

DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE POUR LE PILOTAGE DES OPÉRATIONS DE DRAGAGE MARITIME.

Pascal Gregoire^{1,2}, Chérif Boulemia², Eric Henry², Gérard Ballivy³

¹Port Autonome de Dunkerque, Département Accès Nautiques et Infrastructures, Dunkerque – France

²Université d'Artois, pôle de Béthune, Laboratoire Artois Mécanique et Habitat (L.A.M.H.), Équipe hydrologie, sol et environnement – Béthune - France

³Université de Sherbrooke, Département Génie Civil, Sherbrooke - Canada

ABSTRACT

Dredging works pose the problem of the transfer and of what to do with the products to be evacuated, taking into account the economic repercussions and environmental aspects linked to protection of the environment. The environmental assessment process, reinforced by study of the impact on the environment, within a context of information and participation of the actors concerned enables orientation of an iterative and negotiated approach that corresponds to a social logic. Our aim is to make available to the numerous participants an operational tool for piloting dredging operations that corresponds to the choice of the best techniques and to the problem of what to do with the products. The approach we are proposing is based on multi-criteria analysis. This analysis takes into account the technical, economic, environmental, regulatory, health and social parameters, as well as their weighting. This weighting of criteria is necessary to assess the solutions or alternative variants in a context of durable development. In this article, we present the study context, analysis of the data, identification of the constraints and formulation of the criteria. Then, we show a set of criteria through formulation examples and the various stages of our methodological approach.

RÉSUMÉ

Les travaux de dragage posent le problème du transfert et du devenir des produits à évacuer, compte tenu des incidences économiques et des aspects environnementaux liés à la protection de l'environnement. Le processus d'évaluation environnementale renforcé par l'étude d'impact sur l'environnement dans un contexte d'information et de participation des acteurs impliqués permet d'orienter une démarche itérative et négociée correspondant à une logique sociale. Notre objectif est de mettre à la disposition des nombreux acteurs, un outil opérationnel de pilotage des opérations de dragage répondant au choix des meilleures techniques et au problème du devenir des produits. La démarche que nous proposons s'appuie sur l'analyse multicritère. Cette analyse prend en compte les paramètres techniques, économiques, environnementaux, réglementaires, sanitaires et sociaux ainsi que leur pondération. Cette pondération de critères est nécessaire pour l'évaluation des solutions ou variantes alternatives dans un contexte de développement durable. Dans cet article nous présentons le contexte de l'étude, l'analyse des données, l'identification des contraintes, et la formulation des critères. Ensuite, nous exposons un ensemble de critères à travers des exemples de formulation et les différentes étapes de notre démarche méthodologique.

1. INTRODUCTION

Les opérations de dragage constituent souvent une nécessité stratégique dans le cadre de la maintenance des accès nautiques ou de l'aménagement du territoire. Ces opérations n'échappent pas à la préoccupation majeure de la protection de l'environnement compte tenu des impacts physiques, chimiques, bactériologiques et économiques. L'approche écotoxicologique appliquée aux sédiments marins confirment les risques potentiels sur les écosystèmes et la santé publique (Ifremer. 1999). Les impacts environnementaux ne pouvant être évités, il est important d'évaluer et de comparer les avantages des opérations de dragages prévues, tels qu'ils sont perçus, aux conséquences prévisibles sur l'environnement (Séminaire Nantes. 1989). Encore faut-il que cette évaluation et cette comparaison pour être efficace puissent s'appuyer sur une négociation environnementale incontournable faisant intervenir les différents acteurs impliqués.

2. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

Dans un passé récent, le dragage et la mise en dépôt des sédiments dépendaient prioritairement de l'incidence économique au détriment des aspects environnementaux. L'évolution des conventions internationales pour la protection du milieu marin (Ospar. 1992) et les contraintes réglementaires croissantes (loi sur l'eau. 1992) notamment en matière de protection des écosystèmes aquatiques (Arrêté juin 2002) a conduit à intégrer définitivement l'évaluation environnementale lors des différentes étapes du processus de dragage (extraction, transport, dépôt).

