

ER.QG 94.01

Mars 1994

**MOYENS D'ETUDES  
DES PHENOMENES SEDIMENTAIRES  
MARINS, ESTUARIENS ET FLUVIAUX**

-----

**SERVICE TECHNIQUE CENTRAL  
DES PORTS MARITIMES ET VOIES NAVIGABLES**

---

2, Boulevard Gambetta - B.P. 53  
60321 COMPIÈGNE Cédex - Téléphone 44 20 37 23 - Télécopie 44 20 06 75

STCPMVN

ER.QG 94.01

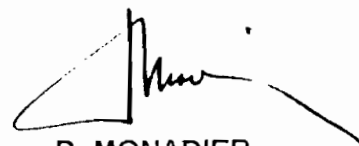
Mars 1994

**MOYENS D'ETUDES  
DES PHENOMENES SEDIMENTAIRES  
MARINS, ESTUARIENS ET FLUVIAUX**

-----

AUTEUR : C. MIGNIOT (LCHF -SOGREAH)

VU, LE CHEF DE SERVICE



P. MONADIER

Diffusion N

S O M M A I R E

	<u>Pages</u>
<u>INTRODUCTION</u> .....	1
<b>I.</b> <u>DIVERSITE DES PROBLEMES SEDIMENTOLOGIQUES</u> <u>LES PARAMETRES SUSCEPTIBLES D'INTERVENIR</u> .....	3
I.1.    DIVERSITE DES PROBLEMES SEDIMENTOLOGIQUES .....	3
1.1.1. Généralités .....	3
1.1.2. Problèmes susceptibles de se poser .....	4
I.2.    PARAMETRES INTERVENANT DANS LES ETUDES SEDIMENTOLOGIQUES ....	9
1.2.1. Généralités .....	9
1.2.2. Schémas de principe de la dynamique sédimentaire fluviale, marine et estuarienne .....	10
<b>II.</b> <u>DEFINITION DES OBJECTIFS A ATTEINDRE - LES CONSEQUENCES SUR</u> <u>L'ENVIRONNEMENT - LA FACON D'ABORDER UNE ETUDE SEDIMENTOLO-</u> <u>LOGIQUE</u> .....	13
2.1.    LES OBJECTIFS D'UN AMENAGEMENT ET LES CONSEQUENCES SUR L'ENVIRONNEMENT .....	13
2.1.1. Généralités .....	13
2.1.2. Schémas de quelques objectifs intégrés .....	14
2.2.    FACON D'ABORDER UNE ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE AVANT DE REALISER UN AMENAGEMENT FLUVIAL, MARITIME OU ESTUARIEN .....	14
<b>III.</b> <u>SYNTHESE DES DOCUMENTS EXISTANTS - ETUDES EN NATURE</u> .....	17
3.1.    EXAMEN PRELIMINAIRE DU SITE ET SYNTHESE DES DOCUMENTS EXISTANTS .....	17
3.1.1. Examen préliminaire du site .....	17
3.1.2. Recueil et synthèse des documents existants .....	17
3.1.3. Avant-projet des schémas d'aménagement .....	19
3.1.4. Programme détaillé des études à réaliser .....	19
3.2.    ETUDES EN NATURE .....	19
3.2.1. Géologie - Géographie .....	20
3.2.2. Hydrographie - Topographie .....	20
3.2.3. Océanographie - Hydrologie - Météorologie .....	20
3.2.4. Sédimentologie .....	21
3.2.5. Traceurs fluorescents et radioactifs .....	23
3.2.6. Mécanique des sols : sismique et forage .....	24
3.2.7. Pollution - Ecologie - Milieu vivant - Environnement	
3.2.8. Interprétation du rapport sur les études en nature ..	24

S O M M A I R E (suite)

	<u>Pages</u>
IV. <u>COMPORTEMENT DES SEDIMENTS SOUS LES ACTIONS HYDRODYNAMIQUES</u> <u>ETUDES SUR PLANS ET THEORIQUES - SCHEMAS DES AVANT-PROJETS</u> <u>D'AMENAGEMENT</u> .....	25
4.1. COMPORTEMENT DES SEDIMENTS SOUS LES ACTIONS HYDRODYNAMIQUES .	25
4.1.1. Vitesses de chute des particules .....	26
4.1.2. Tassement au cours du temps et gradient de tassement dans les dépôts .....	26
4.1.3. Rhéologie des dépôts et propriétés mécaniques des sols .....	27
4.1.4. Pentas d'équilibre sous l'eau ou à l'air et courants de turbidité .....	27
4.1.5. Comportement des sédiments sous l'action des courants	28
4.1.6. Action de la houle sur les sédiments .....	28
4.1.7. Actions cumulées des houles et des courants .....	29
4.1.8. Action des vents - transports éoliens .....	29
4.2. ETUDES SUR PLANS ET THEORIQUES .....	30
4.2.1. Domaine fluvial .....	30
4.2.2. Domaine maritime .....	32
4.2.3. Domaine estuarien .....	34
4.3. SCHEMAS DES AVANT-PROJETS D'AMENAGEMENT .....	37
V. <u>ETUDES SUR MODELES REDUITS PHYSIQUES SEDIMENTOLOGIQUES</u> .....	38
5.1. LA SIMILITUDE APPLICABLE AUX MODELES REDUITS SEDIMENTOLOGIQUES	39
5.1.1. Similitude géométrique .....	39
5.1.2. Similitude dynamique .....	40
5.1.3. Similitude sédimentologique .....	43
A. Conservation du même régime d'écoulement autour du grain .....	44
B. Conditions d'entraînement des sédiments sous les actions hydrauliques .....	44
C. Conservation de la trajectoire des particules en suspension .....	47
D. Conservation des mêmes lois de débits solides et du rapport entre les quantités transportées en charriage et en suspension - Triages granulométriques .....	47
E. Conservation du rapport entre le poids du matériau et les forces exercées par l'eau sur le fond .....	48
F. Transport correct dans le courant général de masse perpendiculaire à la plage .....	48
G. Conservation de la forme générale de la plage .....	48
H. Représentation des vases .....	48



S O M M A I R E (suite)

	<u>Pages</u>
5.1.4. Echelle des temps sédimentologiques .....	50
A. Echelle des temps sédimentologiques de transport de sable par la houle .....	50
B. Echelle des temps sédimentologiques applicable à des sédiments mis en suspension par la houle et transportés par un courant général ou un courant de marée .....	51
C. Echelle des temps sédimentologiques applicable au transport de sable par les courants de marée ...	51
D. Echelle des temps sédimentologiques applicable au mouvement des vases .....	52
5.1.5. Conclusions .....	53
5.2. L'ETALONNAGE DES MODELES REDUITS PHYSIQUES - LE TARAGE ET LES ORDRES DE GRANDEUR DES ECHELLES ADOPTEES ....	56
5.2.1. Etalonnage des modèles réduits physiques - le tarage .	56
5.2.2. Ordres de grandeur des échelles adoptées .....	58
5.2.3. Méthodologie des études sur modèles réduits .....	59
5.2.3.1 Modèles d'agitation et de seiches .....	59
5.2.3.2 Modèles sédimentologiques .....	60
a) Modèles sédimentologiques où la houle est dominante	61
b) Modèles sédimentologiques où l'action de la marée et notamment des courants de marée est dominante ..	63
c) Modèles sédimentologiques d'estuaires .....	65
d) Modèles fluviaux .....	68
e) Modèles d'ouvrages (influence sur les fonds) .....	69
5.2.3.3 Modèles de captage et de rejet d'eaux chaudes .....	69
5.2.3.4 Modèles de stabilité des ouvrages .....	70
5.2.3.5 Modèles divers .....	71
VI. <u>ETUDES A L'AIDE DE MODELES MATHEMATIQUES SEDIMENTOLOGIQUES</u> <u>PERSPECTIVES D'AVENIR</u> .....	72
6.1. ORGANISATION D'UN MODELE MATHEMATIQUE SEDIMENTOLOGIQUE .....	73
6.2. MODELES MATHEMATIQUES HYDRAULIQUES .....	76
6.2.1. Etudes fluviales .....	76
6.2.2. Etudes maritimes des houles .....	77
6.2.3. Etudes maritimes des courants côtiers et des estuaires	79
6.2.4. Etudes de diffusion des polluants .....	80
6.2.5. Modélisation tri-dimensionnelle et modèles hydrauliques en éléments finis .....	81

S O M M A I R E (suite)

	<u>Pages</u>
6.3. MODELES MATHÉMATIQUES SEDIMENTOLOGIQUES .....	82
6.3.1. Evaluation qualitative des mouvements sédimentaires à partir des résultats des modèles mathématiques hydrauliques - Associations entre modèles mathématiques et études sur plans .....	82
6.3.2. Association entre modèles mathématiques et modèles physiques : la modélisation hybride .....	83
6.3.3. Etudes fluviales .....	84
6.3.4. Etudes maritimes .....	86
6.3.5. Modèles estuariens - Représentation des transports de vase .....	87
6.4. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES MODELES REDUITS SEDIMENTOLOGIQUES PHYSIQUES ET MATHÉMATIQUES - PERSPECTIVES D'AVENIR .....	89
6.4.1. Avantages et inconvénients des modèles physiques sédimentologiques .....	90
6.4.2. Avantages et inconvénients des modèles mathématiques .	93
6.5. CONCLUSIONS .....	95
<u>CONCLUSIONS</u> .....	97
<u>BIBLIOGRAPHIE</u> .....	101
<u>ANNEXES</u> Caractéristiques de différents matériaux susceptibles d'être utilisés en modèle réduit pour représenter les sédiments naturels non cohésifs (galets - sables) et cohésifs (limons - vases).	

# INTRODUCTION

## INTRODUCTION

Un littoral, un estuaire ou une rivière sont, dans la plupart des cas dans un équilibre sédimentologique précaire et il suffit que l'un des paramètres qui conditionne cet équilibre soit modifié pour que des perturbations importantes apparaissent entraînant des difficultés soit pour les aménagements réalisés, soit pour les zones limitrophes. Au contraire, certaines modifications pourront apporter des améliorations appréciables à l'environnement sédimentaire d'un site.

Suivant la géométrie et la morphologie des fonds, l'importance des courants, l'amplitude de la marée, les caractéristiques des houles et des vents, la nature des matériaux transportés, l'orientation des ouvrages par rapport aux berges d'une rivière ou d'un littoral... les atterrissements sédimentaires pourront, en effet, se former et se développer de façon très différente.

Il est donc nécessaire, avant de réaliser un aménagement, de procéder à des recherches préalables permettant d'établir des présomptions sur les risques encourus et de définir des tracés d'ouvrages susceptibles de mieux s'adapter aux conditions locales et de répondre aux objectifs que l'on s'est fixés.

COMPRENDRE, PREVOIR, REMEDIER seront les trois domaines que l'on doit avoir présents à l'esprit après s'être fixé les OBJECTIFS techniques et financiers que l'on désire obtenir et les avoir situés dans un cadre très général où interviennent les interactions entre les phénomènes hydrauliques, sédimentaires, biologiques et humains.

Les études sédimentologiques permettent d'aborder ces problèmes en tenant compte à la fois des phénomènes géologiques "anciens" qui ont marqué le littoral, et notamment des importantes fluctuations des niveaux marins au cours des dix derniers millénaires et des phénomènes "récents" ou "actuels" qui peuvent agir directement sur les évolutions des fonds et qui sont liés aux caractéristiques des matériaux : galets, graviers, sables, silts, vases, algues ou herbes recouvrant les fonds... et aux conditions hydrauliques et océanographiques qui seront susceptibles d'agir sur ces sédiments. Il s'agit là d'une association entre certains aspects de la géologie, de l'hydraulique et de la dynamique sédimentaire [1].

Dans cette synthèse sur les "MOYENS D'ETUDE DES PHENOMENES SEDIMENTAIRES MARINS, ESTUARIENS ET FLUVIAUX" nous examinerons successivement :

- la diversité des problèmes sédimentologiques qui peuvent se poser et les paramètres qui peuvent intervenir,

---

[1] *Les facteurs essentiels de la dynamique sédimentaire dans le cadre de la construction des ouvrages en mer. Nécessité de leur étude à différentes échelles dans l'espace et dans le temps - C. MIGNIOT - A. S.T.E.O. 10ème Colloque - Janvier 1982.*

- les objectifs que l'on doit se fixer et les conséquences que cela peut avoir sur l'environnement. La façon d'aborder une étude sédimentologique,
- la synthèse des documents existants, les études en Nature et du comportement des sédiments sur les actions hydrodynamiques,
- les études sur plan et par le calcul : avantages et limites,
- les études à l'aide de modèles réduits physiques sédimentologiques,
- les études à l'aide de modèles mathématiques et les perspectives d'avenir.

Dans les conclusions des recommandations et le schéma de principe des études hydrosédimentaires seront synthétisés.

Précisons que l'on ne reprendra pas dans ce rapport les différentes formules des transports sédimentaires et l'on se reportera aux rapports établis par le L.C.H.F.-SOGREAH pour le Service Technique Central des Ports Maritimes et des Voies Navigables et notamment aux rapports relatifs à :

- abaques de transports solides des sédiments non cohésifs - Janvier 1987,
- synthèse des connaissances sur le tassement et la rhéologie des vases. Rapport n° 4238.R1 - Septembre 1987,
- définition des paramètres hydrosédimentaires à prendre en considération sur modèles mathématiques sédimentologiques. Rapport 54260.R1 - Mars 1988,
- manuel sur l'hydrodynamique sédimentaire (1ère partie) et l'érosion et sédimentation du littoral (2ème partie). Rapport n° 5.078.R1 et R2 - Mai et Juillet 1989,
- érosion aux abords des ouvrages maritimes. Rapport n° 51093 - Août 1989.

Pour ne pas surcharger ce rapport on trouvera en annexe les caractéristiques de différents matériaux susceptibles d'être utilisés en modèle réduit pour représenter les sédiments naturels non cohésifs ou cohésifs.

\* \*

\*

# CHAPITRE I

DIVERSITE DES PROBLEMES SEDIMENTOLOGIQUES  
LES PARAMETRES SUSCEPTIBLES D'INTERVENIR

## I

### DIVERSITE DES PROBLEMES SEDIMENTOLOGIQUES

#### LES PARAMETRES SUSCEPTIBLES D'INTERVENIR

#### I.1. DIVERSITE DES PROBLEMES SEDIMENTOLOGIQUES

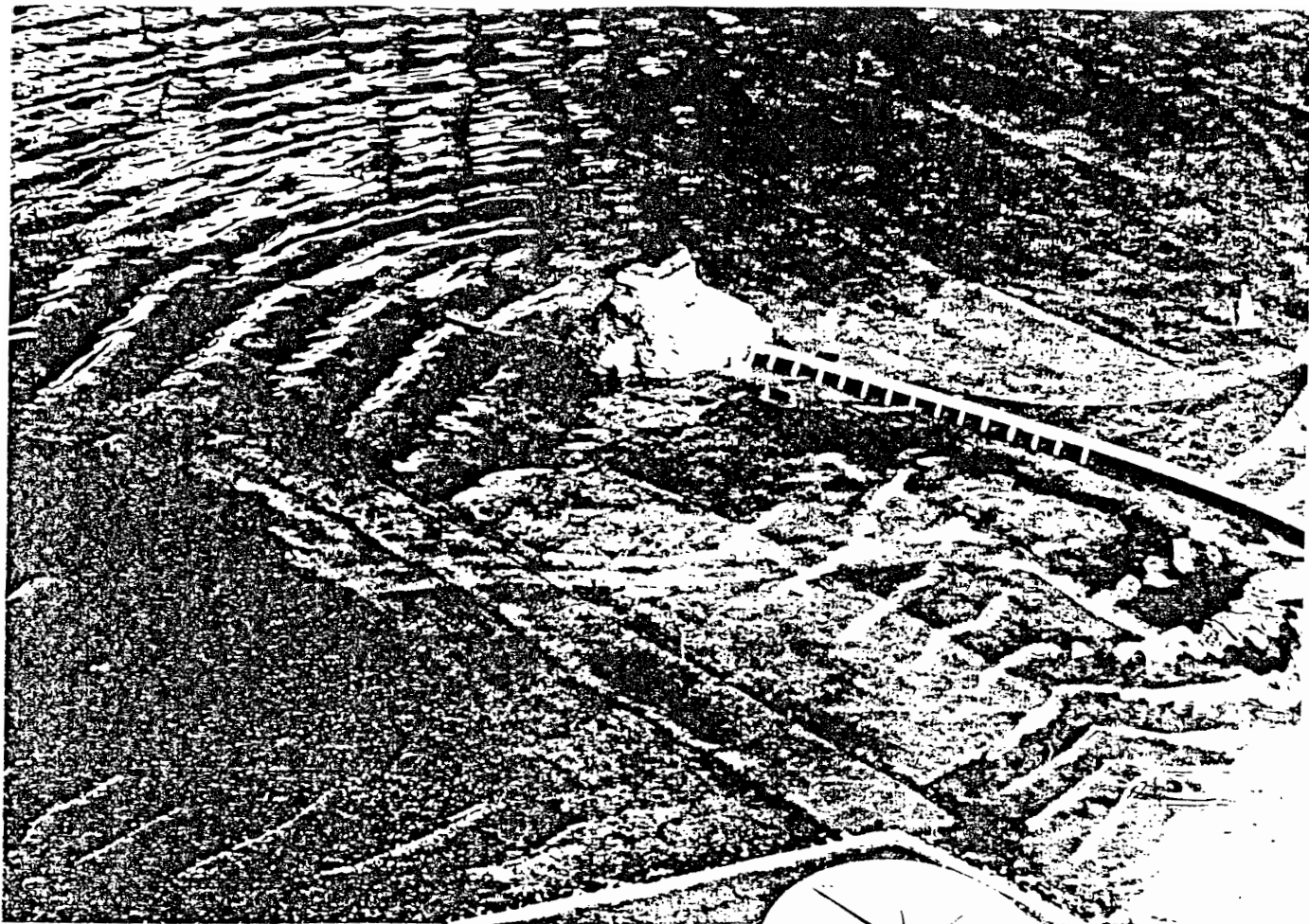
##### 1.1.1. GENERALITES

La diversité des problèmes qui peuvent se poser sur le plan sédimentologique est très grande. Une méconnaissance des facteurs susceptibles d'agir sur les évolutions des fonds risque d'entraîner des répercussions à court terme et à long terme et de condamner irrémédiablement une installation maritime ou fluviale et de provoquer des dommages dans des secteurs relativement éloignés.

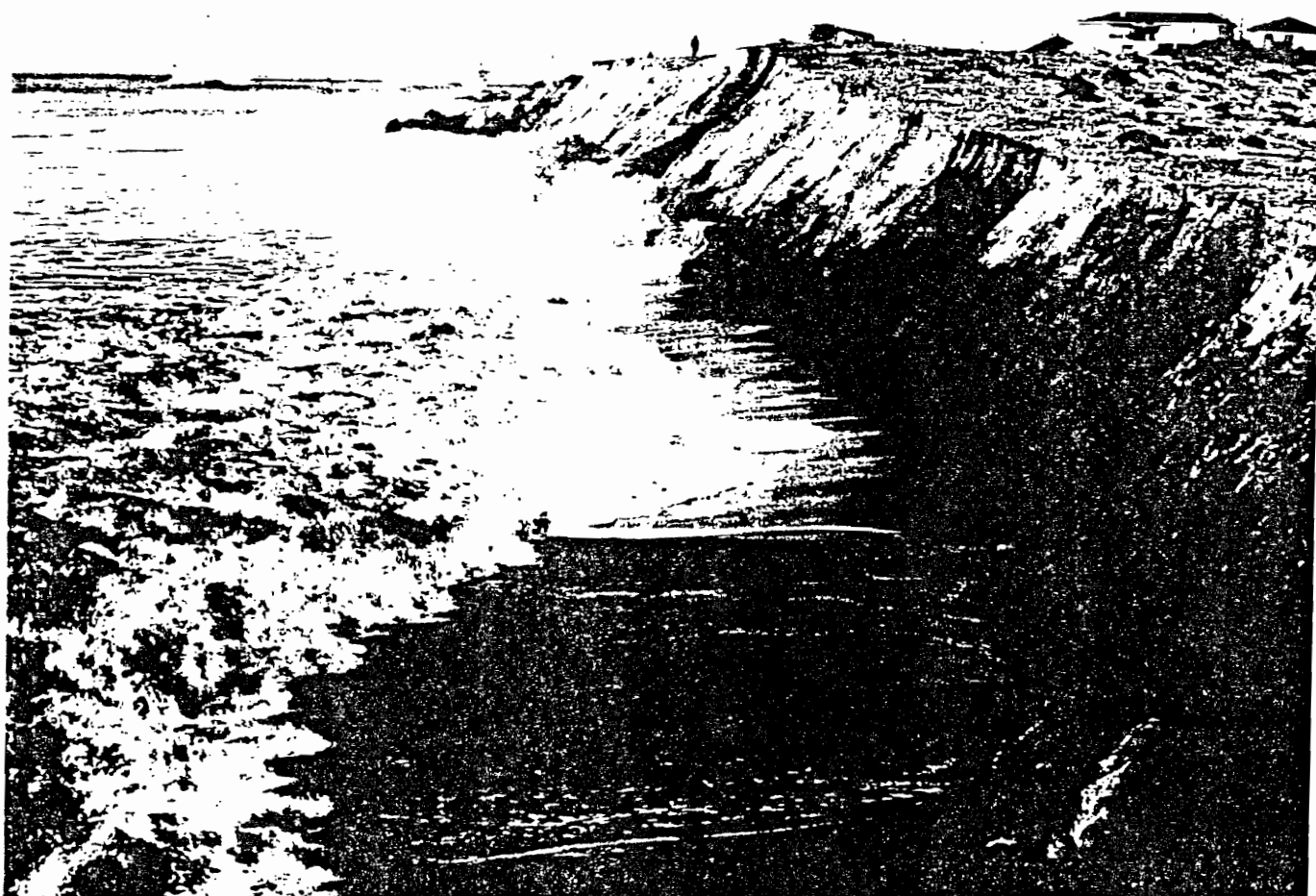
C'est ainsi que des extractions trop importantes d'agrégats dans une rivière peuvent entraîner une érosion des fonds non seulement vers l'aval mais vers l'amont avec un enfoncement du lit de la rivière, des affouillements près des ouvrages, des dégradations des rives... Le rejet massif de sédiments au cours d'un dévasement de barrage, avec un apport solide très supérieur aux possibilités de transports hydrauliques, peut provoquer une surélévation des fonds et une dégradation de la qualité des eaux avec toutes les répercussions que cela peut avoir pour les inondations, la pollution, la pêche... Des dragages massifs dans le bief amont d'un estuaire risquent de favoriser la remontée de la marée et de l'intrusion saline dont les répercussions viendront s'ajouter aux interactions sédimentaires. Le long d'une côte, soumise à un transit littoral important, la réalisation d'un ouvrage maritime provoquera des accumulations de matériaux susceptibles, à la longue, de contourner les jetées et de venir bloquer la passe d'entrée, mais surtout d'entraîner des érosions des plages dans la zone sous le vent qui pourront se propager sur des dizaines de kilomètres mettant en péril les installations limitrophes... Des rejets de produits de dragages au large des côtes pourront non seulement entraîner des surélévations des fonds mais subir des recyclages en libérant brutalement les éléments toxiques contenus dans les sédiments très fins (métaux lourds, nucléides, microbes...).

Un aménagement doit donc se concevoir pour répondre aux OBJECTIFS que l'on s'est fixés pour un site déterminé mais il doit s'INTEGRER dans une province sédimentaire assez vaste en établissant un DIAGNOSTIC aussi précis que possible permettant de prévoir ses effets sur l'équilibre des zones limitrophes aussi bien pour l'évolution des fonds et les phénomènes hydrauliques que pour les problèmes écologiques et esthétiques.





1 MONT-SAINT-MICHEL - Sauvegarde environnement marin



2 PLAGE D'ANGLET (P.A.) - Erosion du littoral avant les aménagements de protection

1.1.2. PROBLEMES SUSCEPTIBLES DE SE POSER

La liste des problèmes sédimentologiques qui peuvent se poser pour les aménagements maritimes, estuariens et fluviaux ne peut être exhaustive et un aperçu sera donné dans ce paragraphe pour attirer l'attention sur l'importance des problèmes sédimentaires que l'on peut rencontrer dans les différentes disciplines et les travaux qu'ils entraînent.

- AMENAGEMENT DES LITTORAUX :

Protection des plages contre l'érosion, protection d'un site contre la sédimentation, aménagement de sites balnéaires, création de plages artificielles et de marinas, réalisation de routes en front de mer, aménagement des dunes et protection contre les transports éoliens, lutte contre la pollution des eaux et des plages, création de parcs ostréicoles ou piscicoles, sauvegarde d'un site (Mont-Saint-Michel) et préservation de l'environnement, création de polders [2]... (photographies 1 et 2).

Les travaux porteront sur la réalisation d'épis, de brise-lames, de rechargements des plages, d'ouvrages de haute plage (per-rés...), de by-pass de sables, de revêtements, de plantations de fascinages et de plantes de fixation, de stations de rejets en mer d'effluents, etc...

- CONSTRUCTIONS PORTUAIRES (commerce, pêche, plaisance) :

Protection contre l'agitation et les seiches, contre l'ensablement et l'envasement, lutte contre les accumulations et risques de contournement des ouvrages par les sédiments, maintien des chenaux d'accès, protection des plages sous le vent contre l'érosion, protection contre les algues, stabilité des digues et affouillements en pied des ouvrages, passage des sédiments par-dessus des ouvrages par actions éoliennes ou par porosité à travers les ouvrages, pollution des plans d'eau [3 - 4 - 5] (photographies 3 et 4).

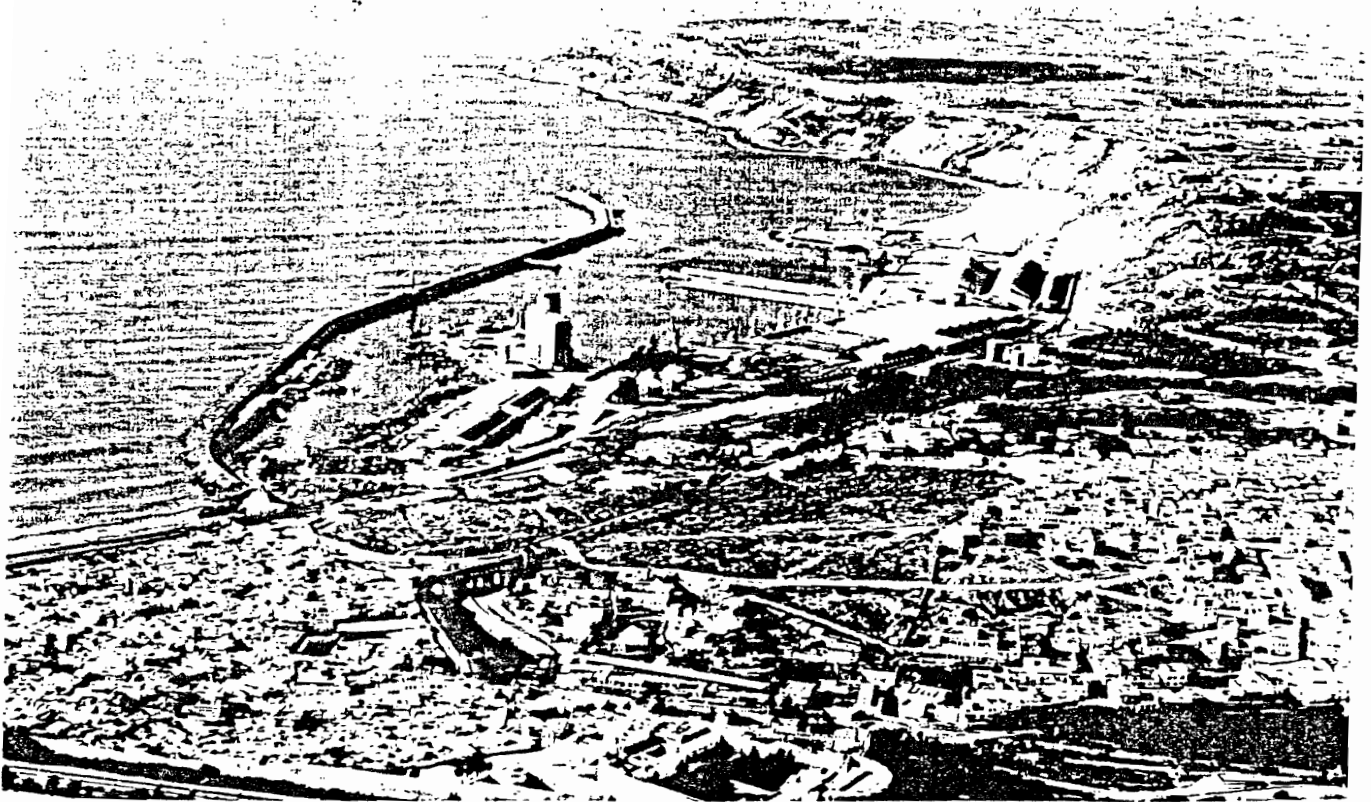
---

[2] Erosion et sédimentation en mer. Manuel sur l'Hydrodynamique Sédimentaire (2ème partie) - L.C.H.F. - S.T.C. - 1989.

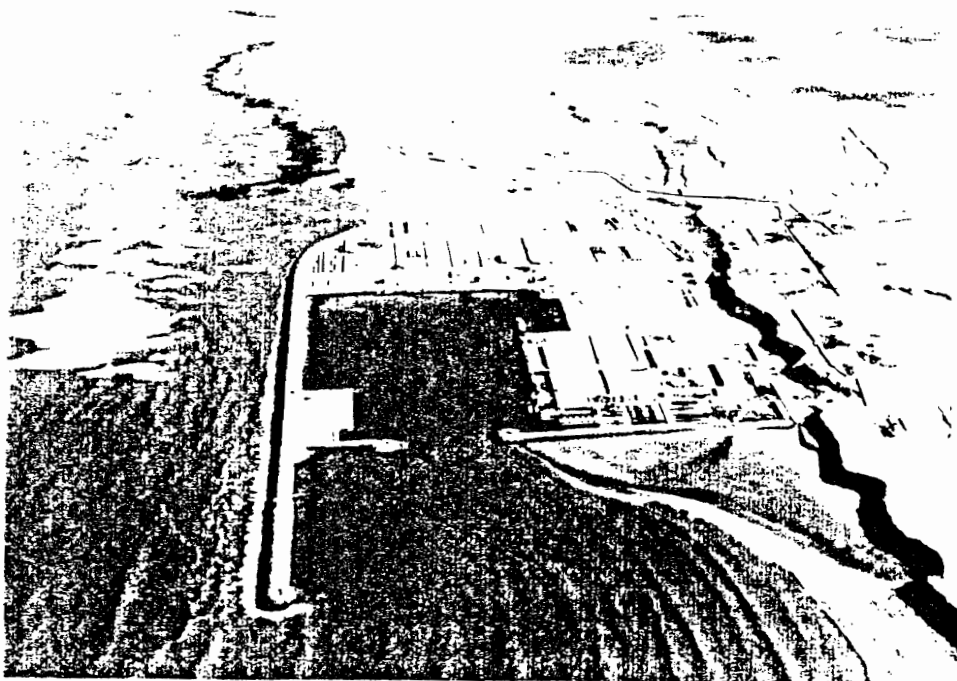
[3] Etude de la dynamique sédimentaire marine, fluviale et estuarienne - C. MIGNIOT - Thèse Doctorat es-Sciences - PARIS-SUD - 1982.

[4] Influence d'un ouvrage maritime sur l'évolution d'un littoral sableux - S. MANOUJIAN - XVIIIe journées de l'Hydraulique - S.H.F. - Septembre 1984.

[5] Les problèmes d'ensablement des Ports Marocains - L. CHARROUF - Thèse Doctorat - PARIS-SUD - 1989.



**3** PORT DE SAFI - Lutte contre l'ensablement



**4** PORT DE TANTAN - Dépôts dans le courant d'expansion de la houle

Les travaux porteront sur la réalisation de digues, épis, quais, dragages des chenaux d'accès et des zones portuaires avec rejets des matériaux, problèmes de navigabilité sur des fonds plus ou moins consolidés, mise en place de by-pass, etc...

- *INFRASTRUCTURES OFF-SHORE :*

Stabilité des fonds, phénomènes de sous-pression sur les sédiments (fluidification), protection du pied des ouvrages, amarage des bateaux, revêtement des sols, pose de sea-lines... (*photographie 5*).

Les travaux porteront sur la réalisation et la mise en place des structures dans des zones soumises à des houles très importantes (30 m de hauteur), la protection du pied des ouvrages par grande profondeur, le maintien des sea-lines...

- *PRISES D'EAU DE MER pour le refroidissement des usines et centrales :*

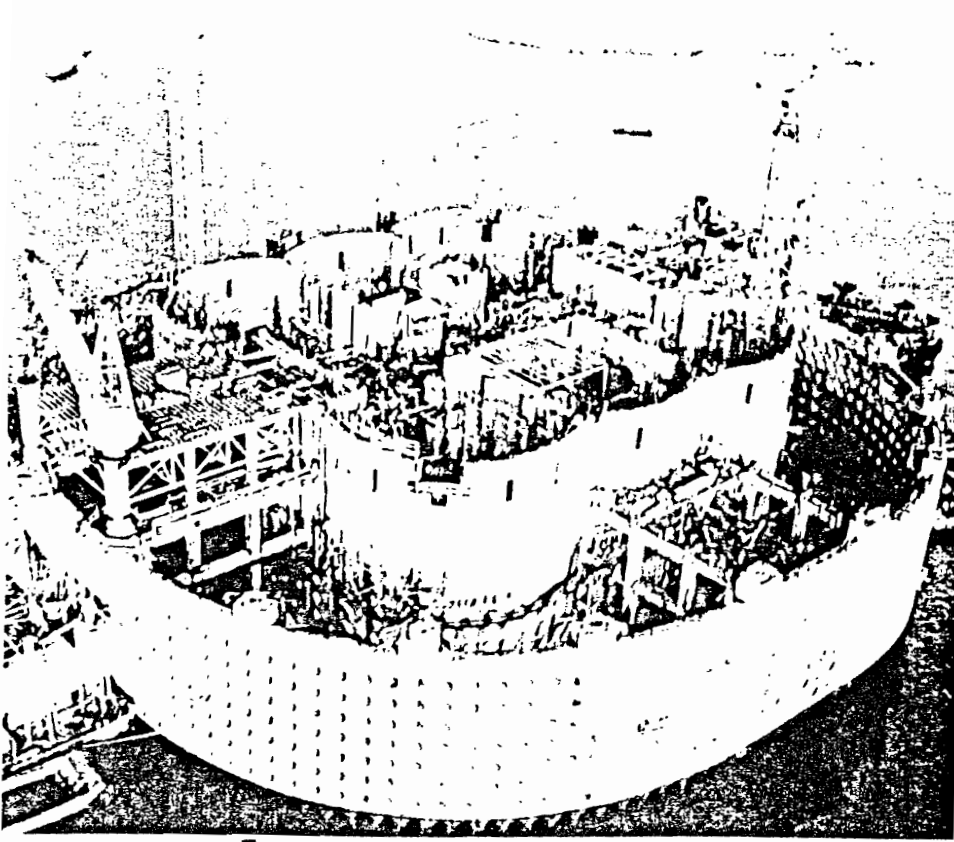
Eviter de pomper des sables en suspension, création de bassins de pompage ou de tours de prise d'eau par grande profondeur, réduire les perturbations sur l'équilibre du littoral, prendre en compte les courants d'aspiration qui viennent s'ajouter aux actions océanographiques, tenir compte des algues et des poissons qui peuvent être aspirés, des polluants chimiques ou déchets pétroliers, de la prolifération des mollusques, éviter le recyclage des eaux chaudes rejetées... (*photographie 6*).

Les travaux porteront sur : aménagement de bassins de protection, de tours de prise d'eau, de sea-lines, d'installation de filtrage et de bassins de décantation, des canaux de rejets en mer permettant d'assurer une bonne dilution et une dispersion des eaux chaudes, etc...

- *REJETS DES EAUX USEES en mer :*

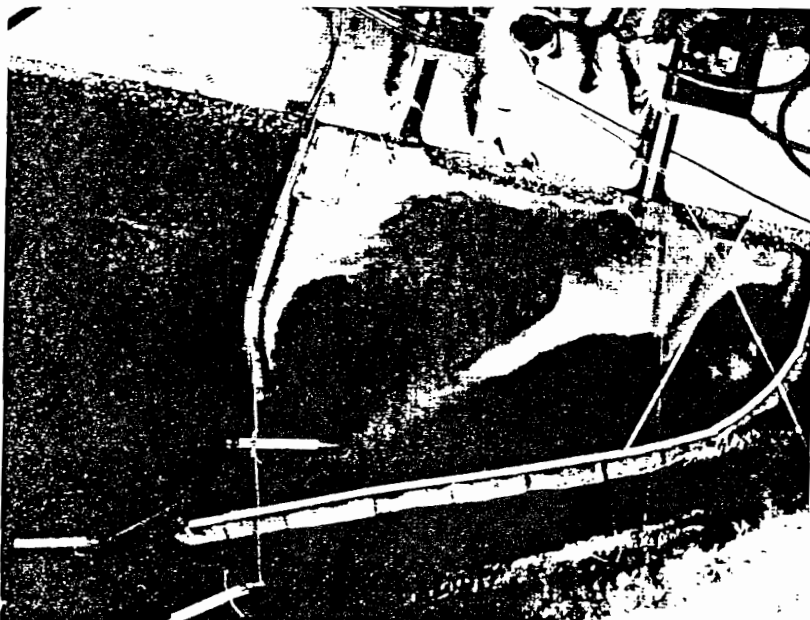
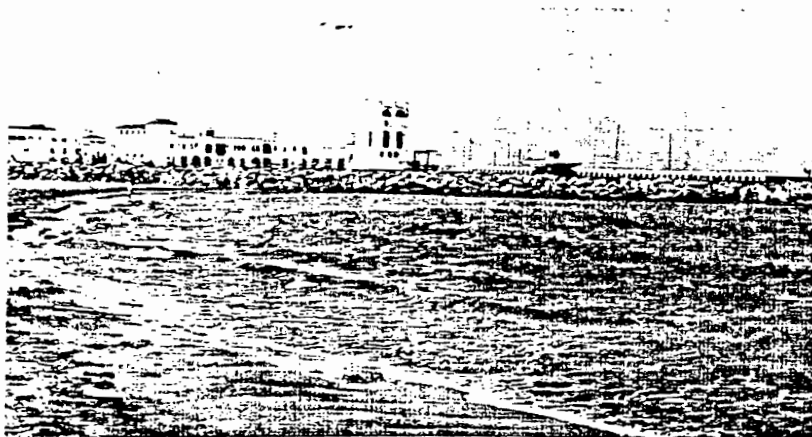
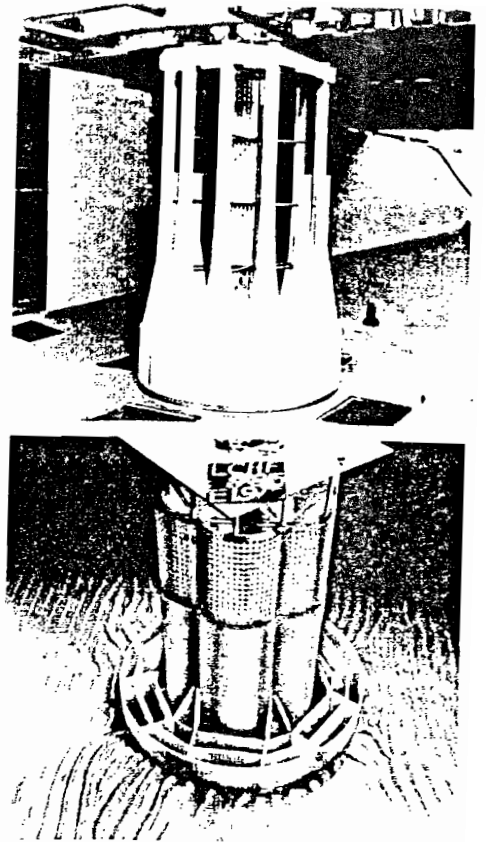
Pose de sea-lines, dilution des polluants fixés sur les particules sédimentaires très fines, pollutions thermiques, chimiques et bactériennes, à courte et longue distance, influence sur la faune et la flore... (*photographie 7*).

Les travaux porteront sur : station d'épuration et traitement, canalisation de rejet et protection des installations par des enrochements, recherche de la profondeur optimale de rejet, élimination des sédiments pollués (dragages et mises en dépôt), etc...



5

INFRASTRUCTURES OFF-SHORE - Protection pied des ouvrages



6-7

PRISES D'EAU ET REJETS D'EAUX CHAUDES



- EXTRACTION DES AGREGATS EN MER :

Comblement des souilles, action sur le littoral, réserve sédimentaire marine et nature des agrégats... [6].

Les travaux porteront sur : recherche du site, engins d'extraction par grande profondeur, refoulement et mise en dépôt à terre...

- DRAGAGES EN MER :

Connaissance des matériaux à draguer, de leur consolidation, des possibilités de dilution, conditions de décantation dans les puits, conditions de refoulement (pertes de charge dans les conduites), rejet en mer, estimation des dépôts, courants de turbidité et reprise par les actions hydrodynamiques... (photographie 8).

Les travaux porteront sur : les recherches des moyens de dragage, de transport et de refoulement les mieux appropriés (drague aspiratrice, désintégrateur, dragues à bennes...), les conditions et les zones de dépôts.

- AMENAGEMENT DES ESTUAIRES :

Correction du tracé, calibrage, approfondissement, propagation de la marée et de l'intrusion saline, ensablement et envasement, dragages et rejets des produits dragués, aménagement des darses et postes à quais, pollution, environnement de l'estuaire et des zones inondables, influence du débit fluvial [7 - 8 - 9 - 10]... (photographie 9).

Les travaux porteront sur : dragages, rectification du cours, épis de protection des berges, calibrage, seuils de fonds, digues submersibles, quais, prises d'eau, etc...

---

[6] Influence des extractions d'agrégats en mer sur l'équilibre des littoraux - J. VIGUIER et C. MIGNIOT - Houille Blanche - 1979.

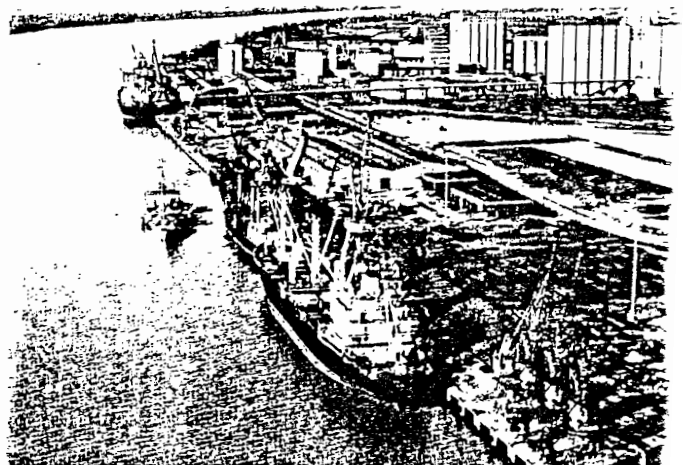
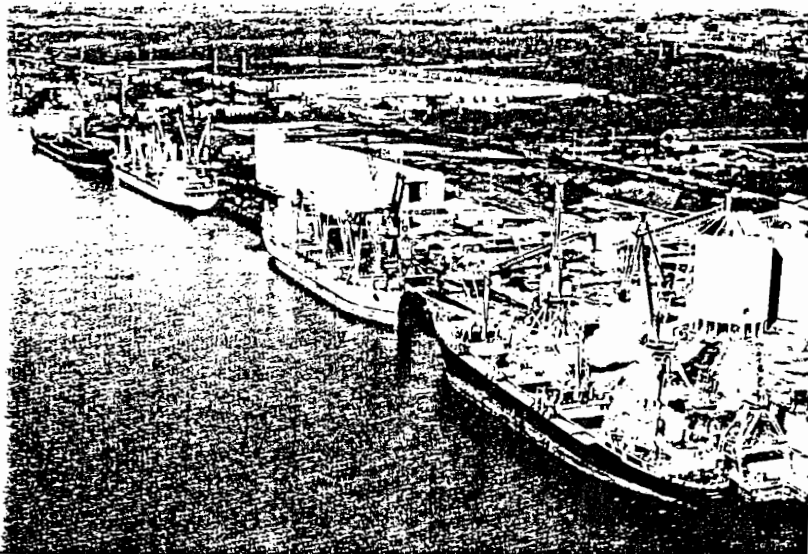
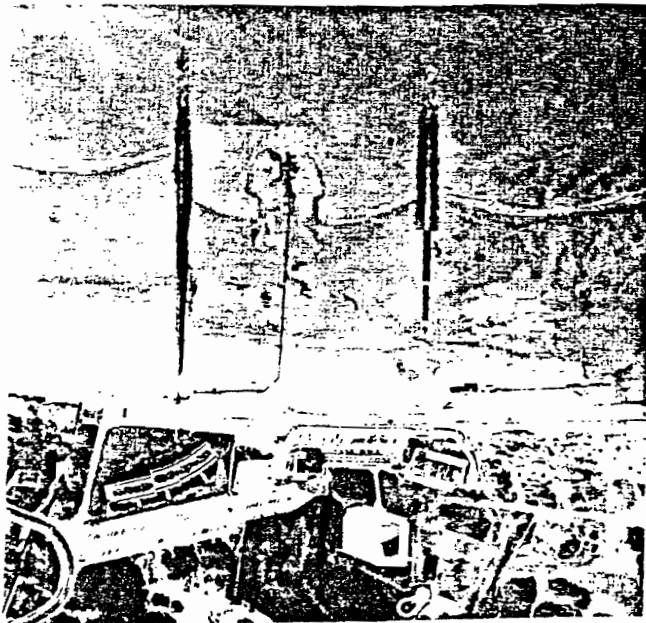
[7] Etude sur les mouvements des sédiments péltiques dans les modèles d'estuaire soumis à la marée - L.C.H.F. - D.P.V.N. - Décembre 1970.

[8] Etude comparative des mouvements sédimentaires de quelques estuaires - B. BELLESSORT - Houille Blanche n° 8 - 1972.

[9] Dynamique sédimentaire estuarienne - C. MIGNIOT - Institut océanographique - Océanis Vol. 6 - 1980.

[10] Les matières en suspension dans les estuaires - C. MIGNIOT - Comité Français de Géologie de l'Ingénieur - Octobre 1983.

Photos Heacon





- PROTECTION DES EMBOUCHURES :

Interactions entre les volumes d'eau oscillant de l'estuaire et les remaniements par les houles dans le profil et dans le transit littoral, formation de barres, de déplacement des débouchés en mer, difficultés nautiques... (photographies 10 et 11).

Les travaux porteront sur : la fixation de l'embouchure et la concentration des courants pour maintenir les profondeurs : digues, jetées, dragages, bassins de chasses, épis sur la côte, enibecquetage de l'embouchure, chenaux d'accès...

- NAVIGATION DANS LES CHENAUX ENVASES :

Manoeuvres des navires dans des chenaux envasés, définition de la profondeur nautique, modification du pied de pilote et de l'assiette du navire, augmentation de la puissance nécessaire pour conserver la vitesse, influence de la cohésion des fonds et du gradient de concentration dans les dépôts, possibilité de réduire le pied de pilote et d'augmenter le tirant d'eau [11]... (photographie 12).

Les travaux porteront sur : une amélioration des connaissances de la nature des fonds, de la profondeur exacte au-dessus d'un seuil de concentration ou de rigidité (sondes densimétriques et rhéologiques), des caractéristiques et des aménagements des navires, des conditions de progression et de manoeuvre des navires, etc...

- PRELEVEMENTS D'EAU DOUCE EN ESTUAIRE :

Remontée saline, gradients salinité et mélange des eaux douces et salées, influence débit fluvial, modification de la propagation saline par dragages... intérêt pour l'alimentation en eau des villes et de l'agriculture.

Les travaux porteront sur : la prévision de la remontée saline au cours de la marée et des conditions hydrologiques, la mise en place du soutien d'étiage, la programmation des prises, les profondeurs de la prise...

- REJETS D'EFFLUENTS EN ESTUAIRE :

Fixation et concentration des polluants chimiques, nucléaires et biologiques sur les vases. Risque de remontée des polluants dans l'estuaire en fonction de l'heure de la marée, stockage des polluants dans les dépôts des vases, problèmes d'utilisation des vases polluées, etc...

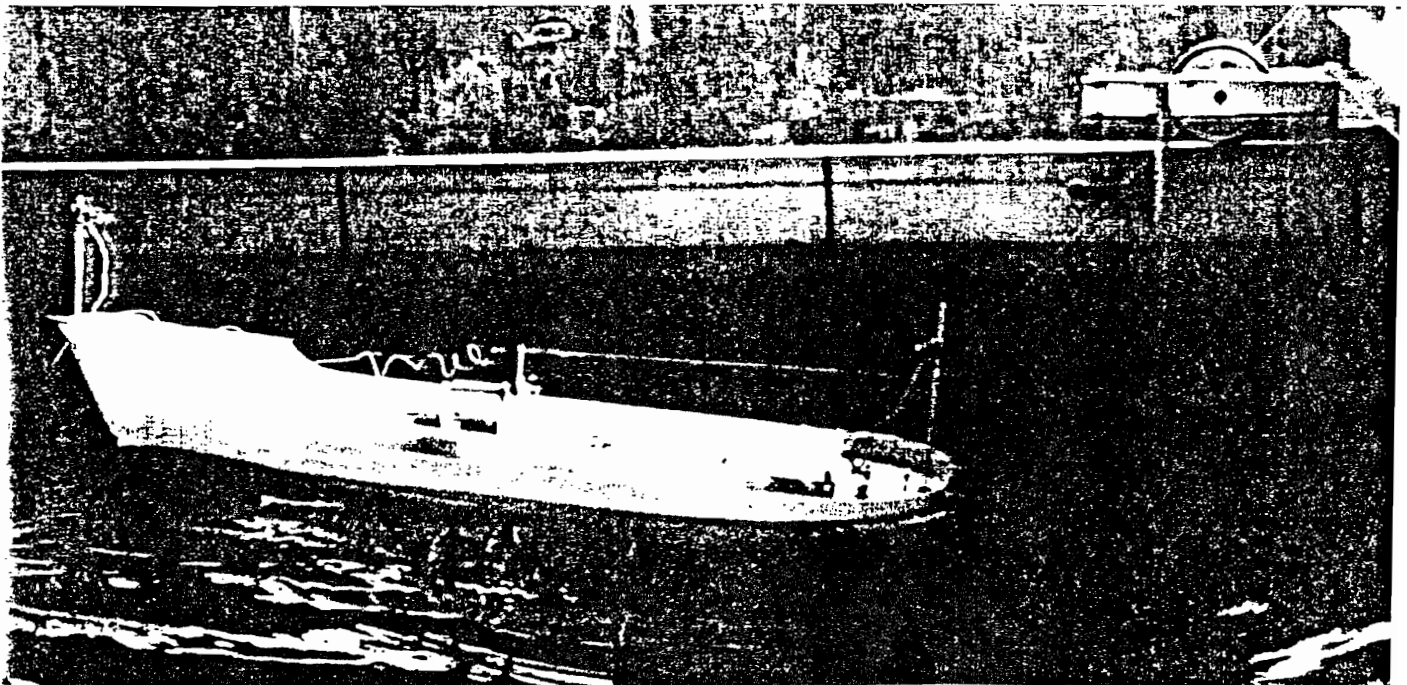
---

[11] Navigabilité dans les chenaux envasés - J. VIGUIER et J.M. ROQUES - L.C.H.F. - S.T.C. - Avril 1986.



D-11

COLMATAGE DES EMBOUCHURES PAR LES SABLES



Les travaux tiendront compte des taux de pollution, des méthodes d'extractions des dépôts, de leurs rejets au large ou dans des champs d'épandage (consolidation et reprise...). Problèmes d'absorption-désorption en fonction de la nature minéralogique des argiles...

- AMENAGEMENTS DES RIVIERES :

Hydrologie et érosion spécifique des bassins versants. Stabilisation des chenaux de navigation et des berges, lutte contre l'érosion et la sédimentation, déviation et correction des cours d'eau, maintien des souilles, maintien des cotes d'eau minimales, extraction des granulats, pollution chimique ou biologique, aménagements de barrages, écluses, canaux [12]... (photographie 13).

Les travaux porteront sur : épis, seuils, digues, revêtement des berges, protection des sols, dragages, etc...

- BARRAGES D'ACCUMULATION :

Modification du régime hydraulique, sédimentation des retenues et évacuation des sédiments, érosion à l'aval, transport des agrégats dans le bief aval, stabilité de l'ouvrage... (photographie 14).

Les travaux porteront sur : barrages, canaux, seuils d'évacuation, protection des berges, dragages et hydro-aspirateurs, vidages périodiques et définition des transports solides en fonction du débit liquide évacué [13]...

- OUVRAGES HYDRAULIQUES ET EPURATION DES EAUX :

Décantation des sédiments, bassin d'épuration, circulation des eaux, écluses et tunnels sous les rivières (envasement, ensouillement. ..) dragues, rendements, puits...

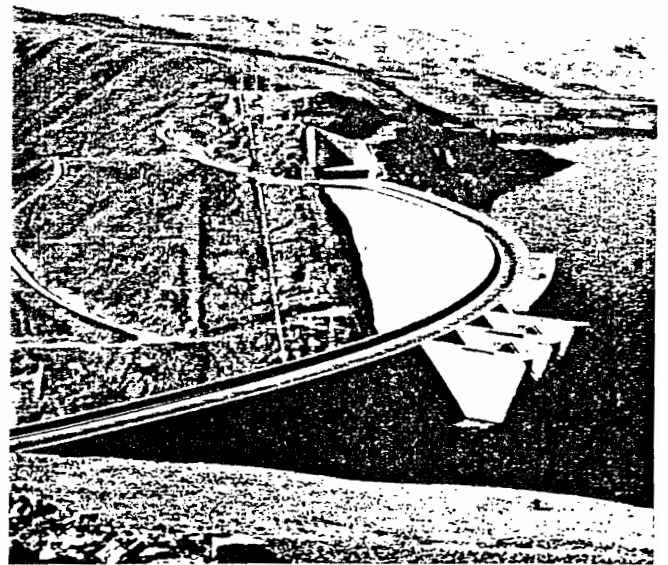
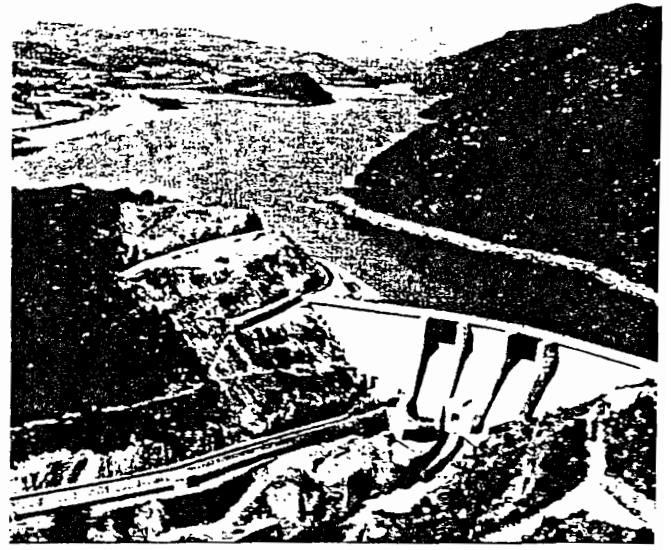
Les travaux sont très diversifiés mais font tous appel à une bonne connaissance des problèmes hydrosédimentaires.

- ETC...

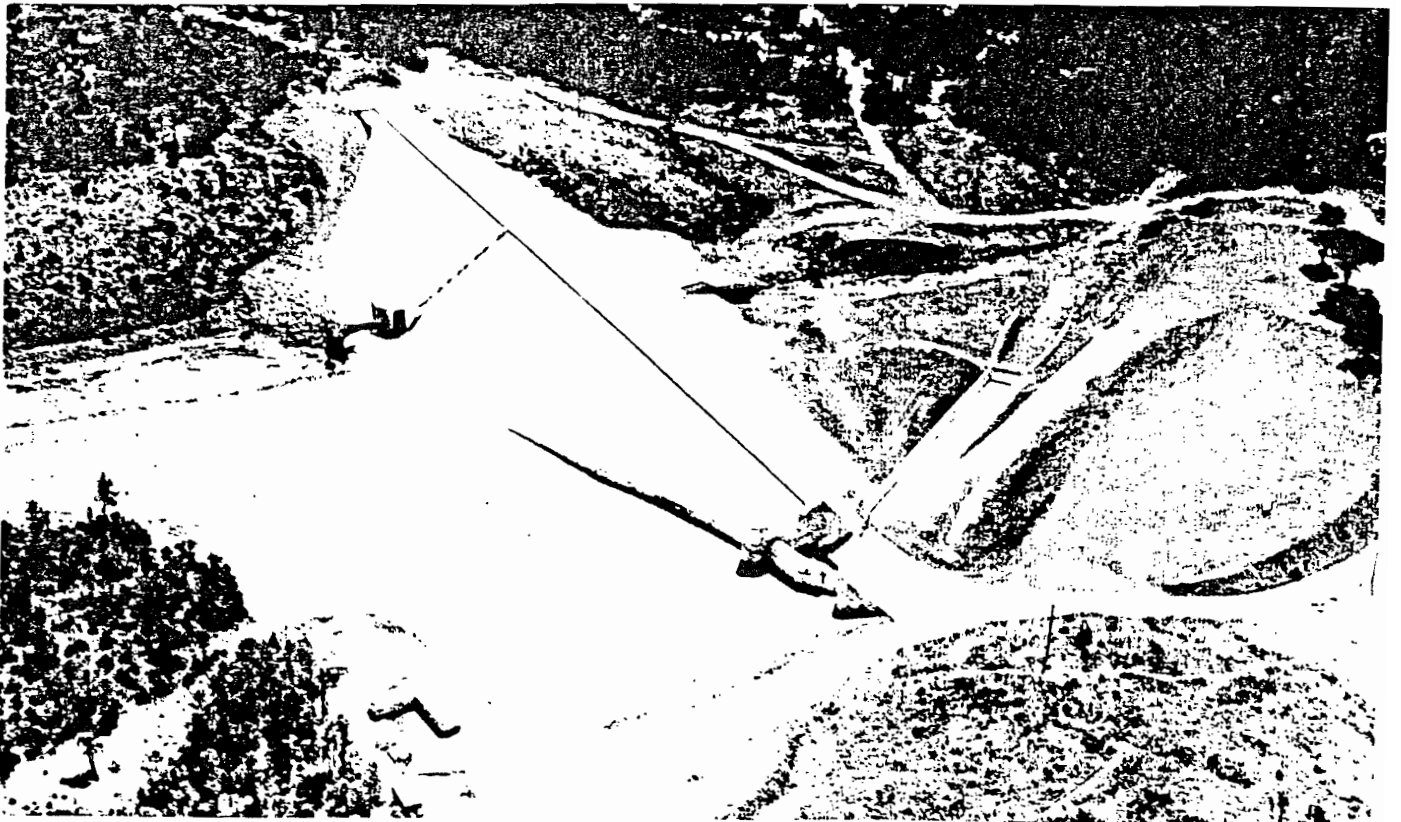
---

[12] Guide d'hydraulique fluviale - E.D.F. Direction Etudes et Recherches - M. RAMETTE - Avril 1981.

[13] Rejets des produits de dragage à l'aval d'un barrage sur l'Oued HAMIZ - J. VALEMBOIS et C. MIGNIOT - Houille Blanche n° 2 et 3 - 1973.



13 EROSION DES BERGES D'UNE RIVIERE



Pratiquement dans toutes les installations et aménagements où interviennent des sédiments et un milieu transporteur (eau, air, liquides divers), les problèmes hydrosédimentaires se poseront avec toutes les interactions entre les différents facteurs en présence. On ne peut aborder de tels problèmes qu'en s'appuyant sur des études très complètes qui prennent en considération l'ensemble des paramètres susceptibles d'intervenir et en les associant aux objectifs que l'on s'est fixés et aux possibilités financières de les réaliser.

