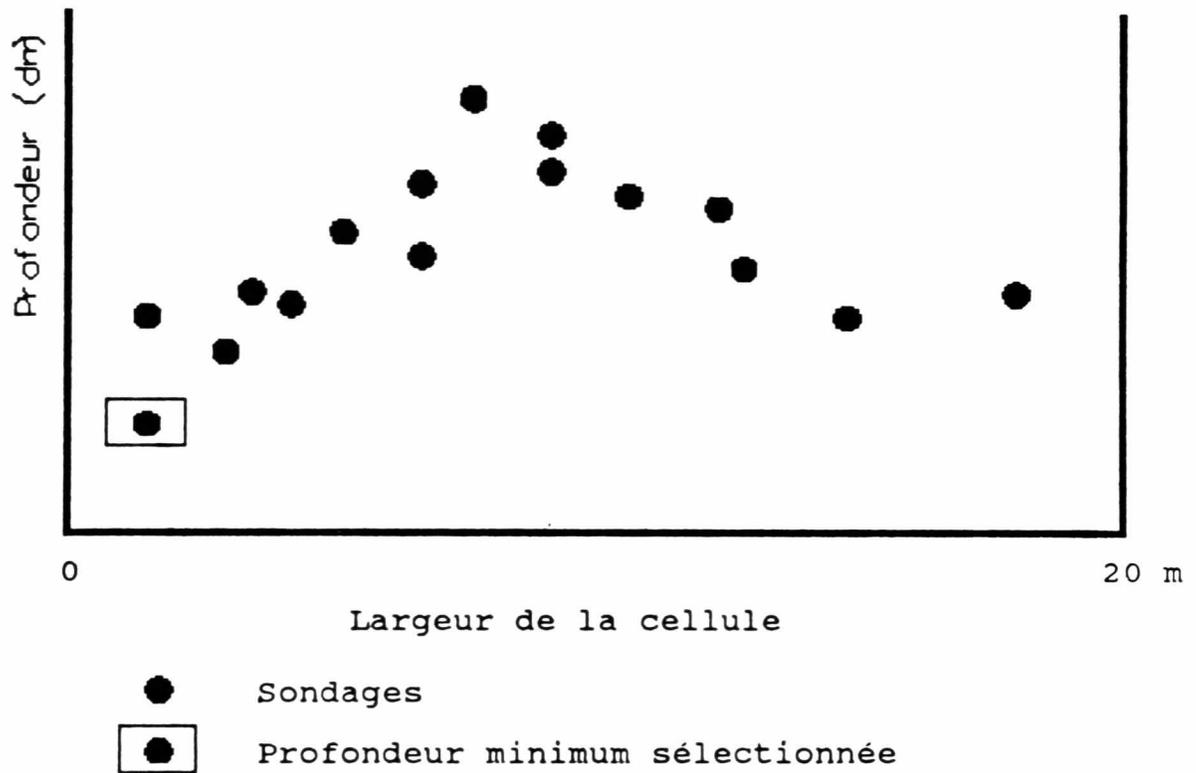


Figure 29 - Profil de la distribution des profondeurs
à l'intérieur de la cellule

Profil montrant la distribution des profondeurs. La profondeur minimum sélectionnée par l'ordinateur sera signalée et pourra être modifiée.

3.3.2 Moyenne pondérée

Le principe de base de la moyenne pondérée est d'obtenir une surface régionale à partir des points situés dans un rayon de recherche [Burrough, 1986; Crain, 1970; Leberl, 1973; 1975; Makarovic, 1976]. Cette méthode interpole la valeur d'une cellule comme étant la moyenne pondérée des points avoisinants. Il s'agit d'une interpolation linéaire attribuant un poids inversement proportionnel à la puissance deux de la distance entre les points existants et celui à être interpolé.

La valeur du point Z_i situé dans le centre symétrique de la cellule est calculée de la façon suivante:

$$f(x_i, y_i) = \frac{\sum_{l=1}^n W(x_l, y_l) Z_l}{\sum_{l=1}^n W(x_l, y_l)} \quad (3.3)$$

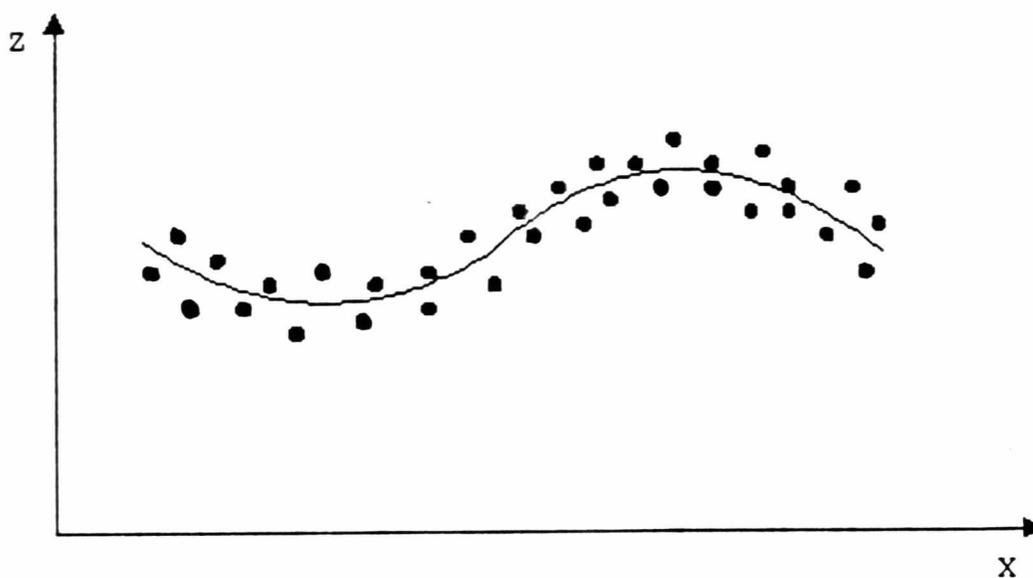
où $w(x_i, y_i)$ est la fonction de poids et s'exprime comme ceci:

$$\begin{aligned} 1/(x^2 + y^2) & \quad \text{lorsque } x^2 + y^2 \leq R^2 \\ 0 & \quad \text{lorsque } x^2 + y^2 > R^2 \end{aligned}$$

R représente la distance de balayage du rayon de recherche et équivaut dans notre cas, à la largeur de la cellule.

3.3.3 Surface polynômiale

Cette méthode fait coïncider une surface polynômiale aux points avoisinants [Burrough, 1986; Crain, 1970; Leberl, 1973; 1975]. L'interpolation s'effectue à l'aide d'un polynôme de 2^e degré par régression et est représenté par la figure 30.



Un polynôme de 2e degré est construit à partir de la distribution des points échantillonnés

Figure 30 - Polynôme de 2e degré

La table 2 montre divers polynômes employés pour le calcul de surfaces:

Table 2
Divers polynômes employés pour une surface

Surfaces	Nombre d'inconnus	Polynômes
Linéaire	3	$b_0 + b_1X + b_2Y$
Bi-linéaire	4	$b_0 + b_1X + b_2Y + b_3XY$
Quadratique	6	$b_0 + b_1X + b_2Y + b_3X^2 + b_4XY + b_5Y^2$
Cubique	10	$b_0 + b_1X + b_2Y + b_3X^2 + b_4XY + b_5Y^2 + b_6X^3 + b_7X^2Y + b_8XY^2 + b_9Y^3$

b_k = coefficients des polynômes

X, Y = coordonnées locales

3.3.4 Différence finie

Le principe des méthodes par les différences finies est basé sur l'hypothèse qu'une surface peut être dérivée d'équations différentielles [Crain, 1970]. Il s'agit de construire une expression analytique approchée d'une fonction que l'on ne connaît que pour une suite discrète de valeur de la variable.

Soit, $f(x,y)$ une fonction connue pour tous les X et Y , $\Delta f(x,y)$ sera dite la différence finie de premier ordre de $f(x,y)$ au point x,y .

$$\Delta f(x,y) = f(x + h, y + h) - f(x,y) \quad (3.4)$$

h représente la distance entre les deux surfaces utilisées. Voyons plus en détail la présentation des calculs:

Soit:

$$Z_{ij} = a_1 + a_2 X_{ij} + a_3 Y_{ij} + a_4 X_{ij}^2 + a_5 Y_{ij}^2 + a_6 X_{ij} Y_{ij} \quad (3.5)$$

où, $Z(x_i, y_j) =$ profondeur de l'élément i, j

$a_x =$ coefficients polynômiaux

$X_{ij}, Y_{ij} =$ Coordonnées locales de l'élément i, j

La différence entre les deux profondeurs peut-être calculée comme ceci:

$$\Delta Z = (a_1^I - a_1^E) + (a_2^I - a_2^E)X + (a_3^I - a_3^E)Y + (a_4^I - a_4^E)X^2 + (a_5^I - a_5^E)Y^2 + (a_6^I - a_6^E)XY \quad (3.6)$$

où, $\Delta Z =$ différence des profondeurs

$a_{x,s}^I =$ coefficients polynômiaux de la surface intérieure

$a_{x,s}^E =$ coefficients polynômiaux de la surface extérieure

$(x+h)$

$X, Y =$ coordonnées locales

La nouvelle profondeur pour la surface intérieure sera calculée comme ceci :

$$Z_{ij}^* = Z_{ij} - \Delta Z_{ij} \quad (3.7)$$

Z_{ij}^* = profondeur corrigée pour la surface intérieure au point i, j

Z_{ij} = profondeur non-corrigée de la surface intérieure

ΔZ_{ij} = la correction en profondeur de la surface intérieure de l'élément i, j .

Le processus itératif se termine lorsque le maximum de changements entre les deux surfaces est plus petit qu'un critère établi à l'avance.

3.4 FILTRAGES

Dans la démarche entreprise pour établir de nouvelles approches pour le traitement des données bathymétriques, les méthodes de filtrages dans le domaine spatial ont été identifiées comme des outils potentiels. Un filtre spatial peut être défini comme une transformation pixel par pixel d'une image en attribuant à une coordonnée de l'image transformée une profondeur en fonction des relations existants avec les pixels

environnants [Castleman, 1979; Hassan 1986; Schowengerdt 1983]

Cette transformation peut viser deux objectifs différents:

- A - *Elimination des erreurs*: réduire les effets non-désirés contaminant le signal utilisé pour construire l'image. On peut, par exemple, détecter la présence de parasites dans une image en intensifiant celui-ci par rapport à l'arrière plan. On peut également construire un modèle pour le bruit par une fonction périodique.
- B - *Rehaussement d'images*: Augmenter les contrastes d'une caractéristique spécifique dans une image (arêtes, points isolés, etc..) au dépend des autres éléments de l'image.

La présente étude tente de déterminer quelles catégories de filtres s'appliquent le mieux dans des approches en hydrographie.

L'application de filtres se fait en déplaçant une fenêtre m par n sur l'image originale (voir figure 31).

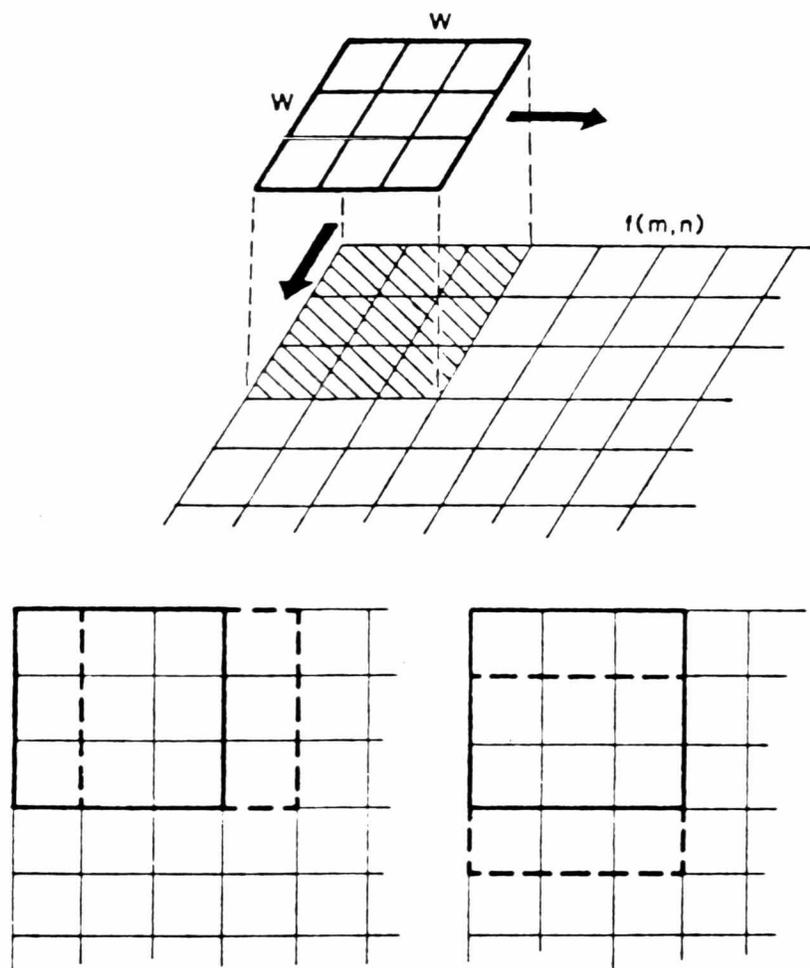


Figure 31 - Déplacement d'une fenêtre sur une image

[Schowengerdt, R.A., 1983]

M et N sont normalement des chiffres impairs permettant de conserver la symétrie lors du calcul de la valeur de la cellule centrale. L'image résultante est obtenue par convolution [Castleman, 1979; Richard, 1986; Schowengerdt, 1983].

La convolution numérique qui est une opération mathématique par laquelle deux fonctions peuvent être combinées est représentée par la figure 32.

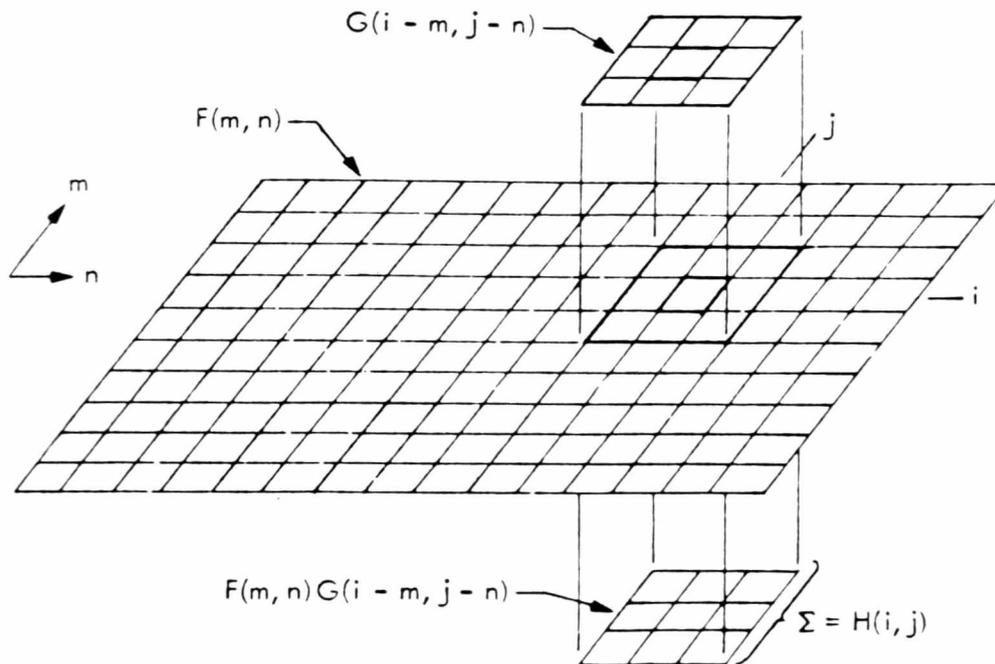


Figure 32 - Principe de la convolution

[Castleman, 1979]

Dans cette figure, une matrice 3 par 3 a été appliquée par convolution à une image. L'opérateur de convolution (*) est décrit par l'expression suivante:

$$h(x, y) = f * g = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(u, v) g(x-u, y-v) du dv \quad (3.8)$$

Dans une image numérique:

$$H(i,j) = F * G = \sum_M \sum_N F(m,n) G(i-m,j-n) \quad (3.9)$$

On retrouve deux principaux types de filtres: passe-bas et passe-haut. Les filtres passe-bas éliminent les hautes fréquences d'une image, atténuent les détails et réduisent les contrastes (voir figure 33 b). Les filtres passe-haut éliminent les basses fréquences, rehaussent les détails et produisent une image avec un histogramme étroit à zéro (voir figure 33 c).