Des effets potentiels sur l'environnement, les effets liés à l'immersion des produits de dragage sont les moins bien perçus en terme d'impact sur l'écosystème aquatique de par les effets défavorables qui peuvent en découler (AIPCN. 1977) :

- L'augmentation de la turbidité.
- L'apport en contaminants.
- La remise en circulation des sédiments.
- La contamination faune, flore.
- Le recouvrement des fonds.
- La modification de l'intensité lumineuse.
- La réduction de la demande en oxygène.

Les contaminants-traces identifiés dans les sédiments marins sur la fraction fine confirment les risques sanitaires ; de nombreux contaminants restent (en France) non réglementés (HAP, TBT, POP, ...) malgré l'existence de seuils provisoires ou de recommandations internationales. Chaque famille est composée de substances et congénères de toxicité plus ou moins élevée qui peuvent présenter un caractère persistant et une tendance à la bioaccumulation dans les tissus des espèces (tableau 1).

Tableau 1. Contamination PCB dans le réseau trophique du bar ($\mu\text{g/g}$) (Ifremer. 2000)

PCB dans le sédiment marin	10 $\mu\text{g/g}$
Phytoplancton	15 $\mu\text{g/g}$
Owenia fusiformis (vers)	90 $\mu\text{g/g}$
Crangon crangon (crevette)	157 $\mu\text{g/g}$
Bioaccumulation dans le bar	200 $\mu\text{g/g}$

Ces phénomènes de bioconcentration peuvent présenter un danger pour l'homme.

« Ces opérations de dragage sont extrêmement coûteuses et les services chargés des accès portuaires recherchent le meilleur compromis entre les impératifs du maintien des activités, l'incidence du coût des dragages sur l'économie portuaire et la protection de l'environnement. Cette problématique pour laquelle il n'existe pas de réponse unique doit être examinée au cas par cas ». [Alzieu, 1999].

3. ETAT DE L'ART

Les sédiments marins contaminés ont fait l'objet de nombreux travaux sur le plan international. Sur le plan français, le groupe interministériel Géode a élaboré un outil d'aide à la décision.

3.1 Modèle Géodrisk (Ifremer. 2001).

Cet outil d'aide à la décision en matière de gestion des sédiments marins contaminés est basé sur la prise en compte des domaines suivants :

- Le danger potentiel de chaque contaminant.
- La toxicité mesurée du sédiment.
- La potentialité du transfert des contaminants à partir de la zone de dépôt.
- La sensibilité de l'écosystème récepteur.

Il intègre les contraintes de l'arrêté du 14 juin 2000 (J.O. du 10 août 2000) « relatif aux niveaux de référence à prendre en compte lors d'une analyse de sédiments marins ou estuariens présents en milieu naturel ou portuaires » qui fixe les valeurs guide pour 8 métaux lourds et 7 polychlorobiphényles.

➤Le danger potentiel de chaque contaminant prend en considération :

- La concentration du contaminant dans le sédiment comparée à sa valeur de niveau 1.
- L'affinité pour la phase dissoute en utilisant le coefficient de partage entre la phase solide et l'eau (K_d) pour les contaminants inorganiques et le coefficient de partage entre l'octanol et l'eau (K_{ow}) pour les substances organiques.
- La bioconcentration déterminée par le facteur (FBC) pour les substances organiques.
- La toxicité potentielles (sublétale).

➤La potentialité du transfert prend en compte (de façon subjective) les aspects de transport du polluant et d'accessibilité à une cible donnée.

➤La sensibilité de l'écosystème récepteur prend en compte les conditions locales de risques d'exposition avec les conséquences sur la salubrité.

Comme Géodrisk actuellement ne prend en compte qu'un nombre limité de contaminants il est nécessaire d'avoir recours à des évaluations complémentaires en laboratoire.

3.2 Bioessais de laboratoire

Plusieurs tests de toxicité permettent d'évaluer la toxicité globale du sédiment en raison de leur sensibilité et de leur aptitude à différencier les divers types de contamination (Quiniou. 2001).

- Le test d'embryotoxicité des œufs fécondés de bivalves (*Crassostrea gigas*, *Mytilus edulis*).
- Le test microtox phase solide de la bactérie marine *phosphobacterium phosphoreum*.
- Le test de toxicité des sédiments sur l'amphipode marin *Corophium* sp.
- Le test de toxicité aiguë sur le copépode marin *trigriopus brevicornis*.

