

DIRECTIVES TECHNIQUES
POUR LA SURVEILLANCE
PHYSIQUE AUX LIEUX
D'IMMERSION EN MER

Environnement Canada
Programme d'immersion en mer

Novembre 1998

AVANT PROPOS ET REMERCIEMENTS

Le Canada est un pays maritime. Il possède le plus long littoral du monde entier et il a un intérêt vital dans la préservation d'un milieu marin sain. Même si, selon les normes mondiales, le milieu marin canadien est relativement non contaminé, les eaux territoriales du Canada connaissent certains problèmes, spécialement dans les ports, les estuaires et les zones littorales. L'évaluation des permis et les activités de surveillance de l'immersion en mer entreprises par Environnement Canada représentent quelques-unes des mesures mises en place au Canada dans le but de prévenir la pollution marine par l'immersion des déchets en mer. Ces activités donnent également aux utilisateurs l'assurance qu'on utilise des solutions de rechange pratiques, et préférables sur le plan de l'environnement, et qu'il y a encore des sites d'immersion appropriés.

Le Programme d'immersion en mer, et ses contrôles réglementaires, est en place depuis 1975. Entre 1975 et 1990, la surveillance des sites d'immersion s'est faite sur une base de recherche. En 1991, on a commencé les travaux et la consultation en vue de l'élaboration d'un programme national systématique pour surveiller les lieux d'immersion, parce qu'un besoin d'une évaluation à long terme de la conformité et des répercussions avait été identifié aux niveaux national et international. Le présent document est un résultat de ces efforts.

Les Directives techniques pour la surveillance physique aux lieux d'immersion en mer donnent des conseils aux gestionnaires et aux professionnels pour l'élaboration et la mise en oeuvre de projets de surveillance dans les sites d'immersion en mer qui reçoivent des matériaux de dragage et d'excavation. Parmi les sujets abordés compris :

- équipement de positionnement
- équipement d'échantillonnage
- techniques pour observer directement les lieux d'immersion et de définir leurs limites
- modèles de transport des sédiments pour les prédictions des effets en court-temps et long-temps.

Ces Directives techniques nationales ont été préparées dans le cadre d'un processus exhaustif d'examen et de consultation de scientifiques et d'experts du Canada et de l'étranger. Les auteurs remercient spécialement Jim Osborne, Linda Porebski et John Karau pour leurs conseils et leur appui. Les demandes de renseignements doivent être envoyées à :

Paul Topping
Division du milieu marin
Environnement Canada
351, boul. St-Joseph, Hull (Québec), K1A 0H3
Tél. : 819-953-0663, Fax : 819-953-0913,
Courriel : paul.topping@ec.gc.ca

Le présent document doit être cité comme suit :

Directives Techniques Pour La Surveillance Physique Aux Lieux d'Immersion En Mer. (1998)
Environnement Canada, Division du milieu marin. 51 p.

TABLE OF CONTENTS

INTRODUCTION.....	5
TECHNIQUES GÉO-PHYSIQUES	6
1. STRATÉGIES DES LEVÉS GÉOLOGIQUES ET POSITIONNEMENT	7
1.1 Définir Les Objectifs du Levé	7
1.2 Caractérisation du site	7
1.3 Positionnement.....	10
1.3.1 Positionnement du navire en surface.....	10
1.3.2 Positionnement subsuperficiel.....	11
1.3.3 Limites opérationnelles.....	12
2. VUE D'ENSEMBLE DES TECHNIQUES DE LEVÉ	14
2.1 Sondage bathymétrique	15
2.2 Systèmes de cartographie par balayage.....	16
2.3 Détermination du profil subsuperficiel du fond	16
2.4 Imagerie de sonar à balayage latéral.....	17
2.5 Cartographie par lignes-images.....	19
2.6 Campagnes d'échantillonnage	20
2.6.1 Échantillonnage ponctuel.....	21
2.6.2 Carottage.....	22
2.6.3 Échantillonnage par plongeur	23
2.7 Techniques de visualisation	23
2.7.1 Photographie du fond marin.....	24
2.7.2 Obtention de profils sédimentaires par photographie	24
2.7.3 Utilisation de caméras vidéo.....	24
2.7.4 Observations en plongée	26
2.8 Techniques de pointe	26
2.8.1 Levés magnétométriques	26
2.8.2 Levés de résistivité.....	26
2.8.3 Études de marquage	27
2.8.4 Systèmes de surveillance <i>in situ</i>	26
2.9 Équipement et expertise au Canada	26
MODÉLISATION DU TRANSPORT DES SÉDIMENTS.....	27
1. OUTIL DE CONCEPTION DE PROGRAMMES DE SURVEILLANCE	29
2. DÉPÔT INITIAL	31
2.1 Modèle de devenir à court terme STFATE : largage instantané	32
2.2 Modèle de devenir à court terme REJPAR : largage instantané	35
2.3 Le modèle de devenir à court terme SED_DISP : largage continu	36
3. MODÉLISATION DU TRANSPORT DES SÉDIMENTS APRÈS L'IMMERSION	39
3.1 SEDTRANS (sédiments non cohésifs).....	39
3.2 WAW.F (sédiments non cohésifs).....	40
3.3 WHACKER (sédiments non cohésifs).....	42
3.4 TRANSPOR (sédiments non cohésifs).....	43
3.5 Mike 21 STP (sédiments non cohésifs)	45
3.5 Module de transport de la vase MT de Mike 21 (sédiments cohésifs).....	47
3.7 CUMBSED (Sédiments cohésifs et non cohésifs combinés).....	49
3.8 TABS-MD (Sédiments cohésifs et non cohésifs combinés)	50
3.9 LTFATE (Sédiments cohésifs et non cohésifs combinés).....	51

4. DERNIÈRES REMARQUES	52
RÉFÉRENCES	53

INTRODUCTION

La gestion de l'immersion des déchets en mer comporte entre autres la surveillance des lieux d'immersion. Les données de surveillance servent à évaluer les décisions sur l'octroi de permis, à examiner la justesse des mesures de réglementation et à définir les actions correctrices qui s'imposent ou les autres études ou recherches à effectuer. Environnement Canada (1998) a publié des directives sur la surveillance des lieux d'immersion. Celles-ci établissent les éléments déclencheurs d'une telle surveillance, traitent de l'élaboration de plans de surveillance pour vérifier les hypothèses d'impact et précisent l'orientation des programmes de surveillance de base et les exigences relatives aux paliers de la surveillance.

Parmi les principaux déclencheurs de la surveillance, mentionnons l'immersion de déblais de dragage contenant des polluants dont la concentration excède l'état de traces ou la possibilité de répercussions sur des régions vulnérables (sur des ressources biologiques), de perte d'habitat ou de conflit avec d'autres utilisations du milieu marin. Au nombre des principaux paramètres de surveillance, mentionnons les caractéristiques sédimentaires et physiques fondamentales du site et de la matière qui y sera immergée, ainsi que des données sur les produits chimiques présents dans les sédiments. Pour assurer une surveillance échelonnée, il faut au moins établir des prévisions sur l'étendue initiale des matériaux d'immersion et, en cas de possibilité de remise en suspension et de transport, sur le lieu final de dépôt (en deçà de limites détectables). Ces renseignements permettent de définir les limites du site d'immersion et la surveillance du site sert à vérifier l'exactitude des prévisions. Des levés pourront être effectués à une seule reprise ou successivement, selon la nature du site et les objectifs de la surveillance. La plupart des activités d'immersion de déchets entraîneront des perturbations de l'habitat dont le degré sera lié à des modifications des caractéristiques des sédiments, comme l'épaisseur du dépôt de déblais, la différence de texture sédimentaire entre le milieu naturel et le dépôt et la superficie occupée par les déblais.

Pour planifier des programmes de surveillance répondant aux exigences de ces directives, il faut connaître les méthodes d'échantillonnage et de levé géologique ainsi que les modèles de prévision des caractéristiques de dépôt initial et de transport des sédiments. Le présent document d'orientation fournit des renseignements sur les méthodes de levé et les techniques de modélisation informatique appropriées à l'analyse et à la surveillance des lieux d'immersion.

Portée

Ce document examine deux grands domaines. Il traite en premier lieu des méthodes de levé géologique et d'échantillonnage des sédiments et décrit ensuite brièvement les modèles de devenir à court terme des sédiments d'immersion et les modèles de transport des sédiments qui pourront être utilisés après le dépôt des matériaux sur le fond marin. Dans les deux cas, il présente des renseignements permettant au lecteur de mettre au point des stratégies de mesure et de modélisation appropriées au site à l'étude. Les méthodes et le matériel dont il est question sont des technologies généralement reconnues et accessibles. Il est certain que les techniques de levé géophysique et l'utilisation de sondes spécialisées *in situ* ou de sondes sous-marines mouillées évoluent rapidement, mais, souvent ce matériel est généralement non disponible ou trop coûteux à utiliser.

De même, le domaine de la modélisation du transport des sédiments ne cesse de progresser et des nouvelles méthodes de calcul sont constamment proposées. Toutefois, ces nouvelles méthodes sont souvent peu documentées et ne sont pas à la portée des non-spécialistes, parce que les programmes informatiques de soutien sont trop limités ou parce que les données de terrain exigées sont trop difficiles à obtenir. Pour des raisons pratiques, les modèles examinés dans le présent document portent uniquement sur des programmes généralement disponibles ou assortis d'une aide technique et qui ont été bien étalonnés à l'aide de données.

Une note sur la terminologie : On utilise la terminologie de Percival and Lindsay (1997), pour la texture des sédiments. On utilise l'expression «eau peu profonde» pour les eaux de moins de 100 m de profondeur et généralement même de moins de 30 m de profondeur, et l'expression «eau profonde» lorsque l'eau a plus de 100 m et généralement même plus de 200 m de profondeur. Les autres termes géologiques sont résumés dans le glossaire.

Taille des sédiments Nomenclature (Percival and Lindsay, 1997)

Granulo. (mm)	Unité Ø	Tamis taille	Catégorie Wentworth	
4096	-12			
1024	-10	Utiliser	bloc	
256	-8	des tamis		
64	-6	en broche	gros caillou	GRAVIERS
16	-4			
4	-2	5	petit caillou	
3,36	-1,75	6		
2,83	-1,5	7	granule	
2,38	-1,25	8		
2,00	-1,0	10		
1,68	-0,75	12		
1,41	-0,5	14	sable très grossier	
1,19	-0,25	16		
1,00	0,0	18		
0,84	0,25	20		
0,71	0,5	25	sable grossier	
0,59	0,75	30		
0,50	1,0	35		
0,42	1,25	40		
0,35	1,5	45	sable moyen	
0,30	1,75	50		
0,25	2,0	60		SABLES
0,210	2,25	70		
0,177	2,5	80	sable fin	
0,149	2,75	100		
0,125	3,0	120		
0,105	3,25	140		
0,088	3,5	170	sable très fin	
0,074	3,75	200		
0,0625	4,0	230		
0,0530	4,25	270		
0,0440	4,5	325	limon grossier	
0,0370	4,75			
0,0310	5,0			
0,0156	6,0	400	limon moyen	VASES
0,0078	7,0		limon fin	
0,0039	8,0		limon très fin	
0,00098	9,0	>400		
0,00049	11,0			
0,00024	12,0		argile	
0,00012	13,0			
0,00006	14			

TECHNIQUES GÉO-PHYSIQUES

1. STRATÉGIES DES LEVÉS GÉOLOGIQUES ET POSITIONNEMENT

Ce chapitre constitue un examen des techniques de levés géologiques qui peuvent être utilisées pour la surveillance des sites d'immersion en mer. On y présente un bref aperçu a) des techniques de levés et b) des stratégies d'application de ces techniques à divers types de sites en fonction des objectifs du levé. Le présent examen ne se veut ni un guide pratique d'application des techniques ni un manuel de prescriptions détaillées; on propose cependant des références appropriées.

Des estimations des coûts ont été fournies pour permettre les comparaisons, tout au moins d'ordres de grandeur. Les coûts sont fondés sur les taux «typiques» de 1993-1994, exigés par les entreprises qui effectuent des levés hydrographiques. Il est probable que les coûts varient grandement selon les objectifs du levé; ils ne peuvent donc être estimés de façon précise qu'une fois les objectifs définis pour un site donné.

1.1 Définir Les Objectifs du Levé

Le tableau 1 propose une approche à quatre niveaux permettant de définir les objectifs du levé, chacun de ces niveaux correspondant à un degré de détail croissant. La catégorie du levé de base contient l'information de base pour un site donné qui peut être directement tirée des données existantes ou d'un levé effectué spécifiquement sur le site à l'appui de la demande de permis. Cette information sert à la modélisation initiale pour évaluer les hypothèses en ce qui concerne les impacts.

Les levés de niveau I visent à déterminer la superficie initiale du dépôt sur le fond marin et peuvent nécessiter l'utilisation de plusieurs techniques d'échantillonnage et de levés acoustiques. Dans le cas où on prévoit un programme d'opérations successives de surveillance, on recommande d'avoir recours à un levé de niveau II; les méthodes et les normes peuvent différer par rapport à celles du levé de niveau I à cause de la nécessité d'amasser des données comparables d'un levé à l'autre. Dans le cas de levés successifs, lorsqu'on désire effectuer des comparaisons quantitatives, c'est-à-dire déterminer des bilans sédimentologiques ou de polluants qui pourront être comparés avec toute la fiabilité statistique voulue, on utilisera les levés de niveau III.

Tableau 1. Catégories d'objectifs des levés

Catégorie	Objectifs du levé
Levé de base	définir les conditions naturelles du fond marin
Niveau I	déterminer la superficie initiale du dépôt d'immersion sur le fond marin
Niveau II	réaliser des levés successifs pour délimiter qualitativement les variations de la superficie du dépôt d'immersion
Niveau III	effectuer des levés successifs pour estimer quantitativement les taux de dispersion

1.2 Caractérisation du site

On peut appliquer une vaste gamme de techniques de levé à la surveillance des sites d'immersion (tableau 2). Toutefois, ce sont les caractéristiques de chacun des sites qui dicteront l'ensemble particulier de techniques à utiliser pour la surveillance; il revient donc à dire qu'il est illogique de déterminer les techniques à utiliser avant de connaître les caractéristiques du site. Il est important de catégoriser le site au moment du levé de base pour pouvoir ensuite formuler adéquatement les hypothèses en matière d'impact et choisir les levés appropriés. Parmi les grandes catégories de sites, on note :

les sites dispersifs ou non dispersifs - on appelle sites dispersifs les sites pour lesquels on prévoit que les matériaux déposés ne resteront pas en place; les sites sont dit non dispersifs dans le cas contraire (Fredette et al., 1990b). Ce sont souvent la topographie et la texture du fond qui indiqueront qu'un site est dispersif ou non. Ainsi, les sédiments vaseux fins à texture lisse indiquent généralement un régime d'accumulation et

un site non dispersif. Par ailleurs, les sédiments plus grossiers présentant des formes allongées dans le sens de l'écoulement ou en travers de celui-ci laissent à penser qu'il y a déplacement et qu'il s'agit d'un site dispersif. On trouvera dans Amos et King (1984) un bon guide pour l'interprétation de la topographie sous-marine.

les sédiments contrastants ou non contrastants - les sites à sédiments contrastants sont ceux où on note une différence significative entre les caractéristiques sédimentologiques des matériaux d'immersion et celles du fond marin (par ex. sables et graviers déversés sur un lit de silt et d'argile); les sites à sédiments non contrastants sont ceux pour lesquels on s'attend à ce que les sédiments d'immersion et ceux du fond marin aient des caractéristiques sédimentologiques semblables (par ex. sables vaseux déversés sur des vases sableuses). Il est généralement plus facile de détecter les sites à sédiments contrastants que les autres avec les méthodes acoustiques.

dépôts d'immersion épais ou minces - l'épaisseur relative du dépôt aura un effet sur les stratégies de surveillance. On ne peut définir en termes absolus «épais» et «mince», ces qualificatifs étant différents selon la nature contrastante ou non des sédiments, la profondeur d'eau et d'autres facteurs. Ces qualificatifs ont trait à la détectabilité au moyen de techniques acoustiques; ainsi, un dépôt très mince (par ex. plus moins que 30 cm) sera difficile à détecter au moyen de techniques acoustiques, alors qu'un dépôt épais (par ex. plus grande que 1 m) sera généralement détectable. Pour les sites à dépôt «mince», il sera préférable d'avoir recours au carottage.

On trouvera au tableau 3 quelques exemples de combinaisons de caractéristiques de sites, avec les techniques de levés primaires proposées, ainsi que les raisons de ces suggestions. Le tableau illustre la complexité du choix des instruments appropriés pour le levé d'un site. Le choix final dépendra a) des objectifs du levé (c'est-à-dire levés de niveau I, II ou III), b) des caractéristiques du site et c) de la fréquence prévue des levés successifs au site.

Tableau 2. Techniques de levés géologiques

Géophysique	Visuel
sondage bathymétrique	photographie du fond
cartographie par balayage ¹	images vidéo
détermination du profil subsuperficiel du fond	observations en plongée
imagerie de sonar à balayage latéral	détermination des profils sédimentaires
cartographie par lignes-images ²	photographie
Échantillonnage	Méthodes de pointe
échantillonnage ponctuel	levés magnétométriques
carottage	levés de résistivité
échantillonnage par plongeur	études de marquage
	méthodes <i>in situ</i>

1. Carte bathymétrique en trois dimensions produite à partir d'un ensemble de transducteurs montés sur une rampe (Figure 2).

2. Carte bathymétrique en trois dimensions et image de sonar latéral (lignes-images) produites à partir d'un transducteur unique à multifaisceaux.

Tableau 3. Exemples de stratégies de levés en fonction des caractéristiques générales du site

Nature dispersive (estimation initiale du potentiel de transport)	Contraste des sédiments (différence entre les matériaux d'immersion et les sédiments)	Épaisseur (épaisseur relative en termes de détectabilité acoustique)	Techniques/ stratégies de levé initial proposées	Justification
Sédiments dispersifs	Contraste élevé	Épais	bathymétrie haute résolution sonar à balayage latéral détermination du profil subsuperficiel du fond	Étant donné que le dépôt d'immersion est épais et le potentiel de transport élevé, les possibilités de détection au moyen de levés bathymétriques successifs haute résolution sont bonnes; on peut utiliser la détermination du profil subsuperficiel du fond si les matériaux du dessus sont plus fins; l'utilisation du sonar à balayage latéral devrait permettre d'obtenir une bonne image spatiale de la dispersion.
		Mince	sonar à balayage latéral carottage échantillonnage ponctuel	Le sonar à balayage latéral devrait fournir une bonne image spatiale de la dispersion; le carottage donnera une résolution élevée de l'épaisseur, mais il faudra peut-être procéder à de nombreux carottages si le sonar a démontré une distribution irrégulière; l'échantillonnage ponctuel pourra être utilisé si les matériaux se sont beaucoup dispersés.
	Contraste faible	Épais	bathymétrie haute résolution carottage échantillonnage ponctuel	Puisque le dépôt d'immersion est épais et le potentiel de transport élevé, les possibilités de détection au moyen de levés bathymétriques successifs haute résolution sont bonnes; les techniques de carottage ou d'échantillonnage ponctuel pourraient être utiles dans les secteurs éloignés du dépôt principal; les faibles contrastes limitent l'utilisation de techniques acoustiques.
		Mince	carottage échantillonnage ponctuel	Étant donné que les techniques acoustiques ne permettront vraisemblablement pas de détecter les matériaux, il se peut que le carottage accompagné d'analyses ultérieures constitue le seul moyen possible de surveiller la dispersion; on pourrait peut-être aussi penser à utiliser des méthodes de marquage.
Sédiments non dispersifs	Contraste élevé	Épais	bathymétrie haute résolution sonar à balayage latéral détermination du profil subsuperficiel du fond	La même que pour la catégorie des sédiments dispersifs, mais la fréquence des levés successifs nécessaires pourra être moins grande.
		Mince	sonar à balayage latéral carottage	Le sonar à balayage latéral pourra convenir pour la détection initiale, mais il se peut que les matériaux d'immersion soient masqués par la sédimentation naturelle au fil des ans; il pourra être nécessaire d'utiliser un programme de carottage à densité élevée.
	Contraste faible	Épais	bathymétrie haute résolution	Des levés bathymétriques successifs à haute résolution pourront être utiles; il faudrait calculer à l'avance les volumes minimums décelables au moyen de tels levés; les autres techniques acoustiques ne permettront généralement pas de déceler les changements.
		Mince	carottage	Il se peut que le carottage accompagné d'une manutention et d'un traitement soigneux des sédiments soient les seules façons de détecter la dispersion des sédiments depuis le lieu d'immersion.

1.3 Positionnement

On utilise la technologie de positionnement ou de navigation durant les levés géologiques marins pour aider à localiser les lignes de levés et les sites d'échantillonnage sous-marin ou pour les contrôler. Il existe divers systèmes d'établissement de position ou de navigation, soit autonomes, soit intégrés électroniquement à un écho sondeur et d'autres équipements d'acquisition de données.

On choisit un système de positionnement essentiellement en fonction des objectifs de l'étude, des conditions physiques, de la topographie du fond marin et de la superficie de la zone à étudier, de l'équipement disponible, de la distance minimale entre les stations d'échantillonnage, de l'accessibilité au site, de la réoccupation de la station, du degré voulu de précision et d'exactitude et des contraintes financières (USEPA, 1987). Par exemple, les levés de surveillance ou de reconnaissance de vastes superficies ne nécessitent normalement pas un positionnement aussi précis ou exact que celui qui est nécessaire dans le cas de levés effectués à un site de faible superficie où il faut surveiller ou échantillonner de façon répétée les mêmes stations.

1.3.1 Positionnement du navire en surface

On trouvera dans le *Document d'orientation sur le prélèvement et la préparation de sédiments en vue de leur caractérisation physicochimique et d'essais biologiques*; (Environnement Canada 1994, tableau 2) une revue des systèmes de positionnement; ce document présente les systèmes, leur portée maximale, leur précision et leurs avantages et inconvénients. L'information ne s'applique qu'à la navigation de surface toutefois et ne traite pas des problèmes de positionnement de l'échantillonneur ou, dans le cas des levés au moyen d'un sonar, de la position ou de la direction du «poisson» remorqué.

Chacun des types disponibles de méthodes de positionnement (optique à ligne de visée, électronique à courte ou longue portée et par satellite) ont des avantages et des inconvénients; en outre, s'y rattachent des caractéristiques d'exactitude et de portée précisées par le

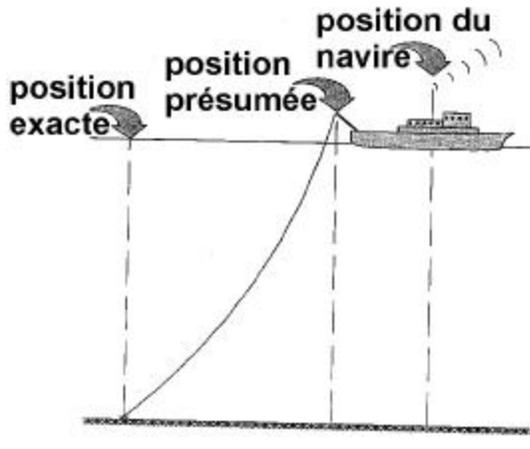


Figure 1. Schéma illustrant certaines erreurs associées au positionnement des emplacements d'échantillonnage par rapport à la position du navire.

fabriquant. L'«exactitude opérationnelle» dans les conditions normales d'utilisation, qui est inférieure à l'exactitude précisée par le fabricant, est tout aussi importante (voir section 1.3.3).