## I.2. PARAMETRES INTERVENANT DANS LES ETUDES SEDIMENTO-LOGIQUES

### 1.2.1. GENERALITES

Les paramètres susceptibles d'intervenir dans les études sédimentologiques peuvent être classés sommairement en 5 groupes liés aux problèmes géologiques, morphologiques, géographiques et hydrauliques, à la nature des matériaux et aux interventions humaines.

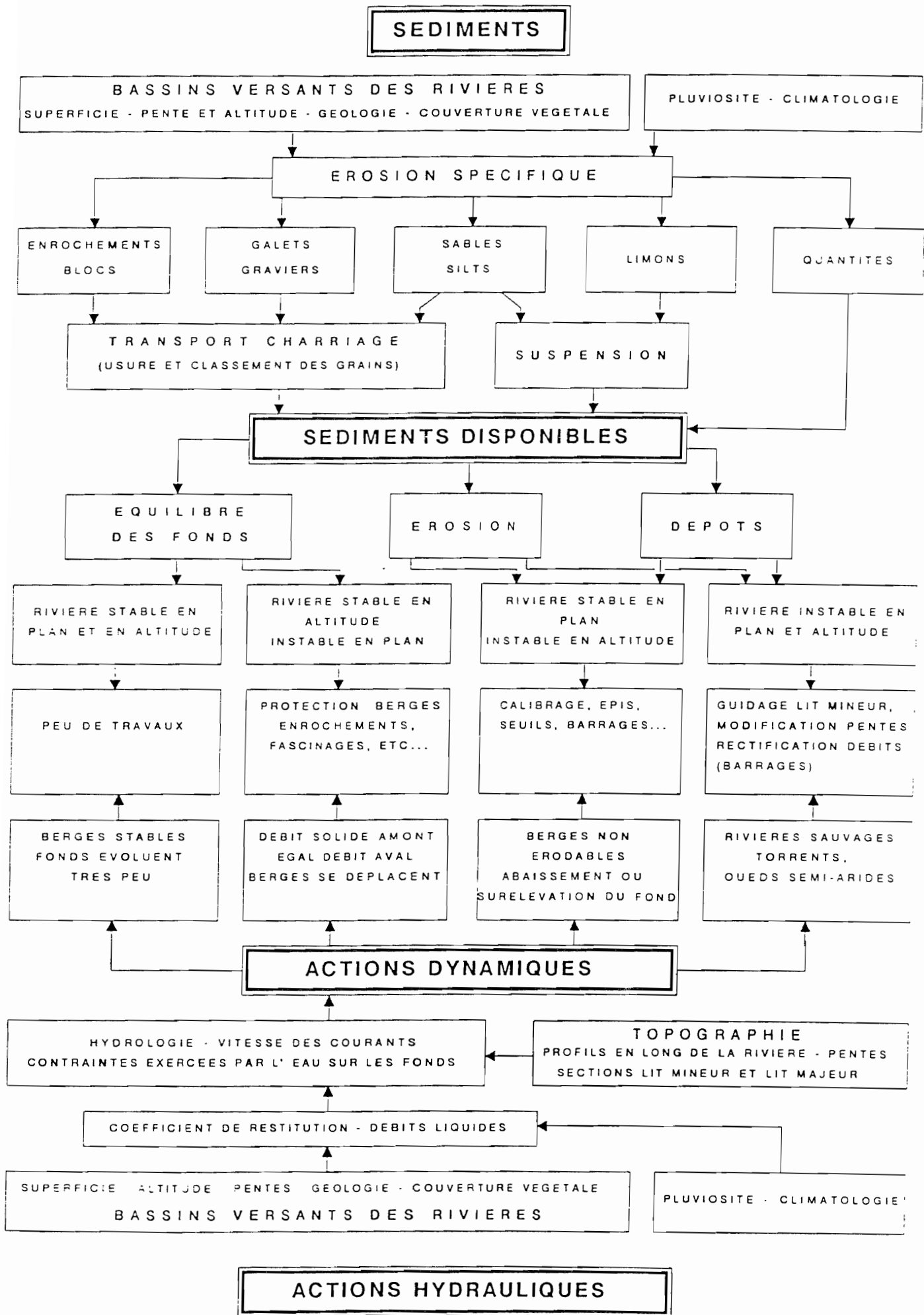
Les problèmes géologiques sont indispensables à préciser pour implanter un aménagement dans un site déterminé en tenant compte de la nature du substratum, des phénomènes tectoniques, du colmatage des fonds au cours de la transgression flandrienne, de l'évolution du niveau moyen de la mer, de l'épuisement du stock sédimentaire marin... et d'une façon générale de tous les phénomènes naturels anciens qui ont pu marquer le secteur des études ou pourront le marquer au cours des évolutions géologiques futures.

La morphologie du terrain et la géographie devront tenir compte du découpage des côtes, des pentes et de la nature des terrains, des zones submersibles par les eaux, des fonds marins limitrophes...

Les facteurs hydrauliques ou plus exactement dynamiques engloberont tous les paramètres susceptibles d'agir sur les mouvements sédimentaires : marées, courants, débits fluviaux, houles, seiches... ainsi que les actions météorologiques tels que le vent et les transports éoliens ou la pluviosité et la température qui pourront agir sur la dégradation des roches.

La nature des matériaux devra tenir compte de leur origine fluviale, marine, éolienne ou artificielle ainsi que leurs caractéristiques granulométriques, morphoscopiques, minéralogiques et chimiques. La notion de stock sédimentaire disponible ainsi que l'importance des apports et les conditions de transport en charriage ou en suspension resteront des paramètres importants à prendre en considération.

# SCHEMA DE LA DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE FLUVIALE





Les actions humaines sont loin d'être négligeables et leur connaissance à court et moyen terme est indispensable pour se faire une idée plus précise des évolutions sédimentaires qu'elles ont entraînées. Appauvrissement en sédiments par suite des dragages, réduction des apports terrigènes par réalisation de barrages et protection des sols contre l'érosion, arrêt du transit littoral par des ouvrages implantés le long de la côte... autant d'interventions qui pourront perturber l'équilibre précaire de nos rivières, estuaires ou littoraux.

Tous ces paramètres vont "marquer" les sédiments et entraîner des évolutions des fonds qu'il faudra prévoir, comprendre, maîtriser.

### 1.2.2. SCHEMAS DE PRINCIPE DE LA DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE FLUVIALE, MARINE ET ESTUARIEENNE

Compte tenu du nombre de paramètres à prendre en considération dans une étude sédimentologique, il est difficile d'établir des schémas de principe rigoureux à prendre en considération dans l'élaboration d'un projet.

On trouvera toutefois, à titre indicatif, sur les figures 1, 2 et 3 des schémas de la dynamique sédimentaire fluviale, marine et estuarienne.

La dynamique sédimentaire fluviale (*Figure 1*) devra prendre en compte les caractéristiques des bassins versants des rivières, leur superficie, leur pente et altitude, la nature géologique des sols, la couverture végétale et les remaniements apportés par l'homme (labourage, défrichement, plantation...). La pluviométrie et les actions climatiques (gels, soleil...) agiront pour d'une part moduler les coefficients de restitution liquide, d'autre part l'érosion spécifique des sols et la production des agrégats en résultant.

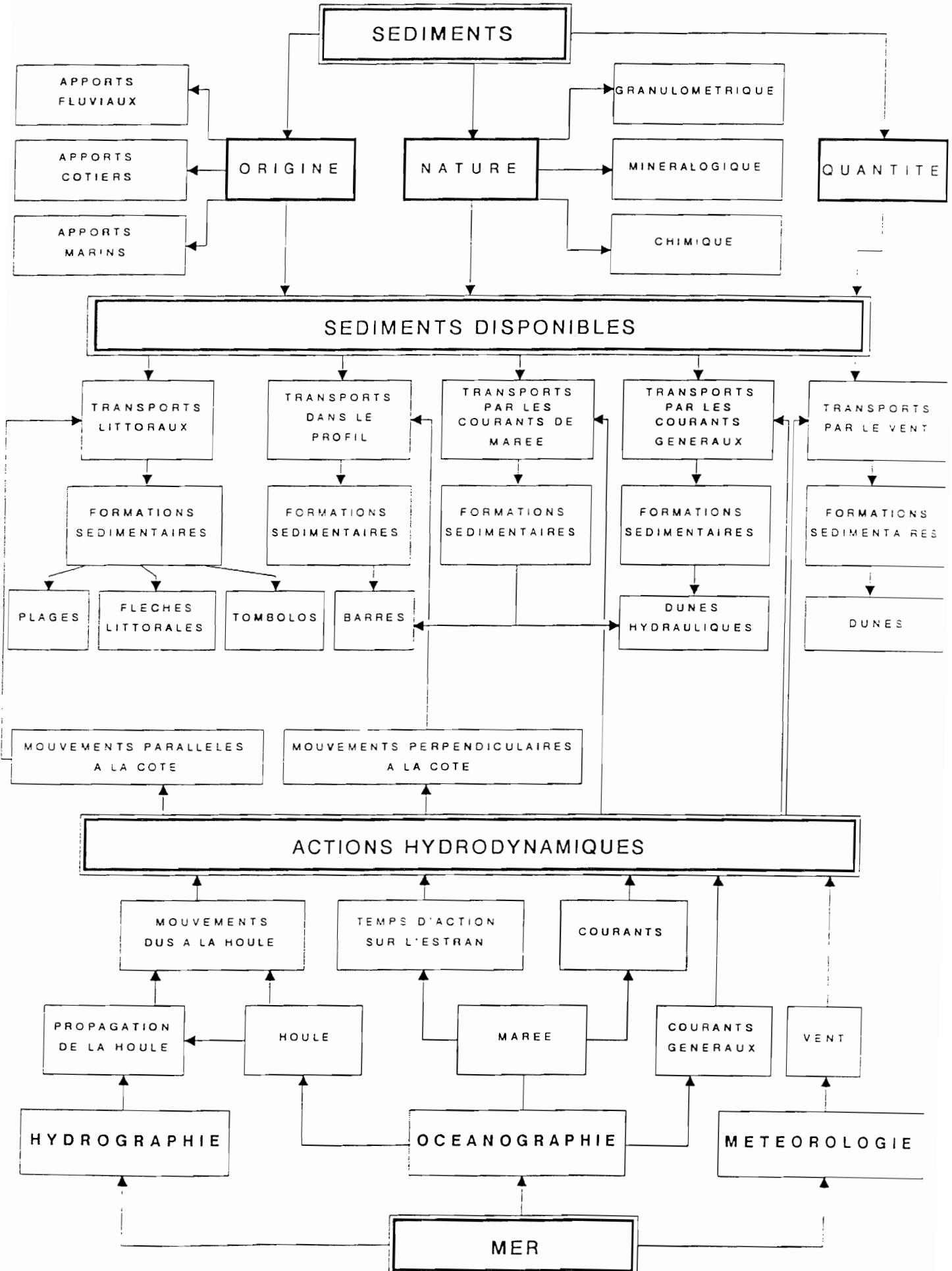
Tous les facteurs hydrologiques interviendront ensuite dans les transports sédimentaires par les torrents, ruisseaux et rivières en fonction des caractéristiques topographiques (pentes, sections...) et de leur nature qui conditionnera en partie leur coefficient de rugosité lui-même évolutif en fonction des transports sédimentaires (lit plat, dunes, rides...).

Suivant le rapport entre les quantités de sédiments réellement transportés et les possibilités hydrodynamiques de transport de la rivière liées aux caractéristiques des sédiments (blocs, galets, graviers, sables, silts, limons...), les fonds pourront être en équilibre, en érosion ou en sédimentation entraînant des modifications du lit de la rivière et de ses berges.

Les rivières pourront être stables en plan et en altitude si les apports de matériaux sont du même ordre que les transports sédimentaires ou stables en altitude et instables en plan si les berges sont soumises à des déplacements en plan avec des érosions qui compensent les sédimentations.



# SCHEMA DE LA DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE EN MILIEU MARIN



Les rivières pourront au contraire être stables en plan et instables en altitude si les apports sont inférieurs ou supérieurs aux quantités transportées dans le bief par les courants. Ce sera le cas des berges non érodables ou protégées et de fonds soumis à des surélévations ou à des abaissements. On devra rétablir l'équilibre sédimentaire en calibrant la rivière à l'aide d'épis, de seuils ou réduire les transports solides et les apports liquides à l'aide de barrages ou autres aménagements.

Dans les rivières instables en plan et en altitude on trouvera les rivières sauvages et torrentielles, les oueds des régions semi-arides... on devra tenter de maintenir le lit mineur, régulariser le débit (barrages)...

Le schéma de principe devra également prendre en compte les variations importantes du niveau des eaux en fonction des débits et les écoulements dans le lit mineur et majeur avec les périodes d'étiage et de crues avec leurs inondations... ainsi que des conditions de transport des sédiments en charriage, saltation ou suspension.

La dynamique sédimentaire marine sera encore plus complexe (*Figure 2*) puisque les actions hydrauliques porteront sur les houles et mers de vent, les marées, les courants, les seiches, les vents... eux-mêmes perpétuellement modifiés par la topographie des fonds marins et du littoral et réagissant les uns sur les autres (les courants modifiant la propagation des houles, le vent engendrant des courants, les houles ayant des actions très différentes au large du déferlement et près de côte...).

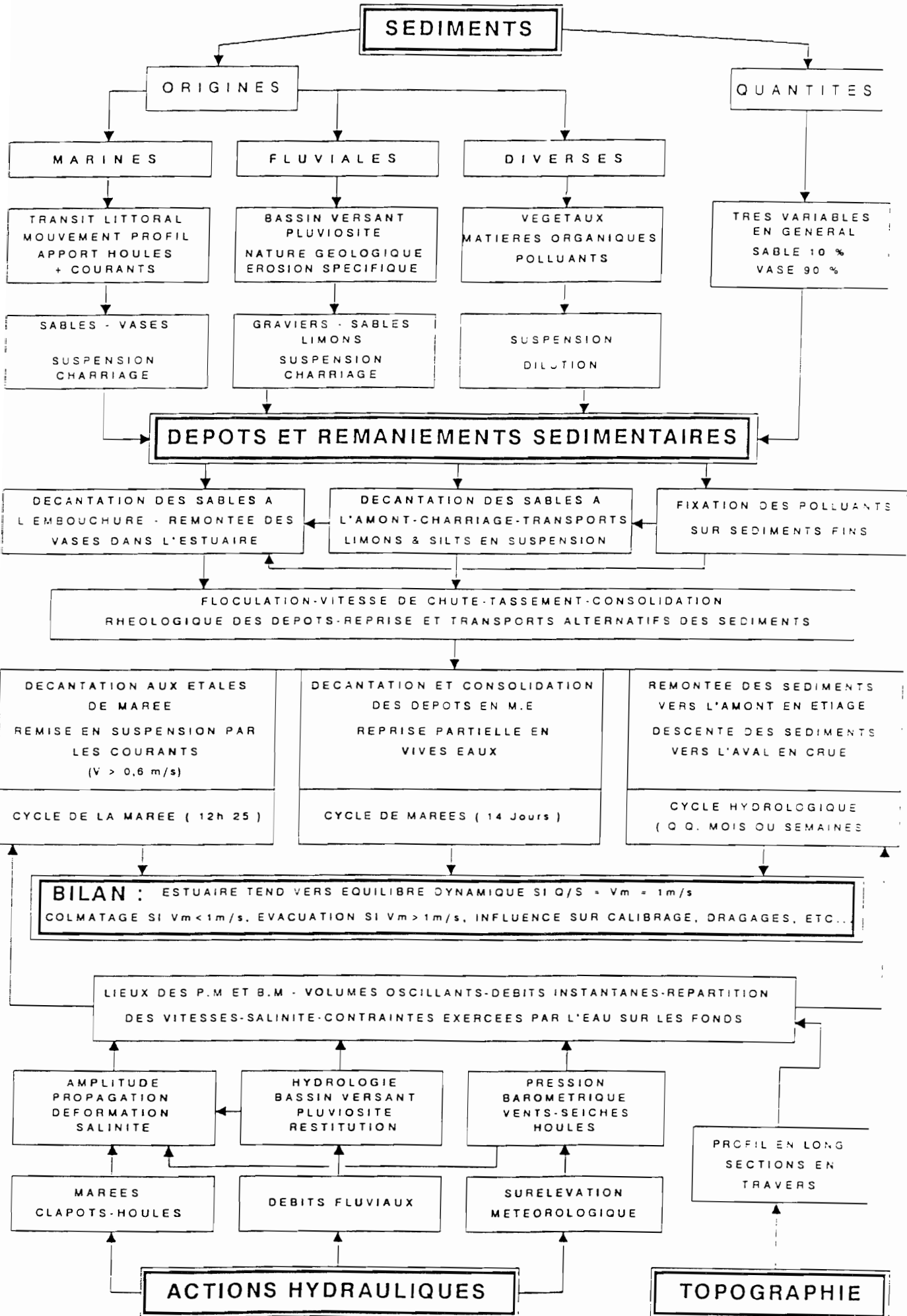
Les sédiments seront très diversifiés et aux apports marins viendront s'associer les apports terrigènes avec des stocks sédimentaires importants qui pourront se concentrer dans certains secteurs en période de houles moyennes et de beau temps et se trouver brutalement libérés au début d'une tempête avec des transports sédimentaires qui seront d'abord saturés puis sous-alimentés...

Aux transports dans le profil, perpendiculairement à la côte, viendront se superposer les transports littoraux parallèles à la côte sous l'action des houles déferlantes, les transports sous l'action des courants de marées et des courants engendrés par le vent, les transports éoliens...

Les plages seront façonnées par toutes ces actions hydrodynamiques, s'érodant ou s'engraissant, formant des tombolos, des barres, des flèches littorales, des dunes...

Dans ce milieu en perpétuel remaniement, toutes les interventions humaines, qu'il s'agisse d'aménagements portuaires, de prises d'eau, de protection du littoral, de création de sites balnéaires..., pourront modifier les équilibres et entraîner non seulement des répercussions locales répondant correctement à l'aménagement projeté mais de répercussions lointaines qui risquent de ne pas avoir été prises en considération dans l'élaboration des travaux.

SCHEMA DE LA DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE ESTUARIEENNE



La dynamique sédimentaire estuarienne (Figure 3), située à la rencontre entre les actions fluviales et marines, sera encore plus difficile à étudier et à maîtriser. Dans cet univers soumis au jeu des marées avec des volumes d'eau oscillant considérables qui pénètrent et sortent de l'estuaire, aux débits fluviaux qui varient suivant le régime hydrologique de la rivière, aux salinités qui fluctuent dans l'espace et dans le temps, aux clapots qui peuvent endommager les rives..., les sédiments vont subir des remaniements importants.

Les gros éléments (sables) se déposeront d'une façon préférentielle à l'amont s'ils ont une origine fluviale et se déplaceront ensuite progressivement vers l'aval en fonction des transports résiduels par les courants. Les sables d'origine marine se trouveront principalement à l'embouchure où ils formeront des barres et contribueront au façonnage du débouché en fonction du rapport entre le transit littoral sous l'effet des houles et les capacités de transport dues aux volumes oscillant engendrés par les marées.

Les éléments fins (limons, vases, silts) seront déplacés en suspension sous le jeu des courants de marées et pourront se déposer temporairement au cours des étales de marées subissant alors des tassements et des consolidations qui dépendront non seulement de la nature des sédiments mais de la durée pendant laquelle la vitesse des courants reste inférieure à un seuil critique tributaire des propriétés rhéologiques des dépôts. Période courte à l'échelon des étales des marées de vives eaux, période de quelques jours à l'échelon du cycle des marées, de quelques semaines à quelques mois au cours du cycle hydrologique.

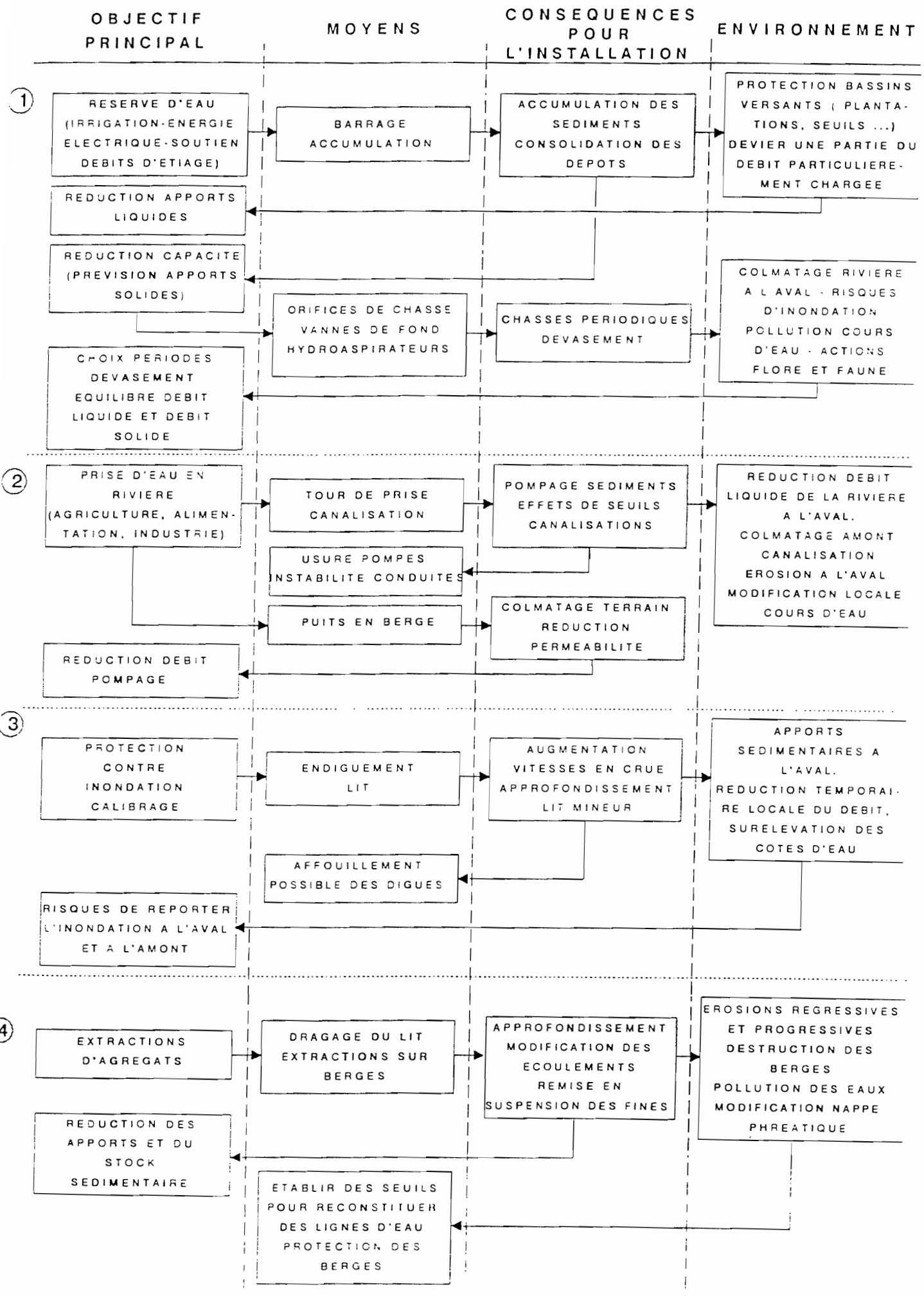
L'équilibre des fonds de l'estuaire dépendant de ces dépôts rythmiques des sédiments fins et de leur consolidation plus ou moins grande au cours des temps, sera très délicat à aborder lorsqu'il s'agira d'approfondir l'estuaire pour le rendre navigable aux bâtiments de fort tonnage, de le calibrer, d'aménager des ouvrages d'art, de prélever des eaux douces pour l'agriculture ou l'alimentation des villes... Tous les paramètres interfèrent alors les uns sur les autres et l'on ne peut aborder un aménagement qu'en prenant en compte l'ensemble de ces paramètres : hydrauliques, salinité, mouvements sédimentaires, profondeurs, fixation des polluants sur les vases, risques d'inondation ou de dégradation des berges au cours des variations trop importantes des niveaux de Pleine Mer et de Basse Mer, etc...

On retrouve toujours avant d'aborder une étude non seulement la nécessité de bien répondre aux objectifs fixés (par exemple, approfondissement du chenal dans un secteur donné), mais de rechercher les répercussions que cela peut avoir dans les différents domaines hydrauliques, sédimentologiques, biologiques, piscicoles, environnement, etc... en prenant en compte l'ensemble des paramètres qui peuvent intervenir et les interactions entre ces paramètres.

\* \* \*

\*

## SCHEMA DES OBJECTIFS DANS LE DOMAINE FLUVIAL



# CHAPITRE II

DEFINITION DES OBJECTIFS A ATTEINDRE  
LES CONSEQUENCES SUR L'ENVIRONNEMENT  
LA FACON D'ABORDER UNE ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE

## II

### DEFINITION DES OBJECTIFS A ATTEINDRE LES CONSEQUENCES SUR L'ENVIRONNEMENT LA FACON D'ABORDER UNE ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE

#### II.1. LES OBJECTIFS D'UN AMENAGEMENT ET LES CONSEQUENCES SUR L'ENVIRONNEMENT

##### 2.1.1. GENERALITES

Insister sur la nécessité de fixer les objectifs de l'aménagement et des études qui en découlent peut apparaître dérisoire car il est évident que c'est la première chose à faire lorsque l'on veut entreprendre des recherches susceptibles de donner une solution à un problème d'aménagement.

En fait une solution d'aménagement maritime, fluviale ou estuarienne peut très bien répondre à un objectif déterminé mais qui ne prend en considération qu'une partie du problème et négliger des facteurs qui pourront apparaître, par la suite, comme très importants, voire prépondérants.

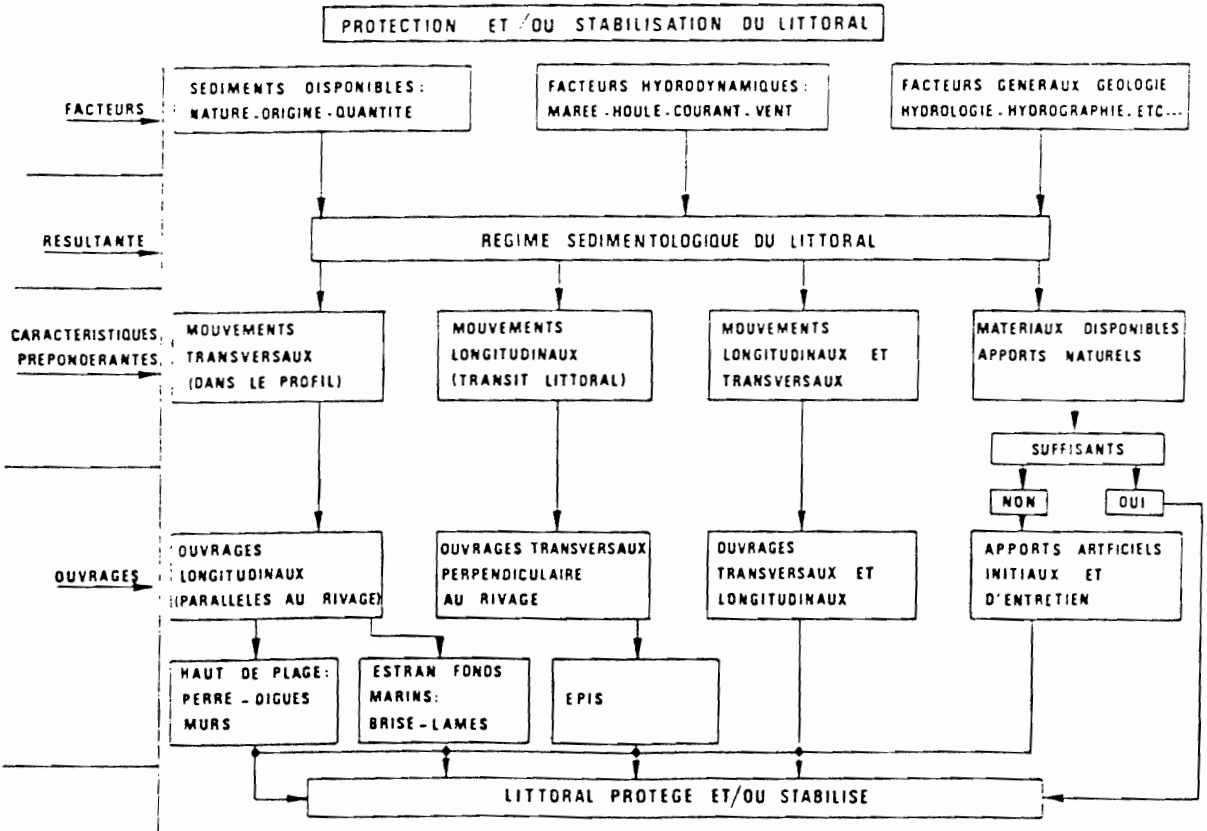
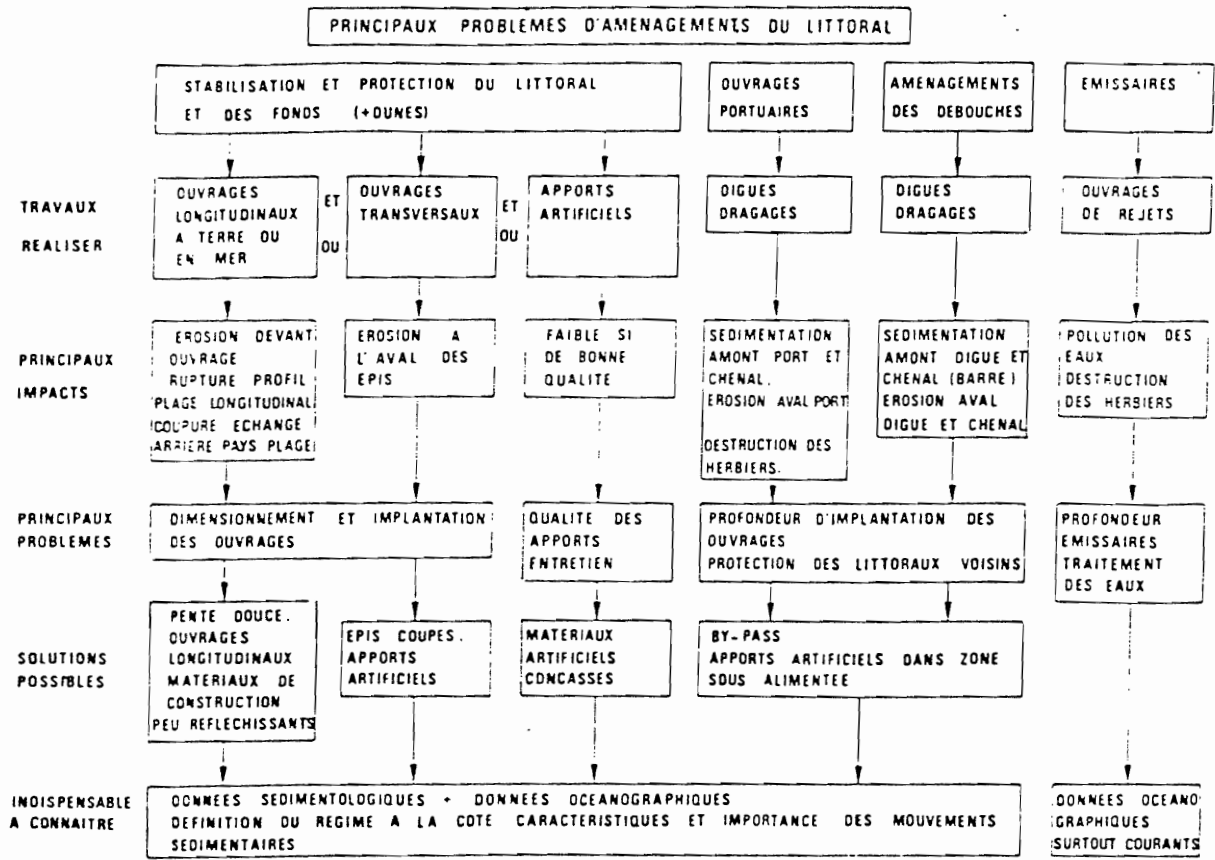
C'est ainsi, par exemple, que si l'on a pour objectif d'assurer la protection d'un bassin portuaire contre l'agitation on peut être amené à donner une longueur importante au recouvrement de la passe d'entrée par la digue principale, ce qui répondra au problème que l'on avait à résoudre mais risque d'entraîner des courants d'expansion de la houle à l'abri de l'ouvrage et un colmatage de la passe d'entrée par les sédiments.

En gagnant des terrains sur le littoral pour aménager un front de mer ou une route, il suffit de réaliser une digue de haute plage et de remblayer pour obtenir un terre-plein convenable, mais les risques d'érosion de la plage seront accrus entraînant à la longue une dégradation des digues... et une disparition du front de mer.

En maintenant un chenal d'accès à une embouchure ou à un port maritime à l'aide de dragages continus, on peut améliorer considérablement les possibilités nautiques et éviter un recyclage des produits dragués en rejetant les sédiments très au large. Après plusieurs décennies on constatera que les fonds limitrophes dans la zone sous le vent se seront considérablement abaissés... et que des érosions spectaculaires des plages apparaîtront nécessitant la mise en place de travaux de défense considérables.



# SCHEMA DES OBJECTIFS DANS LE DOMAINE MARITIME



En colmatant une digue jugée comme trop poreuse car elle laisse passer un peu d'agitation, on provoquera, dans certains cas, l'apparition de seiches à l'intérieur d'un bassin portuaire mettant en péril la sécurité des bateaux...

En réalisant un barrage à l'entrée d'un petit estuaire qui s'ouvre dans une baie, on évite la propagation de la marée à l'intérieur des terres et l'on supprime par la même occasion certains risques d'inondation et de remontée saline. En contre-partie on entraîne un déséquilibre sédimentaire avec colmatage de la baie par les sédiments et dégradation d'un environnement indispensable à son maintien esthétique.

Les exemples ne manquent pas pour souligner l'intérêt de ne pas fixer seulement l'objectif d'un aménagement mais les objectifs qui auront à prendre en considération l'ensemble des problèmes hydrauliques, sédimentologiques, biologiques, esthétiques, financiers et humains. La solution retenue pourra alors, en fonction des considérations techniques et financières mises en jeu, négliger certains aspects du problème ou trouver des solutions de compensation à mettre en place pour remédier aux perturbations apportées par l'aménagement jugé comme indispensable et prioritaire. Il s'agira de faire un choix en parfaite connaissance de cause des problèmes qui peuvent se poser.

#### **2.1.2. SCHEMAS DE QUELQUES OBJECTIFS INTEGRES**

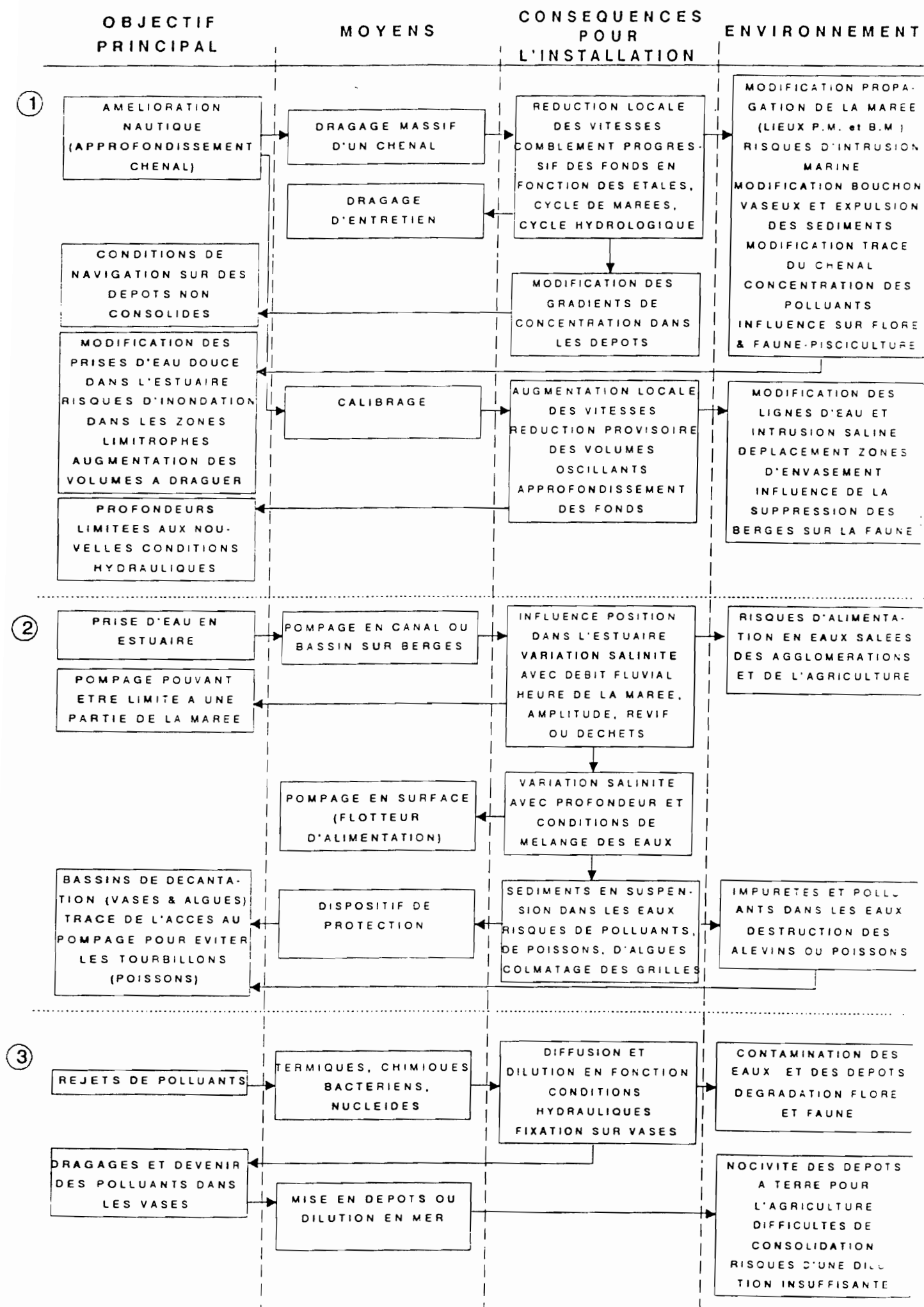
Dans le premier chapitre, un inventaire non exhaustif des problèmes qui peuvent se poser en sédimentologie a été donné et dans ce paragraphe nous nous bornerons à donner quelques schémas de principe d'objectifs "intégrés" dans les domaines fluviaux, maritimes et estuariens (Figures 4 - 5 - 6).

Ces schémas n'ont pour but que d'attirer l'attention sur les problèmes qui peuvent se poser autour d'un objectif d'aménagement et les interactions que cela peut entraîner entre les différents facteurs qui entrent en jeu. Les difficultés que l'on devra surmonter ne sont pas forcément liées à l'importance du projet envisagé mais à son impact qu'il peut avoir sur l'environnement.

#### **2.2. FACON D'ABORDER UNE ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE AVANT DE REALISER UN AMENAGEMENT FLUVIAL, MARITIME OU ESTUARIEN**

Devant la complexité des facteurs qui interviennent dans une étude sédimentologique et des conséquences que cela peut entraîner, non seulement sur le plan financier mais sur l'équilibre d'un environnement géographique et humain, il est nécessaire avant de réaliser un ouvrage ou un aménagement de procéder à des études préalables permettant de fixer les paramètres susceptibles d'intervenir et d'établir des présomptions sur les risques encourus.

## SCHEMA DES OBJECTIFS DANS LE DOMAINE ESTUARIEN



Il sera possible ensuite de définir des aménagements susceptibles de répondre aux objectifs fixés tout en s'intégrant dans un environnement sédimentaire et hydraulique beaucoup plus vaste et à des investissements financiers raisonnables.

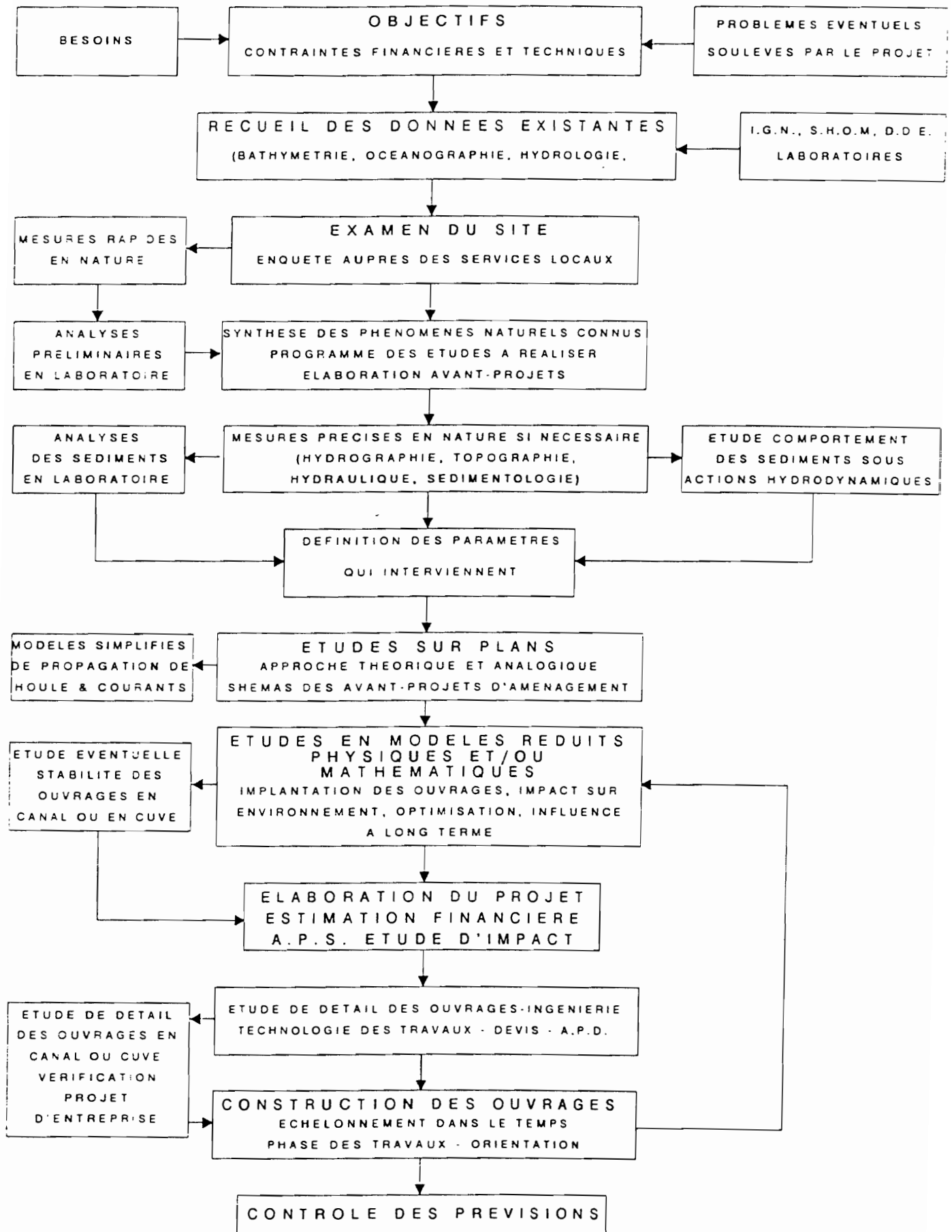
Dans tous les cas le schéma général restera identique et nécessitera :

- la définition des objectifs à atteindre et des contraintes financières et techniques,
- le recueil des données existantes et leur analyse (géologie, hydrographie et topographie, hydrologie, océanographie, sédimentologie),
- un examen préliminaire du site et une discussion avec les services administratifs politiques et privés qui s'intéressent au projet,
- l'établissement d'une note de synthèse préliminaire des phénomènes naturels et des schémas d'avant-projet d'aménagement. Cette note sera complétée par une proposition de programme d'études nécessaires à la mise au point définitive du projet,
- des mesures en Nature (si elles n'ont pas déjà été réalisées) pour préciser les facteurs hydrauliques et sédimentologiques. Ces mesures en Nature seront complétées par des analyses en laboratoire sur les sédiments recueillis et éventuellement par des études sur le comportement de ces matériaux sous les actions hydrodynamiques,
- une étude sur plans et une approche théorique et analogique du ou des projets envisagés. Dans certains cas, cette étude sera suffisante si le problème est relativement simple dans d'autres cas elle ne permettra que d'élaborer un avant-projet d'aménagement.

A l'issue de ces études en Nature, en laboratoire et sur plans, un rapport sera établi permettant de définir les paramètres qui peuvent intervenir et d'élaborer un ou des projets d'aménagement.

- des recherches plus précises et beaucoup plus complètes à l'aide de modèles réduits physiques et(ou) mathématiques qui permettront de préciser :
  - . l'intérêt des aménagements envisagés (en définissant ce qui pourrait se passer si aucun ouvrage n'était construit),
  - . l'implantation à donner aux ouvrages (optimisation des ouvrages sur le plan technique),
  - . leur impact à court et moyen terme sur le site considéré et sur les zones limitrophes,
  - . les risques que l'aménagement peut entraîner sur l'environnement et les moyens d'y remédier,

# SCHEMA D'UNE ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE POUR L'AMENAGEMENT D'UN SITE



- une évaluation sommaire du prix des travaux à réaliser pour répondre aux objectifs initialement fixés et une estimation des travaux d'entretien des ouvrages pour assurer la pérennité des aménagements.

Les résultats des études en Nature, sur plans et en modèles et les évaluations sommaires du prix des travaux permettront d'établir l'Avant-Projet Sommaire des aménagements (A.P.S.) et de lancer l'étude d'impact.

- une étude détaillée des ouvrages à réaliser afin de préciser leurs dimensions, leur stabilité et éventuellement l'échelonnement des travaux dans le temps.

Cette étude pourra nécessiter des recherches en canal et en cuve à houle permettant de dimensionner les différents ouvrages. Les résultats obtenus serviront à l'établissement de l'Avant-Projet Détaillé (A.P.D.) établi par ailleurs pour arrêter toutes les options techniques, financières et de gestion des ouvrages.

- un suivi de l'influence des travaux réalisés, après construction des ouvrages, afin de contrôler les prévisions faites au cours des différentes études sur l'impact sédimentologique des aménagements et éventuellement de donner des indications sur les améliorations susceptibles d'être apportées si des divergences apparaissaient entre les prévisions et les évolutions constatées.

Ce programme général d'une étude sédimentologique est illustrée sur la Figure 7, chaque phase de recherches étant développée dans les chapitres suivants.

\* \* \*

\*

# CHAPITRE III

SYNTHESE DES DOCUMENTS EXISTANTS

ETUDES EN NATURE

### III

#### SYNTHESE DES DOCUMENTS EXISTANTS

##### ETUDES EN NATURE

La première phase des études portera sur un examen préliminaire du site et un recueil des documents existants permettant :

- de réaliser une synthèse des phénomènes connus,
- d'élaborer des schémas d'aménagement du projet,
- d'établir le programme détaillé des études à réaliser.

Elle sera suivie, si les documents existants sont insuffisants, par des études en Nature et par des mesures du comportement des sédiments sous les actions hydrodynamiques afin de définir les paramètres qui peuvent intervenir dans le projet envisagé.

#### 3.1. EXAMEN PRELIMINAIRE DU SITE ET SYNTHESE DES DOCUMENTS EXISTANTS

##### 3.1.1. EXAMEN PRELIMINAIRE DU SITE

Afin de situer le projet d'aménagement dans son contexte physiographique, les études seront précédées par un examen rapide du site permettant de prendre en compte l'aspect morphologique du littoral ou de la rivière, la nature des fonds, l'étendue du secteur à aménager, les traces d'érosion ou de sédimentation, les facteurs hydrauliques et océanographiques qui peuvent agir et l'aspect des zones limitrophes.

Au cours de cet examen préliminaire sur le terrain, un entretien avec le ou les responsables du projet sera fait permettant de bien préciser les objectifs de l'aménagement et le but des études à entreprendre.

##### 3.1.2. RECUEIL ET SYNTHESE DES DOCUMENTS EXISTANTS

Cette partie de l'étude doit permettre de regrouper les documents disponibles et de situer le problème sédimentologique dans son cadre général géographique, géologique, hydrographique, hydraulique et morphologique.



Une enquête devra être menée auprès des Services Locaux de la D.D.E., des agences de bassins et des Directions portuaires, du Service Hydrographique de la Marine - S.H.O.M. (cartes marines, cahiers hydro, recherches hydrographiques sur le régime des côtes...), de l'Institut Géographique National - I.G.N. (cartes, photographies aériennes prises à différentes dates, photos satellites...), des Services de l'Hydrologie, à l'ORSTOM, B.R.G.M., dans les Laboratoires d'Hydraulique (L.N.H. - SOGREAH - L.C.H.F.), dans les Universités (études et thèses de Doctorat), à la Météorologie Nationale (vents, prévision des houles...) ... sans oublier d'interroger les autochtones, les mairies, les pêcheurs... et d'une façon générale toutes les personnes qui s'intéressent ou ont eu à s'intéresser au secteur envisagé pour le projet d'aménagement.

La synthèse devra comporter une exploitation des données :

- géographiques et géologiques locales et générales (variation du niveau marin, tectonique, sismique, nature des roches, orientation du littoral, pendage des terrains, importance des bassins versants, etc...),
- physiographique permettant de situer la zone à étudier dans un contexte plus général (canton sédimentaire) et de prendre en compte l'aspect morphologique du site (micro-falaises d'érosion, dunes éoliennes, vestiges de destruction, nature des fonds, couverture végétale...),
- hydro-topographique (pentes des fonds marins ou fluviaux, évolution des fonds et trait de côte au cours du temps...),
- océanographique et hydrologique (marées, courants, houles, vents, débits des rivières, volumes oscillant dans les estuaires et lieux de P.M. et B.M., etc...),
- sédimentologique (nature des matériaux, origine, importance et mode de transport) et l'analyse de quelques échantillons prélevés pendant la mission préliminaire sur le terrain complétera ces données,
- pollutions éventuelles (origine et nature des polluants, concentration, zones de rejets...),
- interventions humaines et impact des ouvrages sur le littoral, la rivière ou l'estuaire.

Dans les conclusions de la synthèse des documents disponibles, les paramètres principaux susceptibles d'intervenir dans le projet d'aménagement devront être bien définis afin d'établir des premières présomptions sur l'impact que le projet peut entraîner sur le plan sédimentologique.

**3.1.3. ESQUISSES DES SCHEMAS D'AMENAGEMENT**

A l'issue de la synthèse des documents existants et en liaison avec les services qui ont la charge du projet d'aménagement, une esquisse des schémas d'aménagements possibles sera faite en envisageant différentes solutions compatibles avec les phénomènes hydrosédimentaires connus, les objectifs fixés et les limites financières possibles.

**3.1.4. PROGRAMME DETAILLE DES ETUDES A REALISER**

Compte tenu des objectifs à atteindre et des documents disponibles, un programme détaillé des mesures complémentaires réalisées en Nature et des études à faire tout d'abord sur plans, ensuite en tant que besoin à l'aide de modèles réduits physiques et (ou) mathématiques, sera établi permettant d'atteindre les connaissances indispensables pour la réalisation du projet d'aménagement et d'éviter tous les aléas qu'une méconnaissance de certains phénomènes ou de recherches insuffisamment précises entraîneraient pour le projet.

**3.2. ETUDES EN NATURE**

Les études en Nature auront pour but de fournir les éléments nécessaires à l'établissement du projet tant du point de vue des risques d'érosion ou de sédimentation qu'il peut entraîner que de la stabilité des ouvrages à réaliser.

Ces études en Nature devront être réparties sur des durées suffisamment longues afin de préciser l'évolution des phénomènes au cours d'une année moyenne (étiage, crue, beau temps, tempête...) et d'évaluer par extrapolation les phénomènes exceptionnels ayant une périodicité déterminée (annuelle, décennale, centennale...).

Ces mesures font appel aux différentes disciplines de géologie, hydrographie, hydrologie et océanographie, sédimentologie, traceurs fluorescents ou radioactifs, mécanique des sols, écologie... et l'on doit vérifier que les différentes présomptions des mouvements sédimentaires que l'on peut déduire de chacune de ces disciplines se recoupent bien entre elles permettant d'établir des lois aussi précises que possibles qui seront prises en considération dans l'élaboration du projet d'aménagement et reproduites sur les modèles réduits physiques ou mathématiques éventuellement réalisés [14].

---

[14] *Les domaines d'études en sédimentologie - C. MIGNIOT - Journées prospectives sur l'environnement littoral - 3ème Session - Centre Océanologique de Bretagne - Février 1980.*

**3.2.1. GEOLOGIE - GEOGRAPHIE**

Une prospection sur le terrain, appuyée par des recherches plus générales, permettra de fixer le contexte géologique du secteur envisagé pour l'aménagement. Elle tiendra compte non seulement de la nature des roches et du substratum, mais des conditions de comblement ou d'évolution au cours des périodes géologiques et, notamment, au cours de la dernière transgression flandrienne. Les phénomènes tectoniques et sismiques pourront éventuellement faire l'objet de recherches plus poussées si l'intérêt du projet le nécessite (par exemple installation d'une centrale nucléaire).

**3.2.2. HYDROGRAPHIE - TOPOGRAPHIE**

Un relevé exact de la zone des études sera nécessaire si les documents disponibles sont insuffisants ou si des évolutions récentes des fonds ou du sol ont pu se produire. Ces levés nécessiteront de préciser : le zéro de référence (NGM, cartes marines...), les conditions de mesures (fréquence écho sondeur, plomb poisson...), les échelles des levés (un levé d'ensemble au 1/10 000 est souvent souhaitable et doit être complété par des levés au 1/2 500 ou 1/1 000 dans certaines zones).

L'attention doit être attirée sur la nécessité de disposer de mesures précises dans toute la "zone active" située en mer entre le déferlement des houles de tempêtes et le haut estran (zone très difficile à lever).

Des levés de répétition seront à réaliser pour définir l'importance de l'évolution des fonds au cours de tempêtes ou dans certains secteurs d'accumulation ou d'érosion (profils en travers de répétition, rythme des accumulations et des érosions dans les chenaux d'estuaire en fonction des marées et du cycle hydrologique...).

**3.2.3. OCEANOGRAPHIE - HYDROLOGIE - METEOROLOGIE**

Mesures des marées et de leur propagation (lignes d'eau, lieux des P.M. et B.M., vitesses des courants...). Surélévation météorologique du niveau des eaux. Mesures de houles pendant une année complète ou, tout au moins, pendant la période des tempêtes (Datawel, mât de houle, estimations visuelles...) ; ces mesures devront porter non seulement sur les hauteurs et périodes mais sur les directions des vagues et leur répartition dans les trains d'ondes. Evaluation des seiches ou mouvements à longue période (courtes de 2 à 4 minutes et longues de 20 mn à 1 heure). Mesure des courants généraux et des courants de marée, des courants de houle et des courants dus aux vents. Débits des rivières et hydrogrammes.

Etude statistique des vents par direction et force et corrélation avec les houles et mers de vent, pluviosité et coefficient de restitution des bassins versants. Température et évaporation...

Déterminer les variations de salinité des eaux (en particulier pour les estuaires et lagunes), ainsi que la turbidité des eaux (quantité de matériaux solides en suspension dans les eaux), en fonction des saisons, des forces des houles, des débits des rivières, des marées...

Dans le choix des appareils de mesures on devra tenir compte non seulement de leur précision et qualité, mais des difficultés de mise en place et de relevage ainsi que des risques de pannes ou de déperdition. Pour les houles notamment, les mesures à l'aide d'appareils enregistreurs auront intérêt à être doublées par des évaluations visuelles faites par des personnes qualifiées (anciens marins...).

#### 3.2.4. SEDIMENTOLOGIE

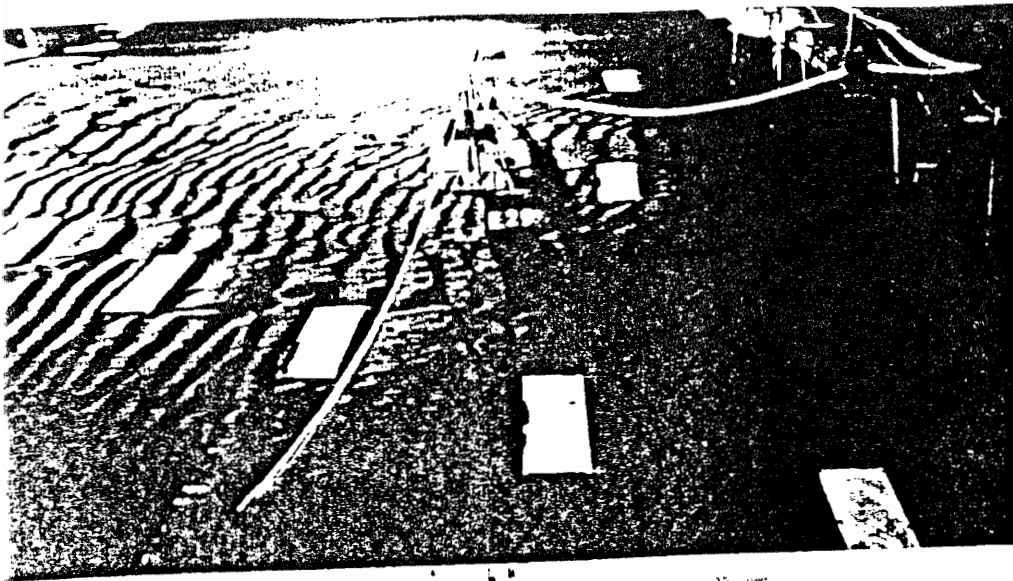
Nature des sédiments, origine, mouvements, quantités transportées et conditions de transport (charriage ou suspension), érosions et dépôts, morphologie des fonds... feront partie de cette discipline.

En fait un sédiment porte en lui les marques des actions hydrodynamiques qu'il a subies et il est possible, à partir d'une analyse assez fine des échantillons, d'établir des présomptions non seulement sur son origine mais sur ses conditions de transport et de dépôt. Il s'agit là d'une partie très importante des études en Nature et des analyses en laboratoire qui porteront sur :

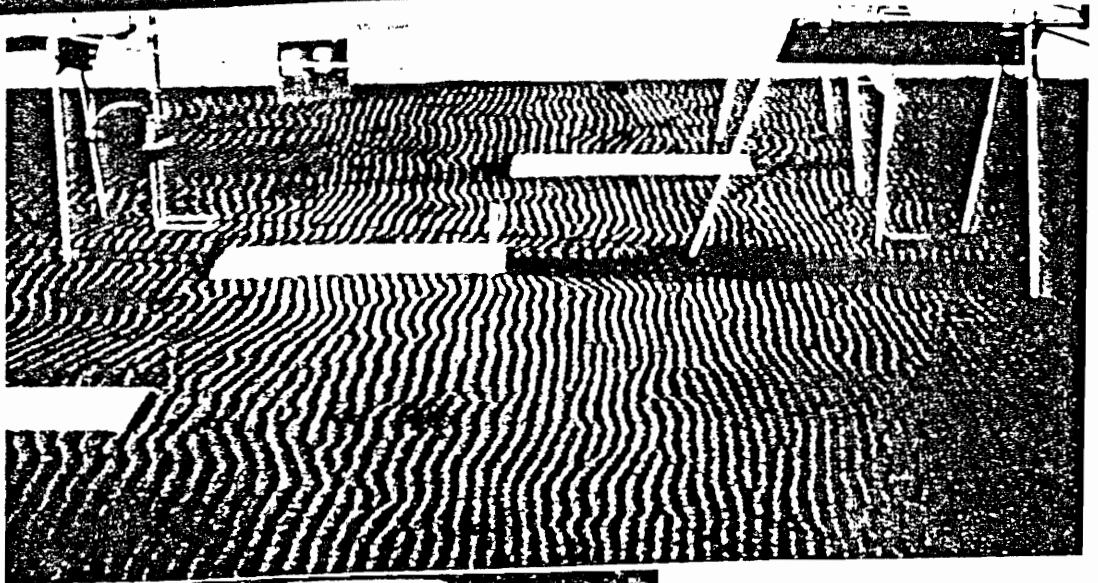
- la granulométrie (répartition des particules dans l'échantillon prélevé) :
  - . étude des indices (diamètre moyen, écart type, indice de classement...) qui donnent des indications sur les directions de transport,
  - . courbes de probabilité permettant d'estimer les différents stocks sédimentaires,
  - . forme de la courbe granulométrique qui donne une première idée sur les conditions de transport et de dépôt (parabolique, logarithmique, hyperbolique),
- la minéralogie (minéraux lourds en particulier et minéraux des argiles) qui est un moyen de rechercher l'origine et le mélange des différents stocks sédimentaires. Par cette étude, on pourra établir des présomptions pour savoir si un sable provient d'une rivière ou d'un oued, d'une roche mère voisine, de la destruction d'une falaise, de dépôt des produits de dragages, d'un transit littoral, ou d'un ancien stock sédimentaire submergé au cours de la transgression des eaux, etc...