Des notes de risques (Ifremer, 1999) sont alors attribuables en fonction de la réponse de différents tests à des sédiments contaminés (exemple tableau 2)

Tableau 2. Test embryotoxicité (concentration 5g/l sédiment sec)

Pourcentage de larves « D » anormales	Toxicité	Note de Risque
< 10%	Négligeable	0
10 à 30	Faible	1
30 à 50	Moyenne	2
> 50	Forte	3

Plusieurs protocoles de recherche permettent de détecter la contamination bactérienne du sédiment :

- La méthode miniaturisée par ensemencement en milieu liquide pour le dénombrement des escherichia coli (norme AFNOR T90-433).
- La recherche et dénombrement des streptocoques du groupe D, par ensemencement en milieu liquide (norme AFNOR T90-411, oct89).
- La méthode miniaturisée par ensemencement en milieu liquide pour le dénombrement des entérocoques (norme AFNOR T90-432).

3.3 Commentaires

Les résultats Géodrisk et les bioessais de laboratoire permettent de caractériser les sédiments marins d'après leur contamination et leur toxicité.

L'évaluation des risques environnementaux sur l'écosystème aquatique est menée par l'établissement d'un système de notation (ou score) de risque qui permet ou non et sous réserve d'études d'impacts complémentaires, de procéder à l'immersion des produits dragués. L'objectif est finalement de mettre en œuvre la solution la moins préjudiciable pour l'environnement.

4. OBJECTIFS ET DEMARCHE METHODOLOGIQUE

4.1 Objectifs

Compte tenu des problèmes liés à la présence des contaminants, aux impacts environnementaux, à l'incidence financière des opérations, notre objectif est de :

- mettre à la disposition des gestionnaires un outil de gestion et d'aide à la décision pour le pilotage des opérations de dragage et de mise en dépôt en associant l'étude d'impact sur l'environnement et la l'analyse multicritère.

4.2 Démarche méthodologique

La démarche envisagée intègre l'analyse multicritère pour modéliser la préparation de la décision. en plaçant la négociation avec les différents acteurs au niveau de la structure du modèle.

Le schéma de notre démarche méthodologique est décrite à la figure 1.

Nous avons orienté notre réflexion sur l'évaluation environnementale et l'aide à la décision multicritère qui favorisent la négociation avec les différents acteurs.

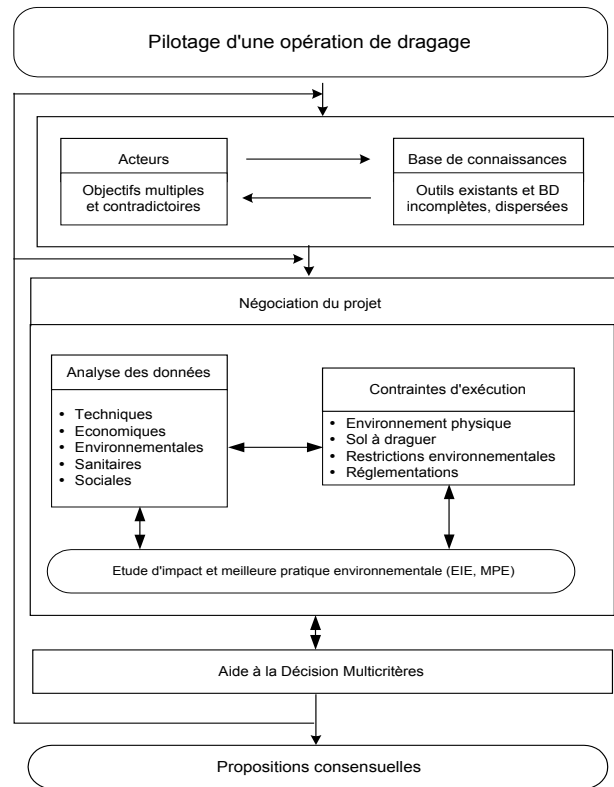


Figure 1. Pilotage d'une opération de dragage.