La Figure 1 illustre des exemples d'erreurs de positionnement : a) la position présumée de l'échantillonneur par rapport à la position du navire (dans ce cas, la position du navire est déterminée par celle de l'antenne) et b) la position exacte de l'échantillonneur, qui n'est pas toujours connue à cause des courants ou de «la marche» résiduelle du navire. Dans les cas où les courants sont forts ou l'eau très profonde, cette dernière erreur peut être importante. La position exacte de l'échantillonneur peut être déterminée avec exactitude au moyen d'un système de télémétrie acoustique sous-marin qui détermine la position relative de l'échantillonneur par rapport au navire ou au moyen d'un système de navigation en rapport avec le fond marin qui détermine la position de l'échantillonneur par rapport à un réseau de navigation acoustique.

1.3.2 Positionnement subsuperficiel

On trouvera au tableau 4 un résumé des techniques primaires qui peuvent servir à déterminer la position des échantillonneurs ou des instruments de levés par rapport au fond marin. La détermination des positions subsuperficielles est critique lorsque les conditions du fond marin sont très variables (p. ex. irrégulières) et lorsque des levés successifs sont requis. En plus de positionner les échantillonneurs avec exactitude, il est très important de connaître l'emplacement exact du poisson autopropulsé (PAP) ou du submersible, si l'on veut répéter des levés à des cibles ou des stations du fond marin.

Remarque sur la navigation par GPS. Le GPS (système de positionnement global) peut permettre d'obtenir la position avec une erreur de moins d'un mètre à l'échelle du globe (Frodge *et al.*, 1994; Hurn, 1993; Lapucha et Barker, 1994; Wells *et al.*, 1992). Toutefois, ce niveau de précision n'est pas normalement réalisable, surtout lorsqu'on essaie de relocaliser des positions déjà examinées ou échantillonnées (Hurn, 1989; Lieck, 1990).

Les systèmes de navigation GPS non corrigés ont généralement une exactitude de ± 100 m à cause d'une détérioration voulue des signaux satellites. Ainsi, les positions obtenues auront une incertitude inhérente de ± 100 m. En notant avec précision les positions GPS à une station littorale fixe en même temps que les positions s'enregistrent sur le navire, celles-ci peuvent être corrigées après le levé avec une erreur de l'ordre de moins d'un mètre. C'est ce qu'on appelle le GPS différentiel post-traitement. Soulignons toutefois que la position du navire au cours du levé n'est connue qu'à une exactitude de ± 100 m.

En transmettant l'information de position au navire hydrographique depuis une station littorale fixe, on peut corriger la position GPS sur le navire et réduire l'erreur à moins d'un mètre (c'est le positionnement GPS différentiel en temps réel, ou cinématique, ou encore, DGPS). La Garde côtière canadienne (GCC) diffuse à l'heure actuelle une correction GPS différentielle et des systèmes DGPS standard sont disponibles dans le commerce. En résumé, le DGPS offre la possibilité d'obtenir des levés en temps réel avec une erreur de moins d'un mètre là où sont disponibles des corrections diffusées par la GCC. On peut louer, auprès d'entreprises spécialisées dans les levés, des unités de transmission différentielles spécialement conçues pour l'établissement de DGPS cinématiques (lignes de visée) là où il n'existe pas de corrections diffusées par la GCC

Tableau 4. Systèmes de positionnement sous-marin

Catégorie	Exactitude	Portée	Avantages	Inconvénients
Technique de la distance horizontale (poisson) et de l'angle du filin (échantillonneurs)	Varie; généralement ± 10 m pour le poisson; ± 5 m pour les échantillonneurs	s.o.	Méthode mécanique simple pour estimer la position du poisson (quantité de câble et profondeur du poisson) ou de l'échantillonneur (angle et longueur du filin).	Il se peut que le poisson ne soit pas tiré directement derrière le navire, ce qui entraîne une erreur; il peut être difficile d'estimer l'angle du filin à partir d'un navire qui roule.
Cibles ou empreintes de frottement sur le fond marin	Généralement ± 5 m	Dépend de la portée du sonar latéral	On place sur le fond marin des cibles qui apparaîtront sur l'image du sonar latéral; on peut faire des empreintes de frottement pour des levés successifs.	Il peut être difficile de distinguer les cibles du fond (mauvaise résolution); les cibles doivent être mouillées et récupérées; les empreintes de frottement peuvent se remblayer.
Transpondeur sur le fond marin	Généralement ± 5 m	Dépend de la portée du sonar latéral	Les transpondeurs de fréquence adéquate apparaissent comme des cibles sur l'image du sonar latéral.	Nécessite un remplacement annuel ou un mouillage / récupération pour chacun des levés; la cible doit se trouver à portée du sonar à balayage latéral.
Balise sur le fond marin (émetteur d'ultrasons)	Variable	<1 km	Méthode simple de relocalisation d'une position par un plongeur, un PAP ou un submersible (le véhicule trouve l'endroit au moyen d'un récepteur directionnel).	Nécessite une plate-forme subsuperficielle pour relocaliser la balise.
Systèmes embarqués de portée et de relèvement	± 2 m	500 m	Donne une position relative au navire au moyen des portées et relèvements (distance et azimut); installation simple à bord du navire et transpondeur acoustique sur l'échantillonneur, le PAP ou le poisson.	Nécessite un traitement en temps réel pour correspondre à la navigation; peut être sensible au bruit du navire; coûteux et nécessite beaucoup d'employés.
Réseau de navigation sur le fond marin	± 2 m	» 5 km	Image planimétrique de la zone étudiée affichée sur un écran montrant les transpondeurs et les cibles; positionnement relatif dans le réseau de transpondeurs très exact; utilisé principalement pour les levés à partir de submersibles et de PAP dans le cadre de levés techniques.	Nécessite l'installation d'au moins trois transpondeurs acoustiques sur le fond marin; les transpondeurs subsuperficiels doivent être mouillés et récupérés; la position absolue n'est bonne que si la position du navire l'est également.

Un levé sera beaucoup plus complexe si on y ajoute le positionnement subsuperficiel; il faut alors de l'équipement additionnel tant sur le navire qu'à l'extérieur de celui-ci, un traitement additionnel des données à bord du navire et du personnel spécialisé pour faire fonctionner l'équipement. Les systèmes de positionnement subsuperficiel ne sont pas utilisés de façon régulière dans le cadre de levés des fonds marins (mais plutôt utilisés dans le cadre de levés techniques), quoique de tels systèmes soient disponibles en location au Canada. Le coût de ces systèmes varie beaucoup, un système acoustique de détermination des positions se louant environ 5 000 \$/jour (comprend le coût des opérateurs).

1.3.3 Limites opérationnelles

Comme indiqué ci-haut, les systèmes de positionnement en surface et subsuperficiels comportent tous deux des erreurs inhérentes. Dans les cas où l'on utilise les deux types de systèmes de positionnement, ces erreurs s'ajoutent. En outre, l'exactitude du positionnement, en raison des limites opérationnelles, n'atteint pas celle

spécifiée par le fabricant. Par exemple, lorsqu'on utilise des systèmes de positionnement électronique à deux distances, l'exactitude de la position dépend de l'«angle d'incidence» qui diffère souvent de l'angle droit optimum. Les mauvaises conditions opérationnelles (vents, vagues et courants violents) diminuent aussi la capacité des navires hydrographiques à suivre les directives de pilotage contrôlé par le système de positionnement. Il est aussi très difficile pour un navire de rester en place ou de retourner à une station lorsque la mer est grosse. Ainsi, même si le système de positionnement a une exactitude théorique de ± 3 m par exemple, les contraintes opérationnelles pourront réduire cette exactitude à ± 20 m par rapport à la position visée.

Les nouveaux levés multifaisceaux par lignes-images ou par balayage fournissent généralement une grande densité d'information sur les profondeurs, corrigée en fonction du roulis et du tangage. Ces systèmes sont moins sensibles aux limites opérationnelles dont il vient d'être question, puisqu'il est probable que les données bathymétriques chevauchent des données de levés précédents malgré les déviations par rapport aux lignes de levés prévues.

Voici quelques exemples de divers systèmes de positionnement, des exactitudes prévues, des exactitudes opérationnelles et des coûts approximatifs.

Exemple 1 : Positionnement pour un levé de sédiments superficiels en eau peu profonde

Description : profondeur d'eau : 20-30 m; site non dispersif (présumé) de résidus miniers; sédiments naturels du fond marin : silts; résidus : sable fin; on prévoit utiliser un carottier à boîte pour documenter la dispersion, les résidus miniers et la concentration de ceux-ci; grille d'échantillonnage initial prévue de 5 x 5 (25 échantillons) pour un espacement de mailles de 100 m; nombreux levés successifs prévus.

Système de positionnement : étant donné qu'on prévoit effectuer de multiples levés successifs, il faut utiliser le DGPS (en temps réel); il faut donc prévoir une exactitude ± 2 m de l'antenne du navire.

Contraintes opérationnelles du positionnement : il faut appliquer une correction à la différence entre l'antenne et l'échantillonneur (différence de 4 m, mais la correction variera selon l'orientation du navire lorsque l'échantillonneur touche le fond); comme les courants de marée sont minimes, la différence entre la position présumée de l'échantillonneur et sa position réelle serait inférieure à ± 2 m (c'est-à-dire presque directement sous le navire); l'exactitude opérationnelle globale de l'échantillonnage est de ± 4 m par rapport à la grille de référence absolue; si la grille d'échantillonnage est occupée de nouveau plus tard, il sera probablement difficile pour le navire de se placer dans un rayon de moins de 5 m par rapport à l'emplacement d'origine à cause des difficultés de positionnement du navire et du largage du carottier; la position absolue du deuxième échantillon sera connue à ± 4 m, mais il est peu probable qu'il se trouve exactement au même endroit que le premier échantillon.

Coûts : on prévoit un programme d'une durée d'un jour; il faut compter trois jours de location au total (installation et démontage du DGPS). Il y a trois possibilités :

- 1) dans les cas où la GCC diffuse des corrections, la location d'un système de qualité «levé» pendant trois à quatre jours coûterait environ 600 \$ (prix pour une semaine);
- 2) dans les cas où il n'y a pas de diffusion par la GCC, on pourrait faire un traitement ultérieur des données; le coût pour la location d'un GPS de qualité «levé» est de 450 \$ et le coût d'achat des données de DGPS est d'environ 200 \$; toutefois, pour ce système, la position réelle ne sera précise qu'à environ 100 m;
- 3) dans les cas où il n'y a pas de diffusion par la GCC, on peut mettre sur pied un DGPS en temps réel spécialement conçu pour les levés qui comporterait l'installation d'une station transmettrice littorale et d'un système de traitement embarqué; les coûts seraient de l'ordre de 3 000 à 4 000 \$ et permettraient d'obtenir un positionnement DGPS en temps réel.

Exemple 2 : positionnement pour un levé en eau profonde avec sonar à balayage latéral

Description : profondeur d'eau : 300 m; site non dispersif (présumé) polyvalent; les matériaux d'immersion sont du till d'excavation; les sédiments naturels du fond sont du silt; on veut effectuer un levé au moyen d'un sonar latéral pour déterminer l'emplacement exact des matériaux d'immersion par rapport à la cible; on utilise un sonar latéral de 500 kHz avec correction de distance oblique et de vitesse; la largeur de l'image est de 200 m. Le premier levé sera effectué avant l'immersion des matériaux et le deuxième, après.

Système de positionnement : un DGPS (en temps réel) sera utilisé; on peut donc prévoir une exactitude d'environ 2 m par rapport à l'antenne du navire; transpondeurs-cibles sur le fond marin.

Contraintes opérationnelles du positionnement : région où les courants de marée sont relativement puissants, ce qui compliquera la détermination de la position du poisson; celle-ci sera déterminée à l'aide de la position du navire, du cap de celui-ci et de la distance horizontale du poisson estimée à partir de la profondeur du poisson et de la quantité de câble entre le navire et le poisson. À cause de la longueur de câble utilisé et de la présence de forts courants de marée, la position estimée du poisson est probablement exacte à ± 30 m. Puisqu'il existe déjà des cibles de matériaux d'immersion antérieurs, il est nécessaire d'obtenir un positionnement plus détaillé au sonar. L'opérateur choisit de mouiller quatre transpondeurs-cibles subsuperficiels sur le fond marin; la position de ces cibles (une cible comprend un gros bloc d'ancrage, une balise et une ligne d'amarrage à la surface de 300 m) est établie à ± 5 m au moyen du système de navigation de surface. Ces cibles constituent des points de référence absolus sur les images sonar «avant» et «après». Toutefois, il est probable qu'il faille récupérer les transpondeurs avant l'immersion des matériaux pour éviter qu'ils ne soient enfouis sous eux, puis les mouiller à nouveau une fois les matériaux déversés. On établit une petite mosaïque sonar de la zone proposée pour les cibles.

Coûts : on prévoit un programme d'une durée d'un jour; si l'on tient compte de l'installation (deux jours, y compris la mise en place des transpondeurs) et du démontage (deux jours, y compris la récupération des transpondeurs) d'un DGPS et des transpondeurs de surface, la période totale de location serait d'une semaine. Dans les cas où un DGPS, avec corrections émises par la GCC, est disponible au site, nous recommandons de louer un système de qualité «levé» durant trois à quatre jours (environ 600 \$, prix pour une semaine), et de louer pendant une semaine des transpondeurs-cibles pour 200 \$/semaine/cible (x4) (coût total de 800 \$).

Les estimations de coût fournies ici valent pour les eaux maritimes de la portion sud du Canada. Dans le cas d'opérations arctiques, il faut ajouter des coûts pour le transport et l'installation plus compliquée.

2. VUE D'ENSEMBLE DES TECHNIQUES DE LEVÉ

Il existe diverses techniques de surveillance des matériaux d'immersion en mer; on peut les classer en quatre grandes catégories :

Techniques géophysiques - techniques qui permettent parfois de délimiter le dépôt d'immersion en utilisant des techniques acoustiques de réflexion du fond marin ou des couches subsuperficielles. Ces techniques comportent le sondage bathymétrique, la cartographie par balayage, la détermination du profil subsuperficiel du fond, l'imagerie par sonar latéral et la cartographie par lignes-images.

Techniques d'échantillonnage - techniques qui mènent à la collecte d'un échantillon de sédiments soumis à une analyse détaillée (composition minéralogique ou texture, c'est-à-dire granulométrie). Ces techniques comportent l'échantillonnage ponctuel, le carottage, l'échantillonnage par plongeur ou l'échantillonnage par PAP ou submersible.

Techniques visuelles - techniques qui fournissent des images photographiques ou vidéo du relief sous-marin. Ces techniques comportent : les photographies prises au moyen d'appareils-photo, l'imagerie vidéo provenant de PAP ou de traîneaux remorqués sur le fond, les profils sédimentaires obtenus par photographie et les observations directes par submersible.

Techniques de pointe - techniques qui ne sont pas utilisées fréquemment dans les études de surveillance du fond marin, mais qui peuvent être utiles dans certains cas, par exemple les études de recherche et développement. Ces techniques comportent : les levés magnétométriques du fond marin, les levés de résistivité électromagnétique, les études de marquage et l'installation d'instruments *in situ*.

On traite des possibilités d'application de ces techniques à la surveillance des sites d'immersion en mer,

notamment de la cartographie spatiale des sédiments d'immersion (superficie et épaisseur) et de la capacité d'utiliser les données pour estimer les volumes et les bilans de polluants. Pour obtenir de l'information supplémentaire sur les outils qu'on peut utiliser sur le terrain, consulter Hands (1993), une étude semblable.

2.1 Sondage bathymétrique

On utilise un sondeur qui produit une trace linéaire de la position du fond marin par rapport à la surface de l'eau. On obtient uniquement le profil de la surface du relief. En reportant une série de profils sur une grille, on peut déterminer la bathymétrie du fond et produire une carte bathymétrique.

L'exactitude de la bathymétrie sera fonction a) des instruments (les transducteurs haute fréquence à cônes étroits permettent d'obtenir les données les plus exactes), b) des pentes du fond marin, c) de l'état de la mer lors du levé, d) de

la profondeur d'eau et e) de la précision de la navigation (Milne, 1980). En règle générale, on peut obtenir, dans des conditions optimales, des exactitudes correspondant à 1 % de la profondeur d'eau.

Les signaux obtenus donnent aussi une indication des caractéristiques du fond marin; les fortes réflexions correspondent à des fonds «durs» et les réflexions faibles à des fonds «mous». On a élaboré des systèmes permettant de classer les matériaux du fond à partir des signaux électroniques réfléchis sur le fond marin (Kavli *et al.*, 1994). Des instruments capables de classer les sédiments en grandes catégories - roches, gravier, sable et vase - ont été mis au point. Dans certains systèmes, on utilise des transducteurs multifréquences pour classer les fonds marins; dans d'autres, un signal de retour sinusoïdal à fréquence unique est enregistré et traité pour classer les sédiments (Prager *et al.*, 1993).

On peut effectuer des levés successifs du fond marin pour surveiller les variations de celui-ci; par exemple, une série de levés effectués au cours d'une période de cinq ans a permis de suivre le déplacement graduel de buttes de matériaux de dragage vers la côte du golfe du Mexique (Hands, 1994). Toutefois, les erreurs associées aux diverses limites d'exactitude dont il a été question ci-dessus empêcheront généralement la détection de variations du fond marin de moins de 0,3 m en eau peu profonde (<30 m) et de variations inférieures à 1 m en eau profonde (>100 m). Là où les pentes sont relativement abruptes ou la topographie du fond est plutôt accidentée, la limite de détection augmentera.

Dans les cas où le dépôt d'immersion a plus de 1 m d'épaisseur sur un fond relativement plat, on pourra probablement le détecter au moyen de levés bathymétriques par quadrillage, quoique le pourtour du dépôt ne pourra être défini avec exactitude à moins que les sédiments d'immersion n'aient des caractéristiques de réflexion très différentes des sédiments avoisinants. Tout levé successif nécessitera l'utilisation d'un système de navigation extrêmement exact, comme un système à deux distances ou un DGPS (voir section 1.2.1).

Les coûts des levés bathymétriques peuvent varier beaucoup. Pour un levé de reconnaissance simple qui fait appel au positionnement par radar ou LORAN-C, les coûts de location d'un sondeur de qualité «levé» seront probablement de l'ordre de 100 à 200 \$/jour, selon le degré d'enregistrement numérique; il faudra peut-être

Sondage bathymétrique

Avantages

- Instruments simples; aucun instrument externe n'est nécessaire.
- Peut être utilisé en interface avec la navigation pour l'enregistrement et traité numériquement.
- Peut fournir une indication des caractéristiques du fond marin (mou ou dur) et peut servir à distinguer les sédiments d'immersion des sédiments naturels du fond.
- Des systèmes de traitement électronique en temps réel peuvent permettre de classer les sédiments du fond marin.

Inconvénients

- Donne une image spatiale limitée; il faut effectuer plusieurs lignes de levé pour produire une carte.
- Levés successifs dépendent beaucoup de l'exactitude de la navigation.
- La technique de mesure de la profondeur ne peut, seule, permettre de déceler les limites du dépôt d'immersion, celui-ci étant probablement très mince sur son pourtour.

engager des opérateurs spécialisés (500 à 700 \$/jour par opérateur) si l'on utilise des systèmes d'enregistrement plus perfectionnés. En plus, il faudra compter de trois à cinq jours de traitement des cartes typiques du type de site d'immersion après les levés avant de produire des cartes bathymétriques de grand format.

2.2 Systèmes de cartographie par balayage

On utilise fréquemment ces systèmes lors de levés bathymétriques en eau peu profonde pour produire des cartes bathymétriques haute résolution. Un navire hydrographique est muni de rampes et d'une série de transducteurs (Figure 2) qui lui permettent de balayer le fond sur une grande surface et de récolter des données bathymétriques synchrones; le système donne essentiellement une série d'échosondages, mais qui sont normalement traités à bord du navire pour produire une carte bathymétrique par lignes-images.

À raison que ces navires hydrographiques sont vulnérables à l'état de la mer, ce système convient particulièrement bien aux endroits protégés et peu profonds (par ex. ports, rivières, eaux intérieures). Les navires qui conviennent bien sont toutefois relativement rares et souvent utilisés à l'appui des opérations de dragage. Le coût d'un système de cartographie par balayage, du matériel associé, du navire et des salaires est de l'ordre de 4 800 \$/jour.

Systemes de cartographie par balayage

Avantages

- Production d'une carte bathymétrique à haute résolution
- Grâce au traitement numérique fait à bord, on peut produire rapidement des cartes composites
- Pourvu que la navigation soit précise, on peut obtenir une image complète du fond marin

Inconvénients

- Les systèmes à balayage nécessitent beaucoup d'équipement et de personnel; doit normalement être utilisé sur un navire hydrographique spécialement conçu.
- Les systèmes de rampes sont sensibles à l'état de la mer et ne peuvent normalement pas être utilisés par mauvais temps.
- Ne convient pas aux eaux profondes; généralement utilisé lorsque la profondeur est <30 m, mais encore mieux à <20 m.

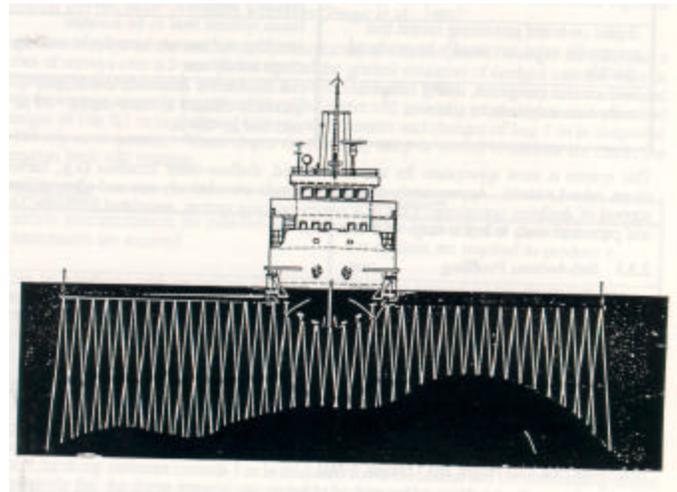


Figure 2. Schéma d'un système de cartographie par balayage montrant la configuration des rampes et la série de 16 transducteurs fixés sur chacune d'elles. (tiré de NAVITRONICS)

2.3 Détermination du profil subsuperficiel du fond

La technique de détermination du profil subsuperficiel du fond est fondée sur les mêmes principes que l'écho-sondage : soit la transmission d'une impulsion sonore provenant d'un transducteur, la réflexion de cette impulsion aux interfaces de densité et l'enregistrement de l'impulsion sonore de retour. Elle se distingue principalement de l'écho-sondeur par l'utilisation d'une plus grande puissance et de fréquences plus faibles, ce qui permet la pénétration de l'impulsion sonore dans les sédiments. Le fait d'utiliser des fréquences plus faibles réduit toutefois la précision des mesures, de telle sorte que les couches situées près du fond marin (à moins de 0,25 m du fond) sont fréquemment «masquées» par la signature acoustique du fond. L'épaisseur minimale de détection d'une couche superficielle de sédiments est généralement de l'ordre de 0,25 m en eau peu profonde, mais Simpkin et Davis (1993) ont souligné pouvoir distinguer des cibles de 0,15 m et de l'ordre de 1 à 2 m en eau profonde (voir également Parent et O'Brien, 1993).