MORPHOLOGIE DES FONDS

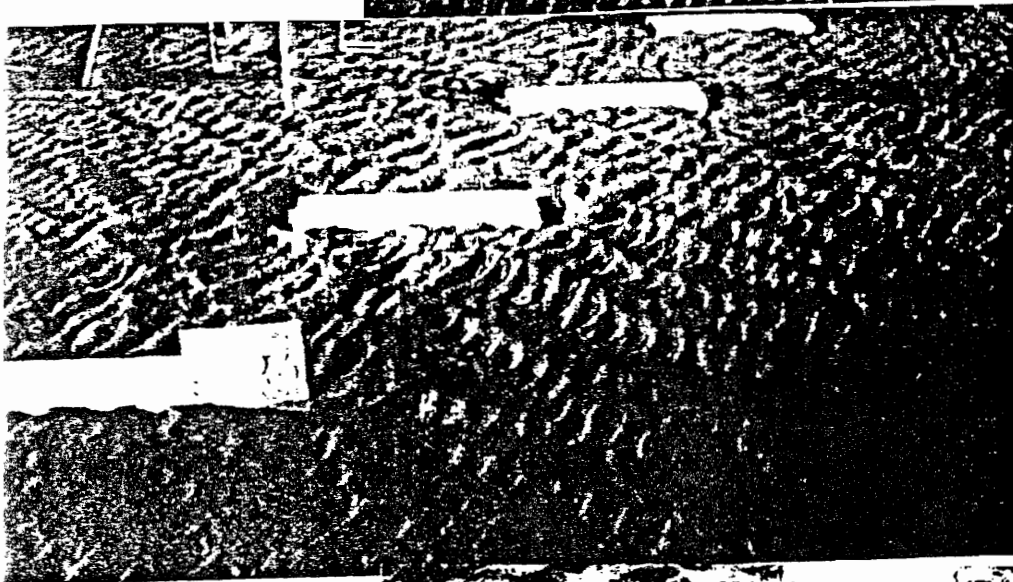
A - Rides de courants



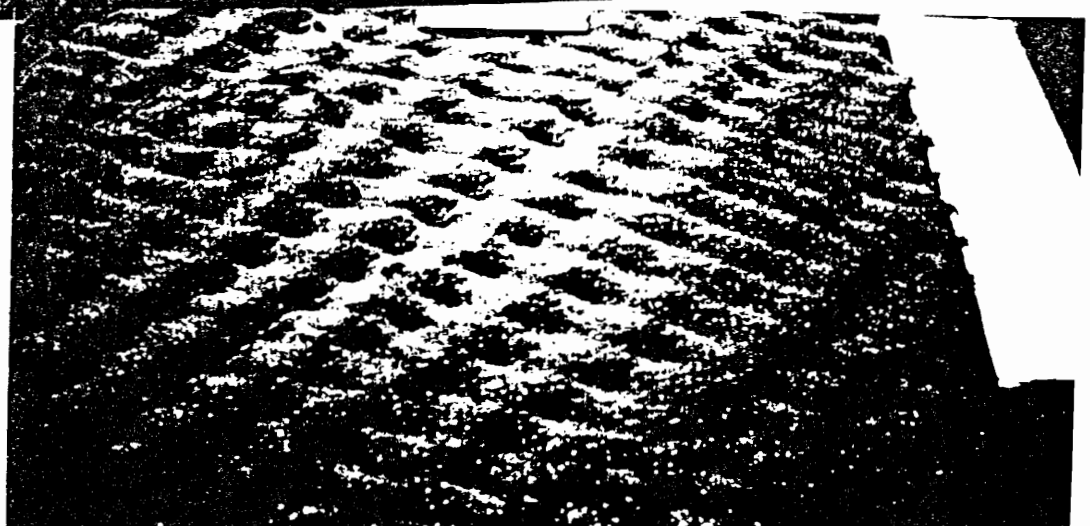
B - Rides de houles



C - Rides croisées houle + courant



D - Rides croisées



A ces études minéralogiques, il faut associer les études de la radioactivité naturelle qui permettent d'apprécier l'origine et le sens du déplacement des matériaux ainsi que les mélanges qu'ils ont subis [15].

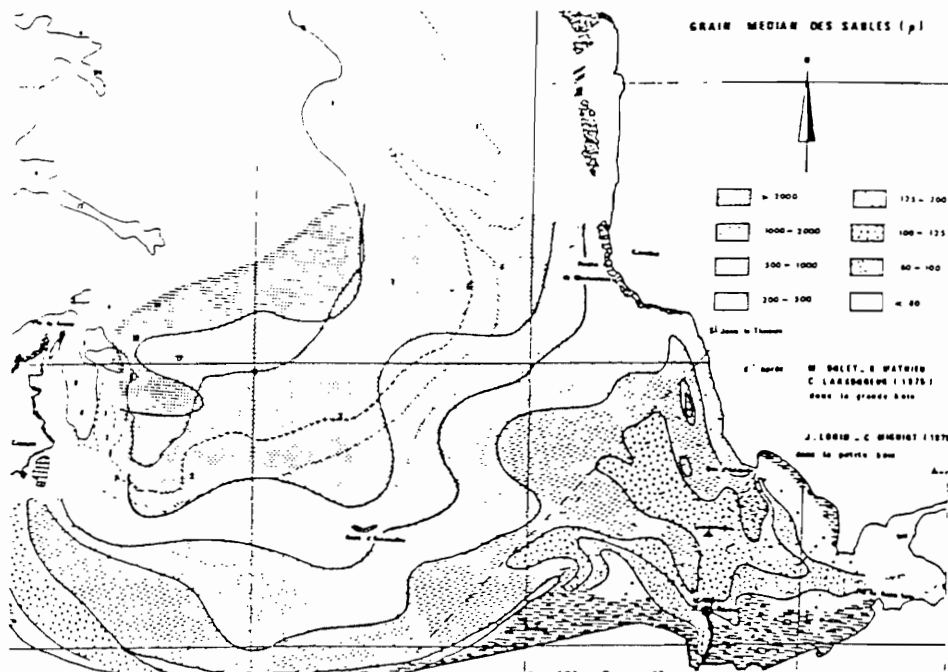
- la morphoscopie (forme des grains et polissage par abrasion) donne des indications sur les conditions d'usure des particules et, de ce fait, sur leurs conditions de transport (suspension = grains anguleux, charriage = grains arrondis, actions d'usure plus forte sous l'action des houles que des courants, influences éoliennes...). Nécessité de comparer la morphoscopie pour des grains de mêmes diamètres,
- la composition chimique (% carbonates, matières organiques, oxyde de fer...) apporte des éléments complémentaires particulièrement appréciables pour les sédiments fins,
- la teneur en eau des sédiments fins, le gradient de concentration dans les dépôts, la nature des eaux interstitielles... fournissent des données indispensables pour préciser si les dépôts des vases sont récents ou anciens, s'ils se sont produits en eau douce ou en eau de mer... Ces mesures ont intérêt à être complétées par la connaissance de la rigidité initiale des dépôts in situ (sonde SR10) [16],
- la morphologie des fonds et notamment les figures que l'on peut observer à la surface des sédiments : dunes, rides, anti-dunes... fournira des indications sur les dernières actions hydrodynamiques qui ont pu agir sur les fonds. En fonction des caractéristiques des dunes et des rides il sera possible de prévoir si les transports se sont faits sous une action prépondérante de courants ou de houles. la direction du transport préférentiel et éventuellement la superposition de plusieurs facteurs dynamiques (rides croisées) (photographie 15).
- la couverture végétale, sous forme d'algues ou d'herbes aquatiques. de mousses sur les roches... qui donne des indications sur les limites de certains mouvements sédimentaires et attire l'attention sur les risques de colmatage des plages, des ports et des prises d'eau par les végétaux arrachés des fonds par les houles et les courants ou se détachant périodiquement des fonds à certaines périodes de l'année.

---

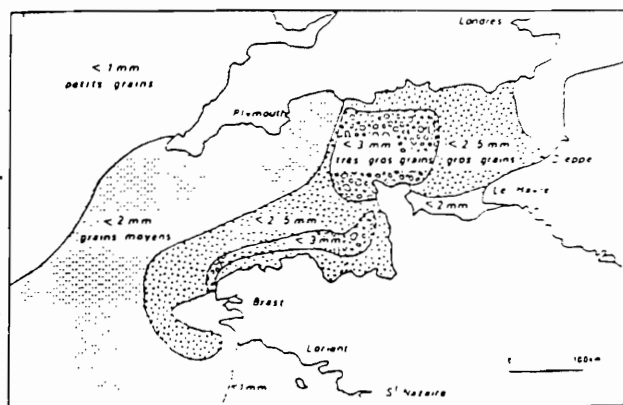
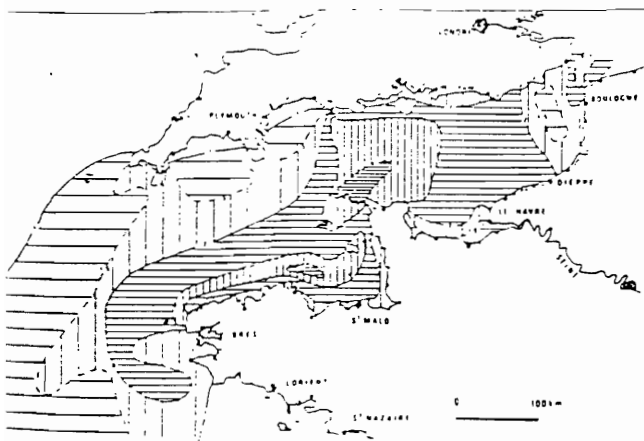
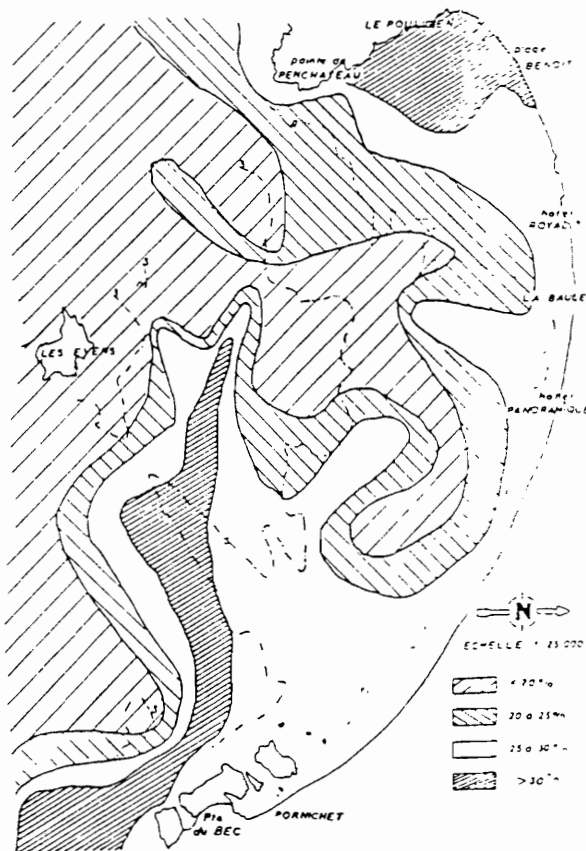
[15] *Etude de la radioactivité naturelle le long des côtes du Languedoc. Evaluation des transits sédimentaires - A. RIVIERE et S. VERNHET - 1955.*  
*Radioactivité naturelle des sédiments marins au large des côtes de l'Estérel - G. COURTOIS et F. ANGUENOT - Compte-rendu de l'Académie des Sciences T. 264 - 29 Mai 1967.*

[16] *Mesures des caractéristiques mécaniques des vases déposées dans les chenaux de navigation - C. MIGNIOT - XVIIIème journées S.H.F. - Septembre 1984.*

Mont St Michel  
**REPARTITION GRANULOMETRIQUE DES SEDIMENTS**



Base de la Baule. Répartition granulométrique des sédiments  
 Courbes d'égalité teneurs en calcaire



Vitesses maximales des courants dans la Manche et granulométrie  
 des sédiments susceptibles d'être transportés



A partir des analyses sédimentologiques on pourra établir des présomptions sur les actions dynamiques subies par les matériaux (à l'échelon du grain ou de l'échantillon) et tracer des cartes d'ensemble donnant les zones d'égale teneur en sédiments pélitiques (vases), d'isomédiannes, d'indices de classement, de répartition des minéraux lourds, de la morphoscopie et de la morphologie des fonds, des teneurs en eau, etc... L'examen de ces cartes donnera des indications sur l'origine ou les origines des sédiments, sur les axes possibles des transports et sur les conditions de dépôt *{Figure 8}*.

### 3.2.5. TRACEURS FLUORESCENTS ET RADIOACTIFS

Les mesures à l'aide de traceurs fluorescents ou radioactifs permettent de vérifier, de préciser et de quantifier les hypothèses données par les études sédimentologiques et d'établir des relations directes entre les conditions d'érosion, de transport et de dépôt des sédiments en fonction des paramètres hydrauliques ou océanographiques.

Mise au point en France par la Section d'Applications des Radioéléments du Centre d'Etudes Nucléaires de SACLAY (S.A.R. - ORIS) la technique des traceurs radioactifs offre de nombreuses possibilités pour les études sédimentologiques qu'il s'agisse de charriage de galets ou de sable dans les rivières, de l'action de la houle sur les sédiments à différentes profondeurs, du transit littoral des sables, du déplacement des vases dans les estuaires ou des risques de recyclage des produits de dragages. Leur application peut permettre de suivre les mouvements sédimentaires sur des périodes de temps préalablement définies allant de quelques heures à quelques mois et leur utilisation s'applique aussi bien aux études en Nature qu'aux recherches en modèles réduits [17].

Les traceurs fluorescents permettent d'étudier les déplacements des sables sur l'estran, notamment dans les zones où il est difficile d'utiliser des traceurs radioactifs par suite de la proximité des parcs ostréicoles ou conchylicoles, mais leur exploitation nécessite un grand nombre de points de mesures ou de prélèvements ce qui les exclut pratiquement des zones sous-marines. Les résultats restent beaucoup plus ponctuels dans l'espace et dans le temps.

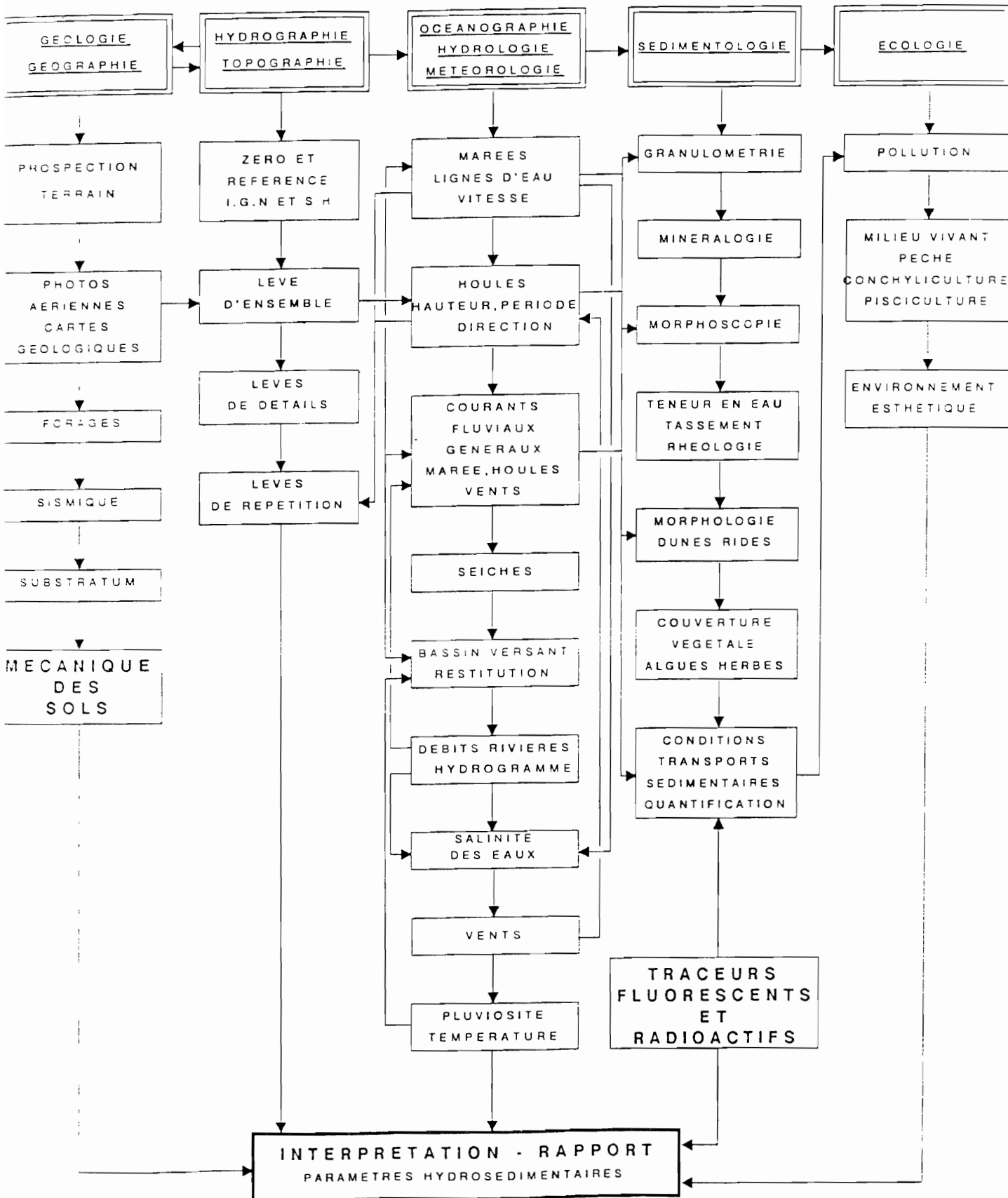
Dans tous les cas, des précautions doivent être prises pour l'exploitation des résultats afin de ne pas confondre les phénomènes d'enfouissement des grains avec leur départ en suspension dans des zones très éloignées du secteur d'immersion du traceur. L'utilisation des particules de différents diamètres peut, dans certains cas, apporter des renseignements utiles pour lever certaines incertitudes.

---

[17] *Les apports des techniques nucléaires à la sédimentologie dynamique - Bilan et références - A. CAILLOT - Rapport ORIS-SAR 107/C287 - Juillet 1989.*

# ORGANIGRAMME D'UNE ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE EN NATURE

**BUT**  
FOURNIR ELEMENTS NECESSAIRES  
POUR ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE  
DU PROJET



3.2.6. MECANIQUE DES SOLS : SISMIQUE ET FORAGE

Ces études seront indispensables pour préciser la profondeur du substratum rocheux, la présence éventuelle d'argile ou de vase, la portance du sol, la nature des produits à draguer, etc...

Ces recherches sont indispensables si les études géologiques ont montré les risques de difficultés pour l'établissement du projet et notamment si des problèmes de déroctage se posaient. Elles peuvent s'intercaler éventuellement entre l'A.P.S. et l'A.P.D. et sortent un peu des problèmes purement sédimentologiques à étudier en première phase en Nature.

3.2.7. POLLUTION - ECOLOGIE - MILIEU VIVANT - ENVIRONNEMENT

Ces facteurs ne peuvent être négligés au cours des études en Nature et l'on devra avoir présent à l'esprit la qualité des eaux en association avec le milieu benthique et l'aquaculture (pêche...). Les études devront permettre de tenir compte des risques de fixation et de transport des polluants sur les vases, de leur concentration possible dans les zones calmes et de leur dilution dans les milieux agités (absorption-désorption).

Un aperçu de l'influence des évolutions sédimentaires sur l'environnement doit également être pris en compte devant l'aspect esthétique pour les installations limitrophes.

3.2.8. INTERPRETATION ET RAPPORT SUR LES ETUDES EN NATURE

A l'issue des études en Nature une interprétation des mesures réalisées et recueillies sera faite permettant de définir l'ensemble des paramètres qui peuvent intervenir sur le plan hydrosédimentaire dans l'élaboration du projet d'aménagement (*Figure 9*).

Le résultat de ces études en Nature devra fournir non seulement les indications indispensables pour l'étude théorique et sur plan, mais pour les différentes recherches qui peuvent être réalisées à l'aide des modèles physiques sédimentologiques ou de modèles mathématiques (conditions limites, paramètres hydrauliques, nature des sédiments, élément d'étalonnage des modèles...).

\* \*

\*

# CHAPITRE IV

COMPORTEMENT DES SEDIMENTS SOUS LES ACTIONS  
HYDRODYNAMIQUES  
ETUDES SUR PLANS ET THEORIQUES  
SCHEMAS DES AVANT-PROJETS D'AMENAGEMENT

## IV

### COMPORTEMENT DES SEDIMENTS SOUS LES ACTIONS

#### HYDRODYNAMIQUES

#### ETUDES SUR PLANS ET THEORIQUES

#### SCHEMAS DES AVANT-PROJETS D'AMENAGEMENT

Partant des phénomènes hydrauliques et sédimentologiques connus en Nature, certains problèmes sédimentologiques peuvent être abordés et même résolus par des études sur plans et par le calcul.

Ces études sur plans et théoriques qui ont l'avantage d'être assez rapides et peu onéreuses doivent s'appuyer sur la connaissance des propriétés physiques des sédiments et de leur comportement sous les actions hydrodynamiques, c'est-à-dire sur des lois théoriques ou empiriques permettant d'évaluer les mouvements sédimentaires en rivière, en mer ou en estuaire.

A l'issue de ces études sur plans, des schémas d'avant-projets d'aménagement pourront être établis, en éliminant ceux qui ne seraient pas compatibles avec les impératifs sédimentaires et hydrauliques, et en permettant de mieux orienter le projet qui, s'il présente des difficultés particulières ou entraîne des investissements importants, devra être affiné par des recherches plus précises et plus complètes à l'aide de modèles réduits.

#### 4.1. COMPORTEMENT DES SEDIMENTS SOUS LES ACTIONS HYDRO-DYNAMIQUES

Ces études nécessitent des installations relativement importantes pour représenter les écoulements fluides auxquels les différents sédiments seront soumis en Nature. Elles sont en général réalisées dans des laboratoires d'hydraulique qui disposent de ces installations et permettent d'apporter des précisions sur le comportement des sédiments dans l'eau depuis leur vitesse de chute jusqu'à leurs conditions de reprise par les courants, les houles et les vents. Il ne s'agit pas d'essais en modèle réduit où l'on appliquerait des lois de similitude sur les sédiments mais d'essais en vraie grandeur transposables directement à la nature.

Ces études couvrent différents types de recherches et sont particulièrement délicates lorsqu'il s'agit de sédiments fins, cohésifs du type vase ou limon. Le Laboratoire Central d'Hydraulique de France a porté ses efforts sur ce domaine particulier de la sédimentologie, permettant une meilleure compréhension des phénomènes naturels et leur représentation dans de bonnes conditions techniques sur les modèles

réduits. Le Service Technique Central des Ports Maritimes et Voies Navigables a fait réunir les principaux résultats de ces études dans le "Manuel sur l'Hydrodynamique Sédimentaire" [18] auquel on se reportera avant d'aborder les études théoriques et sur plans.

Dans ce paragraphe nous ne rappellerons que les mécanismes intervenant dans le comportement des sédiments sous les actions hydrodynamiques.

#### 4.1.1. VITESSES DE CHUTE DES PARTICULES

L'étude des vitesses de chute des particules élémentaires ou d'un ensemble de particules tombant dans un milieu aqueux déterminé est indispensable pour aborder le problème de la décantation des sédiments. On constate que pour les gros éléments (sable, galets, etc...) la forme des particules est très importante et que si la vitesse de chute croît en fonction du diamètre (linéairement pour les sables), pour les particules sphériques, elle tend vers une asymptote pour les débris de coquilles ou les sédiments ayant une forme plate. De même pour les grosses particules les vitesses de chute diminuent lorsque le nombre de particules augmente (vitesses entravées).

Pour les sédiments fins, inférieurs à 40 microns, le problème est beaucoup plus complexe par suite des phénomènes de floculation. Alors que pour les particules élémentaires les vitesses de chute sont très faibles (1/1000 de mm/s pour une particule de 1 micron) et très différentes en fonction de la taille des particules, pour les flocons les vitesses de chute sont assez importantes et peuvent atteindre 0,10 à 2 mm/s la moyenne étant de 0,7 mm/s en milieu floculant et en eau calme. La floculation est d'autant plus grande que la concentration en particules est élevée, les vitesses de chute étant maximales pour des concentrations de l'ordre de 15 à 20 g/l, au-delà on retombe dans des vitesses de chute entravées. De même la floculation, donc la vitesse de chute, augmente avec la salinité des eaux, mais il suffit de 2 à 3 ‰ de salinité (1/10 d'eau de mer) pour que la floculation soit totale.

On se reportera au paragraphe I.3. de l'ouvrage sur l'hydrodynamique sédimentaire [18] pour les formules à utiliser pour les vitesses de chute.

#### 4.1.2. TASSEMENT AU COURS DU TEMPS ET GRADIENT DE TASSEMENT DANS LES DEPOTS

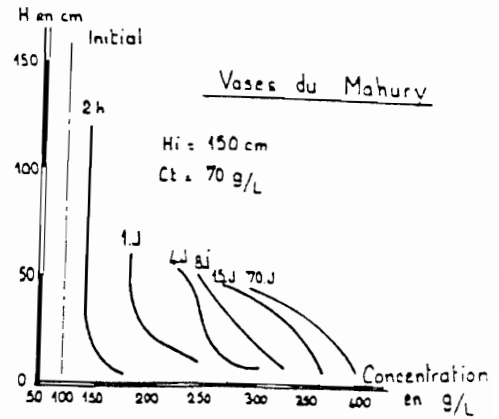
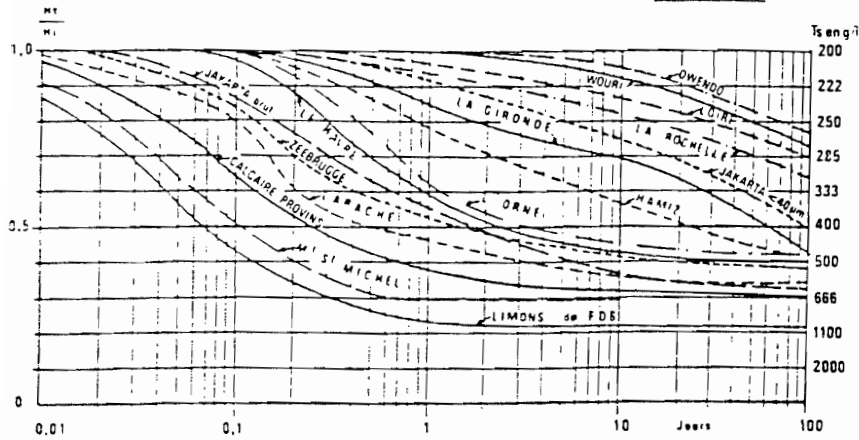
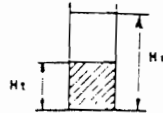
Cette étude apporte les éléments pour prévoir l'évolution d'un dépôt. Faible à nulle pour les sédiments grossiers, cette évolution est très importante pour les mixtures d'éléments fins et des études en laboratoire permettent de prévoir non seulement la modification de la concentration (donc de la teneur en eau) des dépôts, mais une "auscul-

---

[18] Manuel sur l'Hydrodynamique Sédimentaire - 1ère partie - S.T.C. et L.C.H.F.-SOGREAH - N° 51078 R1 - 1989.

COURBES DE TASSEMENT DE DIFFERENTES VASES

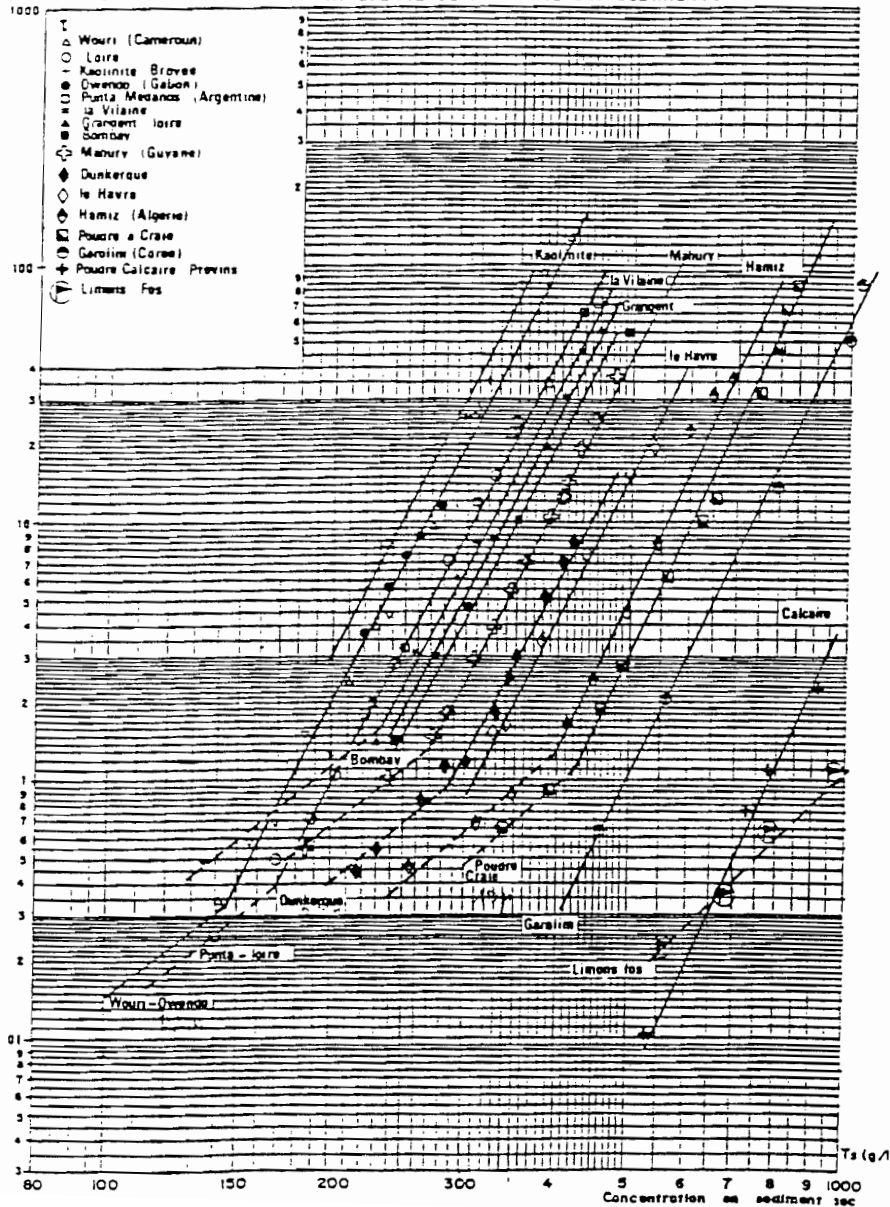
(Concentration initiale  $Ts = 200 \text{ g/l}$ , Hauteur initiale  $H_0 = 1 \text{ m}$ )



11

RIGIDITE INITIALE EN FONCTION DE LA CONCENTRATION EN SEDIMENT SEC

RIGIDITE INITIALE (Newton/m<sup>2</sup>) INFLUENCE DE L'ORIGINE DES SEDIMENTS





tation" des dépôts par gammadensimétrie donne des informations sur le gradient de concentration et sa variation au cours des temps entre la surface et le fond {Figure 10}.

Le gammadensimètre mis au point par la S.A.R. avec le L.C.H.F. [17 - 19] il y a quelques années apporte dans ce domaine un outil très utile pour préciser les différents états de tassement (sondes JTD3 et JTT4).

L'influence des caractéristiques de l'eau interstitielle et des pourcentages de sable dans les éléments est un paramètre à prendre en considération.

Ce problème est traité dans le paragraphe I.4. du Manuel sur l'hydrodynamique sédimentaire.

#### **4.1.3. RHEOLOGIE DES DEPOTS ET PROPRIETES MECANIQUES DES SOLS**

Cette étude permet de bien différencier les états des dépôts. Si pour des sables l'angle de frottement interne varie peu au cours du temps sur des sédiments fins à très fins la variation rhéologique des dépôts est considérable au cours du tassement et de la consolidation des dépôts. Liquides, plastiques ou solides, ces dépôts prennent tous les aspects physiques que l'étude de leur rigidité initiale et de leur viscosité relative permet d'apprécier par une valeur numérique précise {Figure 11}.

Ce problème est traité dans le paragraphe I.5. du Manuel sur l'hydrodynamique sédimentaire.

#### **4.1.4. PENTES D'EQUILIBRE SOUS L'EAU OU A L'AIR ET COURANTS DE TURBIDITE**

L'étude des pentes d'équilibre sous l'eau ou à l'air ainsi que des courants de turbidité qui peuvent se former avec différents types de sédiments fournissent également des informations pratiques aussi bien en sédimentologie que pour les travaux de Génie Civil. De telles pentes peuvent être étudiées en laboratoire en examinant les talus d'équilibre critiques de stabilité ou les phénomènes d'éboulement, glissement et courant de turbidité. Ici encore les études sont relativement simples pour les sédiments non cohésifs du type sable et deviennent beaucoup plus importantes pour les sédiments cohésifs, le terme de rigidité étant l'élément fondamental pour apprécier la tenue d'un dépôt sédimentaire et prévoir les risques de rupture de ce talus sous l'action d'une surcharge, d'une vibration, d'une sous-pression ou d'une érosion du pied de talus {Figure 12}.

---

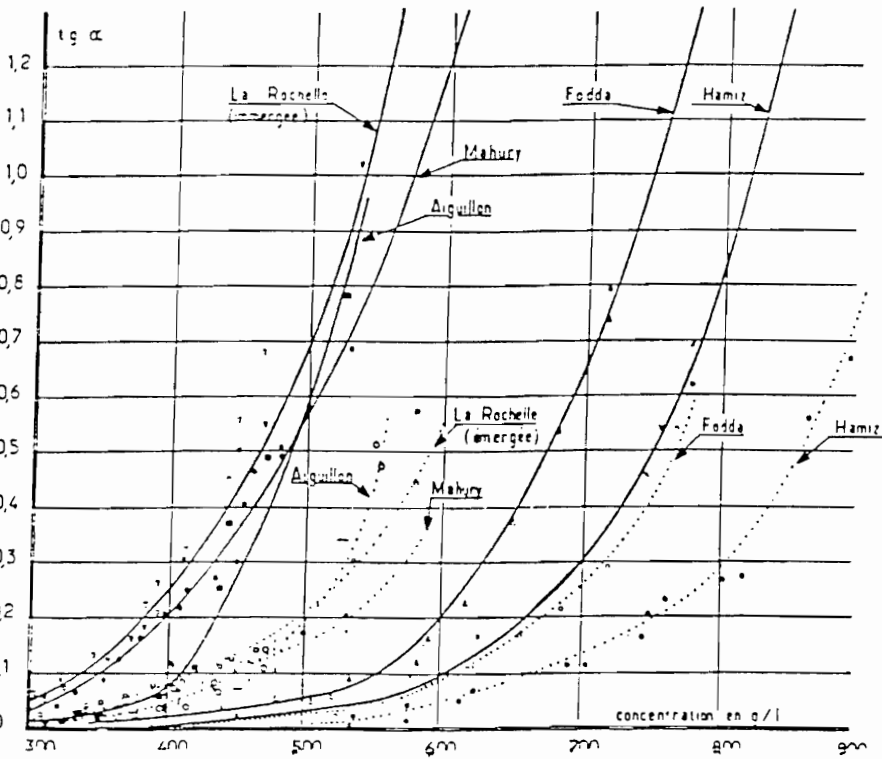
[19] *Utilisation des jauges nucléaires de densité pour étudier et mesurer au laboratoire et in situ la formation et la concentration des dépôts de vase - G. MEYER, D. CHAMBELLAN, A. CAILLOT, C. MIGNIOT - Isotope hydrologie - AIEA - SM 270/78 - 1984.*

VARIATION DE LA PENTE D'EQUILIBRE SOUS L'EAU ET HORS D'EAU  
DE DIFFERENTES VASES PLUS OU MOINS COMPACTES

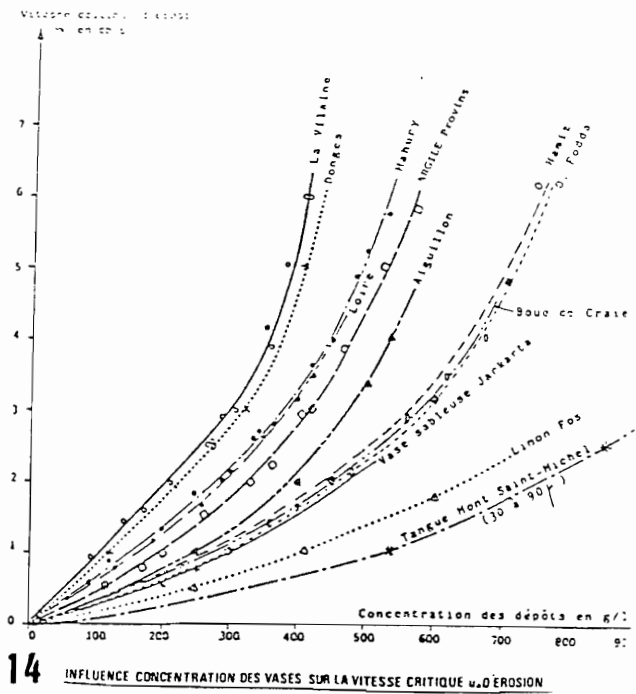
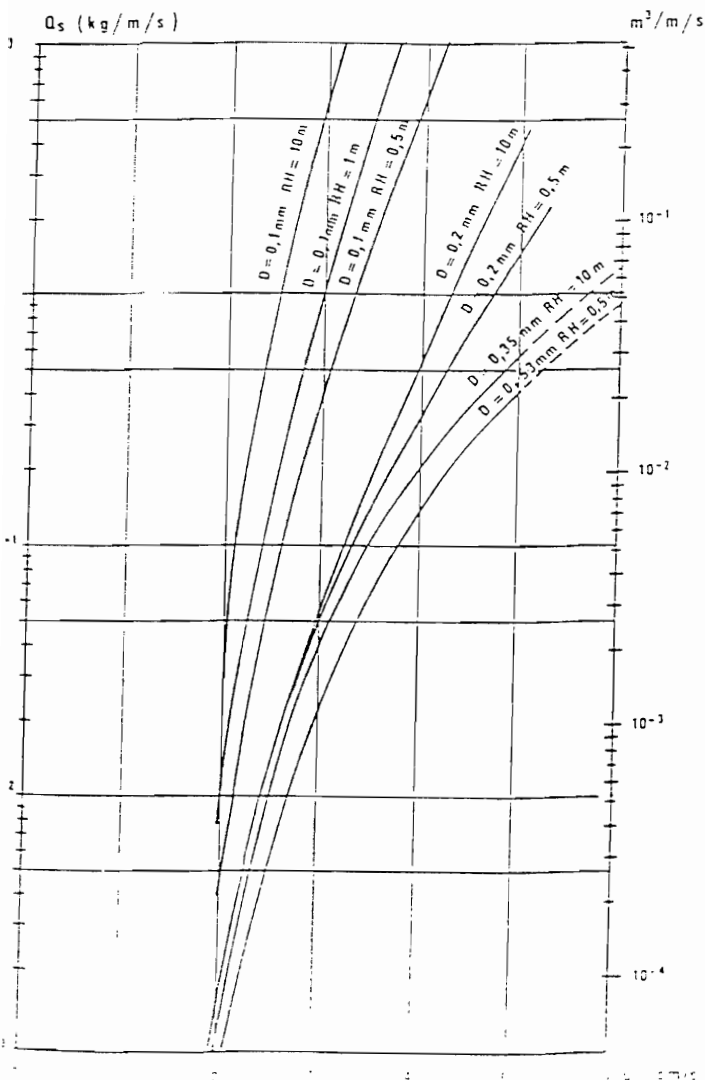
12

(d'après les expériences réalisées par le L.C.H.F.)  
(milieu aqueux, eau douce (fluviale, température 15°C))

— VASE IMMERGEE  
..... VASE EMERGEE



13 DEBIT SOLIDE TOTAL  $Q_s$  EN FONCTION DE  $u_*$   
(Einstein)



14 INFLUENCE CONCENTRATION DES VASES SUR LA VITESSE CRITIQUE  $u_{*0}$  EROSION

De même l'étude des courants de turbidité avec ses conditions de propagation, de transport et de dépôt, de triage granulométrique (granulo classement), apporte des éléments pour apprécier les phénomènes sédimentaires liés à ce type de transport.

Ce problème est traité dans le paragraphe I.6. du Manuel sur l'hydrodynamique sédimentaire.

#### **4.1.5. COMPORTEMENT DES SEDIMENTS SOUS L'ACTION DES COURANTS**

L'étude du comportement des sédiments sous l'action des courants que l'on peut effectuer en canal en faisant couler des eaux à différentes vitesses sur des dépôts de différentes natures plus ou moins consolidés, donne des indications précises sur les vitesses critiques d'érosion et les conditions de transport (*Figures 13 et 14*).

Les résultats sont donnés en rattachant la vitesse critique de frottement sur le fond " $u^*$ " ou la contrainte de cisaillement nécessaire pour éroder les fonds aux caractéristiques physiques et rhéologiques des sédiments.

Le débit solide en suspension et en charriage est rattaché à la vitesse ou à la contrainte efficace ( $u^* - u^*c$ ) ou ( $\tau - \tau c$ ) après avoir établi la relation entre la vitesse moyenne d'écoulement " $U$ " et la vitesse de frottement " $u^*$ ".

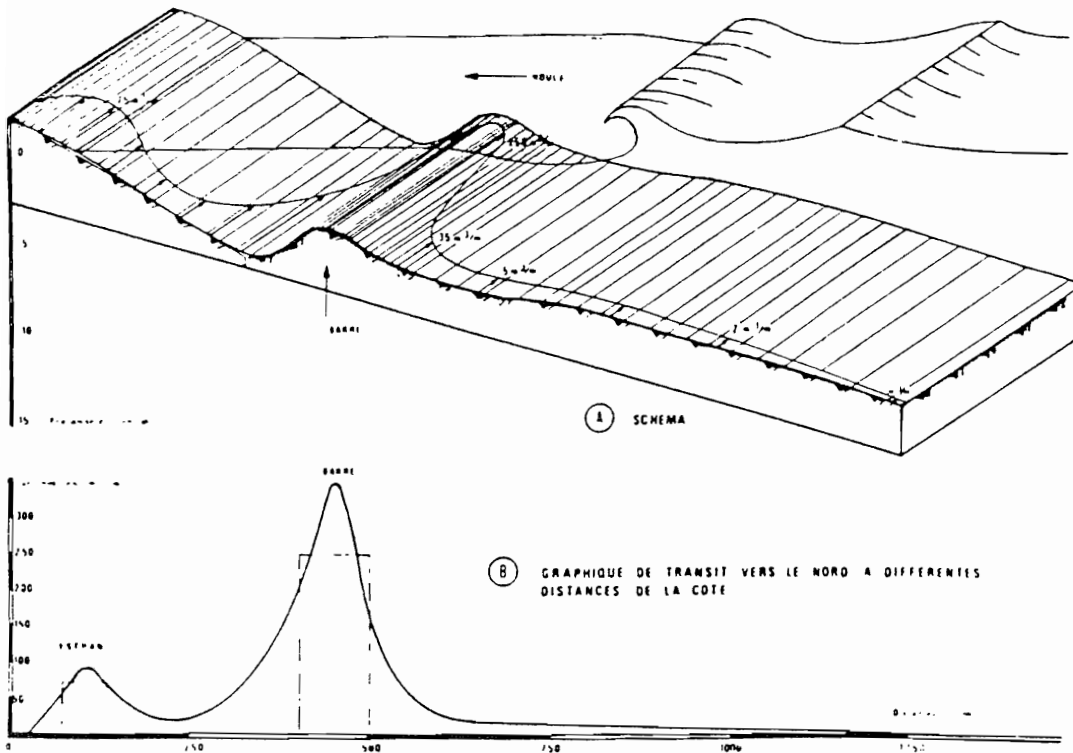
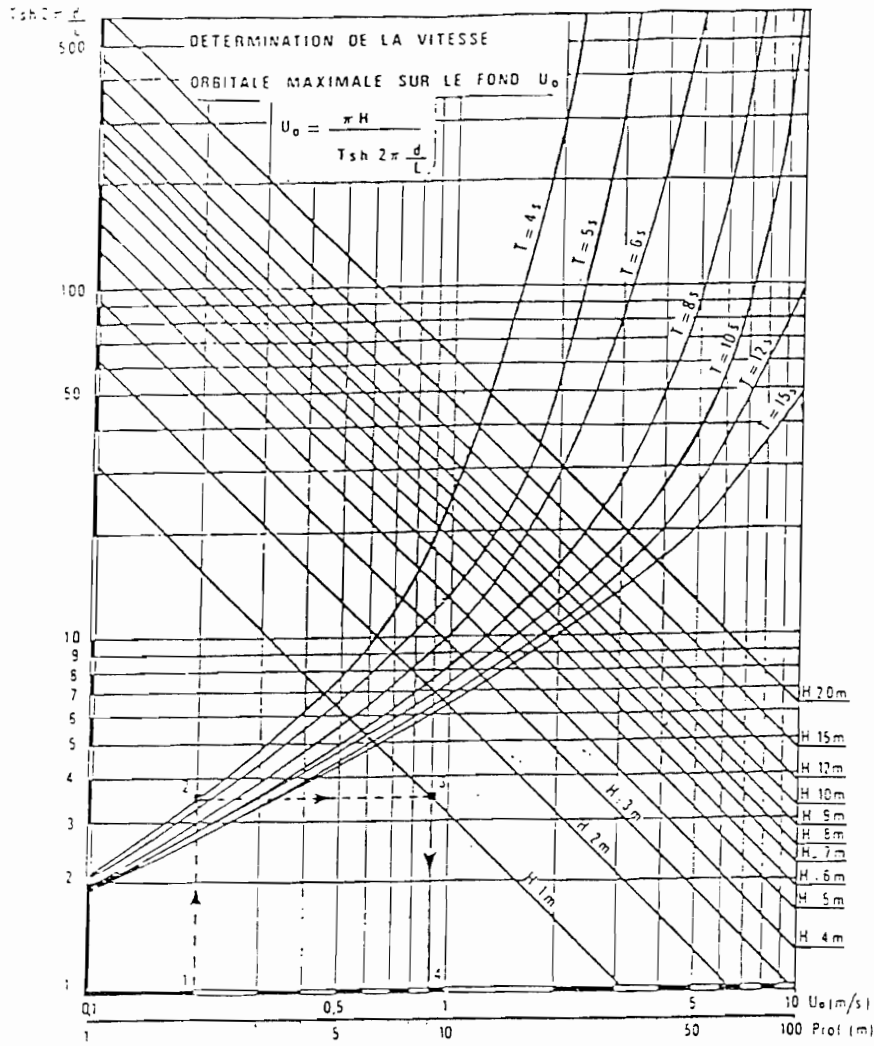
On se reportera au Chapitre II du Manuel sur l'hydrodynamique sédimentaire pour traiter ces problèmes.

#### **4.1.6. ACTION DE LA HOULE SUR LES SEDIMENTS**

L'étude de l'action de la houle sur les sédiments a, comme pour les courants, fait l'objet de recherches extrêmement poussées au L.C.H.F. et dans d'autres laboratoires français en examinant les limites d'action de la houle sur différents types de dépôts ainsi que les conditions de sédimentation. Les résultats ont été rapportés aux vitesses critiques de frottement sur les fonds développées par le mouvement orbitaire de la houle (*Figure 15*).

Partant des résultats en laboratoire, en canal à houle, des évaluations théoriques des quantités déplacées à différentes profondeurs de la mer ont été faites en fonction des caractéristiques des sédiments et de la houle. Ces évolutions ont ensuite été vérifiées en nature à l'aide de traceurs radioactifs immergés à différentes profondeurs apportant ainsi une meilleure connaissance des phénomènes sédimentaires liés à l'action propre de la houle.

Le transit littoral, parallèle au rivage, a pu être estimé en associant les lois trouvées à l'aide des études en modèle réduit aux valeurs mesurées en Nature. Il a été ainsi possible de proposer des formules semi-empiriques beaucoup plus proches des phénomènes naturels



— Répartition des transports le long d'un profil (entre le 4 février et le 23 avril 1974)

que des formules basées sur des considérations purement théoriques et des expérimentations en laboratoire (*Figure 16*).

A partir de ces formules de transports littoraux et de la répartition des transports à différentes distances de la côte, on peut évaluer les volumes sédimentaires arrêtés par un ouvrage et son évolution dans le temps ainsi que les érosions dans la zone sous le vent.

Les problèmes de diffraction, réfraction, réflexion et de courants d'expansion des houles peuvent être abordés par ailleurs afin de donner les conditions hydrauliques précises agissant sur les fonds.

On se reportera au Chapitre III, paragraphes 1 à 8, du Manuel sur l'hydrodynamique sédimentaire pour traiter ces problèmes.

#### **4.1.7. ACTIONS CUMULEES DES HOULES ET DES COURANTS**

Suivant l'importance relative des contraintes tangentielles exercées par les houles et les courants sur les fonds, les conditions de transport des sédiments pourront être très différentes. D'une façon générale, les contraintes dues à la houle s'atténueront rapidement avec la profondeur et dans des fonds supérieurs à 2,5 à 3 fois la hauteur des vagues, l'action des houles sur le remaniement des profils devient négligeable.

On peut estimer que la houle provoque le brassage des matériaux près du fond, dans les zones de faibles profondeurs, avec une remise partielle en suspension des particules et les courants les entraînent dans une direction préférentielle au large du déferlement. Entre le déferlement et la côte le transport par la houle reste prédominant.

Le paragraphe III.9. du Manuel sur l'hydrodynamique sédimentaire traite ce problème.

#### **4.1.8. ACTION DES VENTS - TRANSPORTS EOLIENS**

On ne peut négliger au cours d'une étude sédimentaire, l'importance des transports éoliens qui pourront atteindre en moyenne 15 à 20 m<sup>3</sup> par mètre de plage et par an le long de la côte des Landes mais dépasseront 150 m<sup>3</sup>/m/an dans certains secteurs particulièrement exposés comme dans le Sud du Maroc à LAAYOUNE.

Le Chapitre IV du Manuel sur l'hydrodynamique sédimentaire traite ce problème.

C'est en partant de l'ensemble de ces études en laboratoire sur les propriétés physiques des sédiments et de leur comportement sous les actions hydrodynamiques précises qu'il sera possible d'aborder le comportement des sédiments sous les actions hydrauliques et océanographiques plus complexes.

#### 4.2. ETUDES SUR PLANS ET THEORIQUES

A partir des études de synthèse des documents recueillis, des mesures en Nature et de la connaissance du comportement des sédiments sous les actions hydrodynamiques, une approche du problème d'aménagement du littoral ou d'une installation fluviale ou estuarienne peut être abordée par des études sur plans et théoriques.

Dans des cas simples des ordres de grandeur peuvent être avancés et des présomptions peuvent être faites sur les risques sédimentologiques entraînés par les ouvrages envisagés. Dans les cas plus complexes les études sur plans ne permettront que de dégrossir le problème et d'établir des schémas d'aménagement, dont la validité devra être vérifiée à l'aide en particulier de modèles réduits physiques sédimentologiques ou, éventuellement, de modèles mathématiques.

##### 4.2.1. DOMAINE FLUVIAL

Sur le plan sédimentologique, les études fluviales porteront principalement sur les effets des aménagements sur l'équilibre des cours d'eau. Les problèmes de la stabilisation du lit et de protection des berges, la déviation et correction des écoulements, la protection contre les inondations avec les effets secondaires sur les transports solides, l'influence de barrages mobiles et de prises d'eau, la sédimentation des retenues de barrage... rentreront dans ces études fluviales.

On partira dans tous les cas d'études classiques hydrauliques permettant de définir les écoulements et notamment les lignes d'eau en fonction des débits, des conditions topographiques (sections, pentes des fonds...), et de la rugosité des fonds dépendant elle-même de la nature des sédiments et de leurs conditions de transport.

Pour une étude d'aménagement donné des relations pourront être établies entre les débits solides et les débits liquides dans chaque section de la rivière ainsi qu'entre les transports en suspension et en charriage. Des évaluations entre les risques d'érosion et de sédimentation découleront de ces calculs de transport avec les modifications topographiques des fonds qu'ils entraînent et les nouvelles répercussions sur les lignes d'eau et les écoulements. Il sera ainsi possible de prévoir l'influence d'extractions massives d'agrégats dans un secteur donné avec les érosions régressives et progressives qu'elles entraînent.

Le tracé en plan du lit de la rivière, avec ses zones concaves ou convexes et les méandres qui peuvent en découler, permettra en liaison avec les écoulements et les évaluations des transports solides d'évaluer les profondeurs dans les souilles et dans les mouilles et de rechercher les solutions de rectifications les mieux adaptées pour régulariser le lit de la rivière.

Les esquisses des ouvrages de protection des berges, à l'aide d'enrochement par exemple, découleront d'une évaluation des vitesses le long de la rive et de la pente des talus, la dimension des blocs variant comme le carré de la vitesse pour des enrochements naturels.

Pour un calibrage à l'aide d'épis, susceptibles de rectifier le tracé en plan du cours d'eau, on devra tenir compte en plus du rétrécissement de la largeur de l'écoulement, des tourbillons qu'ils entraînent et des risques d'affouillements en pied d'ouvrages.

Il en sera de même autour d'une pile de pont ou d'un obstacle introduit dans le champ de l'écoulement. Des évaluations théoriques permettront d'estimer l'accélération de l'écoulement au voisinage de l'obstacle que l'on peut schématiser par les équations bi-dimensionnelles d'un écoulement irrationnel autour d'un cylindre par exemple (pour les faibles nombres de FROUDE la vitesse contre le cylindre peut être double de celle de l'écoulement). On pourra, connaissant la contrainte critique de début de mouvement, en déduire la profondeur maximale atteinte par la fosse d'érosion ainsi que la forme de l'affouillement en fonction du rapport de la hauteur d'eau par rapport à la dimension de l'obstacle [20].

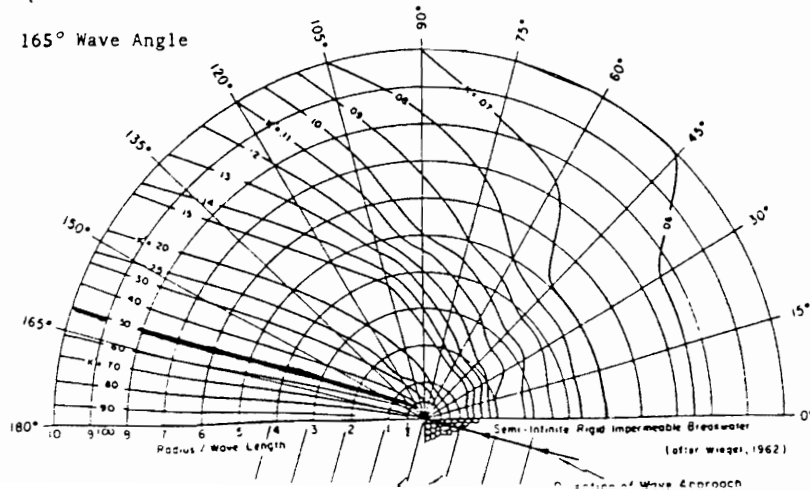
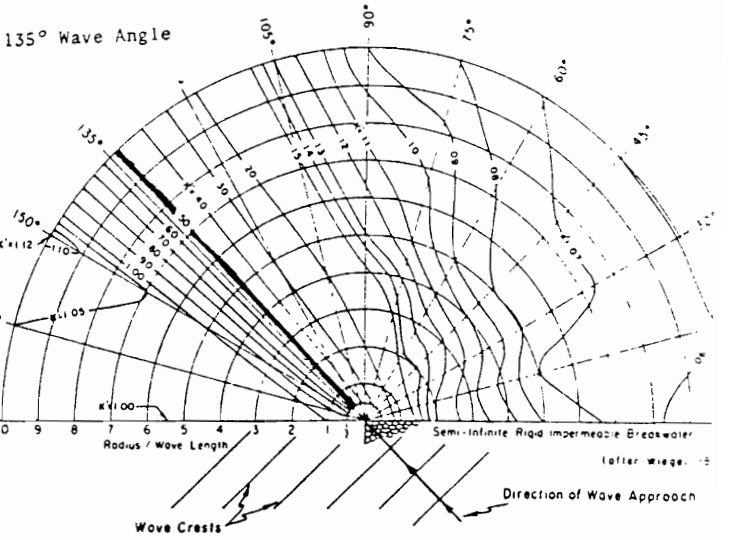
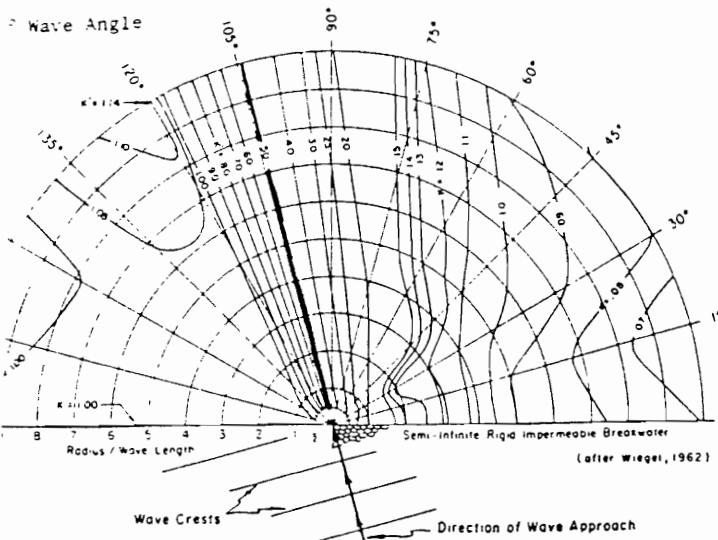
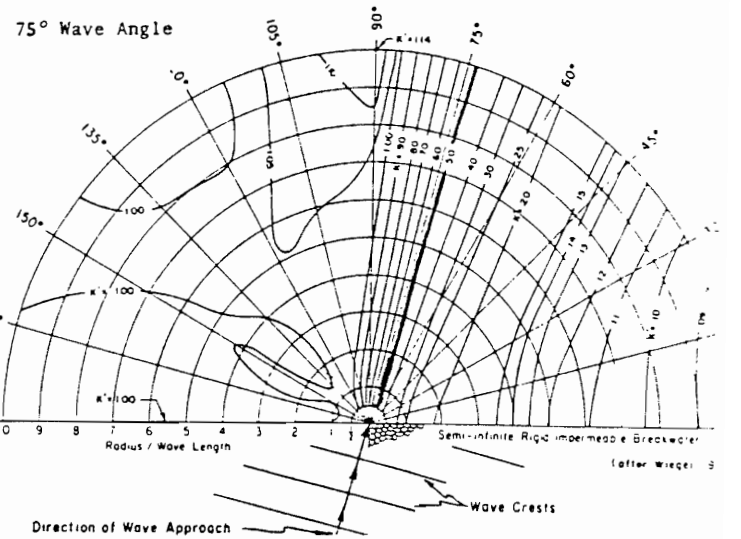
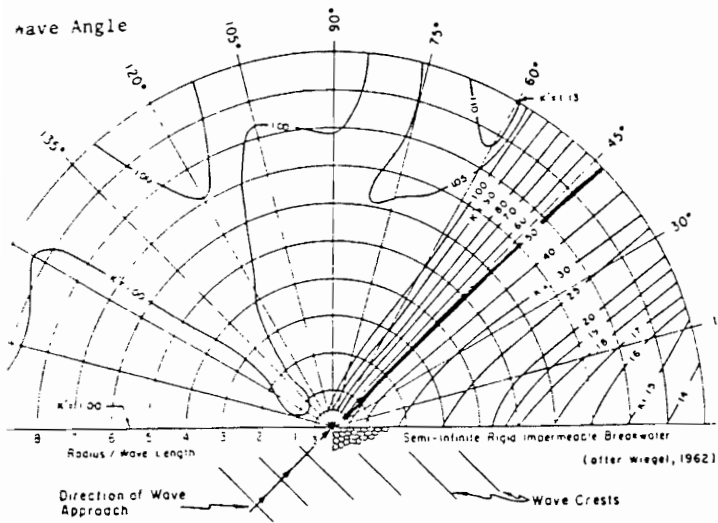
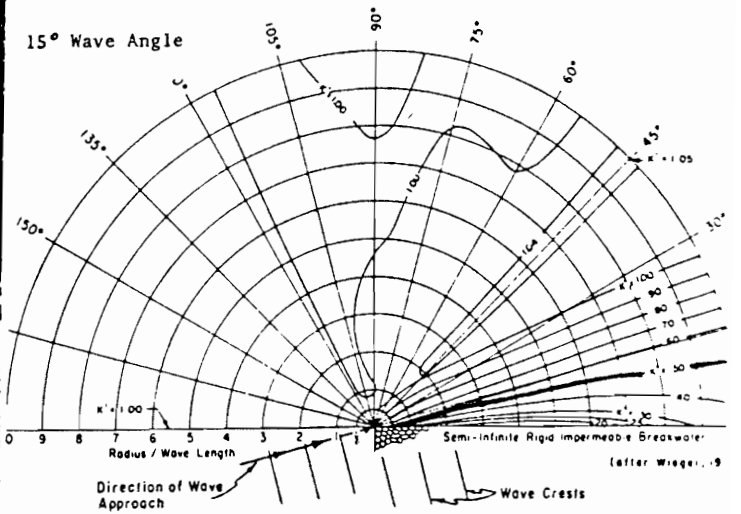
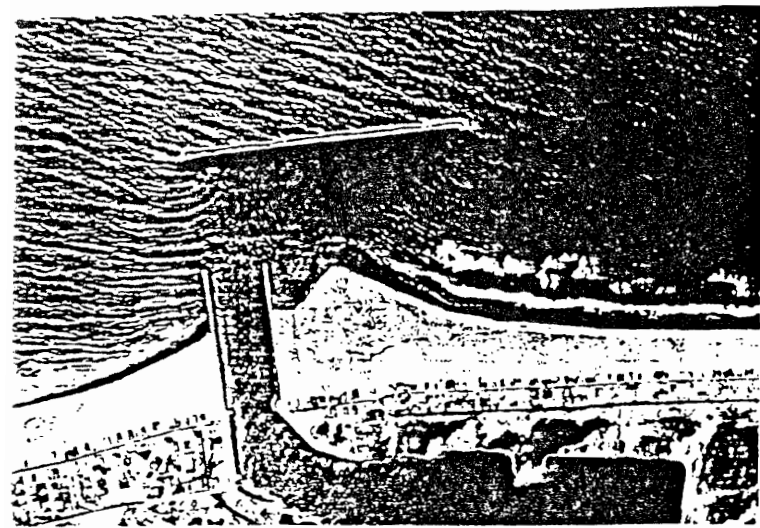
Dans le cas de l'étude du colmatage de retenue de barrage et des possibilités de dévasement, une approche théorique et sur plan doit permettre d'évaluer les risques d'apport sédimentaire en fonction des caractéristiques du bassin versant (érosion spécifique, débit de restitution...), des conditions de dépôt ou ségrégation des sédiments entre l'amont et l'aval, de consolidation des sédiments fins au pied du barrage avec leurs modifications rhéologiques en fonction du temps et de la profondeur, des possibilités de soutirer les dépôts de vases par les vannes de fond avant qu'ils aient atteint une cohésion trop importante... L'étude théorique et sur plan permettra ensuite de définir le débit minimum d'eau à refouler à l'aval du barrage pour entraîner les matériaux provenant du dévasement du barrage sur toute la longueur du cours de la rivière avec les variations des écoulements dans les différents tronçons en fonction de la pente des fonds. On retrouve toujours l'évaluation du transport saturé avec les risques que cela peut entraîner pour les dépôts dans la rivière, les prises d'eau...