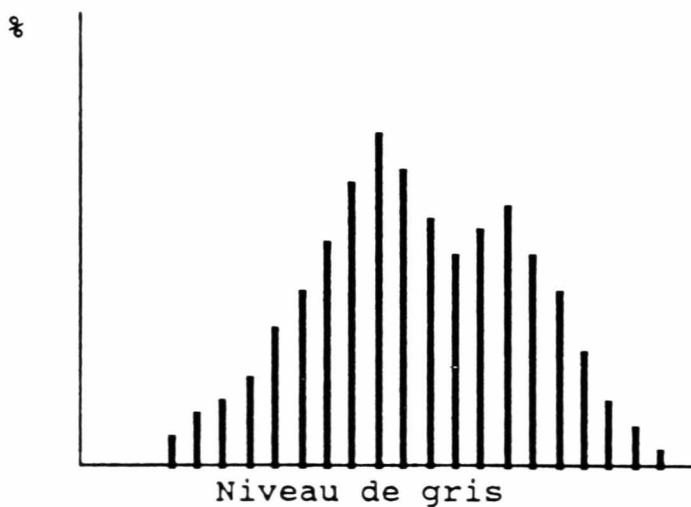


Figure 33a - Histogramme de l'image originale

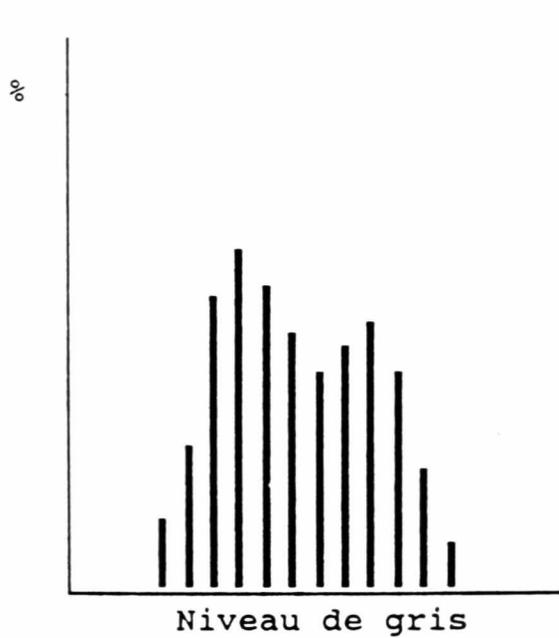


Figure 33b - Filtre passe-bas

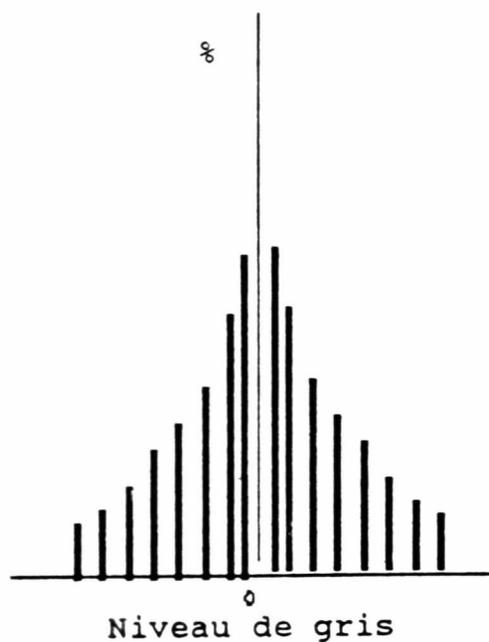


Figure 33c - Filtre passe-haut

Figure 33 - Effets des filtres sur un histogramme d'une image

Pour la présente étude, et faisant suite à l'opération de maillage, 4 filtres ont été testés avec deux largeurs de fenêtres (3 par 3 et 5 par 5).

1 - Filtre moyen

La valeur du pixel central sera remplacée par la moyenne arithmétique du pixel de la fenêtre d'observation.

$$\frac{1}{9} \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline \end{array}$$

2 - Filtre médian

La valeur du pixel central sera remplacée par la médiane des points situés à l'intérieur de la fenêtre. La médiane représente la valeur à laquelle 50% des points sont supérieurs et 50% inférieurs.

3 - Filtre mode

La valeur du pixel du centre de la fenêtre sera remplacée par le mode des points avoisinants. Le mode représente la valeur que l'on retrouve la plus souvent dans l'ensemble des données.

4 - Filtre Laplacien

Le laplacien est un opérateur mathématique provenant de la dérivé seconde qui s'exprime comme ceci:

$$\Delta^2 F = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} \quad (3.11)$$

L'opérateur Laplacien, dans le cas de fonction discrète, est représenté par la matrice suivante [Dagnelie, 1977].

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Le filtre laplacien utilisera donc l'opérateur laplacien pour modifier la valeur centrale de chaque cellule.

CHAPITRE IV

INTERPRÉTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS

4.1 RÉDUCTION DES DONNÉES

Les expériences pour la réduction des données sont exécutées à partir d'un ensemble de données bathymétriques provenant d'un bateau (SMITH) et d'un avion (LARSEN). Les dimensions du sous-ensemble à l'étude ont été établies en fonction des disponibilités des ressources et du temps. Les tests de réduction ont donc été effectués dans une sous-région de 512 m par 400 m. Pour mieux situer la zone d'analyse, mentionnons que les coordonnées UTM (Universal Transverse Mercator) du coin Nord-Ouest sont 454300 (E) et 5565450 (N).

Les fichiers SMITH et LARSEN ont été fournis par le Service hydrographique canadien (section Québec) de l'Institut Maurice Lamontagne situé à Ste-Flavie. Les levés ont été exécutés en 1988 dans la région du Havre St-Pierre.

Description technique des fichiers originaux:

	Appareils	
	SMITH	LARSEN
-----	-----	-----
Système d'acquisition	Acoustique Balayage vertical	Optique
Origine	SW198800244.RED	SH9.SDG
Nombre de points (originaux)	112 000	64 000
Nombre de points (sous-région)	23 370	350
Profondeur moyenne (dm)	169.07	130.2
Ecart-type (cm)	52.4	61.0

L'analyse des résultats s'est accomplie à partir de deux indicateurs. Premièrement, l'erreur d'interpolation (e) indiquera l'exactitude des différentes images réduites. Cette dernière représente la racine carré de l'erreur moyenne entre la profondeur d'un même sondage retrouvé sur la carte numérisée et le fichier à l'étude. Cette erreur se calcule comme ceci:

$$e^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_i^d - Z_i^t)^2$$

où, Z_i^d représente la profondeur sélectionnée par l'algorithme de compression, Z_i^t désigne la profondeur retrouvée sur la carte du Service hydrographique canadien (voir figure 34).

PROJECT NO - 5452-1988-3
 HAVRE ST-PIERRE OUEST (ALIGNEMENTS)
 SURVEY PARTY- CSS F.C.G.SMITH
 HYDROGRAPHER-IN-CHARGE- NORMAND DOUCET
 ASSISTED-BY- ROGER COTE AND GLENN RODGER
 C.H.S. FIELD SHEET NO.- 5519
 SURVEY DATE- AUGUST AND SEPTEMBER 1988
 JULIAN DAYS- 244 248
 PROJECTION- UNIVERSAL TRANSVERSE MERCATOR U.T.M. ZONE- 20
 VERIFIED SCALE- 1/5000 PLOTTED SCALE- 1/5000
 HORIZONTAL DATUM- NORTH AMERICAN DATUM (N.A.D.) 1927

FIELD SHEET LIMITS- NORTH 5562500 TO 5566500
 EAST 452000 TO 456000

SOUNDING DATUM REFERENCE- TIDAL STATION NO. 2480

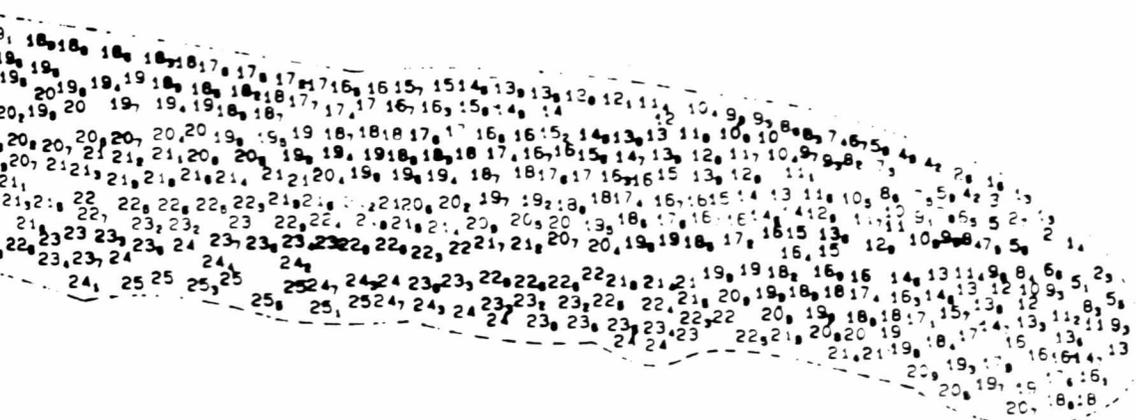
DATUM OF ELEVATION- 2.4 METRES ABOVE SOUNDING DATUM
 DEPTH UNITS- METRES AND DECIMETRES
 100% BOTTOM COVERAGE WAS ACHIEVED WITH THIS ACOUSTIC SWEEP SURVEY
 POSITIONING SYSTEM- KRUPP-ATLAS POLARFIX (RANGE-BEARING)
 ECHO SOUNDER- NAVITRONIC MCS-1B MULTI-CHANNEL SYSTEM
 METHOD OF DATA COLLECTION- AUTOMATED DIGITAL LOGGING

455500

456000



5565500



5565000

Figure 34 - Zone à l'étude issue de la carte bathymétrique du SHC

Cette carte (voir figure 34) contient les sondes qui ont été sélectionnées par l'hydrographe. On doit mentionner que le fichier qui a été utilisé pour construire cette carte est le même que celui employé pour les tests de réduction. Le même fichier des données SMITH aura donc été réduit par trois techniques différentes soit: par la technique conventionnelle de l'hydrographe, par le seuil d'acceptation et finalement, par la compression sélective.

Le deuxième élément de comparaison est l'indice de compression (C). Cet indice de compression servira d'indicateur pour évaluer le pourcentage de réduction obtenu.

$$C = N/n \quad (4.1)$$

où, N = Nombre de points dans le fichier original

n = Nombre de points dans le fichier après rejet

On peut également obtenir le pourcentage de réduction à partir de l'indice de compression (C). Pour ce faire, il suffit d'utiliser la formule suivante:

$$\% \text{ réduction} = 1 - 1/C \quad (4.2)$$

L'objectif final de ces tests consiste à obtenir le meilleur indice de compression tout en conservant la précision originale des données à l'intérieur du standard requis.

4.1.1 Analyse quantitative de la réduction

Signalons, tout d'abord, que tous les travaux exécutés pour la réduction et l'analyse des données ont été effectués à l'aide d'algorithmes personnels écrits en Fortran 77 sur une station VAX.

L'analyse de la performance de la réduction s'est accomplie en variant la valeur de la constante K . Cette constante permet d'intensifier ou de diminuer la réduction. Différents auteurs ont utilisé, pour leurs fins propres, diverses valeurs de K . Ainsi, Greenberg (1987) a utilisé une valeur de K égale à 1.0. Midthassel (1988), quant à lui, a utilisé un K égal à 2.0. Finalement, Grim (1988) a utilisé une valeur de K égale à 3.0. En faisant varier la constante K , on sera en mesure d'établir ou de vérifier quelle valeur est la plus appropriée du point de vue réduction et précision.

Il faut mentionner que la majorité des tests de réduction ont été effectués sur les données SMITH. En effet, la réduc-

tion des données LARSEN s'est avérée inutile dans la présente étude. Rappelons que le système d'acquisition des données Larsen échantillonne un point à tous les 35 mètres environ, ce qui amène une insuffisance d'éléments lors des calculs statistiques employés dans les deux techniques de réduction.

Les caractéristiques des différentes images sont regroupées dans la table 3 pour le seuil d'acceptation et dans la table 4 pour la compression sélective. Il faut mentionner que l'approche employée pour la compression sélective est similaire à celle que l'on trouve dans les travaux de Makarovic (1983). Dans notre cas, nous avons utilisé trois niveaux hiérarchiques et un opérateur laplacien modifié.

Notons également que l'ensemble des résultats et analyses réalisés dans ce travail ne sont valables que pour des valeurs de K situées entre 1.0 et 4.0, des largeurs de cellules entre 5 et 30 mètres et finalement, pour les trois premiers niveaux de la structure hiérarchique.

Table 3 Statistiques des images Smith réduites par le seuil d'acceptation

Largeur de la cellule (m)	Valeur de K	Profondeur moyenne (dm)	Ecart-type de l'image (cm)	Nombre de points dans l'image	Indice de compression (c)	Erreur d'interpolation (e) (dm)
5	3.0	165.79	53.4	27331	1.00	9.37
5	2.0	166.79	53.0	26851	1.02	10.08
5	1.5	165.75	53.1	23717	1.16	8.0
5	1.0	165.22	53.2	17262	1.59	6.0
10	3.0	165.46	53.4	27323	1.00	13.09
10	2.0	165.91	52.9	26646	1.03	10.48
10	1.5	165.64	52.9	23698	1.16	8.07
10	1.0	164.04	52.9	17551	1.56	6.27
20	3.0	165.60	53.1	26939	1.02	14.05
20	2.0	166.07	52.6	26351	1.04	11.58
20	1.5	165.66	52.4	23517	1.17	9.51
20	1.0	164.00	51.8	17363	1.58	7.83
30	3.0	163.65	54.0	27156	1.01	13.9
30	2.0	164.33	53.3	26441	1.04	12.65
30	1.5	164.66	51.9	23552	1.17	10.77
30	1.0	162.34	52.1	17628	1.56	6.80

Table 4 Statistiques des images Smith réduites par la compression sélective

Largeur de la cellule (m)	Valeur de K	Profondeur moyenne (dm)	Ecart-type de l'image (cm)	Nombre de points dans l'image	Indice de compression (c)	Erreur d'interpolation (e) (dm)
1	0.5	165.79	52.7	18755	1.25	5.29
1	1.0	166.83	52.4	18420	1.27	5.29
1	1.5	167.98	52.2	17764	1.32	5.30
1	2.0	168.88	52.3	16802	1.39	5.43
1	3.0	160.44	52.5	14504	1.61	4.85
1	4.0	172.21	52.6	12266	1.27	3.04
2	0.5	166.87	52.0	18347	1.27	5.42
2	1.0	166.57	51.9	17417	1.34	5.41
2	1.5	169.20	52.2	16046	1.46	5.51
2	2.0	169.74	52.5	14452	1.62	5.56
2	3.0	169.81	53.5	11386	2.05	5.69
2	4.0	170.37	54.8	8862	2.64	5.99
3	0.5	168.87	51.6	18832	1.24	5.56
3	1.0	170.45	51.7	17192	1.36	5.66
3	1.5	171.25	52.0	15215	1.54	5.73
3	2.0	171.45	52.6	13366	1.75	5.83
3	3.0	173.13	53.5	10262	2.28	4.51
3	4.0	172.53	55.4	7534	3.10	5.67

La figure 35 représente la relation existant entre l'erreur d'interpolation et la valeur de la constante K utilisée pour intensifier la réduction des données SMITH. Dans les figures suivantes, le symbole S indique le niveau hiérarchique utilisé pour la compression sélective.

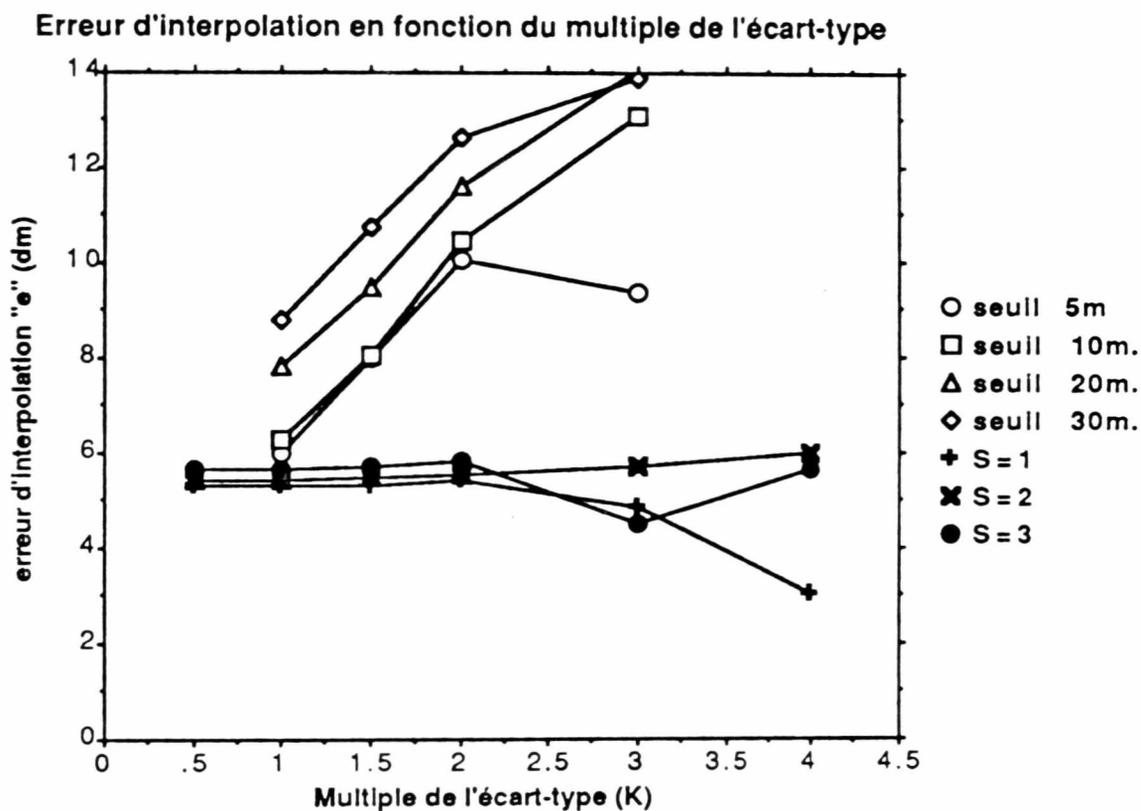


Figure 35 - Erreur d'interpolation des données Smith pour différentes valeurs de K

On constate, après analyse de la figure 35, que les erreurs d'interpolation "e" obtenues par le seuil de réduction sont plus élevées que celles obtenues par la compression

sélective. L'erreur d'interpolation "e" augmente d'environ 65% lorsque K passe de 1.0 à 3.0. Une valeur de K plus petite conserve mieux l'erreur d'interpolation. Les erreurs d'interpolation obtenues par la compression sélective sont restées relativement stables. A certains endroits ($K > 3$, $S = 1$ et 2), "e" a même subi une certaine diminution.