Les contraintes de résolution font que la détermination du profil subsuperficiel du fond ne convient pas pour la plupart des déblais de dragage fins, mais la technique pourrait convenir pour certains projets de surveillance de dépôts d'immersion «épais»; la navigation devrait être précise si l'on prévoit faire le contournage de l'épaisseur des sédiments.

Étant donné que la détermination du profil subsuperficiel du fond est normalement effectuée de concert avec des levés par échosondeur, seuls les coûts du matériel et du personnel nécessaires sont inclus. Les taux quotidiens pour les systèmes de type graphique (p. ex. sortie sur bande enregistreuse) sont de l'ordre de 200 à 300 \$ dans le cas de systèmes simples et de l'ordre de 600 \$ dans le cas de systèmes d'enregistrement numérique. Du personnel technique et professionnel spécialisé doit être présent à bord (1 200 à 1 500 \$ par jour); le traitement ultérieur des données peut coûter de 5 000 à 20 000 \$.

Le «carottage acoustique» est une technique spécialisée de détermination du profil subsuperficiel du fond (Caulfield et Yim, 1982; Caulfield *et al.*, 1983; Tarbotton et Murphy, 1987; McGee *et al.*, 1994) dans laquelle les signaux de retour sont soumis à un traitement en temps réel dans le cas de points donnés, dans le but d'augmenter la résolution et d'établir une corrélation entre l'impédance acoustique du sédiment et sa granularité. Cette technique n'est pas largement utilisée, mais les *US Corps of Engineers* l'ont peut-être déjà utilisée pour certains projets (Tarbotton, 1994, comm. pers.).

Détermination du profil subsuperficiel du fond

Avantages

- L'appareillage est relativement simple; utilisé généralement dans un poisson remorqué, mais peut aussi être mouillé sur le côté.
- Peut être utilisé en interface avec la navigation pour l'enregistrement.
- Fournit une indication des couches subsuperficielles immédiates; peut être capable de distinguer l'épaisseur de sédiments d'immersion si cette épaisseur dépasse 1 m (varie selon les conditions dans lesquelles s'effectuent les levés et le contraste du sédiment)
- Il peut être possible d'évaluer l'épaisseur du dépôt d'immersion et de tracer une carte isopéctique de l'épaisseur du dépôt d'immersion

Inconvénients

- Fournit une image spatiale limitée; de nombreuses lignes de levés sont nécessaires pour produire une carte.
- Les levés successifs sont très dépendants de l'exactitude de la navigation.
- Pas capable de détecter les couches minces, situées près de la surface; peut ne pas détecter les sédiments d'immersion s'il n'y a pas suffisamment de contraste entre le sédiment d'immersion et les sédiments naturels du fond marin

2.4 Imagerie de sonar à balayage latéral

Le sonar à balayage latéral donne des images planimétriques du fond marin, des images analogues à une carte produite par photographie aérienne du sol. Des impulsions acoustiques sont transmises latéralement par un «poisson» remorqué, se réfléchissent sur le relief du fond marin et sont renvoyées au poisson qui les enregistre. L'intensité des signaux réfléchis varie beaucoup en fonction de la «rugosité» du fond; si le contraste est élevé entre la rugosité de la surface du dépôt d'immersion et celle du sédiment du fond marin, il est possible de cartographier la superficie du dépôt d'immersion. Par exemple, si le dépôt d'immersion est constitué de boue et que le fond marin est constitué de gravier, la superficie de la boue pourra probablement être cartographiée avec beaucoup d'exactitude, à la condition que l'épaisseur de la boue soit suffisante (probablement >10-20 cm) pour masquer la surface du gravier. L'imagerie par sonar à balayage latéral s'est révélée utile dans le repérage des dépôts d'immersion hors site (voir Hart, 1992; Jubinski, 1994, comm. pers.).

La résolution des levés obtenus par sonar à balayage latéral varie en fonction a) de l'instrument utilisé (les instruments fonctionnant à plus haute fréquence donnent généralement une meilleure résolution), b) de la stabilité et de l'orientation du poisson, c) de la précision de la navigation, d) de la précision du réglage de l'instrument et des réglages effectués au cours de l'obtention des levés et e) de l'expérience des techniciens qui interprètent les données. Des levés obtenus par sonar à balayage latéral à haute résolution couvrent habituellement une zone de l'ordre de 100 m de largeur par canal (200 m au total); plusieurs lignes de levé devront donc être obtenues pour délimiter le dépôt d'immersion et le fond marin voisin. En rectifiant l'échelle de l'image (opération analogue à la rectification photogrammétrique d'une image obtenue par photographie aérienne par satellite) et en géoréférençant les lignes de levé, on peut obtenir une mosaïque. Des mosaïques sont souvent obtenues dans le cadre d'évaluations techniques du fond marin (Figure 3).

Imagerie de sonar à balayage latéral

Avantages

- Fournit une carte ou une image planimétrique du fond marin; produit une image de la rugosité du fond marin, qui peut être indirectement liée aux sédiments d'immersion
- Peut être interfacé à la navigation pour enregistrer et établir des mosaïques géoréférencées
- L'interprétation sur le terrain permet de modifier le plan d'obtention des levés de façon à optimiser les stratégies d'échantillonnage utilisées
- On peut répéter les levés pour obtenir des transparents qui serviront à évaluer le déplacement des sédiments

Inconvénients

- L'appareillage est relativement complexe, exige l'intervention de techniciens expérimentés, et les données obtenues peuvent demander beaucoup de temps à traiter et à interpréter
- La qualité des levés successifs dépend beaucoup de la précision de la navigation

Les mosaïques obtenues par balayage latéral sont essentielles si l'on envisage de répéter les levés, car c'est la seule façon de géoréférencer les données et de produire des transparents de l'image. La précision des transparents dépendra beaucoup de la précision de la navigation. Les contraintes liées à la précision limitée de la navigation, à la connaissance de la position précise du poisson au cours des deux levés et aux corrections de distance oblique des signaux acoustiques, l'incertitude minimale quant à la position d'une caractéristique du fond marin sera d'environ ± 20 m au cours d'un seul levé, à moins qu'il y ait des cibles ou des répondeurs sur le fond pour contrôler l'image (voir la section 1.3). L'interprétation peut souffrir d'une autre complication provenant de l'effet de flou causé par la dispersion du dépôt d'immersion sur le sédiment naturel, rendant ainsi moins net le contraste entre le sédiment naturel et le dépôt d'immersion.

L'imagerie par sonar à balayage latéral est l'un des outils les plus utiles pour surveiller les lieux d'immersion, mais elle a ses limites. Le fait que la technique puisse donner des images planimétriques en temps réel est un élément extrêmement précieux qui permet d'optimiser le programme d'échantillonnage. Le traitement des données obtenues au cours des levés et la construction de mosaïques permettent de créer des transparents pour des levés successifs, bien que l'incertitude quant à la position de certaines caractéristiques puisse limiter l'interprétation à des «tendances observées» dans les déplacements plutôt qu'à des estimations quantitatives de ceux-ci.

La technique est des plus utiles lorsque a) le contraste est élevé entre les sédiments d'immersion et les sédiments naturels du fond marin (p. ex. boue sur gravier ou gravier sur boue), b) les courants sont relativement faibles de sorte que le contraste demeure élevé et que les sédiments d'immersion ne sont pas dispersés sur les sédiments naturels et que l'effet de flou est minimum et c) que les taux de sédimentation sont suffisamment faibles pour que les sédiments d'immersion ne soient pas recouverts ou masqués par des parasites acoustiques.

Pour améliorer la reproductibilité de la navigation lors de levés successifs au sonar à balayage latéral, on peut utiliser des répondeurs acoustiques comme cibles sur le fond marin ou construire une grille en ménageant des empreintes par creusement ou frottement sur le fond marin. Ces empreintes procurent un cadre de référence absolu et sont très visibles sur les images obtenues par sonar à balayage latéral. Les empreintes de chalut

laissées par les navires de pêche sont fréquemment utilisées pour cartographier les caractéristiques de fond sur les Grands Bancs (Woodworth-Lynas *et al.*, 1991; Messieh *et al.*, 1991).

Bien qu'elle soit utile, cette technique est complexe, elle exige un appareillage remorqué, des techniciens aguerris, des scientifiques expérimentés et, souvent, un traitement ultérieure important. Les coûts pour l'appareillage, les techniciens et les scientifiques dans l'obtention de levés de reconnaissance avec le minimum de traitement ultérieur des données seraient de l'ordre de 1 500 à 2 000 \$ par jour. Pour l'obtention de levés de qualité «mosaïque», on doit compter de 2 000 à 2 500 \$ par jour; le traitement ultérieur des données peut coûter de 5 000 à 10 000 \$ selon le degré de traitement et d'interprétation requis.

2.5 Cartographie par lignes-images

Les progrès récents de l'informatique, du traitement à bord des navires et de l'acoustique du fond marin a permis le développement de systèmes de cartographie lignes-images multifaisceaux à transducteur unique (voir Alleman *et al.*, 1993; Blackington *et al.*, 1991; Rogeau, 1992). Le système à transducteur unique à multifaisceaux peut être fixé au navire ou installé dans un poisson remorqué; Les signaux sont transmis perpendiculairement à la route du navire et produisent des données de réflexion sur une ligne ou une bande. Les données sont traitées de façon à obtenir une carte bathymétrique par lignes-images (voir p. ex. Alleman *et al.*, 1993) ou une combinaison de carte bathymétrique par lignes-images et d'imagerie à balayage latéral (voir Figure 3; Blackinton *et al.*, 1991). L'équipement fonctionne comme un sonar à balayage latéral, mais le traitement des données est beaucoup plus complexe et demande une plus grande expertise.

On ne sait pas si des systèmes de cartographie par lignes-images ont déjà été utilisés pour surveiller un lieu d'immersion; toutefois, des dépôts d'immersion ont été décelés dans le détroit de Géorgie lors de levés de câbles à haute résolution (Figure 3; P. Jalinsky, 1994, comm. pers.) Ces systèmes ont été utilisés principalement dans des levés de reconnaissance en eau profonde, mais des systèmes à haute fréquence ont été mis au point pour les travaux en eau peu profonde (voir Alleman *et al.*, 1993).

Les coûts d'une cartographie par lignes-images peuvent être très élevés. Il en a coûté environ 20 000 \$ par jour pour le système de cartographie par lignes-images, la navigation intégrée, les treuils, l'affichage et l'enregistrement des données et le personnel lors de la campagne dans le détroit de Géorgie (Figure 3). Le traitement ultérieur des données se traduit par des coûts de préparation (4 000 \$ par campagne), mais l'obtention des diagrammes (Figure 3) est relativement peu coûteuse, soit 400 à 600 \$ par diagramme. Les levés effectués en eau peu profonde, tels ceux décrits dans Alleman *et al.* (1993) sont beaucoup moins coûteux, la logistique étant plus simple.

Cartographie par lignes-images

Avantages

- Mêmes avantages que le sonar à balayage latéral, avec en plus une carte bathymétrique superposée
- L'interprétation sur le terrain permet de modifier le plan d'obtention des levés de façon à optimiser les stratégies d'échantillonnage utilisées

Inconvénients

- Mêmes inconvénients que le sonar à balayage latéral; le système de traitement est plus complexe et donc coûteux
- Les levés successifs dépendent beaucoup de la précision de la navigation

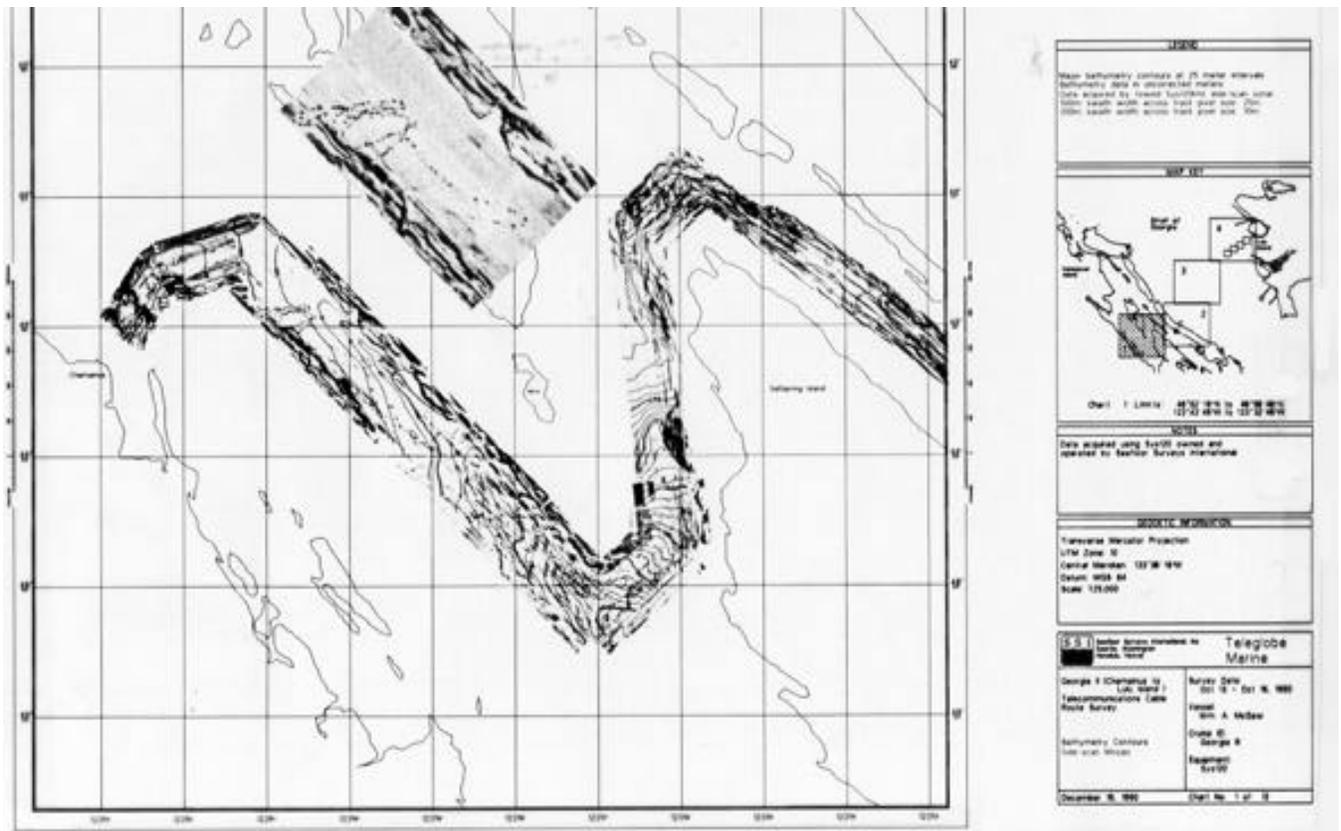


Figure 3. Mosaïque de cartographie par lignes-images avec enregistrement simultané de données bathymétrique et d'images obtenues par sonar à balayage latéral pour la région des îles Gulf, en Colombie-Britannique. Les points foncés sur l'image (en médaillon) sont interprétés comme des déblais éliminés d'une barge (fourni par Seafloor Surveys International Inc.).

2.6 Campagnes d'échantillonnage

Les campagnes d'échantillonnage fournissent des échantillons de sédiments qui peuvent être examinés ou analysés au laboratoire. Ecological Service for Planning Ltd. (1993) résume les tests qui peuvent être effectués : analyses de texture ou de granulométrie, analyses minéralogiques, analyse de métaux-traces et analyse des composés organiques. À un niveau très général, la texture des sédiments du fond marin donne un indice de l'énergie des courants; en effet, des sédiments grossiers indiquent de forts régimes de courant alors que des sédiments plus fins indiquent de faibles régimes de courant. Les diverses textures de sédiments qui se répètent sous forme de motifs indiquent souvent comment les sédiments sont transportés ou leurs sources et leurs puits. Les données de texture peuvent appuyer les «analyses de tendances» effectuées pour surveiller les schémas de dispersion des sédiments (voir p. ex. Hands, 1991 et 1992; McLaren et Bowles, 1985; McLaren et Thomas, 1988).

Les campagnes d'échantillonnage se font presque toujours lors de levés géophysiques quelconques pour vérifier l'interprétation des «unités acoustiques» de superficie dans le cas des levés par sonar à balayage latéral ou des «couches acoustiques» dans le cas de la détermination du profil subsuperficiel du fond. L'utilisation combinée de données géophysiques et de données d'échantillonnage permet d'utiliser l'interprétation des unités acoustiques comme cadre de stratification statistique; ainsi les échantillons permettent de caractériser les unités acoustiques (McGee *et al.*, 1994). Les échantillons peuvent être prélevés sur une grille systématique ou au hasard dans chaque unité.

Sly (1969) donne un excellent résumé des dispositifs d'échantillonnage; ce bilan date un peu, mais nombre des dispositifs d'échantillonnage qui y sont évalués (Figure 4) sont encore couramment utilisés dans les études de surveillance du fond marin. Des échantillonneurs sont également décrits et illustrés dans Fredette *et al.* (1990a).

2.6.1 Échantillonnage ponctuel

Les échantillons ponctuels sont prélevés à l'aide d'un dispositif d'échantillonnage actionné à partir du navire, lorsque celui-ci est arrêté. Le dispositif fonctionne habituellement de telle façon qu'il se referme lorsqu'il touche le fond. Il existe divers types de dispositifs d'échantillonnage ponctuel : Ponar, Smith-McIntyre, VanVeen et Shipek (Figure 4). Ces dispositifs sont utilisés sur une superficie du fond marin de l'ordre de 100 à 1 000 cm² et habituellement à une profondeur de moins de 10 cm.

L'une des interprétations les plus fautives des données d'échantillonnage ponctuel provient du fait que l'hypothèse que l'échantillon prélevé est représentatif du sédiment de fond n'est pas fondée. Les conditions suivantes peuvent être à l'origine de problèmes dans la représentativité de l'échantillon : a) les sédiments superficiels sont répartis inégalement, b) l'échantillonneur a pénétré à travers une couche mince (généralement moins de 10 cm d'épaisseur) et a mélangé des sédiments de surface et des sédiments de subsurface qui peuvent avoir été déposés dans des conditions hydrodynamiques différentes, c) l'échantillonneur peut ne pas être assez gros pour échantillonner de gros clastes (blocs, cailloux plus ou moins gros) ou d) l'échantillon subit un

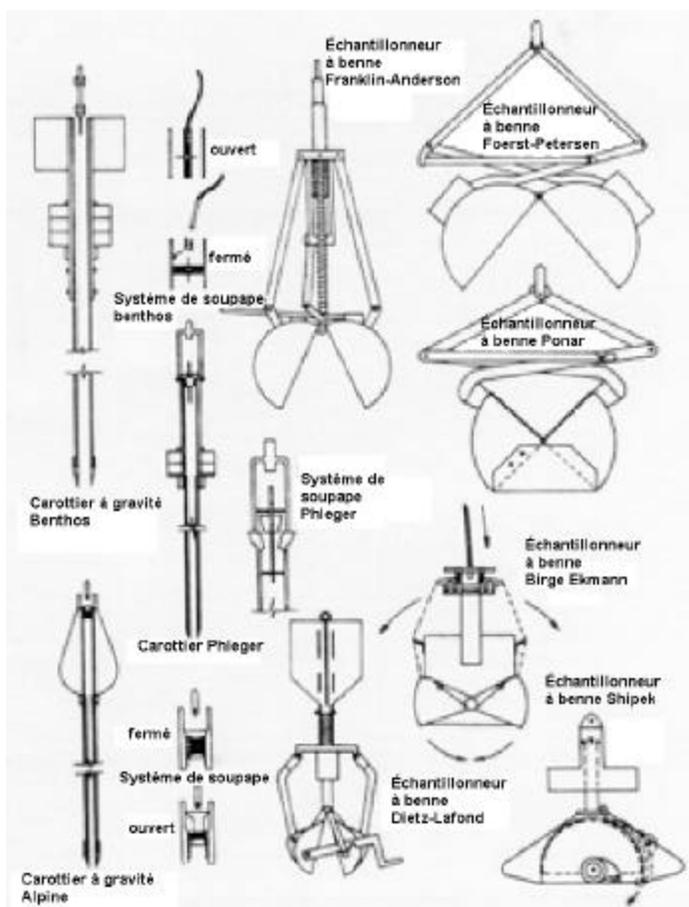


Figure 4. Exemples de dispositifs d'échantillonnage ponctuel et de carottiers (tiré de Sly, 1969).

Échantillonnage ponctuel

Avantages

- Les dispositifs sont en général très faciles à utiliser; des échantillons importants sont prélevés (habituellement, la taille minimale de l'échantillon est d'environ 1 kg)
- Prélèvement d'un échantillon qui est habituellement représentatif du matériel à la surface du fond marin; les échantillonneurs ponctuels peuvent perturber ou mélanger les sédiments, mais il est possible d'obtenir un échantillon non perturbé de la couche de surface en procédant avec soin.
- Une description visuelle comme celle de Folk (1968) permet d'effectuer un premier classement des échantillons et de marquer le terrain d'où ils proviennent et de confirmer l'interprétation faite par balayage latéral
- On peut exécuter une foule d'analyses sur le même échantillon, ce qui permet de surveiller différentes tendances (p. ex. les métaux-traces, la granulométrie, etc.)
- La simplicité de la technique permet de répéter l'échantillonnage

Inconvénients

- Un grand nombre d'échantillons peuvent être requis si les sédiments de fond sont répartis inégalement; l'interprétation peut être difficile
- l'échantillon peut être perturbé et il peut y avoir mélanges de couches minces de sédiments provenant de divers environnements, ce qui complique l'interprétation
- Le prélèvement des échantillons au même endroit lors de levés successifs est sensible à la navigation (± 10 m); cela peut s'avérer un problème avec des sédiments de fond répartis inégalement
- Il faut en général un traitement ultérieur des échantillons; les résultats peuvent prendre des semaines ou même des mois à mettre en graphique

«lavage» lors de la remontée, ce qui se

traduit par la perte de sédiments fins. On peut réduire ces effets en utilisant des techniques complémentaires. Par exemple, le prélèvement de quelques carottes en même temps que les échantillons ponctuels permettra de repérer les endroits où les couches sont minces, ou l'utilisation de l'imagerie vidéo au cours du prélèvement des échantillons permettrait de repérer les endroits où les sédiments superficiels sont uniformes.