4.2.1 Evaluation environnementale

L'évaluation environnementale a pour objectifs de maîtriser les conséquences environnementales du projet et d'optimiser les impacts sur l'environnement. L'analyse des données et des contraintes correspondantes permettront de choisir les indicateurs environnementaux et sanitaires pour l'aide à la décision multicritère.

4.2.2 Aide à la décision multicritère

La démarche d'aide à la décision multicritère que nous souhaitons à utiliser un modèle en 3 phases pour reproduire la problématique et les préférences des acteurs (figure 2).

La phase de structuration du modèle définit le cadre de l'étude

La phase d'exploitation constitue la partie analytique du processus d'étude. Le traitement fait appel à un algorithme mathématique qui doit permettre de juger la valeur de chaque action. La représentation des résultats est basée sur la définition d'une « bonne » ou d'une « mauvaise » action ;

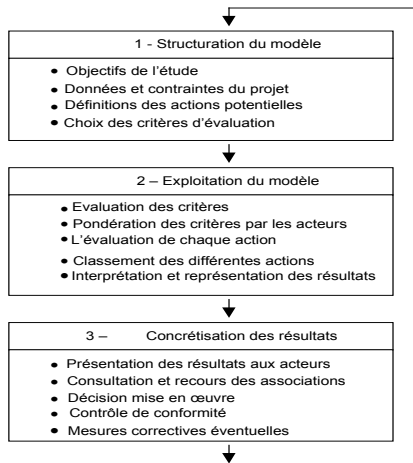


Figure 2. Processus d'aide à la décision

La phase de concrétisation des résultats du modèle passe par la consultation et la validation des différents acteurs (décideurs, experts, associations, ...) au regard des hypothèses et des corrections éventuelles.

5. FORMALISATION DE LA DEMARCHE

5.1 Déroulement

Le processus d'aide à la décision comprend un certain nombre d'étapes dont le formalisme joue un rôle structurant.

Les étapes sont présentées sur la figure 3.

Ce processus d'aide à la décision correspond en réalité à une aide à la négociation multicritère favorisant des échanges permanents au travers d'un dialogue structuré ou chaque étape peut faire l'objet d'une validation intermédiaire des résultats, tout en autorisant une démarche itérative.

5.2 Choix de la méthode

Nous avons privilégié la méthode Electre III car elle répond extrêmement bien à la problématique environnementale en acceptant des relations floues impératives dans le domaine de l'environnement.

Cette méthode nous paraît judicieuse car elle permet également :

- Le classement des actions potentielles les unes par rapport aux autres depuis la meilleure jusqu'aux moins bonnes.
- L'application de la logique floue dans la relation de surclassement et le choix de pseudo-critères répondant au caractère incertain de l'évaluation environnementale.

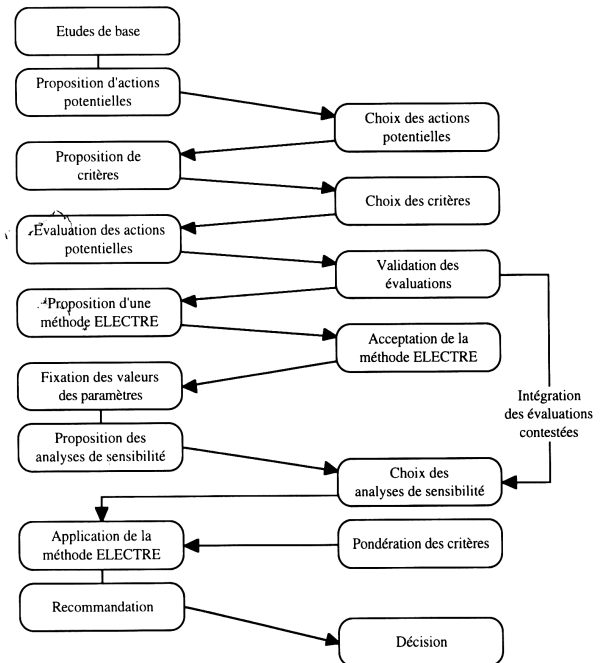


Figure 3. Déroulement du processus (Maystre et al. 1994)

- L'introduction des seuils d'indifférence et de préférence stricte afin d'intégrer l'incertitude des valeurs du tableau de performance des évaluations.
- L'introduction des seuils de veto afin d'évaluer la crédibilité du surclassement des actions potentielles.
- D'expliciter les scénarios en préservant les pondérations des décideurs ce qui permet la mise en valeur des résultats personnels.
- L'analyse de sensibilité afin d'examiner la stabilité des résultats obtenus vis à vis de la variation des seuils.
- La pondération des critères en laissant les acteurs proposer les poids correspondants à leur propre vision même si les enjeux initiaux paraissent divergents.
- Les analyses de robustesse renforçant la visibilité des acteurs dans la compréhension de l'analyse des résultats et des recommandations tout en cernant les variations entre la réalité et le modèle.