La réduction par le seuil a préservé des erreurs d'interpolation plus petites pour des largeurs de cellule moindres. Le seuil conserve donc mieux l'erreur lorsque la largeur de la cellule n'est pas trop grande. La compression sélective pour le niveau hiérarchique 1 ($S = 1$) obtient légèrement les meilleures erreurs d'interpolation.

Il faut également remarquer que suivant la nature du modèle mathématique du seuil d'acceptation, la réduction s'effectue au niveau des valeurs extrêmes de l'ensemble des données originales. A l'inverse, la compression sélective élimine les profondeurs redondantes. Comme le montre la figure 35, il vaut donc mieux éliminer les données redondantes que les valeurs extrêmes car, dans l'ensemble, les erreurs d'interpolation de la compression sélective sont moins élevées.

La figure 36 nous montre la relation existant entre l'indice de compression obtenu par le seuil et la compression sélective en variant la valeur de K.

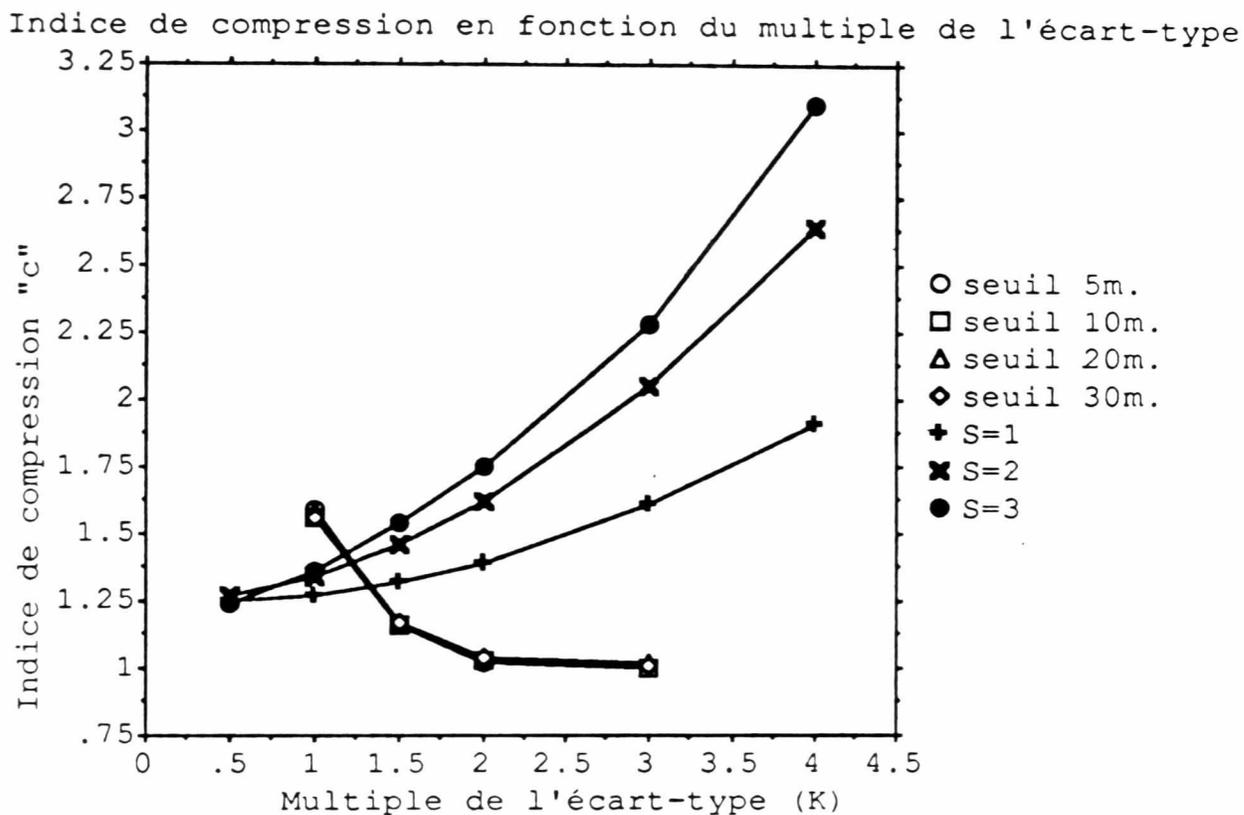


Figure 36 - Indice de compression des données Smith pour différentes valeurs de K

On remarque que l'indice de compression du seuil d'acceptation diminue lorsque K augmente. Il n'existe pas de différence acceptable entre les seuils à 5 mètres ou 30 mètres. La largeur de la cellule n'a donc eu aucun effet sur la compression faite par le seuil. La compression sélective, quant à

elle, obtient un plus haut taux de réduction lorsque K est élevé. Une valeur de C, égale à 3.0, représente une réduction d'environ 67 % des données originales. La compression sélective pour un niveau égal à 3 ($S = 3$) a donc donné les meilleurs résultats de réduction. L'étude a également révélé qu'une augmentation continuelle de la valeur K amène une saturation de la réduction. En fait, pour des valeurs de K plus élevées que 4, l'indice de compression avait tendance à se stabiliser. Ce point de stabilisation est atteint plus rapidement pour des niveaux hiérarchiques moins élevés.

Les figures 37 et 38 permettent de mieux visualiser et comprendre la réduction du nombre de profondeur. La figure 37 montre les changements survenus en variant le niveau hiérarchique (S) pour un K égal à 3.0. La figure 38, représente les changements obtenus en modifiant la valeur de K pour un niveau hiérarchique égal à 2. Ces deux figures montrent les profondeurs qui ont été rejetées et conservées suite à la réduction par la compression sélective. Il est intéressant de noter la distribution des rejets qui varie beaucoup d'un niveau à l'autre.

-	x	-	-	-	x	-	-	x	x	-	-
x	-	-	x	-	x	-	x	x	x	-	-
x	x	-	x	-	x	-	x	-	-	-	-
x	x	-	x	-	-	-	x	x	x	-	-
x	x	-	x	-	x	-	x	x	-	-	-
-	-	-	-	x	-	x	x	x	-	-	-
x	x	x	-	x	-	x	x	x	-	-	x
-	x	x	-	x	-	x	-	-	-	-	x
x	-	x	-	-	-	x	-	x	-	-	-
x	x	-	-	x	-	x	-	x	-	-	x

IMAGE ORIGINALE

-	x	-	-	-	x	-	-	x	x	-	-
x	-	-	x	-	-	-	x	-	-	-	-
-	-	-	-	-	x	-	x	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-
-	x	-	x	-	x	-	x	x	-	-	-
-	-	-	-	x	-	x	-	-	-	-	-
x	-	x	-	-	-	x	-	-	-	-	-
-	x	-	-	x	-	x	-	-	-	-	x
-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-
x	x	-	-	x	-	x	-	x	-	-	x

NIVEAU HIERARCHIQUE 1

-	-	-	-	-	x	-	-	-	x	-	-
x	-	-	x	-	x	-	x	x	x	-	-
-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-
x	x	-	x	-	-	-	x	-	x	-	-
-	x	-	-	-	-	-	x	x	-	-	-
-	-	-	-	x	-	-	x	x	-	-	-
x	-	-	-	x	-	x	x	-	-	-	x
-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-
x	-	x	-	-	-	x	-	x	-	-	-
x	x	-	-	x	-	-	-	x	-	-	-

NIVEAU HIERARCHIQUE 2

-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-
x	x	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	x	-	-	-	x	-	x	-	-
x	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	x	-	x	-	-	-
x	x	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-

NIVEAU HIERARCHIQUE 3

Légende: x = valeur répertoriée
 - = aucune valeur répertoriée

Figure 37 - Sous région représentant les résultats de la compression sélective en modifiant le niveau hiérarchique

-	x	-	-	-	x	-	-	x	x	-	-
x	-	-	x	-	x	-	x	x	x	-	-
x	x	-	x	-	x	-	x	-	-	-	-
x	x	-	x	-	-	-	x	x	x	-	-
x	x	-	x	-	x	-	x	x	-	-	-
-	-	-	-	x	-	x	x	x	-	-	-
x	x	x	-	x	-	x	x	x	-	-	x
-	x	x	-	x	-	x	-	-	-	-	x
x	-	x	-	-	-	x	-	x	-	-	-
x	x	-	-	x	-	x	-	x	-	-	x

IMAGE ORIGINALE

-	x	-	-	-	x	-	-	-	x	-	-
x	-	-	x	-	x	-	x	-	x	x	x
x	x	-	x	-	x	-	x	-	-	-	-
x	x	-	x	-	-	-	x	x	x	-	-
-	x	-	x	-	-	-	x	x	-	-	-
-	-	-	-	x	-	x	x	x	-	-	-
x	x	x	-	x	-	x	x	x	-	-	x
-	x	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-
x	-	x	-	-	-	x	-	x	-	-	-
x	x	-	-	x	-	x	-	x	-	-	-

VALEUR DE K=1.0

-	x	-	-	-	x	-	-	-	x	-	-
x	-	-	x	-	x	-	x	x	x	-	-
x	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-
x	x	-	x	-	-	-	x	x	x	-	-
-	x	-	-	-	-	-	x	x	-	-	-
-	-	-	-	x	-	-	x	x	-	-	-
x	x	x	-	x	-	x	x	-	-	-	x
-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-
x	-	x	-	-	-	x	-	x	-	-	-
x	x	-	-	x	-	x	-	x	-	-	x

VALEUR DE K=2.0

-	-	-	-	-	x	-	-	-	x	-	-
x	-	-	x	-	x	-	x	x	x	-	-
-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-
x	x	-	x	-	-	-	x	-	x	-	-
-	x	-	-	-	-	-	x	x	-	-	-
-	-	-	-	x	-	-	x	x	-	-	-
x	-	-	-	x	-	x	x	-	-	-	x
-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-
x	-	x	-	-	-	x	-	x	-	-	-
x	x	-	-	x	-	-	-	x	-	-	-

VALEUR DE K=3.0

Légende: x = valeur répertoriée
 - = aucune valeur répertoriée

Figure 38 - Sous région représentant les résultats de la compression sélective en modifiant la valeur de K

Pour établir quelle technique de réduction donne les meilleurs résultats, il est nécessaire de combiner les erreurs d'interpolation (e) et les indices de compression (C) des différentes méthodes. La figure 39 combine l'erreur d'interpolation (e) et l'indice de compression (C).

Rapport compression et erreur d'interpolation en fonction du multiple de l'écart-type

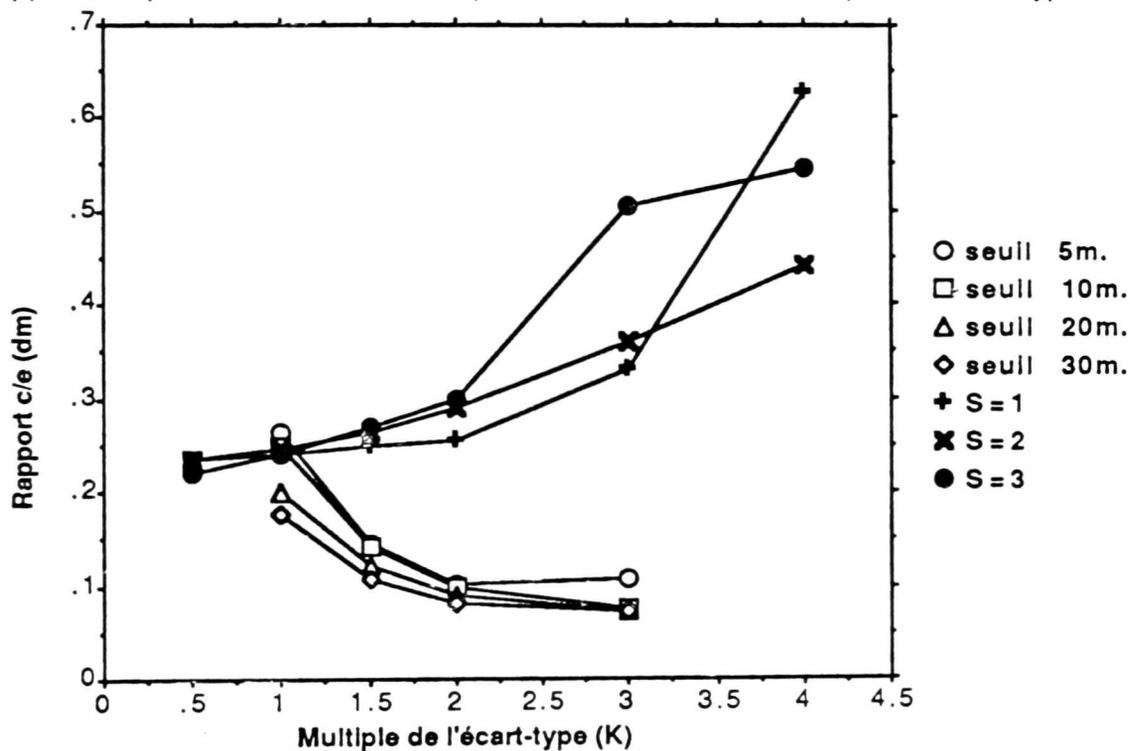


Figure 39 - Rapport c/e des données Smith pour différentes valeurs de K

Le rapport c/e indique de meilleurs résultats lorsque celui-ci est plus élevé. De ce fait, le rapport c/e provenant de la compression sélective se classe beaucoup mieux que pour

le seuil d'acceptation. Dans l'ensemble, la compression sélective procure de meilleurs résultats pour le niveau 3. Ici, il aurait été possible d'augmenter davantage la réduction en intensifiant la valeur de K. Dans le cas du seuil d'acceptation, une valeur de K plus petite procure de meilleurs quotients c/e.

La compression sélective semble, dans l'ensemble, donner les meilleurs résultats. Il est cependant difficile, suivant le travail effectué, d'établir quel niveau ou quelle valeur de K donnerait les résultats optimaux. On se pose donc la question suivante: "Quelle densité de mesures est requise pour obtenir une précision spécifique pour la représentation du terrain?". La réponse est grandement dépendante du but de l'application. En hydrographie, la réduction pourrait encore s'intensifier car l'erreur d'interpolation obtenue demeure dans les normes requises. Une valeur de K plus élevée pourrait être utilisée sans pour autant perdre l'intégrité originale des données. Cependant, l'utilisation d'un niveau hiérarchique plus élevé que 3 pourrait amener l'élimination de profondeurs significatives.

Finalement, on en arrive à la conclusion que la combinaison du seuil d'acceptation et de la compression sélective

apparaît être l'outil le plus avantageux. Ceci s'explique du fait que le seuil d'acceptation permet d'éliminer les profondeurs extrêmes pouvant contenir les erreurs grossières retrouvées dans un ensemble de données. Cette étape accomplie, la compression sélective éliminera automatiquement les profondeurs surabondantes et nuisibles lors de l'impression de la carte. L'hydrographe pourra garder le contrôle de la réduction en intensifiant ou diminuant la valeur de K sans pour autant influencer les critères de rejet.

Voici, en résumé, les principales qualités de la réduction relevées dans le processus du traitement :

- 1 - *La réduction s'est effectuée en adaptant localement la densité de points suivant la variabilité des données originales.*

- 2 - *La réduction est ajustable et quantifiable. Elle peut entraîner une réduction du nombre de points superflus tout en conservant les points pertinents.*

3 - La réduction n'a pas été employée dans le but d'obtenir un seuil maximum de réduction mais pour combiner compression et précision. Une stratégie optimale pourrait permettre de grader le nombre requis de profondeurs.