Les coûts liés à l'échantillonnage ponctuel des sédiments sont faibles comparativement à ceux d'autres techniques. On peut en général louer des échantillonneurs pour quelques dizaines de dollars par jour et, dans leur forme la plus simple, ces échantillonneurs peuvent être «halés à la main» à l'aide d'un bossoir installé sur un petit navire. Les échantillonneurs plus gros peuvent exiger un treuil, notamment en eau profonde où le poids du câble est important. On peut en général couvrir une grille d'échantillonnage de 10x10 sur une superficie d'un kilomètre en une journée (probablement en deux jours si l'échantillonnage doit être répété à certains endroits). Il est essentiel de faire un classement visuel des échantillons au cours du processus de prélèvement pour optimiser le programme d'échantillonnage. L'analyse des échantillons peut coûter de quelques dizaines de dollars par échantillon pour les analyses granulométriques à des milliers de dollars par échantillon pour des analyses de polluants spécialisées (p. ex. analyse des dioxines).

2.6.2 Carottage

Le carottage permet de prélever une colonne de sédiment dans un tube ou une boîte (Bouma, 1969, donne une description générale des systèmes de carottage). La colonne ou la carotte de sédiment fournit des indications sur les couches situées près de la subsurface. Lorsque le carottier pénètre dans les sédiments, ces derniers peuvent être perturbés (p. ex. assèchement), mais la structure stratifiée de base est habituellement préservée et on peut y prélever des échantillons. Il existe divers types de carottiers : carottiers à gravité (Figure 4), carottiers à vibrations ou carottiers à boîte (Figure 5). Voir également la section 2.12 pour la description de l'appareil-photo qui fournit une image «en carotte» des sédiments près de la surface.

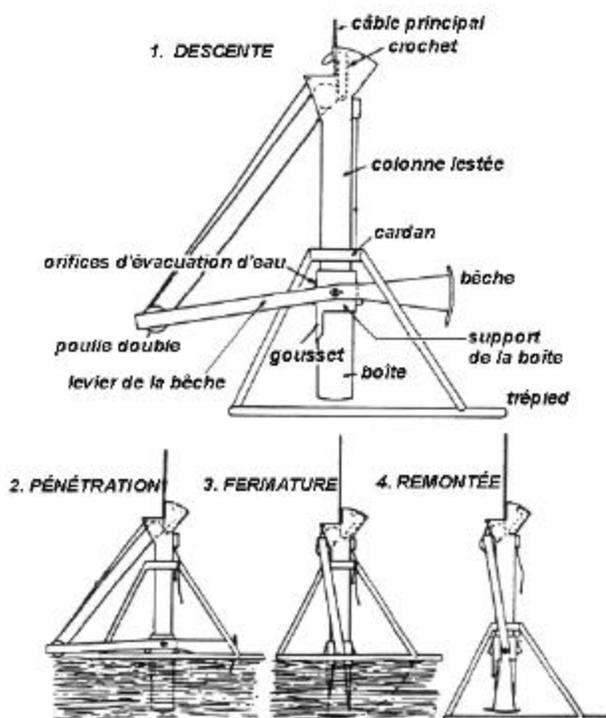


Figure 5. Caractéristiques et fonctionnement d'un carottier à boîte (d'après Lee et Clausner, 1979).

Carottage

Avantages

- En général, dispositifs très simples à utiliser
- Fournit une image claire des conditions subsuperficielles en eau peu profonde; utile pour confirmer l'interprétation du profil subsuperficiel du fond
- Les carottiers à boîte peuvent servir à prélever des échantillons relativement non perturbés

Inconvénients

- L'équipement est plus lourd que dans le cas de l'échantillonnage ponctuel et il faut habituellement des grues et des navires plus gros pour obtenir les échantillons; sur le navire, l'extraction, la manutention et le stockage des carottes doivent faire l'objet d'une planification soignée
- L'échantillon peut être petit (quelques dizaines de grammes) et il est alors impossible de faire plusieurs analyses; la couche supérieure (1-3 cm) peut être perdue avec les carottiers classiques à piston et à gravité et il peut se produire une compression du profil de la carotte
- La profondeur de pénétration est souvent limitée près des rivages sablonneux et sur le plateau continental; un carottier à vibrations (qui exige un matériel beaucoup plus complexe sur le navire) peut être requis pour obtenir une pénétration plus profonde

Le carottage complique davantage les opérations que l'échantillonnage ponctuel, car il faut normalement des engins de levage beaucoup plus lourds; il faut donc habituellement de plus gros navires, des grues ou des chevalets plus gros ainsi que des treuils plus lourds. Certains carottiers à boîte peuvent être utilisés en eau peu profonde à partir de petits navires hydrographiques et permettent d'obtenir des échantillons de fond relativement non perturbés. Les carottiers à vibrations, qu'il faut souvent utiliser dans les sédiments grossiers près du rivage, exigent un cadre posé sur le fond marin, de gros compresseurs et de multiples points d'ancrage (Fuller et Meisburger, 1982). Il est donc important d'utiliser les levés géophysiques pour optimiser la stratégie de prélèvement des carottes.

L'interprétation des données des carottes permet de déterminer le comportement présent et passé des sédiments, et ainsi d'obtenir des informations importantes pour l'évaluation du caractère dispersif des sédiments d'immersion. Il est possible de dater des horizons dans la carotte pour évaluer les taux de sédimentation à un endroit donné.

On peut louer un carottier à raison de quelques dizaines ou centaines de dollars par jour, selon la complexité de l'appareil. Bien qu'il soit possible de mouiller de petits carottiers à partir de petits navires, certains carottiers pourront exiger de plus gros navires équipés de bossoirs ou de chevalets plus importants. On peut prélever de quelques carottes par jour (p. ex. si l'on utilise un carottier à vibrations) jusqu'à une centaine si l'on utilise de petits carottiers «à clapet» sur un fond mou.

2.6.3 Échantillonnage par plongeur

En eau peu profonde (<30 m) sur une aire limitée, il peut être rentable de faire appel à des plongeurs pour prélever les échantillons. Le plongeur peut déterminer si le site d'échantillonnage est représentatif du fond environnant et/ou des sédiments subsuperficiels. Le milieu sédimentaire soumis à l'échantillonnage est connu de façon précise. Le plongeur peut prélever des échantillons ponctuels ou des carottes à une faible profondeur.

Lorsque la visibilité s'étend à plus de 10 mètres et que l'eau est peu profonde (<20 m), de grandes étendues de fond marin peuvent être échantillonnées par un plongeur sur un traîneau remorqué par un navire hydrographique.

Les échantillons prélevés par des plongeurs reviennent plus chers que les échantillons ponctuels courants. Toutefois, la qualité des échantillons est beaucoup meilleure, car les plongeurs peuvent évaluer la

«représentativité» de chaque échantillon avant de le prélever, ils peuvent donner une description visuelle du fond marin et opérer un échantillonnage sélectif. Un plongeur scientifique qualifié demande habituellement 500 à 600 \$ par jour, et il en faut au minimum deux. Le nombre d'échantillons prélevés variera significativement en fonction de la profondeur, de la visibilité, de l'état de la mer et de la grille d'échantillonnage.

Échantillonnage par plongeur

Avantages

- Niveau de confiance élevé dans la capacité de l'échantillon de représenter les conditions du fond marin
- L'échantillonnage peut être très précis; il est possible de retrouver les points d'échantillonnage à l'aide de piquets plantés sur le fond marin
- On peut adjoindre un traîneau remorqué par le navire pour augmenter la superficie échantillonnée

Inconvénients

- Utile uniquement pour de petits sites d'échantillonnage car les plongeurs sont généralement limités à 1 à 2 h de plongée ou à 3 plongées par jour.
- En eau peu profonde seulement, à cause des contraintes liées à la plongée
- Comporte davantage de risques que d'autres types de levés

2.7 Techniques de visualisation

L'information visuelle sur le fond marin permet de vérifier les interprétations géophysiques faites à partir des «unités acoustiques» et de vérifier si les échantillons représentent les conditions du fond marin environnant. La photographie peut être utilisée seule ou avec des échantillonneurs à benne ou des carottiers. Les progrès

intervenues récemment dans le domaine des caméras vidéo sous-marines en font l'un des outils d'observation les plus utiles. On utilise souvent les caméras vidéo en eau peu profonde (<100 m) et des systèmes spécialisés ont déjà été utilisés à des profondeurs pouvant atteindre 4 000 m (Ballard, 1988).

2.7.1 Photographie du fond marin

La photographie du fond marin est l'un des moyens pour les géologues d'obtenir une image du fond marin et d'augmenter ainsi leur confiance dans la capacité des échantillons de représenter le fond marin. Les appareils utilisés sont des appareils photographiques autonomes que l'on descend au fond à l'aide d'un câble. Lorsque l'appareil arrive à 1 ou 2 m du fond, un dispositif déclenche le flash et l'obturateur. Des systèmes de photographie modifiés ont été utilisés en eau profonde pour obtenir des mosaïques (voir p. ex. Ballard, 1988).

On peut louer un appareil simple pour la photographie en eau peu profonde, avec dispositif de déclenchement au fond, pour quelques dizaines de dollars par jour; et ces appareils n'exigent pas de manipulations spéciales. (Pour utilisation avec un treuil à câble normal). Pour louer un appareil déplacé sur traîneau, qui peut exiger un treuil spécial et du personnel spécialisé, on peut s'attendre à payer quelques centaines de dollars par jour.

2.7.2 Obtention de profils sédimentaires par photographie

L'obtention de profils sédimentaires par photographie a été largement utilisée dans le cadre des projets d'immersion en mer aux États-Unis pour obtenir une image haute résolution des sédiments près de la surface du fond marin (Fredette *et al.*, 1990a). L'appareil-photo monté dans un cadre est descendu au fond (Figure 2.6). Le prisme peut pénétrer les sédiments jusqu'à une profondeur de 18 cm. L'interprétation de l'image peut fournir de l'information sur la granularité des sédiments, le potentiel redox de l'endroit, le microrelief de la surface des sédiments, l'épifaune, l'endofaune et la richesse apparente des espèces (Germano, 1983; Rhoads et Germano, 1982). Un tel appareil, dont le coût de location est d'environ 1 000 \$ par jour, peut donner environ 150 images par jour (Fredette *et al.*, 1990a). L'analyse des images coûte 40 à 60 \$ l'image.

2.7.3 Utilisation de caméras vidéo

Les caméras vidéo fournissent des images en temps réel du fond marin au cours des levés et procurent immédiatement des données sur les conditions du fond marin et sur la capacité des échantillons à représenter ces conditions. Les caméras comprennent habituellement une source lumineuse et sont reliées au navire par un câble d'alimentation. Diverses plate-formes de soutien peuvent être utilisées, dont des systèmes tenus par des plongeurs, des poissons autopropulsés (PAP), des appareils remorqués ou des sous-marins. On peut fixer un simple système de caméra vidéo à des échantillonneurs à benne ou à des carottiers afin d'obtenir de l'information sur les caractéristiques superficielles du fond marin.

Photographie du fond marin

Avantages

- Le fonctionnement est relativement simple, mais l'appareil photo peut être coûteux
- Il est facile de répertorier les images à des fins de comparaison dans le cas de levés successifs
- On obtient une image haute résolution du fond marin
- Augmente la confiance dans la capacité des échantillons de représenter le fond marin

Inconvénients

- L'image ne couvre qu'une superficie limitée du fond marin : habituellement de 1 à 2 m²
- Le traitement en temps réel n'est habituellement pas possible; le traitement ultérieur peut prendre des jours et même des semaines

Utilisation de caméras vidéo

Avantages

- Fournit une image en temps réel du fond marin, ce qui permet d'évaluer immédiatement la capacité de l'échantillon à représenter le fond marin et d'interpréter les unités acoustiques
- L'enregistrement peut comporter une bande audio synchronisée avec l'image
- Il est possible de monter des caméras sur des échantillonneurs ou des carottiers afin d'obtenir des observations directes, en temps réel, de l'endroit échantillonné

Inconvénients

- Ce genre d'appareil est habituellement limité à de faibles profondeurs (<100 m) à cause des problèmes causés par le câble d'alimentation; à plus de 30 m de profondeur, il faut un équipement spécial pour manipuler l'appareil
- La relocalisation des points d'échantillonnage peut être difficile, à moins d'utiliser un système sophistiqué de positionnement sous-marin
- Les images peuvent être difficiles à répertorier et à retrouver; il est également difficile de relocaliser les cibles dans le cas de levés successifs

Le système ROPOS (*Remotely Operated Platform for Ocean Science* = Plate-forme océanographique autopropulsée), de fabrication canadienne, a été utilisé jusqu'à une profondeur de 2 500 m. Il comprend une caméra vidéo noir et blanc, une caméra vidéo couleur, un bras manipulateur et un sonar à balayage de secteur. Ce système a servi lors des levés exécutés au lieu d'immersion en mer de la pointe Grey (Shephard, 1994, comm. pers.).

Le principal avantage des images vidéo est qu'elle fournissent au scientifique une vue en temps réel du fond marin au cours des levés. Cela permet d'interpréter immédiatement, et avec un niveau de confiance élevé, les unités acoustiques enregistrées par le sonar à balayage latéral et d'optimiser le programme d'échantillonnage de façon à obtenir la meilleure représentativité des unités géologiques (p. ex. différencier les sédiments d'immersion des sédiments naturels du fond marin).

Les petits PAP utilisés en eau peu profonde se louent pour quelques centaines de dollars par jour et, selon le fournisseur, un technicien qualifié peut être requis. On pourra probablement louer une caméra noir et blanc fixe pour quelques dizaines de dollars par jour. Les PAP utilisés en eau profonde, comme le ROPOS, exigent de gros navires de soutien, une équipe d'opérateurs et de techniciens, des systèmes de navigation intégrée et ils

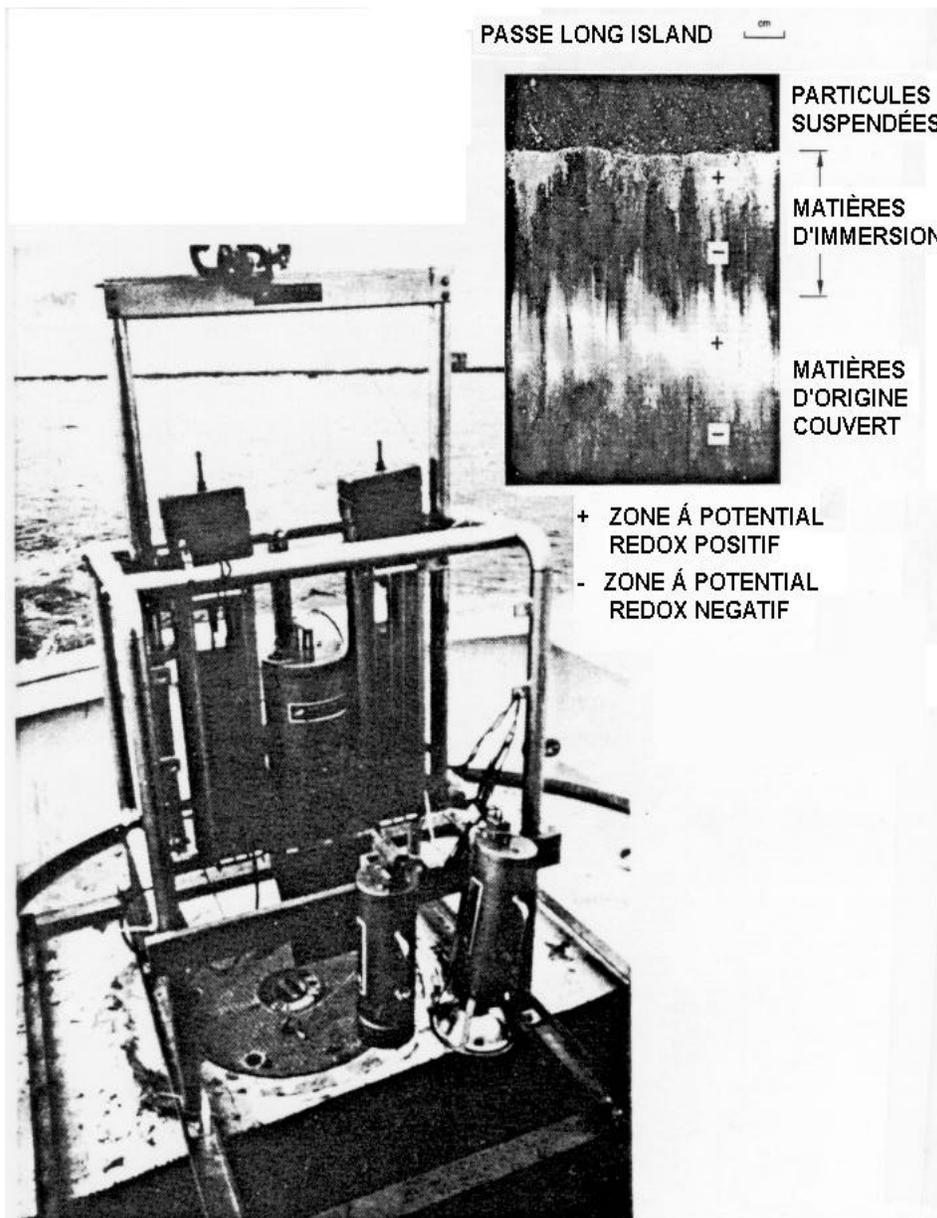


Figure 6. Cadre d'appareil photo utilisé pour la photographie des sédiments et portion de l'image

font grimper les frais à plus de 20 000 \$ par jour (B. Lea, comm. pers., 1994).

2.7.4 Observations en plongée

Dans le cas des sites peu étendus et en eau peu profonde, la collecte d'observation au moyen de plongeurs peut se révéler un moyen rentable d'interpréter les données géophysiques, d'interpoler entre des points d'échantillonnage et de vérifier la représentativité des échantillons ou carottes du fond marin.

Un plongeur peut faire un examen ponctuel du fond marin ou prendre des observations le long de couloirs (lignes). L'utilisation d'un traîneau remorqué peut aider le plongeur à couvrir une plus grande superficie. La section sur les échantillons prélevés par des plongeurs (section 2.6.3) fournit des renseignements sur les tarifs demandés par les plongeurs.

Observations en plongée

Avantages

- Niveau de confiance élevé dans la capacité de l'échantillon de représenter les conditions du fond marin
- Données en temps réel permettant d'optimiser les programmes d'échantillonnage et de levés
- Peut être combiné à un traîneau remorqué pour augmenter la superficie couverte

Inconvénients

- Utile uniquement pour de petits sites d'échantillonnage car les plongeurs sont généralement limités à 1 à 2 h de plongée ou à 3 plongées par jour.
- En eau peu profonde seulement, à cause des contraintes liées à la plongée
- Comporte davantage de risques que d'autres types de levés

2.8 Techniques de pointe

Les techniques suivantes sont qualifiées «de pointe» car elles ne sont pas couramment utilisées dans le cadre de la surveillance des lieux d'immersion en mer. On les mentionne parce qu'elles sont utilisées à l'occasion ou qu'elles offrent certaines possibilités dans certaines conditions. Par exemple, des levés magnétométriques peuvent se révéler utiles pour surveiller la dispersion de résidus miniers riches en minerais ferreux.

2.8.1 Levés magnétométriques

On utilise couramment les magnétomètres aux protons dans l'exploration des hydrocarbures en mer et pour localiser des objets ferreux (p. ex. épaves, pipelines). Les magnétomètres mesurent les champs magnétiques, et les objets ferreux créent des anomalies du champ magnétique. Il n'est pas sûr (au moment de la rédaction de ce rapport) que cette technique ait déjà été utilisée dans le cadre de la surveillance des lieux d'immersion en mer. Toutefois, certaines matières peuvent produire des anomalies du champ magnétique naturel du fond marin (p. ex. les rejets de résidus miniers).

Levés magnétométriques

Avantages

- Peut mesurer directement un polluant
- L'appareillage est relativement simple et peut être traîné sur le fond marin
- Avec d'autres données, il pourrait être possible de mettre en corrélation l'intensité du signal et la profondeur du dépôt

Inconvénients

- Ne semble pas être une technique éprouvée

2.8.2 Levés de résistivité

Des travaux effectués récemment en Colombie-Britannique ont montré que les levés de résistivité s'avéraient prometteurs pour mesurer les propriétés des sédiments subsuperficiels en eau peu profonde (Cheesman *et al.*, 1993). On mesure la conductivité électrique à l'aide d'un capteur remorqué sur le fond marin, et ces mesures, qui s'enregistrent en continu, servent à déterminer la «porosité ouverte» qui permet de calculer indirectement la densité subsuperficielle; le système est présentement configuré pour mesurer la densité dans trois couches subsuperficielles.

La technique a été utilisée dans deux secteurs de résidus miniers de la Colombie-Britannique (Jordan River et Britannia Beach) et a donné de bons résultats (L. Law, comm. pers., 1993). Elle comporte l'avantage important de pouvoir établir un profil des sédiments superficiels grossiers (p. ex. sables grossiers et graviers) et peut distinguer des couches de sédiments grossiers sur des couches de sédiments fins; ces couches sont souvent difficiles à distinguer avec les systèmes de détermination du profil sismique et sont difficiles à carotter.

Levés de résistivité	
Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Moyen relativement simple de mesurer une propriété importante des sédiments superficiels — la porosité • L'appareillage est relativement simple et peut être traîné sur le fond marin • La technique a la capacité de distinguer l'interface entre les sédiments grossiers et les sédiments fins, ce que la détermination du profil subsuperficiel du fond ne permet pas d'obtenir 	<ul style="list-style-type: none"> • La technique est très récente et relativement peu éprouvée, mais on l'a utilisée pour mesurer les dépôts de résidus miniers provenant de deux mines • La technique ne mesure présentement qu'une seule propriété des sédiments

Étant donné la nouveauté de la technique, les coûts n'ont pas été établis, mais ils devraient être de l'ordre de dizaines de milliers de dollars par campagne, à l'exclusion des coûts liés à l'utilisation du navire.

2.8.3 Études de marquage

On peut marquer des particules de sédiment pour suivre leurs mouvements. On utilise des composés fluorescents et des isotopes radioactifs pour ce faire. Le marquage aux composés fluorescents donne une indication qualitative du transport des sédiments, alors que le marquage aux isotopes radioactifs (levés radiométriques) permet d'obtenir des données quantitatives.

Au Canada, on a effectué des levés radiométriques pour surveiller le transport de sédiments sur le plateau continental (Hodgins *et al.*, 1986a). La technique consiste à introduire un marqueur radioactif dans les sédiments du fond marin et à effectuer des levés par la suite à l'aide d'un scintillomètre qui mesure le rayonnement émis. Les levés effectués sur la plate-forme Scotian (Hodgins *et al.*, 1986b) faisaient appel à du verre irradié broyé pour donner des particules de la taille du sable. Les levés ont été effectués au cours d'un hiver après 1, 2,5 et 3,5 mois. Ces levés ont enregistré des déplacements médians de l'ordre de 1 à 2 m par jour dans le cas du site le plus actif.