De telles études sur plans restent délicates à faire et nécessitent de faire appel à des spécialistes dans ce domaine pour associer, aux évaluations théoriques, la connaissance fine des phénomènes et de cas analogues ou voisins qui ont pu être traités. Elles ne permettent que de traiter des phénomènes généraux mais ne fournissent pas d'indications détaillées sur l'influence des ouvrages d'aménagements qui devront faire l'objet de recherches plus poussées à l'aide d'un modèle réduit physique.

---

[20] *Erosion aux abords des ouvrages - J. CARPENTIER - L.C.H.F. SOGREAH - S.T.C. - 1989.*





L'utilisation d'ordinateurs pour le calcul des écoulements et des transports solides avec les interactions entre ces transports, facilitera les études théoriques et sur plans et l'on peut considérer ces outils comme indispensables pour surmonter les difficultés inhérentes à de telles recherches.

#### 4.2.2. DOMAINE MARITIME

Comme pour les études fluviales, les études sur plans dans le domaine maritime comporteront en premier lieu une approche théorique des différents facteurs hydrauliques à prendre en considération pour les évaluations des mouvements sédimentaires. Le nombre de paramètres entrant en jeu pour ces recherches et les problèmes à traiter seront plus complexes sans, pour autant, être insolubles.

Les houles dont les caractéristiques ne peuvent être connues qu'au large devront être ramenées à la côte, dans la zone des transports sédimentaires, en réalisant des plans de réfraction - diffraction des vagues pour les différentes directions et périodes observées en Nature. De nouvelles statistiques de houle à la côte en seront décrites en donnant par direction au voisinage du déferlement (zone des petits fonds de -10 m par exemple) la fréquence des hauteurs et périodes des vagues (hauteurs calculées à partir de la conservation d'énergie entre orthogonales et en tenant compte des modifications dues à la profondeur et à la cambrure).

Des plans de houle détaillés seront ensuite réalisés dans la zone des aménagements en tenant compte des phénomènes de diffraction à l'abri des ouvrages ou dans les brèches comprises entre deux ouvrages. Un calcul théorique ou l'utilisation des abaques de réfraction - diffraction donnés dans le SHORE PROTECTION MANUAL permettront d'aborder ce problème dans de bonnes conditions [21] {Figure 17}.

Si les houles étaient insuffisamment connues au large une approche théorique à partir des statistiques des vents et des fetchs, ainsi qu'à partir des observations des bateaux en mer, devrait être réalisée.

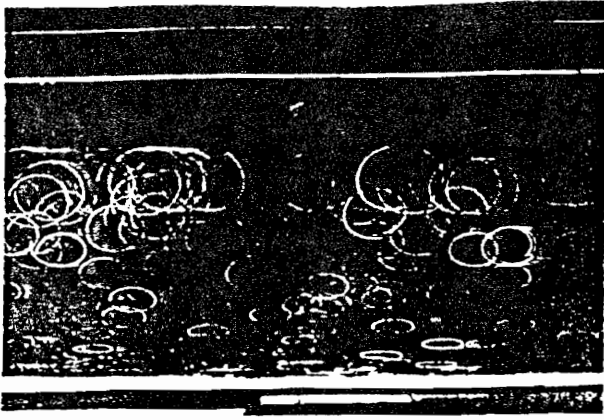
Les courants devront être précisés dans tous les secteurs de l'aménagement envisagé avec les interactions qu'ils peuvent avoir avec les houles. De même les courants dus aux vents seront calculés ainsi que les courants de houles avec leur répartition entre le déferlement et la côte. Une estimation des courants aux abords des ouvrages d'aménagement envisagés permettra d'évaluer les modifications de leurs trajectoires et vitesses et, éventuellement, de définir les courants d'expansion de la houle à l'abri des ouvrages ainsi que les courants dus au remplissage et au vidage des plans d'eau par suite des variations de hauteurs dues à la marée.

---

[21] *Shore Protection Manual - Volume 1 - U.S. Army - Coastal Engineering Research Center - Fort Belvoir - Virginia 22060.*

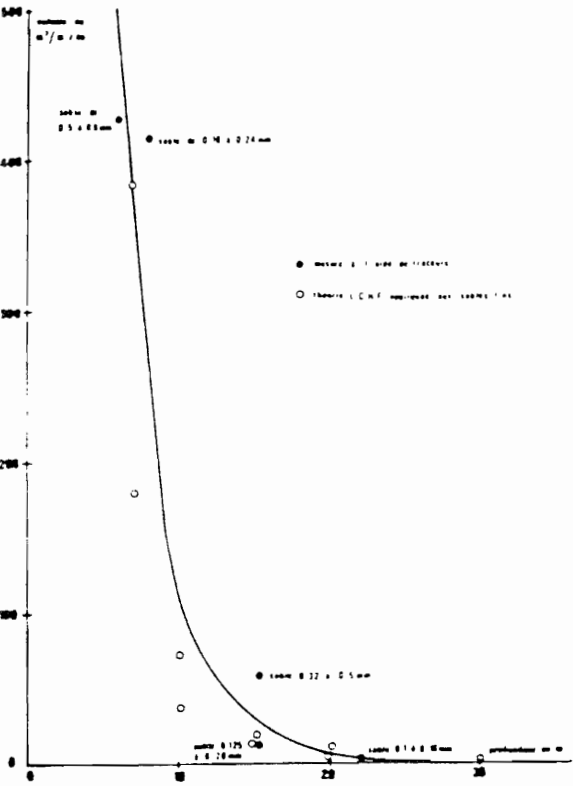


- Mouvements des masses d'eau sous l'action de la

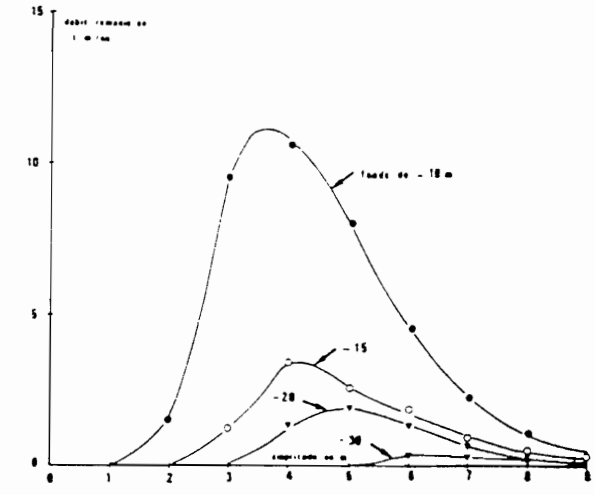


- Mouvements orbitaires.

18

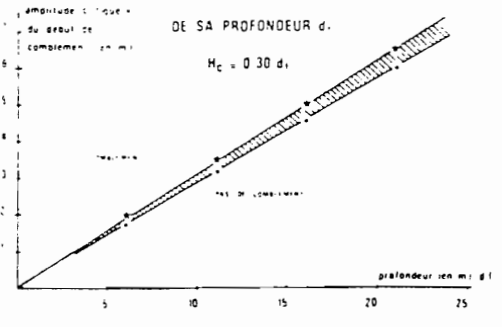


- Volume des sédiments sableux déplacés dans le profil fonction de la profondeur. (Résultats des expériences à l'aide traceurs radioactifs de 1975 ramenés à une année moyenne).

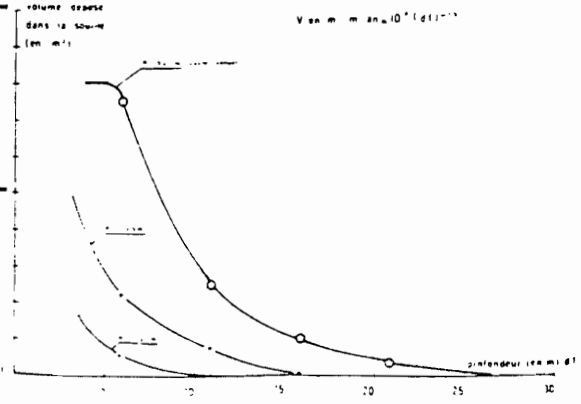


- Graphique des remaniements théoriques à différentes profondeurs en fonction de l'amplitude de la houle

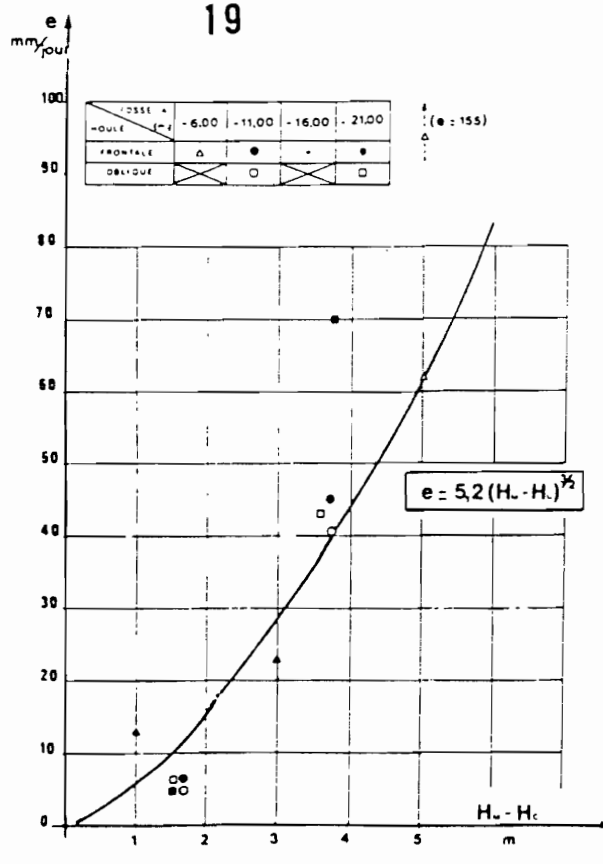
19



ME DEPOSE DANS UNE SOUILLE DE 800 000 m³ AU COURS D'UN CYCLE ANNUEL



Amplitude critique H\_c de comblement d'une souille



- Rehaussement moyen journalier du centre de la

Une estimation des seiches possibles ou des fluctuations du niveau moyen des eaux entre le déferlement et la côte par suite des houles en trains d'ondes complétera cette approche hydraulique.

Dans une deuxième phase on définira, à partir des facteurs hydrauliques et océanographiques, les contraintes de cisaillement exercées par l'eau sur les fonds et l'on recherchera, connaissant la nature des sédiments, les conditions de remaniements sédimentaires et des transports en résultant. On évaluera, par exemple, les quantités de sables ou vases déplacées à différentes profondeurs et les volumes entraînés soit dans le profil, perpendiculairement au littoral, soit parallèlement à la côte sous la double action des houles et des courants résiduels (*Figures 18 et 19*).

Une évaluation des mouvements sédimentaires entre le déferlement et le haut estran permettra de préciser l'importance du transit littoral et sa répartition dans le profil pour les différentes houles. On en déduira l'importance des volumes sédimentaires interceptés par les ouvrages et les répercussions que cela peut avoir pour l'évolution des plages au vent et sous le vent ainsi que par les petits fonds avoisinants [2 - 22 - 23].

De même il sera possible à partir des apports sédimentaires du contournement des ouvrages par le transit littoral, d'estimer les risques d'ensablement des passes d'entrée d'un port ainsi que de pénétration des sables dans les bassins sur le double effet de la diffraction et des courants issus des seiches, des tourbillons ou du remplissage par la marée.

Des évaluations sur les quantités de sables mis en suspension par les vagues à différentes distances de la côte et à différentes profondeurs permettront d'estimer les risques d'entraînement des matériaux au cours du pompage des eaux de refroidissement d'une centrale électrique ou nucléaire ou d'usines en bordure de mer.

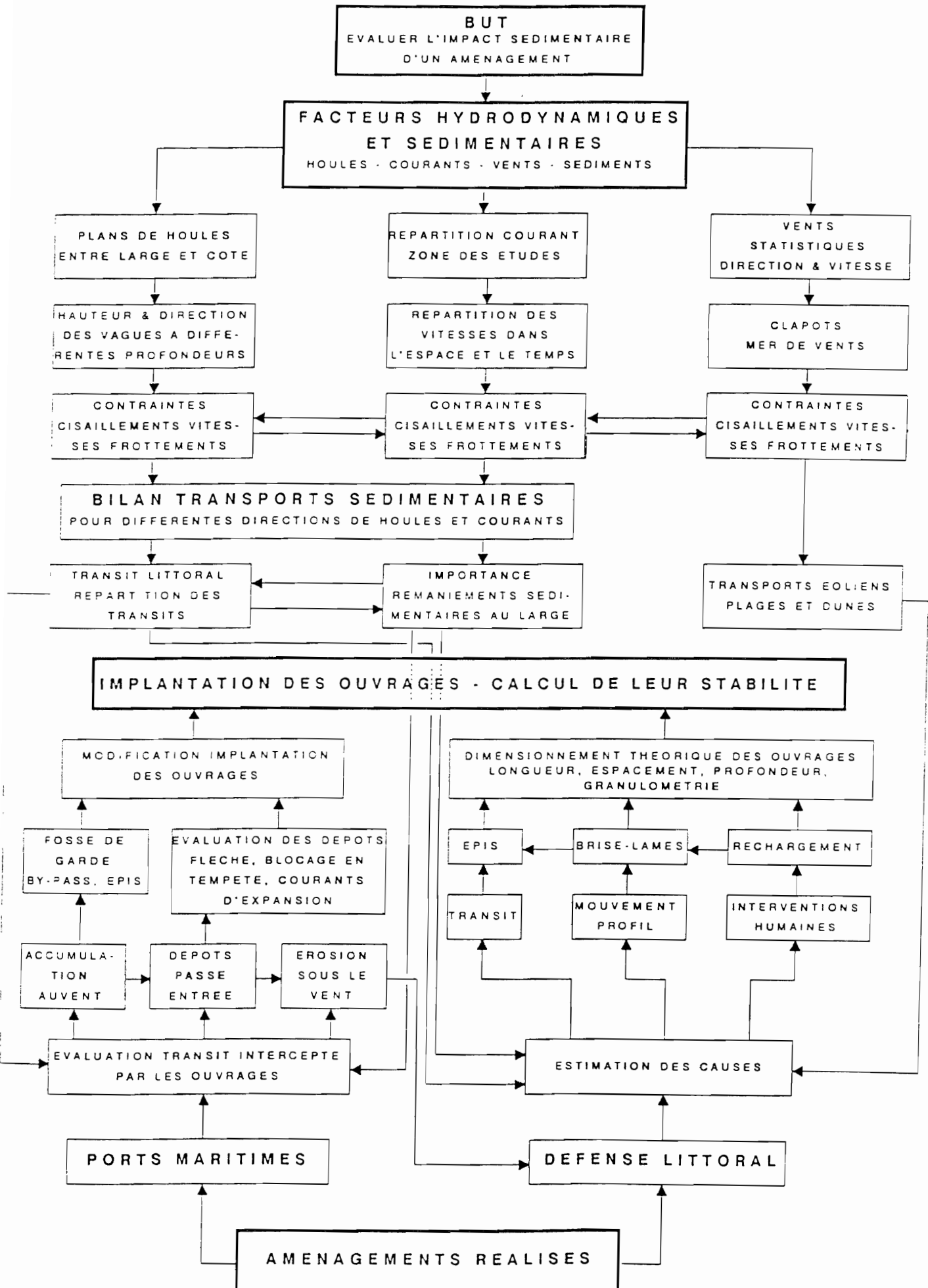
Enfin les possibilités d'assurer une protection du littoral par des rechargements des plages, des épis, des brise-lames pourront être évaluées en tenant compte du déficit sédimentaire, des conditions de transports des matériaux (dans le profil ou en transport littoral) et des interactions entre les ouvrages et les houles et les courants. Suivant l'importance des érosions du littoral et leurs causes, on pourra évaluer la granulométrie et les volumes de rechargement de la plage, la longueur et les espaces entre épis, les caractéristiques des brise-lames et les ordres de grandeur des accumulations sédimentaires qu'ils provoqueront.

---

[22] *Essais de théorie de l'évolution des formes de rivage de plages de sables et de galets - R. PELNARD CONSIDERE - XVIIIe journées de l'Hydraulique - S.H.F. Marseille - 1986.*

[23] *Dynamique sédimentaire maritime - Principes Généraux - J.P. MONTAZ - SOGREAH - Cours E.N.S.M.G. - 1986.*

# EXEMPLE D'ORGANIGRAMME D'UNE ETUDE MARITIME SUR PLANS



Pour les ouvrages à réaliser une approche théorique, basée sur les caractéristiques des houles, permettra de les dimensionner et de définir les enrochements ou blocs artificiels à mettre en place (calcul de la hauteur des ouvrages non submersibles, estimation des poids des éléments de la carapace par la formule d'HUDSON...).

Il est bien certain, devant le nombre des paramètres qui entrent en jeu dans une étude maritime et des interactions entre ces paramètres, que les études théoriques et sur plans ne peuvent donner que des indications générales sur les évolutions sédimentaires et des prévisions qualitatives sur l'influence d'un aménagement. Comme pour les études fluviales, des recoupements avec des cas analogues susceptibles d'avoir été réalisés sont souhaitables pour valider les présomptions de ces études qui restent, dans tous les cas, des plus utiles pour orienter suffisamment tôt et à moindre frais les avant-projets d'aménagement.

A titre indicatif, l'organigramme d'une étude maritime sur plans est donné sur la Figure 20 dans les cas de la réalisation d'un port et de la défense du littoral.

#### 4.2.3. DOMAINE ESTUARIE

Dans le domaine estuarien, les études sédimentologiques théoriques et sur plans seront basées, avant tout, sur les lois de continuité qui régissent l'équilibre de l'estuaire.

Variations exponentielles des largeurs, des sections, des volumes d'eau oscillant, lois d'équilibre des profondeurs pour une vitesse critique déduite du rapport entre le débit instantané maximum par la section moyenne, lois des mélanges entre les eaux douces fluviales et les eaux salées marines, de propagation et du temps de séjour des eaux fluviales dans l'estuaire, des vitesses résiduelles en fonction de l'amplitude de la marée et du débit fluvial...

Les études sur plans devront donc, en partant des mesures faites en Nature, définir ces lois de continuité et d'équilibre. Elles devront également préciser le comportement des différents sédiments de l'estuaire, et notamment des vases, sous les actions hydrodynamiques qu'ils peuvent subir et évaluer le comportement des suspensions : floculation, vitesse de chute des flocons, tassement en fonction du temps, gradient de concentration dans les dépôts, consolidation rhéologique, etc...

A partir de ces données, il sera ensuite possible d'évaluer qualitativement l'impact d'aménagement sur la propagation de la marée (lignes d'eau instantanées, lieux des Pleines Mers et des Basses Mers, vitesses et volumes d'eau oscillant), d'établir des présomptions sur l'évolution de l'intrusion saline, et d'estimer les risques d'envasement d'un secteur déterminé.

Un approfondissement important d'un chenal en aval d'un estuaire pourra par exemple ne modifier que faiblement la section mouillée de l'estuaire si ce dernier est très large. Le calcul montrera que les volumes d'eau oscillant à l'amont et les lignes d'eau sont peu perturbés ainsi que l'intrusion saline. Par contre le même calcul fera apparaître une réduction des vitesses dans le chenal dragué et une diminution appréciable des contraintes de cisaillement sur les fonds qui varieront comme la puissance  $1/6$  des profondeurs.

Connaissant par ailleurs les conditions du tassement des dépôts en fonction du temps et les vitesses critiques de frottement nécessaires pour remettre en suspension des dépôts ayant atteint une concentration ou une rigidité donnée, il sera possible d'évaluer les quantités de matériaux qui pourront être "piégés" dans le chenal au cours d'une étale de marée, d'un cycle de marée ou d'un cycle hydrologique. Pour chacun de ces cycles en effet la consolidation des dépôts se fera sur quelques heures, quelques jours ou quelques semaines et les concentrations dépasseront le seuil critique de remise en suspension. En associant lois de consolidation et répartition des contraintes de cisaillement dans le temps on peut donc faire un bilan des sédimentations possibles et, de ce fait, avoir une première estimation des dragages d'entretien à réaliser.

Cette estimation par le calcul est en fait beaucoup plus complexe par suite des modifications de la turbidité des eaux, dans la zone étudiée, sous les effets du cycle hydrologique et des vitesses résiduelles qui conduisent à une remontée des vases vers l'amont de l'estuaire en étiage et leur descente vers l'aval en crue. La position du "bouchon vaseux" dépendra de ce cycle hydrologique associé aux variations des coefficients de marées. On se trouve donc limité dans une approche théorique et sur plans et l'on ne peut que dissocier les dépôts pour des cas extrêmes avec et sans bouchon vaseux dans le secteur considéré c'est-à-dire en période de forte et de faible turbidité moyenne des eaux avec une résultante qui intégrera la périodicité de ces phénomènes. Les résultats deviennent alors très qualitatifs.

L'influence d'un calibrage de l'estuaire, dans un tronçon donné, sur l'équilibre sédimentaire et les modifications des profondeurs en résultant, pourra également faire l'objet d'une approche théorique et sur plans en admettant toujours la loi de continuité des vitesses maximales ou moyennes. Si les fonds sont suffisamment meubles les sections d'approfondiront pour retrouver cette loi de continuité et l'on pourra donner un ordre de grandeur des profondeurs atteintes. Les études sur plans par contre ne pourront donner, avec précision, les modifications temporaires qui peuvent se produire dans la propagation de la marée et, de ce fait, sur les volumes oscillant et les vitesses. Sur le plan sédimentologique ces études ne pourront donner que des tendances générales qu'il faudra ensuite quantifier par des études plus poussées à l'aide de modèles réduits physiques sédimentologiques ou mathématiques tri-dimensionnels.

Pour le déplacement d'une masse de vase dans un estuaire en fonction du débit fluvial de l'amont on pourra également, par une étude sur plans, évaluer d'une part l'importance de son excursion alternative vers l'amont et vers l'aval sous le jeu de la marée, d'autre part la résultante moyenne du déplacement en admettant que la masse de vase soit solidaire des masses d'eau en mouvement. Il s'agit d'intégrer le débit fluvial dans le débit de marée qui traverse la section considérée. On pourra de cette façon évaluer qualitativement le temps qu'une particule mettrait pour descendre (ou remonter) l'estuaire depuis la limite du bief fluvio-maritime. En fait ce résultat restera entâché d'erreurs par suite de la variation des vitesses de flot et de jusant dans une section transversale de l'estuaire (chenaux de flot et chenaux de jusant) et du gradient des vitesses, salinités et turbidités sur la verticale. Ici encore les études sédimentologiques sur plans ne peuvent donner que des tendances qui, si elles restent très utiles pour l'établissement d'un avant-projet sont nettement insuffisantes pour prévoir quantitativement l'influence d'un aménagement sur le plan sédimentaire.

A l'embouchure les phénomènes se compliqueront encore plus par suite de l'équilibre qui doit se produire entre les actions purement marines - tels que les apports dans le transit littoral ou l'action des houles sur les fonds - et les actions dynamiques dues à la marée et aux volumes oscillant qui pénètrent et sortent de l'estuaire. Une évaluation théorique entre le débit solide littoral annuel et le volume d'eau oscillant à l'embouchure en vives eaux peut donner des présomptions sur les possibilités d'équilibre et du maintien de l'embouchure. On pourra également pour une étude sur plans avoir un ordre de grandeur de l'influence d'ouvrages de guidage ou de calibrage se prolongeant en mer et permettant d'une part de réduire les apports dans le transit littoral, d'autre part de maintenir la puissance érosive des volumes d'eau oscillant à des distances plus grandes du littoral donc à des profondeurs marines plus importantes. On pénètre dans un domaine où les actions cumulées des courants et de la houle interfèrent sans que l'on puisse par la seule étude sur plans en déduire les effets.

Intérêt et limite des études sur plans et théoriques se retrouvent dans le domaine estuarien avec tous les avantages que ces études présentent pour une approche de l'élaboration des esquisses d'aménagement sans pour autant pouvoir prétendre évaluer avec certitude leur impact sur les phénomènes sédimentaires.



#### 4.3. SCHEMAS DES AVANT-PROJETS D'AMENAGEMENT

A partir du recueil et de l'analyse des documents existants, des mesures en nature et des études sur plans, et compte tenu des objectifs à atteindre, des schémas des avant-projets d'aménagement peuvent être établis.

A ce stade des études - qui ont pu être relativement sommaires et rapides si le problème à résoudre est simple et n'entraîne pas des contraintes financières importantes - différentes solutions d'aménagement seront proposées en prenant en considération non seulement leur efficacité mais leur impact sur l'environnement.

Dans des cas simples, ne présentant pas de risques sédimentaires appréciables, d'investissements trop lourds et pour lesquels les études sur plans ont apporté des résultats suffisamment crédibles on pourra passer directement à l'établissement du projet d'aménagement et à son estimation financière. L'avant-projet sommaire des aménagements (A.P.S.) pourra être établi après avoir informé suffisamment les services ou collectivités locales de l'état d'avancement des études et lancé, si nécessaire, une étude d'impact.

Dans des cas plus complexes différentes esquisses d'aménagement seront envisagées en tenant compte des contraintes techniques mises en évidence par les études préliminaires. Certaines solutions pourront être définitivement abandonnées si des risques indéniables avaient été mis en évidence tant sur le plan hydraulique que sédimentologique ou d'environnement. Pour les autres, un compromis sera à faire entre avantages et inconvénients des différentes esquisses d'aménagements et en prenant en compte non seulement les frais de premier établissement que cela comporte mais les frais d'entretien ou ceux qui apparaîtront à long terme lorsque, par exemple, la capacité d'emménagement sédimentaire d'un ouvrage se trouvera saturée nécessitant de mettre en oeuvre de nouveaux aménagements ou de procéder à des dragages d'entretien ou à des protections du littoral hors de proportion avec l'intérêt économique des installations.

Pour chacune de ces esquisses d'aménagement - basées sur les études sur plans - on devra évaluer les problèmes qu'ils sont susceptibles de soulever, ainsi que leurs avantages. Les incertitudes sur les prévisions d'évolution sédimentaire devront être clairement définies et les possibilités d'amélioration du projet par des études plus complètes devront être précisées.

Le programme détaillé des études complémentaires à entreprendre sur des modèles réduits sédimentologiques sera défini en indiquant les échelles exactes du modèle, s'il s'agit d'un modèle physique, les éléments utilisés pour son étalonnage et les différentes solutions d'aménagement qui seront examinées, la solution jugée comme étant la plus satisfaisante étant ensuite étudiée sur une longue période et comportant éventuellement des aménagements progressifs et susceptibles de résoudre les difficultés qui pourraient apparaître à long terme pour les installations ou les zones limitrophes.

# CHAPITRE V

ETUDE SUR MODELES REDUITS PHYSIQUES SEDIMENTOLOGIQUES

## V

### ETUDE SUR MODELES REDUITS PHYSIQUES SEDIMENTOLOGIQUES

Dans l'état actuel des connaissances les modèles réduits physiques sédimentologiques restent pratiquement le seul moyen valable pour mieux comprendre les interactions entre fluide et particules, reproduire des évolutions des fonds avec une bonne précision, prévoir l'influence d'un aménagement et rechercher des solutions permettant de limiter les phénomènes sédimentologiques aux abords des installations tout en préservant l'équilibre des zones limitrophes.

De telles études, qui ont fait leur preuve depuis près de 40 ans [24 - 25], bénéficient des progrès constants dans la similitude et dans les appareils de reproduction des phénomènes naturels. La programmation des modèles physiques par des mini-ordinateurs et le dépouillement automatique des mesures permettent notamment un gain de précision et de rapidité.

De même les recherches très poussées qui ont été faites sur le comportement des sédiments naturels sous les actions hydrodynamiques et leur représentation par des matériaux artificiels ayant aux échelles du modèle les mêmes comportements, ont permis d'affiner les résultats tant pour les problèmes d'ensablement que pour ceux d'envasement.

Ces modèles qui sont en exploitation dans les différents laboratoires d'hydraulique (SOGREAH, Laboratoire National d'Hydraulique et certains laboratoires universitaires pour notre pays) apportent des éléments essentiels permettant, les phénomènes naturels étant connus, de prévoir les évolutions sédimentologiques d'un littoral d'une rivière ou d'un estuaire tant dans l'espace que dans le temps.

Encore faut-il que ces modèles aient été conçus à des échelles bien adaptées aux phénomènes susceptibles d'être étudiés et que l'on ait pu s'assurer de leur validité par un étalonnage aussi précis que possible. Il est en effet difficile, sinon impossible, de concilier sur un modèle physique toutes les conditions de similitude des phénomènes de transport des sédiments liés aux écoulements et l'on doit faire un choix dans les phénomènes à reproduire en appliquant des échelles dimensionnelles plus particulièrement adaptées au problème posé.

---

[24] *Représentation des transports et des dépôts de sédiments dans des modèles maritimes - C. MIGNIOT - Journée technique sur la simulation en hydraulique maritime - O.T.H. - Mars 1972.*

[25] *Validité des modèles réduits sédimentologiques maritimes - J.P. LECLERC - SOGREAH-L.C.H.F. - Mission Interministérielle de la mer - 1989.*

Le choix de ces échelles, les paramètres physiques à représenter étant fixés, dépend d'un certain nombre de critères, les uns liés à une bonne représentation des écoulements hydrauliques moyens, de l'érosion et des chemins parcourus par les matériaux en suspension et en charriage, les autres dépendant des limites à prendre en considération pour que la zone à étudier ne soit pas influencée par les perturbations dues à l'introduction de la marée, des courants, de la houle et des matériaux. Les échelles du modèle doivent être enfin choisies pour que, sur le plan pratique, les grandeurs restent compatibles avec les impératifs économiques, les possibilités actuelles des laboratoires et une exploitation rationnelle des essais.

Dans ce chapitre plus spécialement consacré à la méthodologie des études des modèles réduits physiques, nous examinerons successivement :

- la similitude applicable aux modèles réduits sédimentologiques,
- l'étalonnage des modèles réduits physiques - le tarage et les ordres de grandeur des échelles adoptées,
- la méthodologie des études en fonction des recherches à réaliser.

#### **5.1. LA SIMILITUDE APPLICABLE AUX MODELES REDUITS SEDIMENTOLOGIQUES**

Pour être valable un modèle sédimentologique doit répondre à un certain nombre de critères de similitude, les uns étant liés à une réduction géométrique appropriée d'un secteur géographique ou d'un ouvrage, les autres à la représentation correcte de l'évolution du fluide et des mouvements des matériaux schématisant les sédiments naturels. Similitude géométrique, similitude dynamique, similitude sédimentologique et échelles des temps de reproduction d'un phénomène connu sont à prendre en considération dans l'élaboration du choix des échelles du modèle réduit.

##### **5.1.1. SIMILITUDE GEOMETRIQUE**

La première condition à satisfaire sera de représenter les longueurs, largeurs, hauteurs, suivant des échelles linéaires, afin que toutes les dimensions du modèle et leurs homologues en nature (appelé prototype) soient dans un rapport constant.

Si toutes les dimensions ont le même rapport, le modèle sera dit non distordu ; au contraire, si les dimensions en plan et en hauteur présentent des rapports différents, le modèle sera distordu. Dans certains cas, les échelles des largeurs et des longueurs ne seront pas les mêmes et le modèle sera dit à double distorsion.

Dans le cas des modèles sédimentologiques maritimes, on utilisera le plus souvent une simple distorsion :

Modèle	Longueur Largeur	Hauteur	Distorsion	Surface verticale	Surface horizont.	Volumes
Distordu	1/m	1/n	m/n	1/mn	1/m <sup>2</sup>	1/m <sup>2</sup> n
Non distordu	1/m	1/m	1	1/m <sup>2</sup>	1/m <sup>2</sup>	1/m <sup>3</sup>

### 5.1.2. SIMILITUDE DYNAMIQUE

La similitude géométrique doit être complétée par une similitude dynamique. Les forces qui règnent en des points homologues dans le modèle et sur le prototype devront être en relation constante.

Celles qui interviennent le plus fréquemment sont dues à l'inertie, la gravité, la viscosité, la tension superficielle, l'élasticité, les pressions, etc...

Sur un modèle réduit à fonds mobiles, les premières conditions qu'il faudra représenter sont celles que l'on doit s'imposer sur un modèle à fonds fixes. Ces conditions ne permettent, le plus souvent, de réaliser qu'une similitude de l'écoulement moyen, en négligeant l'allure des phénomènes au voisinage de la paroi, celle-ci n'intervenant que pour créer une perte de charge, quantité scalaire dont on n'étudie que les variations suivant l'axe du lit.

Pour tous les écoulements à surface libre, le fait que la force de pesanteur "g" s'exerçant sur le fluide soit la même en nature que sur le modèle, il s'ensuit que le rapport des forces d'inertie (proportionnelles au carré des vitesses V<sup>2</sup>) aux forces de gravité (proportionnelles à gH), doit rester constant, lorsque l'on passe de la nature au modèle. Cette loi est donnée par la similitude de Froude :

$$\frac{v^2}{gdn} = \frac{v^2}{gdm}$$

("dn" et "dm" étant les hauteurs d'eau en nature et sur le modèle).

En fait il sera possible, dans le cas où l'on a à représenter simultanément les actions de la houle et des courants, à l'embouchure d'un estuaire par exemple, d'apporter une légère distorsion de l'échelle de Froude pour les courants, afin d'ajuster les transports sédimentaires (distorsion des vitesses ne dépassant pas 20 %).

La similitude de Reynolds fait intervenir le rapport des forces d'inertie aux forces de frottement visqueux :

$$\frac{Vd}{\nu(\text{nature})} = \frac{vd'}{\nu(\text{modèle})} = Re$$

un petit nombre de Reynolds signifiera que les forces de viscosité sont prépondérantes.

Sur un modèle, on ne peut vérifier en même temps la similitude de Froude et de Reynolds, et il n'est pas nécessaire sur un modèle fluvial, maritime ou d'estuaire de conserver le même nombre de Reynolds qu'en nature, mais de s'imposer un écoulement du type turbulent rugueux, c'est-à-dire d'avoir sur le modèle :

$$\frac{vd'}{\nu m} > 500 \text{ à } 2\,000$$

On peut admettre, si sur le modèle le nombre de Reynolds dans un chenal ou un bras d'estuaire est supérieur à 2 000, que le chenal ou le bras se creusera correctement, sinon il aura tendance à disparaître plus vite sur le modèle que dans la nature. Dans le cas de bras ou de chenaux multiples en particulier, on devra s'assurer que les échelles sont choisies de telle sorte qu'en toute zone, ce nombre de Reynolds critique est atteint.

De la similitude de Froude, le nombre de Reynolds étant supposé supérieur à 500, on pourra en déduire les échelles des vitesses, des temps et des débits hydrauliques.

Modèle	Vitesse horizontale	Vitesse verticale	Temps hydraulique	Débit
Distordu	$1/n^{1/2}$	$m/n^{3/2}$	$n^{1/2}/m$	$1/m n^{3/2}$
Non distordu	$1/m^{1/2}$	$1/m^{1/2}$	$1/m^{1/2}$	$1/m^{5/2}$

La houle étant un phénomène essentiellement gravitaire, aux dissipations d'énergie près qui se développent près du fond, sera régie par la similitude de Froude.

Les hauteurs des vagues seront représentées à l'échelle  $1/n$  et les périodes à l'échelle  $1/n^{1/2}$ . Toutefois, pour les phénomènes où la diffraction est prépondérante il faudra sur un modèle distordu ajuster les périodes par une échelle fonctionnelle. Cet impératif conduira d'une part à diminuer la distorsion du modèle, notamment dans le cas de formation de flèches sédimentaires soumises aux phénomènes de diffraction, d'autre part à réduire légèrement les périodes tout en s'imposant de conserver la même zone de déferlement qu'en Nature et les mêmes obliquités des houles résiduelles avec le littoral. En

général une réduction des périodes de 15 à 20 % suffit pour obtenir des résultats satisfaisants sur le plan sédimentologique, par contre les extrapolations des résultats aux phénomènes d'agitation dans un bassin portuaire doivent être prises avec plus de réserves.

Sur le modèle on devra également conserver une similitude de "perte de charge" ce qui entraîne :

- une épaisseur de la couche limite "e" ( $e = 11,6 v / (gdi)^{1/2}$  dans un courant et  $e = 1,3 (vT)^{1/2}$  sous la houle) très supérieure aux dimensions des grains "D", sans qu'il y ait formation de rides d'une façon non contrôlée.

Cette condition se traduit par la relation :

$$11,6 \frac{D}{e} \leq 500$$

- une reproduction des lignes d'eau conformément à la nature, c'est-à-dire représenter une similitude des forces de frottement hydraulique (condition de Chezy).

En appelant "C" le coefficient de Chezy on a :

$$V = C (Rh)^{1/2} ; Rh = \text{rayon hydraulique} \neq d$$

L'échelle des coefficients de frottement C modèle/C nature est donc égale à :

$$\frac{C (\text{modèle})}{C (\text{nature})} = \left(\frac{n}{m}\right)^{1/2}$$

autrement dit, le coefficient de Chezy doit être plus faible sur le modèle qu'en nature, ce qui peut être obtenu en augmentant artificiellement la rugosité de fond sur un modèle à fonds fixes (à l'aide de plaques de métal déployé, par exemple), ou en choisissant sur les modèles à fonds mobiles de sable ou de graviers de diamètres "D" des grains supérieurs à la nature :

$$C = k \left(\frac{d}{D}\right)^{1/6}$$

et :

$$\frac{D (\text{modèle})}{D (\text{nature})} = \frac{1}{n} \left(\frac{m}{\bar{n}}\right)^3$$

En pratique, on constate que, dans un estuaire en particulier, la pente "i" dépend principalement de la géométrie des berges et de la topographie des fonds et qu'il n'est pas impératif de respecter très exactement les grossissements des matériaux calculés à partir des formules de Chezy-Strickler ; il est toutefois souhaitable d'avoir une plus forte rugosité qu'en nature. Dans le cas de modèle de vase, il apparaît qu'en schématisant les sédiments naturels par des particules

pélimitiques très fines (quelques microns), on obtient au voisinage du fond une couche visqueuse ou plastique qui présente les mêmes propriétés qu'un fond rugueux et permet de reproduire convenablement la propagation de la marée et la répartition des courants, alors que, sur le même modèle à fonds fixes, il aurait peut-être fallu introduire une rugosité artificielle.

### 5.1.3. SIMILITUDE SEDIMENTOLOGIQUE

Les considérations précédentes permettent de représenter sur un modèle l'écoulement hydraulique moyen, elles ne tiennent pas compte du mouvement des sédiments mobiles. On peut résumer ces considérations en disant que, pour être acceptable, le modèle doit en première approximation :

- respecter la similitude géométrique,
- respecter la similitude de Froude,
- avoir un écoulement du type turbulent rugueux,
- respecter une similitude de rugosité (dans le cas où la rugosité du fond n'est pas négligeable devant la rugosité de forme).

Pour reproduire des mouvements sédimentaires homologues sur le modèle à ceux de la nature, il faut, en plus, définir un matériau mobile qui présente des comportements analogues, sous les mêmes actions hydrauliques, à ceux des sédiments naturels \*. Un tel matériau modèle doit respecter en premier lieu :

- la conservation du même régime d'écoulement autour du grain tombant en chute libre dans l'eau,
- des conditions correctes d'entraînement des sédiments sous les actions hydrauliques,
- une conservation des trajectoires des particules en suspension dans le courant de houle, ce qui impose des vitesses de chute appropriées des particules,
- une conservation des lois de débit solide avec le rapport entre les quantités transportées en charriage et en suspension,
- une conservation d'un rapport constant entre les forces de gravité et les forces de l'eau sur le grain (critère de Devimeux),
- un transport correct dans le courant général de masse perpendiculaire à la plage (critère de J. Valembois),

---

\* Les caractéristiques de différents matériaux susceptibles d'être utilisés en modèle réduit pour représenter les sédiments naturels, seront données en annexe.



- une conservation de la forme générale de plage (critère de Larras),
- pour des vases, on doit avoir un rapport constant entre les rigidités initiales des dépôts et les forces tractrices et respecter les tendances générales de floculation et de tassement, au cours des temps, que l'on rencontre sur les sédiments naturels.

#### A. Conservation du même régime d'écoulement autour du grain

Ce premier critère pourra être respecté, si l'on conserve sur le modèle la même valeur du paramètre sans distorsion du grain "G" qu'en nature [26].

Ce paramètre "G" est le rapport de  $\tau_0 / \Sigma g D$  à  $R^{*2}$  avec :

$\Sigma = \rho_s - \rho_0$  : = densité apparente du matériau,

$R^* = u^* D : \nu$  c'est-à-dire le nombre de Reynolds étoilé rapporté au grain, " $\nu$ " étant la viscosité cinématique de l'eau et " $u^*$ " la vitesse de frottement  $(\tau_0 : \rho_0)^{1/2}$ .

Ce paramètre "G" du grain s'écrit :

$$G = \frac{\Sigma g D^3}{\nu^2} = f(R^*)$$

La relation de similitude correspondant à l'égalité "G modèle = G nature" permet de définir le rapport entre les diamètres des grains sur le modèle et en nature :

$$D \text{ modèle} : D \text{ nature} = (\Sigma \text{ modèle} : \Sigma \text{ nature})^{-1/3} (\nu \text{ modèle} : \nu \text{ nature})^{2/3}$$

Compte tenu que le rapport entre les viscosités de l'eau sur le modèle et en nature peut être voisin de 1, si l'on utilise de la bakélite de densité 1,4 sur le modèle, le diamètre des particules devra être 1,58 fois plus gros que pour les sédiments naturels de densité 2,6.

#### B. Conditions d'entraînement des sédiments sous les actions hydrauliques

Ce deuxième critère impose une similitude de "régime de fond" et la conservation du paramètre "G" du grain, ce qui implique que le nombre de Reynolds du grain ( $D_{50}$  pour un mélange) soit reproduit à l'échelle 1 ainsi que le nombre "G"

---

[26] Etude sur modèle du transport littoral. Conditions de similitude - J. VALEMBOIS - Coastal Engineering - Vol. 9 Ch. 18 - 1960.

$$[R^*] = \frac{u^* D}{\nu} = f(D^*) = 1$$

et  $[G] = \Sigma g D^3 : \nu^2 = 1$

a) Dans le cas de la houle, la vitesse moyenne de cisaillement "u\*" sur le fond peut être, d'après les travaux d'Eagleson, définie par :

$$u^* = \left( \frac{8 \nu U_{\max}^2}{\pi T} \right)^{1/4} \quad \text{avec } U_{\max} = \frac{\pi H}{T \operatorname{sh} 2 \pi \frac{d}{L}}$$

$$u^* = \left( \frac{8 \pi \nu H^2}{T^3 \operatorname{sh}^2 2 \pi \frac{d}{L}} \right)^{1/4}$$

"H" étant la hauteur des houles, "L" leur longueur d'onde, "T" leur période, "d" la profondeur d'eau et "ν" la viscosité cinématique de l'eau.

Si la houle est représentée en similitude de Froude, l'échelle de "u\*" est égale à :

$$u^* \text{ nature} : u^* \text{ modèle} = \frac{(\text{échelle } H)^{1/2}}{(\text{échelle } T)^{3/4}} = n^{1/8}$$

Si "n" est le rapport entre les hauteurs nature et modèle.

Pour que le nombre de Reynolds du grain (D50 pour un mélange) soit reproduit à l'échelle 1, il faut donc que :

$$[Re^*] = \frac{u^* D}{\nu} = f(D^*) = 1$$

$$D \text{ modèle} : D \text{ nature} = (n)^{1/8}$$

Si le modèle est à l'échelle des hauteurs de 1:n = 1:75, on aura :

$$D \text{ modèle} : D \text{ nature} = 1,71$$

Si l'on veut conserver le paramètre  $G = \Sigma g D^3 : \nu^2$  et obtenir ainsi une similitude de "régime de fond", il faudra que l'échelle du matériau artificiel soit :

$$\Sigma \text{ nature} : \Sigma \text{ modèle} = n^{3/8}$$

Pour un modèle à l'échelle du 1:75 en hauteur, le rapport des densités apparentes des sédiments naturels et artificiels sera de 5, ce qui conduit à un matériau artificiel de densité 1,32.

- b) Dans le cas des courants, il faudrait théoriquement que l'on ait une similitude entre les vitesses critiques de frottement "u\*" en nature et en modèle, ce qui conduirait, compte tenu que :

$$u^* = \left(\frac{\tau}{\rho}\right)^{1/2} ; u^* = (gR_H i)^{1/2}$$

à u\* modèle : u\* nature = m<sup>1/2</sup>.n

Une telle similitude des vitesses de frottement "u\*" imposerait que la représentation des vitesses au voisinage du fond soit dans le même rapport en nature et sur le modèle, ce qui semble très difficile à obtenir dans un estuaire où les gradients de densité existant en nature ne sont pas forcément reproduits sur le modèle.

Avec l'hypothèse de la non-distorsion du paramètre "G" du grain et de "R\*" critique, l'application de la méthode d'Einstein montre (G. Moguilny) que la similitude du démarrage du charriage ne peut être assurée qu'à condition de distordre les vitesses modèle par rapport à la similitude de Froude, contrairement au cas de la houle pour lequel aucune distorsion n'est nécessaire. Dans le cas d'un modèle au 1:75 en hauteur, cette distorsion des vitesses peut atteindre 1,5 à 2.

- c) Pour qu'il y ait similitude d'entraînement, à l'entrée d'un estuaire, sous l'action des courants et de la houle, il faudra donc établir un compromis qui sera contrôlé ensuite et ajusté au cours de la phase expérimentale du tarage.

R. BONNEFILLE [27 - 28] a proposé de caractériser le début d'entraînement des sédiments non cohésifs, d'un diamètre supérieur à 0,2 mm, à partir des paramètres sans dimension.

$$R^* = \frac{u^* D}{\nu} \text{ et } D^* = G^{1/3} = \left(\frac{\Sigma g}{\nu^2}\right)^{1/3} D$$

- pour  $0,3 < R^* < 12$  on a :  $D^* = 2,5 R^{*4/5}$   
- pour  $R^* > 12$  on a :  $D^* = 3,8 R^{*5/8}$

Si "D\*" est inférieur à ces valeurs, aussi bien en Nature que sur modèle, il y a mouvement, au-dessus les fonds sont stables (Figure 21).

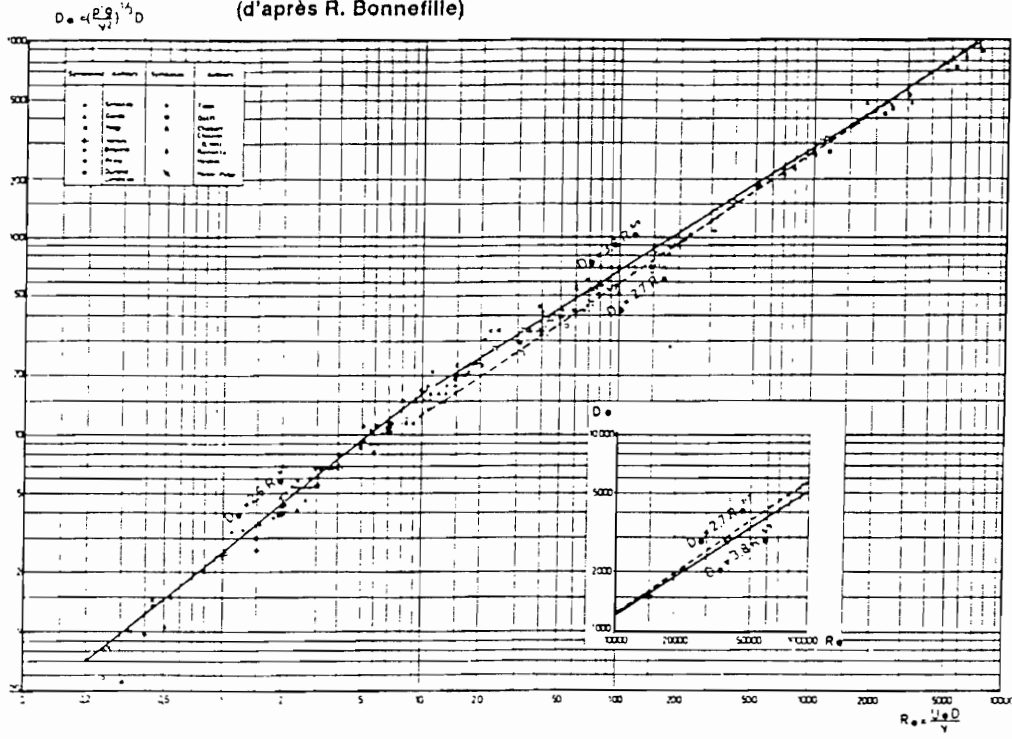
---

[27] *Essais de synthèse des lois de début d'entraînement des sédiments sous l'action d'un courant en régime continu - R. BONNEFILLE - Bulletin C.R.E.C. N° 5 - 1963.*

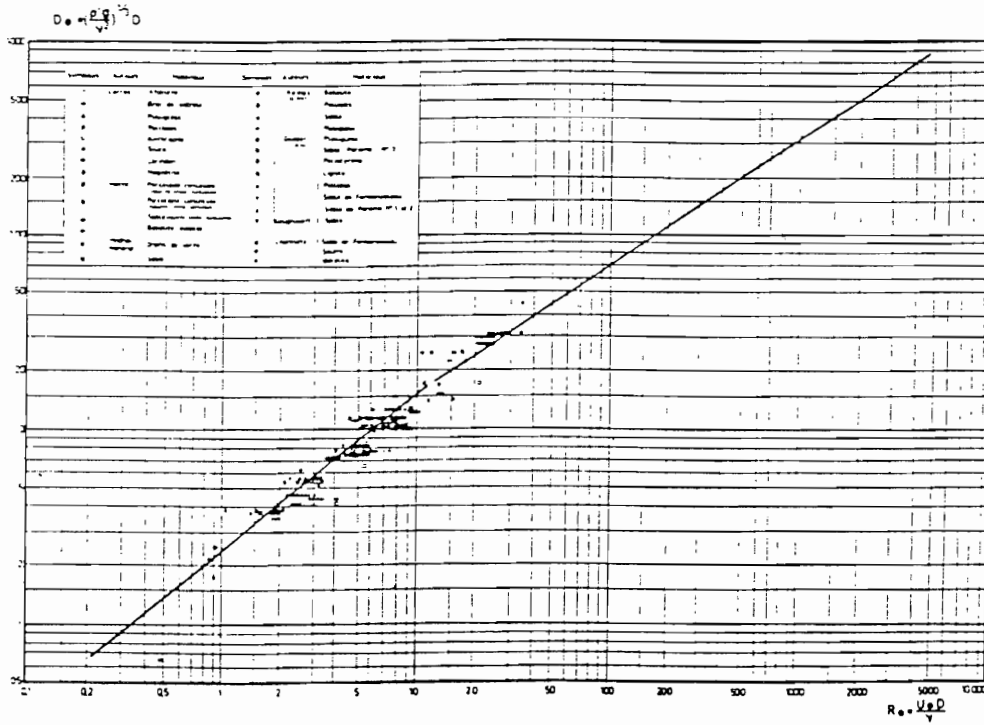
[28] *Cours d'hydraulique maritime - R. BONNEFILLE - ENSTA - Editions Masson - 1980.*

DEBUT D'ENTRAINEMENT DES SEDIMENTS

(d'après R. Bonnefille)



- Loi de début d'entraînement des sédiments sous l'action d'un écoulement uniforme



- Loi de début d'entraînement des sédiments sous l'action de la houle

C. Conservation de la trajectoire des particules en suspension

Le respect des trajectoires, la vitesse de chute des particules étant supposée non modifiée par la turbulence, dispersion, etc... nécessite que les échelles de similitude des vitesses de chute soient dans le rapport :

vitesse de chute modèle : vitesse de chute nature :  $m:n^{3/2}$

Si, par exemple, le modèle est à une échelle en plan du 1:175 et une échelle des hauteurs de 1:75, on devra avoir sur le modèle des particules ayant des vitesses de chute 3,7 fois plus faibles que celles des sédiments naturels. En adoptant une bakélite ayant des diamètres légèrement plus gros que ceux des sables naturels, cet impératif est obtenu pour les sables moyens et fins.

Précisons que, si l'on adoptait, dans les cas des éléments péltiques en particulier, un matériau mobile ayant des vitesses voisines de celles des sédiments naturels, on aurait la relation entre les échelles en plan et en hauteur :

$$m = n^{3/2} \quad \text{et} \quad \frac{m}{n} = m^{1/3}$$

On aurait obtenu un résultat analogue dans une rivière en admettant la loi de la longueur des méandres "L" en fonction du débit "Q" :

$$L = K Q^{1/2} \quad \text{ou} \quad m = n^{3/2}$$

De telles distorsions sont fréquemment adoptées pour les études d'estuaires.

D. Conservation des lois de débits solides et du rapport entre les quantités transportées en charriage et en suspension - Triages granulométriques

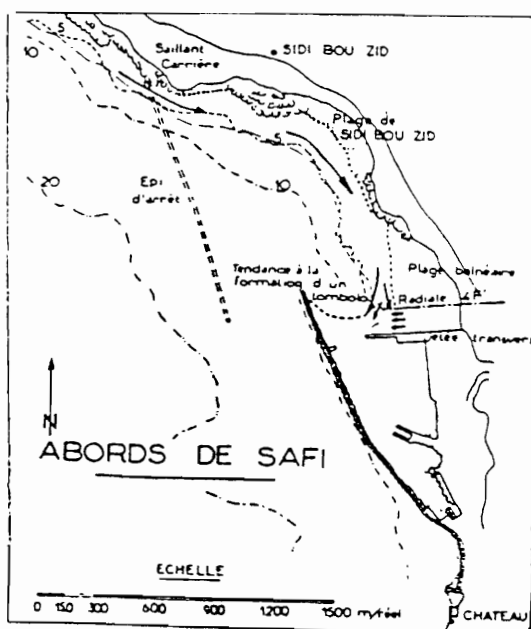
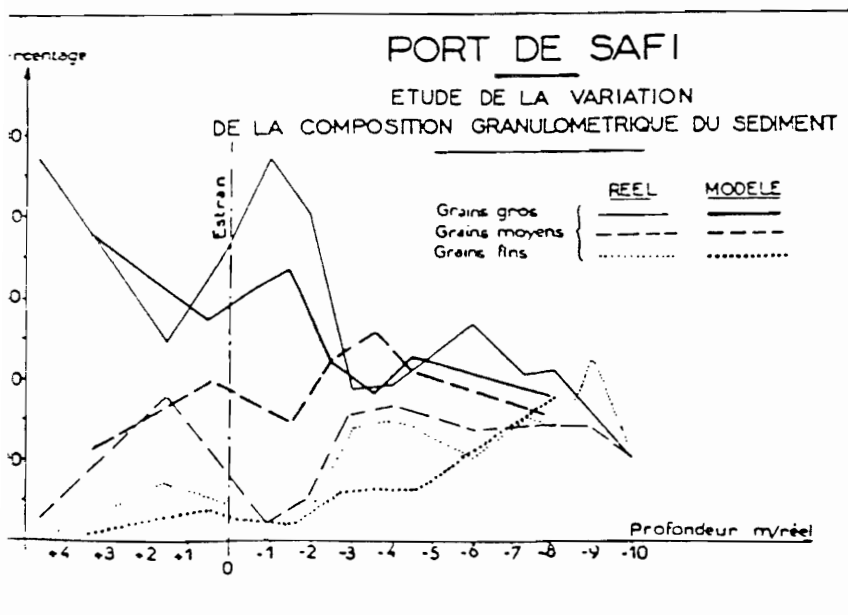
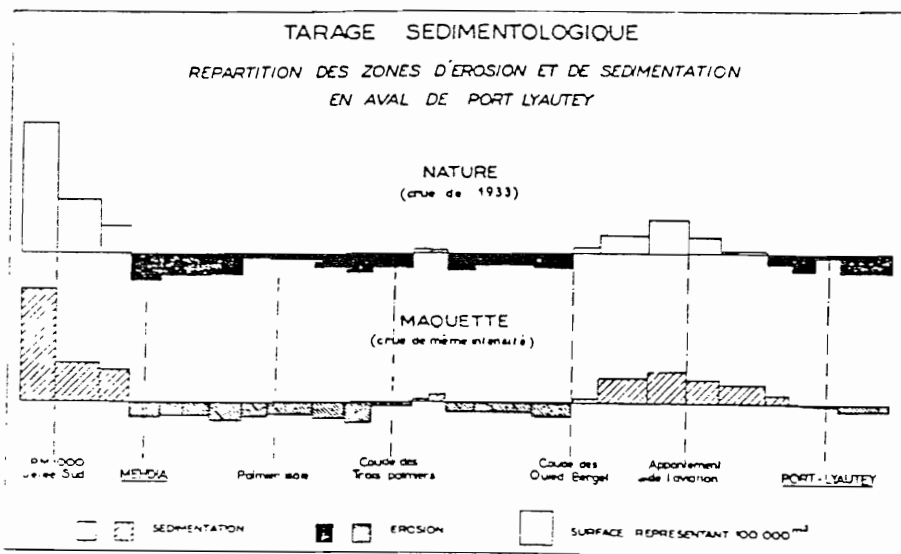
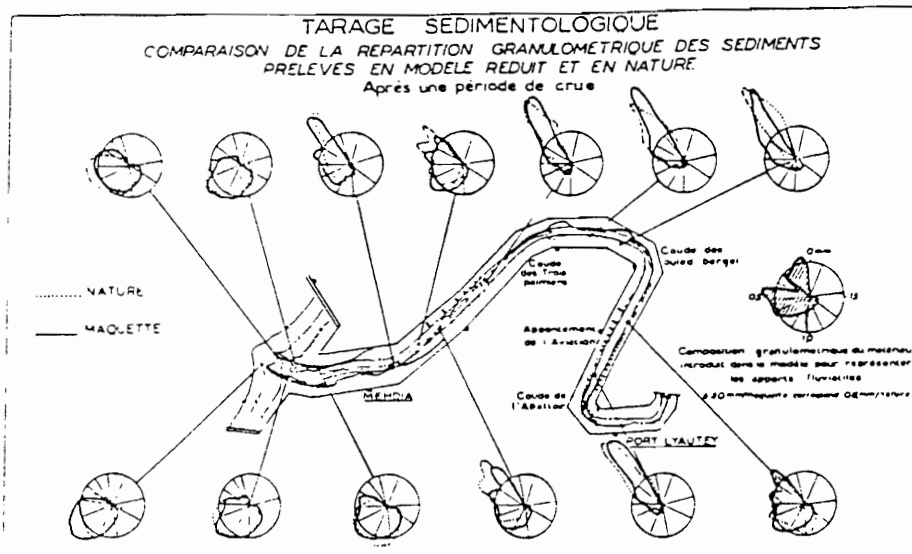
Le respect du début d'entraînement des matériaux artificiels schématisant les sédiments naturels est insuffisant pour obtenir une similitude correcte des transports. Il faudra s'assurer, en plus, que les débits solides transportés sur le modèle suivent les mêmes lois que les sédiments naturels avec un rapport correct entre les quantités transportées en suspension et en charriage.