4 - La réduction a conservé les données dans leur format original.

L'inconvénient majeur de la réduction, utilisant un quadrillage régulier, est que celle-ci ne tient pas compte de la densité de points le long de la ligne de levé. La figure 40 représente schématiquement cette situation.

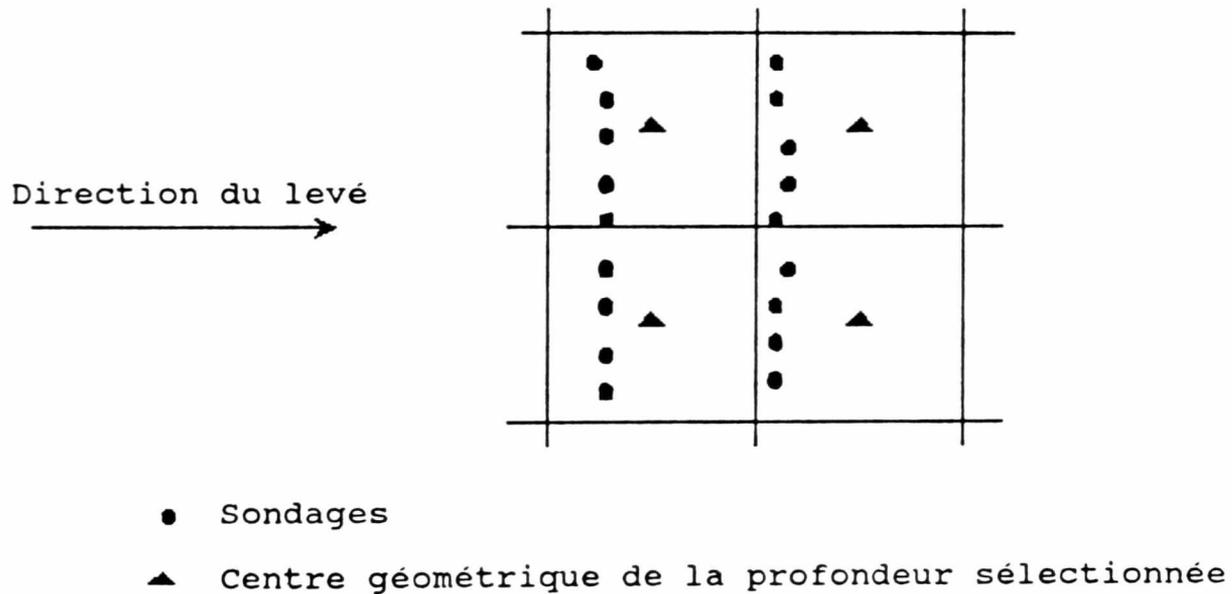


Figure 40 - Patron de sondage des données Smith

On voit que la densité d'échantillonnage est plus élevée dans la direction du levé que dans l'autre. La réduction ne tient pas compte du patron de sondage ce qui crée un déséquilibre lors de la sélection de la profondeur minimum. Ce déséquilibre est plus prononcé pour les données SMITH que pour les données LARSEN.

4.2 MODELES NUMÉRIQUES DE TERRAIN

Comme il a été précédemment mentionné, le présent travail a comparé quatre différentes méthodes d'interpolation. Les objectifs des tests consistent à évaluer la performance de quatre modèles numériques de terrain (MNTs) dans le but d'établir un nouveau produit pour la visualisation et l'analyse des données bathymétriques. Les travaux ont été exécutés en partie à l'aide d'algorithmes personnels écrits en Fortran. L'analyse numérique des images a été accomplie par l'entremise du logiciel EASI-PACE de la compagnie Perceptron inc. (PCI). La manipulation des MNTs s'est faite en partie sur le système d'information géographique de la compagnie PAMAP Graphics ltd. (Victoria), monté également sur un ordinateur personnel.

4.2.1 Analyse quantitative des MNTs

Le critère le plus élémentaire pour évaluer la performance d'un MNT est de se dire que le modèle le plus simple sera le meilleur. Mais ce critère simpliste ne tient pas compte du facteur qualité. Or, il a été expérimenté que, dans certains cas, il existe des différences majeures dans la performance des diverses méthodes d'interpolation. En conséquence, l'évaluation des méthodes d'interpolation est habituellement faite sur la base de leur précision et exactitude, lesquelles peuvent être décrites par l'erreur d'interpolation (e). La comparaison des MNTs se fera donc en variant la largeur de la cellule du maillage et en examinant l'effet sur la précision.

Les tables 5 et 6 résument l'ensemble des valeurs statistiques retrouvées sur les divers MNTs pour les données SMITH. La table 7 regroupe les statistiques pour les données LARSEN.

Table 5 - Statistiques de base et erreurs d'interpolation 110
des images minimum des données Smith

Techniques d'interpolation	Constante K	Moyenne (dm)	Ecart-type (cm)	Erreur d'interpolation (dm) "e"
5	1.0	165.22	53.2	6.00
5	1.5	165.75	53.1	8.00
5	2.0	173.76	53.4	10.08
5	3.0	173.50	53.9	9.37
5	aucune	173.27	54.2	9.79
10	1.0	164.04	52.8	6.27
10	1.5	165.64	52.9	8.07
10	2.0	165.91	52.9	10.48
10	3.0	165.46	53.4	13.09
10	aucune	169.54	57.0	14.97
20	1.0	164.00	51.8	7.83
20	1.5	165.66	52.3	9.51
20	2.0	166.07	52.6	11.58
20	3.0	165.60	53.1	14.05
20	aucune	163.73	61.7	18.11
30	1.0	162.34	52.1	8.80
30	1.5	164.66	51.9	10.77
30	2.0	164.33	53.3	12.65
30	3.0	163.65	54.0	13.90
30	aucune	154.46	67.4	22.15

Table 6 - Statistiques de base et erreurs d'interpolation
des divers MNTs des données Smith

Techniques d'interpolation	Résolution (mètres)	Moyenne (dm)	Ecart-type (cm)	Erreur d'interpolation (dm) "e"
Moyenne pondérée	5	166.28	51.8	11.69
	10	163.47	54.2	40.83
	15	162.34	57.6	39.48
Surface polynômiale	5	166.26	51.8	11.70
	10	155.19	51.5	40.03
	15	162.11	57.9	40.10
Différence finie	5	175.73	39.8	11.56
	10	157.99	44.0	42.09
	20	168.1	45.6	47.40
	30			13.0
Moyenne arithmétique	5	175.70	51.7	5.99
	10	174.73	53.3	5.36
	20	175.17	53.6	6.94
	30	171.61	57.0	11.37

Table 7 - Statistiques de base et erreurs d'interpolation des divers MNTs des données Larsen 112

Techniques d'interpolation	Résolution (mètres)	Moyenne (dm)	Ecart-type (cm)	Erreur d'interpolation (dm) "e"
Image Minimum	5	94.61	49.4	14.4
	10	94.8	49.6	17.6
	20	95.5	49.6	31.9
	30	95.5	50.9	39.3
	40			45.0
	50			51.0
Moyenne pondérée	5	119.18	54.8	6.1
	10	117.91	54.6	37.2
	20	123.22	56.1	63.4
	30	127.43	58.5	38.5
	40			37.0
	50			35.0
Surface polynômiale	5	119.14	54.8	6.1
	10	117.73	54.6	37.3
	20	122.77	56.2	64.2
	30	127.10	58.7	38.8
	40			37.5
	50			36.0
Différence finie	5	139.80	38.1	50.1
	10	137.26	48.4	49.8
	20	136.67	56.6	52.8
	30	185.50	81.4	49.6
	40			40.1
	50			32.0

La figure 41 nous montre les erreurs d'interpolation obtenues pour les divers MNTs en variant la largeur de la cellule de 5 à 30 mètres.

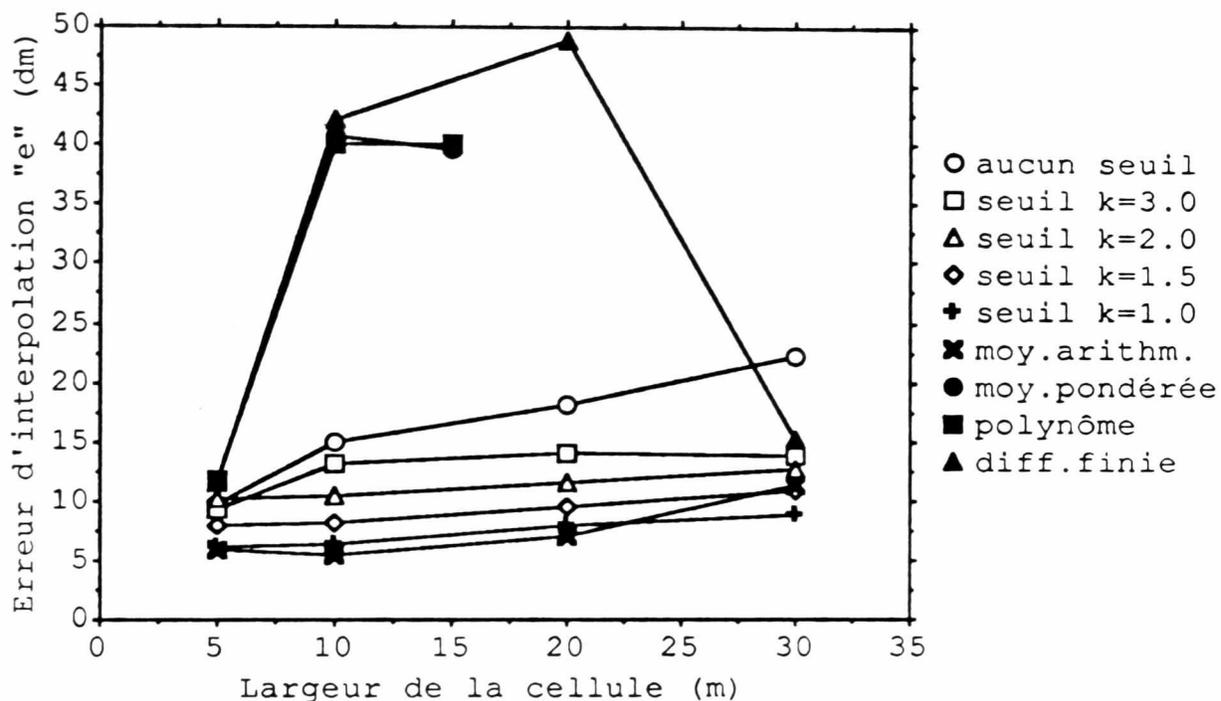


Figure 41 - Erreur d'interpolation des données Smith en fonction de la largeur de la cellule pour divers MNTs

En général, la différence entre les images minimums est très petite (10 à 20%). La différence entre les trois modèles calculés sur PAMAP (soit: la moyenne pondérée, la surface polynômiale et la différence finie) est très petite également (0,1%) pour des cellules entre 5 et 15 mètres. L'expérimenta-

tion a mis en évidence certaines faiblesses ou limites du système PAMAP. En effet, étant donné le grand volume de données, PAMAP n'a pas permis d'utiliser une cellule plus grande que 15 mètres. Le logiciel limite le nombre de points pour le calcul à 10 points par cellule. Mentionnons qu'à ce stade, une cellule de 20 mètres contient en moyenne 100 profondeurs.

On remarque qu'une augmentation de la grosseur de la cellule tend à augmenter l'erreur d'interpolation pour les images minimums. En réalité, une plus grande cellule entraîne un plus grand déplacement de la profondeur minimum. Les images minimums sont en fait construites en sélectionnant la profondeur minimum à l'intérieur de la cellule. Ce minimum est par la suite associé au centre géométrique de la cellule, sans aucune interpolation. Pour cette raison, l'application du seuil d'acceptation permet d'améliorer la performance des images minimums. Les images à $K = 1.0$ ont produit les meilleures erreurs d'interpolation à n'importe quelle largeur de cellule. L'élimination des valeurs extrêmes améliore la performance des images minimums. L'image obtenue par la moyenne arithmétique a donné de très bons résultats. Cette conclusion vient à l'encontre des résultats présentés par Leberl (1973). Leberl concluait que l'interpolation faite à l'aide de la moyenne arithmétique ne s'avérait pas une méthode appropriée.

Le fichier construit sans aucun seuil a donné les moins bons résultats. Il serait donc néfaste pour les hydrographes de construire leur carte en ne sélectionnant que la profondeur minimum sans auparavant éliminer les profondeurs extrêmes.

Les erreurs obtenues par les trois MNTs calculées sur PAMAP (moyenne pondérée, surface polynômiale et différence finie) ont augmenté pour des largeurs de cellules entre 5 à 10 mètres. Par contre, les erreurs d'interpolation ont diminué pour des largeurs de cellules plus grandes que 10 mètres. Il est difficile d'identifier la tendance générale des erreurs dues à l'insuffisance d'échantillons. Néanmoins, cette situation rejoint quelque peu la conclusion de Leberl (1973) qui disait que la différence entre les méthodes d'interpolation n'est pas plus élevée lorsque la résolution est plus grande. Cette conclusion est cependant surprenante et discutable car il était anticipé que la différence entre les méthodes d'interpolation serait plus petite lorsque la complexité du terrain est plus grande.

Passons maintenant à l'analyse des données LARSEN en étudiant la figure 42.

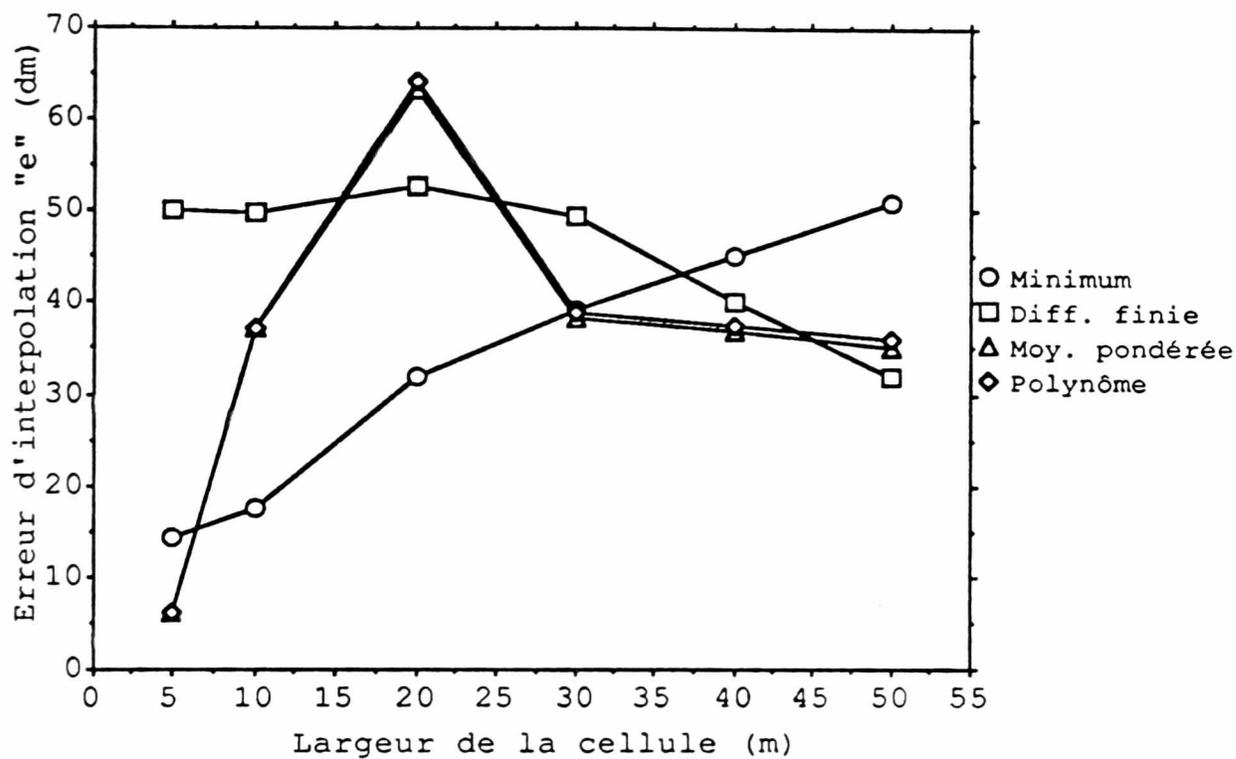


Figure 42 - Erreur d'interpolation des données Larsen en fonction de la largeur de la cellule pour divers MNTs

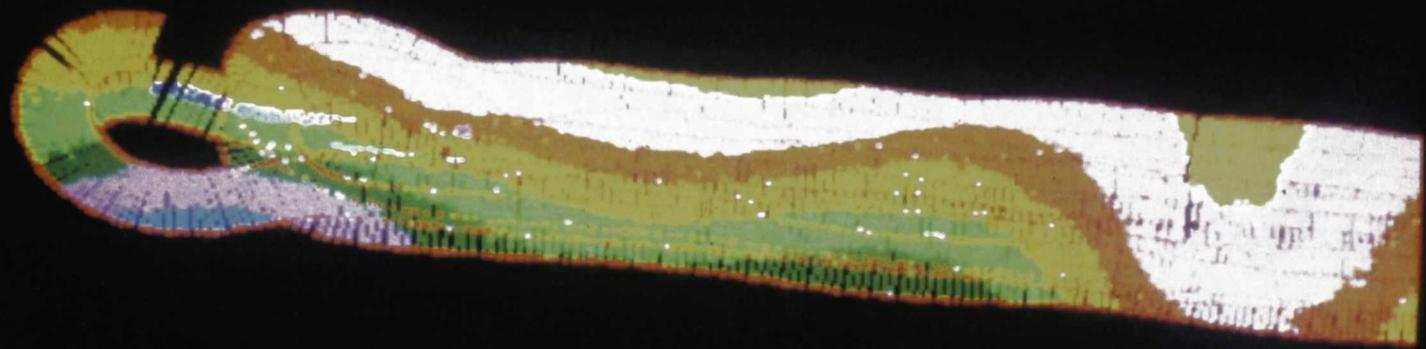
Les erreurs d'interpolation des données LARSEN sont, en moyenne, plus élevées que celles obtenues avec les données SMITH. On remarque que pour des cellules entre 5 et 30 mètres, c'est l'image minimum qui donne les meilleurs résultats. Pour une largeur de cellule de 30 mètres, les erreurs sont sensiblement les mêmes. Au delà de 30 mètres, il semble que la différence finie provoque de plus en plus de meilleurs résultats. Rappelons que l'échantillonnage du LARSEN donne un point à tous les 35 mètres environ. Ce qui signifie que l'interpolation est

inutile pour des cellules plus petites que la résolution de l'échantillonnage du levé.