L'algorithme de la méthode Electre III est décrit dans l'ouvrage de Maystre et al. 1994.

5.3 Les acteurs

Les principaux acteurs identifiables pour le pilotage des opérations de dragage sont de façon non exhaustive :

- Le maître d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre déléguée.
- Le Directeur Départemental des Affaires Maritimes .
- Le Chef de la Mission inter-services de l'Eau
- Le Directeur Régional de l'Environnement

- Le Directeur Départemental des Affaires Sanitaires et Sociales
- Les Maires des villes concernées
- Le Chef du laboratoire de l'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer
- Le cas échéant des Associations pour la protection de l'environnement.

La constitution de ce groupe de pilotage a pour but essentiel de rechercher une réponse à la problématique posée qui soit justifiable et acceptée par les acteurs (Maystre, Bollinger. 1999).

5.4 Elaboration des scénarios

La construction des scénarios par les différents acteurs dépend intimement des données du projet et des contraintes d'exécution.

Les données significatives extraites le cas échéant d'un système d'information géographique (SIG) comportent les informations de type :

- Météorologiques (vent, température, brouillard, ...).
- Hydrographiques (bathymétrie, marées, courants, houles).
- Géologiques et géotechniques (matériaux, volumes, granulométrie, densité, compacité, gaz, matière organique, ...).
- Environnementales (qualité du sol, de l'eau, vie aquatique, ...).
- Régionales terrestres (populations, plaisance activités maritimes, commercialisation, pêche, élevage, espaces protégés, ...).

Les contraintes d'exécution concernent principalement :

- L'environnement physique du chantier, (accès, gabarit, sol, contamination, structures existantes, obstacles, conditions météo, hydrographie, trafic, ...).
- Les restrictions environnementales éventuelles (overflow, almo, dégazage, eaux résiduelles, matière en suspension, niveaux sonores, ...).
- La réglementation interne et les conventions internationales (loi sur l'eau, arrêté 2000, convention Oskar 1992, ...).
- La maîtrise des dépenses pour l'opération envisagée (amenée-repli des engins, dragage et mise en dépôt, constitution des digues, valorisation des produits, traitement des matériaux contaminés, ...).
- Le respect du délai d'exécution compatible avec la gestion des activités commerciales portuaires.

Plusieurs approches peuvent être considérées pour l'élaboration des scénarios (Maystre et al. 1994) :

- La représentation d'actions fragmentaires autour desquelles vont se construire les scénarios.
- Des actions globales ou scénarios à préciser en fonction de certains éléments secondaires.

5.5 Choix des critères

Le choix et l'élaboration des critères par les différents acteurs du groupe de pilotage est une démarche itérative pour un choix consensuel de tous les acteurs impliqués.

Nous avons retenu cinq pseudo-critères découpés en sous-critères afin de procéder à une évaluation plus fine des scénarios.

Les cinq pseudo-critères sont :

- Les aspects techniques.
- Les aspects économiques.
- Les aspects environnementaux.
- Les aspects sanitaires.
- Les aspects sociaux

Chaque sous-critère peut faire l'objet d'une grille d'évaluation à l'aide d'un système de notation :

Exemple 1 : sous-critère « type de matériau » du pseudo-critère « aspects techniques ».

Tableau 3. Evaluation sous critère 1

Capacité d'extraction et de mise en dépôt	Facile	Moyenne	Difficile
Note	1	2	3

Exemple 2 : sous-critère « oxygène dissous » du pseudo-critère « aspects environnementaux ».