Un sédiment grossier tels que graviers, galets, gros sables... se rapprochera des lois de débit données par Meyer-Peter, c'est-à-dire des lois variant sensiblement comme une fonction de la troisième puissance de la vitesse avec un transport prépondérant en charriage.

Un sable fin à moyen au contraire se rapprochera d'une loi de débit fonction de la cinquième puissance de la vitesse, le

# REPRODUCTION DES TRIAGES GRANULOMETRIQUES SUR MODELE REDUIT

22



transport en suspension augmentant très rapidement en fonction de la vitesse et de l'inverse du diamètre du grain.

Le matériau utilisé sur le modèle devra avoir une densité et une granulométrie qui permette de retrouver ces mêmes lois ce qui nécessite sur un modèle sédimentologique d'utiliser des matériaux artificiels ayant une densité relative très inférieure à celle des sédiments naturels.

La validité de ces conditions de similitude des lois et débits solides et des rapports suspension/charriage se trouvera confirmée par les triages granulométriques constatés sur le modèle qui devront être comparables à ceux observés en Nature. Il s'agit là d'un impératif absolu à respecter pour s'assurer de la validité du modèle dans les phénomènes de transports sédimentaires aussi bien par les courants que par les houles {Figure 22}.

#### E. Conservation du rapport entre le poids du matériau et les forces exercées par l'eau sur le fond

En écrivant le rapport entre le poids des matériaux et la force de frottement exercée par le courant sur le fond et en effectuant des analogies avec des forces de frottement exercées sur des familles de carènes géométriquement semblables, Devimeux a établi des relations entre les dimensions des particules mobiles et les échelles du modèle [29].

$$D_m : D_n = 0,8 \left( \frac{\Sigma_{nat}}{\Sigma_{mod}} \right) \left( \frac{v_{mod}}{v_{nat}} \right)^{1/2} m^{1/2} / n^{3/4}$$

Pour un modèle à l'échelle du 1:175 en plan et 1:75 en hauteur, utilisant de la bakélite de densité apparente  $\Sigma = 0,40$ , on aura :

$$D_{modèle} : D_{nature} = 0,8 (4 \cdot 1 \cdot 13,3 : 25,5) = 1,68$$

#### F. Transport correct dans le courant général de masse perpendiculaire à la plage

Le profil des fonds devant dépendre de la façon dont les matériaux mis en suspension dans le déferlement sont transportés par les courants de masse perpendiculaires à la plage, il faut, théoriquement, pour être en similitude, écrire que le rapport, entre la vitesse de chute et la profondeur d'eau, à la vitesse du courant de masse par la longueur perpendiculaire à la plage est conservé (J. Valembois).

---

[29] *Reproduction des triages granulométriques sur modèle réduit - J. LAURENT - Publication n° 38 de l'Association Internationale de l'Hydrologie - Rome - 1951.*

En admettant, par ailleurs, que le paramètre "G" du grain est conservé, on obtient :

$$m:n = (\rho_s - \rho_0) : (\rho_m - \rho_0)$$

avec  $\rho_s$  : densité nature ;  $\rho_m$  : densité modèle ;  $\rho_0$  = densité de l'eau.

Ce critère semble conduire à une distorsion légèrement trop forte du modèle.

#### G. Conservation de la forme générale de la plage

Partant de la relation expérimentale établie par J. Larras pour le profil général des plages, M. Tardif a examiné les distorsions que l'on devait adopter sur un modèle de transport sous la houle sur lequel les sédiments naturels étaient schématisés par des particules de bakélite de densité 1,40. Les résultats de son étude montrent que, suivant l'échelle des diamètres et la cambrure de la houle, les distorsions varient entre 1,5 et 3,5 en moyenne.

#### H. Représentation des vases

Déjà complexe pour la représentation des sédiments non cohésifs, la similitude devient délicate lorsque l'on veut schématiser des vases sur un modèle réduit maritime ou d'estuaire.

Les connaissances acquises permettent, cependant, d'aborder ce problème dans de bonnes conditions, en tenant compte des propriétés physiques de ce type de matériau [30].

Sur un modèle distordu, il faudra en particulier représenter :

- les vitesses de chute (en eau calme) dans un rapport de  $m:n^{3/2}$ ,
- la dispersion des flocons sous l'action de forts courants et la refloculation aux étales ou pour de faibles vitesses (macro-floculation) .
- le tassement des dépôts à l'échelle des temps hydrauliques, c'est-à-dire  $n^{1/2}:m$ ,
- la rigidité de ces dépôts après un temps de tassement donné pour qu'elle soit dans un rapport de  $m:n^2$  et, par voie de conséquence, que les conditions de reprise qui sont directement liées à la rigidité initiale soient représentées en similitude,



- les gradients de concentration dans les dépôts,
- les débits solides d'érosion en fonction des contraintes de cisaillement,

$$Q = f(\tau_0 - \tau_c)^{3/2} \quad \text{avec } \tau_c = f(\tau_y) \neq 0,1 \tau_y$$

ce qui conduirait à des échelles des débits solides de :

$$Q_m : Q_n = m^{3/2}/n^3$$

et à des valeurs de turbidité supérieures à celles de la nature ce qui est confirmé dans les études estuariennes.

En reproduisant les vases naturelles par des vases traitées chimiquement, on arrive à respecter une grande partie de ces impératifs de la similitude permettant une bonne approche des problèmes de représentation des vases. Il n'en reste pas moins que les résultats obtenus doivent être soigneusement contrôlés par un étalonnage du modèle basé sur des phénomènes et des évolutions des fonds connus en nature.

#### 5.1.4. ECHELLE DES TEMPS SEDIMENTOLOGIQUES

L'échelle des temps sédimentologiques est égale au rapport des durées respectives pour obtenir en modèle réduit les mêmes évolutions des fonds qu'en nature sous les mêmes actions hydrauliques reproduites en similitude.

Cette échelle est, dans le cas des transports de sable, sous l'action de la houle et des courants différente de l'échelle des temps hydrauliques.

##### A. Echelle des temps sédimentologiques de transport de sable par la houle

Cette échelle des temps peut être déterminée théoriquement en se basant sur les équations du transit littoral sous la houle, et en tenant compte du coefficient empirique "Km" du matériau artificiel et "KN" des sédiments naturels, ainsi que des échelles "m" des longueurs et "n" des hauteurs du modèle.

En fait, sur un modèle distordu, l'échelle théorique des temps sédimentologiques sera égale au rapport entre l'échelle des volumes et l'échelle des débits sous la houle :

$$T:t = n^{1/2} (m:n)^2 (Km:KN)$$

Le rapport "Km:KN" atteint 25 à 30 lorsque l'on schématise sur un modèle les sables naturels par une matière plastique de densité 1,40 ; il serait de 50 à 60 pour un matériau de densité 1,25.

Pour un modèle ayant une échelle en plan du 1:175 et des hauteurs du 1:75, l'échelle des temps sédimentologiques atteindra 1:1000 à 1:1400, c'est-à-dire qu'une année sera représentée en 8 heures de fonctionnement du modèle environ.

Cette échelle théorique des temps sédimentologiques devra être appliquée aux différentes durées d'action des houles avec les alternances de tempêtes, houles moyennes et de beau temps et les variations continues de directions, hauteurs et périodes correspondant à ces différentes houles.

Le "cycle de houle" comportera donc les successions des différentes houles observées en nature au cours d'une année caractéristique avec des durées par exemple de quelques minutes de tempête (1 à 2 jours en nature), suivies par 15 à 20 minutes de houles moyennes (1 mois en nature), puis à nouveau quelques minutes de tempête... et pour les périodes de houles faibles une durée de 1 heure par exemple représentant 2 à 3 mois d'été. Toutes ces houles seront reproduites en "trains de vagues" répondant aux lois de probabilité naturelle.

**B. Echelle des temps sédimentologiques applicable à des sédiments mis en suspension par la houle et transportés par un courant général ou un courant de marée**

Si l'on compare la quantité des matériaux transportés par la houle en charriage ou en suspension au débit liquide du courant de houle, on peut en déduire la concentration du transport " $C_t$ ".

Pour qu'un courant général transporte proportionnellement la même quantité de matériaux mis en suspension par la houle, il faudra que les vitesses de ce courant soient réalisées aux mêmes échelles que les courants de houle.

Compte tenu des équations du courant de houle, les vitesses du courant général ou des courants de marées devront être multipliées par  $(\frac{m}{n})^{1/3}$

Dans le cas d'un modèle au 1:175 en plan et 1:75 en hauteur, la vitesse des courants devrait être 1,52 fois plus grande que celle donnée par la similitude de Froude.

**C. Echelle des temps sédimentologiques de charriage applicable au transport de sable par les courants de marée**

L'application des formules de charriage montre que, si la similitude des tensions critiques d'entraînement était rigoureusement réalisée, l'échelle des débits solides par unité de largeur du lit serait voisine de 1. Dans ces conditions, l'échelle des temps sédimentologiques serait égale au rapport entre l'échelle des volumes ( $m^2n$ ) et l'échelle des longueurs ( $m$ ) :

$$T \text{ nature} : t \text{ modèle} = m^2 n : m = mn$$

Cette échelle théorique des temps serait donc, dans le cas d'un modèle au 1:175 en plan et 1:75 en hauteur, de 13 100.

En fait, une telle échelle qui nécessite une similitude des tensions critiques d'entraînement ne peut être obtenue que si l'on a initialement représenté les courants en appliquant une forte distorsion de Froude, ce qui peut entraîner de sérieuses difficultés.

On est donc réduit pour assurer une représentation simultanée correcte des phénomènes de transport sous la houle, reproduits à l'échelle de Froude, et sous l'action des courants, représentés avec une certaine distorsion de Froude, d'ajuster les phénomènes hydrauliques, afin que les évolutions des fonds soient comparables à ceux constatés en nature.

On pourra, suivant le cas, soit distordre raisonnablement les courants en jouant sur la similitude de Froude, afin d'augmenter leurs vitesses, soit ajuster leur durée d'action, afin de les rendre compatibles aux actions de la houle. Dans ce domaine, le tarage du modèle reste encore l'élément le plus valable pour pallier aux difficultés de représenter en parfaite similitude les actions des courants et de la houle, la théorie ne pouvant servir que de guide pour "ajuster" plus rapidement le modèle.

#### D. Echelle des temps sédimentologiques applicable au mouvement des vases

Comme pour les autres échelles des temps sédimentologiques, on écrira que, pour des mêmes actions hydrauliques, reproduites en similitude sur le modèle, l'échelle théorique des temps sédimentologiques est égale au rapport entre l'échelle des volumes et l'échelle des débits.

Or, dans le cas des vases, le volume des dépôts dépendra de leur concentration qui ne sera pas la même en nature et sur le modèle. D'une façon générale, si l'on schématise les vases naturelles par une vase traitée sur le modèle, pour un même poids transporté et déposé, le tassement sera plus faible en modèle qu'en nature et le volume des dépôts en résultant sera plus important (Rapport de 5 à 10 dans certains cas).

De même, il sera possible, dans une certaine mesure, d'augmenter la turbidité des eaux introduites aux limites du modèle, ce qui serait d'ailleurs en accord avec les conditions de débit d'érosion des fonds pour des contraintes de cisaillement en similitude.

L'échelle des temps sédimentologiques sera, dans ces conditions :

$$t \text{ modèle} : T \text{ nature} = (v : V) (\gamma_m : \gamma_N) / (q : Q) (C_m : C_N)$$

Si l'on appelle "v" et "V" les volumes, "q" et "Q" les débits, " $\gamma_m$ " et " $\gamma_N$ " les concentrations des dépôts, "Cm" et "CN" les turbidités respectivement du modèle et de la nature :

$$t \text{ modèle} : T \text{ nature} = (n^{1/2} : m) (CN : Cm) (\gamma_m : \gamma_N)$$

Par exemple, sur un modèle à l'échelle en plan du 1:600 et en hauteur du 1:70 ayant une turbidité de 0,5 g:l en nature et de 2 g:l sur le modèle, la concentration des dépôts pour une même épaisseur à l'échelle des hauteurs atteignant 450 g:l en nature et 100 g:l en modèle, l'échelle des temps sédimentologiques sera de :

$$t_m : T_N = (8,35 : 600) (0,5 : 2) \left(\frac{100}{450}\right) = 1:1\ 300$$

alors que l'échelle des temps hydrauliques serait de 1:140 environ.

#### 5.1.5. CONCLUSIONS

Suivant les problèmes à étudier en modèle réduit, il faudra adopter des échelles de similitude différentes permettant d'obtenir dans la zone intéressée des mouvements sédimentaires comparables à ceux observés en nature.

Certains critères de similitude permettent d'aborder ce problème et de guider dans le choix des échelles ; ils montrent, en contre-partie, qu'une similitude sédimentologique rigoureuse applicable à tous les points d'un modèle et à toutes les actions hydrauliques est impossible.

Avant d'aborder une étude en modèle réduit, il faudra donc bien préciser le problème à étudier et les actions hydrodynamiques et sédimentologiques en présence. On adoptera ensuite des échelles susceptibles de représenter avec fidélité plus spécialement tel type de phénomènes, en conservant à l'esprit qu'un tel modèle ne pourra être utilisé pour étudier d'autres problèmes qu'avec beaucoup de réserve.

Heureusement, on dispose, après plus d'un quart de siècle d'études en modèle réduit, de nombreux exemples d'essais qui ont donné des résultats très satisfaisants pour tel ou tel type d'étude, il est ainsi possible de compléter les critères de similitude pour le choix des échelles par l'expérience acquise dans les différents Laboratoires Français ou Etrangers.

Par ailleurs, la connaissance théorique de l'échelle des temps sédimentologiques d'un modèle maritime a permis d'apporter une amélioration considérable dans les conditions expérimentales.

Cette échelle des temps sédimentologiques sera appliquée aux durées respectives des différentes houles (tempêtes, houles moyennes...)

observées en nature et reproduites sur le modèle réduit. Le "cycle annuel" de houles représenté sur le modèle sera la schématisation de toutes les houles successives en direction, amplitude et période, susceptibles d'être relevées en nature, au cours d'une année moyenne.

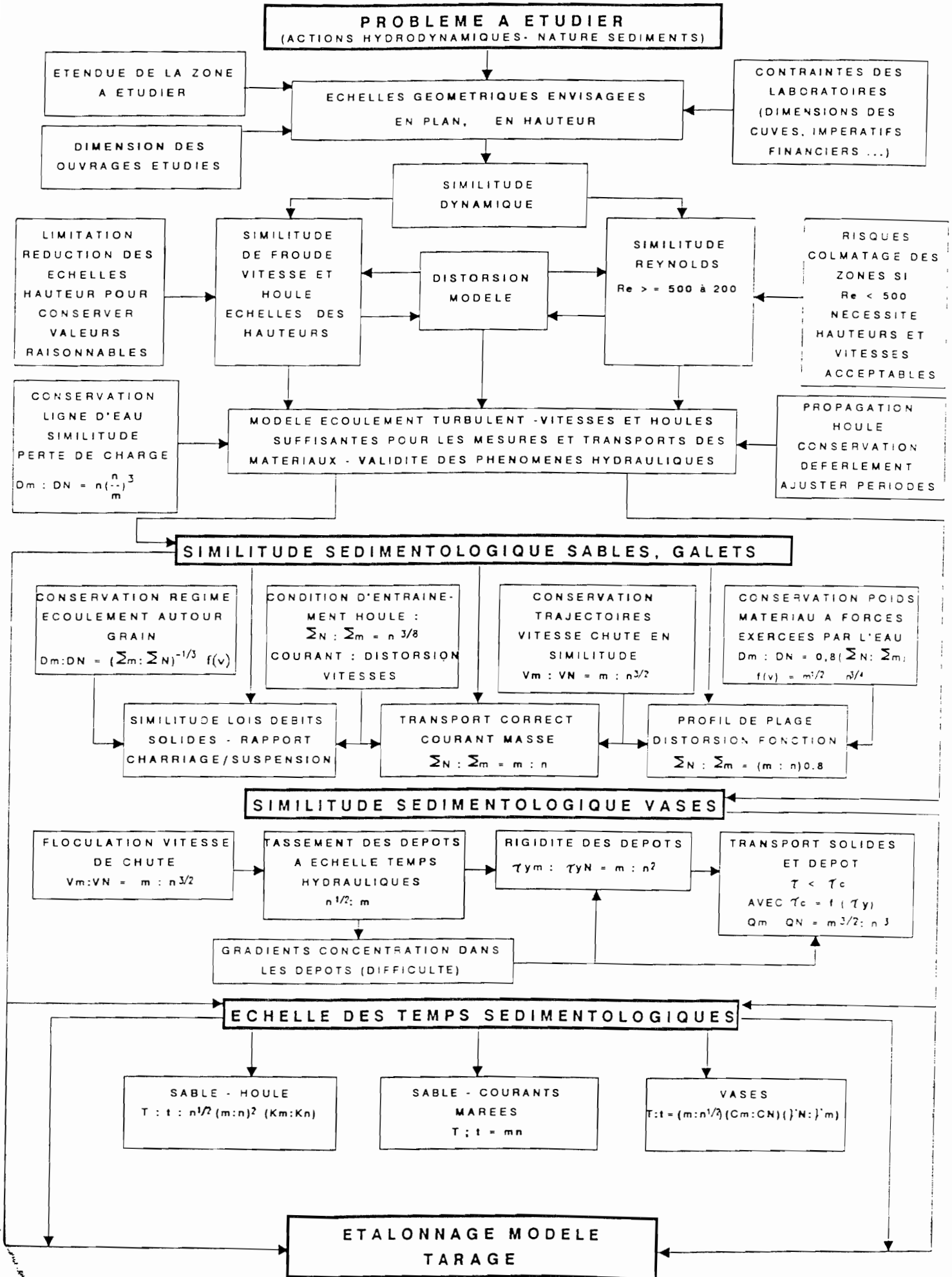
Cette schématisation est un des points les plus délicats des études de transport littoral sur modèle car, dans ce domaine, le phénomène global dépend de l'ordre dans lequel se succèdent les états élémentaires. En appliquant l'échelle théorique des temps sédimentologiques à la durée des différentes houles se succédant en nature, on respectera aussi exactement que possible le déplacement des particules solides le long du littoral, leur départ vers le large sous l'action des tempêtes, leur remontée à la côte par les houles de beau temps et les houles moyennes, les différents transits littoraux qui peuvent s'effectuer alternativement dans un sens ou dans l'autre avec une résultante qui dépendra de l'action des houles dominantes.

Rappelons enfin qu'un modèle réduit doit être considéré comme une vaste machine à calculer qui donne toujours une réponse. Suivant la façon dont il a été conçu, les échelles adoptées et surtout les éléments d'information qu'on lui fournit, il pourra être le collaborateur le plus précieux, permettant de prévoir l'avenir ou, au contraire, conduire à des résultats erronés.

Dans tous les cas, un modèle sédimentologique doit être conçu en le basant sur des connaissances aussi précises que possible des phénomènes hydrauliques : houle, vent, courant... et des propriétés physiques des sédiments naturels et de leur comportement sous les actions hydrauliques. On pourra, ensuite, établir un modèle réduit physique valable qui répondra avec toute la précision désirable au problème pour lequel il a été conçu. Un tel modèle permettra, par ailleurs, de détecter éventuellement des phénomènes mal connus en nature, de raisonner sur un ensemble d'actions hydrauliques et sédimentologiques réduites à une échelle humaine pouvant facilement être visualisée et de faire avancer progressivement nos connaissances générales sur les phénomènes sédimentaires en utilisant la somme des connaissances acquises à l'occasion de chaque étude particulière.

La Figure 23 donne un schéma des lois de similitude à appliquer sur un modèle réduit sédimentologique et le tableau suivant les valeurs de ces échelles pour un modèle distordu et non distordu.

# RECHERCHE DES LOIS DE SIMILITUDE APPLICABLES A UN MODELE SEDIMENTOLOGIQUE



ECHELLES DE SIMILITUDE DES MODELES

SIMILITUDE	GRANDEURS CARACTERISTIQUES	SYMBOLE	MODELE NON DISTORDU	MODELE DISTORDU
Géométrique	Longueur - largeur Hauteur Distorsion Surface horizontale Surface verticale Volume	1/L 1/d $\Delta = L/d$ 1/S 1/S' 1/Vol	1/m 1/m 1 1/m <sup>2</sup> 1/m <sup>2</sup> 1/m <sup>3</sup>	1/m 1/n m/n 1/m <sup>2</sup> 1/mn 1/m <sup>2</sup> n
Dynamique (Froude - Reynolds)	Vitesse horizontale Vitesse verticale Temps hydraulique Débit liquide Ecoulement turbulent  Perte de charge Ch Coefficient Chezy Contrainte sur le fond Vitesse de frottement u*	1/V 1/V' 1/t 1/q $Re = \frac{Vd}{\nu}$  Cm/CN  1/τ <sub>o</sub> 1/u*	1/m <sup>1/2</sup> 1/m <sup>1/2</sup> 1/m <sup>1/2</sup> 1/m <sup>5/2</sup>  1 1 1/m 1/m <sup>1/2</sup>	1/n <sup>1/2</sup> m/n <sup>3/2</sup> n <sup>1/2</sup> /m 1/mn <sup>3/2</sup>  (n/m) <sup>1/2</sup>  m/n <sup>2</sup> m <sup>1/2</sup> /n
Sédimentolo- gique Sable	Rugosité fond - Chezy (diamèt. des matériaux D) Conservation même régime écoulement Densité apparente matériau Vitesse chute des grains W Coefficient de Strickler K	Dm/DN Dm/DN  Σm/ΣN Wm/WN Km/KN	- -  - 1/m <sup>1/2</sup> -	n (n/m) <sup>3</sup> (Σm/ΣN) <sup>-1/3</sup> (νm/νN) <sup>-2/3</sup> 1/n <sup>3/8</sup> m/n <sup>3/2</sup> n <sup>2/3</sup> /m <sup>1/2</sup>
Sédimentolo- gique Vase	Vitesse chute flocons (se rapproche de WM = WN) d'où : Temps tassement = temps hydraulique Rigidité initiale	Wm/WN  $\Delta = L/d$  1/t 1/τy	1/m <sup>1/2</sup>  -  1/m <sup>1/2</sup> 1/m	m/n <sup>3/2</sup>  m <sup>1/3</sup>  n <sup>1/2</sup> /m m/n <sup>2</sup>
Echelle temps sédimentolo- gique	Transport sable par houle Transport sable par courant Transport vase (γ = con- centration dépôt, C = turbidité)	1/t"  1/t" 1/t"	-  - -	1 n <sup>1/2</sup> (m:n) <sup>2</sup> (Km:KN) 1/mn 1 (m/n <sup>1/2</sup> ) (Cm/CN) (νN/νm)

5.2. L'ETALONNAGE DES MODELES REDUITS PHYSIQUES -  
LE TARAGE ET LES ORDRES DE GRANDEUR DES ECHELLES  
ADOPTES

5.2.1. ETALONNAGE DES MODELES REDUITS PHYSIQUES - LE TARAGE

La connaissance des lois de similitude applicables aux études à l'aide de modèles réduits physiques sédimentologiques permet de fixer les échelles du modèle, en acceptant certains compromis dans les phénomènes à représenter, et en éliminant systématiquement des réductions géométriques qui conduiraient à des résultats inacceptables ou à des risques d'erreurs que l'on ne pourrait maîtriser.

Il n'en reste pas moins que devant la complexité des phénomènes hydrauliques et sédimentologiques à représenter, et des interactions qu'ils peuvent avoir entre eux, il n'existe pas une similitude rigoureuse permettant de représenter fidèlement tous les facteurs qui sont à prendre en considération. Les échelles devront donc être choisies en donnant une priorité aux problèmes hydrosédimentaires qui apparaissent comme prépondérants pour les études envisagées et en négligeant les autres tout en essayant de fixer les incertitudes qui peuvent en résulter.

C'est ainsi, par exemple, que dans l'étude des risques d'ensablement d'une installation portuaire - qui nécessite d'utiliser un modèle distordu - on donnera une priorité à la représentation correcte des mouvements sédimentaires sous la houle, associée ou non aux courants, mais que l'on négligera la précision dans les phénomènes d'agitation à l'intérieur du bassin portuaire qui ne seront étudiés que qualitativement. De même si les ouvrages de protection sont bien représentés pour assurer des coefficients de réflexion et des franchissements corrects, compte tenu de la distorsion, phénomènes qui agissent sur les transports sédimentaires, l'étude de leur stabilité sera négligée car n'étant pas adapté aux échelles choisies.

Par ailleurs, il sera difficile au cours d'une étude sédimentologique de représenter systématiquement tous les phénomènes hydrauliques avec leur succession dans le temps, telle que durée exacte des tempêtes et variation des hauteurs des houles au cours de l'année, cycles de marées, fluctuations des débits fluviaux... on sera amené à simplifier les phénomènes en les regroupant pour avoir une schématisation représentative de l'ensemble des actions hydrauliques sans entrer dans des complications hors de proportion avec le bénéfice que l'on peut en tirer pour la validité des résultats.

Ces compromis dans la représentation de tous les phénomènes sédimentologiques et les simplifications dans la représentation des phénomènes hydrauliques et océanographiques nécessitent de s'entourer de précautions et de vérifier la validité du modèle dans la représentation des phénomènes connus en Nature. Il s'agit là de "l'étalonnage du modèle" phase indispensable pour d'une part contrôler la fidélité du modèle,



d'autre part préciser les facteurs les plus importants qui sont à prendre en considération dans l'étude.

Ce "tarage du modèle" consistera tout d'abord à vérifier que les phénomènes hydrauliques qui interviennent dans les mouvements sédimentaires sont bien représentés et que le "cycle" des houles et des courants correspond bien aux différentes actions océanographiques et hydrauliques qui se succèdent en Nature avec des durées moyennes d'action aux échelles sédimentologiques des temps du modèle.

On devra également s'assurer que les conditions aux limites du modèle soient suffisamment étendues pour qu'elles n'apportent pas de perturbations dans la "zone active" du modèle où l'on introduira les sédiments. Pour les houles en particulier, on tiendra compte des risques d'expansion latérale des houles en extrémité des générateurs avec les déperditions d'énergie que cela comporte et dont la répercussion sur le littoral se traduirait par des transits imparfaits. Des mesures des caractéristiques des houles tout le long de la côte permettront de vérifier la validité de la propagation des énergies des houles et, éventuellement de les corriger.

Sur le plan sédimentologique on devra s'assurer que les successions des phénomènes hydrauliques et océanographiques dans le temps conduisent bien aux mêmes évolutions des fonds autour d'un profil d'équilibre moyen avec des érosions des plages en tempête et un comblement des petits fonds, suivi pour des houles plus faibles d'une remontée des matériaux sur la côte. De même on vérifiera que le transit littoral parallèle à la côte correspond bien aux mesures faites en Nature ou, tout au moins, aux prévisions que l'on peut faire sur ce phénomène.

L'étude de l'évolution des fonds, sur une période déterminée, et après réalisation d'un aménagement, offrira un élément très valable pour l'étalonnage du modèle en s'assurant que l'on obtient bien, sous l'action des mêmes phénomènes hydrauliques, des variations comparables sur le modèle et en Nature. On pourra ainsi préciser l'échelle de temps sédimentologiques qui avait été présumée par les approches théoriques de la similitude.

Dans les cas plus difficiles où l'action des courants se superposerait à celle de la houle (embouchure d'un estuaire, d'un havre...) l'étalonnage deviendra indispensable pour vérifier que la distorsion appliquée aux échelles de Froude pour les courants - ou une augmentation de leur durée d'action - n'entraîne pas de perturbations dans l'évolution des fonds.

Enfin la vérification de la bonne reproduction des triages granulométriques des sédiments sur le modèle apportera une certitude sur les conditions de transports et de remaniements sédimentaires en suspension et en charriage. Si sur un modèle réduit physique sédimentologique on constate que, pour des conditions hydrauliques homologues, on obtient les mêmes évolutions des fonds et les mêmes triages granulométriques qu'en Nature, on pourra affirmer que le modèle est en parfaite similitude.

A l'issue de ce tarage du modèle sédimentologique, les phénomènes susceptibles d'être représentés avec fidélité devront être bien définis ainsi que ceux ne donnant que des résultats qualitatifs ou ne pouvant être étudiés avec les échelles adoptées.

Cette phase des études d'étalonnage est primordiale pour l'ensemble des recherches envisagées à l'aide des modèles réduits physiques sédimentologiques même si les connaissances que l'on a pu acquérir depuis plusieurs années sur ces modèles permettent d'être très optimiste dans les résultats escomptés.

### 5.2.2. ORDRES DE GRANDEUR DES ECHELLES ADOPTEES

L'application des lois de similitude permet d'établir les rapports entre les dimensions géométriques, dynamiques et sédimentologiques d'un modèle. Elle permet également de guider le choix des échelles à adopter et de rejeter des échelles géométriques qui sortiraient des impératifs théoriques.

En pratique il faut toutefois admettre que les échelles que l'on se fixe sur un modèle (échelles géométriques) sont liées à l'expérience acquise par les laboratoires et la validité des résultats obtenus [25].

A titre indicatif, nous donnons ci-après les ordres de grandeur des échelles géométriques en plan à adopter sur des modèles réduits physiques ainsi que des estimations de leur durée d'exploitation et des prix de revient.

- modèle d'agitation (houle) 1/75 à 1/150 sans distorsion  
Durée : 3 à 4 mois  
Prix : 400 000 à 800 000 F
- modèle de stabilité d'ouvrage (en canal) 1/20 à 1/60 sans distorsion  
Durée : 1,0 à 3 mois  
Prix : 200 000 à 400 000 F
- modèle de stabilité en cuve (3 dimensions) 1/50 à 1/90 sans distorsion  
(correction coef. perméabilité dans sous couche)  
Durée : 3 à 6 mois  
Prix : 500 000 à 1 000 000 F
- modèle fluvial d'un ensemble géographique [31] 1/100 à 1/200 - Distorsion 1,5 à 2  
Durée : 3 à 8 mois  
Prix : 500 000 à 1 000 000 F

-----  
[31] Aménagements fluviaux - Essais sur modèles réduits de 1988-1989 -  
Spécifications et coûts - D.F.R. SOGREAH - Juin 1989.

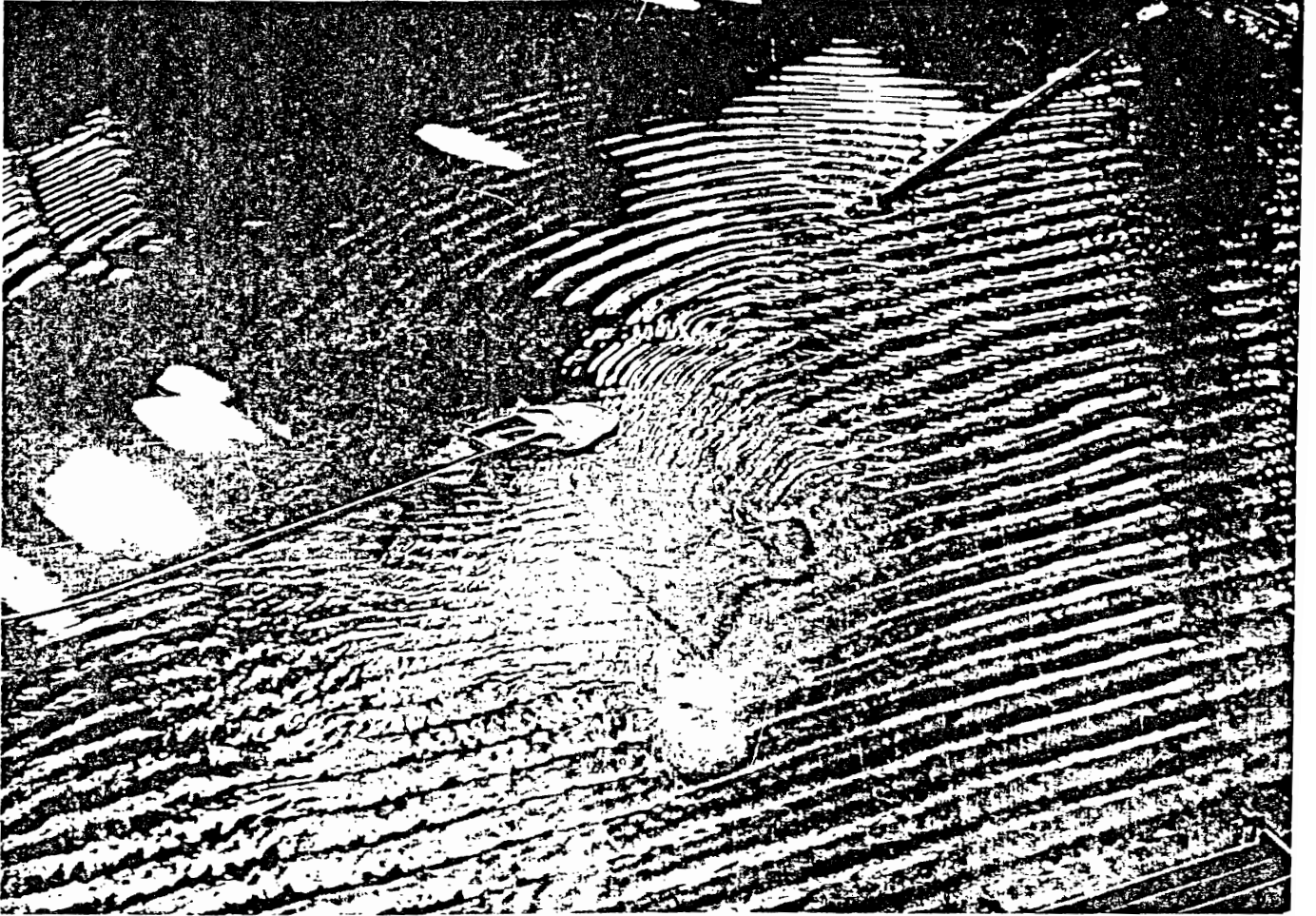
- |  |   |
|--|---|
| - modèle fluvial d'une section de rivière                        | 1/50 à 1/100 - Faible distorsion<br>Durée : 2 à 4 mois<br>Prix : 500 000 à 700 000 F  |
| - modèle fluvial d'un petit aménagement                          | 1/20 à 1/70 - Sans distorsion<br>Durée : 1 à 3 mois<br>Prix : 150 000 à 500 000 F   |
| - modèle de barrage  | 1/50 à 1/150 - Sans distorsion<br>Durée : 3 à 6 mois<br>Prix : 500 000 à 1 000 000 F  |
| - modèle maritime sédimentologique d'aménagement portuaire       | 1/150 à 1/300 - Distorsion 2 à 3<br>Durée 6 à 15 mois<br>Prix : 1 000 000 à 2 500 000 F   |
| - modèle sédimentologique de défense du littoral                 | 1/100 à 1/200 - Distorsion 1,5 à 2,5<br>Durée : 4 à 8 mois<br>Prix : 800 000 à 1 500 000 F  |
| - modèle d'estuaire de sable avec représentation de l'embouchure | 1/200 à 1/400 - Distorsion 3 à 4<br>Durée : 7 à 12 mois<br>Prix : 1 500 000 à 2 500 000 F   |
| - modèle d'estuaire de vase sur une grande superficie            | 1/400 à 1/1000 Distorsion $m^{1/3}$ (7 à 10)<br>Durée : 12 à 18 mois<br>Prix : 1 800 000 à 3 000 000 F                                      |
| - modèle de site géographique (qualitatif)                       | 1/1000 à 1/2000 - Forte distorsion entre $m^{3/11}$ (Blasius) et $m^{1/2}$ (Lacey)<br>Durée : 6 à 12 mois<br>Prix : 1 000 000 à 2 000 000 F |

### 5.2.3. METHODOLOGIE DES ETUDES SUR MODELES REDUITS

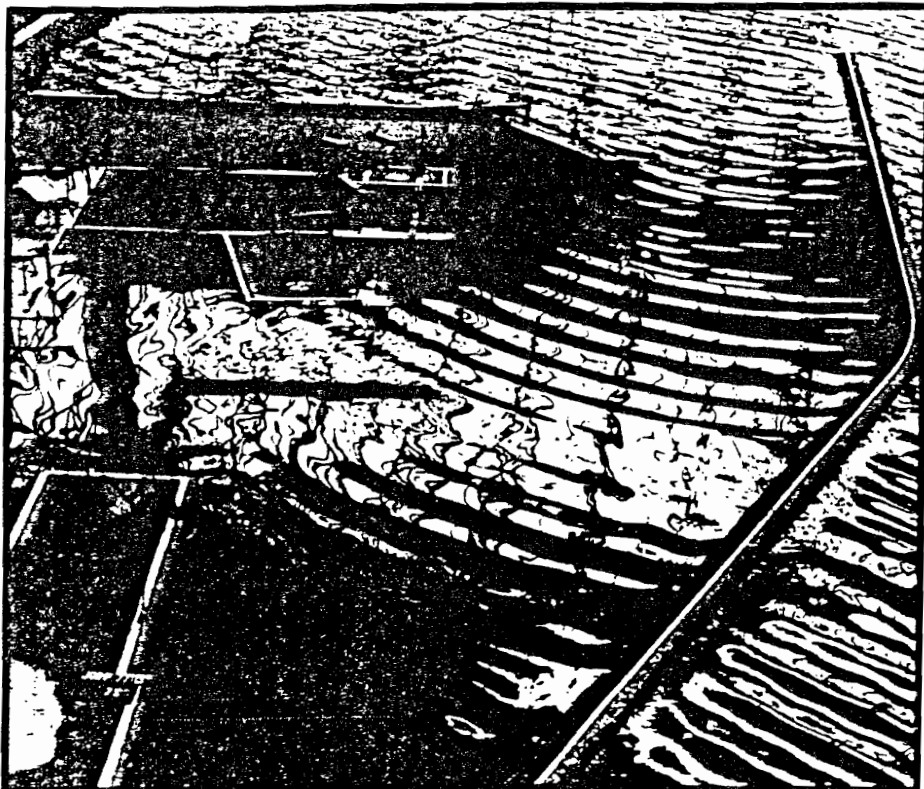
Suivant les problèmes à étudier, les échelles adoptées, le nombre de paramètres hydrologiques et océanographiques à prendre en compte et la nature des sédiments constituant les fonds, la méthodologie des essais pourra être sensiblement différente.

#### 5.2.3.1. Modèles d'agitation et de seiches

Il faudra, pour que ces modèles soient valables, que l'on puisse tout d'abord mesurer d'une façon suffisamment précise les fluctuations de niveau à l'intérieur du plan d'eau (photographie 16). On devra par exemple déceler une amplitude résiduelle équivalente à 0,05 m en Nature soit pour un modèle au 1/100 : 0,5 mm, ce qui reste acceptable avec les appareils enregistreurs actuels, couplés ou non sur ordinateur. Pour des échelles supérieures (1/200 par exemple) on devra prendre de grandes précautions pour éliminer les phénomènes de tension superficielle parasite (poussières).



Port de Cherbourg



Port de Jorf-Lasfar (Maroc)

On vérifiera également que l'amortissement des houles sur le modèle, par suite des frottements et des tensions superficielles, reste comparable aux valeurs admises en Nature ce qui élimine des échelles de réduction trop importantes de dimensions géométriques.

Les mesures pourront être réalisées soit en direction fixe du générateur de houle, en faisant varier la période et la hauteur moyennes par paliers, soit en étudiant les variations de l'agitation pour une période et une hauteur constante des houles mais avec une variation lente et progressive des directions ce qui permet de déceler les directions critiques pour l'agitation d'un bassin ou devant un quai.

De même la représentation des houles en trains d'ondes ou d'une façon aléatoire avec une loi de répartition des vagues comparable à la nature, permet d'avoir des résultats beaucoup plus proches de ceux que l'on aura en Nature et de mettre en évidence les seiches associées à l'agitation.

Pour l'étude des seiches on effectuera les essais en faisant varier lentement et d'une façon continue la période moyenne des vagues des trains d'ondes afin de mettre en évidence les périodes de résonance des bassins. Dans le cas des seiches le modèle pourra être distordu (alors que pour l'agitation proprement dite il y a intérêt de ne pas distordre le modèle ou d'adopter une échelle fonctionnelle permettant de corriger les effets de diffraction, tout en limitant la distorsion à des valeurs inférieures à 1,5).

Les essais d'agitation pourront être complétés en étudiant les mouvements des bateaux amarrés le long des quais (tangage, roulis, pilonnement. ..) apportant des éléments supplémentaires pour définir les possibilités de chargement/déchargement et éventuellement les efforts sur les amarres.

L'ensemble des mesures d'agitation sera interprété en tenant compte des types de bateaux qui fréquentent le port et des études statistiques des houles du large. On pourra, de cette façon, préciser les risques exacts de voir le quai inutilisé quelques jours par an ou au contraire être toujours utilisable.

Les résultats seront présentés sous forme de tableaux et graphiques donnant l'agitation résiduelle devant les quais et le long de certains axes privilégiés (chenal, passe entrée, centre du port, bassin d'évitage. ..).

#### 5.2.3.2. Modèles sédimentologiques

De tels modèles qui sont, dans l'état actuel de nos connaissances, les seuls valables pour prévoir l'influence d'ouvrages sur les évolutions des fonds - soit avec des sédiments grossiers du type galets, graviers ou sables, soit avec des sédiments très fins du type vases ou limons - ne se traiteront pas rigoureusement de la même façon suivant que l'on

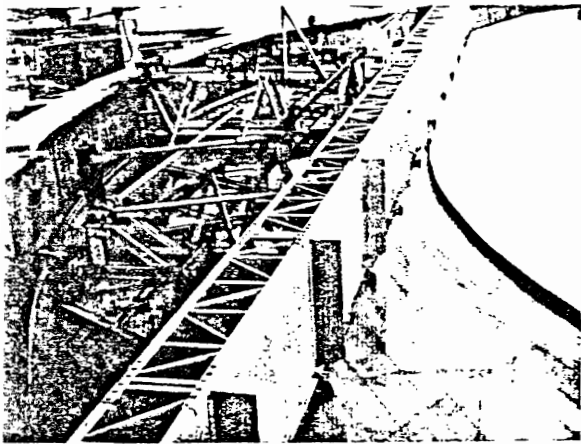
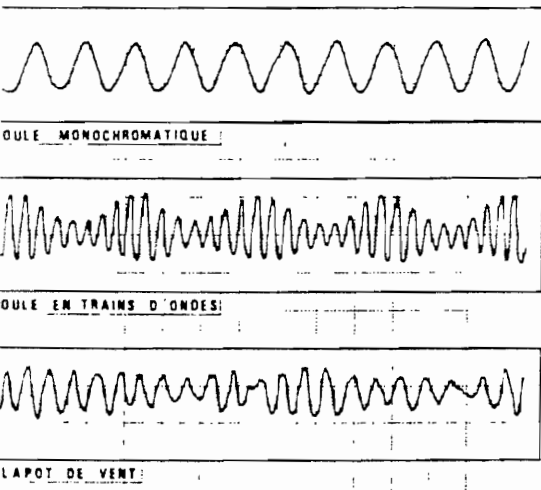
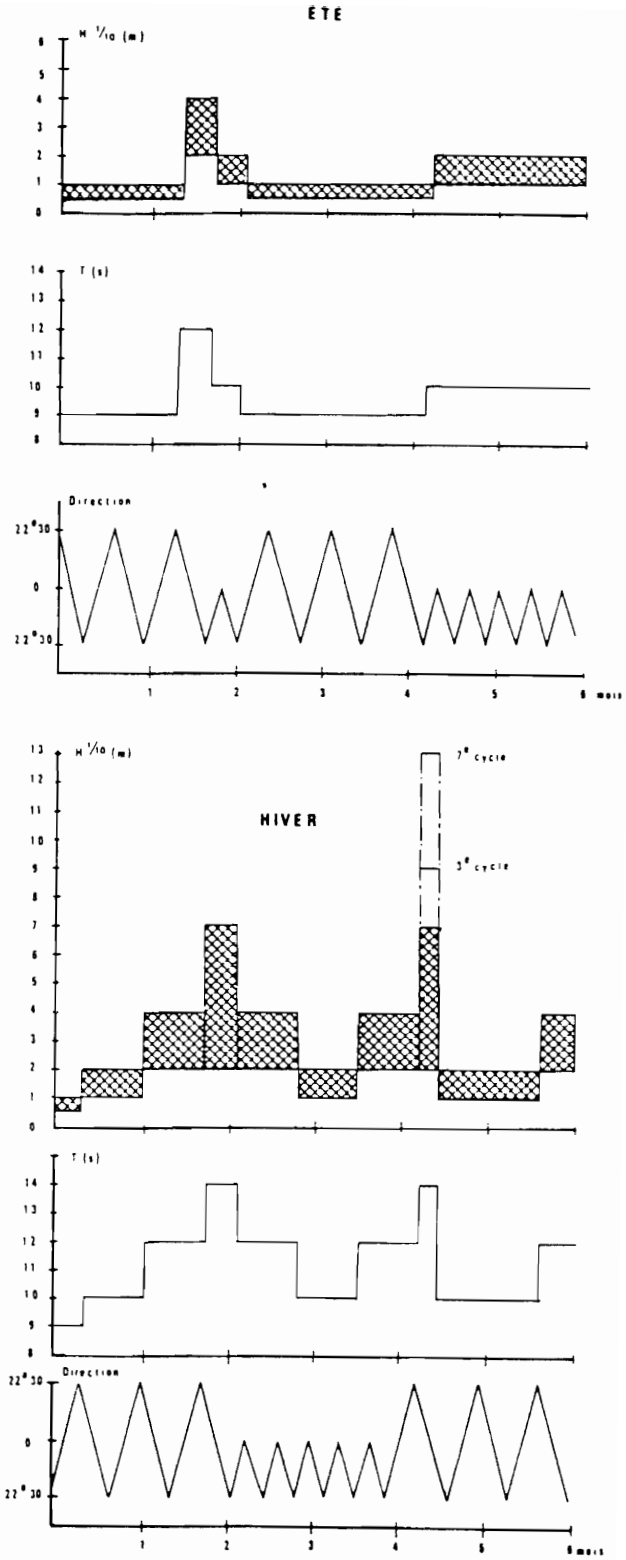


Figure 5 – Générateur de houle pivotant



– Différents types de houles représentés en modèle



– Cycle de houle reproduit en modèle sur une longue période.

examine un secteur où la houle est dominante, où elle s'associe aux courants de marée, où l'on se situe en estuaire, etc...

a) Modèles sédimentologiques de sable où la houle est dominante

Si les fonds sont constitués de sables, on aura intérêt de choisir des échelles en plan comprises entre le 1/150 et le 1/300 avec une distorsion des hauteurs de 2,3 à 2,5 permettant de respecter les profils de plage et la répartition des mouvements sédimentaires aux différentes profondeurs. Dans ce cas, les matériaux artificiels auront une densité comprise entre 1,35 et 1,40.

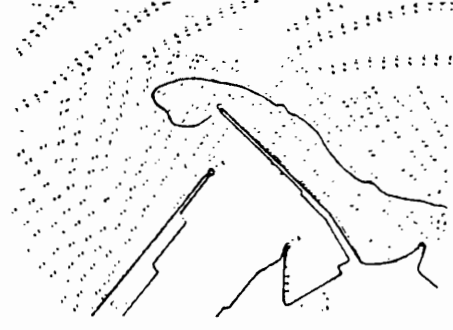
Pour que les phénomènes sédimentologiques soient convenablement représentés, il est indispensable de reproduire sur le modèle :

- des houles en trains d'ondes (ou des houles aléatoires) ayant une répartition des hauteurs dans le train respectant la loi de probabilité en Nature (*Figure 24*),
- la succession des directions, hauteurs, périodes que l'on constate en Nature, avec les périodes de tempêtes répétitives mais de courte durée, les périodes de houles moyennes et de beau temps... La durée propre de chaque type de houle sera calculée à partir de l'échelle des temps sédimentologiques et le "cycle annuel" comportera toutes les successions des phénomènes naturels. Une action cumulée des phénomènes qui s'éloignerait trop des successions constatées en Nature ne permettrait pas d'obtenir des résultats sédimentologiques acceptables,
- la répartition granulométrique des matériaux du modèle conformément (aux échelles de similitude) aux sédiments naturels. Le modèle devra en particulier reproduire les triages granulométriques, critère de la fidélité du modèle et du respect des pourcentages des sédiments transportés en charriage et en suspension,
- l'échelle des temps sédimentologiques théoriques pour la durée de chaque phénomène,
- le coefficient de réflexion des ouvrages maritimes (on corrigera l'effet de distorsion en agissant sur le coefficient intrinsèque de réflexion),
- les fluctuations de niveau de l'eau sous les effets de la marée et des phénomènes météorologiques. Pour assurer une meilleure répartition des houles aux différents niveaux une distorsion de l'échelle des marées aura intérêt à être faite (marée plus courte) en s'assurant que cette distorsion n'est pas créatrice de courants parasites.

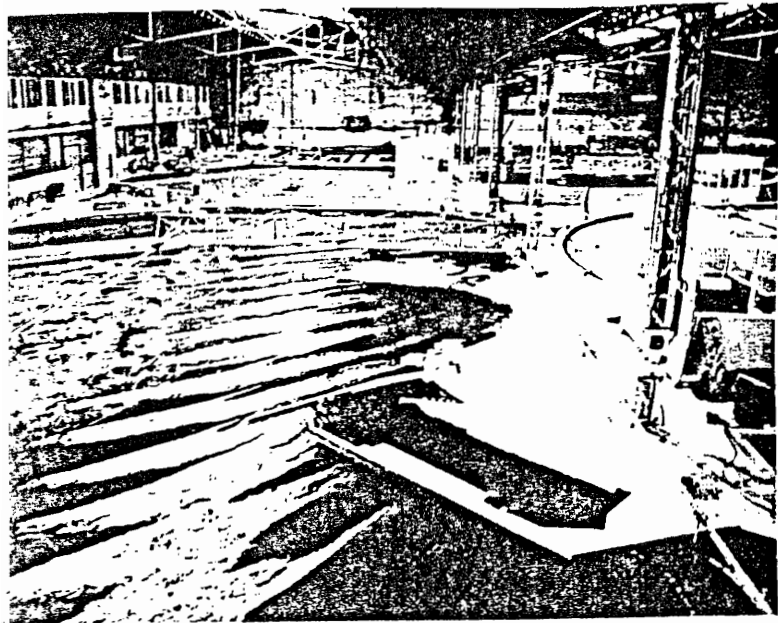
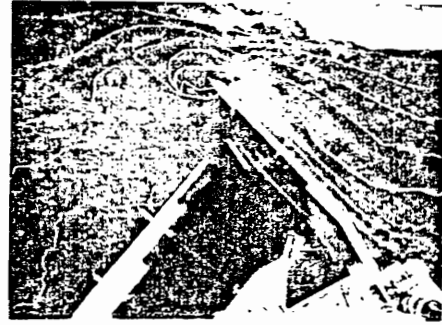


# FORMATION DES FLECHES

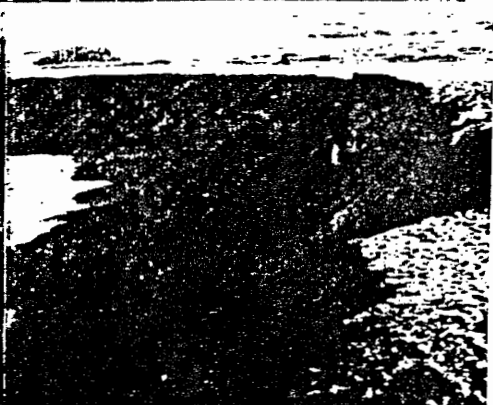
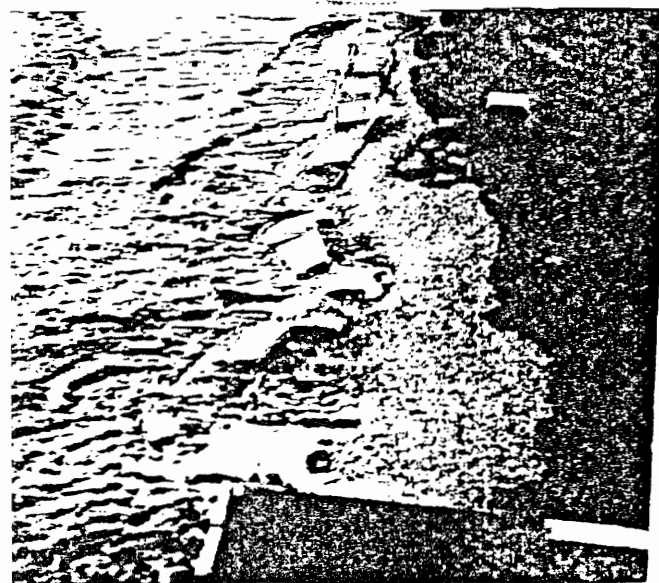
NATURE



MODELE



# PROTECTION DU LITTORAL D'ANGLET

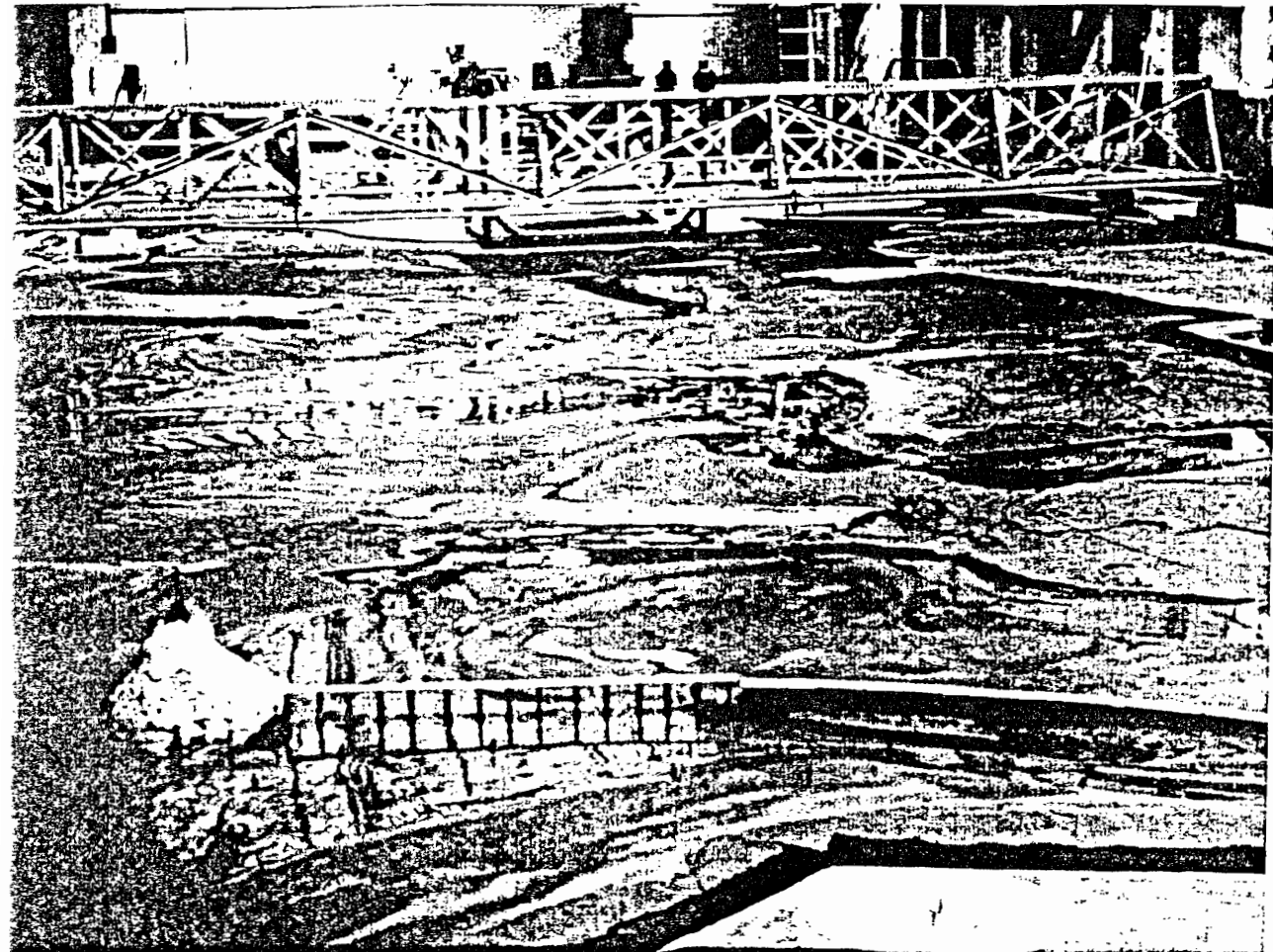




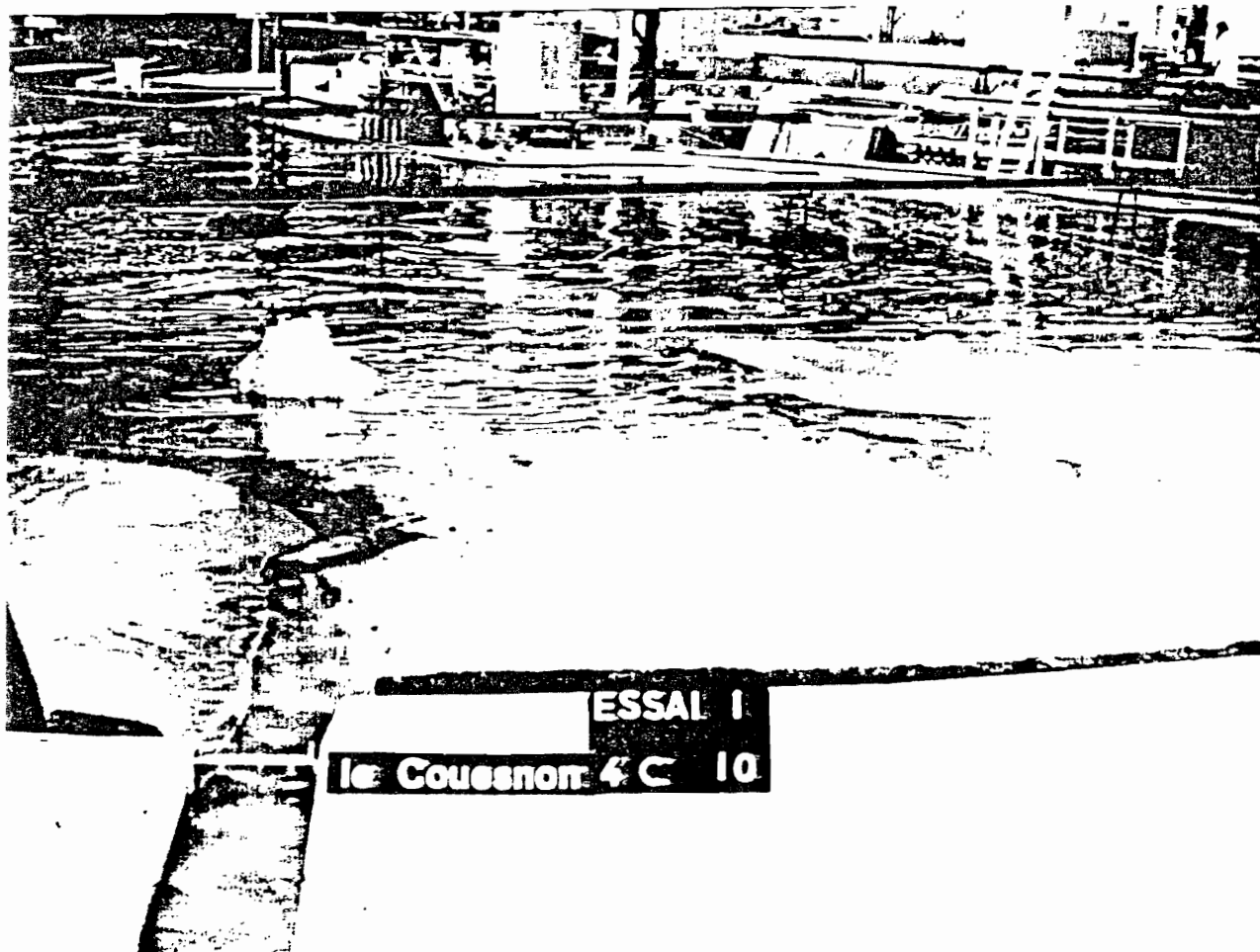
On dispose actuellement de comparaisons très fines entre les prévisions de tels modèles et les réalisations faites en Nature apportant la preuve que de tels modèles sont parfaitement fiables aussi bien pour les études de ports en eau profonde, de ports de pêche, de prises d'eau ou de défense du littoral et d'extractions d'agrégats (photographie 17).