4.2.2 Analyse qualitative des MNTs

Une autre partie du présent travail a consisté à évaluer les techniques de visualisation utilisées en télédétection pour aider l'hydrographe lors de l'interpolation des données bathymétriques. L'étude a permis de constater que les images couleurs sont plus appropriées pour l'interprétation visuelle globale que les cartes conventionnelles. La figure 43 donne un exemple d'une image bathymétrique.

IMAGE BATHYMETRIQUE



REGION:

NORD DE L'ILE DU
HAVRE ST-PIERRE

ORIGINE:

PAMAP:WEIGHTED AVER.

Lab. Teledetection

LEGENDE

Profondeur (metres)

□	1-18
□	19
□	20
□	21
□	22
□	23
□	24
□	25
□	26
□	27
□	28-50

Figure 43 - Image bathymétrique des données Smith

Résolution: 2mx2m

Comme le montre la figure 44, les images peuvent être rehaussées en utilisant des méthodes standards de traitement d'images numériques. Par exemple, on peut noter les rehaussements linéaires d'histogrammes et l'utilisation des pseudo-couleurs (2^e image sur figure 44). La troisième image, sur la figure 44, a été obtenue en utilisant trois différentes tables de couleurs (Look-up table) pour donner les composantes rouge, verte et bleue du spectre de couleur. Des images produites en teintes de gris se sont avérées moins agréables et plus difficile à interpréter que les images couleurs [Drury and Walker, 1987]. Seulement 16 niveaux de gris ont pu être discriminés sur une image noir et blanc. L'utilisation de la couleur a permis d'augmenter la gamme de profondeurs identifiables. Il est cependant évident que l'affichage des images bathymétriques à tous les décimètres est difficile. Pour le présent travail, les profondeurs s'évaluaient de 5 décimètres à 255 décimètres. Nous avons donc 250 niveaux à afficher en décimètres. Néanmoins, la limitation de 256 niveaux d'affichage par écran couleur apporte un élément restrictif à l'utilisation de l'affichage à chaque décimètre. D'un autre côté, la visualisation à chaque mètre de profondeur peut amener des erreurs d'interprétation néfastes pour la navigation. Il a donc lieu d'établir des trames de couleurs représentatives en fonction de l'étalement des profondeurs.

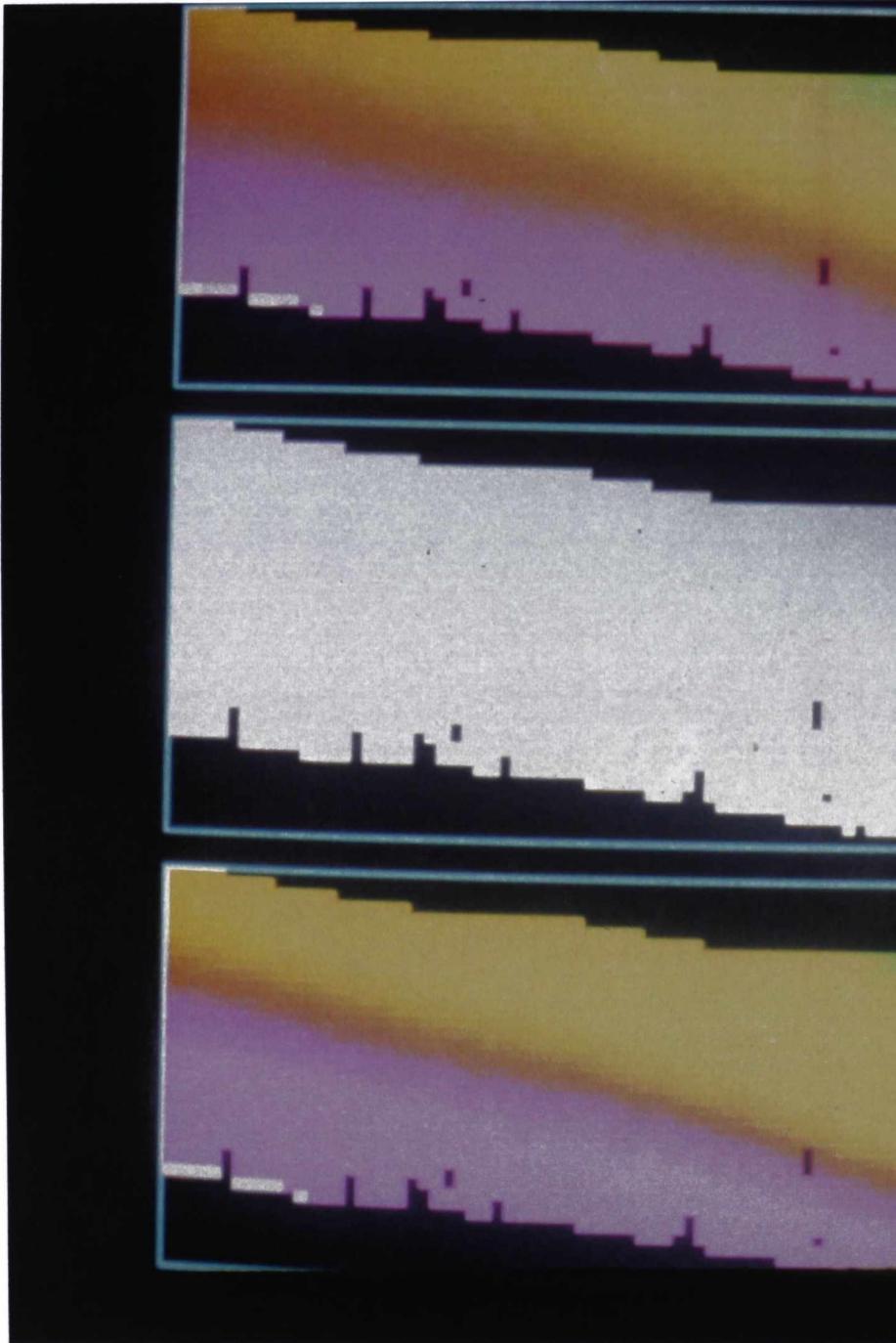
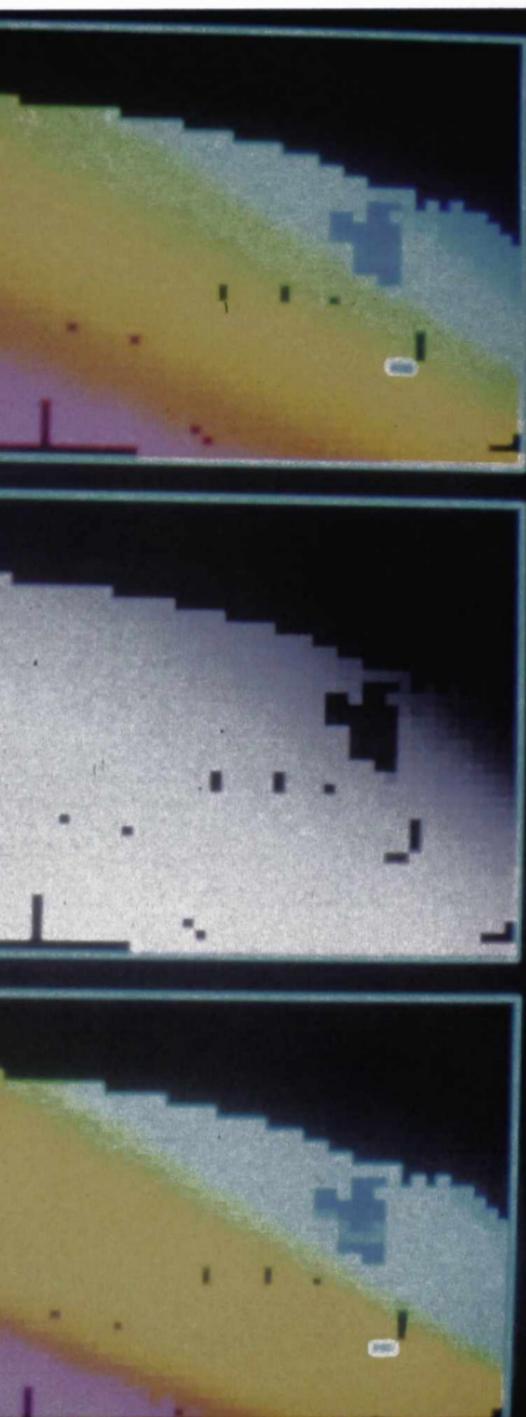


Figure 44 - Rehaussements d'images Smith



RÉCHAUSSEMENTS

Résolution: 10mx10m

La figure 45 regroupe les quatre modèles bathymétriques des données SMITH. Dans l'ensemble, la présentation des MNTs est similaire. Le modèle de la différence finie diffère légèrement des autres car son algorithme calcule une profondeur pour chaque cellule, même s'il n'y a pas suffisamment de points avoisinants.

IMAGE BATHYMETRIQUE

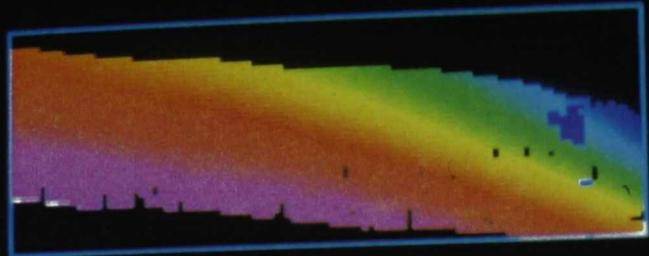
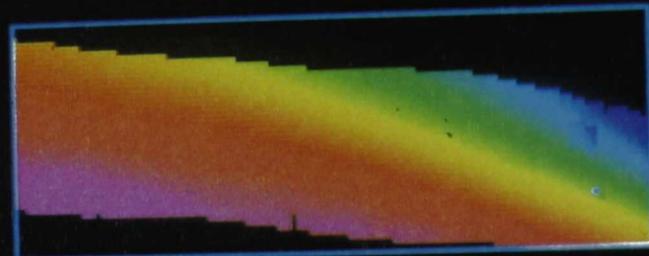
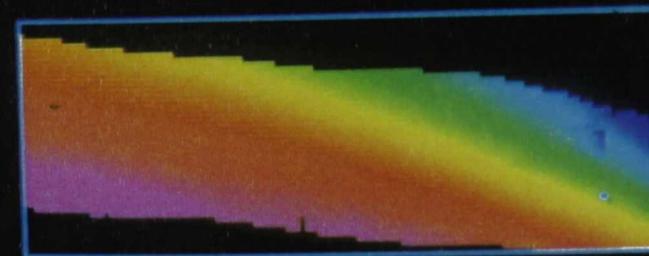


IMAGE
MINIMUM

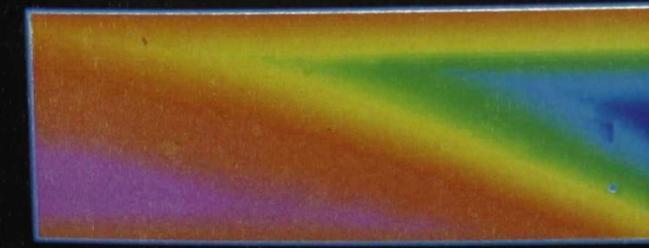
REGION:
NORD DE L'ILE DU
HAVRE ST-PIERRE



MOYENNE
PONDEREE



SURFACE
POLYNOMIALE



DIFFERENCE
FINIE



Figure 45 - Modèles bathymétriques des données Smith

Résolution: 5mx5m

La figure 46 montre les quatre modèles bathymétriques obtenus de données LARSEN. L'avantage de l'image minimum est que celle-ci donne l'emplacement exact du sondage car il n'y a pas d'interpolation. Les modèles obtenus par la *moyenne pondérée* et la *surface polynômiale* sont sensiblement les mêmes. Le temps de calcul nécessaire pour ces deux modèles est long. Ils ont produit de pauvres résultats là où la densité de points est basse. Leurs résultats sont très dépendants de la longueur du rayon de recherche et ont tendance à lisser les régions à haute densité. Les principales qualités de ces deux MNTs sont la simplicité et la possibilité de laisser libre de valeurs les cellules ne possédant pas suffisamment de points.

Le modèle obtenu par les *différences finies* n'apparaît pas naturel par endroit. Le principal avantage est que celui-ci est très rapide de calcul. Le modèle par la différences finies contient très peu de maximums et de minimums tout en minimisant les coupures. L'ensemble des données a subi un léger lissage.

IMAGE BATHYMETRIQUE

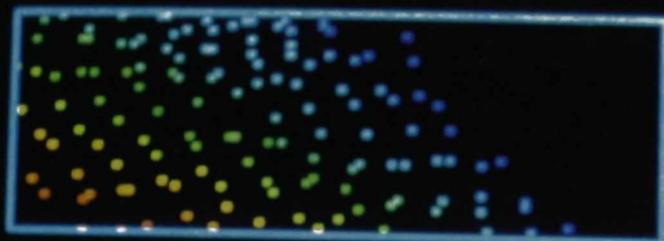
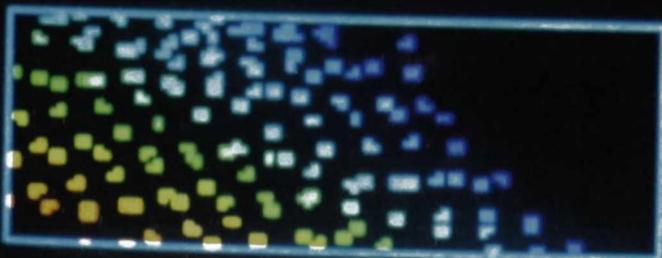


IMAGE
MINIMUM

REGION:
NORD DE L'ILE DU
HAVRE ST-PIERRE



MOYENNE
PONDEREE



SURFACE
POLYNOMIALE



DIFFERENCE
FINIE

LEGENDE

Profondeur
(metres)

Blue	1-2
Light Blue	3-4
White	5-6
Light Green	7-8
Green	9-10
Yellow-Green	11-12
Yellow	13-14
Orange	15-16
Red-Orange	17-18
Red	19-20
Purple	21-22
Dark Purple	23-24
Black	25-26
Black	27-28
Black	29-30

Figure 46 - Modèles bathymétriques des données Larsen

Résolution: 5m x 5m

Un dernier outil a été utilisé pour comparer les divers MNTs. Il s'agit de la formation d'images contenant la différence de profondeur pour chaque cellule entre un MNT et le fichier numérique fourni par le SHC. La figure 47 montre la distribution et la valeur des différences entre le fichier numérique du SMITH et l'image minimum (1^{ère} image) et la moyenne pondérée (2^e image). On remarque que l'image obtenue par les profondeurs minimums a de moins grandes différences que pour la moyenne pondérée. La majorité des différences se situe entre 1 et 4 mètres pour les images minimums. Pour l'image de la moyenne pondérée, la plupart des différences se situent entre 10 et 14 mètres.

La figure 48 montre les différences retrouvées sur les images LARSEN et le fichier numérique. Encore ici, l'image minimum a donné de plus petites différences (entre 1 et 4 mètres) que la moyenne pondérée (entre 10 et 50 mètres). Ces images de différences ne viennent qu'appuyer la conclusion voulant que les images minimums donnent de meilleurs résultats que les autres MNTs.