Tableau 4. Evaluation sous-critère 2

Niveau de variation en oxygène dissous			
Durée	Courte	Moyenne	Longue
Note	1	2	3
Etendue	Faible	Moyenne	Globale
Note	1	2	3
Intensité	Faible	Moyenne	Forte
	($\leq 1\text{mg}/\text{lO}_2$)	(>1 et $\leq 2\text{mg}/\text{lO}_2$)	(>2mg/lO ₂)
Note	1	2	3

L'évaluation globale du sous-critère 2 est réalisé par simple sommation.

Exemple 3 : sous critère « acceptabilité commerciale » du pseudo-critère « aspects sociaux ».

Tableau 5. Evaluation sous-critère 3

Acceptabilité sous-critère 3 (pêche, navigation, conchyliculture)			
Acceptabilité	Pas de conflit d'occupation	Risque de conflits légers	Risque de conflits graves
Note	1	2	3

Certains pseudo-critères et sous-critères correspondent à des critères d'opinion (subjectifs) qu'il convient néanmoins d'intégrer dans la négociation.

5.6 Tableau des performances

Chaque scénario identifié par les acteurs est jugé selon chaque pseudo-critère.

Ce jugement appelé évaluation est représenté par un tableau à double entrée, appelée tableau des performances dans laquelle chaque ligne représente un scénario et chaque colonne un pseudo-critère

5.7 Pondération des pseudo-critères

La pondération des pseudo-critères est une phase fondamentale pour les acteurs.

Cette étape est souvent délicate et plusieurs méthodes sont envisageables, (pour mémoire) :

- La méthode qui n'utilise pas de poids sur les pseudo-critères en considérant donc aucune prépondérance particulière.
- La méthode simple qui consiste à fixer des poids directement utilisables.
- La méthode des rangs avec transformation des rangs en poids exprimés en pourcentage

Finalement, nous pouvons dresser le tableau des performances des évaluations des actions potentielles intégrant la pondération des pseudo-critères par l'ensemble des acteurs du groupe de pilotage.(tableau 6).

Tableau 6 . Tableau des performances des évaluations

Actions potentielles	p-critère 1 Technique	p-critère 2 Economique	p-critère 3 Environ.t	p-critère 4 Sanitaire	p-critère 5 Social
Scénario1	5	9	18	4	5
Scénario 2	8	47	18	4	7
Scénario 3	6	1	27	5	11
Scénario 4	7	25	17	1	4
Poids A1	32	32	11	11	14
Poids A2	7	13	30	20	30
Poids A3	20	20	20	20	20

Scénario 1 : dragage à la DAM et immersion des sédiments

5.8 Choix des paramètres initiaux

La méthode Electre III nécessite le choix de trois seuils pour chaque pseudo-critère :

- Le seuil d'indifférence (q) est le plus grand écart de préférence jugé compatible avec l'indifférence.
- Le seuil de préférence (p) est le plus grand écart de préférence jugé non probant d'une préférence stricte.
- Le seuil de veto (v) est le plus petit écart entre les performances de deux scénarios potentiels au-delà duquel l'utilisateur estime qu'il n'est plus possible d'accepter que le plus mauvais des deux scénarios soit considéré globalement comme au moins aussi bon que le meilleur, même si ses performances sur les pseudo-critères sont toutes meilleures.

Trois valeurs différentes (seuils) sont ainsi comparées à une même valeur de comparaison.

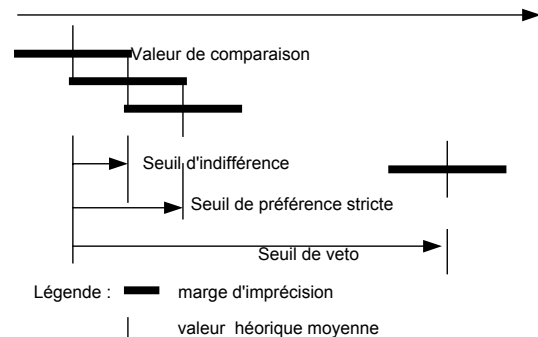


Figure 4. Seuils relatifs (Maystre, Bollinger. 1999)

L'utilisation des seuils d'indifférence et de préférence stricte permet de respecter le principe de la logique floue, les évaluations n'étant que très rarement des valeurs exactes (Maystre, Bollinger. 1999).