Études de marquage	
Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Permet de mesurer directement la dispersion des sédiments • La technique a été utilisée près du rivage et sur le plateau continental; elle comporte donc des limites • Fournit des résultats en temps quasi réel; les levés peuvent donc être optimisés • Les études radiométriques donnent des résultats quantitatifs • Les études de fluorescence donnent des résultats qualitatifs 	<ul style="list-style-type: none"> • Les manipulations et la nécessité d'obtenir un permis présentent des complications dans le cas des levés radiométriques • L'appareillage est relativement complexe et exige des opérateurs spécialisés • Technique limitée aux sédiments de la taille du sable; la quantité de matériel dépend de la dynamique au niveau du site • Les résultats des études radiométriques peuvent être difficiles à interpréter • Les données qualitatives peuvent nous renseigner sur la dynamique des sédiments, mais elles ne peuvent pas être utilisées pour la modélisation

Bien que la technique n'ait pas été utilisée directement dans une étude sur un lieu d'immersion en mer, elle

pourrait permettre de mesurer indirectement la dispersion des sédiments. Des études de marquage avec des composés fluorescents pourraient être effectuées dans le cadre d'un programme d'échantillonnage ponctuel ou de carottage, entraînant peu de frais supplémentaires. En effet, le marquage et le mouillage du sable pourraient coûter à peine quelques milliers de dollars de plus. Les études de marquage du sable par des composés radioactifs sont coûteuses. Une campagne pourrait ainsi coûter environ 100 000 \$ (200 000 \$ pour des levés successifs).

2.8.4 Systèmes de surveillance *in situ*

Il existe de nombreux systèmes de surveillance *in situ* permettant de mesurer les courants ou le mouvement des sédiments à un site donné. Il s'agit d'ensembles spécialisés d'appareils comportant par exemple une caméra et un courantmètre ou d'instruments de recherche spécialisés. Par exemple, l'Institut océanographique de Bedford a conçu un appareil, le *Sea Carousel*, qui mesure les contraintes de cisaillement qui s'exercent sur le fond marin (Amos *et al.*, 1992a; 1992b), un paramètre important à utiliser dans la modélisation du transport des sédiments. Cet appareil a été testé à un lieu d'immersion dans la baie de Fundy (Amos *et al.*, 1993).

Des transmissomètres peu coûteux et susceptibles d'être perfectionnés ont été utilisés pour mesurer l'arrivée subite de sédiments en suspension dans le fjord de Colombie-Britannique (Prior *et al.*, 1987); on est en train de mettre au point de simples dispositifs à aube inclinée pour mesurer le transport épisodique de sédiments (Bornhold, comm. pers., 1994), qui peuvent servir à étalonner les modèles de transport des sédiments.

Les systèmes de surveillance *in situ* sont généralement coûteux, ils donnent des résultats sur une période de temps limitée et exigent l'intervention de spécialistes pour l'interprétation. Ces systèmes constituent des outils de recherche importants, mais il est peu probable qu'ils soient utilisés couramment dans le cadre de programmes de surveillance. Ils pourraient être utiles dans le cadre de programmes spécialisés de surveillance de grande envergure, mais avant de faire appel à de tels systèmes, il serait prudent de demander l'avis de spécialistes.

2.9 Équipement et expertise au Canada

On dispose de beaucoup d'expertise dans le domaine des levés sur le fond marin au Canada, tant dans le secteur privé que dans les laboratoires de recherche gouvernementaux. Une grande partie de cette expertise a été acquise au cours des activités d'exploration pétrolière en mer dans les années 1970 et 1980, et elle a d'ailleurs été exportée à l'étranger.

Tout l'équipement mentionné dans le présent rapport est disponible au Canada et une grande partie a été utilisée dans des études de surveillance du fond marin.

MODÈLES DU TRANSPORT DES SÉDIMENTS

1. MODÉLISATION DU TRANSPORT DES SÉDIMENTS : OUTIL DE CONCEPTION DE PROGRAMMES DE SURVEILLANCE

Déterminer le devenir des matériaux de dragage constitue l'une des étapes essentielles de l'élaboration d'un programme de surveillance des lieux d'immersion. Il faut d'abord tracer les limites du lieu d'immersion en fonction des opérations de mise en place des matériaux. La deuxième étape consiste à examiner la possibilité que les matériaux déposés soient transportés avec les sédiments par les vagues et les courants. Ces processus de transport détermineront le devenir à long terme des matériaux et ainsi, la superficie touchée par les polluants contenus dans les sédiments.

Les modèles informatiques numériques peuvent évaluer à la fois la superficie initiale du dépôt et la possibilité que les matériaux de dragage soient transportés avec les sédiments. La superficie initiale du dépôt et l'épaisseur des matériaux recouvrant le fond marin sont déterminées à l'aide d'un modèle de devenir à court terme. Les échelles de temps utilisées pour calculer ce mouvement et les mouvements subséquents vont de quelques minutes à quelques heures, selon la composition des matériaux.

Les échelles de temps pour les sédiments transportés à l'extérieur d'un site donné après leur dépôt varient considérablement selon les régimes hydrodynamiques et sédimentaires. Ces échelles peuvent varier de quelques heures à de nombreux mois. De même, la formulation des modèles de devenir à long terme varie considérablement en fonction des modèles disponibles lors du dépôt initial.

Ce guide donne un bref aperçu des modèles informatiques dans ces deux catégories et résume les modèles qui étaient disponibles à l'automne de 1993, pour les eaux canadiennes.

1.1 Étapes de modélisation et décisions

La Figure 7 montre une approche en matière de modélisation du site d'immersion. L'étape 1 consiste à préciser le matériau qui doit être déposé au fond - ses propriétés physiques et chimiques, son poids spécifique et son volume - ainsi que les méthodes d'immersion. En général, la méthode d'immersion détermine le choix du modèle de devenir à court terme. Une immersion instantanée, ou une série de telles immersions, peut être modélisée à l'aide de STFATE. L'immersion continue peut être examinée à l'aide du modèle SED_DISP. Dans les deux cas, le résultat de l'opération est la cartographie des limites du lieu d'immersion. Le chapitre suivant étudie ces modèles plus en détail.

L'étape 2 porte sur le devenir à long terme des matériaux immergés. D'abord, le milieu sédimentaire naturel est classé en termes de caractéristiques grossières : fond sableux ou fond vaseux, fond plat ou terrain accidenté, et formes évidentes ou non. Les données sur la granulométrie provenant des échantillons ponctuels ou des carottes peuvent également servir pour déduire le déplacement du fond, et ainsi indiquer si la zone en est une de dépôt net, d'érosion nette ou d'équilibre (voir la section 6 sur la modélisation de l'évolution des sédiments). Le résultat est une première évaluation des signes que des processus de transport des sédiments interviennent. Si de tels signes n'existent pas, la modélisation n'est peut-être pas nécessaire ou l'application d'un simple modèle peut être justifiée pour confirmer l'interprétation géologique. Si par contre il existe des signes de transport des sédiments, le matériau qui constitue le fond doit alors être classé en fonction de sa distribution granulométrique et de sa cohésivité.

Lorsque le fond est constitué de sable et de gravier non cohésifs, plusieurs modèles peuvent s'appliquer. Les trois premiers sont les plus faciles à utiliser et peuvent être exécutés par des non-spécialistes sur des ordinateurs personnels. Ils fournissent la vitesse de transport potentiel des sédiments. Le terme potentiel signifie simplement que l'épaisseur des sédiments du fond est supposée infinie et que l'approvisionnement en matériau est illimité. La clé du succès consiste à déterminer les données hydrodynamiques d'entrée et, dans le cas de certains modèles, les caractéristiques de rugosité du fond. Lorsque la vitesse de transport des sédiments est élevée, la dispersion du matériau déposé sur une région est importante. Dans ce cas, la modélisation morphologique - qui fournit des prévisions relatives à l'évolution du fond marin - sera nécessaire. Les trois premiers modèles peuvent tous être transformés en modèles morphologiques; les deux derniers modèles de la liste exécutent déjà des calculs de l'évolution du fond.

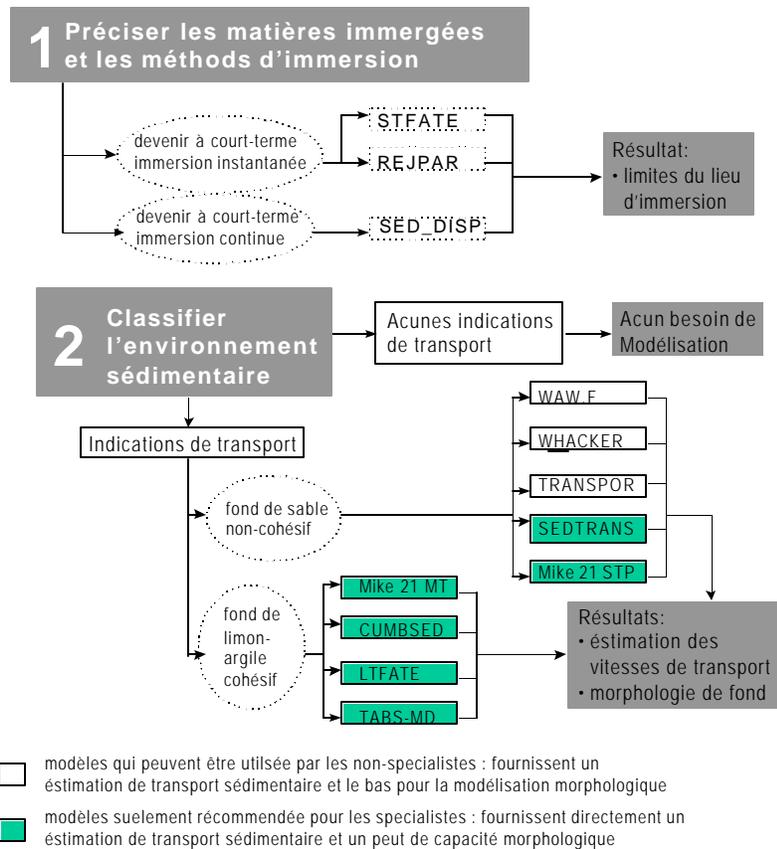


Figure 7. Étapes de la prise de décisions quant à la modélisation du lieu d'immersion et résumé des modèles disponibles.

En général, c'est toute une démarche que de passer d'un modèle de transport potentiel à un point donné à un modèle morphologique intégral. Cette démarche n'est pas recommandée à ceux qui ne sont pas familiers avec la modélisation numérique et avec la théorie du transport des sédiments.

Lorsque les sédiments du fond sont cohésifs, particulièrement dans le cas d'un fond mou et moelleux à forte teneur en matières organiques, il faut utiliser des modèles spécialisés de transport de vase. Il en existe trois (voir Figure 7), mais les trois comportent des codes complexes conçus pour être exécutés par des spécialistes, avec beaucoup de données sur le terrain. Ces modèles ne sont pas recommandés pour les modélisateurs inexpérimentés.

Le résultat de la modélisation à long terme est soit : 1) une évaluation de la vitesse de transport des sédiments naturels ou des sédiments naturels et déposés pour une gamme de courants et de vagues sur le site; soit 2) une prévision des zones d'érosion et de dépôt des matériaux constituant le fond dans toute la région entourant un lieu d'immersion. Tous les modèles de transport des sédiments qui prévoient la vitesse de transport potentiel à un point donné sont cependant limités : on ne peut pas savoir sur quelle distance la matière sera dispersée. Par contre, on peut connaître la quantité de matière délogée d'un lieu d'immersion; on peut trouver le temps que

nécessitera la dispersion de toute la charge déversée en calculant la vitesse du courant et l'état des vagues en fonction du temps sur le site. Les étapes de l'évaluation de la distance de dispersion ou du temps d'élimination nécessiteront une programmation additionnelle à celle déjà requise pour exécuter des modèles de transport des sédiments.

Tous les modèles de transport des sédiments dépendent grandement de l'hydrodynamique de forçage. Des erreurs de l'ordre de 10 à 20 % dans les données sur les courants et les vagues peuvent être amplifiées par les modèles de transport des sédiments et se traduire par des erreurs de plusieurs ordres de grandeur dans l'estimation des vitesses de transport. Il faut donc accorder un soin particulier aux données d'entrée sur les vagues et les courants. Il arrive souvent que ces données ne sont pas disponibles à partir de mesures et qu'elles ne peuvent être obtenues qu'à l'aide de modèles numériques spécialisés. Lorsque le transport des sédiments dépend grandement des orages - ce qui est souvent le cas dans les eaux côtières peu profondes - des modèles de prévision à fortiori des vagues seront probablement nécessaires en plus des modèles prévisionnels des courants afin d'établir les paramètres des conditions qui entraînent la remise en suspension des sédiments ainsi que leur transport. À l'instar des modèles de transport de vase décrits dans les chapitres suivantes, ces modèles hydrodynamiques et de prédiction des vagues nécessitent des données pour les conditions limitrophes, un étalonnage et une vérification, et ils nécessitent souvent le concours de spécialistes expérimentés dans ces nouveaux domaines.

Il faut se rappeler les données hydrodynamiques d'entrée nécessaires pour exécuter un des modèles de transport des sédiments suivants lorsqu'on désire appliquer un ou plusieurs de ces modèles à un site donné.

Il convient de remarquer que la plupart des modèles de transport des sédiments sont très empiriques et qu'ils ne possèdent pas les propriétés physiques nécessaires pour être appliqués à différents sites avec le même degré de confiance. Les résultats des modèles doivent généralement être utilisés comme indicateurs pour savoir s'il s'agit d'un site de dépôt ou non et pour donner une évaluation approximative de l'importance du transport des sédiments et des conditions de vagues et de courants dans lesquelles se fait ce transport. Plus le degré de précision requis augmente, plus il faut des données obtenues sur le terrain pour l'étalonnage et la vérification et plus il faut faire appel à des spécialistes pour l'interprétation.

2. DÉPÔT INITIAL

De nombreux modèles de cette catégorie sont utilisés pour calculer la superficie du fond marin couvert par le matériau immergé, l'épaisseur de la couche et la distribution spatiale des matériaux de dragage. Les données obtenues grâce à ces modèles sont ensuite utilisées pour tracer les limites du site. Il existe deux types de modèles qui se distinguent par le type de largage utilisé :

- 1) les modèles de devenir à court terme pour un largage instantané, généralement des matériaux de dragage, à partir de barges et de trémies;
- 2) les modèles de devenir à court terme pour un largage continu, généralement associés au dragage continu ou aux installations de forage et de production d'hydrocarbures en mer.

Le largage instantané à partir de trémies et de barges est généralement associé aux opérations de dragage mécanique ou hydraulique. La teneur en eau du matériau à immerger peut donc varier considérablement (15 à 95 %). Les particules de sédiments associées au largage continu ont généralement une teneur élevée en eau qui dépend de la nature de la technique de dragage ou des systèmes de récupération de la vase et des systèmes de lavage des déblais de forage utilisés par l'industrie pétrolière.

2.1 Modèle de devenir à court terme STFATE : largage instantané

Le modèle STFATE est un module du *Automated Dredging and Disposal Alternatives Management System* (ADDAMS) mis au point par l'*US Army Engineer Waterways Experiment Station* à Vicksburg (MS) et traite spécifiquement du largage instantané de déblais de dragage.

Base théorique

Le comportement du matériau largué est décrit en trois phases, indiquées de façon schématique à la Figure 8 :

- 1) *descente convective* - où le déplacement du nuage est dominé par la gravité et sa quantité de mouvement initiale;
- 2) *affaissement dynamique* - se produit lorsque le nuage entre en contact avec le fond marin ou qu'il atteint une densité neutre, de sorte que le mouvement vertical est retardé et que la dispersion horizontale domine;
- 3) *transport-diffusion passif* - commence lorsque le matériau est transporté par les courants ambiants et la turbulence de fond.

La charge totale à larguer de la barge ou de la trémie est divisée en de multiples nuages de forme présumée hémisphérique. L'immersion est représentée par une série de ces nuages. Étant donné que la concentration des solides du matériau immergé est censée être faible, chaque nuage se comporte comme un liquide dense au cours de la descente convective, et le modèle est basé sur l'analyse d'un panache thermique flottant. Les principales équations expriment la conservation de la masse, de la quantité de mouvement, de la flottabilité, des particules et du tourbillonnement.

Durant la phase de descente, des particules fines et des polluants dissous s'échappent des nuages et sont introduits dans la colonne d'eau. On a ainsi observé qu'environ 5 % du matériau disparaît du nuage convectif dans 100 pieds d'eau.

Durant l'affaissement dynamique, le modèle est basé sur les mêmes équations de conservation que durant la phase convective, avec une fonction «forme» qui varie selon que le nuage ralentit dans la colonne d'eau ou qu'il entre en contact avec le fond. Dans le premier cas, une forme de sphéroïde aplati. Dans le dernier, on suppose une forme ellipsoïdale.

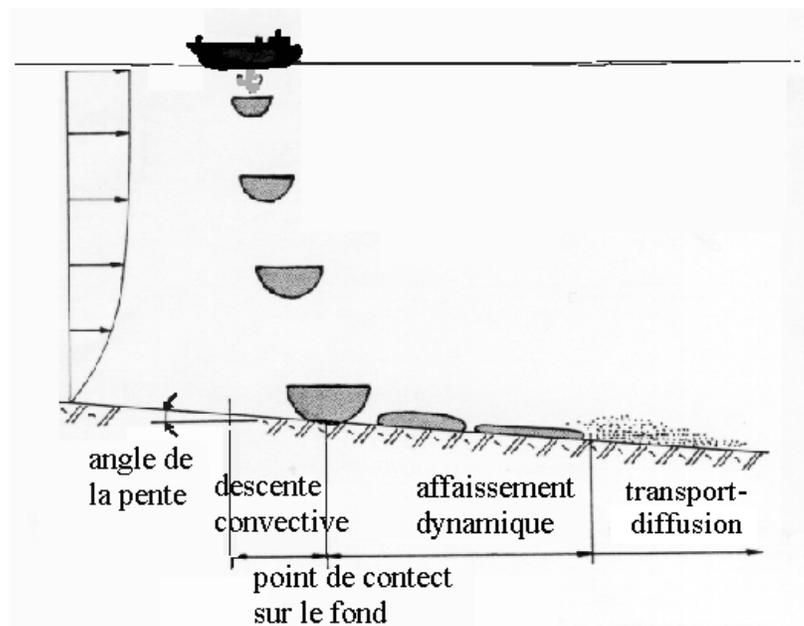


Figure 8. Illustration schématique de l'immersion de déblais de dragage indiquant les trois phases de la décantation au fond.

La phase de l'affaissement se termine lorsque le taux d'étalement dû à la diffusion turbulente est supérieur à celui du nuage qui s'affaisse. Des expériences en laboratoire et des données prises sur le terrain indiquent que des matières fines se perdent dans la colonne d'eau, dans la partie supérieure du nuage qui s'affaisse. Ces matières et les polluants qui s'en libèrent sont ensuite sujets à un transport par les courants ambiants et à la

diffusion par la turbulence, et des particules se déposent. Ainsi, les fractions de sédiments fins se déposent au fond après que les fractions grossières s'y soient déposées, et couvrent une plus grande superficie.

Le modèle est solutionné sur une grille cartésienne constituée d'espacements uniformes dans chaque direction; cette grille fournit une résolution spatiale de la zone concernée. Elle se limite aux eaux libres, sans indiquer le rivage.

Le modèle *STFATE* ne prévoit pas la remise en suspension du matériau une fois que celui-ci s'est déposé au fond. Un critère de contrainte de cisaillement critique est cependant utilisé pour contrôler le processus de dépôt original. Lorsque la contrainte qui s'exerce sur le fond à cause des courants ambiants dépasse la valeur critique pour la granulométrie de la fraction solide en suspension, il ne se fait aucun dépôt. Le modèle peut ainsi être appliqué à des sites dispersifs.

Le modèle *STFATE* peut également calculer les concentrations de polluants et de sédiments en suspension dans la colonne d'eau. On peut donc avoir une idée des impacts physiques et chimiques des opérations d'immersion sur la colonne d'eau.

Données d'entrée

Les données d'entrée sont précisées dans six catégories :

- 1) *description du site* - spécifications de la grille, pente du fond et densité de l'eau ambiante;
- 2) *océanographie* - profils du courant ambiant (2-points);
- 3) *Entrée-sortie/exécution* - choix de la simulation, de sa durée et des résultats voulus;
- 4) *description du matériau* - fractions solides, vitesses de chute, teneur en eau, couches dans le navire d'immersion et caractéristiques de disparition;
- 5) *opérations d'immersion* - endroit, vitesse, durée, propriétés du navire;
- 6) *coefficients empiriques* - divers coefficients empiriques pour la friction, l'entraînement, la disparition, l'affaissement, la masse apparente et la diffusion (des valeurs par défaut sont données pour tous les coefficients).

L'entrée des données dans le modèle se fait par une interface commandée par menus, et est relativement facile une fois que le modélisateur s'est familiarisé avec la structure d'ensemble du programme. Les résultats sont très sensibles à la description du matériau et aux opérations d'immersion; il faut accorder une attention particulière à ces données d'entrée.

Résultats

Les résultats du modèle sont très détaillés et comprennent :

- 1) reproduction de toutes les données d'entrée
- 2) instantanés à intervalles de temps discrets des paramètres du nuage (position, vitesse, dimensions, contraste de densité, concentrations) durant les phases de descente convective et d'affaissement, et à la fin de la phase d'affaissement;
- 3) à divers moments, instantanés de la concentration des sédiments en suspension;
- 4) à différentes profondeurs, concentrations maximales du traceur/polluant dans la grille et aux limites de la grille.

Les résultats de base sont emmagasinés dans un fichier sur disque. Des options d'impression et de traçage sont prévues dans le programme. La Figure 9 présente un exemple de sortie graphique, donnant l'épaisseur du dépôt en pieds, pour une barge à coque ouvrante, d'une capacité de 3 000 m³, qui se vide en 30 secondes dans

80 m d'eau de profondeur, avec un courant ambiant de 0,18 cm/s. La sortie tabulaire, qui donne l'épaisseur totale du dépôt ainsi que la définition des limites du lieu d'immersion est indiquée à la Figure 10.