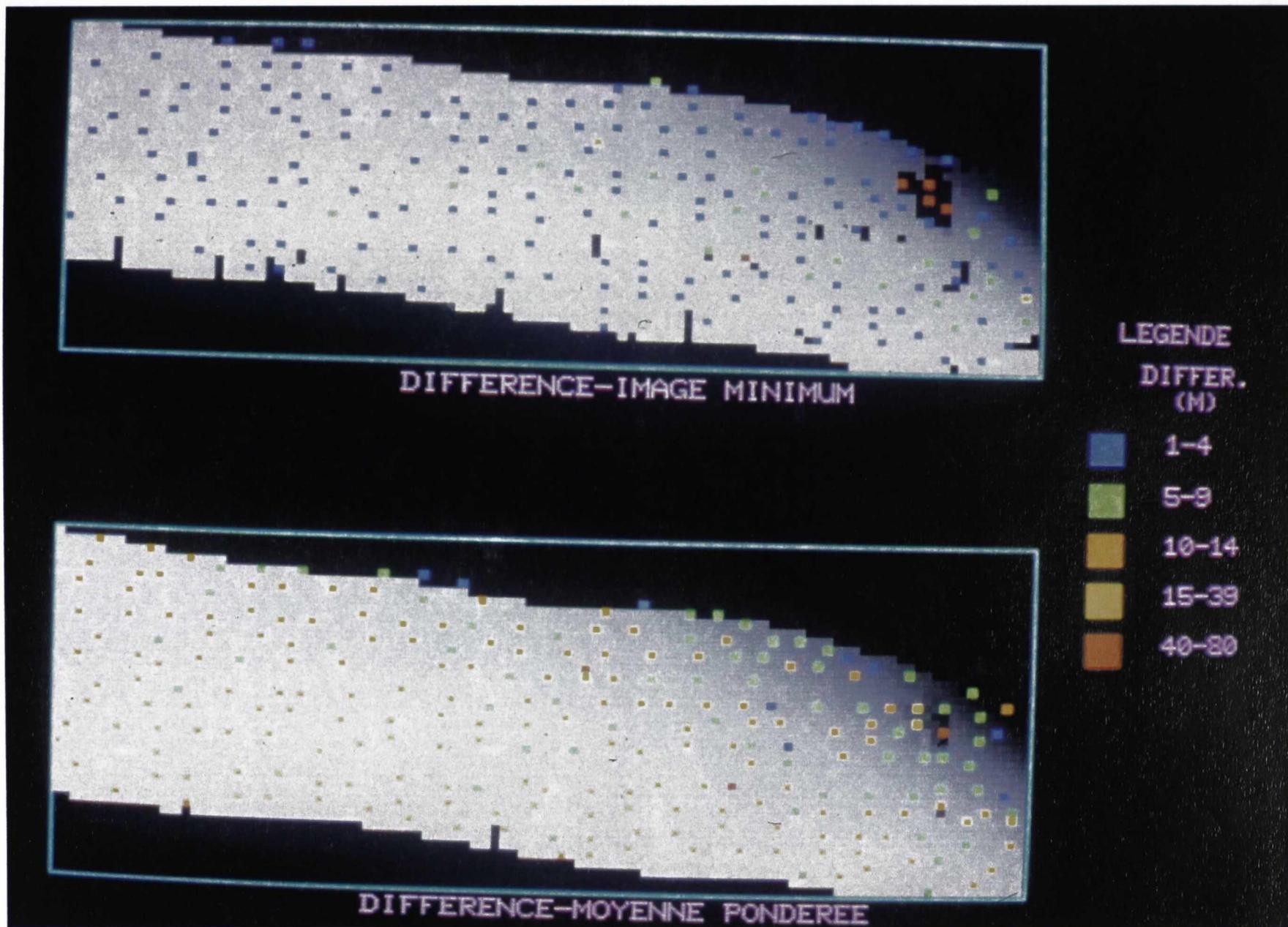
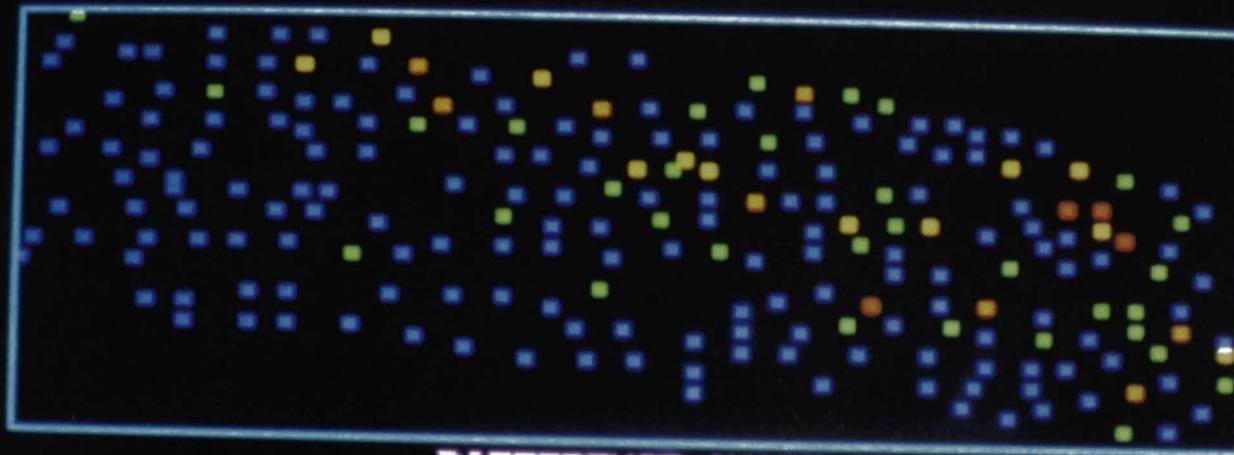
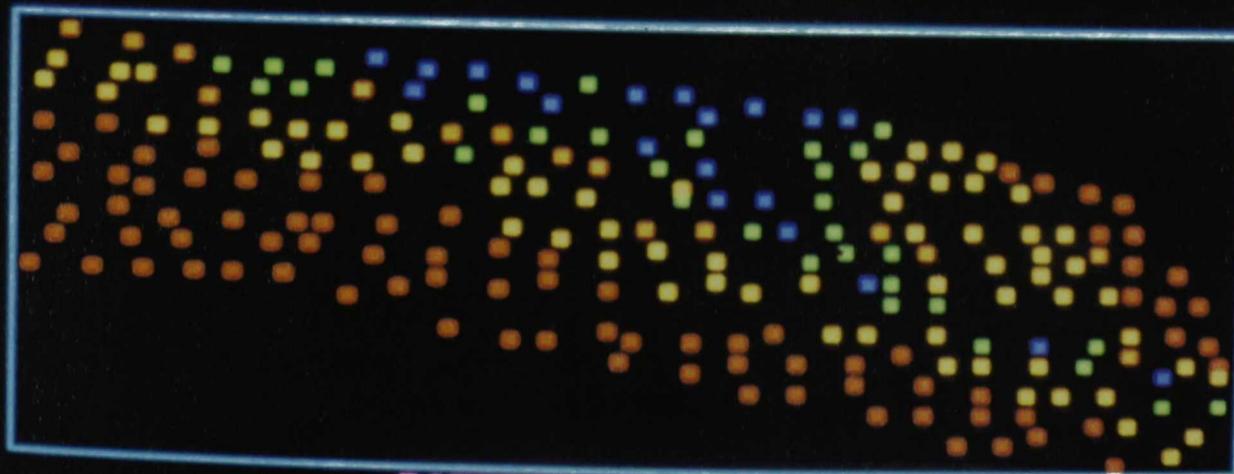


Figure 47 - Images de différences des INTs des données Smith Résolution: 5mx5m

DONNEES LARSEN



DIFFERENCE-IMAGE MINIMUM



DIFFERENCE-MOYENNE PONDEREE

Figure 48 - Images de différences des INTs des données Larsen Résolution: 5mx5m

La table 8 permet une analyse comparative des divers MNTs employés. L'auteure a consigné une note sur 5 permettant d'estimer la performance des MNTs. La cote 1 désigne un rendement nul. A l'opposé, la cote 5 indique une excellente performance. Naturellement, un modèle qui est approprié pour une certaine mission ne peut, en même temps, être le meilleur pour tous les besoins.

Table 8 - Appréciation de la performance des MNTs en hydrographie

	Image minimum	Moyenne arithmétique	Moyenne pondérée	Surface polynômiale	Différence finie
Vitesse de modelisation	5	5	2	2	4
Flexibilité (précision et exactitude)	4	4	2	2	3
Puissance de lissage	1	1	3	3	5
Sensibilité au choix des paramètres	2	2	5	5	2
Possibilité d'extrapolation	1	1	2	3	4

4.2.3 Optimisation de la largeur de la cellule

Il a été question jusqu'à présent de l'erreur d'interpolation pour différentes largeurs de cellule. Le problème de la détermination de la largeur de la cellule a très peu été abordé. La tendance générale veut que la largeur de la cellule soit établie suivant l'échelle graphique de la carte finale [Claussen and Kruse, 1988; Kielland and Hally, 1989; Midthassel et al., 1988]. La largeur de la cellule est fixée à 1 millimètre à l'échelle de la carte. Par exemple, à l'échelle 1 : 5000, la cellule est de 5 mètres.

Cet intervalle est néanmoins dépendant de l'homogénéité de la région, du patron de sondage et de la densité des points. Il pourrait donc être intéressant de vérifier l'établissement d'un critère pour déterminer la résolution (largeur de la cellule) optimale en fonction de la topographie marine. Leberl (1973) a proposé une méthode qui tend à réunir les caractéristiques du terrain et la précision recherchée à la densité de l'échantillonnage. Cette méthode est basée sur la relation existant entre la grosseur de la cellule, l'écart-type normalisé et la précision d'un modèle numérique de terrain.

La région à l'étude a tout d'abord été divisée en sous-région dépendamment du type de terrain. Trois types de terrain

ont été identifiés:

- 1 - Plat : 0 % à 4 %
- 2 - Ondulé : 4 % à 8 %
- 3 - Montagneux : + 8 %

La figure 49 montre la régression linéaire entre l'erreur d'interpolation (e) du MNT et la largeur de la cellule.

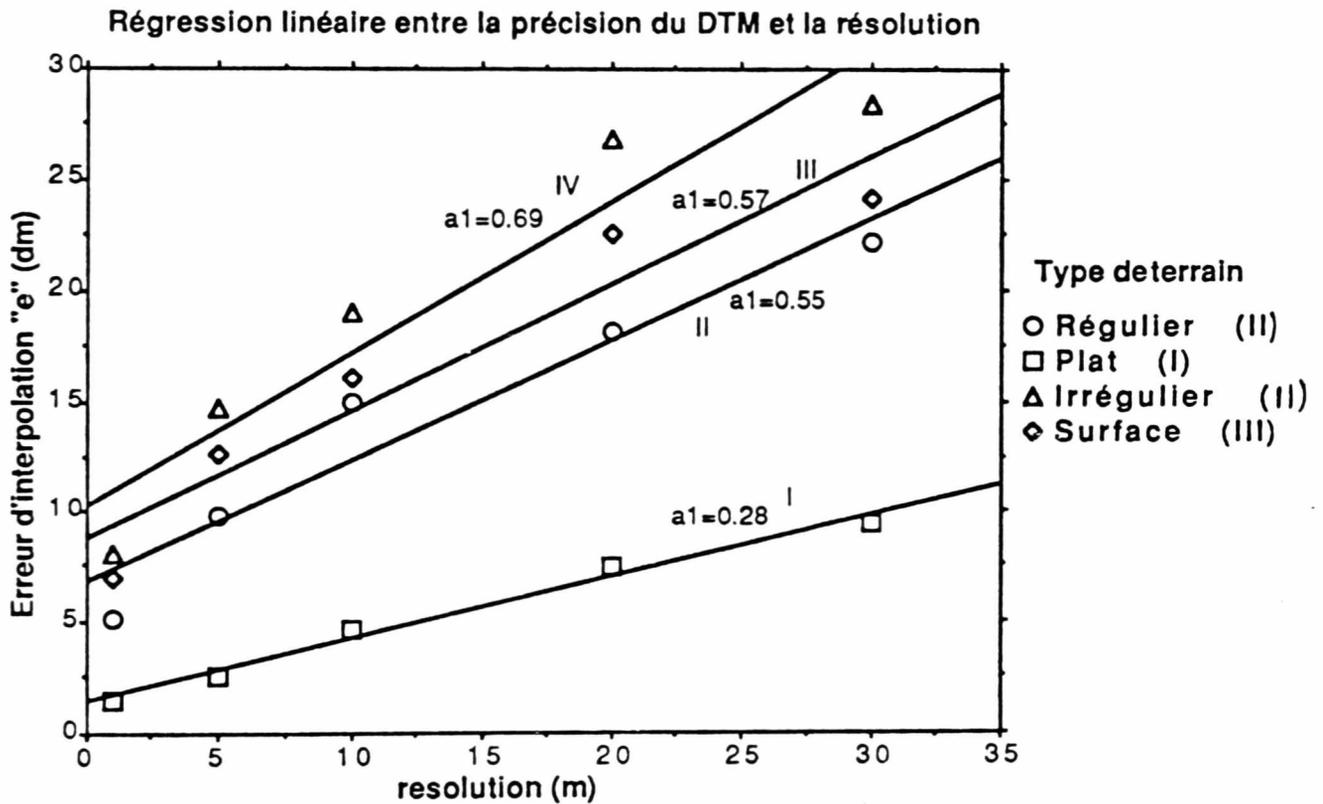


Figure 49 - Régression linéaire entre l'erreur d'interpolation d'un MNT et la largeur de la cellule pour différents types de terrain

Ce graphique révèle la présence d'une relation linéaire entre la précision du MNT et la résolution.

Erreur d'interpolation (e) = $a_0 + a_1 \times$ largeur de la cellule

La corrélation des points situés sur la droite est très élevée, se situant aux environs de 98 %. La pente de ces droites donne l'impression d'être liée au type de terrain. En terrain montagneux, la pente de la droite est plus prononcée, tandis qu'en terrain plat, la pente de la droite est plus basse.

Suite à l'analyse des données, nous avons pu déceler une corrélation très élevée (98 %) entre le coefficient a_0 (pente de la régression linéaire entre "e" et la résolution) et l'écart-type normalisé (σ_n). L'écart-type normalisé correspond au quotient de l'écart-type de la zone (σ_f) et la racine carrée de la superficie (S^2).

$$\sigma_n = \sigma_f / S$$

La figure 50 illustre la corrélation entre l'écart-type normalisé et le coefficient a_1 .

**Comparaison entre l'écart-type et le
coefficient a1 de la régression**

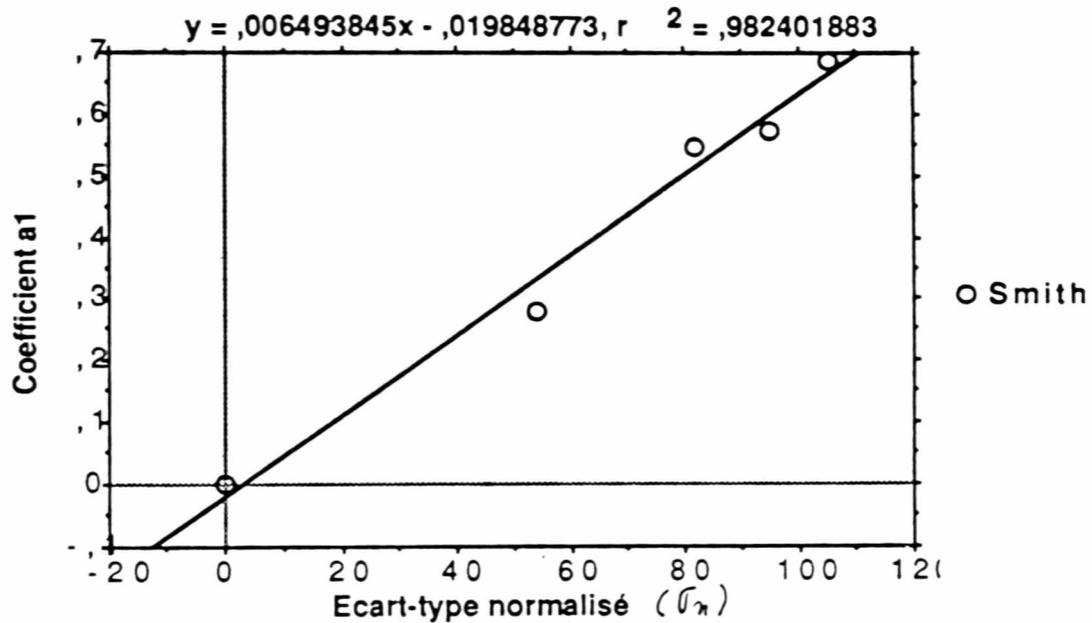


Figure 50 - Relation entre l'écart-type normalisé et le coefficient a1 de la régression linéaire entre l'erreur d'interpolation et la résolution

Notons que pour les besoin de l'affichage, l'axe des x (soit l'écart-type normalisé) à été multiplié par 10000.