A titre indicatif, nous donnons ci-après quelques caractéristiques de modèles sédimentologiques maritimes avec houle dominante.

SITES	DATES	ECHELLES		MATERIAUX		OBJECTIFS
		M	N	NATURE MM	MODELE MM	
PORT DE SAFI	1950	175	100	SABLE 0,5	POLLOPAS 0,7	PROTECTION CONTRE ENSABLEMENT
PORT D'ASHOOD	1957	300	100	SABLE 0,25	BAKELITE 0,40	PROTECTION CONTRE ENSABLEMENT
COTE ANGLET (P.A.)	1975	200	75	SABLE MADRAGUE	BAKELITE SABLE 1 MM	PROTECTION CONTRE EROSION
PORT D'AGADIR	1976	250	125	SABLE 0,15	BAKELITE 0,30	ENSABLEMENT PASSE D'ENTREE ET EROSION PLAGE ....
PRISE D'EAU MOHAMMEDIA	1977	175	75	SABLE 0,24	BAKELITE 0,40	PROTECTION CONTRE ENSABLEMENT
SOUSSE	1978	175	75	SABLE 0,125 + ALGUES	BAKELITE 0,21 + FIBRE PLASTIQUE	PROTECTION CONTRE ENSABLEMENT ET ALGUES
COTES BASQUES	1978	150	70	SABLE 0,14 MADRAGUE	BAKELITE 0,22 SABLE 0,50	PLAGE ARTIFICIELLE
LAAYOUNE	1979	200	100	SABLE 0,10	PLASTIQUE 1,55 0,5	ETUDE EVOLUTION PLAGE
SIDI IFNI	1979	200	80	SABLE 0,21	BAKELITE 0,36	ENSABLEMENT PORT
BENISAF	1980	175	80	SABLE 0,42	BAKELITE 0,71	FLECHE SEDIMENTAIRE



Coupure partielle de la digue et aménagement du barrage



Suppression du barrage et de la totalité de la digue d'accès

SITES	DATES	ECHELLES		MATERIAUX		OBJECTIFS
		M	N	NATURE MM	MODELE MM	
PORT POINTE NOIRE	1986	250	125	SABLE 0,25	BAKELITE 0,35	EXTENSION FLECHE SABLEUSE
SAINT DENIS D'OLERON	1987	190	80	SABLE 0,33	BAKELITE 0,50	PROTECTION ENSABLE- MENT
KPEME	1988	300	110	SABLE 0,50	BAKELITE 0,7	PROTECTION LITTORAL
ABIDJAN	1989	300	110	SABLE 0,5	BAKELITE 0,7	PROTECTION LITTORAL ET ENTREE LAGUNE

NOTA Pour les matériaux et sédiments, les diamètres moyens indiqués correspondent à la médiane mais l'on respecte sur les modèles sédimentologiques l'éventail granulométrique réparti sur un site donné.

b) Modèles sédimentologiques où l'action de la marée et notamment des courants de marée est dominante

La houle dans ce cas n'a qu'une action de remise en suspension des sédiments mais n'est pas l'agent principal de transport. C'est le cas, par exemple, du modèle du Mont-Saint-Michel, du Havre de Régneville, du bassin d'Arcachon et, dans une moindre part, des ports de Zeebrugge et de Dunkerque (photographie 18).

Pour concilier les similitudes de transport sous l'action des courants (dominants) et de la houle, on devra :

- choisir une distorsion sensiblement plus importante du modèle (3 à 5),
- représenter en général une plus grande superficie pour avoir de bonnes conditions aux limites et bien reproduire la géométrie des bassins ou des baies (échelles en plan de 1/350 pour Régneville, 1/500 pour le Mont-Saint-Michel, 1/400 pour Zeebrugge...),
- choisir un matériau artificiel sur le modèle sensiblement moins dense que celui adopté pour les houles dominantes (nacre densité 1,25),
- introduire une légère distorsion de Froude pour les courants (10 à 15 %) pour ajuster les conditions de reprise et de transport des matériaux et respecter les échelles des houles c'est-à-dire leurs zones de déferlement. Une distorsion trop forte des

échelles de Froude conduirait à ne plus respecter les lignes d'eau et la propagation des marées.

Le cycle annuel d'essais devra être soigneusement étudié pour que les actions de houle (tempêtes notamment) soient harmonisées avec le cycle de marées et de courants.

Ces modèles, bien que plus délicats que les précédents, ont donné d'excellentes prévisions qui ont pu être vérifiées en Nature. Ils apportent les éléments indispensables pour mieux comprendre les interactions entre les phénomènes naturels et définir des solutions valables.

Comme précédemment, on trouvera ci-après quelques caractéristiques de ces modèles maritimes où les actions des marées s'associent aux actions de la houle.

SITES	DATES	ECHELLES		MATERIAUX		OBJECTIFS
		M	N	NATURE MM	MODELE MM	
DUNKERQUE	1972	400	60	SABLE 0,2	BAKELITE 0,45	ETUDE DES RISQUES D'ENSABLEMENT DU PORT DE DUNKERQUE
ARCACHON	1973	850	150	SABLE 0,3	NACRE (1,22) 0,66	MIGRATION DE LA PASSE NORD
MONT-SAINT-MICHEL	1977	500	70	TANGUE ET SILT < 0,1	NACRE ET POUDRE BOIS	PROTECTION DU SITE CONTRE LA SEDIMENTA- TION
LA COUBRE	1978	450	100	SABLE 0,25	BAKELITE 0,32	FLECHE SABLEUSE IN- TERNE ET PROTECTION BONNE ANSE
ZEEBRUGGE	1981	400	100	SABLE 0,30	NACRE 0,42	ENSABLEMENT DU PORT ET RISQUES D'EROSION AU PIED DES OUVRAGES
REGNEVILLE	1982	350	80	SABLE 0,25	NACRE 0,35	AMENAGEMENT DE L'EN- TREE DU HAVRE - PRO- TECTION DU LITTORAL
CARTERET	1986	150	70	SABLE 0,30	BAKELITE 0,4	PROTECTION CHENAL ACCES CONTRE ENSABLE- MENT
GRAVELINES	1989	250	100	SABLE 0,22	NACRE 0,31	PROTECTION DU PORT CONTRE ENSABLEMENT

### c) Modèles sédimentologiques d'estuaires

Le transport des sédiments s'effectue sous l'action des courants alternatifs dus à la marée avec une influence sur les vitesses résiduelles des débits fluviaux propres aux apports des rivières.

Suivant que les sédiments seront à dominante sableuse ou vaseuse (cas général) on adoptera des échelles et des conditions expérimentales sensiblement différentes.

Pour un estuaire à dominante sableuse avec représentation simultanée du bief fluvio-maritime et de l'embouchure (cas de l'oued Sébou, de l'embouchure de l'Adour, de Koranji, de Carteret...) on devra :

- adopter des échelles en plan comprises entre le 1/150 et le 1/250 et des échelles de hauteurs entre le 1/60 et le 1/75 (distorsion de l'ordre de 3 à 3,5),
- rechercher un matériau artificiel présentant des analogies de transport par rapport aux sables naturels ; respecter en particulier le rapport charriage/suspension,
- adopter une légère distorsion des vitesses (augmentation de 10 à 20 %) en diminuant la durée des marées et en augmentant le débit fluvial,
- ajuster les échelles des temps sédimentologiques du transport par les courants à celles du transport par la houle à l'embouchure (augmentation des durées de crues et du nombre de marées de vives eaux dans le cycle),
- éventuellement chercher à reproduire simultanément les transports de limons (matériaux  $< 40 \mu\text{m}$ ) et de sable,
- obtenir une similitude des triages granulométriques.

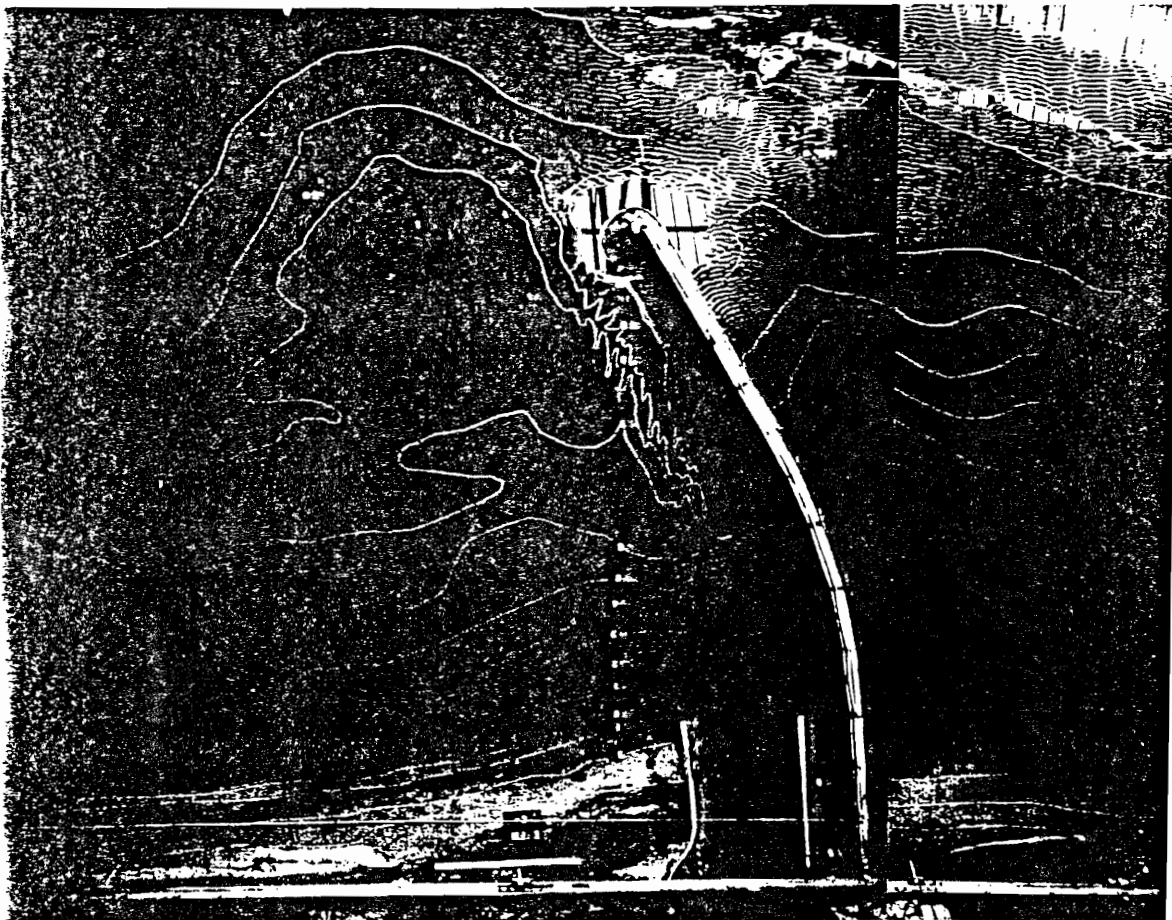
Le réglage d'un tel modèle est très minutieux et la durée de son tarage peut être longue, mais les résultats obtenus sont très proches de ceux qui seront constatés en Nature (photographie 19).

Pour un estuaire à dominante vaseuse comportant uniquement le bief fluvio-maritime (pas d'action de houle), on respectera :

- une distorsion voisine de la racine cubique de l'échelle en plan ce qui permettra d'avoir une zone représentée assez étendue et des vitesses appréciables des courants (vitesse de chute voisine de 1, vitesse horizontale de 1/8 à 1/10),
- les propriétés physiques des vases en similitude (floculation, vitesse de chute, tassement, rhéologie, conditions de reprise par les marées de Vives Eaux et de dépôts en Mortes Eaux...),



Embouchures de l'Adour



Ensemblement du chenal d'accès au cours d'une tempête

- un cycle de marées permettant d'obtenir les dépôts en Mortes Eaux (coef. < 70) et la reprise des dépôts en Vives Eaux (coef. > 80), ainsi qu'un cycle hydrologique avec déplacement du bouchon vaseux vers l'aval en crue et l'amont en étiage. Ce cycle doit être ajusté aux échelles de tassement et de consolidation rhéologique des dépôts et prendre en compte les gradients de concentration,
- une représentation correcte des salinités (échelle 1) avec les fluctuations des mélanges entre les eaux douces et salées. Il faut toutefois remarquer que les déplacements des vases dans l'estuaire, vers l'amont en étiage et vers l'aval en crue, dépendent principalement des vitesses résiduelles de la marée et du débit fluvial, la salinité n'ayant qu'une action secondaire,
- les fluctuations de turbidité dans les différents points du modèle en fonction des caractéristiques des marées et des débits fluviaux,
- les pentes des dépôts sous l'eau.

Des difficultés appréciables peuvent apparaître dans les bras secondaires où le nombre de Reynolds est insuffisant. On aura alors tendance à un colmatage supérieur à celui qui se produira en Nature.

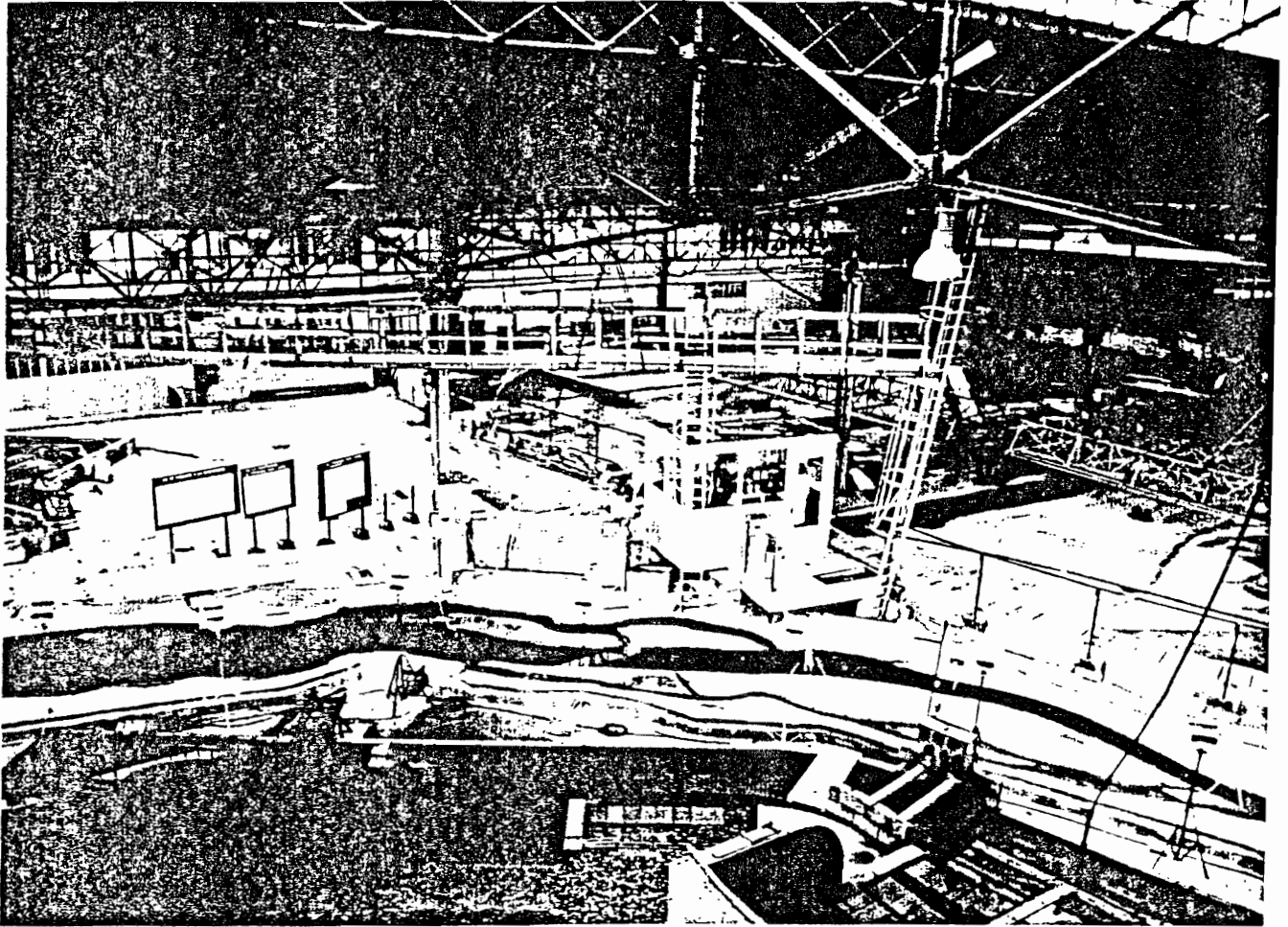
Le réglage est délicat et les mesures longues par suite de l'impossibilité de vider le modèle et de la nécessité de ne pas interrompre le cycle pendant les essais (tassement et blocage des fonds de vase en cas d'arrêt du modèle) (photographie 20).

Le tableau ci-après donne les caractéristiques de quelques estuaires étudiés au L.C.H.F. ou à SOGREAH [32].

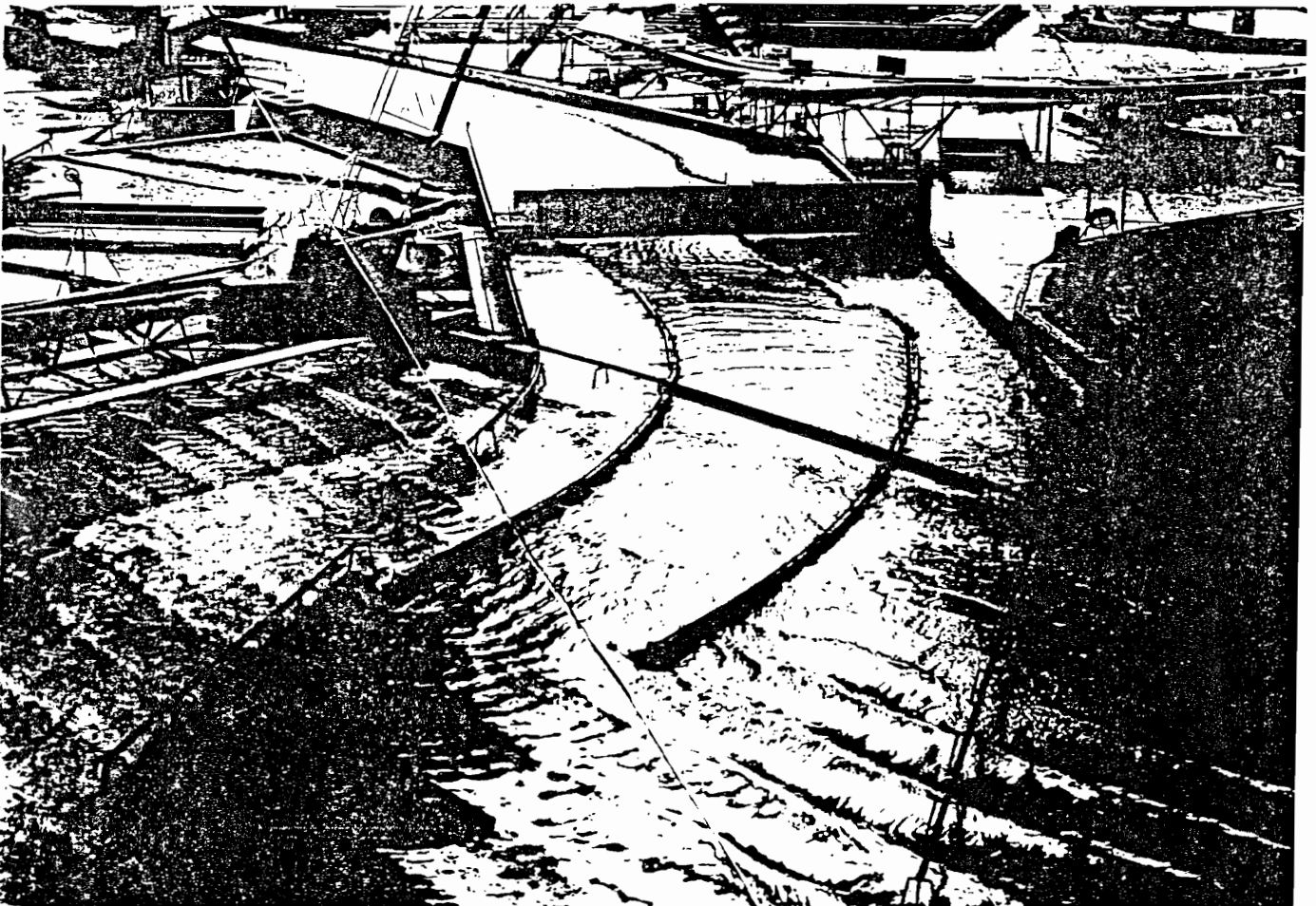
---

[32] Exposé sur les problèmes d'envasements étudiés au L.C.H.F. - C. MIGNIOT - L.C.H.F. - 1984.





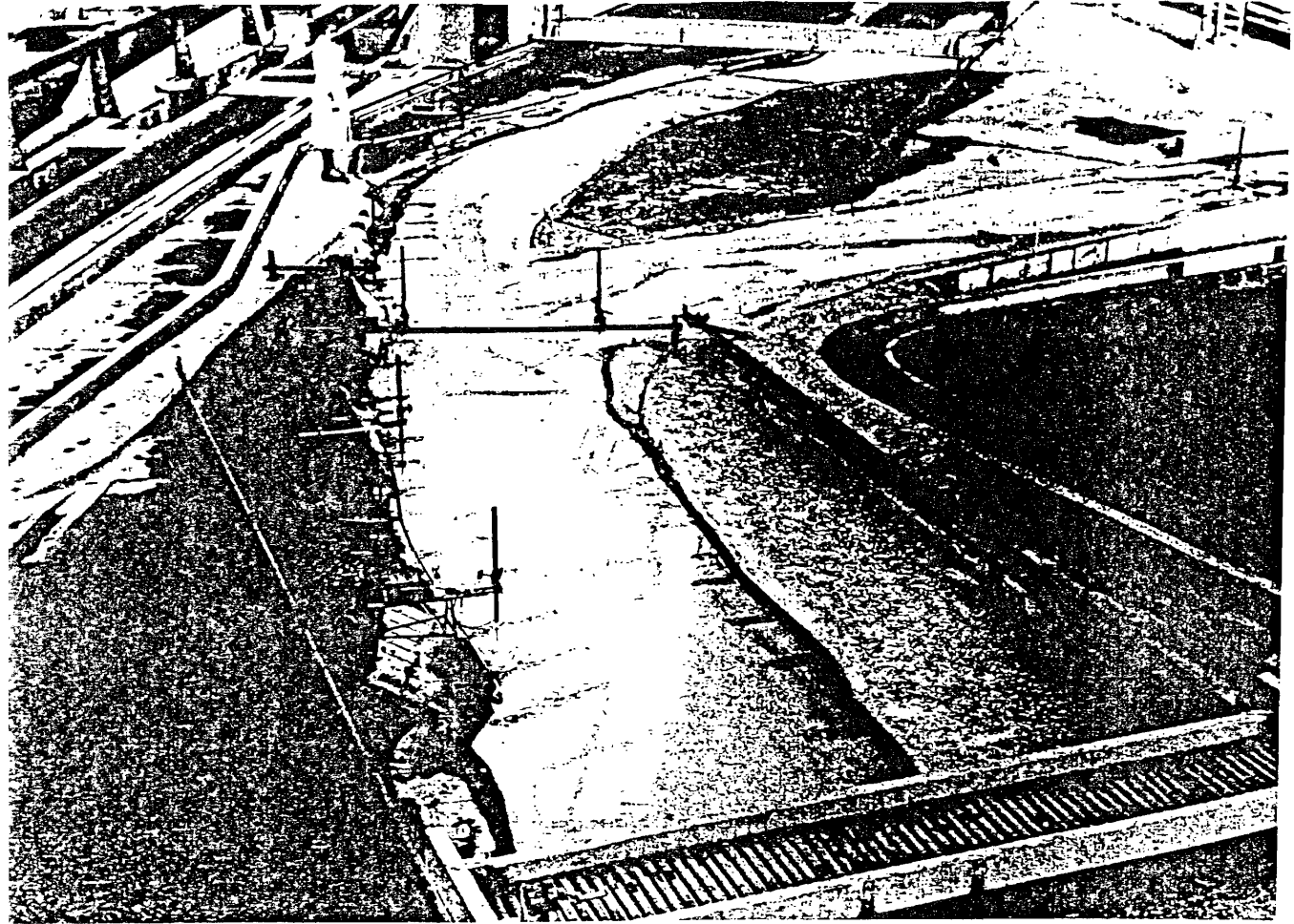
Estuaire de la Loire



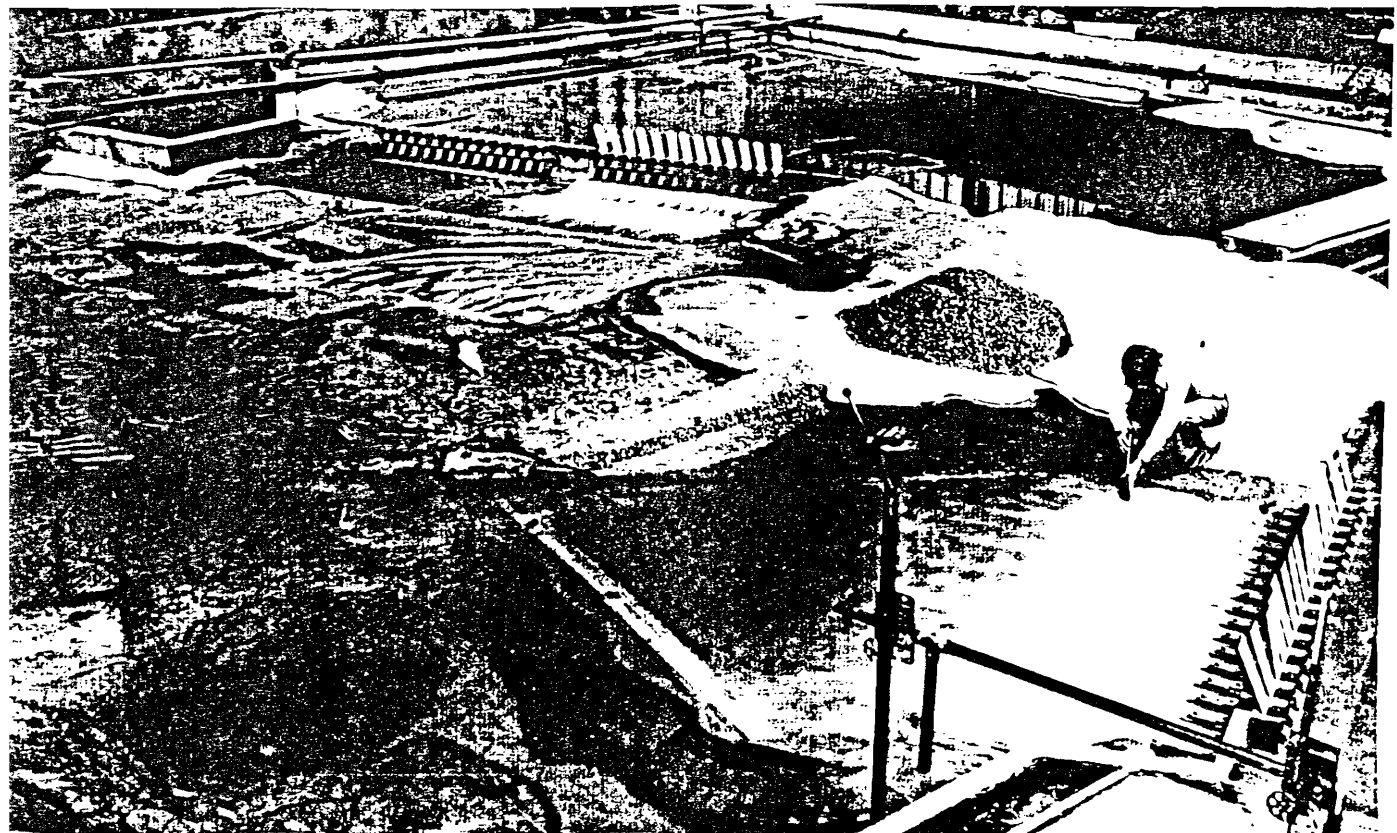
Estuaire de l'oued Sebou (Maroc)



SITES	DATES	EHELLES		MATERIAUX		OBJECTIFS
		M	N	NATURE MM	MODELE MM	
OUED SEBOU	1953	200	75	SABLE ET VASE	POUDRE BAKELITE 0,3	ENSABLEMENT ET ENVA- SEMENT DU CHENAL ET DE L'EMBOUCHURE (AVEC HOULE)
CAYENNE	1956	475	58	VASE	POUDRE BAKELITE	ENVALEMENT DE L'EM- BOUCHURE ET DRAGAGE CHENAL
BOMBETCKA -MAJUNGA	1962	1500	150	VASE	POUDRE BAKELITE 5 m	ETUDE COLMATAGE DE LA BAIE ET DES CHE- NAUX D'ACCES
LA VILAINE	1966	750	100	VASE	VASE TRAITEE	INFLUENCE BARRAGE SUR L'ENVALEMENT EMBOUCHURE
MAHURY	1968	800	80	VASE	VASE TRAITEE	INFLUENCE TRACE CHENAL SUR SON ENVA- SEMENT
KORANJI	1969	200	50	SABLE FIN LIMON	POLYSTYRENE DENS. 1,10	PRISE D'EAU EN ESTUAIRE
EMBOUCHURE DE L'ORNE	1973	300	75	SABLE ET VASE	BAKELITE 0,3 ET POUDRE BAKELITE	ENVALEMENT CHENAL ACCES A CAEN ET PORT DE QUISTREHAM
SEINE	1974	1000	100	SABLE FIN	SCIURE DE BOIS	EVOLUTION DU CHENAL
EMBOUCHURE ADOUR	1975	200	75	SABLE MADRAGUE	BAKELITE ET SABLE	EVOLUTION PROFONDEUR DU CHENAL D'ACCES (AVEC HOULE)
ESTUAIRE LOIRE	1983	1250	140	VASE	VASE TRAITEE	APPROFONDISSEMENT CHENAL A -13,25 M ENVALEMENT-SALINITE REJETS EFFLUENTS...
ESTUAIRE WOURI	1986	600	70	VASE	VASE TRAITEE	APPROFONDISSEMENT CHENAL ACCES AU PORT DE DOUALA
DIVES	1989	120	40	SABLE FIN	NACRE FINE	AMENAGEMENT PORT DE PLAISANCE



Confluent Rhône - Durance



Aménagement du fleuve Zaïre à Grand Inga

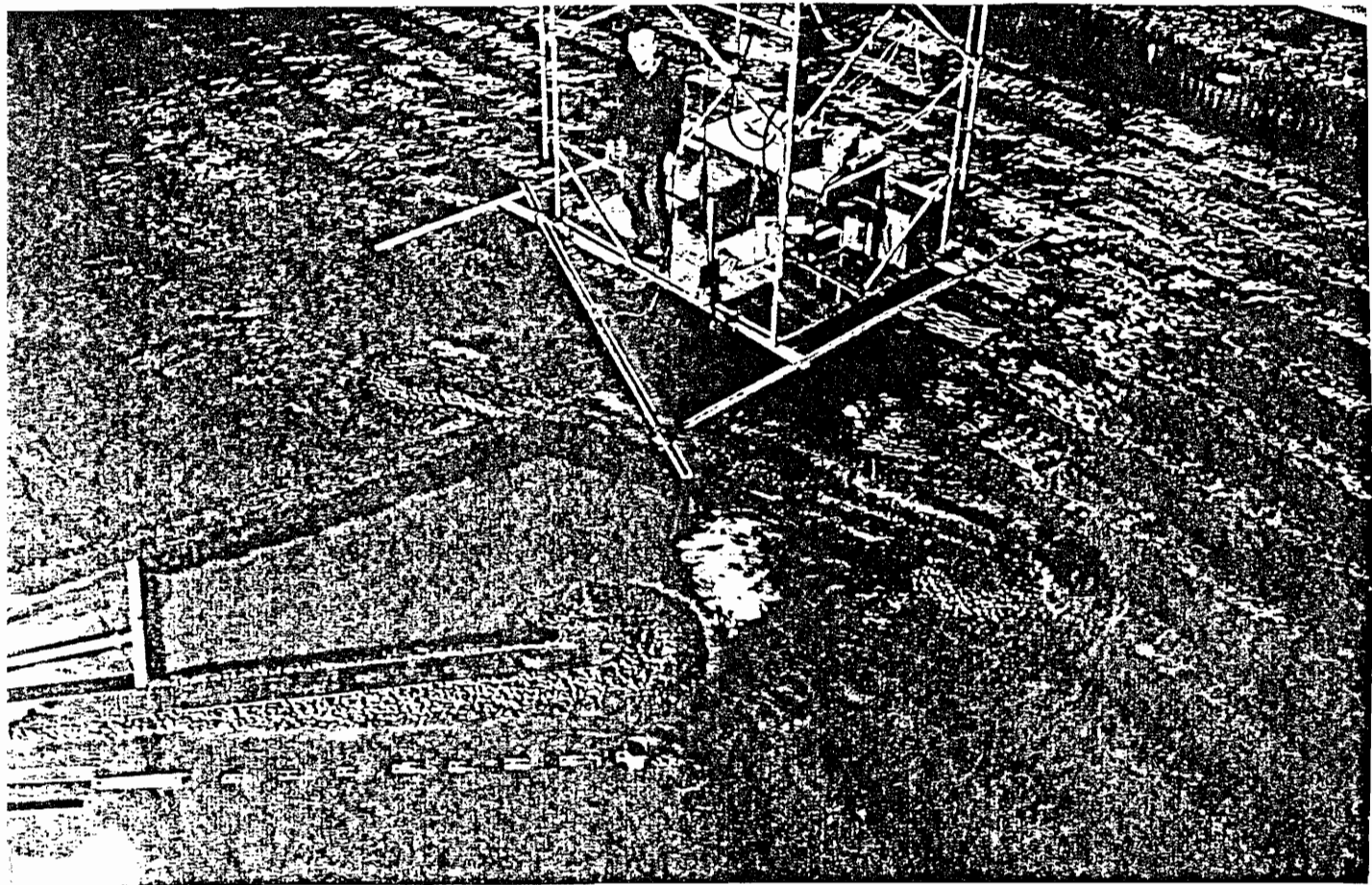
d) Modèles fluviaux

Bien que les phénomènes soient plus simples, ces modèles restent d'un réglage délicat par suite des modifications de la forme des fonds (dunes - rides - anti-dunes - lits plats). Comme pour les autres modèles, on devra :

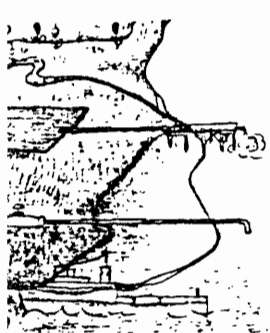
- s'assurer que les phénomènes hydrauliques sont correctement représentés (lignes d'eau, cotes, vitesses...) mais en se rappelant que la rugosité des fonds est une variable lorsque le modèle est mis en fonds mobiles,
- respecter les seuils d'entraînement des matériaux (similitude de début d'entraînement),
- se rapprocher d'une similitude de débits solides en fonction des forces tractrices et respecter le rapport charriage - suspension,
- ajuster le cycle hydrologique aux échelles des temps sédimentologiques.

Le tableau ci-après donne quelques valeurs des échelles des modèles réduits fluviaux qui viennent d'être récemment étudiés (photographie 21).

SITES	DATES	ECHELLES		MATERIAUX		OBJECTIFS
		M	N	NATURE MM	MODELE MM	
LA LOIRE AU PONT DE CE	1988	250	80	SABLE	SCIURE TRAITEE	ABAISSER NIVEAU DES CRUES SANS COMPROMETTRE EQUILIBRE DES FONDS
LE PAILLON A NICE	1988	100	100	SABLE	SCIURE BOIS	EVITER DEPOT DES SEDIMENTS APRES COUVERTURE TORRENT
CERGY PONTOISE	1988	50	50	VASE	SCIURE FINE	RISQUE ENVAISEMENT PORT FLUVIAL
LE COUESNON - BARRAGE DE LA CASERNE	1989	30	30	ENROCHEMENTS	CAILLOUX CONCASSES	PROTECTION PIED DU BARRAGE
L'ARVE A CLUSES (HAUTE SAVOIE)	1989	30	30	ENROCHEMENTS	CAILLOUX CONCASSES	PROTECTION DES BERGES



Prise d'eau en mer  
de la centrale thermique  
de Zouk Mikhael  
Liban



Rejet en mer  
des cendres de  
la centrale thermique de Blyth  
Grande-Bretagne

SITES	DATES	EHELLES		MATERIAUX		OBJECTIFS
		M	N	NATURE MM	MODELE MM	
L'ISERE A MOUTIERS	1989	33,3	33,3	SABLE/ ENROCHEMENTS	CONCASSE	STABILISATION LIT PAR DES ENROCHEMENTS
LE MERDARET ISERE	1989	20	20	ENROCHEMENTS	CONCASSE	STABILISATION DU LIT

e) Modèles d'ouvrages (influence sur les fonds)

Dans ces modèles, les phénomènes de détails deviennent prépondérants (tourbillons, fluctuations des vitesses, décollement des trajectoires des courants...), il est nécessaire par ailleurs d'avoir une bonne précision dans les mesures.

On est conduit à :

- adopter des échelles en plan comprises entre le 1/25 et le 1/100 (piles du pont Saint Esprit à Bayonne 1/80, tunnel de Cheviré à Nantes 1/75...) et à ne pas distordre le modèle (ou très peu).
- choisir un matériau mobile ayant des vitesses critiques d'entraînement voisines de celles des sédiments naturels (compte tenu des échelles de similitude),
- respecter la similitude des débits solides en fonction des vitesses ou des forces tractrices,
- se rapprocher du rapport charriage/suspension observable en Nature,
- représenter un cycle hydraulique comparable au cycle naturel.
- pour les vases respecter les conditions de tassement des dépôts avec leurs gradients.

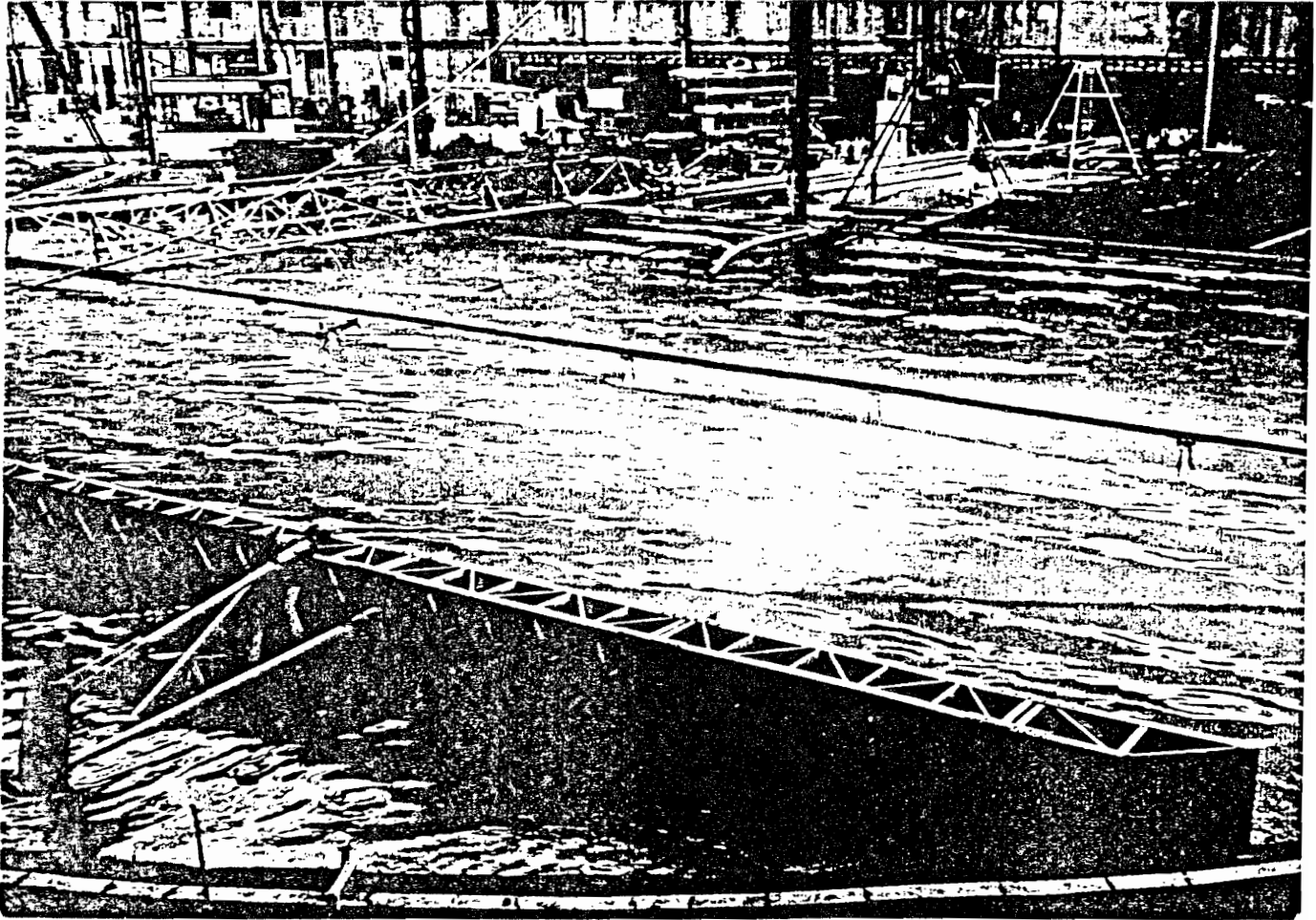
Le choix du matériau mobile reste délicat mais il semble que la répartition des successions des phénomènes hydrauliques dans le cycle n'ait pas une action préférentielle dans les dépôts et érosions constatés.

5.2.3.3. Modèles de captage et de rejet d'eaux chaudes

Ces modèles se sont développés considérablement avec l'extension des besoins en eau de refroidissement (débits atteignant 100 à 200 m<sup>3</sup>/s).

Ces modèles sont surtout valables pour étudier la répartition du champ proche et les risques de recyclage soit des eaux chaudes (centrales thermiques), soit des eaux froides (gaz) (photographie 22).





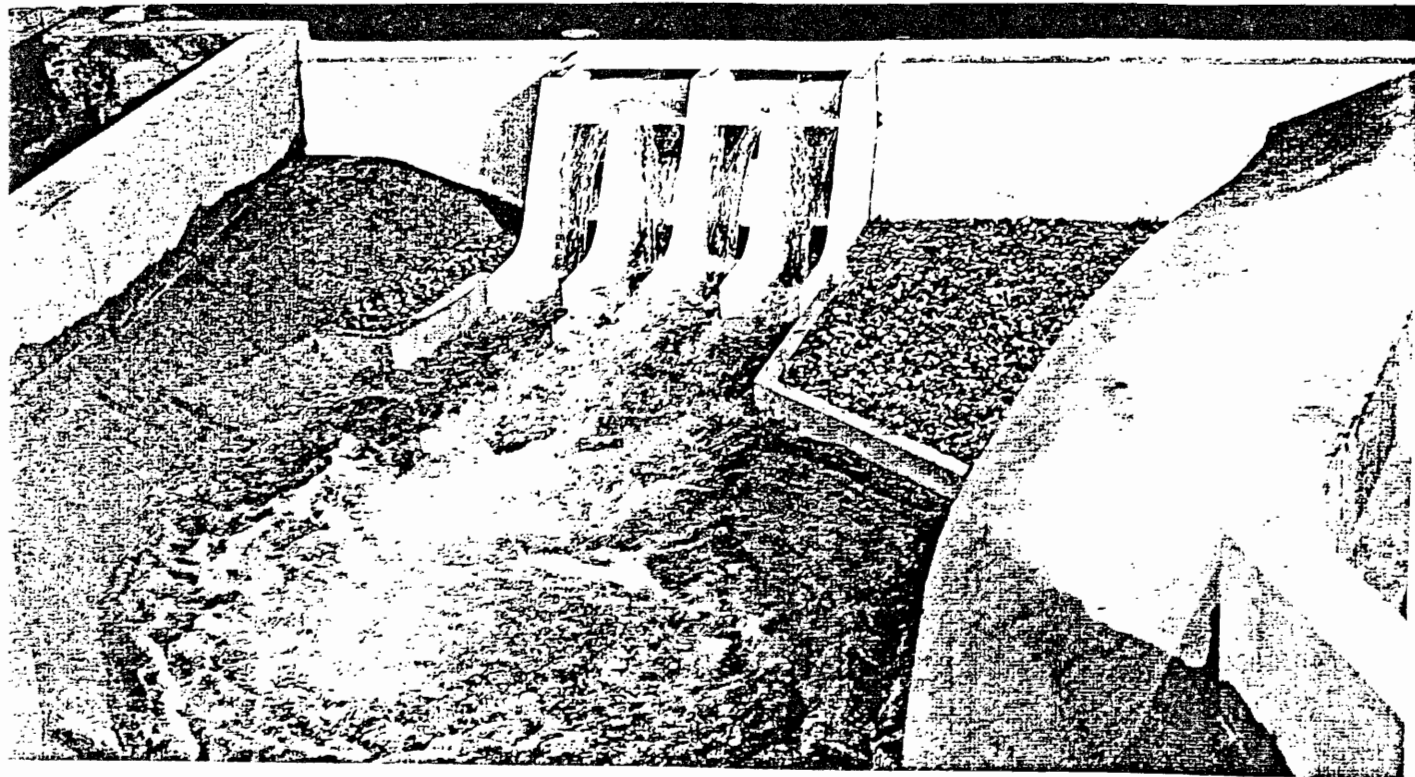
Il faut sur ces modèles :

- s'assurer que les courants de densité et de diffusion des eaux sont correctement représentés (on adopte en général le même rapport de densité ou quelquefois une légère augmentation du  $t$ ),
- ajuster les vitesses des courants de houle à celles des courants d'aspiration et de rejet (correction de la racine cubique de la distorsion),
- disposer d'un matériel précis pour les mesures de température, de colorimétrie... utiliser la thermographie avec étalonnage de la tâche.

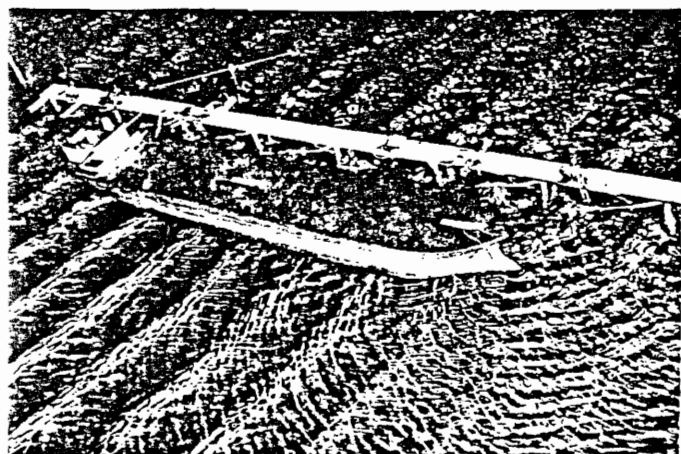
#### 5.2.3.4. Modèles de stabilité des ouvrages

Les études de stabilité des ouvrages sous l'action des houles et/ou des courants font partie des recherches classiques en modèle réduit physique. On doit, pour de telles études, adopter des échelles comprises entre le 1/25 et le 1/80 sans distorsion. Il faut par ailleurs :

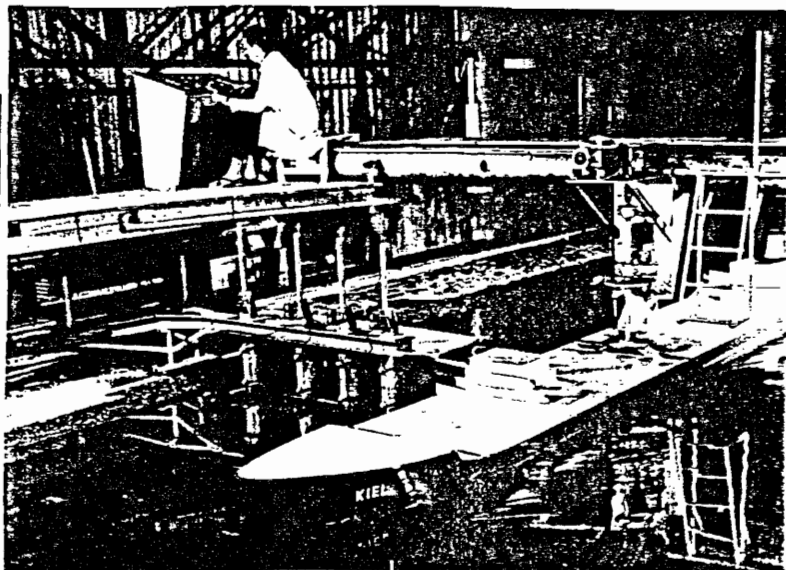
- respecter scrupuleusement la densité des éléments (enrochements ou blocs artificiels) ainsi que la répartition granulométrique,
- respecter les différentes catégories d'éléments des différentes couches (noyau, sous couche, carapace...),
- choisir des blocs naturels ou artificiels ayant des états de surface comparables à ceux de la nature (rejeter les blocs trop lisses),
- choisir un plan de pose des éléments identique à celui de la nature (éviter la mise en place trop ordonnée des éléments),
- bien préciser la houle de projet (paramètre prépondérant),
- soumettre au départ l'ouvrage à des houles de "tassement" permettant aux éléments de se mettre en place,
- tenir compte des fluctuations du niveau des eaux, dues à la marée, en les associant aux différentes forces des vagues (cycle de marées associé au cycle de houle),
- prendre un soin particulier du pied des ouvrages, tenir compte des érosions possibles,
- représenter et mesurer les franchissements - tenir compte de leur effet sur la face interne de l'ouvrage,
- prendre en considération l'obliquité et la forme des houles (houles en trains d'ondes) en complétant les études à 2 dimensions par des études à 3 dimensions (photographie 23).



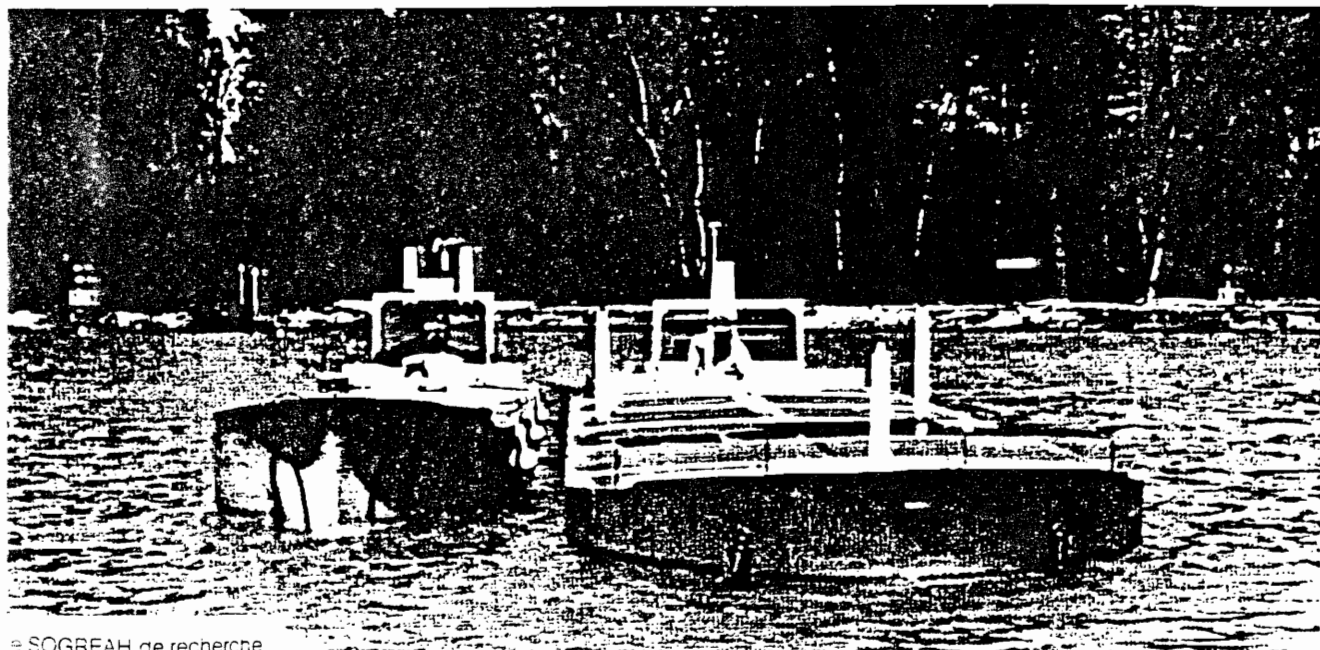
Barrage de Sidi-Driss (Maroc)



Mesure des efforts exercés  
sur les amarres  
Cliché Port Autonome de Marseille.



Navigation dans les chenaux envasés



le SOGREAH de recherche  
entraînement pour la marine.  
Revel - France



Malgré les progrès faits dans la connaissance de la stabilité des ouvrages, les études à l'aide de modèles réduits physiques restent nécessaires (la destruction de la digue de Sines en est une confirmation) .

#### 5.2.3.5. Modèles divers

Les études sur modèles réduits physiques s'appliquent à de nombreux autres cas plus ou moins complexes (photographie 24) :

- navigabilité dans les chenaux envasés : possibilités de réduire la valeur du pied de pilote, de faire passer un bateau dans des vases non consolidées, influence sur les conditions de manoeuvre...
- amélioration des conditions de dragage : forme des becs d'élinde, du débit d'aspiration, augmentation des concentrations de mixture, influence de la vitesse d'avancée de la drague...
- bassins de décantation pour les eaux usées : bassin à boues actives, décantation gravitaire...
- protection des prises d'eau contre les bancs de poissons, les déchets, les glaces...
- modification des états de tassement par champ électrique,
- etc...

Pour chaque type d'étude des échelles appropriées doivent être choisies pour respecter les phénomènes hydrauliques et sédimentologiques.

\* \* \*

En conclusion, les études en modèle réduit sont passées, au cours de ces dernières décennies, d'une méthodologie "artisanale" - qui cependant avait fait ses preuves - à une méthodologie très avancée où les techniques les plus modernes, associées à celles des ordinateurs, permettent d'obtenir dans des temps réduits des résultats extrêmement précis.

Augmentation des performances des modèles, réduction de la durée des études, précisions accrues, les modèles réduits physiques sédimentologiques apportent des éléments indispensables pour établir les projets d'ouvrages.

Leur coût d'exploitation bien que pouvant apparaître assez élevé (2 à 3 millions de francs pour une grosse étude, 500 000 à 250 000 Frs pour une étude modeste) ne représente que le 1/100 à 1/500 de certains aménagements, c'est-à-dire une fraction dérisoire en comparaison des gains que cela permet d'obtenir.



# CHAPITRE VI

ETUDES A L'AIDE DE MODELES MATHEMATIQUES  
SEDIMENTOLOGIQUES  
PERSPECTIVES D'AVENIR

## VI

### ETUDES A L'AIDE DE MODELES MATHEMATIQUES

#### SEDIMENTOLOGIQUES

#### PERSPECTIVES D'AVENIR

L'utilisation du modèle mathématique a fortement progressé au cours des trente dernières années et les domaines d'application ainsi que la précision de cette technique sont en augmentation continue. Cette évolution rapide est liée, comme pour les modèles physiques, à l'amélioration de la connaissance des mécanismes responsables des mouvements sédimentaires et à leur formulation théorique associée au développement considérable de la puissance des ordinateurs [33].

De même qu'un modèle physique se construit dans des installations prévues à cet effet (cuve ou canal, pompes, générateurs de houle, instruments de mesure, matériaux mobiles...), un modèle mathématique se construit à partir d'un ou plusieurs codes de calcul appropriés. Un code de calcul est un logiciel informatique bâti pour résoudre une classe particulière de problèmes physiques. Pour chaque problème concret appartenant à cette classe, il faut construire un modèle particulier. Concrètement cela signifie qu'il faut fournir au logiciel un ensemble de données relatives au site à étudier. Le logiciel fournira alors les résultats qui s'en déduisent.

Les modèles mathématiques offrent l'avantage, lorsque le code de calcul existe, d'être d'une exploitation assez rapide et d'un prix généralement plus bas que celui d'un modèle physique équivalent. Ils peuvent englober des superficies importantes et se conserver pratiquement indéfiniment.

Ces modèles restent cependant encore limités au niveau de la description fine des phénomènes, de la capacité mémoire des ordinateurs et du temps de calcul qui, dans certains cas, peut dépasser le temps nature.

C'est pour cette raison qu'en France l'utilisation des modèles mathématiques sédimentologiques dans les études est encore peu fréquente alors que les modèles mathématiques hydrauliques sont entrés dans une phase d'exploitation importante et correspondent le plus souvent à des outils très bien adaptés pour les études d'aménagements portuaires ou littorales.