5.9 Analyse de robustesse

L'analyse de robustesse cherche à élaborer des recommandations acceptables pour une vaste gamme de valeurs des paramètres.

Si en faisant varier les paramètres autour de leur valeur initiale, les résultats ne sont pas modifiés de manière importante, la recommandation est dite robuste.

Les paramètres suivants sont susceptibles de variations dues soit à l'incertitude des données de base, soit à la subjectivité des données volontaristes (Maystre et al. 1994) :

- Les poids des pseudo-critères.
- Les seuils d'indifférence.
- Les seuils de préférence stricte.
- Les seuils de veto.

5.10 Interprétation des résultats

La démarche évoquée a fait l'objet de diverses simulations conduisant à des recommandations pour le dragage et la mise en dépôt des sédiments contaminés des bassins intérieurs du Port Est de Dunkerque (Conférence internationale - gestion des milieux urbains, Alger 2002). Malgré la variation des paramètres, les analyses successives conduisent à constater que certains scénarios peuvent être recommandables en respectant la sensibilité et les hypothèses retenus par différents acteurs. En réalité le processus itératif d'analyse de robustesse doit consister à rechercher un sous-ensemble de plus en plus réduit de scénarios stables avec un effort croissant pour départager ces scénarios pouvant conduire à un consensus entre les différents acteurs

6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Nous avons montré à travers cette communication :

- L'intérêt de la méthode d'aide à la décision multicritère, par l'analyse des données disponibles et des contraintes d'exécution, par la recherche des scénarios et le choix de pseudo-critères d'évaluation.

- Comment la méthode proposée peut favoriser le dialogue et la négociation avec les différents acteurs.

L'intégration simultanée des pseudo-critères techniques, économiques, environnementaux, sanitaires et sociaux dans l'étude pour le choix potentiel des meilleurs scénarios permet d'associer mieux les différents acteurs notamment par la pondération personnalisée des pseudo-critères sélectionnés pour l'évaluation des scénarios.

La démarche proposée présente un caractère consensuel dans le sens où elle oblige à considérer les points de vue des différents acteurs en déroulant l'évaluation des scénarios de manière participative, en réduisant les risques de situations conflictuelles et en recherchant également les scénarios qui correspondent à une préférence commune pour l'ensemble des acteurs.

- L'opportunité de recourir à un outil de traitement considérant la logique floue en réponse à l'incertitude des évaluations des scénarios notamment dans le domaine environnementale.

Les perspectives de ce travail doivent permettre dans l'avenir, d'imbriquer l'étude d'impact sur l'environnement et l'aide à la décision multicritère pour le pilotage des opérations de dragage maritime en associant très tôt les préférences des différents acteurs pour un processus négocié de la gestion de l'environnement dans une logique de développement durable.

IFREMER, 2001. Géodrisk, la démarche d'analyse des risques liés à l'immersion des boues de dragage des ports maritimes, pp 4-6

MAYSTRE et al, 1994. Méthodes multicritères ELECTRE, description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale, pp11, 83-106, 168

MAYSTRE et al, 1999. Aide à la négociation multicritère, pratiques et conseils, pp 10-14, pp51-56.

GREGOIRE et al, 2002. Aide à la décision pour le choix d'un scénario de dragage intégrant une négociation multicritère (conférence internationale sur la gestion des milieux urbains, Alger)

BIBLIOGRAPHIE

Actes du séminaire international sur les aspects environnementaux liés aux activités de dragages. Nantes 1989., pp359-361

AIPCN, 1977. Rapport final de la Commission Internationale pour l'étude des effets du dragage et de l'évacuation des produits de dragage sur l'environnement, annexe au bulletin n°27, pp4-7.

Arrêté du 14 juin 2000 (J.O du 10 Août 2000) relatif aux niveaux de référence à prendre en compte lors d'une analyse de sédiments marins ou estuariens présents en milieu naturel ou portuaire.

Convention de Paris, 1992 : protection de l'environnement marin couvrant la zone maritime du Nord-Est de l'Atlantique et des océans arctiques y compris la Mer du Nord.

IFREMER, 1999. Dragages et environnement marin, état des connaissances, pp12-14, pp132-134.