La relation mathématique suivante entre σ_n et a_1 a été déduite:

$$a_1 = 0,0065 \sigma_n \quad (4.3)$$

Il est évident que cette relation ne peut servir que d'indicateur. Elle n'est valable, pour l'instant, que pour des valeurs de σ_n situées entre 0.00054 et 0.00106 et des largeurs de cellule situées entre 5 et 30 mètres.

Il serait donc possible, en connaissant l'écart-type normalisé et la précision désirée, d'établir la largeur de la cellule la plus convenable. D'autres relations présentées par Leberl (1973) et Ghazalli (1974) ont été expérimentées par l'auteur. Cependant, aucune d'entre elles n'a donné de résultats concluants.

4.3 FILTRES

L'utilisation de filtres avec les images bathymétriques visait principalement deux objectifs. Premièrement, les filtres ont été testés dans le but d'améliorer la précision des images formées par les profondeurs minimums. Les tests ont seulement été effectués sur les images SMITH. La table 9 nous montre la performance des filtres médian, moyen, mode et Laplacien pour des fenêtres de 3 par 3 et 5 par 5.

Table 9 - Statistiques de base et erreurs d'interpolation
des MNTs filtrés

Largeur de la fenêtre	Type de filtre	Moyenne (dm)	Ecart-type (cm)	Erreur d'interpolation (dm) "e"
3 x 3	Médian	173.60	52.3	9.27
	Mode	173.64	53.2	11.87
	Moyen	157.95	61.0	30.13
	Laplacien			79.69
5 x 5	Médian	173.25	53.1	8.89
	Mode	173.12	53.1	15.64
	Moyen	146.55	66.3	40.10
	Laplacien			81.36

La figure 51 présente l'erreur d'interpolation de ces fichiers en fonction de la largeur de la fenêtre.

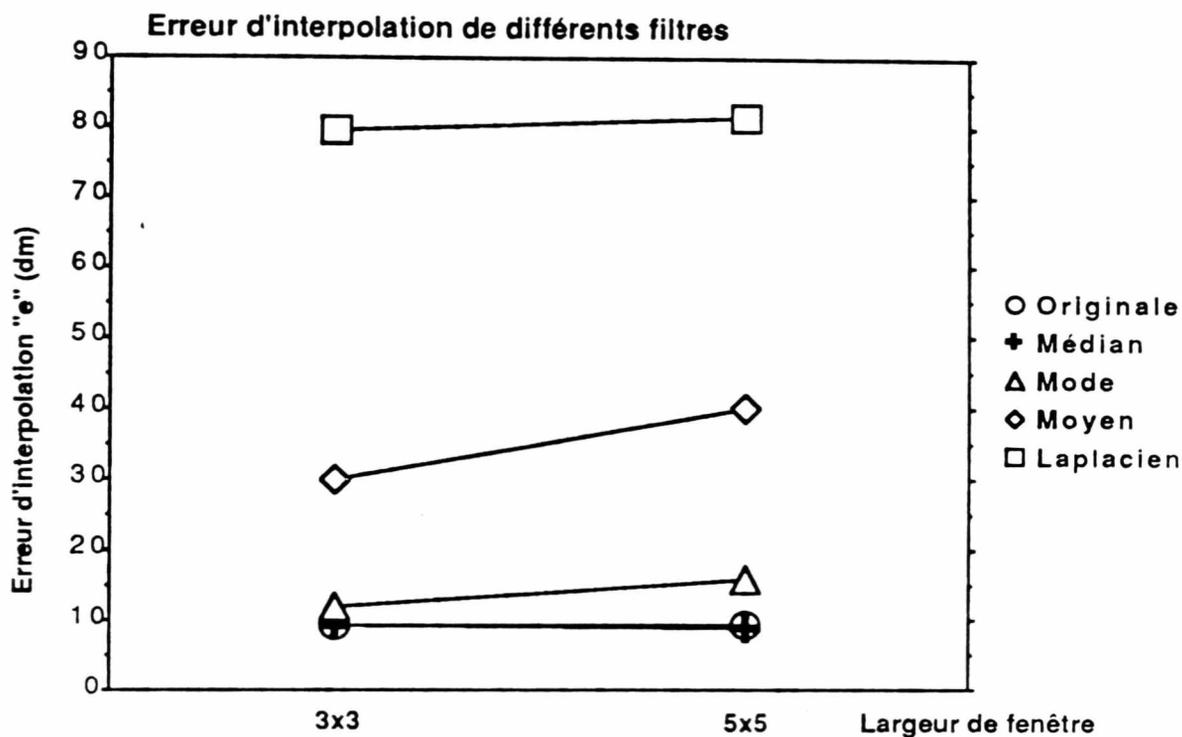


Figure 51 - Erreur d'interpolation des filtres pour différentes largeurs de fenêtre

Aucun des filtres n'a amélioré la précision de l'image originale. Ces résultats sont effectivement en concordance avec ceux obtenus par Leberl (1973). Le filtre médian est celui qui a conservé la meilleure erreur d'interpolation. Le filtre laplacien a, quant à lui, considérablement augmenté l'erreur d'interpolation. Cette augmentation est cependant normale étant donné que le filtre laplacien (filtre passe-haut)

tend à éliminer les basses fréquences tout en rehaussant les lignes de contours et les régions ayant une grande variance.

Le deuxième objectifs de cette étude consistait à déterminer l'apport des filtres pour la visualisation des images bathymétriques. La figure 52 regroupe les différentes images obtenues après l'application de filtres.

IMAGE BATHYMETRIQUE

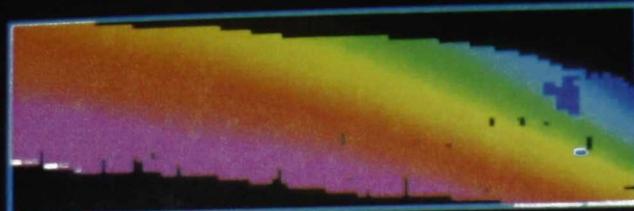
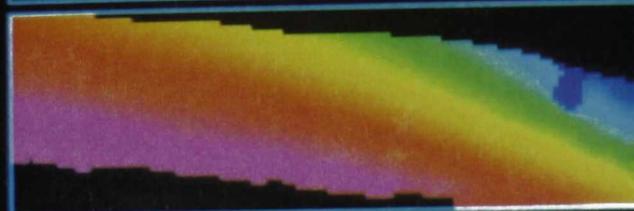


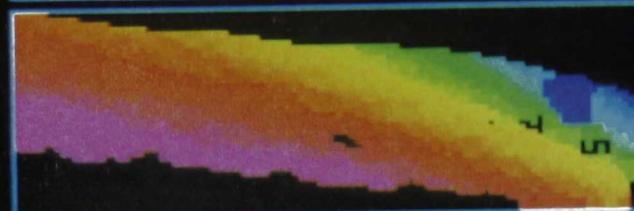
IMAGE
ORIGINALE

REGION:

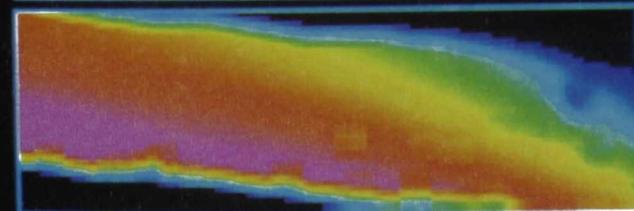
NORD DE L'ILE DU
HAVRE ST-PIERRE



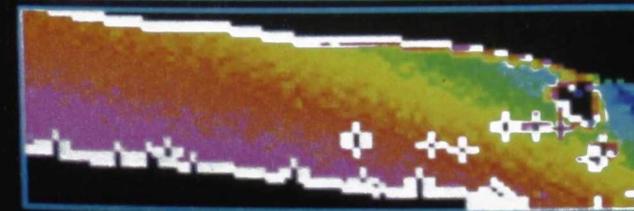
MEDIAN



MODE



MOYEN



LAPLACIEN

LEGENDE

Profondeur
(metres)

■	1-2
■	3-4
■	5-6
■	7-8
■	9-10
■	11-12
■	13-14
■	15-16
■	17-18
■	19-20
■	21-22
■	23-24
■	25-26
■	27-28
■	29-30

Figure 52 - Images bathymétriques après filtrage Résolution: 5mx5m

Le *filtre médian* a éliminé les trous de données de l'image originale. Il provoque un adoucissement des contours. Il améliore légèrement l'interpolation en éliminant les valeurs extrêmes de l'imagerie. Ce filtre médian homogénise les grands ensembles en atténuant les petits détails fins. Le *filtre mode* tend à élargir les zones exemptes de points (taches ponctuelles). Il augmente l'incertitude pour la délimitation des changements de couleurs (zone de coupures). Le *filtre moyen* a grandement atténué les contours. Il amène beaucoup d'incertitude. Il diminue considérablement le contraste et donne une image plus floue. Le *filtre Laplacien*, quant à lui, a mis en évidence les trous de données. Celui-ci peut s'avérer très utile pour accentuer les zones ne possédant pas suffisamment de points.

Dans l'ensemble, le filtre médian s'avère le plus utile pour faciliter l'interprétation de l'image tout en conservant l'erreur d'interpolation sensiblement intacte.

CHAPITRE V

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Le premier objectif du travail effectué était d'établir une méthode de travail permettant de réduire le nombre de profondeurs originales sans sacrifier l'intégrité des sondages. Cette réduction devait s'accomplir de façon automatique en réduisant l'intervention de l'hydrographe, tout en validant l'information de profondeur. Cette étude a démontré que la compression sélective est un instrument pratique, capable de réaliser l'opération de réduction. Celle-ci est alors basée sur des mesures bien définies et objectives aidant à éliminer l'élément subjectif apporté par le jugement de l'hydrographe. L'élimination des profondeurs surabondantes peut être intensifiée ou diminuée en variant la valeur de K , suivant l'application visée. La compression sélective a conservé l'erreur d'interpolation initiale des images SMITH à l'intérieur des précisions requises en hydrographie. La compression sélective est une technique locale qui a l'avantage de conserver un plus grand nombre de points en terrain accidenté et moins en terrain plat.

Pour que la sélection des sondages soit simple et facile à utiliser et à comprendre par l'hydrographe, celle-ci doit être effectuée sur un ensemble de points exempts d'erreurs. Pour ce faire, on devra, avant tout processus de sélection (compression sélective), vérifier et nettoyer les données

enregistrées. L'analyse des résultats a permis de constater que le seuil d'acceptation ($K \sqrt{\quad}$) s'avère être un outil très approprié pour éliminer les erreurs grossières. L'ensemble de données ainsi réduit par le seuil d'acceptation peut servir à la fois aux cartographes, aux hydrographes et aux géologues. En effet, le cartographe comme l'hydrographe pourra se concentrer sur les limitations graphiques de la carte (utilisant la compression sélective) et les géologues, sur les anomalies naturelles des profondeurs.

Enfin, la combinaison du seuil d'acceptation et de la compression sélective a permis de réduire l'espace d'archivage et a augmenté la vitesse de traitement, tout en conservant la précision originale des données.

Le deuxième objectif du travail visait à mettre en évidence l'utilisation des modèles numériques de terrain (MNTs) en hydrographie. La précision d'un MNT est gouvernée, en partie, par la grosseur de la cellule et l'interpolation mais, surtout par la densité de sondages et par le patron d'échantillonnage. La poursuite de ce deuxième objectif a conduit à la comparaison de différentes méthodes d'interpolation pour diverses largeurs de cellule. Les résultats obtenus indiquent que les images construites à partir de la moyenne arithmétique des profondeurs

conservent la meilleure erreur d'interpolation. Rappelons que ces images sont basées sur une interpolation linéaire simple, d'où se dégage la conclusion que la méthode d'interpolation la plus simple devrait être employée pour le traitement des données SMITH. Les images minimum avec un seuil d'acceptation ont également fourni de très bons résultats. L'interpolation pour les données SMITH s'est donc avérée inutile. Par contre, les techniques d'interpolation ont eu une plus grande influence sur les données LARSEN. L'interpolation par la différence finie donne l'impression de produire les meilleurs résultats. L'étude semble indiquer que la précision de l'interpolation est gouvernée, en partie par la résolution de la cellule mais encore d'avantage par la résolution du levé (densité et uniformité de l'échantillonnage).

L'étape suivante était d'établir un critère pour déterminer la résolution optimale en fonction de l'homogénéité du fond marin. L'utilisation de l'écart-type normalisé des profondeurs semble être un bon indicateur de la relation "grosseur de la cellule - précision MNT". Une relation a pu être établie entre la grosseur de la cellule, l'écart-type normalisé et la précision d'un MNT. Il aurait cependant été intéressant de pousser plus loin l'analyse des relations existant entre ces divers paramètres.

Une autre portion du travail se concentrait sur l'utilisation de nouveaux produits pour faciliter les opérations de visualisation et d'interprétation de l'hydrographe. Le système de maillage ou carroyage a grandement facilité la manipulation des données tout en conservant les informations statistiques nécessaires pour une analyse subséquente. Les images couleurs ainsi obtenues sont plus appropriées pour l'interprétation visuelle et peuvent être rehaussées en utilisant des méthodes standard de traitements d'images numériques. Plusieurs autres produits peuvent être dérivés des MNTs. Les vues en 3 dimensions n'ont pas été utilisées dans le présent travail, cependant, la troisième dimension pourrait apporter un élément utile pour la navigation. Rappelons que les MNTs deviendront la base pour la construction des cartes électroniques. Les MNTs, appuyés d'une base de données, sont également d'excellents outils pour intégrer différentes sources d'informations telles que:

- marées et courants,
- position de bouées,
- texture du fond marin,
- pente et direction de pente,
- lignes de côte.

Dans la présente étude, les MNTs se sont avérés des outils plus appropriés pour la visualisation que pour l'analyse. Les filtres n'ont pas amélioré la précision des images. Le seul point positif du filtrage s'est effectué au niveau de la visualisation.

En terminant, il peut être mentionner que l'opportunité d'utiliser un système d'analyse numérique d'images a facilité les opérations de visualisation. Cependant, la possibilité d'utiliser 3 palettes de couleurs de 256 niveaux de gris n'a pas été exploitée au maximum. Pour rendre l'interprétation facile à l'hydrographe, l'appareil doit être limité à moins de couleurs. En hydrographie, un appareil de visualisation rudimentaire, utilisant une simple carte VGA, serait suffisant pour les présents besoins. Les autres fonctions disponibles sur PCI ont aidé à la manipulation sans pour autant être nécessaires. Le système d'information géographique PAMAP n'a, quant à lui, pas suffisamment de couleurs d'affichage. PAMAP s'est avéré à la base un outil pratique pour l'analyse mais très tortueux dans ses approches avec l'utilisateur.

La recherche effectuée pour ce travail a permis d'atteindre en grande partie les objectifs initiaux déterminés par les besoins des hydrographes.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Allam, M.M. (1978) DTM Application in Topographic Mapping, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol.44, no. 12, December. pp. 1513-1520.
- Applied Optics, volume 25, no.13, 1 July (1986) Recueil de sept exposés relatifs au programme de recherche et développement de l'Australie en matière d'hydrographie par laser.
- Asada, A. (1988) Contour Processing and 3D Image Processing of Sea Beam Bathymetric Data, International Hydrographic Review, Monaco, LXV(1), January. pp.65-80.
- Ayeni. O.O. (1982) Optimum Sampling for Digital Terrain Models: A Trend Towards Automation, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol.48, no. 11, November. pp. 1687-1694.
- Banic, J., S. Sizgoric and R. O'Neil (1986) Scanning Lidar Bathymeter for Water Depth Measurement, SPIE, vol.663, Laser Radar Technology and Applications. pp.187-195.
- Bell, R.D., R. E. Chapeskie, W.S. Crowther, K.R. Holman, D.M. Jackson and S.R. Oroas (1989) Nautical Chart Production Using Digital Data and Interactive Compilation, Lighthouse: Edition 40, Fall. pp.25-29.
- Bodie, J.G. (1984) The Bottom Line - DMA Hydrographic Research And Development For the 80's, HYDRO '84, National Ocean For Service Hydrographic Conference. pp.168-176
- Botman, A.G. and K. Kubik (1979) On the theoretical Accuracy of the Moving Average Method for Surface Estimation, ITC Journal, no.1. pp. 68-84.