---

[33] *Mécanismes d'évolution du littoral. Question II l'Hydraulique et la maîtrise du littoral - Rapport général et complément au rapport général - C. MIGNIOT et F. BIESEL - XVIIIe journées S.H.F. Marseille - Septembre 1984.*

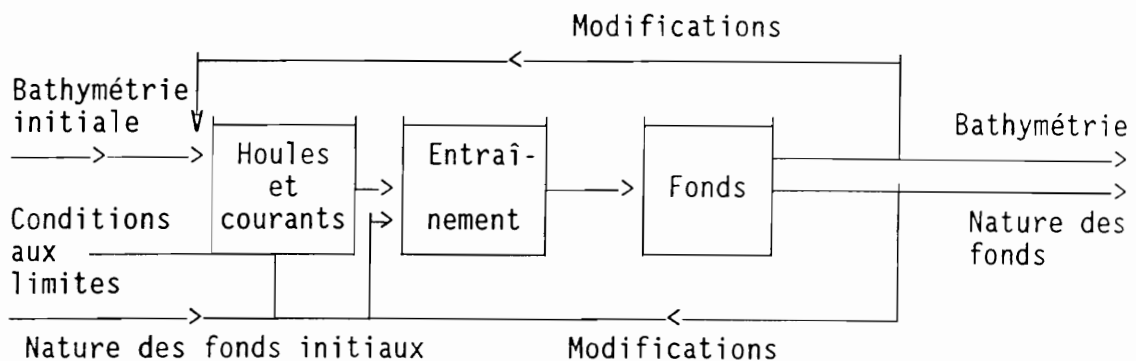
Il n'en reste pas moins que si un modèle mathématique hydraulique peut donner en chaque point et à chaque instant les vitesses des courants et les répartitions de l'agitation, il sera toujours possible de transformer par le calcul ces valeurs en contraintes tangentielles exercées par l'eau sur les fonds, ou en vitesses de frottement, et d'établir des estimations du transport en résultant en appliquant différentes formules de l'hydrodynamique sédimentaire [34]. Sans prétendre disposer, dans tous les cas, d'un véritable modèle mathématique sédimentologique intégrant tous les paramètres et conduisant à des évolutions précises et détaillées des fonds, on pourra souvent appréhender certaines tendances d'érosion ou de sédimentation et orienter le choix d'une solution dont la quantification pourra se faire sur un modèle sédimentologique de détail. Il y a donc généralement complémentarité entre les modèles mathématiques, les études sur plans, les essais en modèles réduits physiques sédimentologiques et les mesures en nature.

Dans ce chapitre, après avoir rappelé le principe d'organisation d'un modèle mathématique sédimentologique, nous examinerons les possibilités offertes par les modèles hydrauliques mathématiques et les modèles sédimentologiques fluviaux, maritimes et estuariens.

### 6.1. ORGANISATION D'UN MODELE MATHEMATIQUE SEDIMENTOLOGIQUE

L'organisation d'un modèle mathématique sédimentologique a été donnée par M. F. BIESEL aux XVIIIème journées de la S.H.F. [33] ainsi que par les différents spécialistes français qui participaient à ces journées.

Un modèle mathématique sédimentologique peut se présenter par un diagramme comportant 3 modules notés "courants", "entraînement", "fonds".



[34] Définition des paramètres hydrosédimentaires à prendre en considération sur modèles mathématiques sédimentologiques - L.C.H.F. SOGREAH et S.T.C. P.M.V.N. - Mars 1988.

Le module "courants" correspond à un modèle mathématique des mouvements de l'eau, que ces mouvements soient dus à des courants fluviaux ou de marées ou à l'action de la houle et du vent. Ce "module" doit non seulement permettre de calculer les vitesses de l'eau mais aussi les diffusivités qui représentent les effets pratiques essentiels de la turbulence. Cette nécessité n'apparaît pas toujours d'une façon évidente mais même les modèles mathématiques les plus simples reposent sur une hypothèse implicite, la turbulence y étant supposée identique (sous réserve de réglage) à celle correspondant aux écoulements uniformes et permanents ayant la vitesse moyenne locale.

Le module "entraînement" a pour rôle de calculer les quantités de matériaux entraînés par charriage, saltation... ou mises en suspension ou déposés, le calcul de l'advection des matériaux en suspension se faisant, dans certains cas, dans le cadre du modèle mathématique de courants.

Enfin le module "fonds" a pour objet de calculer l'évolution de la couche sédimentaire, c'est-à-dire de la bathymétrie, la nature, l'âge et l'origine des couches de sédiments, etc... Cette évolution des fonds modifiera les données utilisées par les modules précédents.

En associant les trois modules on arrive à un modèle mathématique sédimentologique théoriquement valable sous réserve que chaque module le soit et que l'on ne cumule pas des erreurs dues à la méconnaissance que l'on a encore dans la représentation exacte des phénomènes hydrauliques et sédimentaires.

Du côté des modules hydrauliques ou de courantologie les premiers modèles de ce type présentaient deux défauts principaux : ils introduisaient une très grande diffusion parasite du calcul et ils étaient bi-dimensionnels (intégrés sur la verticale). Ces défauts étaient rédhibitoires pour les problèmes sédimentologiques complexes. Ils sont maintenant partiellement résolus dans un certain nombre de cas pratiques.

On ne peut réduire indéfiniment les mailles de calcul sans arriver à des coûts de machine prohibitifs. Il est impératif de veiller à ce que la "définition" qu'ils permettent soit conservée. Ce n'est pas le cas des modélisations purement eulériennes qui introduisent, en plus, des diffusions parasites énormes par rapport aux diffusions physiques réelles.

En tenant compte dans les calculs des répartitions eulériennes et lagrangiennes, on améliore les modèles hydrauliques permettant d'obtenir des modèles du type CYTHERE, OKO ou HYCO mis au point par SOGREAHLNH, L.C.H.F. ou AMTEC qui sont déjà des modèles bi-dimensionnels très performants.

Parallèlement, le problème de la représentation sur des modèles courantologiques bi-dimensionnels des zones découvrantes de grande étendue, pouvait être résolu et la représentation des courants induits par la houle commence à être maîtrisée.

On peut dire que dans l'état actuel, des modèles courantologiques bi-dimensionnels sont opérationnels sous réserve du maillage et de la représentation fine de certains phénomènes tourbillonnaires ou de fluctuations rapides de la bathymétrie et de la topographie. De même certaines interactions entre les houles et les courants restent à prendre en considération dans les cas où de tels phénomènes existent comme par exemple aux débouchés des rivières en mer ou sur des littoraux où les courants de marées se superposent aux actions des houles.

Ces modèles bi-dimensionnels hydrauliques, s'ils représentent déjà un apport considérable pour tenter d'aborder les modèles mathématiques sédimentologiques, restent encore insuffisants dans un certain nombre de cas pratiques. L'importance des gradients verticaux de concentration et de vitesse prend toute sa valeur dans les problèmes de sédimentation et des erreurs importantes peuvent apparaître si l'on ne tient pas compte des gradients de densité [35] ce qui nécessite l'introduction de la troisième dimension verticale. C'est pourquoi des codes de calcul courantologiques prenant en compte cette dimension verticale ont été développés ces dernières années et commencent à être utilisés sur des cas simples.

L'utilisation des modèles tri-dimensionnels hydrauliques apportera un progrès considérable par l'utilisation du module "courantologie" dans les modèles mathématiques sédimentologiques.

Pour le module "entraînement" les formules développées dans le manuel sur l'hydrodynamique sédimentaire [18] montrent que l'on dispose d'une somme d'informations considérables sur les lois de transport des sédiments. Ces formules montrent également qu'elles ne sont applicables qu'à certaines catégories de matériaux et à certains régimes hydrauliques ; leur utilisation non contrôlée sur des modèles mathématiques conduirait donc à des erreurs importantes en négligeant par exemple le transport en suspension et en ne prenant en considération que le charriage qui peut ne représenter qu'une infime partie du transport. De même les formules doivent tenir compte de la modification de la forme des fonds donc de leur rugosité, ce qui peut entraîner des écarts de un à quatre dans les quantités transportées suivant que l'on se situe sur un "lit plat" ou avec un "lit à dunes".

Pour les sédiments cohésifs, les difficultés d'utilisation des formules de transport sont encore plus grandes puisque les taux d'érosion dépendront de la charge en particules solides dans les eaux et de la rigidité des fonds qui varie en fonction du temps et de la profondeur dans les dépôts. On arrive ainsi à des formulations complexes qui viendront encore augmenter le temps de calcul des modèles mathématiques si l'on n'accepte pas certaines simplifications basées sur la connaissance des processus hydro-sédimentaires.

---

[35] *Prise en compte des courants de densité dus aux mises en suspension dans les modèles mathématiques maritimes à fonds mobiles - F. BIESEL - Rapport II.9, XVIIIe journées Hydraulique S.H.F. - 1984.*

Le module "fonds" ne devrait pas poser de problèmes matériels de programmation en admettant les équations de continuité, mais peut poser des problèmes de diffusion numérique. La simulation à long terme des mécanismes sédimentaires nécessite cependant une schématisation pour la prise en compte de l'interaction entre le fond et l'écoulement et pour la reproduction des différents cycles de marée, de houle ou d'hydrologie. Il faut en effet généralement étudier l'action sur plusieurs années de facteurs évoluant fortement à l'échelle de l'heure. Les interactions fond-écoulement obligent à recalculer en permanence les caractéristiques de l'écoulement ce qui peut conduire à un effort de calcul très lourd non seulement au niveau sédimentologique mais surtout au niveau hydrodynamique. Certaines hypothèses simplificatives permettent d'alléger considérablement les calculs en adoptant des raisonnements comparables à ceux utilisés sur les modèles physiques et en représentant par exemple N marées par une seule N fois plus grande [36].

Les progrès considérables réalisés au cours des dernières années dans les modèles mathématiques permettent d'espérer que malgré la difficulté rencontrée pour chaque "module" il sera possible d'arriver un jour à l'élaboration de modèles mathématiques sédimentologiques opérationnels pour les cas les plus complexes.

Dans l'état actuel, les méthodologies d'étude s'orientent vers la combinaison des modèles mathématiques et physiques pour résoudre les problèmes pratiques (modèles hybrides). Des perspectives encourageantes apparaissent dans ce domaine. En effet, les modèles mathématiques d'ensemble sont susceptibles de fournir des indications sur les phénomènes sédimentaires globaux qui peuvent se produire sur des étendues importantes et les modèles réduits physiques sédimentologiques "locaux" fournissent les détails sur les évolutions d'un secteur réduit de quelques kilomètres et permettent ainsi de mettre au point les solutions d'aménagements souhaitables.

## 6.2. MODELES MATHEMATIQUES HYDRAULIQUES

### 6.2.1. ETUDES FLUVIALES

Depuis de nombreuses années, les modèles mathématiques d'écoulement en rivière, de remous et de propagation de crues existent et sont utilisés assez couramment.

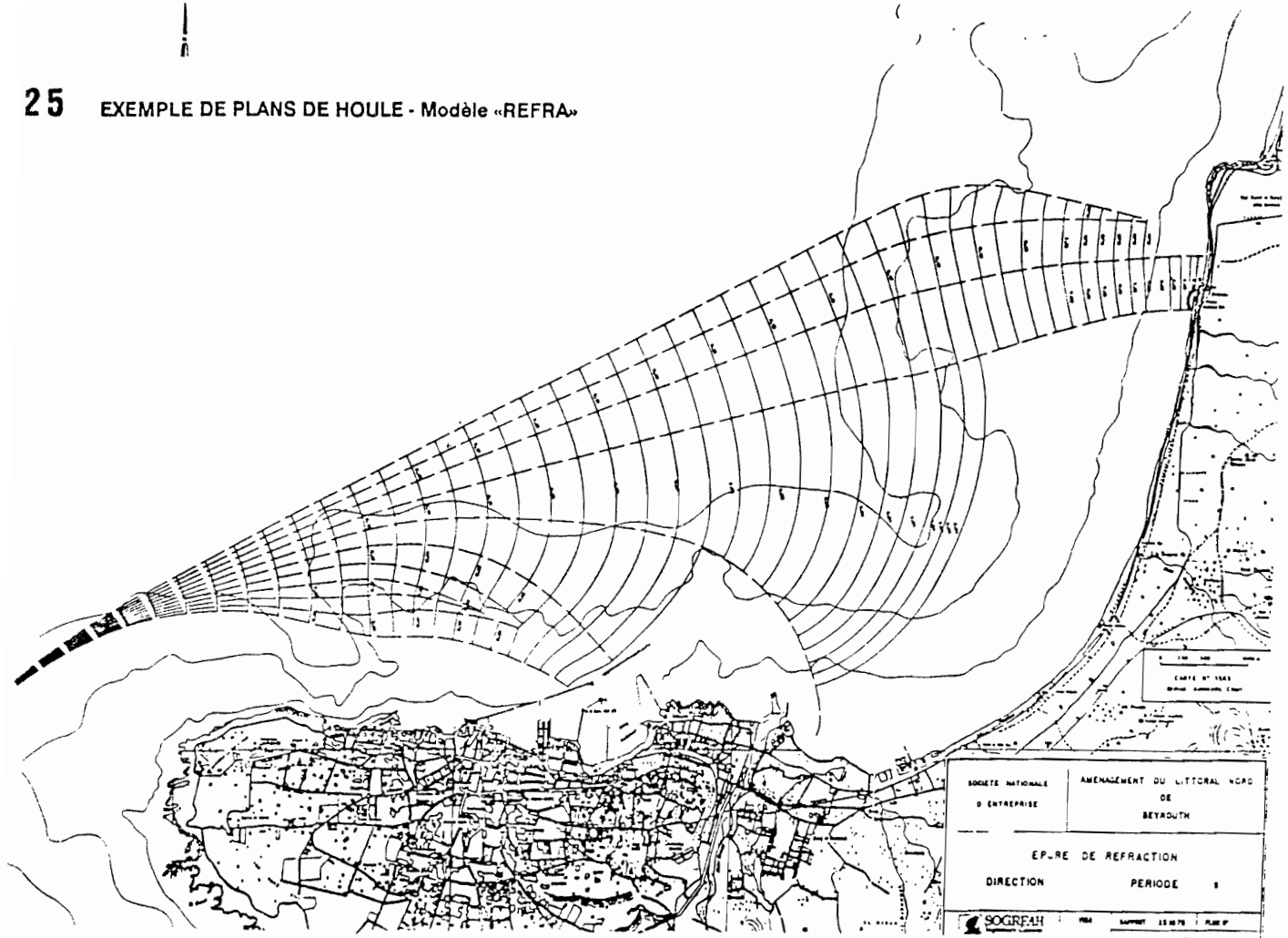
En hydrologie le programme "PREVIK" permet à partir des conditions pluviométriques d'un bassin versant de géométrie et de nature géologique données, de calculer les débits susceptibles d'alimenter une rivière.

---

[36] *Exemples d'application d'une modélisation numérique du charriage sous l'action des courants* - B. LATTEUX et Y. COEFFE - S.H.F. R.13 - Marseille 1984.



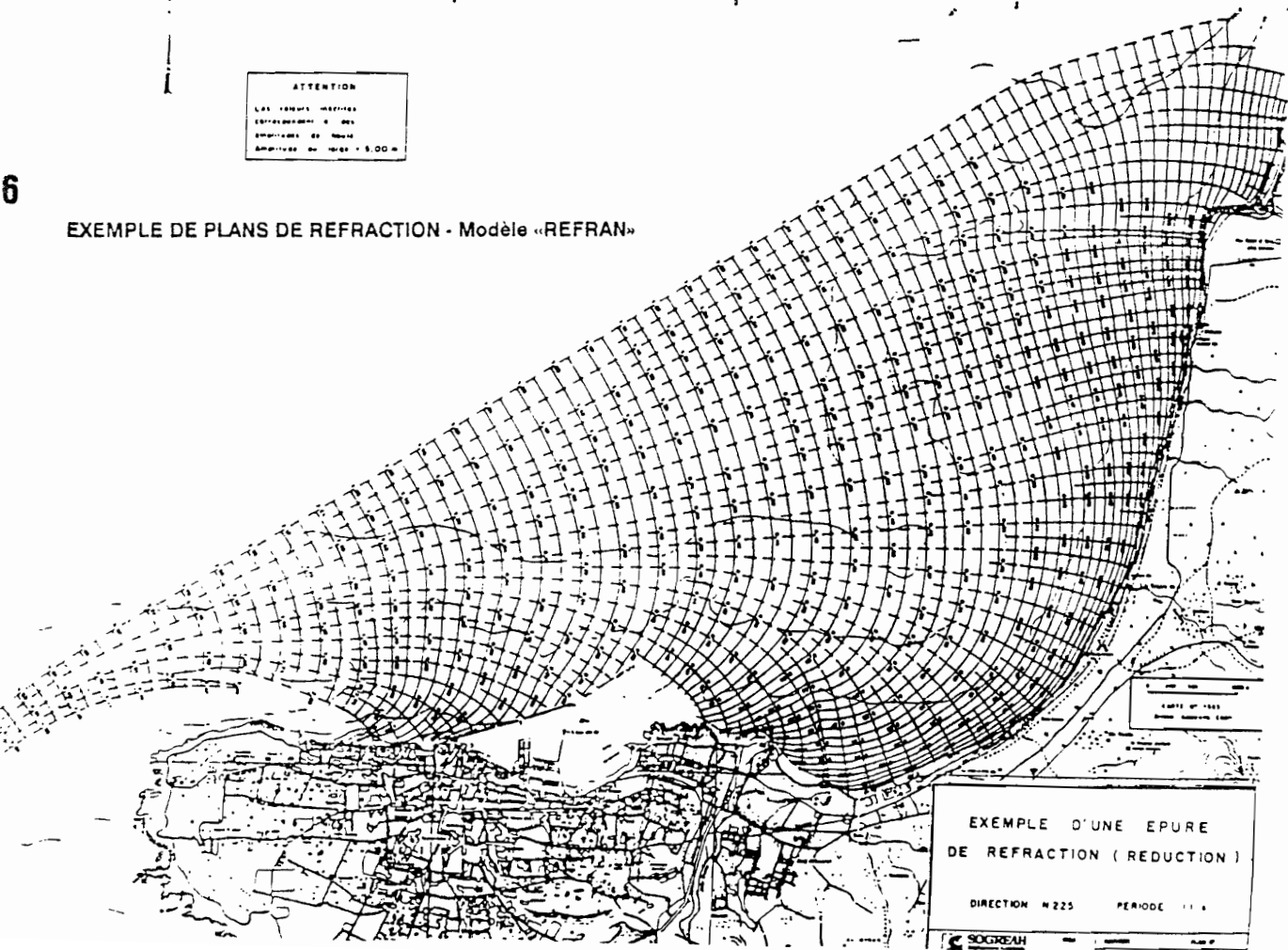
25 EXEMPLE DE PLANS DE HOULE - Modèle «REFRA»



ATTENTION  
 LES TRONCS MERISSES  
 ESTIMES A 100  
 AMPLOISSE EN MOYEN  
 AMPLOISSE EN MOYEN = 5,00 m

6

EXEMPLE DE PLANS DE REFRACTION - Modèle «REFRAN»



La simulation des écoulements non permanents uni-dimensionnels et bi-dimensionnels dans les rivières et leurs champs d'inondation, peut être abordée par le système "CARIMA" (Calcul Rivière Maille) mis au point par SOGREAH et "LIDO SARA" du L.N.H. et du STCPMVN. Les écoulements sont représentés par les équations complétées de Saint-Venant.

Pour la représentation des écoulements multi-dimensionnels en plan horizontal à travers de vastes champs d'inondation, une modélisation consiste à considérer un système de casiers liés entre eux par différentes lois d'échange. Cette modélisation est disponible dans les codes CARIMA (SOGREAH) et REZO-CASIER (L.N.H.).

De tels modèles permettent de prévoir l'influence du dragage d'un chenal sur les lignes d'eau, de caractériser des digues de protection contre les crues, de programmer les consignes d'exploitation des crues, etc...

Le programme "REMOU" permet le calcul et le tracé des courbes de remous sur un cours d'eau ramifié en régime fluvial ou torrentiel en appliquant le théorème de BERNOUILLI.

#### 6.2.2. ETUDES MARITIMES DE HOULES

Réfraction, diffraction, réflexion, seiches et courants de houle induits dans la zone de déferlement, sont à étudier pour avoir une approche de la propagation des houles le long d'un littoral.

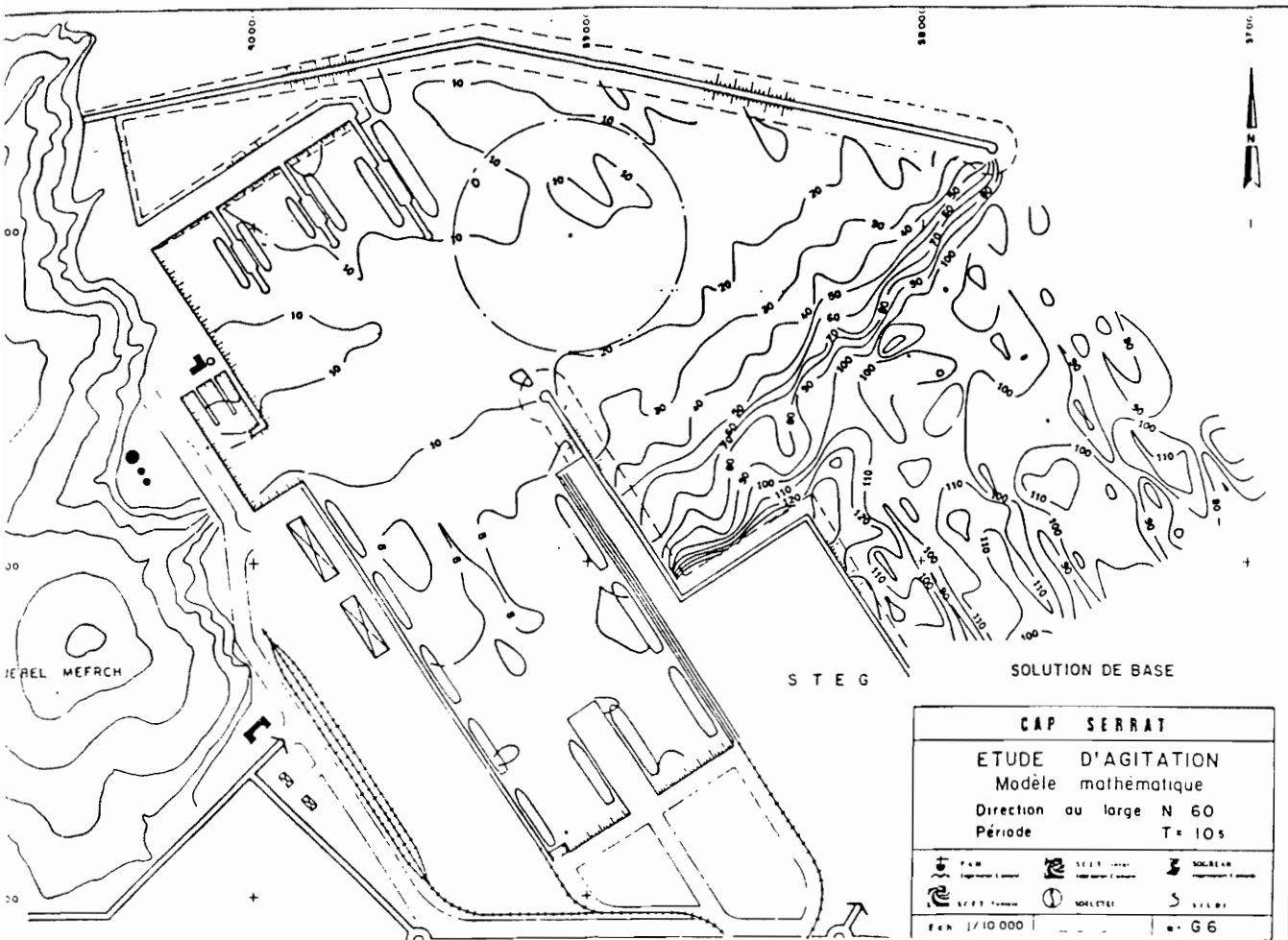
Différentes cotes de calcul existent actuellement pour résoudre ces problèmes avec des difficultés croissantes en fonction de la précision que l'on désire obtenir, les modèles les plus sophistiqués pouvant prendre en compte les phénomènes de réfraction et de diffraction mais étant relativement coûteux en temps de calcul.

Le caractère irrégulier de la houle n'était pas pris en compte jusqu'à présent. Les recherches effectuées pour introduire dans les modèles de réfraction une répartition de Rayleigh de hauteur des vagues au large permettent maintenant d'obtenir dans la zone de déferlement une répartition réaliste des hauteurs et des courants de houle [37]. L'action des courants sur la propagation des vagues est également maintenant prise en compte.

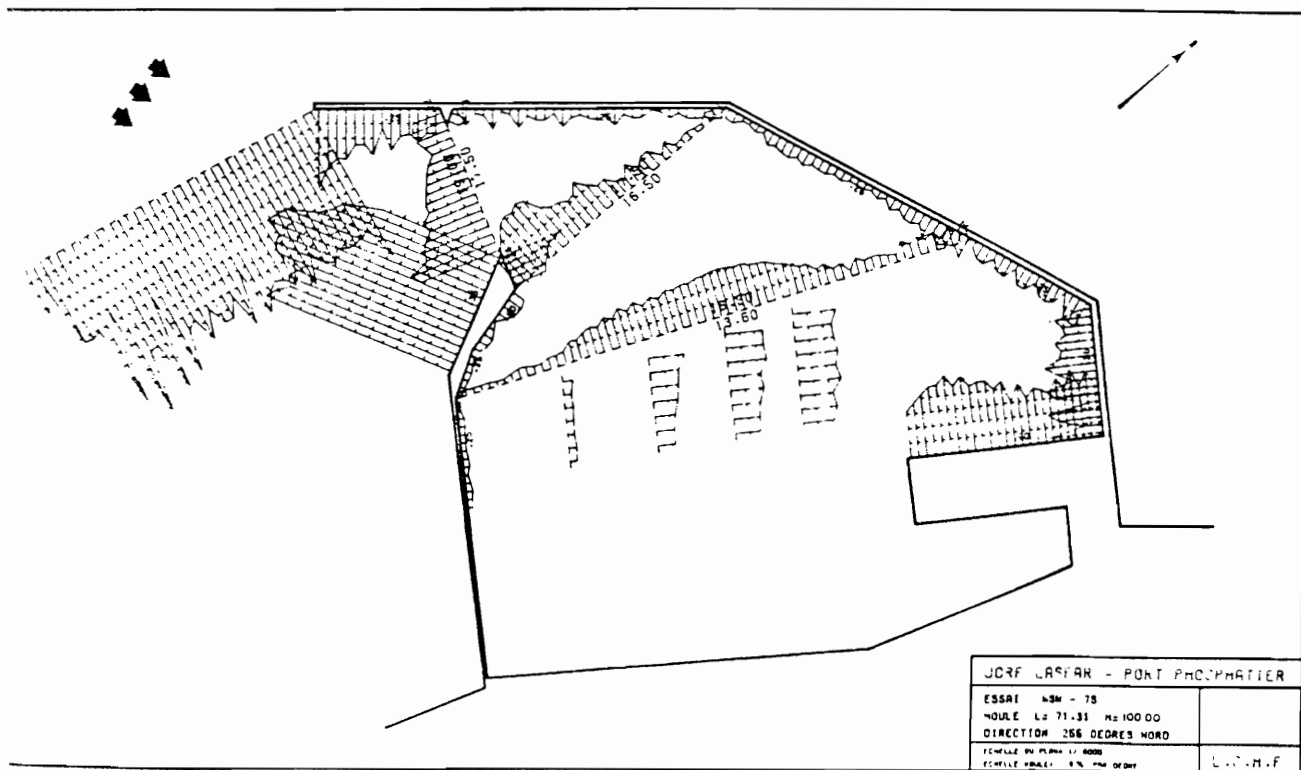
La réfraction de la houle au premier ordre peut être obtenue sur un modèle du type "REFRA" (L.N.H. et SOGREAH), le calcul s'effectue orthogonale par orthogonale sans être maître de la densité d'ortho-

---

[37] *Note sur les outils disponibles à SOGREAH pour la modélisation mathématique en sédimentologie marine - L. HAMM - Paramètres à prendre en considération sur modèles mathématiques - Annexe 1 - SOGREAH - LCHF - STC - Mars 1988.*



7 EXEMPLE DE REPARTITION DE L'AGITATION DANS UN PORT -  
Modèle «DIVINE» et modèle L.C.H.F.



nales arrivant à la côte. Dans la zone de concentration la densité est très forte, dans les zones d'expansion elle est très faible. Ceci est un obstacle à l'interpolation des résultats sur une grille de calcul régulière {Figure 25}.

Le calcul "REFRAN" permet de définir la réfraction de la houle en troisième ordre, la propagation s'effectuant front d'onde par front d'onde avec limitation automatique de l'écartement entre deux orthogonales entre deux bornes préalablement définies. En cas d'expansion, des orthogonales supplémentaires sont ajoutées, en cas de convergence, des orthogonales sont supprimées, le calcul "général" automatiquement des orthogonales intermédiaires permettant de définir avec plus de précisions les hauteurs et directions résiduelles d'une houle de caractéristiques données au large {Figure 26}.

Au cours du calcul la dissipation d'énergie induite par le déferlement est évaluée à partir d'équations empiriques ainsi que la profondeur de déferlement, fonction de la pente du fond et de la cambrure de la houle. Un modèle de courant de houle calcule alors le champ de débit provenant des transferts d'énergie dans la zone de déferlement.

Les débits de courants de houle du type "COURHOUL" (L.N.H.) sont calculés en résolvant les équations du type Saint Venant moyennées en temps sur la verticale [38]. Les récents progrès ont concerné l'utilisation de la théorie Cnoidale de la houle pour déterminer les termes moteurs et la simulation du déferlement par perte d'énergie en utilisant la formulation du ressaut hydraulique. Le point faible de la modélisation reste la simulation de la turbulence à l'aide d'une viscosité constante. De même les aspects tri-dimensionnels gagneraient à être simulés, permettant par exemple de représenter les courants de retour ("undertow") [39].

La diffraction et l'agitation de la houle dans un port ou un bassin de configuration quelconque, comportant des ouvrages partiellement ou totalement réfléchissants, sont données, en houle régulière, en admettant une configuration des fonds variant par paliers horizontaux. Différents modes de calcul ont été établis pour résoudre ce problème notamment les modèles "DIVINE" à SOGREA, "DIFFRA" au L.N.H., "HYPO 41" chez AMTEC et "DIFF 5" au L.C.H.F. qui permettent de tracer les courbes d'égale agitation relative dans un port ou la variation de l'agitation le long des quais et des ouvrages. Le programme "TRAPP" permet en plus de visualiser des résultats sous forme tri-dimensionnelle {Figures 27 et 28}.

---

[38] *Présentation d'un modèle de transport littoral sous l'action de la houle - P. PECHON et Y. COEFFE - L.N.H. - XVIIIe journées de l'hydraulique - S.H.F. Marseille - 1984.*

[39] *Modélisation numérique des phénomènes en sédimentologie côtière - B. LATTEUX - E.N.P.C. - Formation Continue - Mai 1989.*

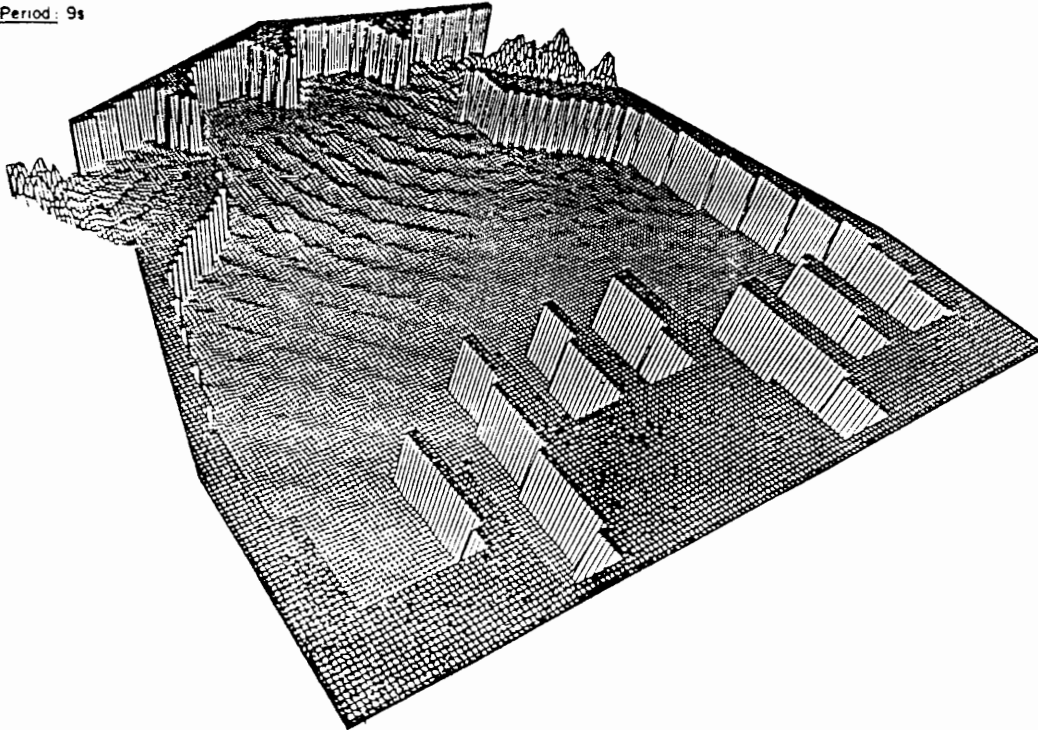
Wave height in harbour entrance: 6m

DISTORSION 1/150

Offshore direction: 325°

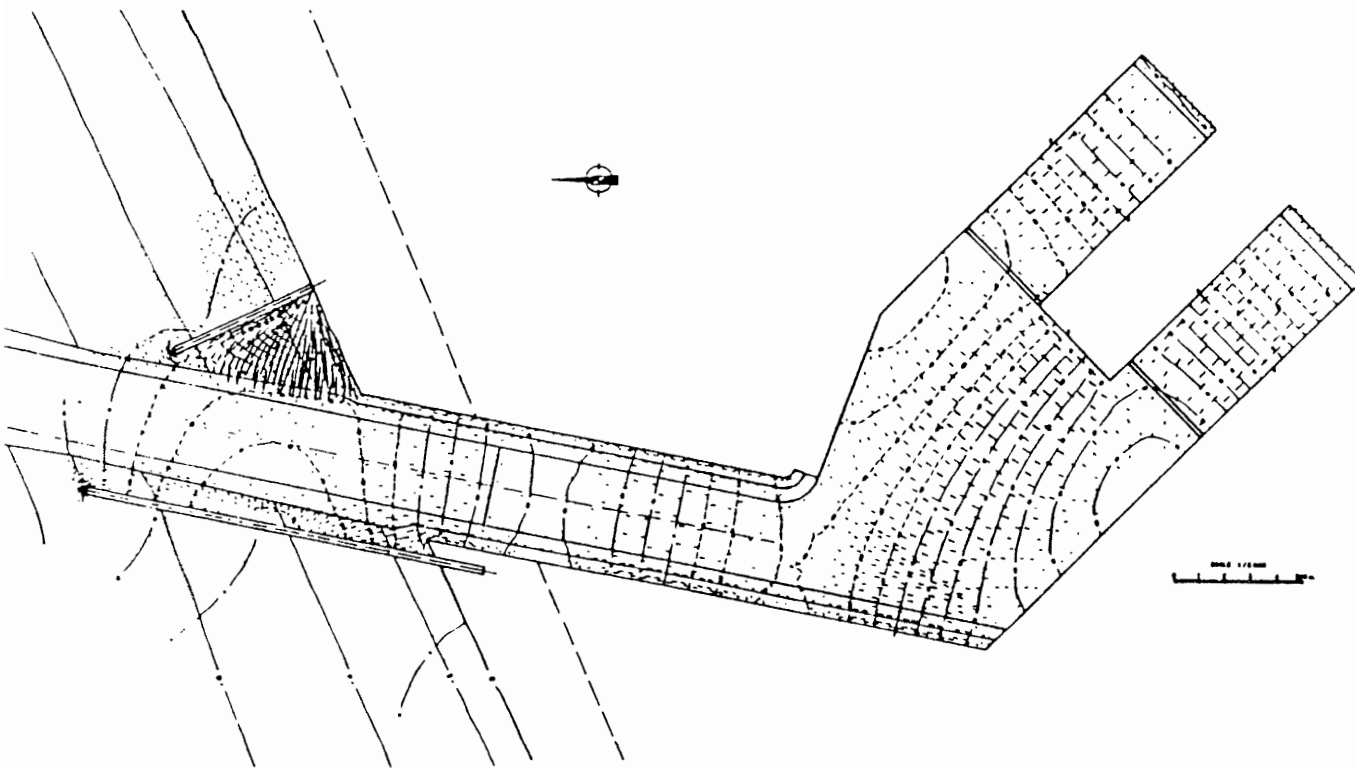
Level: +1.10 (ACD)

Period: 9s



Wave disturbance at the berths: between 0.1 and 0.3m

## 28 VISUALISATION TRI-DIMENSIONNELLE DE L'AGITATION - Modèle «TRAPP»



Réprésentation sous forme de courbes de niveaux de la surface libre, à l'instant où la cote maximale est atteinte au point d'amplification la plus élevée, pour l'un des modes de résonance du port. ( $f = 0.0057$  Hz)

## 29 ETUDE DES SEICHES - Modèle «SEICHE» - Port Damiette

La réfraction et la diffraction transversale simultanées, par exemple par suite de la présence d'une île, d'un haut fond ou d'un brise-lames, sont plus délicates à aborder mais le modèle "RECIF" développé au L.N.H. avec le Service Central Technique P.M.V.N. apporte déjà des résultats très prometteurs. Le calcul est fait dans le sens perpendiculaire de propagation, crête de houle par crête de houle et doit permettre des évaluations satisfaisantes jusqu'à des angles de 30° entre houles incidentes et houles diffractées-réfractées. Le calcul est plus lent que pour les modèles classiques de réfraction ce qui limite encore son utilisation à tous les cas de calculs.

Le code de calcul "DIFFRAC", développé à SOGREAH, permet de prendre en compte la diffraction et la réfraction dans un cas quelconque, y compris dans la zone de déferlement ce qui permet ensuite le calcul des courants d'expansion derrière un brise-lames par exemple [37].

Le modèle "SEICHE" (SOGREAH et L.N.H.) est un modèle à éléments finis qui prend en compte simultanément les effets de réfraction dus aux fonds marins et ceux de diffraction et de réflexion dus aux ouvrages maritimes et à la configuration de la côte. Ce modèle permet de calculer les principales caractéristiques des oscillations verticales du plan d'eau et des mouvements horizontaux des particules d'eau en fonction des fréquences de résonance (Figure 29).

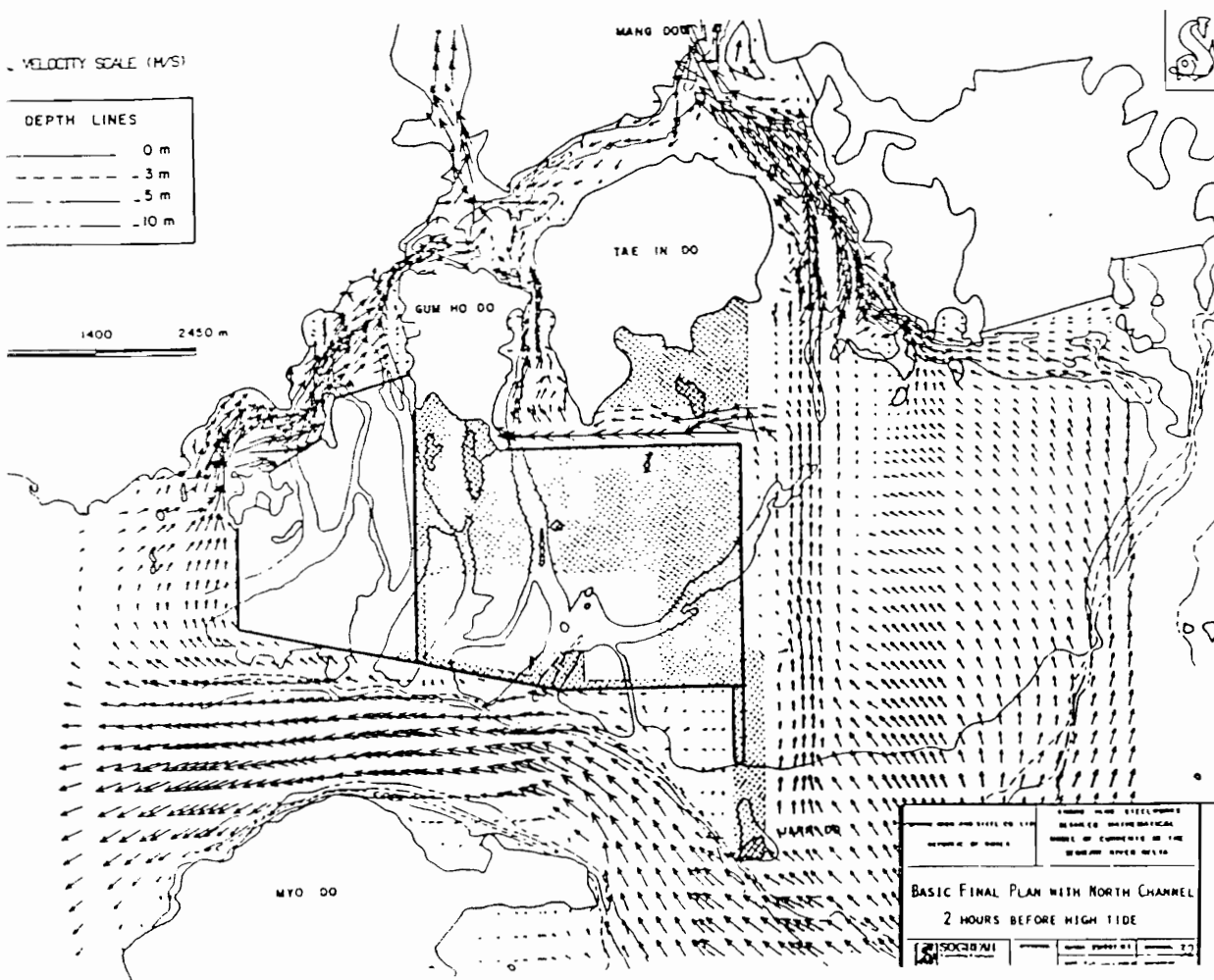
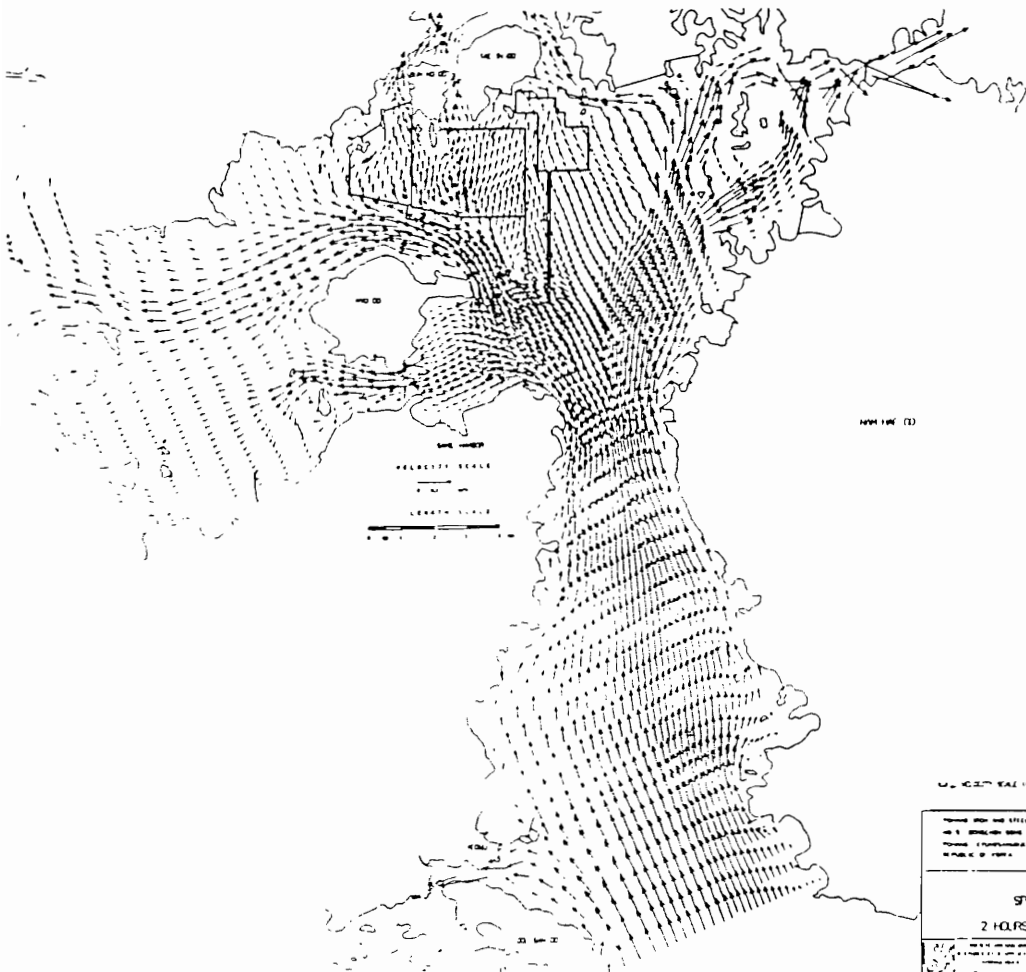
### 6.2.3. ETUDES MARITIMES DES COURANTS COTIERS ET DES ESTUAIRES

La modélisation de l'hydrodynamique en milieu côtier a trouvé un plein épanouissement depuis ces dernières années avec la simulation numérique des courants de marée. Ces modèles permettent de résoudre les équations non linéaires des ondes longues à faible cambrure en régime non permanent et dans un domaine très complexe. La prise en compte de la variation de la géométrie des zones couvertes et découvertes par la marée, offre un progrès supplémentaire récent et permet de disposer avec une très bonne précision des champs de courants, en direction et vitesse, sur toute l'étendue d'une zone littorale ou estuarienne soumise à la marée, ainsi que la diffusion et dispersion des polluants thermiques et chimiques supposés répartis dans toute la masse d'eau.

Le modèle "CYTHERE ES1" bi-dimensionnel, mis au point par le L.N.H. et SOGREAH répond à ce progrès et résout les équations intégrées sur la verticale des ondes de marée, en différence finie, sur un maillage rectangulaire ou curviligne orthogonal [40]. La Figure 30 donne un exemple des courants de marée à YEOSU.

---

[40] *New method for tidal current computation - J.P. BENQUE, J.A. CUNGE, J. FEUILLET, A. HAUGUEL et F.M. HOLLY - A.S.C.E., Vol. 108 WW3 - Août 1982.*





Ce modèle peut prendre en compte l'action du vent de surface et éventuellement de la houle. Les équations résolues sont les équations de Saint Venant auxquelles ont été ajoutés les effets des contraintes de cisaillement en surface induites par le vent ainsi que les contraintes de radiation induites par la houle (ces forces supplémentaires devant être calculées par ailleurs). La capacité de ce code de calcul à reproduire des structures tourbillonnaires à axe vertical a également été vérifiée, ce phénomène étant très important à reproduire pour simuler l'envasement de bassins portuaires. La Figure 31 donne un exemple des champs de courants donnés par un tel modèle avec et sans houle ou vent [41].

De même, le modèle "OKO" réalisé par le L.C.H.F. en association avec M. F. BIESEL, permet d'obtenir des résultats comparables en utilisant l'algorithme EULALIE (Eulérien et Lagrangien LIE) qui permet de réduire considérablement les diffusions de calcul que l'on a dans les modèles classiques. Sur ce même modèle, on peut également introduire l'action du vent de surface (VOKO) dont l'effet peut ne pas être négligeable dans la répartition des courants. De même tous ces modèles de marées tiennent compte de la force de CORIOLIS.

Ces deux types de modèles qui se rapprochent de certains modèles utilisés à l'étranger (JUPITER par exemple), bien que très perfectionnés, restent des modèles monocouche et ne prennent pas pour l'instant en compte les gradients de densité et de vitesse sur la verticale.

Les modèles filaires multicouches du type "ERIKA", mis au point par M. BIESEL au L.C.H.F. et "STRATEST" mis au point à SOGREAH, permettent d'aborder dans des conditions satisfaisantes les phénomènes de densité (salinité), de variation des vitesses sur la verticale, de pollution thermique ou chimique et ultérieurement de transport de vases. Ces modèles restent toutefois limités à des estuaires ou à des chenaux car ils ne prennent en compte, actuellement, la troisième dimension due à la largeur que d'une manière approchée. Avec le code ODYSSEE (mis au point par le L.N.H.) des espoirs apparaissent de pouvoir modéliser les courants dans les trois dimensions en conservant un nombre de mailles sur la verticale constant dans le temps et dans l'espace au moyen d'une déformation de maillage en différence finie, ce qui permet, notamment, d'assujettir la surface libre à un noeud de maillage.

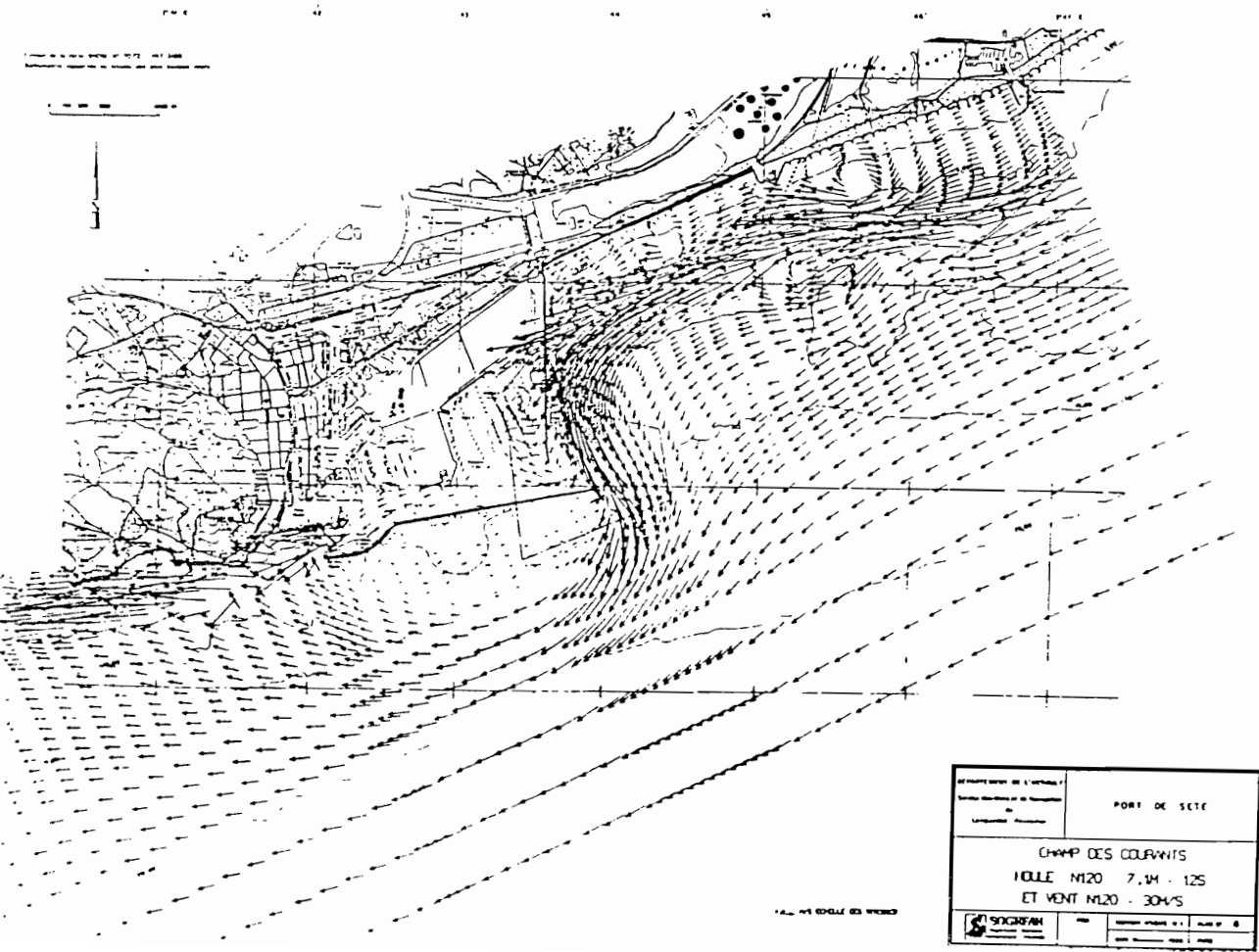
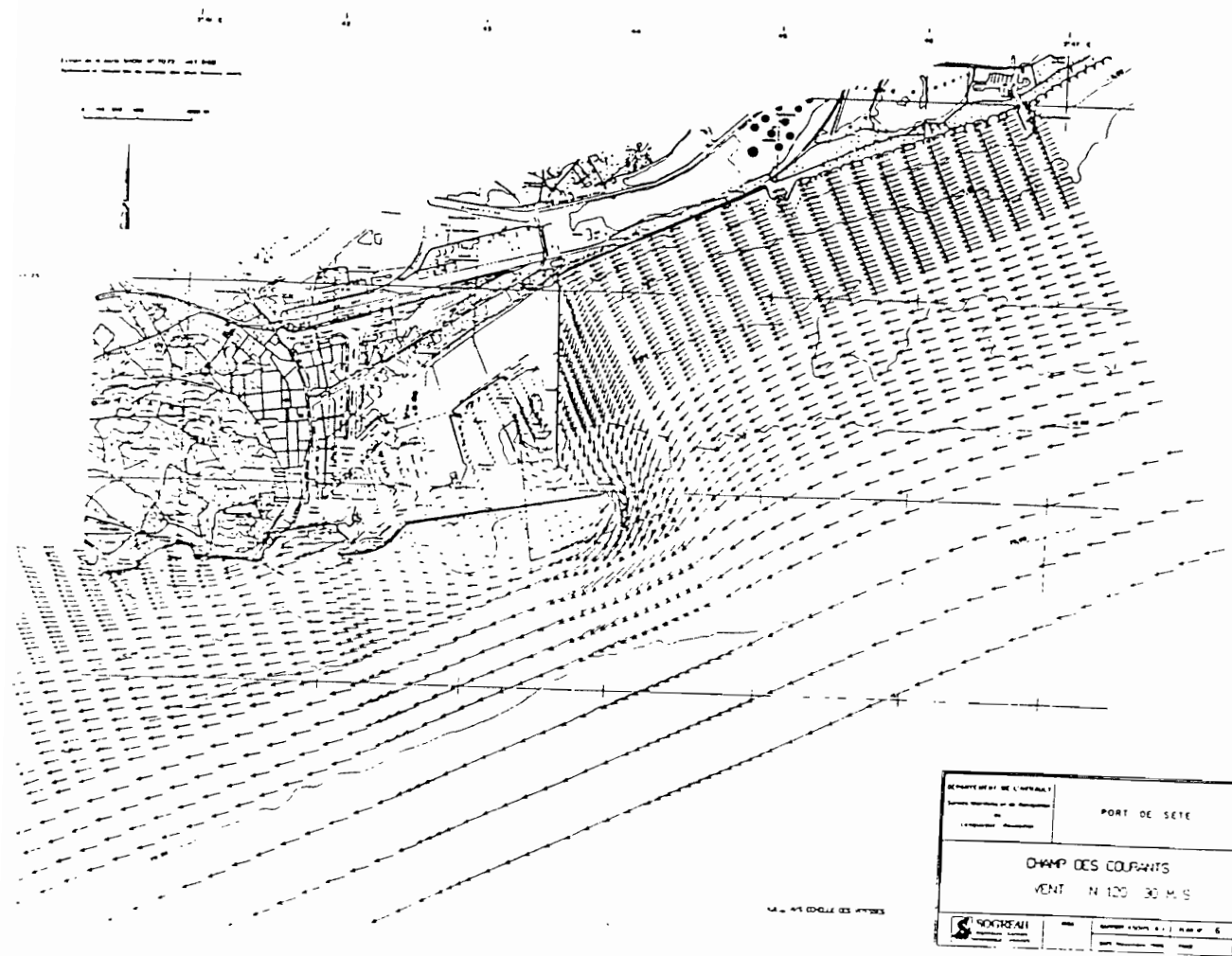
#### 6.2.4. ETUDES DE DIFFUSION DES POLLUANTS

En associant aux modèles courantologiques mathématiques un système de modélisation bi-dimensionnel qui résout les équations de convection - diffusion d'un champ de concentration avec des termes de sources ou de puits, on peut étudier sur modèles mathématiques la propagation d'un polluant. Le modèle "ARGOS" (SOGREAH) couplé avec "CYTHERE" ou le modèle 3.D. "ODYSSEE" (L.N.H.) répondent à ces problèmes.

---

[41] The dimensionnal modelling of wind - induced in coastal and harbour areas - L. HAMM, J.M. USSEGLIO, B. QUETIN - Processus international - Conference Birmingham - B.H.R.A. - 1985.





Le champ de concentration peut être celui d'une matière diluée ou dissoute quelconque (polluant, phytoplancton, composant chimique ou organique, mais aussi vase en suspension ou température), à condition que la diffusion turbulente soit suffisante pour que la concentration reste homogène sur une verticale, ce qui est le cas en zone côtière de mer à marée.

Les termes de source ou de puits traduisent les entrées et sorties des sédiments du domaine. Les lois d'évolution chimique ou biologique sont des lois empiriques couplées à l'équation de continuité [42].

Des codes de calcul multi-couches bi-dimensionnels verticaux ont également été développés pour tenir compte de la stratification dans les estuaires (code STRATEST de SOGREAH).

#### 6.2.5. MODELISATION TRI-DIMENSIONNELLE ET MODELES HYDRAULIQUES EN ELEMENTS FINIS

La modélisation bi-dimensionnelle s'avère inadaptée dans les cas où des effets tri-dimensionnels sont importants : chenaux dragués, digues submersibles. C'est pourquoi des codes de calcul tri-dimensionnel ont été développés au L.N.H. et à SOGREAH afin de traiter ces cas spécifiques. La Figure 32 présente les résultats d'un cas test simulant l'écoulement dans une souille draguée à (-12,00) sur des fonds à (-4,00).

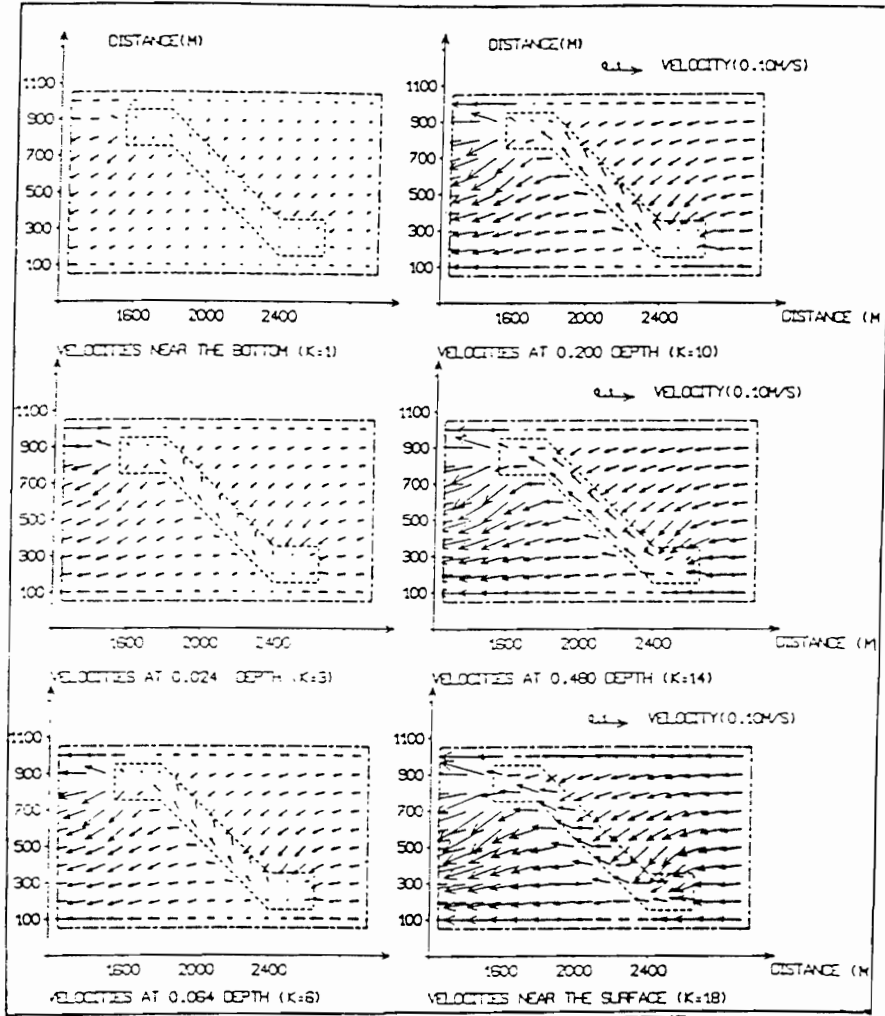
Un tel modèle tri-dimensionnel ne permet cependant pas de traiter facilement des problèmes pratiques à cause de la complexité de sa mise en oeuvre (définition du maillage, introduction de conditions aux limites) et de la durée des calculs.