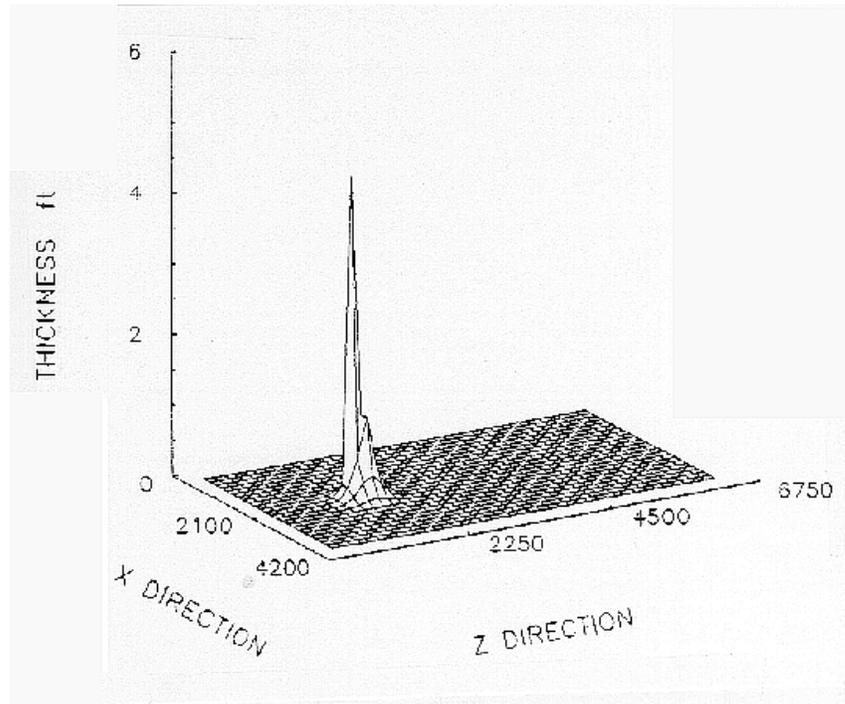


Figure 9. Exemple d'un tracé tridimensionnel de l'épaisseur de dépôt total à partir du modèle STFATE.

THICKNESS ft = ÉPAISSEUR EN pi X DIRECTION = DIRECTION X Z DIRECTION = DIRECTION Z

TOTAL THICKNESS (FT) OF NEW MATERIAL ON BOTTOM, 14400.00 SECONDS AFTER DUMP
 ...MULTIPLY DISPLAYED VALUES BY 1.000 (LEGEND... + = .LT. .01 . = .LT. .0001 0 = .LT. .000001)

M W=	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	31
3 0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4 0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5 0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
6 0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
7 0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
8 0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
9 0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
10 0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
11 0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
12 0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
13 0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
14 0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
15 0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
16 0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
17 0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
18 0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
19 0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20 0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
21 0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
22 0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
23 0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
24 0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25 0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
26 0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
27 0000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Figure 10. Exemple d'un résultat tabulaire indiquant l'épaisseur de dépôt total à partir du modèle STFATE.

TOTAL THICKNESS (FT) OF NEW MATERIAL ON BOTTOM, 14400.00 SECONDS... = ÉPAISSEUR TOTALE (EN PI) DE NOUVEAU MATÉRIAU AU FOND, 14 400 SECONDES APRÈS LE LARGAGE... MULTIPLIE LES VALEURS AFFICHÉES PAR 1 000 (LÉGENDE...

2.2 Modèle de devenir à court terme REJPARG : largage instantané

REJPARG est un modèle simple fonctionnant sur ordinateur personnel qui décrit les phases initiales de descente et d'étalement d'une charge de sédiments largués de façon instantanée à partir d'une barge ou d'un chaland. Il a été conçu et programmé pour être appliqué aux estuaires caractérisés par de forts courants de marée et exige un minimum de données d'entrée pour fournir des prévisions raisonnables. Le modèle est décrit par Drapeau *et al.* (1992).

Base théorique

Ce modèle est semblable au modèle STFATE étant donné qu'il décrit le comportement du matériau en deux phases distinctes :

- 1) *descente convective* - où le mouvement des sédiments est dominé par la quantité de mouvement verticale et la force d'entraînement durant sa descente à partir du chaland jusqu'au point de contact initial avec le fond;
- 2) *étalement dû au courant de densité* - commençant lorsque le nuage atteint le fond et qu'il s'étale de façon latérale en raison du courant de densité au fond.

Drapeau ne tient compte que de deux variables pour la phase de descente convective : le rayon du nuage et la vitesse verticale. Toute la charge de sédiments est traitée comme s'il s'agissait d'un seul et même nuage. Ces deux paramètres sont calculés en fonction de rapports empiriques déjà découverts par Krishnappan (1975) à partir d'une série d'expériences sur les panaches. Le rayon et la vitesse sont ensuite combinés pour définir le flux des sédiments dans le courant de densité.

Seule une fraction des sédiments immergés contribuera à la formation d'un courant de densité. Drapeau *et al.* définissent cette fraction en comparant la vitesse de descente à la vitesse de décantation naturelle des grains de sédiments. Si les deux sont égales, il n'y a alors aucun sédiment pour former un courant de densité, et tout le matériau se dépose au fond à l'intérieur du rayon de descente finale. Cependant, lorsque la vitesse de descente dépasse la vitesse de décantation naturelle, il y a alors de l'énergie excédentaire disponible pour produire un flux de courant de densité. La quantité de sédiments qui contribue au courant de densité est exprimée sous forme de constante empirique multipliée par la vitesse excédentaire sans dimension (la vitesse de descente moins la vitesse de sédimentation normalisée par la vitesse de descente). La constante empirique trouvée est 0,5.

On suppose que le courant de densité s'étale de façon radiale à partir du rayon initial défini au point de contact avec le fond. On suppose que la dynamique du courant de densité suit les résultats des travaux de Middleton (1966a,b) dans lesquels on établit un rapport entre la vitesse radiale externe et l'épaisseur initiale de la couche du courant de densité à partir de la différence de densité (dans ce cas-ci, entre le flux chargé de sédiments et l'eau de mer). On suppose de plus que lorsque le courant de densité s'étale vers l'extérieur, son volume demeure constant; sur le plan géométrique, cette hypothèse exige que l'épaisseur de la couche diminue proportionnellement au temps et à la distance à partir du point d'impact. Le modèle tient également compte de la perte de sédiments par décantation à partir du courant de densité. Cette perte diminue l'épaisseur de la couche et est prise en compte dans l'algorithme de solution.

L'advection due au courant de marée n'est modélisée que dans la deuxième phase de courant de densité.

Contrairement au modèle STFATE, REJPARG ne tient compte d'aucun mécanisme de disparition, il ne prévoit donc pas de concentration de sédiments en suspension au-dessus de la concentration produite à l'intérieur du courant de densité.

Données d'entrée

Les données d'entrée suivantes sont utilisées dans le modèle REJPAR :

- 1) *données sur le site* - profondeur de l'eau (on suppose une profondeur uniforme);
- 2) *océanographie* - séries chronologiques du courant ou ellipse des marées (on suppose que les courants sont uniformes pour une profondeur donnée);
- 3) *description du matériau* - le volume de sédiments par charge d'immersion, le nombre de charges, et le pourcentage en poids des sédiments dans chacune des trois catégories granulométriques;
- 4) *données sur les opérations d'immersion* - le rayon de l'erreur de navigation (choix au hasard d'un lieu d'immersion réel avec une erreur de positionnement précisée par l'utilisateur).

Résultats

Le modèle vise à calculer l'accumulation totale des sédiments sur le fond marin après plusieurs déversements à un endroit donné, exprimée en centimètres. On suppose que les largages se font au centre d'une grille de 2 km de côté, divisée en mailles de 10 m - en tenant compte de l'erreur de navigation. Ces mailles ne sont pas définies par l'utilisateur mais ont plutôt des valeurs par défaut; cette valeur n'est utilisée que pour calculer l'accumulation des sédiments déposés.

Le résultat de l'opération consiste en trois fichiers de données : 1) le fichier de la matrice de sédimentation qui indique l'épaisseur dans chaque maille, 2) une coupe nord-sud et une coupe est-ouest. Ces fichiers de données permettent de faire le tracé et le contour de l'accumulation de

sédiments et de présenter un tracé à mailles tridimensionnelles (Figure 11). D'après Drapeau *et al.*, les graphiques sont produits à l'aide du programme *Surfer* de Golden Software, Boulder (CO).

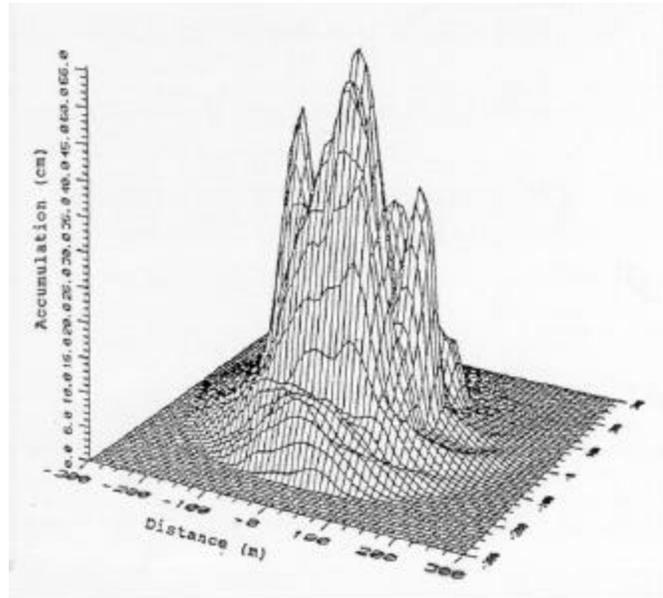


Figure 11. Exemple d'un tracé tridimensionnel de l'épaisseur de matériaux de dragage obtenu à l'aide du modèle REJPAR (extrait de Drapeau *et al.*, 1992)

2.3 Le modèle de devenir à court terme SED_DISP : largage continu

Le modèle *SED_DISP* permet d'établir la configuration du dépôt suite à un largage continu de matières particulières durant plusieurs mois, voire plusieurs années. Ce modèle a été mis au point en 1992 pour le traitement des boues et des débris de forage des puits sous-marins, mais s'applique également bien à tout autre rejet à long terme de particules décrites par un ensemble de catégories granulométriques.

Base théorique

Le modèle *SED_DISP* est basé sur deux hypothèses fondamentales : 1) la vitesse de chute et le transport des particules individuelles sont indépendants et 2) les courants ambiants peuvent être traités en tant qu'écoulements constants dans le temps. La première hypothèse signifie que le comportement des particules des sédiments ne dépend pas des propriétés physiques de la boue solide-liquide, y compris son inertie et sa flottabilité, au point de largage. Dans certains cas, cette hypothèse est trop restrictive à proximité du point de largage. Un modèle de panache flottant est alors appliqué pour prévoir l'endroit où le panache atteint une

densité neutre et ralentit. À ce point, la phase liquide est en équilibre avec l'eau ambiante, il n'y a aucune inertie résiduelle et le matériau peut se décanter en suivant la dynamique des particules. On peut se procurer des modèles de panache flottant auprès de l'*Environmental Protection Agency* des États-Unis (voir Baumgartner *et al.*, 1993 pour plus de détails).

La deuxième hypothèse est avancée pour le traitement des données d'entrée sur le courant. Les courants sont clairement le facteur dominant qui régit le devenir à court terme du matériau déversé. Lorsqu'il y a déversement sur une longue période de temps, la configuration du dépôt final reflète la somme de toutes les vitesses et de toutes les directions du courant qui ont traversé le site au cours de cette période. Il est donc important de calculer le dépôt pour toutes les conditions d'écoulement. Le modèle *SED_DISP* est spécialement formulé pour utiliser un diagramme en grappe-vitesse-direction pour les données d'entrée sur le courant; ce diagramme donne la fréquence de chaque condition d'écoulement et est calculé de façon régulière à l'aide de données obtenues à partir des courantomètres.

On suppose que chaque écoulement, donné par une vitesse et une direction sur le diagramme, ne varie pas avec le temps durant la décantation. De par leur nature, les courants de marée océaniques ont tendance à effectuer une rotation de 360° toutes les 12 à 24 heures; l'hypothèse de l'écoulement constant semble donc restrictive. Cependant, le temps de décantation des fractions boueuses et argileuses dépasse souvent plusieurs jours pour des profondeurs de quelques dizaines de mètres ou plus. Étant donné cette durée de décantation, l'hypothèse de l'écoulement constant, qui établit la moyenne de l'influence de la marée pour donner un écoulement net, est raisonnable et le modèle s'applique à de nombreux types d'endroits. Dans le cas des fractions plus grossières de sable et de gravier, le temps de décantation n'est que de quelques minutes et l'hypothèse est valide sans qualification.

Les données d'entrée sur les courants peuvent varier dans l'espace pour chaque condition d'écoulement. Il s'agit d'une importante caractéristique lorsque la structure au point de largage modifie le champ d'écoulement, auquel cas l'écoulement moyen et le taux de diffusion turbulente varient dans la couche limite autour de la structure et dans le sillon. Les éléments de la vitesse du courant et les valeurs du coefficient de diffusion sont des données d'entrée pour le modèle dans une grille cartésienne régulière. Ces données sont généralement obtenues à l'aide d'un modèle hydrodynamique.

SET_DISP est composé de deux modules : un calcul de la sédimentation et un calcul du dépôt. Chaque fraction granulométrique est définie par un nombre de particules, généralement plusieurs milliers. La position de chaque particule est donnée dans un espace tridimensionnel grâce à ses coordonnées x, y et z. Ces positions changent à mesure que les particules sont transportées par le courant moyen, à mesure qu'elles se décantent à une vitesse de chute prescrite et à mesure qu'elles sont diffusées par la turbulence. Le calcul s'effectue jusqu'à ce que toutes les particules atteignent le fond ou qu'elles soient transportées à l'extérieur des limites du modèle. La diffusion est modélisée sous forme de processus de marche aléatoire, dont l'échelle est établie en fonction du coefficient de transports verticaux. Le résultat du module de sédimentation est le taux d'accumulation en $\text{kg/m}^2/\text{h}$ dans chaque cellule de la grille du modèle pour chaque fraction granulométrique, pour chaque condition de courant.

Le module de dépôt fait la somme de ces taux de sédimentation multipliés par la fréquence des conditions de courant durant toute la période du largage. Le résultat est le poids total en kilogrammes, des sédiments déposés dans chaque cellule de la grille. On calcule les épaisseurs du dépôt en divisant par le poids spécifique submergé en kg/m^3 .

Données d'entrée

Les données d'entrée suivantes, stockées dans des fichiers, sont nécessaires :

- 1) *paramètres d'exécution* - nombre de types d'effluents, données sur les propriétés de sédimentation pour chaque effluent, nombre et emplacement des points de largage (plusieurs sont permis), dimensions de la grille et espacement des lignes, durée du largage et divers paramètres de contrôle;
- 2) *données sur le courant* - diagramme en grappe-ciel de la vitesse par rapport à la direction (16 directions sont recommandées), élément vitesse et données sur le coefficient de turbulence répartis sur la grille;
- 3) *masque de la grille* - ensemble d'entiers relatifs définissant chaque cellule de la grille comme étant un point d'eau ou de terre/plate-forme pour vérifier les calculs.

SED_DISP permet de traiter plusieurs types d'effluents, ce qui est très pratique lorsque les opérations modifient la distribution granulométrique du matériau déversé avec le temps. Chaque type d'effluent est précisé à l'aide d'un programme tableur contenant des informations qui figurent au tableau 5. Les données consistent en une désignation de chaque élément, de sa granulométrie, de sa vitesse de chute, du poids spécifique déposé (densité) et de la composition en pourcentage du poids, ainsi que du taux de largage. Le nombre de particules pour chaque catégorie granulométrique est également donné dans le tableau. La précision de la solution dépend du fait qu'il faut posséder un nombre suffisant de particules dans chaque catégorie granulométrique; il suffit généralement d'en avoir 2 000 ou plus par catégorie.

Tableau 5. Exemple de fichier d'entrée pour le modèle SED_DISP
Vitesse de largage : 200 kg/h

N°	Composante	D (mm)	w (m/s)	Densité (kg/m ³)	Composition (% poids)	Vitesse de largage (kg/h)	Nombre de particules
1	granulaire	5	0,297	1 835	16,0%	32,00	4 000
2	sable grossier	1,25	0,148	1 962	9,0%	18,00	4 000
3	sable moyen	0,25	0,066	1 996	4,0%	8,00	4 000
4	aggloméré	0,15	0,051	1 999	15,0%	30,00	4 000
5	limon/vase	0,06	0,00331	2 002	56,0%	112,00	4 000
					100,00%	200,00	

Comme l'indique le tableau 5, on peut tenir compte de l'agglomération des fines particules en ajoutant une catégorie appropriée et en précisant une vitesse de chute effective pour les particules floculées.

Résultats

Les données de sortie de SED_DISP consistent en fichiers reproduisant les données d'entrée et en fichiers donnant le dépôt total (kg/m^2) et l'épaisseur correspondant (cm) après la période de largage précisée. Si on utilise plusieurs types d'effluents, ces résultats sont également donnés pour chaque type. Ces données sont stockées dans des tableaux correspondant à la grille.

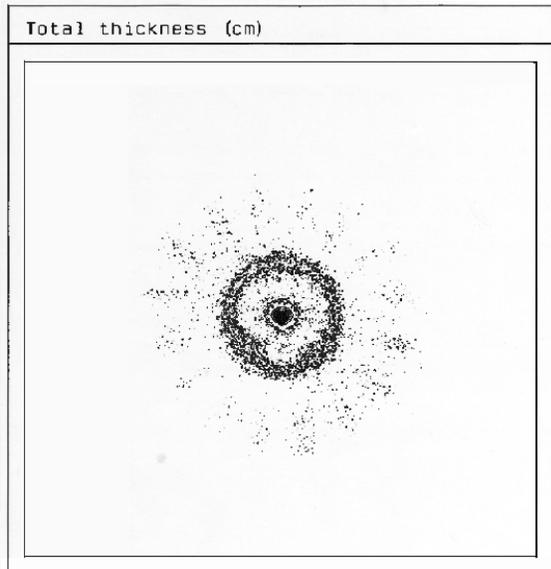


Figure 12. Exemple du traçage du contour de l'épaisseur de dépôt à l'aide du modèle SED_DISP.

Total thickness (cm) = **Épaisseur totale (cm)**

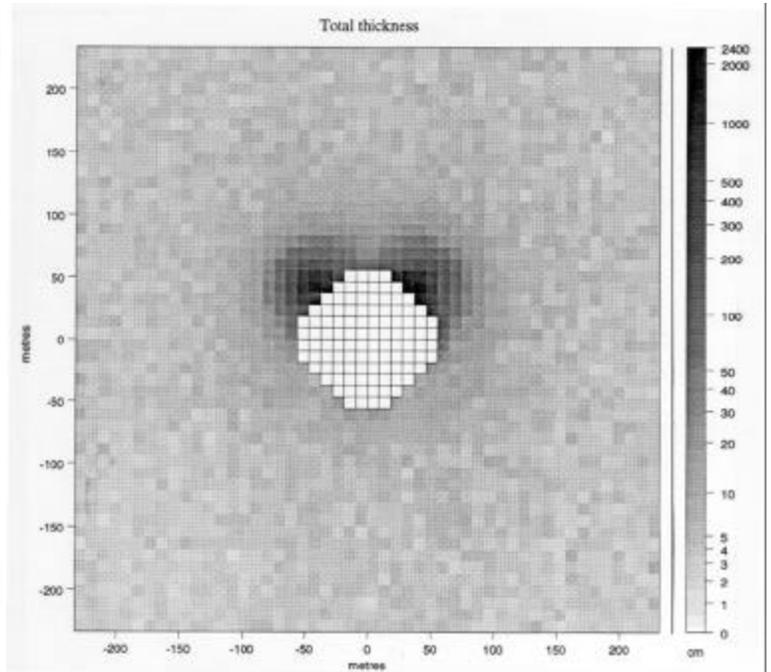


Figure 13. Exemple d'un tracé sur imprimante postscript de l'épaisseur de dépôt à l'aide du modèle SED_DISP.

metres = **mètres** Total thickness = **Épaisseur totale**

Il existe un logiciel de traçage pour afficher les données sur une matrice à cellules à l'aide d'une imprimante post-script. Les figures 5 et 6 donnent des exemples de ces procédés pour un programme de forage en mer comportant deux chutes de déversement placées de façon symétrique de chaque côté de l'axe d'une plate-forme. Cette information peut ensuite être utilisée pour définir les limites de la superficie couverte par le dépôt initial.

3. MODÉLISATION DU TRANSPORT DES SÉDIMENTS APRÈS L'IMMERSION

3.1 SEDTRANS (sédiments non cohésifs)

SEDTRANS est un modèle de charge totale pour les sédiments non cohésifs soumis à l'action des courants seuls ou des courants et des vagues. Il a été mis au point au cours des 15 dernières années par la Commission géologique du Canada, et le modèle a évolué en même temps que la connaissance des processus de transport du plateau continental à partir d'observations faites sur le terrain. Le modèle a été décrit dans plusieurs publications, dont les plus récentes sont Amos (1988) et Martec (1989). Il a été appliqué dans une forme unidimensionnelle (transport à un point donné) (Davidson, 1984) et dans une forme bidimensionnelle sur une grille de points couvrant une grande superficie (Amos et Judge, 1991).

Formulation de base

Les contraintes de fond pour les courants constants sont déterminées à l'aide d'une vitesse de référence à 1 m au-dessus du fond marin et un coefficient de traînée constant publié. Les contraintes dues aux seules vagues sont calculées à l'aide du déplacement maximal des particules attribuable aux vagues, obtenu en faisant appel à la théorie des vagues linéaires, aux facteurs de friction de Jonsson (1966) modifiées et à la rugosité de fond étalonnée en fonction de la granulométrie (D ou D_{50}). Les contraintes de fond soumises à des conditions de vagues et de courants sont basées sur la théorie de Grant et Madsen (1979).

Des seuils de mouvement initial sont appliquées au transport de la charge de fond (d'après Miller *et al.*, 1977) et au transport de la charge en suspension à l'aide du rapport de vitesse de chute de Bagnold (1966). Un des plus importants aspects du modèle SEDTRANS réside dans le fait qu'on calcule la partie de chaque période de vagues au cours de laquelle les courants dépassent les valeurs seuils. Ce calcul donne les contraintes de fond instantanées qui sont intégrées pour donner une contrainte de transport moyenne calculée en fonction des vagues. Cette contrainte est ensuite utilisée dans une des quatre formules de transport choisie par l'utilisateur (E-H, Einstein-Brown, Yalin (1963) et Bagnold). On suppose que le transport des sédiments se fait dans la même direction que la contrainte moyenne de fond qui est colinéaire avec le courant lorsqu'on ne tient compte que des courants, ou telle que déterminée à partir de la formule de Grant et Madsen (1979) dans des conditions combinées de vagues et de courants.

Ce modèle peut être utilisé pour simuler une répartition granulométrique caractérisée par D_{50} , ou appliqué de façon séquentielle à toute une gamme de granulométries représentant une répartition donnée. Dans ce dernier cas, on trouve le transport en faisant la somme de toutes les granulométries.

Données d'entrée

Les données d'entrée sont :

- 1) *données sédimentaires* - granulométrie D_{50} , poids spécifique des minéraux ou un ensemble de granulométries et poids spécifiques correspondants, rugosité absolue du fond;
- 2) *données hydrodynamiques* - courant qui varie lentement à une hauteur de référence de 1 m au-dessus du fond marin, hauteur de la vague, période de la vague et direction de propagation des vagues (la hauteur de la vague significative a été utilisée dans les exemples);
- 3) *données sur le site* - profondeur de l'eau, poids spécifique de l'eau;
- 4) *paramètres d'exécution* - information sur la grille, formule de transport des sédiments, options quant aux résultats.