- Bourgoin, J. (1981) Détection d'anomalies de profondeur, 16e Congrès de la Fédération Internationale des Géomètres (FIG), Suisse, Août, Rapport du groupe de travail 415. 251 pages.
- Bourquin, L.B. and M.F. Van Norden (1980) The Hydrographic Airborne Laser Sounder: A Planning And Operational Scenario(II), NAVOCEANO, Hydrographic Division, July.
- Burke, R.G., S. Forbes, K. White (1988) Le traitement des importants fichiers résultant des levés surfaciques en eau peu profonde et assurant la couverture du fond à 100%, International Hydrographic Review, july. pp. 82-96.
- Burrough, P.A., M.J. de Heus and E.G. Kloostermann (1985) Complementary Use of Thermal Imagery and Spatial Analysis of Soil Properties and Wheat Yields to Reveal Cyclic Patterns in the Polders, Journal Soil Science, vol. 36. pp. 141-151.
- Burrough, P.A. (1986) Principles of Geographic Information Systems for Land Resources Assessment, Clarendon Press Oxford.
- Burrows, K.G. (1988) Information Management in the Modern Hydrographic Office, International Hydrographic Review, Monaco, LXV(1), January. pp.93-105.
- Casey, M.J. (1984) Deploying the Lidar on Hydrographic Surveys, Poceedings of the Ninth Canadian Symposium on Remote Sensing, St-John's, Newfoundland, August 1984. pp.165-175.
- Casey, M.J. R.A. O'Neil, P. Conrad (1985) The Advent of LARSEN, Proceedings of the 1 st Biennial Canadian Hydrographic Conference, Dartmouth, N.S.
- Casey, M.J. and D. Monahan (1986) Contours and Contouring in Hydrography Part II- Interpolation, International Hydrographic Review, Monaco, LXV(1), January. pp.37-54.

- Casey, M.J. and J. Vosburgh (1987) Airborne Hydrographic Surveying in the Canadian Arctic, International Hydrographic Review, Monaco, LXIV (1), January. pp.111-121.
- Casey, M.J, (1987) Acoustic Sweeping And Laser Sounding (LARSEN 500), Colloque: L'hydrographie - Dimension essentielle aux sciences de la mer, Rimouski.
- Castleman, K.R. (1979) Digital Image Processing, Prentice-Hall. 429 pages.
- Chapman, M.A. (1987) Digital Elevation Modelling, Lecture Notes in Digital Mapping and Land Information, Edited by J.A.R.Blais. pp. 40-58.
- Chiles, J.P. and P. Chauvet (1975) Kriging: A Method for Cartography of the Sea Floor, International Hydrographic Review, Monaco, LXV(1). pp.25-41.
- Chorowicz, J. et al., (1989) Utilisation des modèles numériques de terrain pour la reconnaissance automatique de certaines formes en géologie-géomorphologique, Société française de photogrammétrie et de télédétection, Bulletin no.115. pp.5-7.
- Claussen, H. (1987) The Representation Of The Sea Bottom in Deep Sea Areas By The DTM Program TASH, Nachrichten aus dem Kartem-und Vermessungswesen, Series II, nr. 46. pp.183-191.
- Claussen, H. and I. Kruse (1988) Application of the DTMs-Program TASH for Bathymetric Mapping, International Hydrographic Review, Monaco, LXV(2). pp. 117-125.
- Cloet, R.L., S.L. Hurst, C.R. Edwards, P.S. Phillips, A.J. Duncan (1982) A Sideway Looking-Tower Depth Measuring System, J.R.Inst. Of Navigation, vol. 35. pp.411-420

Cloet, R.L. and C.R. Edwards (1986) The Bathymetric Swathe Sounding System, The Hydrographic Journal, April, no.40. pp.9-17.

Compton, J.S. et M.A. Hudson (1988) Nouvelle technologie dans le domaine de la cartographie en Australie: Le sondeur bathymétrique laser aéroporté, Revue Hydrographique Internationale, Monaco, LXV (2), Juillet 1988. pp.153-167.

Crain, K. (1970) Computer Interpolation and Contouring of Two-Dimensional Data: A review, Geoexploration, 8. pp.71-86.

Dagnelie, P. (1977) Analyse statistique à plusieurs variables, Les presses Agronomiques de Gembloux. 362 pages.

DeMoustier, C. (1988) State of the Art in Swath Bathymetry Survey Systems, International Hydrographic Review, Monaco, LXV (2), July. pp.25-54.

Doak, E.L. et al. (1979) Remote Bathymetry by Landsat in the Chagos Archipelago, ERIM Report, April 1979.

Doyle, F.J. (1978) Digital terrain models: An overview, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol.44, no. 12, December. pp. 1484-1485.

Druke, S.A. and A.S.D. Walker (1987) Display and Enhancement of Gridded Aeromagnetic Data of the Solway Basin, International Journal of Remote Sensing, vol.8, no.10. pp.1433-1444.

Engelmann, I. (1967) Towed Echosonders for Parallel Sounding, International Hydrographic Review, vol.44, no. 2. pp. 7-10.

- Farentholz, S. (1963) Profile and Area Echoograph for Surveying and Location of Obstacle in Waterways, International Hydrographic Review, vol. 40, no. 1. pp.23-37.
- Frederiksen, P. (1981) Terrain Analysis and Accuracy Prediction by Means of the Fourier Transformation, Photogrammetria, vol.36. pp. 145-157.
- Gagnon, P.A. Notes de cours d'hydrographie, 1988 Faculté de foresterie et de géomatique. U. Laval. 198 pages.
- Ghazalli, S.A. (1974) Numerical Investigation of Progressive Sampling for Digital Terrain Models, ITC Journal. pp. 655-681.
- Gluch, T., J. Piwowar, S.M. Till and R.A. O'Neil (1983) The Bathymetric Estimator Search Technique for Processing Lidar Data, Proceedings of the Eighth Canadian Symposium on Remote Sensing. pp.111-117.
- Gratton, D.J. and P.J. Howarth (1989) Integration of Digital Elevation Model Parameters with Landsat and Spot Imagery for Mapping Mountain Glaciers: Building a Glaceological Information System, Int. Geoscience and Remote Sensing Symposium- IGARSS '89. pp.60-62.
- Greenberg, A.R. (1987) Statistical Filtering of Bathymetric Data, Technical Papers, ASPRS-ACSM Fall Convention, Reno Nevada, Oct. pp. 4-9.
- Grieve, G.R. and R. Simard (1984) Digital Elevation Modeling: Process Towards Automatic Procedures with Landsat MSS Geocoded Data, Proceeding of the Canadian Symposium on Remote Sensing, 9th. pp.461-469.
- Grim, P.J. (1988) The COP Algorithm for Selecting Soundings Within a PUA, Draft Report NOAA. Rockville, Md.. 10 pages.

- Guenther, G.C., and R.W.L. Thomas (1981a) Error Analysis of Pulse Location Estimates for Simulated Bathymetric Lidar Returns, Proceedings of the Fourth Laser Hydrography Symposium, Salisbury, South Australia, September-October 1980, (Department of Defence Special Document ERL-0193-SD).pp.362-395.
- Guenther, G.C., and R.W.L. Thomas (1981b). Depth Measurement Biases for Airborne Laser Bathymeter, Proceedings of the Fourth Laser Hydrography Symposium, Salisbury, South Australia, September-October 1980, (Department of Defence Special Document ERL-0193-SD). pp.428-452.
- Guenther, G.C. and J.E. Green (1982) Improved Depth Selection in the Bathymetric Swath Survey System (BS3) Combined Offline Processing (COP) Program, National Oceanic and Atmospheric Administration Technical Report OTES-10. U.S. Department of Commerce, Rockville, Md.
- Guenther, G.C. and R.W.L., Thomas (1984) Effects of Propagation-induced Pulse Stretching in Airborne Laser Hydrography, Proceedings of the Seventh SPIE Conference on Ocean Optics Monterey, California, June 1984, 3. pp.287-296.
- Habert, I.P.A. (1982) Bathymétrie: le levé régulier, Service hydrographique et océanographique de la marine, France. Manuel d'hydrographie fascicule 5. 73 pages.
- Hally, P. (1987) Mesure de la profondeur, Colloque. L'hydrographie dimension essentielle aux sciences de la mer. Rimouski.
- Hassan, M.M. (1986) A Digital Filtering Method, ASPRS-ACSM Fall Convention, Technical Papers. pp.232-238.
- Herliky,R., S.P. Matula, C. Andreasen (1988) Gestion des données de sondage surfacique par la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Revue Hydrographique Internationale, Monaco, LXV (2), Juillet. pp. 59-80.

- Hickman, G.D. and J.E. Hogg (1969). Application of an Airborne Pulsed Laser for Near Shore Bathymetric Measurements, Remote Sensing Environ.,1. pp.47-58.
- Journault, M. (1987) La cartographie marine, Colloque. L'hydrographie dimension essentielle aux sciences de la mer. Rimouski.
- Kerr, J., A.L. Adams and R. Burke (1987) CSS "FCG SMITH" Hydrographic Acoustic Sweep Vessel, International Hydrographic Review, LXV (2), July. pp.7-14.
- Kielland, P. and P.Hally (1989) Canadian Preparations for the Swath Sounding ERA, Lighthouse. Edition 39, Spring. pp.25-33.
- Kolough, D. (1984) Interferometric Side-Scan Sonar, a Topographic Sea-Floor Mapping System, International Hydrographic Review, vol. 61 (2). pp.35-49.
- Korbijn, W., J.K.E. Crince (1987) New Hydrographic Data Acquisition and Processing System for the Royal Netherlands Navy, International Hydrographic Review, Monaco, LXIV (1), January. pp.59-70.
- Kubik, K. and A.G. Botman (1976). Interpolation Accuracy for Topographic and Geological Surface, ITC Journal, no.1. pp. 236-273.
- Lambert, R. (1988) Le système de traitement de données hydrographiques de terrain du Service Hydrographique du Canada, région du Québec, Janvier 1988. 19 pages.
- Leberl, F. (1973). Interpolation in Square Grid DTM, ITC Journal, no.5. pp. 756-807.
- Leberl, F. (1975). Photogrammetric Interpolation, ITC Journal, no.2. pp. 205-229.

- Lepage, R. and P.N. Holraya (1989) Adventures in Interactive Compilation, international Hydrographic review, vol. LXVI, no. 2. pp. 29-42.
- Mac Donald, D. and K. Czotter (1985). The Hydrographic Contouring System-Practical Experiences, Lighthouse, Edition no.31, May. pp. 20-24.
- Mac Donald, G. (1984) Computer - Assisted Sounding Selection Techniques, International Hydrographic Review, vol. LXI, no. 1. pp. 93-109.
- Maillet, H. (1984). Le laser: Principes et techniques d'application, Lavoisier tec & Doc. 550 pages.
- Makarovic, B. (1973). Progressive Sampling for Digital Terrain Models, ITC Journal, no.3. pp. 397-416.
- Makarovic, B. (1975) Amended Strategy for Progressive Sampling, ITC Journal, vol. 1. pp. 117-128.
- Makarovic, B. (1976). A Digital Terrain Model System, ITC Journal, no.1. pp.57-83.
- Makarovic, B. (1977)a Composite Sampling for DTMs, ITC Journal, no. 2. pp.406-433.
- Makarovic, B. (1977)b Regressive Rejection - A Digital Data Compression Techniques, Proceeding of the Fall Technical Meeting of ASP, little Rock, Arkansas, October. pp. 455-475.
- Makarovic, B. (1983). A Test on Compression of Digital Terrain Model Data, ITC Journal, no.2. pp.133-138.
- Mark, D.M. (1978) Concepts of Data Structure for Digital Terrain Models, Proceedings of the DTM Symposium American Society of Photogrammetry-American Congress on Survey and Mapping, St-Louis, Missouri. pp. 24-31.

- McCaffrey, E.K. (1981) A Review of the Bathymetric Swath Survey System, International Hydrographic Review, vol 58 (1). pp.19-27.
- Measures, R.M. (1984). Laser Remote Sensing Fundamentals and Applications, New-York, Wiley. 509 pages.
- Midthassel, A.E. Solvberg and F. Pohner (1988). Data Management of Swath Sounding Systems, International Hydrographic Review, Monaco, LXV(2), July. pp. 91-115.
- Miller, S.W. and A.L. Kok (1988). Selective Generalization of Depth Contours for Production of Nautical Charts, Technical Papers, ACSM-ASPRS, Annual convention, vol.2., St-Louis, Missouri, March 13-18. pp. 66-75.
- Monahan, D. and M.J. Casey (1985). Contours and Contouring in Hydrography Part I: The Fundamental Issues, International Hydrographic Review, Monaco, LXV(2), July. pp. 105-120.
- Muirhead, K. and A.P. Cracknell (1986). Review Article, Airborne Lidar Bathymetry, International Journal of Remote Sensing, vol.7, no.5. pp.597-614.
- Naylor, A.D. and W.H. Lafollette (1983) Report on DMA'S Prototype Graphics from Enhanced Landsat Imagery for Applications to Hydrographic charting, Centennial Conference of the Canadian Hydrographic Service, April. pp. 138-148.
- Perry, R.B. (1982) Scientific and Hydrographic Use of the Bathymetric Swath Survey System, Proc. MTS-IEEE, Oceans '82 Conference, Washington, D.C.. pp. 396-401.
- Phillips, D.M. (1981). Effect of Water Turbidity on Laser Depth Sounding Performance, Proceedings of the Fourth Laser Hydrography Symposium, Salisbury, South Australia, September-October 1980 (Department of Defence Special Document ERL-0193-sd). pp 336-346.

- Pohner, F. (1988) SIMRAD Subsea A/S: Processing of Multibeam Echo Sounder Data, Paper for U.S. Hydrographic Conference, April.
- Rice, J.R. (1970). General Purpose Curve Fitting, Approximation Theory, Edited by A. Talbot, Academic Press, London & New-York.
- Richard, J.A. (1986) Remote Sensing Digital Image Analysis an Introduction, 281 pages.
- Satyanarayana, P. and S. Prakash (1988). Computer Assisted Cartography in Nautical Charting-An Appraisal, International Hydrographic Review, Monaco, LXV(1). pp.115-128.
- Sallaway, P. (1981). A Review of Digital Terrain Modelling Applied to Hydrographic Charting Activities, Lighthouse, Edition no. 24, November. pp. 23-31.
- Schenke, H.W. (1989). Digital Terrain Models in Marine Cartography, Lighthouse, Edition no.40, Fall. pp.13-15.
- Schiro, R. and G. Williams (1984) An Adaptive Application of Multiquadratic Interpolants for Numerically Modelling Large Numbers of Irregularly Spaced Hydrographic Data, Surveying and Mapping, vol.44, no.4. pp.365-381.
- Schowengerdt, R.A. (1983) Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing, Academic Press. 249 pages.
- Schut, G. (1976) Review of Interpolation Methods for Digital Terrain Models, Archives of the International Society of Photogrammetry, 13th Congress, Helsinki, Finland, vol 21, part 3. Also published in Canadian Surveying, vol 30. pp. 389-412.

- Siegman, A.E. (1986) Lasers, University Science Books, Mill Valley, California, 1283 pages.
- Simard, R. and R. Slaney (1986) Digital Terrain Model and Image Integration for Geologic Interpretation, Thematic Conference, Proceeding of Remote Sensing for Exploration Geology, vol.1. pp.49-60.
- Stefanovic, P., M.M. Rodwan and K. Templi (1977) Digital Terrain Models: Data Acquisition, Processing and Applications, ITC Journal, no.1. pp. 61-76.
- Steinvall, O. and al. (1984) Advanced Technology for Hydrographic Mapping, FOA Report C 30371-E1, September Linköping (ISSN 0347-3708).
- Stenborg, E. (1987) The Swedish Parallel sounding Method - State of the art, International Hydrographic Review, vol. 64, no. 1. pp.7-14.
- Svanberg, B. (1980) Lasers as Probes for Air and Sea, Contemp. Phys. 21. 541 pages.
- Tempfli, K. (1980) Spectral Analysis of Terrain Relief for the Accuracy Estimation of DTMs, ITC Journal, no.3. pp. 478-510.
- Tempfli, K. (1986) Composite/Progressive Sampling - A Program Package for Computer Supported Collection of DTM Data, Technical Papers ACSM - ASPRS Annual Convention, vol. 4. pp. 202-209.
- Till, S.M. (1987) Airborne Electro-Optical Sensors for Ressource Management, Geocarto International, vol. 3. pp. 13-18.
- Varma, H. (1984) An Interactive Graphics Editor for Hydrography, Lighthouse Edition no.30, November. pp.20-26.

- Varma, H., H. Boudreau, M. McConnel, M. O'Brien and A. Piccott (1989) Probability of Detecting Errors in Dense Digital Bathymetric Data Sets by Using 3D Graphics Combined with Statistical Techniques, Lighthouse: Edition 40, Fall. pp. 31-36.
- Warren, J., L. Boone and P. Gubord (1990) A Digital Depth Model and Automated Contours, Lighthouse, edition 41, Spring, pp. 15-18.
- Wells, D.E., B. Nickerson and Y.C. Lee (1989) Error Detection and Correction in Processing Large Bathymetric Data Sets, Final Contract Report Prepared by the Department of Surveying Engineering, For Bedford Institute of Oceanography, Dartmouth, Nova Scotia.
- Zoraster, S. (1987) Honoring Discontinuities and Surface Feature During Grid Processing on Vector Computers, Cartographica, vol.24, no.4. pp.37-48.
- Zoraster, S. (1990) The Automatic Selection of Prime Soundings for Nautical Chart Compilation, Lighthouse, Edition 41, Spring. pp. 9-13.