Le modèle est établi pour exécuter des séries chronologiques de conditions de courants et de vagues sur une grille où ces données ont été produites à partir de modèles prévisionnels à posteriori.

Résultats

Le modèle SEDTRANS donne une évaluation de la vitesse de transport des sédiments en kg/m/s et la direction correspondante à chaque point de la grille pour chaque condition de courant/vague d'entrée. Il existe des programmes de traçage pour cartographier les vitesses de transport.

3.2 WAW.F (sédiments non cohésifs)

Le modèle WAW.F est basé sur la modification du modèle Ackers et White par Willis (1979). Cette modification tient compte de l'influence des vagues sur le transport des sédiments. À l'instar du modèle AW original, il s'agit d'un calcul de la charge totale. Le modèle a été mis au point par la Seaconsult Marine Research Ltd. et est décrit dans Hodgins et Sayao (1986) et Sayao *et al.* (1987).

Formulation de base

Afin d'être appliquée dans des conditions combinées de vagues et de courants, la formule AW a été allongée comme suit :

$$Q_s = \rho_s U D_{35} \{ P_{fg} / (\langle u_* \rangle \tau_{fg}) \}^n \{ P_{cg} / (\tau_{cg} U) \}^{1-n} C_1 \{ F/A-1 \}^m \quad (1)$$

où P = la puissance du courant, and
 fg, cg = indices de grains fins et de grains grossiers.

Dans des écoulements unidirectionnels constants, l'équation (1) se réduit en :

$$Q_s = U D_{35} \{ U / \langle u_* \rangle \}^n C_1 \{ F/A-1 \}^m \quad (2).$$

Dans le modèle WAW.F, les paramètres $\langle u_* \rangle$, τ et P sont tous calculés à la fois pour les fractions de grains fins et les fractions de grains grossiers. Le facteur de friction combiné vagues-courants f_{cw} est évalué à l'aide de la méthode de Tanaka et Shuto (1984), et on suppose que ce facteur de friction ne peut être appliqué qu'au terme oscillatoire. On suppose également que le coefficient adimensionnel de Chezy, c , peut être appliqué au terme courant moyen. La rugosité effective appliquée au coefficient de Chezy pour les grains fins comprend un facteur pour les micro-reliefs sous-marins. La géométrie des micro-reliefs sous-marins est prévue à l'aide des droites conçues par Mogridge (1973), et la rugosité effective est calculée d'après van Rijn (1982). De cette façon, on tient compte de l'influence de la rugosité du micro-relief marin.

La contrainte de fond combinée vagues-courants est alors définie à l'aide de l'équation suivante :

$$\tau = \rho \{ U^2 / c^2 + W^2 f_{cw} u_o^2 / 4 \} \quad (3)$$

où u_o = amplitude du mouvement oscillatoire horizontal, incluant l'effet du courant, calculée à l'aide de la théorie des vagues linéaires, and
 W = coefficient empirique de cisaillement de la vague de Willis (1979).

Les facteurs c et f_{cw} incorporent la rugosité effective du lit dans ces calculs; l'utilisateur n'a pas à préciser leurs valeurs, ils sont calculés par le modèle. Le facteur W est introduit pour modifier le terme contrainte de cisaillement en présence de vagues afin de compenser les seuils différents de mouvement initial en présence de vagues et en présence de courants

La direction du transport des sédiments est prise dans la direction du courant moyen U à chaque étape.

Le modèle est appliqué à un endroit pour une série chronologique de courants et de vagues horaires. Le modèle pourrait facilement être transformé en sous-programme et incorporé dans un modèle à grille pour les calculs morphologiques, ce qui n'a encore jamais été fait.

Données d'entrée

Les données d'entrée sont :

- 1) *données sédimentaires* - granulométries D_{35} et D_{90} , et poids spécifique des minéraux;

- 2) *données hydrodynamiques* - courant à variation lente à une hauteur de référence de 0,5 m au-dessus du fond marin (supposé être représentatif de la vitesse moyenne calculée en fonction de la profondeur utilisée par AW, la moyenne quadratique de la hauteur de la vague, la période de la vague et la direction de propagation de la vague,
- 3) *données sur le site* - profondeur de l'eau, poids spécifique de l'eau,
- 4) *données sur le site* - profondeur de l'eau, poids spécifique de l'eau.

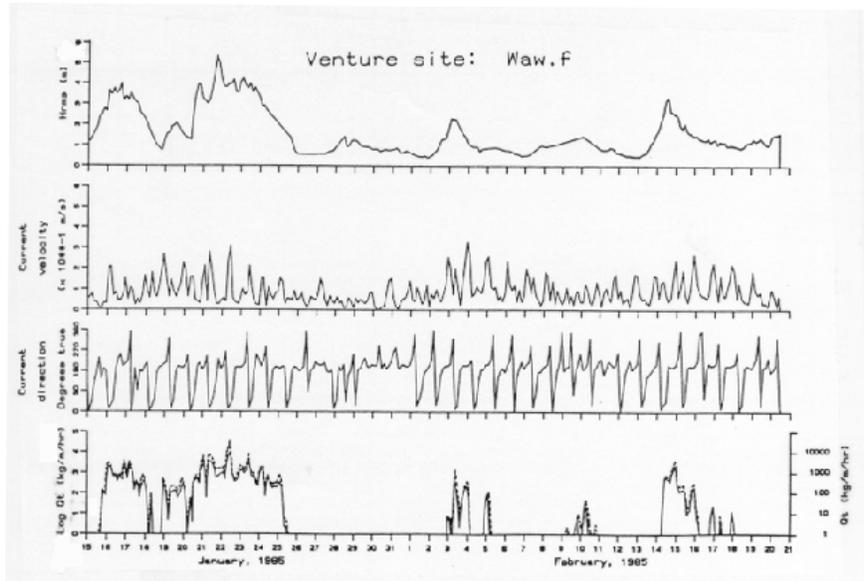


Figure 14. Exemple de séries chronologiques de données d'entrée sur les courants et les vagues, et de séries chronologiques du transport de sédiments Q_s , à partir du modèle WAW.F (d'après Hodgins et Sayao, 1986).

Output

Le modèle WAW.F donne une évaluation de la vitesse de transport des sédiments en kg/m/h et la direction correspondante à chaque point sur la grille, pour chaque condition de courant/vague

Current velocity =
January

Vitesse du courant
= Janvier

d'entrée. La Figure 14 donne un exemple des résultats de ce modèle; ces résultats proviennent de la plate-forme Scotian, à 30 m de profondeur, dans un milieu de sable bien trié. Les données sur les vagues et les courants ont été mesurées au cours de cette analyse (voir Hodgins et Sayao, 1986).

3.3 WHACKER (sédiments non cohésifs)

Le modèle WHACKER a été mis au point par D. Willis en 1979 au Conseil national de recherches et publié dans Willis (1979). Il s'agit d'une modification du modèle de la charge totale de d'Ackers et White, élargissant la formulation pour tenir compte des conditions de vague et de courant. Le modèle WHACKER a servi de base au modèle WAW.F décrit plus haut, et les deux codes sont semblables à presque tous les points de vue.

Formulation de base

Pour une application dans des conditions combinées de vagues et de courants, la formule AW du modèle WHACKER est donnée par l'équation (1), et la méthode d'évaluation des termes est très semblable. Il y a cependant une différence, le modèle WHACKER utilise l'approche de Jonsson (1966) qui calcule la contrainte de fond due aux vagues, plutôt que la formulation plus récente de Tanaka et Shuto (1984) utilisée dans le modèle WAW.F pour la contrainte de fond vagues/courants combinés.

La rugosité du lit est précisée sous forme de donnée d'entrée directe dans le modèle WHACKER. Le modèle est appliqué à un endroit pour une série chronologique de conditions de courants et de vagues d'entrée. Le modèle a été refondu en un sous-programme et implanté dans un modèle à grille pour le transport des sédiments (Willis, 1991).

Données d'entrée

Les données d'entrée sont :

- 1) *données sédimentaires* - granulométrie D_{35} et poids spécifique des minéraux, hauteur de la rugosité du lit;
- 2) *données hydrodynamiques* - vitesse du courant à certaines hauteurs de référence au-dessus du fond marin, hauteur de la vague et période de la vague;
- 3) *données sur le site* - profondeur de l'eau, poids spécifique de l'eau.

Résultats

Le modèle WHACKER donne une évaluation de la vitesse de transport des sédiments en kg/m/s à chaque endroit pour chaque condition de courant/vague d'entrée.

3.4 TRANSPOR (sédiments non cohésifs)

Le laboratoire d'hydraulique de Delft, aux Pays-Bas, a participé à l'élaboration de modèles de transport des sédiments durant de nombreuses années. Leo van Rijn (1989) a résumé la plupart de leurs travaux et a publié un modèle prévisionnel détaillé appelé TRANSPOR dans *Handbook, Sediment Transport by Currents and Waves*.

Formulation de base

Dans la méthode de van Rijn, la charge de fond est donnée par l'équation suivante :

$$Q_{sb} = \langle u_* \rangle D_{50} T^{1.5} / (4D_{gr}^{0.3}) \quad (4)$$

où la vitesse de cisaillement $\langle u_* \rangle$ est calculée à partir de la vitesse du courant et de la rugosité des grains. T est un paramètre de brassage adimensionnel proposé par van Rijn, relié à la contrainte combinée vagues/courants et à la contrainte critique.

La charge en suspension Q_{ss} est évaluée à partir de l'intégrale suivante :

$$Q_{ss} = \int_a^d U(z)C(z) dz \quad (5)$$

où C = concentration dépendante de la profondeur moyenne calculée en fonction du temps,
 z = dimension verticale,
 U = écoulement moyen, vitesse dépendant de la profondeur (calculée à l'aide d'une loi théorique de la couche limite).

La variation $C(z)$ est calculée en intégrant numériquement l'équation suivante

$$dC/dz = -(1-C)^5 C w_s / \epsilon \quad (6)$$

dans laquelle w_s est la vitesse de chute du grain et ϵ est la viscosité turbulente. L'intégration nécessite la concentration à la hauteur de référence a , donnée par l'équation suivante :

$$C(a) = 0,015 D_{50} T^{1.5} / (a D_{gr}^{0.3}) \quad (8)$$

Enfin, $Q_{sb} + Q_{ss}$ est le transport total produit par le courant.

Un aspect important de la méthode de van Rijn réside dans l'évaluation séparée des contraintes de fond dues

aux vagues, aux courants et à l'interaction des vagues et du courant à l'aide des longueurs de rugosité appropriées à chacun. Les contraintes de fond sont combinées pour obtenir une contrainte effective, ainsi que le paramètre T, qui englobe la contrainte critique. De plus, le traitement de l'écoulement de la couche limite, de la hauteur de référence et de la concentration de référence reflète les différences qui existent dans la rugosité de fond, d'une granulométrie à l'autre et d'un micro-relief sous-marin à l'autre.

Le code source du modèle TRANSPOR est en FORTRAN; il peut être exécuté seul, ou facilement adapté comme sous-programme à un programme principal. Le modèle est appliqué à un endroit, à un moment donné, pour lequel on possède des données sédimentaires et hydrodynamiques.

Données d'entrée

Les données d'entrée du modèle TRANSPOR sont :

- 1) *données sédimentaires* - granulométries D_{50} et D_{90} , vitesse de chute effective w_s ($= 0,8D_{50}$), rugosité du lit en fonction du courant, rugosité du fond en fonction des vagues, poids spécifique des minéraux, hauteur de référence pour la concentration au fond;
- 2) *données hydrodynamiques* - hauteur de la vague significative et période de pointe du spectre des vagues, vitesse et angle moyens du courant calculés en fonction de la profondeur entre les vagues et les courants, épaisseur de la couche de brassage à proximité du fond en fonction de la vague, rapport sédiments/phase liquide;
- 3) *données sur le site* - profondeur de l'eau, poids spécifique de l'eau de mer;
- 4) *constantes globales* - accélération gravitationnelle, coefficient de viscosité cinématique.

Le modèle de van Rijn nécessite beaucoup plus de paramètres d'entrée directe que les modèles de charge totale décrits précédemment. Principalement des paramètres comme la hauteur de référence pour la concentration des sédiments du fond, l'épaisseur de la couche mélangée à proximité du fond et deux échelles de longueurs de la rugosité, qui sont difficiles à obtenir pour des utilisateurs non spécialisés. Cependant, la documentation de van Rijn dit comment choisir les valeurs de ces paramètres, et donne les équations pour obtenir des caractéristiques de rugosité reliées aux rides d'oscillation. Il faut donc connaître les conditions qui règnent au fond.

On peut également se servir du modèle de van Rijn comme sous-programme et fournir les données d'entrée par le biais d'une liste d'arguments à l'aide d'instructions ou de formules dans le programme d'appel.

Résultats

Le modèle TRANSPOR donne une estimation du transport de la charge en suspension au moyen d'une intégration numérique et d'une formule empirique, et une estimation du transport de la charge de fond à l'aide de la formule susmentionnée, les deux en kg/m/s. Le flux total est la somme des deux composantes.

Le flux de transport des sédiments prévu à l'aide de ce modèle est celui produit seulement par le courant, mais on tient compte de l'influence du champ de vagues. Ce flux se fait dans la direction de l'écoulement du courant. Tout flux additionnel lié uniquement au champ de vagues doit être ajouté aux résultats de ce modèle; van Rijn suggère des équations pour cet élément du transport dans la documentation sur le modèle, mais ces équations ne sont pas incluses dans le modèle TRANSPOR. En général, le transport lié au courant domine la prévision, à moins que la vitesse orbitale des vagues à proximité du fond soit trop grande comparativement au courant, comme en eau peu profonde.

Van Rijn a comparé sa méthode avec des données prises sur le terrain (rivières) et en laboratoire. La Figure 15 donne des exemples de charge de fond et de charge en suspension.

verticale

$$dC/dt = w_s \partial C / \partial z + \partial / \partial z (\epsilon \partial C / \partial z) \quad (9)$$

où $C(z,t)$ = concentration de sédiments par volume
 t = temps
 z = dimension verticale
 ϵ = coefficient de diffusion turbulente verticale.

Le coefficient de diffusion turbulente pour les sédiments est supposé être égal au coefficient de viscosité turbulente dans la couche limite combinée vagues-courants; ce dernier coefficient est calculé à l'aide des rapports de la couche limite supposés dans des vagues non cassantes. Dans des vagues cassantes, on utilise le modèle de turbulence de Deigaard *et al.* (1986) pour obtenir la viscosité turbulente. La condition limite à proximité du fond est prise comme étant la concentration du fond à la hauteur de référence $a = 2D_{50}$. Cette approche est semblable à celle utilisée par van Rijn et constitue une méthode standard pour résoudre les équations.

La formulation du STP est basée sur le modèle publié par Fredsoe *et al.* (1985), modifié de façon à tenir compte des rides d'oscillation produites par les vagues. La variation de $C(a)$ est donnée comme étant une fonction du paramètre q de Shields basé sur les mesures en laboratoire tirées de Nielsen (1979).

Le module est appliqué à une grille de points qui utilise des données d'entrée en séries chronologiques pour les courants et les vagues.

Données d'entrée

Les données d'entrée sont :

- 1) *données sédimentaires* - granulométrie D_{50} et vitesse de chute w_s correspondante sur la grille du modèle;
- 2) *données hydrodynamiques* - vitesse et direction moyennes du courant en fonction de la profondeur, hauteur de la vague significative et période de la vague de crête spectrale, et direction de la vague aux points d'eau de la grille;
- 3) *données sur le site* - profondeur de l'eau sur la grille;
- 4) *paramètres d'exécution* - dimensions de la grille du modèle, espacement et définition terre-eau, durée de la simulation et intervalles de temps, et options en matière de résultats.

Lorsqu'il est utilisé avec le système Mike 21 ST pour la modélisation morphologique, le module STP permet de produire un catalogue de vitesses de transport des sédiments. Ce modèle peut être appliqué dans des milieux de sable moyen à grossier. Dans des régimes allant du sable fin au silt, on croit que le manque de données de concentrations pour les sédiments en suspension en fonction de l'espace et du temps pourraient réduire la vitesse de transport en raison du temps que le modèle prend pour ajuster le profil de concentration aux conditions hydrodynamiques changeantes.

Résultats

Le module STP est conçu pour être utilisé dans la série de programmes Mike 21; le résultat sert donc à fournir des données qui permettent de calculer les changements du fond marin (morphologie) et interagir avec l'hydrodynamique (composantes vagues et courants). Le résultat de base du module STP est une série chronologique de la charge totale des sédiments en $m^3/m/s$ et la direction correspondante du déplacement à chaque point de la grille du modèle. L'évolution du modèle jusqu'en 1993 comprend le partitionnement des sédiments en un ensemble de classes granulométriques et le traitement de chaque classe séparément dans l'étude du transport.

3.5 Module de transport de la vase MT de Mike 21 (sédiments cohésifs)

À l'instar du STP, le MT est un autre module de la série de programmes Mike 21 conçus et commercialisés par l'Institut hydraulique danois. Le module MT est un module prévisionnel détaillé qui donne la concentration moyenne des sédiments calculée en fonction de la profondeur de la colonne d'eau dans des conditions de vagues et de courants, ainsi qu'en fonction changements de la morphologie du fond. Le module MT est intégré dans le programme du système Mike 21 qui fournit des données hydrodynamiques d'entrée et un calcul de l'évolution du fond. Le MT est disponible dans différentes versions qui se distinguent par leur traitement des couches de fond et des classes granulométriques des sédiments, allant des couches multiples, et plusieurs classes granulométriques à des modèles plus simples à une seule fraction qui prescrivent la densité du lit et la force de cisaillement (linéaire proportionnellement à la profondeur).

Formulation de base

En théorie, le modèle de transport de la vase permet de solutionner une équation exprimant la conservation des particules de sédiments dans la colonne d'eau en fonction de l'advection des courants, de la diffusion turbulente et des processus de gain/perte sur le fond marin et dans les rivières. Le MT utilise une forme de l'équation de conservation intégrée en fonction de la profondeur :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} [h A_x \frac{\partial C}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [h A_y \frac{\partial C}{\partial y}] + Q_L C_L / h - S \quad (10)$$

où C = concentration moyenne calculée en fonction de la profondeur

A_x, A_y = coefficients de diffusion
 u = vitesses moyennes calculées en fonction de la profondeur
 h = profondeur de l'eau
 Q_L = rejet à la source par superficie unitaire
 C_L = concentration de sédiments à la source
 S = terme source érosion/dépôt.

Le plus gros des efforts lorsqu'on cherche à résoudre l'équation (10) consiste à préciser le terme S à l'aide de diverses contraintes critiques pour l'érosion du fond et le dépôt. L'application du modèle dépend absolument des données propres à chaque site sur les concentrations de sédiments qui varient avec le temps afin d'étalonner ces conditions de contraintes limites.

Données d'entrée

Le module MT est conçu pour être exécuté dans le modèle du système Mike 21, qui incorpore les modules hydrodynamiques pour les courants et les vagues exécutés sur la même grille, ainsi que le matériel d'interfaçage et les programmes de sortie graphique. En plus des données sur les courants et les vagues, le modèle nécessite des données sédimentaires pour chaque couche de vase, à chaque point de la grille, qui comprennent les paramètres pour la rugosité du fond marin et les paramètres régissant les contraintes critiques, la consolidation, la floculation et la vitesse de décantation.

Un grand nombre de ces paramètres devront être étalonnés à l'aide de données propres au site. Les applications des modèles du transport de vase dépendent donc beaucoup des données, et sont généralement itératives étant donné que les modules sont étalonnés et vérifiés (y compris les modules sur les courants et les vagues) par rapport à l'information obtenue sur le terrain. Une fois la performance du modèle du système établie, ce dernier peut être exécuté dans un mode de production pour évaluer les conditions naturelles ou les changements associés au dragage et au dépôt de déblais de dragage.

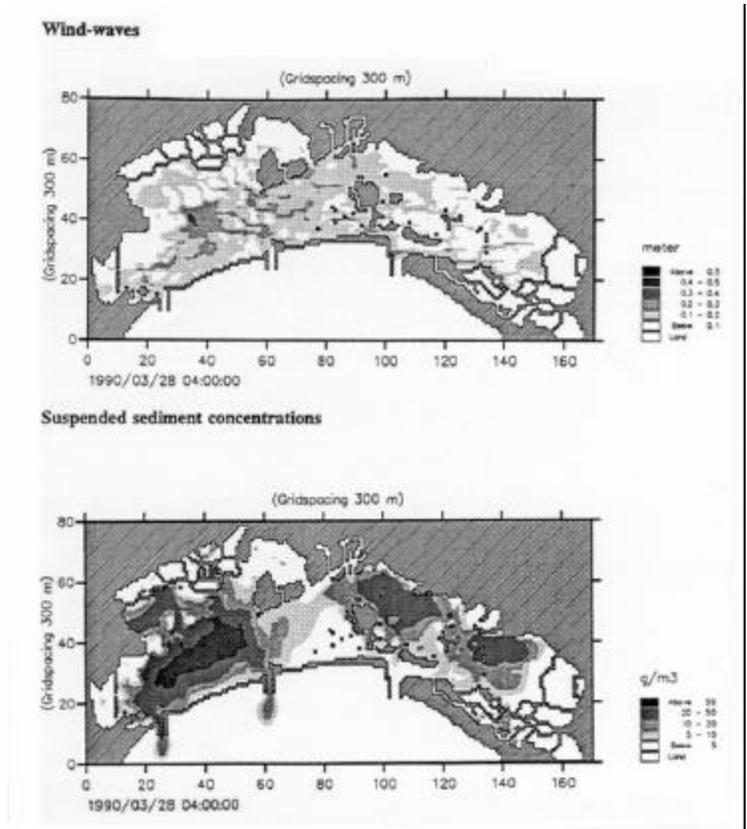


Figure 16. Exemple de résultat du modèle MT de Mike 21 indiquant des conditions de vagues de tempête (partie du haut) et la concentration moyenne des sédiments calculée en fonction de la profondeur (partie du bas) à un moment de la simulation pour le réseau de lagunes de Venise.

Wind-waves = **Vents-vagues** meter = **mètre** Land = **Terre**
 Above = **Au-dessus** Below = **En dessous**
 Gridspacing 300 m = **Espacement de la grille 300 m**
 Suspended sediment concentrations = **Concentrations des sédiments en suspension**

Résultats

Le résultat du module MT est une concentration moyenne de sédiments calculée en fonction de la profondeur, à chaque point d'eau de la grille, pour chaque intervalle de temps précisé par l'utilisateur. Le modèle est exécuté avec les séries chronologiques des données d'entrée sur les vagues et les courants et produit une série chronologique correspondante de concentrations. Lorsque le module est exécuté à l'intérieur de toute la série Mike 21, le résultat permet également de prévoir les changements dans l'élévation du fond marin.

La Figure 16 donne un exemple du résultat du module MT appliqué au réseau de lagunes autour de Venise, en Italie. La partie du haut illustre le champ de la hauteur de la vague significative dans des conditions de grand vent, alors que la partie du bas illustre le champ de la concentration correspondante des sédiments.

3.7 CUMBSED (Sédiments cohésifs et non cohésifs combinés)

CUMBSED est un modèle de transport de vase mis au point par D. Willis au Conseil national de recherches du Canada. Il a été élaboré et appliqué à une étude du bassin Cumberland, dans la baie de Fundy, pour caractériser l'érosion du fond et le dépôt, ainsi que les changements dans le transport des sédiments. Les sédiments peuvent être composés de vase cohésive, de sable non cohésif ou d'un mélange des deux. Le modèle inclut la consolidation avec le temps des vases déposées.

Formulation de base

La plupart des principes physiques du modèle CUMBSED sont semblables à ceux du module MT de Mike 21 dont il a été question précédemment, en ce qui concerne les contraintes critiques pour l'érosion et le dépôt, la consolidation et l'hypothèse selon laquelle les concentrations de sédiments en suspension sont réparties uniformément dans la colonne d'eau et peuvent être prises en compte dans la solution de l'équation (10). Willis a réparti le transport des sédiments en suspension en fractions de vase et de sable. La vase est érodée, transportée et déposée comme dans le modèle MT; cependant, la fraction sable en mouvement est calculée à l'aide de programmes tirés de WHACKER - c'est-à-dire en utilisant la formule de charge totale du modèle AW telle que modifiée par Willis pour tenir compte des vagues.

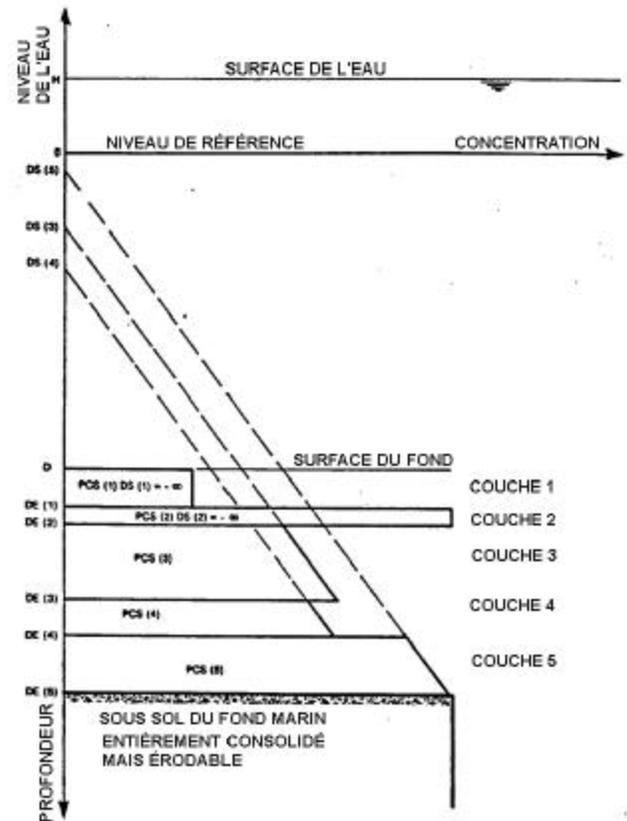


Figure 17. Schéma du fond marin constitué de vase utilisé dans le modèle CUMBSED de Willis

Dans le modèle CUMBSED, le fond marin est schématisé en 5 couches superposées sur un sous-sol consolidé mais érodable (Figure 17). Les couches de vase (qui peuvent contenir chacune une fraction de sable) sont définies par une élévation inférieure fixe relative à un niveau de référence, et une profondeur de concentration zéro correspondant à toutes les matières en suspension. La profondeur de la colonne d'eau change à mesure que les couches sont érodées et redéposées durant le cycle de la marée.

CUMBSED est écrit sous forme d'un ensemble de sous-programmes conçus pour s'interfacer avec un modèle hydrodynamique. Les modèles hydrodynamiques et de transport de la vase sont exécutés sur une grille appliquée à la région concernée, et ils échangent des données à l'intervalle de temps défini par l'utilisateur.

Données d'entrée

À l'instar du modèle MT de Mike 21, CUMBSED dépend beaucoup des données propres au site pour la définition des propriétés sédimentaires et géotechniques des couches, et des données pour l'étalonnage des contraintes critiques pour l'érosion et le dépôt, et les vitesses de décantation des floes de vase. Il nécessite

également un modèle hydrodynamique vérifié pour la prévision des courants et, le cas échéant, un modèle de prévision des vagues.

Résultats

Le résultat du modèle CUMBSED est une série chronologique de concentrations moyennes des sédiments calculées en fonction de la profondeur (fractions vase et sable), et l'élévation du fond par rapport au niveau de référence du modèle.

3.8 TABS-MD (Sédiments cohésifs et non cohésifs combinés)

TABS-MD est un système de modélisation bidimensionnel constitué de modules pour l'hydrodynamique, le transport des sédiments et la qualité de l'eau. Il a été mis au point à l'origine par la *U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station* pour des modélisateurs spécialisés (Thomas et McAnally, 1985). Par la suite, le modèle a été élargi grâce aux travaux de Resource Management Associates à Lafayette, CA (distributeur commercial) et à la Brigham Young University de Salt Lake City, Utah (donneur de licences de FastTABS).

Formulation de base

Le système de modélisation complet est composé de modules, chacun étant codé en FORTRAN 77, qui sont reliés les uns aux autres pour obtenir la solution désirée. Même si une modélisation tridimensionnelle est jugée possible, le système faible est conçu en deux dimensions spatiales pour le moment. Il peut s'appliquer aux problèmes environnementaux dans les mers côtières, les estuaires et les rivières. Il n'est pas conçu pour l'étude des interactions liquide-structure en présence de phénomènes de décollement de tourbillon ou de turbulence à petite échelle.

Les caractéristiques hydrodynamiques considérées sont les écoulements à variation lente produits par les marées, le ruissellement et les marées de tempête. Ces caractéristiques sont calculées à partir des équations classiques pour les vagues en eau peu profonde (Dronkers, 1964). Ces équations sont résolues sur une grille à sections en triangles ou quadrilatères irréguliers à l'aide de méthodes à éléments finis. La solution des éléments finis utilise les résidus pondérés par Galerkin. L'inondation ou l'assèchement des cellules sont permises, ainsi que la spécification des coefficients de turbulence horizontale et l'introduction de structures d'asservissement hydraulique.

Le transport des sédiments est calculé à l'aide d'une équation de la forme (10). Comme dans le cas des deux modèles précédents, la spécification des termes d'interaction du fond marin demande beaucoup d'effort. Lorsque le fond marin est composé de sables non cohésifs, TABS utilise la formule AW pour évaluer le flux de la charge totale. Ce flux est converti en concentrations qui sont utilisées dans l'équation de conservation de la masse des sédiments (10). Dans le cas des sédiments cohésifs (argiles et silts), le terme source du fond marin est précisé à partir des rapports de Krone (1962) pour la contrainte critique de dépôt. Lorsque la contrainte de fond est supérieure au critère de Krone, la méthode élaborée par Ariathurai *et al.* (1977), basée sur les constatations de Partheniade (1962), est utilisée pour calculer la quantité de matières retirées du fond.

Le résultat de ces calculs de sédiments consiste en une prévision du changement de l'élévation du fond marin - on obtient alors une estimation de l'évolution de la morphologie du fond. Lorsque l'approvisionnement en sédiments est limité par la profondeur, l'érosion est contrôlée par l'approvisionnement disponible en matières.

Considérations de l'utilisateur

TABS MD est un ensemble de programmes complexes qui a à peu près les mêmes exigences que Mike 21-MT et CUMBSED en matière de données. Cependant, dans le cas de TABS, il faut établir un maillage d'éléments finis et fournir les données sur la bathymétrie et le faciès des sédiments sur la grille des variables. Même avec un programme de maillage (disponible avec FastTABS), ce procédé est très complexe

et nécessite une quantité considérable de données. L'avantage du maillage d'éléments finis réside dans le fait que l'espacement variable des mailles permet, le cas échéant, une grande résolution; le choix de TABS est donc régi jusqu'à un certain point par la nécessité d'une telle résolution, compensée par le temps nécessaire pour élaborer le modèle et les ressources informatiques nécessaires pour obtenir la solution des mailles.

On peut se procurer de la documentation sur les anciennes versions de TABS auprès de la *U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station* (Thomas et McAnally, 1985). On peut se procurer de la documentation pour FastTABS à la Brigham Young University et des services d'appoint (formation, consultation) sont disponibles chez Resource Management Associates pour TABS-MD.

On n'a pas pu trouver d'études de cas faisant appel à TABS dans le cas de la présente enquête, on ne peut donc pas évaluer l'exactitude du programme. Les utilisateurs qui prévoient se servir de ce système devraient tenir compte des limites décrites dans la documentation pour s'assurer que les algorithmes s'appliquent à leur situation et qu'ils disposent des données d'entrée nécessaires. Ils devraient également examiner les applications précédentes de ce modèle et parler avec les modélisateurs pour s'assurer que la taille des mailles et les dimensions globales des mailles procurent la résolution nécessaire et qu'elles se calculent en un temps raisonnable sur l'ordinateur choisi. Les utilisateurs potentiels doivent également être convaincus qu'il existe suffisamment de données pour étalonner le modèle, principalement s'il s'agit de sédiments cohésifs. Enfin, les utilisateurs qui prévoient transférer le programme de modélisation sur leur propre ordinateur devraient tenir compte des graphiques d'affichage des données d'entrée et de sortie. Les versions existantes de TABS utilisent la version 11.0 de DISSPLA, disponible auprès de Computer Associates. La conversion à d'autres logiciels peut nécessiter beaucoup d'effort de programmation.

3.9 LTFATE (Sédiments cohésifs et non cohésifs combinés)

LTFATE est un programme d'analyse du site qui donne des calculs couplés d'hydrodynamique, de transport des sédiments et de morphologie du fond, avec le temps, en fonction des vagues, de la bathymétrie, de la granulométrie et des courants locaux. Il est conçu pour évaluer les caractéristiques dispersives d'un lieu d'immersion potentiel et s'applique aux réservoirs, aux rivières, aux estuaires et aux mers côtières. Ce modèle utilise des données hydrodynamiques d'entrée dont la moyenne est établie en fonction de la profondeur et peut s'appliquer à bien des sites dans les eaux canadiennes. LTFATE a été mis au point par la *U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station* et est décrit en détail dans Thevenot *et al.* (1993).

Formulation de base

L'objectif de LTFATE est de prévoir l'évolution à long terme d'une butte constituée de matériaux de dragage sous l'action des courants de marée et du régime normal des vagues, ou sous l'action de courants de marée et de vagues de tempête. Les données d'entrée sur les courants et les vagues sont organisées de façon adéquate à cette fin. L'évolution de la butte est calculée à l'aide des modèles de transport des sédiments.

Lorsque les matériaux de dragage sont non cohésifs, le modèle AW est utilisé avec la modification de Swart (1976) pour tenir compte du transport attribuable aux vagues. Le calcul de l'évolution du fond tient également compte du glissement de talus lorsque la pente de la butte est supérieure à l'angle du talus naturel pour les sédiments.

Les sédiments cohésifs sont traités à l'aide d'un algorithme mis au point par Teeter et Pankow (Thevenot *et al.*, 1993). La décantation des sédiments est calculée à l'aide de la formule de Ariathurai *et al.* (1977) et l'étude du flux de dépôt des sédiments sur le fond marin se fait selon les travaux de Mehta de l'Université de la Floride. La remise en suspension est basée sur les constatations de Ariathurai *et al.* (1977). Ce modèle partage de nombreux éléments avec TABS en ce qui a trait au transport cohésif; il tient également compte de la consolidation des sédiments fins après dépôt.

Traitement des données environnementales

LTFATE contient des ensembles de simulation des vagues et des marées propres à certains types de données. Les données sur les vagues sont précisées en tant que statistiques climatiques normales en termes de fréquences de la hauteur de la vague significative, de la période spectrale de pointe et de la direction dominante des vagues. Un algorithme mis au point par Leon Borgman est ensuite utilisé pour convertir les données sur la fréquence en séries chronologiques contenant les propriétés d'autocorrélation propres au site en question (Borgman et Scheffner, 1991). Le modèle tient compte des effets des eaux peu profondes. La *U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station* utilise les prévisions statistiques à posteriori sur les vagues de la *Wave Information Study* (WIS) pour les eaux côtières des États-Unis.

Les données sur les marées donnant les niveaux de l'eau et les courants à certaines profondeurs sont reconstituées à partir des constantes harmoniques astronomiques qui s'appliquent au site. Ces données doivent généralement être mesurées ou calculées à l'aide d'un modèle de marée (Westerink *et al.*, 1993); elles sont généralement inconnues dans les eaux côtières. Les utilisateurs de LTFATE au Canada doivent s'assurer que les constantes harmoniques obtenues à partir de sources canadiennes sont équivalentes à celles calculées aux États-Unis pour lesquelles LTFATE est programmé.

4. DERNIÈRES REMARQUES

Les modèles de transport des sédiments décrits dans ce résumé se divisent en deux catégories : 1) ceux qui sont relativement simples et qui pourraient être utilisés par des organismes qui prévoient des activités d'immersion en mer et qui ne sont pas des spécialistes du transport des sédiments, et 2) les modèles dont la formulation est complexe, qui demandent beaucoup de données d'entrée et qui doivent être appliqués par leurs concepteurs ou des consultants spécialistes. Les modèles morphologiques et les modèles de transport de la vase font partie de ce deuxième groupe.

Pour certains lieux d'immersion possibles dans les eaux marines canadiennes, les modèles simples (WHACKER, WAW.F et TRANSPOR) donnent une indication raisonnable des vitesses de transport potentielles et des conditions hydrodynamiques qui produisent le déplacement des sédiments. Ces modèles simples constituent également de précieux compléments aux levés géologiques, permettant de confirmer l'interprétation des caractéristiques du relief marin observées. Bien que relativement simples en termes de données d'entrée, de formulation et de compréhension des résultats, ces modèles ne sont pas particulièrement accessibles aux utilisateurs non spécialistes, et ce, pour plusieurs raisons, mais principalement parce que le logiciel disponible est mal documenté, qu'il n'a pas de bonnes interfaces utilisateur, voire aucune, et que les résultats se présentent sous des formes qui ne se prêtent pas particulièrement aux problèmes d'immersion en mer.

Cependant, de nombreux endroits qui pourraient être utilisés pour des activités d'immersion, et souvent les matériaux à immerger, sont constitués de sédiments à grains fins faiblement cohésifs. Dans ces cas, les modèles les plus simples ne s'appliquent pas et si on veut faire de la modélisation, il faut utiliser des formulations appropriées au régime sédimentaire. La modélisation doit alors se faire par des spécialistes qui sont familiarisés à la fois avec la théorie de la modélisation et les besoins en données pour étalonner et vérifier le modèle et pour accorder des limites de confiance aux vitesses de transport et aux changements du fond marin prévus.

RÉFÉRENCES

- Amos, C.L., J. Grant, G.R. Daborn and K. Black, 1992. Sea Carousel—A Benthic, Annular Flume. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **34**, 557-577.
- Boone, D.J., 1980. The construction of an artificial island in intermediate water depths in the Beaufort Sea. Proc. of the 1980 Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 187-195.
- Brothers, D.E., 1990. Benthic Sediment Chemistry, British Columbia Ocean Dumpsites, October 1988. Regional Data Report DR-90-07, Environment Canada.
- Canadian Seabed Research Ltd., 1993. Acoustic Monitoring of Ocean Dumping, Sidescan Sonar and Sub-bottom Profiler Survey, Black Point Dumpsite and Caisson Gate Search, Saint John, New Brunswick. Preliminary Draft. Submitted to Environment Canada, Dartmouth, N.S.
- Crean, P.B., and A. Ages, 1971. Oceanographic Records from Twelve Cruises in the Strait of Georgia and Juan de Fuca Strait, 1968, Vol. 1-5. Dept. of Energy, Mines and Resources, Victoria.
- Davidson, S., S. de Margerie, and K. Lank, 1988. Sediment Transport in the Mackenzie River Plume. Unpublished Report, Geological Survey of Canada, 92p.
- Environment Canada, 1993. Interim Monitoring Guidelines for Ocean Disposal. Marine Environment Division, Ottawa, July, 1993.
- Gilbert, G.R., R. Addison and P. Hill, 1990. The fate and erosion history of abandoned artificial islands in the Beaufort Sea. Contract Report by Canadian Seabed Research Ltd., Halifax, NS, for the Canadian Coast Guard, Aids and Waterways, Vancouver, BC and the Geological Survey of Canada, Dartmouth, NS, 60p.
- Gillie, R.D., 1988. Beaufort Sea artificial island data, Itiyok Island, 1986. Environmental Studies Research Funds, Report 090.
- Hamilton, T.S. and S.O. Wigen, 1987. The Foreslope Hills of the Fraser River Delta, Implications for Tsunamis in Georgia Strait. *The International J. of the Tsunami Soc.*, **5**, 15-33.
- Harper, J.R. and P.S. Penland, 1982. Beaufort Sea sediment dynamics. Contract Report by Woodward-Clyde Consultants, Victoria, BC to the Geological Survey of Canada, Dartmouth, NS, 125p.
- Hart, B.S., 1992. Side-scan Sonar Observations of Point Grey Dump Site, Strait of Georgia, British Columbia. Geological Survey of Canada, Ottawa, Current Research Paper 92-1A, 55-61.
- Hart, B.S., J.V. Barry, R.G. Currie, J.L. Luternauer, D.B. Prior and R.D. Macdonald, 1991. High-resolution Seismic and Side-scan Sonar Mapping of the Fraser Delta Front and Adjacent Strait of Georgia, British Columbia. Geological Survey of Canada, Ottawa, Current Research Paper 91-1E, 19-23.
- Hill, P.R. and O.C. Nadeau, 1989. Storm-dominated Sedimentation on the Inner Shelf of the Canadian Beaufort Sea. *J. Sedimentary Petrology*, **59**, 455-468.
- Hill, P.R., S.M. Blasco, J.R. Harper and D.B. Fissel, 1991. Sedimentation on the Canadian Beaufort Shelf. *Continental Shelf Research*, Special Issue for the Canadian Continental Shelf Seabed Symposium, Halifax, Nova Scotia, **11**(8-10), 821-842.
- Hodgins, D.O., 1983. A Review of Extreme Wave Conditions in the Beaufort Sea. Report prepared for Marine Environmental Data Service, Fisheries & Oceans, Canada, by Seaconsult Marine Research Ltd.
- Hodgins, D.O., 1988. Sediment-Storm Interaction Study. NOGAP B.6. Prepared for Fisheries and Oceans Canada.

- Hodgins, D.O., 1989. Design Storm Characteristics for the Amauligak Area. Prepared for Gulf Canada Resources Ltd. by Seaconsult Marine Research Ltd.
- Hodgins, D.O., A.H. Kilback and R.H. Young, 1993. New Tracer Techniques for Pulp Mill Effluent Delineation—Setting the Basis for Effects Monitoring Programs. *Proc. 1993 TAPPI Environmental Conference*.
- Hodgins, D.O., Sayao, O.J., E.D. Kinsella, and P.W. Morgan, 1986. Nearshore Sediment Dynamics—Beaufort Sea. The 1986 Monitoring Program. Environmental Studies Revolving Funds Report 054, Ottawa.
- Kim, K., and D.L. Sullivan, 1993. Ocean Disposal Activity Summary From 1987 to 1992 for Pacific and Yukon Region. Regional Program Report 93-01, Environment Canada.
- LeBlond, P.H., 1983. The Strait of Georgia: Functional Anatomy of a Coastal Sea. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 40(7), 1033-1063.
- Mathews, W.H., J.W. Murray and N.J. McMillan, 1966. Recent Sediments and Their Environment of Deposition, Strait of Georgia and Fraser River Delta. Field Manual for Tenneco Oil and Minerals Ltd., Calgary.
- McLaren, P. and D. Thomas, 1988. The Sediment Transport Regime at the Point Grey Dumpsite: Implications for the Dispersal of Contaminants and Waste Disposal Monitoring. Report prepared for Fisheries & Oceans Canada, DSS Contract FP941-7-1159.
- Meahger, L., 1978. Compilation of the Thickness of Recent Soft Sediment and Ice-related Features in the Beaufort Sea, Northwest Territories. Contract Report by Geomarine Associates, Halifax, NS for the Geological Survey of Canada, Ottawa.
- Neu, H.A., 1960. Hydrographic Survey of Saint John Harbour, N.B. National Research Council of Canada, Mechanical Engineering Report MH-97.
- O'Connor, M.J., 1982a. Physiographic regions of the Southern Beaufort Sea. Contract Report by M.J. O'Connor Associates Ltd., Calgary, AB, for the Geological Survey of Canada, Dartmouth, NS.
- O'Connor, M.J., 1982b. Depth to transgressive unconformity, Southern Beaufort Sea shelf. Contract Report by M.J. O'Connor Associates Ltd., Calgary, AB, for the Geological Survey of Canada, Dartmouth, NS.
- Packman, G.A., 1980. An Environmental Assessment of the Point Grey Ocean Disposal Area in the Strait of Georgia, British Columbia. Regional Program Report 80-3, Environment Canada.
- Pelletier, B.R., 1975. Sediment dispersal in the southern Beaufort Sea. Department of the Environment, Victoria, BC, Beaufort Sea Project, Technical Report No. 25a, 80p.
- Pelletier, B.R., 1984. Marine science atlas of the Beaufort Sea. Geological Survey of Canada, Miscellaneous Report 38.
- Percival, J.B. and Lindsay, P.J. 1997. *Measurement of physical properties of sediments. In: Manual of Physico-Chemical Analysis of Aquatic Sediments*. Mudroch, A., Azcue, J.M., Mudroch, P. Eds. CRC Press, Lewis Publishers, Boca Raton, Florida USA., 287pp. ISBN 1-56670-155-4.
- Perrott, T., J.R. Harper, P. Hill and S. Blasco, 1984. The analysis of LANDSAT MSS data for characterizing sediment dispersal in the Beaufort Sea. Proceedings of the 8th Canadian Symposium on Remote Sensing, Paper 513, 283-291.
- Pharo, C.H. and W.C. Barnes, 1976. Distribution of Surficial Sediments of the Central and Southern Strait of Georgia, British Columbia. *Can. J. Earth Sci.*, 13, 684-696.

- Prager, B., R. Inkster, P. Lacroix and L. Mayer, 1993. ISAH-S Bottom Classification: Preliminary Results. Proc. Oceans '93 Conf., Victoria, BC.
- Stronach, J.A., J.O. Backhaus, and T.S. Murty, 1993. An update on the numerical simulation of oceanographic processes in the waters between Vancouver Island and the mainland: The GF8 model. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, 31, 1-86.
- Sullivan, D.L., 1987. Compilation and Assessment of Research, Monitoring and Dumping Information for Active Dump Sites on the British Columbia and Yukon Coasts from 1979 to 1987. Regional Program Report 87-02, Environment Canada.
- Waldichuk, M., 1957. Physical Oceanography of the Strait of Georgia, British Columbia. *J. Fish. Res. Bd. Canada*, 14(3), 321-486.