C'est pourquoi un couplage entre CYHERE et ce code tri-dimensionnel a été effectué à SOGREAH. Ce couplage permet d'avoir une résolution tri-dimensionnelle uniquement dans les zones où cela est indispensable.

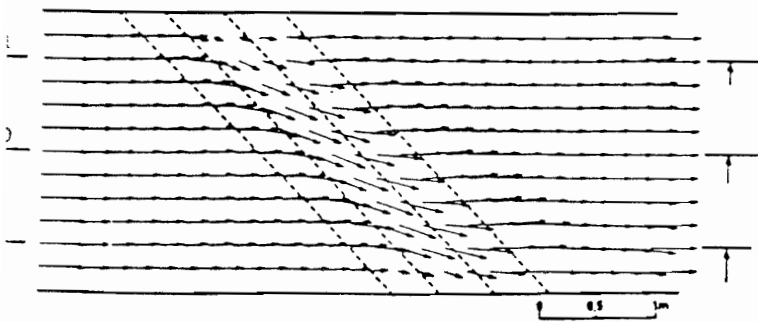
L'utilisation des techniques en éléments finis était limitée jusqu'à ces derniers temps, à la résolution de types privilégiés d'équation et il a fallu l'apparition des ordinateurs actuels pour que, moyennant des recherches approfondies, on puisse adapter la technique des éléments finis aux équations non linéaires des ondes longues. Les avantages de cette méthode résident dans une grande souplesse de maillage qui permet d'étudier avec précision des secteurs d'intérêt tels que les chenaux portuaires ou l'entrée de darses dans lesquelles des tourbillons peuvent apparaître. Les différents laboratoires français se penchent sur cette technique ainsi que certaines sociétés privées (AMTEC par exemple) ou des universitaires et il existe à

---

[42] *Méthodes de modélisation du transport et de la dispersion de polluants rejetés en mer - B. QUETIN et J.M. USSEBLIO-POLATERA - XVIIIe journées de l'hydraulique - S.H.F. Marseille 1984.*



HORIZONTAL VELOCITIES IN THE 3-D BLOCK AT VARIOUS FRACTIONS OF THE DEPTH (SIGMA COORDINATES) AT LOW WATER (SOGREAH)

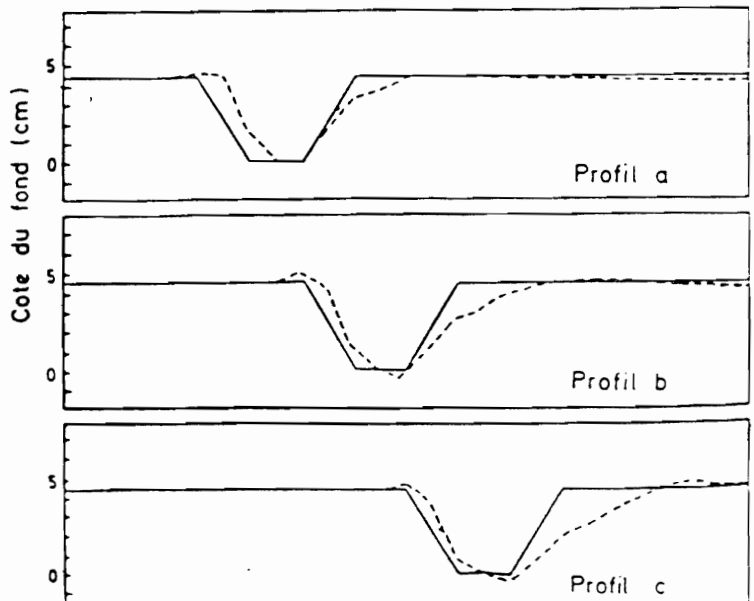


CHAMP DE CONTRAINTES SUR LE FOND

Profils du fond { — Initial, - - - - - Après 2h 20mn

évolution d'un chenal incliné à 45° sur la direction moyenne de l'écoulement

exemples d'application d'une modélisation numérique du charriage sous l'action des courants



l'Université de Compiègne, un logiciel de base "REFLUX" (Modèle aux Eléments Finis applicable aux fluides) qui est un programme bi-dimensionnel prenant en compte comme les modèles OKO ou CYTHERE, les vitesses moyennes sur la verticale.

Il existe actuellement deux logiciels de calcul d'écoulements bi-dimensionnels à surface libre "REFLUX" au S.T.C.P.M.V.N. et à l'U.T.C. et "TELEMAC" au L.N.H. Ces deux logiciels, tous deux basés sur la résolution des équations de Saint Venant, permettent de calculer en chaque noeud le champ de vitesse horizontale ainsi que la hauteur d'eau en tout instant. Ils intègrent, suivant les cas, des modèles de turbulence du type viscosité constante ou longueur de mélange et même pour TELEMAC du type k.E.

A l'étranger, on retrouve les mêmes évolutions dans les techniques des modèles mathématiques hydrauliques avec des possibilités de calculer par les éléments finis les vitesses moyennes sur la verticale et la variation de niveaux dans les estuaires ou les zones côtières mais les temps de calcul imposés par cette méthode nécessitent de limiter les points de maillage et ne permettent pas encore, sauf dans les cas extrêmement simples, d'introduire la troisième dimension et encore moins l'ensemble des mécanismes sédimentaires qui agissent sur un littoral.

### 6.3. MODELES MATHEMATIQUES SEDIMENTOLOGIQUES

Les progrès continuels dans les moyens de calculs offerts par les ordinateurs et les améliorations des connaissances des lois d'entraînement des sédiments, permettent d'aborder des modèles mathématiques sédimentologiques dans des cas relativement simples. Pour les cas plus complexes, une modélisation hybride est actuellement le meilleur compromis coût-qualité pour l'étude des cas pratiques.

On ne peut en effet actuellement atteindre la finesse de définition des écoulements réels sur un modèle mathématique. Par contre sur de grandes étendues à étudier la modélisation physique est coûteuse et peut être imprécise. Cette complémentarité naturelle ainsi que les progrès réalisés dans le pilotage automatique des modèles physiques permettent maintenant de coupler les deux outils pour étudier les cas les plus complexes.

#### 6.3.1. EVALUATION QUALITATIVE DES MOUVEMENTS SEDIMENTAIRES A PARTIR DES RESULTATS DES MODELES MATHEMATIQUES HYDRAULIQUES - ASSOCIATION ENTRE MODELES MATHEMATIQUES ET ETUDES SUR PLANS

On peut toujours, partant des modèles numériques hydrauliques de houle ou de courant, déterminer par le calcul les contraintes tangentielles exercées par l'eau sur les fonds et en appliquant les équations de transport des sédiments, obtenir une cartographie de l'intensité des transports au cours d'une période déterminée et en déduire des prévisions sur les zones probables d'érosion et de dépôt sur une période de

temps assez courte. Partant de ce nouvel état des fonds, il sera ensuite possible de reprendre le calcul hydraulique et de réinjecter dans les résultats des équations de transport. Dans tous les cas, une telle approche ne peut être valable que si l'on a bien pris en compte les transports par charriage et par suspension qui peuvent conduire à des évolutions des fonds diamétralement opposées si l'on s'est trompé dans l'évaluation du pourcentage de chacun de ces types de transport.

Cette association entre modèle mathématique hydraulique et étude sédimentologique sur plans, peut présenter un réel intérêt pour évaluer qualitativement les risques d'érosion ou de sédimentation d'un secteur géographique déterminé. Par exemple, en partant d'une étude statistique des houles au large (direction, fréquence de période et de hauteur) il sera possible à partir des plans de réfraction des houles de définir en chaque point et pour chaque direction de houles du large, le bilan de remaniement sédimentaire local des houles et d'introduire par une évaluation des courants induits dans la couche limite, le bilan de transport résultant dans un sens préférentiel. Sur la côte la même approche permettrait de calculer le transit littoral par direction, la profondeur du transport, le bilan résiduel annuel... Il ne s'agit pas d'une étude approfondie sur modèle mathématique sédimentologique mais d'une approche qualitative des phénomènes sédimentaires par utilisation des résultats des modèles mathématiques hydrauliques en admettant certaines relations entre hauteur des vagues ou vitesses moyennes et contraintes tangentielles exercées par l'eau sur les fonds.

### **6.3.2. ASSOCIATION ENTRE MODELES MATHÉMATIQUES ET MODELES PHYSIQUES : LA MODELISATION HYBRIDE**

La complémentarité naturelle entre modèles physiques et mathématiques trouve sa meilleure expression dans la modélisation hybride qui permet de remplacer une partie d'un modèle physique traditionnel par un modèle numérique. Les deux principaux types de modèles hybrides sont :

- les modèles en temps différé : les conditions aux limites d'un modèle physique sont déterminées par un modèle numérique dont les résultats sont fournis au préalable ; ou bien, à l'inverse, les résultats d'un modèle physique sont utilisés pour régler un modèle numérique,
- les modèles en temps réel : le montage est le même qu'en différé mais les deux modèles fonctionnent simultanément en s'échangeant des informations. Il y a alors interaction constante sur toute la durée de l'essai.

Un exemple classique de modélisation hybride en temps différé est le calcul préalable de la propagation de la houle vers la côte pour définir les conditions de houle au batteur dans un modèle physique d'évolution du littoral.

SOGREAH vient de terminer une étude dans l'estuaire de la Seine avec un tel modèle, la modélisation mathématique fournissant la répartition transversale des courants aux extrémités d'un modèle physique à grande échelle ne représentant que 10 kilomètres d'estuaire.

Enfin sur le modèle sédimentologique de la DIVES, comprenant l'estuaire et une portion de côte, un modèle hybride en temps réel a été testé : l'estuaire et la rivière étaient simulés numériquement. Le niveau d'eau mesuré à l'entrée dans le modèle physique permettait au modèle mathématique de calculer le débit entrant ou sortant qui était alors injecté toutes les 3 secondes.

### 6.3.3. ETUDES FLUVIALES

Plusieurs modèles mathématiques sédimentologiques existent pour traiter globalement les problèmes de transports sédimentaires en rivière et évaluer les modifications moyennes des profondeurs dans les sections.

Les codes de calcul "TRANSO", "EROS", "CARISA", "COURLIS" existent au L.N.H. et les codes "CHAR 1", "CHAR 2" et "CARICHAR" (SOGREAH) fournissent des renseignements très utiles pour évaluer les modifications du lit moyen d'une rivière.

Le modèle mathématique "CHAR 2" (SOGREAH) est un modèle filaire de charriage adaptant automatiquement la forme des sections aux conditions locales des vitesses et des capacités de transport solide à chaque pas de temps de calcul.

Il permet de donner les altérations des volumes transités à l'aval d'un bief et l'évolution moyenne de ses propres fonds en fonction :

- des hypothèses introduites sur les formules de transports solides à utiliser,
- des différences introduites sur les apports solides en amont du bief considéré,
- des extractions pratiquées dans l'emprise du modèle et de la cadence de ces extractions.

Il modélise également les dépôts dans les réservoirs.

Ce modèle permet de donner l'impact général sur les phénomènes de transports solides sans en donner les détails locaux. Cet impact se mesure par les quantités charriées annuellement en aval et en toutes sections dans la zone considérée, avant, pendant et après les travaux ainsi que par l'évolution des fonds moyens de chaque section. Il permet donc de franchir une étape dans la conception du projet d'ensemble.

Il ne peut calculer par contre, étant uni-dimensionnel, la répartition des érosions (ou des sédimentations) sur l'étendue de chaque section ni, éventuellement, entre les différents bras d'une rivière. Ces études détaillées des phénomènes locaux et de dimensionnements plus fins des travaux devront avoir recours, si nécessaire, aux modèles physiques sédimentologiques qui permettent d'aborder les phénomènes tri-dimensionnels. Il s'agit là d'une modélisation hybride qui illustre bien la complémentarité des deux outils.

Le code de calcul "CARICHAR" améliore encore les possibilités de "CHAR 2" en incluant les effets de tri granulométrique, de pavage, d'adaptation du transport réel aux conditions locales de l'écoulement (mise en suspension progressive) et en calculant à la fois le transport par charriage et en suspension.

Le modèle mathématique "COURLIS" (L.N.H.) permet d'évaluer les dépôts et les érosions dans une retenue de barrage en fonction de la répartition des rigidités (ou des cohésions) dans les dépôts des sédiments (vases ou limons) et des actions hydrauliques qu'ils subissent (hydrogrammes de crues, hauteurs d'eau...).

Le modèle couple un calcul mono-dimensionnel de l'écoulement avec une description bi-dimensionnelle des échanges sédimentaires avec le fond, les lois étant déduites d'essais en canal sur des matériaux ayant les mêmes caractéristiques rhéologiques [43].

Le modèle d'écoulement est un modèle filaire classique et le modèle sédimentologique est basé sur la résolution d'une équation de transport diffusif de concentration de matière en suspension donnée. A chaque noeud, la contrainte de cisaillement exercée par l'écoulement sur les fonds vaseux est calculée à partir de la vitesse moyenne et du tirant d'eau local. On calcule ensuite, en fonction de cette contrainte, les débits d'érosion ou de dépôt.

Avec le modèle "REFLUX", qui est un code de calcul bi-dimensionnel horizontal aux éléments finis, un modèle numérique bi-dimensionnel de charriage a été mis au point en utilisant la méthode des éléments finis. Le code "MEFCHA" a fait l'objet de confrontations satisfaisantes dans des cas très simples [44].

Cette méthode offre l'avantage d'une grande souplesse d'utilisation en prenant en compte des géométries très complexes par l'intermédiaire d'éléments de dimensions et d'orientations différentes.

---

[43] *Simulation numérique de l'érosion des vases de retenue par les crues* - J.B. BOUCHARD, M. CORDELLE, J. LORIN - *Houille Blanche* n° 3/4 - 1989.

[44] *La modélisation du transport solide par charriage à l'aide d'un modèle aux éléments finis* - J.P. TANGUY, G. DHATT, M. FRENETTE, P. MONADIER - *Houille Blanche* n° 3/4 - 1989.

Un tel modèle permet de préciser les évolutions des fonds dans des secteurs très tourmentés comme par exemple aux alentours d'un épi soumis à des courants uni-directionnels {Figure 33} ou dans des zones de réduction brutale des largeurs d'un canal.

#### 6.3.4. ETUDES MARITIMES

Partant des résultats mathématiques hydrauliques de propagation des houles et des courants, on peut toujours imaginer calculer, pas de temps par pas de temps, les mouvements sédimentaires et les évolutions des fonds en résultant avec leurs répercussions sur les phénomènes hydrauliques. Théoriquement il ne devrait pas y avoir de problèmes insurmontables.

En fait, les interactions entre les paramètres hydrauliques et sédimentologiques sont telles qu'il est difficile de les appréhender facilement notamment avec des modèles bi-dimensionnels et que l'on doit imaginer un certain nombre de simplifications permettant de rester dans des temps de calcul raisonnables pour étudier la simulation à long terme des mécanismes sédimentaires.

Le modèle "TRANSO" (L.N.H.) permet d'avoir une approche des phénomènes en récupérant en chaque point du maillage les caractéristiques de l'écoulement (hauteur - vitesse) d'un modèle hydrodynamique à partir d'une modélisation appropriée et en calculant le transport solide en ces points. A chaque pas de temps l'évolution des fonds est alors obtenue en appliquant aux sédiments l'équation de continuité et en réactualisant ensuite l'écoulement.

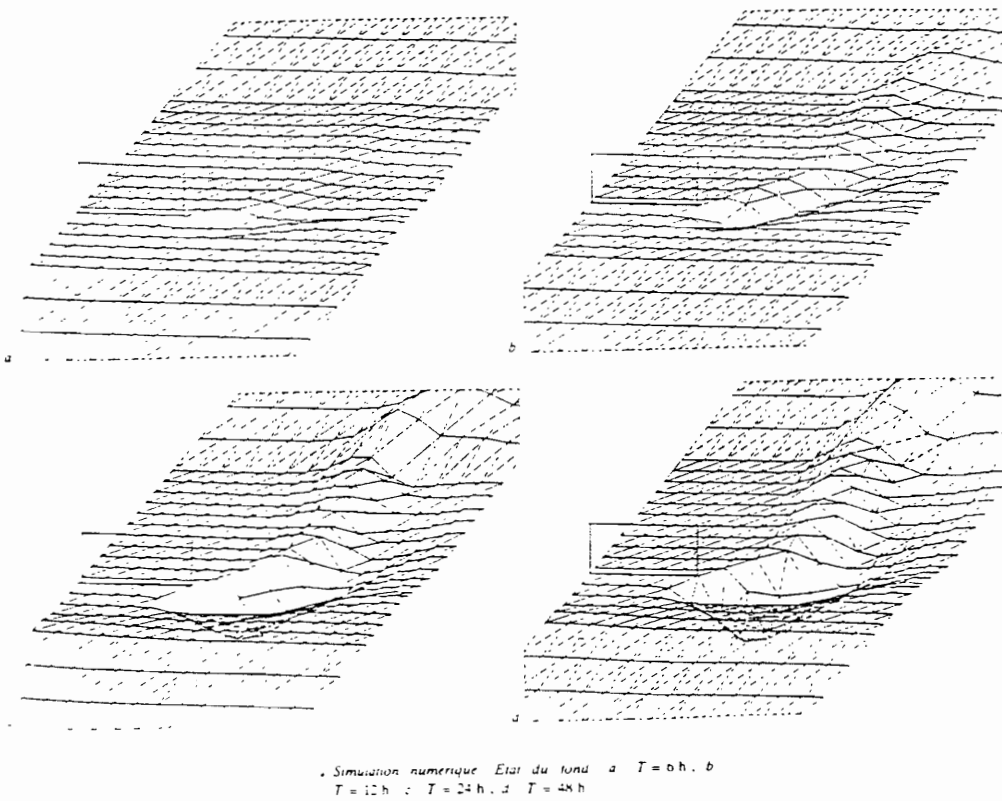
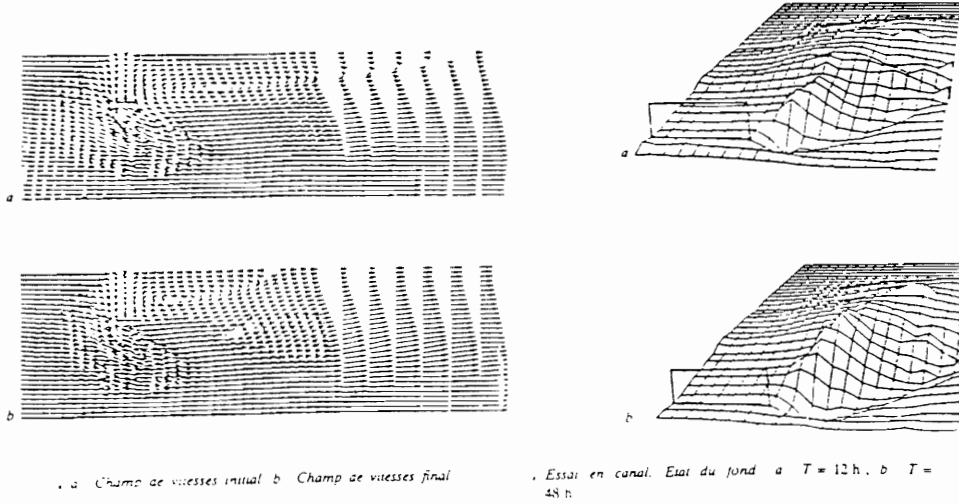
La simulation des fonds à long terme conduisant à des calculs très lourds, différentes simplifications sont introduites en supposant soit que les écoulements ne sont pas modifiés tant que les évolutions de fonds ne dépassent pas un certain seuil, soit en représentant par exemple "N" marées par une seule. Les phénomènes deviennent difficiles à prendre en considération lorsque le fond est pratiquement en équilibre dynamique avec l'écoulement et que l'on introduit un ouvrage qui perturbe fortement l'écoulement et entraîne des évolutions sédimentaires rapides ; il y a alors une disproportion entre les valeurs adoptées par les pas de temps de calcul limitant la validité des résultats.

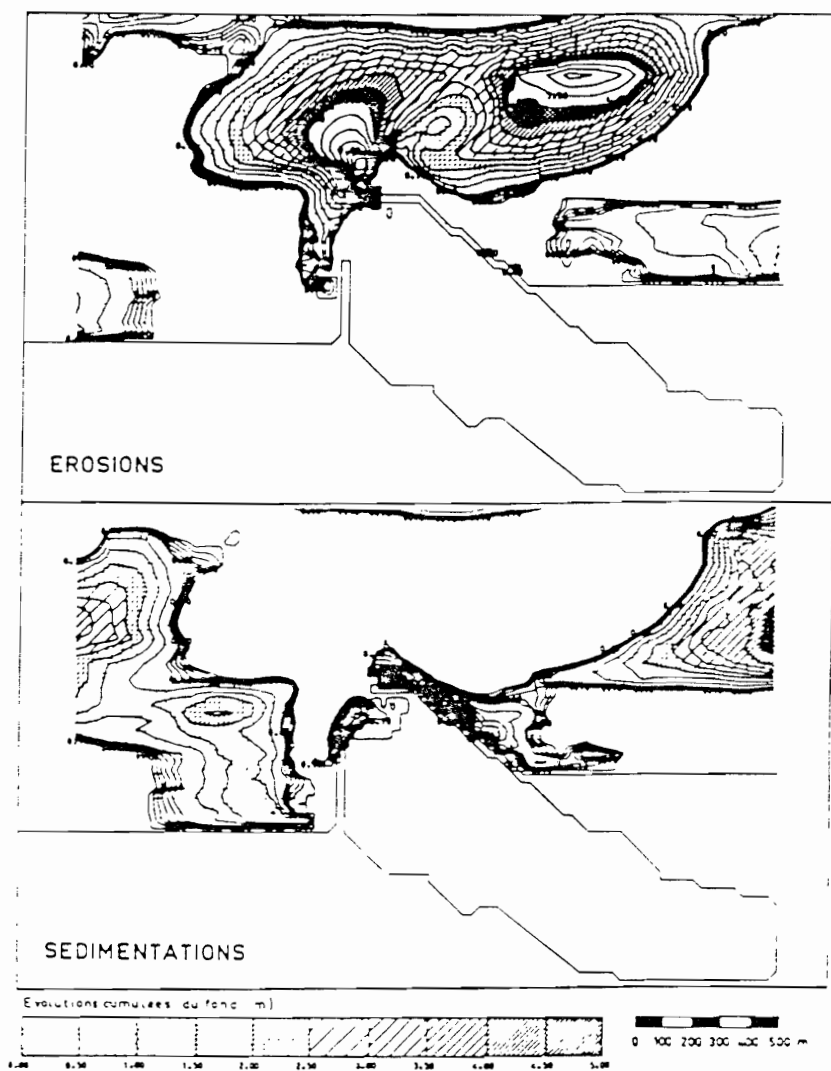
Ces modèles mathématiques sédimentologiques de transport par les courants sont, par ailleurs, tributaires de la dispersion des valeurs des débits solides en fonction des formules utilisées et de l'aspect très pointu de la loi de transfert écoulement instantané - évolution des fonds [36].

La Figure 34 illustre certains résultats qui ont pu être obtenus pour l'évolution des fonds devant l'avant port de Calais en précisant bien que l'évolution des fonds ne résulte pas directement du transport, mais de sa variation spatiale, qui est d'un ordre inférieur en précision.

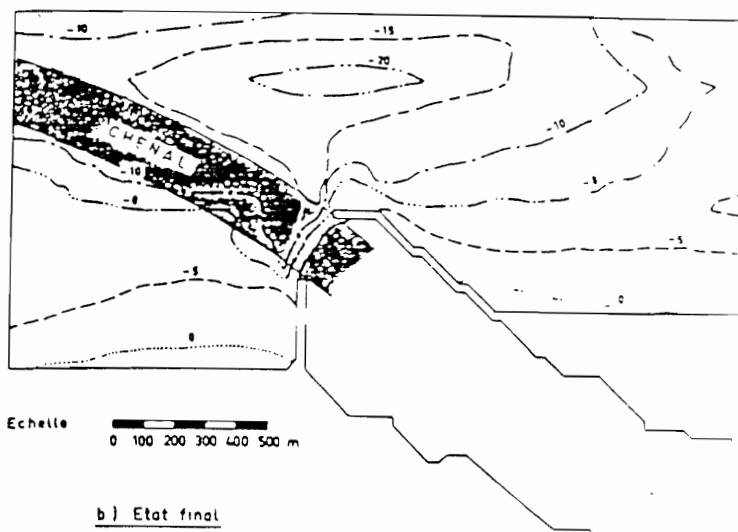
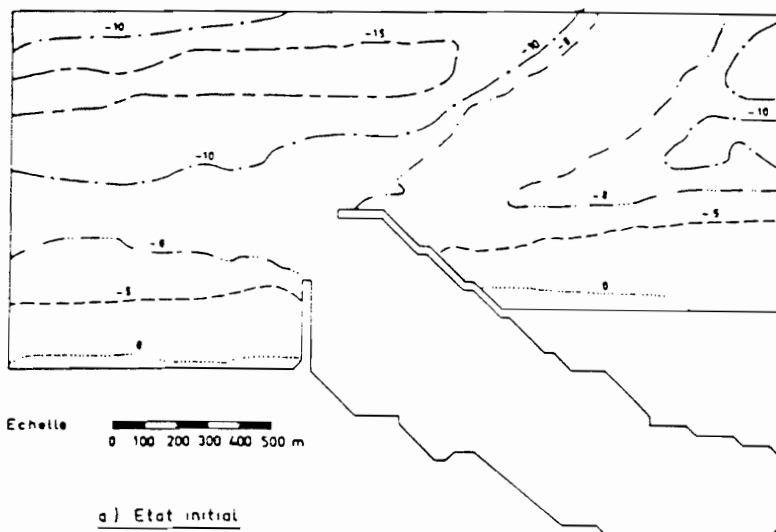


La modélisation du transport solide  
par charriage à l'aide d'un modèle aux éléments finis



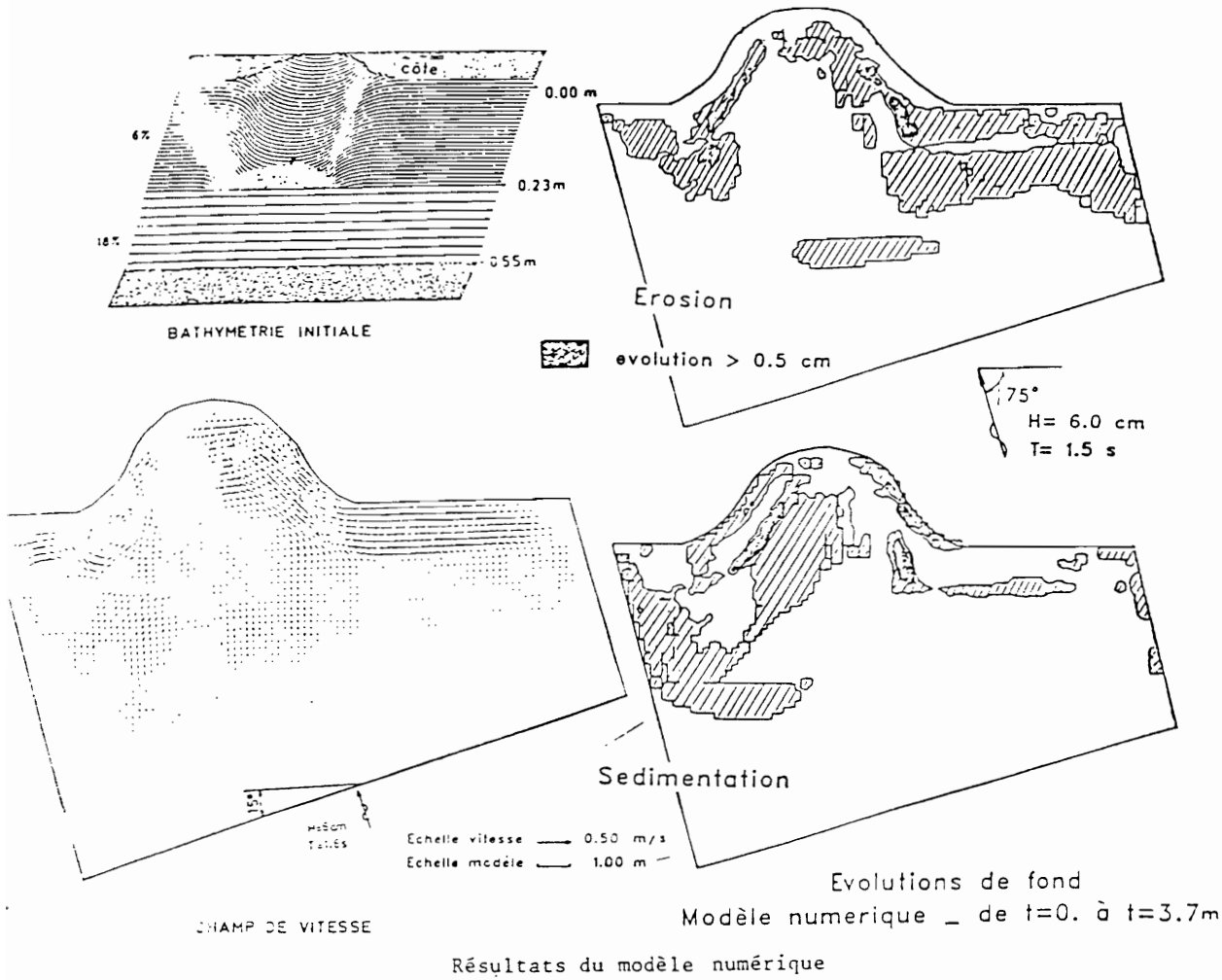


NOUVEL AVANT PORT DE CALAIS  
évolution des fonds après 8 ans



### 35

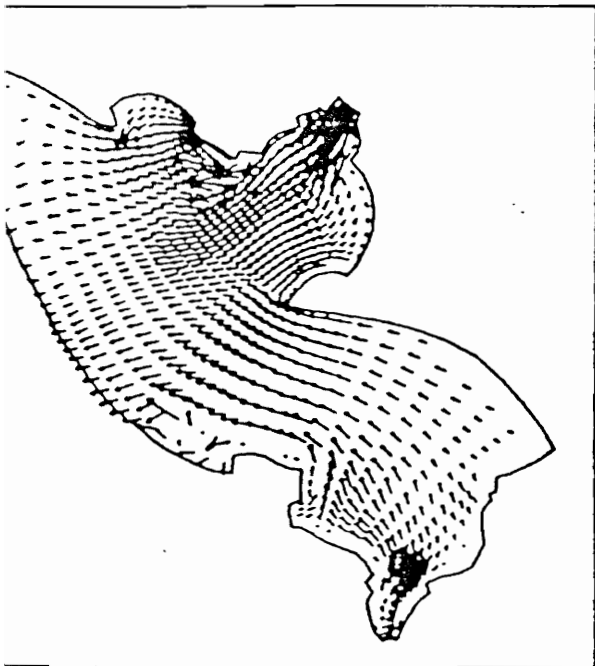
#### MODELE DE TRANSPORT LITTORAL SOUS L'ACTION DE LA HOULE



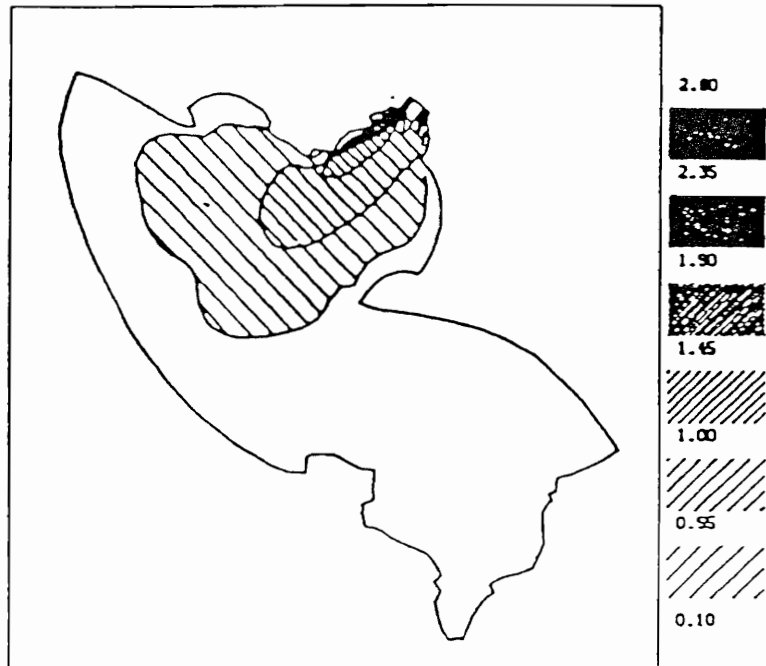
### 36

#### MODELE BIDIMENSIONNEL DE L'ESTUAIRE DE LA LOIRE CRUE - VIVE EAU 2 HEURES APRES PM A ST NAZAIRE.

Champs de courants



ISO concentration en suspension (G/L)



Le modèle "LITTO" (SOGREAH) permet de calculer l'évolution du trait de côte dans un littoral sans barre soumis à un transit littoral sous l'action d'un gradient longitudinal des houles réfractées ou diffractées. Ce modèle est applicable à des côtes simples, régulières et ne présentant pas de discontinuités particulières.

Les résultats obtenus peuvent compléter ceux donnés par un modèle physique sédimentologique en permettant d'extrapoler les résultats sur des distances beaucoup plus grandes que celles prises en considération dans les limites du modèle. Ils permettent également d'avoir une première approche globale des phénomènes d'évolution du littoral en fournissant des résultats. Là encore une modélisation hybride permet de réduire les coûts d'une étude tout en répondant aux objectifs fixés.

En partant des résultats hydrauliques du modèle "COURHOUL" (L.N.H.), une évaluation de l'évolution des fonds sous l'action des courants de houle a été faite à l'aide d'une formule de transport solide. La validation du code correspondant "TRADEF" est en cours [38].

Le calcul d'évolution des fonds adopté utilise successivement trois modèles : propagation et déferlement des houles, courants de houle, transport et évolution des fonds.

Bien qu'il soit possible d'utiliser les phénomènes de réfraction et de diffraction, la nécessité de réduire les temps de calcul impose de se limiter à la réfraction seule. De même, les phénomènes de variation de la zone de déferlement au cours de la succession des vagues en trains d'ondes ou aléatoires ne sont pas pris en considération. Le modèle considère uniquement une houle du type monochromatique et admet une certaine répartition des vitesses de courant de houle entre le déferlement et la côte. Le champ de transport est évalué par la formule de BIJKER qui prend en compte les phénomènes d'entraînement par la vitesse moyenne et la mise en suspension des grains par la vitesse orbitale de la houle.

La Figure 35, établie par le L.N.H., donne la comparaison entre les résultats obtenus par ce code de calcul sur une baie semi-circulaire soumise à la houle par rapport aux évolutions des fonds constatées sur un modèle réduit physique de mêmes caractéristiques.

#### **6.3.5. MODELES ESTUARIENS - REPRESENTATION DES TRANSPORTS DE VASE**

Sur le plan hydraulique, le modèle CYTHERE permet d'évaluer la propagation des marées et des courants avec une représentation bi-dimensionnelle des phénomènes, les valeurs étant moyennées sur la verticale. Le modèle ERIKA (L.C.H.F. - BIESEL), au contraire, tient compte de la répartition des vitesses et densités sur la verticale mais reste un modèle filaire sur la longueur, les lois de variation de largeurs étant estimées par une loi de continuité théorique. Ce modèle ERIKA donne les répartitions des salinités, polluants et éventuellement des suspensions sur la verticale le long des estuaires. Le code de calcul

"STRATEST" bi-dimensionnel vertical permet de calculer simultanément les profils des courants sur la verticale, la répartition de la salinité et des sédiments en suspension ainsi que la température.

Pour le transport des vases en suspension sous l'action des courants, 2 systèmes ont été développés au L.N.H. permettant de traiter respectivement les aspects verticaux et horizontaux du phénomène [39 - 45 - 46].

Le premier résout l'équation bi-dimensionnelle verticale de transport-diffusion de concentration sur un domaine variable dans le temps et dans l'espace : un changement de variable adéquat conduit à un domaine rectangulaire fixe avec mailles raffinées près du fond, pour tenir compte des forts gradients de concentration et de diffusivité turbulente dans cette zone.

Ce modèle traite également l'érosion de sédiment, son dépôt et son tassement par gestion de différentes couches du fond caractérisées par une concentration de dépôt, une contrainte critique de début d'érosion et un temps de séjour à l'issue duquel la vase passe dans la couche inférieure, plus consolidée.

Ce modèle a permis notamment de déterminer dans quelles conditions l'homogénéité verticale de la concentration était suffisante pour autoriser l'intégration sur la verticale de l'équation de transport-diffusion de concentration.

Le second modèle, dont le domaine de validité a ainsi été cerné à l'aide du premier, résout sur un maillage curviligne-orthogonal l'équation bi-dimensionnelle intégrée sur la verticale de transport-diffusion de concentration.

La Figure 36 montre un exemple d'application au cas de l'envasement de l'estuaire externe de la Loire sans représentation de la houle, ce qui peut expliquer les différences très appréciables avec ce qui se passe en Nature.

Comme l'a montré M. B. LATTEUX [39] :

"Les limites actuelles spécifiques de ces types de modèle résident d'abord dans la reproduction de l'hydrodynamique, telle la simulation des gradients de salinité en estuaire, qui est un lieu privilégié de transport de vase en suspension ; de même les concentrations importantes, qui engendrent des courants de turbidité couplant l'hydrodynamique aux phénomènes sédimentaires, ne peuvent être reproduits".

---

[45] *Numerical models for sediment transport in suspension in coastal areas* - B. LATTEUX - Ch. TEISSON - *Euromech Colloquium 192 - Munich 1985.*

[46] *New advances in numerical modelling of suspended sediment transport in the Loire estuary* - I.A.H.R. - *Copenhagen 1988.*

"Les actions supplémentaires de la houle et du vent sur la reprise et la dispersion des sédiments ne sont également pas prises en compte".

"Signalons enfin le problème de simulation à long terme, où le phénomène de tassement, d'échelle de temps intermédiaire entre celles de l'hydrodynamique et de l'évolution des fonds, ne permet pas d'appliquer les procédures utilisées pour le sédiment non cohésif".

"Parmi les axes actuels de recherche, la modélisation de la dimension verticale permettrait d'étendre le domaine d'utilisation de ce type de modèle : un modèle soit tri-dimensionnel, soit bi-dimensionnel horizontal couplé avec une simulation mono-dimensionnelle verticale, pourrait alors traiter les problèmes de décantation de vase dans les zones abritées (où les profils de concentration, même de sédiments très fins, ne sont plus homogènes) et le transport en charriage-suspension de sédiments non cohésifs où les profils verticaux de concentration sont également très hétérogènes".

"De même l'élaboration d'un modèle bi-dimensionnel vertical couplant l'écoulement, la salinité et le transport en suspension serait particulièrement adapté à l'étude des problèmes estuariens". Un tel code a été développé à SOGREAH (code STRATEST).

#### 6.4. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES MODELES REDUITS SEDIMENTOLOGIQUES PHYSIQUES ET DES MATHEMATIQUES - PERSPECTIVES D'AVENIR

On oppose souvent modèles physiques et modèles mathématiques alors que ces deux outils puissants et remarquables sont complémentaires et ne répondent pas aux mêmes préoccupations, n'ont pas les mêmes possibilités.

Comme l'a exprimé M. J. FISCHER, I.C.P.C., après avoir eu la responsabilité technique de recherches sur modèles physiques et mathématiques [47]

"Certes le modèle mathématique verra ses possibilités continuer à se développer considérablement au cours des prochaines années grâce à l'amélioration des performances des ordinateurs et des algorithmes de calcul, mais dans l'état actuel le modèle physique reste encore le seul outil valable pour répondre à certaines questions et il est probable qu'il continuera à y répondre seul valablement encore de longues années. Il faut considérer également que les modèles physiques, et notamment les modèles sédimentologiques, ne sont pas figés et qu'ils bénéficient eux aussi de progrès techniques constants grâce à une meilleure représentation des divers sédiments en similitude et à l'utilisation de l'informatique qui permet d'automatiser certaines tâches et d'accélérer le dépouillement et l'exploitation des essais..."

---

[47] *Modèles mathématiques et modèles physiques en hydraulique - J. FISCHER - Bulletin P.C.M. - Ponts et Chaussées - 1985.*

Il est difficile de préciser les avantages et inconvénients des modèles réduits physiques sédimentologiques et des modèles mathématiques sédimentologiques puisque les premiers bénéficient d'une longue expérience et leurs prévisions ont pu être contrôlées par les résultats obtenus en Nature depuis plusieurs décennies alors que les seconds ont été développés récemment.

Par contre, les modèles purement hydrauliques, qu'ils soient physiques ou mathématiques, ont déjà tous deux une antériorité qui permet de juger de leur validité et de les comparer avec leurs avantages et leurs inconvénients propres. Dans ce domaine on peut dire que les modèles mathématiques hydrauliques permettent d'englober des surfaces importantes avec, en général, des répartitions moyennes des phénomènes sur la verticale (modèles bi-dimensionnels), alors que les modèles physiques sont limités à des secteurs moins étendus dans lesquels il est nécessaire de représenter en détail l'ensemble des phénomènes hydrauliques naturels : tourbillons, houles aléatoires ou en trains d'ondes...

Dans ce domaine dimensionnel des surfaces à représenter, modèles mathématiques et modèles physiques sont particulièrement complémentaires, les études sur modèles mathématiques pouvant, dans certains cas, être jugées comme suffisantes si les problèmes à étudier ne nécessitent pas des recherches très détaillées dans des zones étroites ou nécessitant une bonne connaissance des répartitions des phénomènes sur la verticale. Ce sera le cas par exemple pour une étude de propagation de houle ou d'agitation à l'intérieur d'un plan d'eau portuaire ou de la répartition d'un champ de courants aux abords d'un littoral ou d'un estuaire.

Dans tous les cas, qu'il s'agisse de modèles physiques ou mathématiques, tous deux ont des impératifs communs basés sur la CONNAISSANCE DES PHENOMENES NATURELS à reproduire aux limites des modèles et la nécessité de vérifier la validité des outils utilisés en procédant à leur ETALONNAGE, c'est-à-dire la vérification des phénomènes connus en Nature sous des actions hydrauliques et sédimentologiques précises (lignes d'eau, laisses de pleines mers et de basses mers, propagation de la marée et de la salinité, évolution des fonds au cours d'une période déterminée sous les mêmes actions hydrauliques en Nature, triages granulométriques...).

#### 6.4.1. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES MODELES PHYSIQUES SEDIMENTOLOGIQUES

##### Avantages

- basés sur des lois de similitude appropriées aux objectifs de recherches,
- sont utilisés depuis de nombreuses années permettant d'apprécier la validité des prévisions [25] et d'apporter des améliorations dans la reproduction des phénomènes sédimentaires,

- possibilité de représenter simultanément à trois dimensions l'ensemble des phénomènes hydrauliques (marée, houle, courant) avec leur succession dans le temps : cycles de marées, courants associés, houles aléatoires ou en trains d'ondes, cycle annuel de houles avec les variations continues de hauteurs, périodes et directions des vagues, hydrogramme de débits des rivières...
- grand choix de matériaux mobiles pour représenter en similitude les lois de transport en charriage et en suspension des sédiments (galets, graviers, sables, silts), possibilité de respecter les lois de consolidation et de transport des sédiments cohésifs (vases ou limons) avec la floculation, tassement, rhéologie, vitesse critique d'érosion, turbidité..., possibilité de représenter les algues et certains polluants,
- représentation correcte des transports simultanés en charriage et en suspension : respect des triages granulométriques,
- interactions continues entre les variations des profondeurs, l'évolution des phénomènes hydrauliques et la rugosité (dunes, rides... vases fluides ou plastiques...),
- visualisation des phénomènes et comparaison directe avec la nature : les utilisateurs peuvent contrôler à tout moment les phénomènes qui pourront se produire à la suite d'un aménagement ou de la réalisation d'un ouvrage,
- possibilité de représenter des évolutions sur des durées importantes de 10 à 25 ans grâce à des échelles réduites des temps sédimentologiques (par exemple un an reproduit en 8 heures sur un modèle sédimentologique littoral),
- possibilité d'étudier en détail certains phénomènes sédimentaires agissant sur des zones limitées en choisissant des échelles appropriées ou d'avoir une vue d'ensemble des évolutions des fonds sur une portion du littoral de 5 à 10 km de longueur ou sur l'ensemble d'un estuaire et de son embouchure,
- possibilité d'utiliser des "cuves types" comportant les installations appropriées pour la représentation de la houle (générateurs pivotants), de la marée (lois de niveau), des courants (répartiteurs des débits aux limites du modèle)... ainsi que tout l'appareillage de mesures. Ces possibilités permettent dans certains cas d'implanter un secteur du littoral à étudier dans une cuve existante et de réduire ainsi la durée de construction et son prix.

### Inconvénients

- encombrement assez grand nécessitant des superficies de halls d'essais appréciables (la superficie d'un modèle sédimentologique peut atteindre 800 à 1000 m<sup>2</sup> pour un très grand modèle et 100 m<sup>2</sup> pour un petit modèle),



- absence de pérennité : on ne peut conserver très longtemps un modèle physique après son exploitation par suite de son encombrement et du prix des installations immobilisées. De même, il n'est pas transportable,
- difficulté de représenter de très grandes étendues par suite de la nécessité de rester dans une gamme d'échelles de similitude acceptable et de l'encombrement que cela entraînerait (plaque tournante pour représenter la force de Coriolis dont l'effet sur les courants marins est sensible lorsqu'elle s'exerce sur de grandes étendues),
- similitude délicate pour tenir compte de l'ensemble des phénomènes (houles, marées, courants) ; nécessité d'adapter les échelles entre elles pour réduire les incompatibilités,
- maniement délicat nécessitant des laboratoires très spécialisés et minutieux dans la reproduction des phénomènes sédimentaires avec leur succession dans le temps,
- disposer d'un stock de matériaux très diversifiés pour représenter les différents sédiments naturels aux échelles choisies. Pour les vases, nécessité de suivre leur évolution en fonction des caractéristiques des eaux (température, sels dissous...),
- durée des études et prix de revient assez importants (2 mois à 2 ans suivant l'étude, 300 000 à 2 000 000 F.) tendant à diminuer grâce à l'évolution de l'appareillage et à une meilleure connaissance des lois de l'hydrodynamique sédimentaire (réduction considérable de la durée de tarage des modèles).

#### Perfectionnements apportés

- meilleure connaissance des lois de similitude dans la représentation des matériaux cohésifs en particulier pour les études d'efforts sur les navires circulant dans les chenaux envasés,
- amélioration du matériel de reproduction des phénomènes hydrauliques naturels : vagues aléatoires, programmation automatique des cycles hydrauliques reproduits,
- enregistrements instantanés et en continu (sans arrêter le modèle) des évolutions des fonds : sondes à ultra-sons, sondes densimétriques... Dépouillement automatique des résultats au fur et à mesure du déroulement des essais,
- amélioration des phénomènes de transport sous les actions cumulées de la houle et des courants (adaptation des échelles des temps sédimentologiques),
- utilisation de traceurs radioactifs sur les modèles pour vérifier les mouvements sédimentaires et les comparer aux mesures faites en Nature,

- recherche d'une méthodologie de construction des modèles physiques permettant de réduire leur coût tout en conservant les précisions du modelage des fonds.

#### 6.4.2. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES MODELES MATHÉMATIQUES

Les modèles mathématiques sédimentologiques étant encore à l'état de recherches - en dehors de certains modèles simples qui sont opérationnels - nous avons étendu nos réflexions à l'ensemble des modèles mathématiques en partant du principe que les avantages apportés par les modèles hydrauliques offrent d'ores et déjà des possibilités pour engager des études sédimentologiques sur plans très valables (modélisation hybride).

##### Avantages

- peuvent englober des étendues très importantes (Manche, embouchure d'un estuaire, ensemble d'une zone littorale...) et être transposés à des secteurs plus réduits en partant des conditions aux limites du modèle d'ensemble,
- exploitation assez rapide et prix de revient intéressant, lorsque le code de calcul existe,
- possibilité de conservation pratiquement infinie (mais tenir compte des modifications très rapides des outils de calcul) et facilité de transportabilité permettant au client de récupérer éventuellement l'outil qui a servi aux études (si le code de calcul a été établi spécialement pour cette étude),
- peuvent traiter actuellement de nombreux problèmes d'hydraulique purs avec une bonne précision : écoulements moyens en rivière, ressaut, réfraction diffraction réflexion des houles, simulation des courants de marées, prise en compte du vent...
- permettent d'étudier à grande échelle la superposition des phénomènes hydrauliques et océanographiques ou météorologiques : introduction des forces de Coriolis, du vent sur le plan d'eau, de l'action des houles... dans un modèle de courantologie du type CYTHERE,
- apportent des éléments hydrauliques pour aborder les phénomènes de transports sédimentaires et fournissent des indications sur les conditions aux limites de modèles réduits physiques éventuels,
- peuvent traiter la répartition des polluants dans les "champs lointains" en admettant certaines lois de diffusion,

- fournissent d'ores et déjà des indications précises sur les évolutions moyennes des fonds dans une rivière soumise au charriage et des ordres de grandeur des transports en suspension des vases sous l'action des courants de marées,
- visualisation de plus en plus conviviale avec l'apparition de processus graphiques spécialisés et les images de synthèse. Possibilités d'animation vidéo en temps réel.

### Inconvénients

- mode de calcul délicat et long à mettre au point (plusieurs mois voire plusieurs années),
- nombre de mailles limité ne permettant pas une finesse suffisante pour étudier un chenal étroit ou des tourbillons de faibles dimensions. Cet inconvénient peut être éliminé partiellement par le recours à des modèles emboîtés,
- difficultés de faire des modèles tri-dimensionnels qui prennent en compte les variations des vitesses, densités... sur la verticale,
- temps de calcul très longs si l'on veut représenter les successions des phénomènes hydrauliques : cycles de marées, cycles de houles, superposition des phénomènes hydrauliques...
- difficultés d'aborder les phénomènes sédimentologiques par suite des incertitudes sur la validité des formules utilisées et du temps de calcul pour la discrétisation de l'espace et du temps et des interpolations successives que l'on doit faire à chaque pas de calcul - donc à des approximations,
- difficultés de maîtriser la "diffusion numérique" qui peut être plus importante que la diffusion physique réelle et de prendre en compte les interactions entre les évolutions et les formes des fonds (lits plats, dunes, rides...) avec les phénomènes hydrauliques,
- herméticité des modèles mathématiques qui ne permet pas aux clients de suivre l'évolution des phénomènes au cours du calcul, sauf si une visualisation conviviale a été mise en oeuvre.

### Perfectionnements apportés

S'agissant d'une science relativement récente, les perfectionnements ne pourront que progresser fortement et couvrir des domaines de plus en plus complexes dont celui de la sédimentologie dynamique.

- possibilités d'utiliser les techniques des éléments finis aux équations non linéaires des ondes longues : grande souplesse de maillage qui permet d'étudier avec précision des secteurs d'intérêt privilégié,

- développement de modèles tri-dimensionnels,
- prise en compte des gradients de densité qui peuvent modifier fortement les écoulements [33],
- modélisation simultanée des phénomènes de transports en suspension et en charriage sous l'action des courants et des houles agissant seuls ou simultanément,
- représentation des dépôts des vases en respectant leurs propriétés physiques et leur évolution dans le temps et l'espace (gradients de densité et de rigidité dans les dépôts, influence du transport solide en fonction de la turbidité des eaux...),
- amélioration des lois de transport des sédiments cohésifs et non cohésifs sous les différentes actions hydrodynamiques...
- animation graphique - ou imagerie électronique - des résultats obtenus à l'aide des modèles mathématiques (visualisation des courants, de la propagation des houles, de l'évolution d'un littoral, des apports sédimentaires dans un port...).

#### 6.5. CONCLUSIONS

Si les modèles réduits physiques sédimentologiques ont fait leurs preuves, permettant de représenter les phénomènes complexes d'interaction entre les houles et les courants, l'ensemble des mouvements sédimentaires, y compris ceux liés aux déplacements des vases dans les estuaires, ils nécessitent de s'entourer de grandes précautions dans le choix des échelles, des matériaux mobiles, dans la méthodologie des études. De tels outils, s'ils veulent rester parfaitement fiables, ne peuvent supporter la médiocrité et de faire des impasses sur la représentation des phénomènes hydrauliques dans leur succession dans le temps, ni dans la représentation des transports en charriage et en suspension. Ils ne peuvent être conservés indéfiniment par suite de leur encombrement et doivent être dans toute la mesure du possible couplés avec des petites ordinateurs pour obtenir des dépouillements automatiques et instantanés des résultats permettant de réduire la durée des études et de ce fait, leur prix de revient [31].

De la même manière le modèle mathématique n'est pas un outil dont on doit sous-estimer la difficulté et l'importance. La construction d'un code de calcul ou d'un modèle mathématique nécessite du personnel hautement qualifié et formé à ces nouvelles techniques. Cette qualification ne peut être obtenue que dans un petit nombre d'instituts qui ont déjà une relativement "longue" expérience dans ce nouveau domaine.

Précisons enfin pour terminer, que toutes ces méthodes de recherches et de mesures à l'aide de modèles, que ce soit des modèles physiques ou des modèles mathématiques, ne peuvent prendre toute leur valeur qu'en s'appuyant sur la connaissance exacte des phénomènes naturels, véritable base de toutes les recherches hydrosédimentaires.

\*           \*

\*

## CONCLUSION

## CONCLUSIONS

La complexité des mouvements sédimentaires, sous les différentes actions hydrauliques et océanographiques, nécessite de procéder à des études préliminaires très complètes avant de réaliser des aménagements maritimes, estuariens ou fluviaux.

Après avoir fixé les OBJECTIFS que l'on désire obtenir, et les avoir situés dans un cadre très général, les études doivent permettre de définir les PARAMETRES HYDROSEDIMENTAIRES qui interviennent, afin de PREVOIR les répercussions des ouvrages envisagés, COMPRENDRE les phénomènes, tenter de REMEDIER aux difficultés rencontrées que ces difficultés soient dues à l'ensablement ou à l'envasement d'installations portuaires, de chenaux ou de barrages ou à des érosions des berges d'un fleuve ou d'un littoral.

Ces études ne doivent pas se limiter aux simples prévisions de l'évolution des fonds mais doivent également englober les influences que les aménagements peuvent avoir à court ou à long terme sur l'environnement, la faune et la flore, la qualité des eaux et des plages, les aspects esthétiques, financiers et humains.

DEFINIR LES PARAMETRES HYDRAULIQUES qui interviennent sera la base même des études. La connaissance des courants, des débits, des marées et surélévations météorologiques des eaux, des houles et des mers de vents, des actions éoliennes... est indispensable pour évaluer les contraintes exercées par le fluide sur les sédiments.

PRECISER LA NATURE DES SEDIMENTS soumis à ces actions hydrodynamiques sera le complément nécessaire pour estimer, à partir des lois de l'hydrodynamique sédimentaire, l'importance et le sens des mouvements des matériaux. En appliquant les lois de continuité on pourra ensuite EVALUER LES EVOLUTIONS DES FONDS sous les différentes actions hydrauliques et océanographiques ainsi que les interactions entre ces modifications des fonds, en altitude et en forme, sur les phénomènes hydrauliques. De proche en proche, "pas de temps par pas de temps", il sera ainsi possible d'avoir des présomptions sur l'évolution des phénomènes sédimentaires.

Les schémas de la dynamique sédimentaire fluviale, marine et estuarienne {Figures 1 à 3} donnent un aperçu des paramètres susceptibles d'intervenir et qu'il faut, dans tous les cas, resituer dans un contexte géologique général pour tenir compte des phénomènes anciens qui ont marqué les rivages et les fleuves et qui continueront d'agir sur eux par suite des lentes fluctuations du niveau marin ou de phénomènes tectoniques quelquefois plus brutaux.

Les MOYENS D'ETUDE de ces phénomènes sédimentaires font appel à différentes disciplines et à différentes techniques dont la Figure 7 donne un aperçu.

Tenir compte tout d'abord des **DONNEES EXISTANTES** et des observations qui ont pu être accumulées depuis de longues périodes sur un site déterminé : anciennes cartes, mesures hydrologiques et océanographiques, évolution des berges et du trait de côtes, photographies aériennes. .. remarques faites par les riverains ou certains chercheurs et notées dans différents ouvrages du Service Hydrographique de la Marine, de l'Institut Géographique, des Mairies, des Services des Ponts et Chaussées... Toutes ces données seront classées, étudiées, analysées et mises sous forme de synthèse apportant des éléments pour les objectifs que l'on s'est fixés.

L'EXAMEN DU SITE apportera, à travers la morphologie du terrain, des éléments pour estimer les évolutions qu'il subit. On devra toutefois situer ces évolutions dans un cadre plus général et éviter de généraliser un phénomène transitoire, dû à des actions hydrauliques passagères, à des variations susceptibles de se produire à long terme.

Les **MESURES EN NATURE**, hydrographiques, bathymétriques, océanographiques, hydrauliques et sédimentologiques fourniront, si elles n'ont pas déjà été faites, les éléments de base indispensables pour aborder les recherches. On devra, ici encore, tenir compte des phénomènes temporaires ou épisodiques et s'assurer que les mesures réalisées sont bien transposables à une année moyenne sans entrer pour autant dans des programmes d'études extrêmement longues et coûteuses qui seraient hors de proportion avec les objectifs initialement fixés.

Les **ETUDES SUR PLANS** et **THEORIQUES**, basées sur une bonne connaissance du **COMPORTEMENT** des **SEDIMENTS** sous les **ACTIONS HYDRODYNAMIQUES**, permettront dans certains cas de pouvoir résoudre le problème de l'aménagement dans des cas simples où les risques ne sont pas trop importants. Dans l'état actuel avec les connaissances que l'on a de certains phénomènes, l'habitude de certains problèmes, les analogies avec des installations comparables déjà réalisées, l'amélioration des moyens de calculs numériques... on peut à l'aide d'une bonne étude sur plans et théorique établir des esquisses d'aménagement et orienter déjà le choix entre différentes solutions qui devront ensuite être affinées.

Dans des cas plus complexes, les études sur plans resteront nettement insuffisantes et l'on devra faire appel à des recherches plus complètes et plus précises à l'aide de **MODELES REDUITS PHYSIQUES ET/OU MATHEMATIQUES**.

Ces deux outils de recherche ne sont pas concurrentiels mais complémentaires et répondent à des problèmes sensiblement différents.

Les modèles **MATHEMATIQUES**, traitent actuellement les problèmes d'hydraulique d'une façon satisfaisante (propagation des houles, courantologie, dispersion de polluants...) et peuvent englober de grandes superficies géographiques. Ils ont l'avantage, lorsque le mode de calcul existe, d'être assez facilement exploitables donc rapides et d'un prix de revient raisonnable. Ils présentent par contre l'inconvénient d'être souvent bi-dimensionnels et d'avoir un nombre de points



de calculs, ou de mailles, limités ce qui rend quelquefois leur utilisation délicate pour étudier certains détails des écoulements. Les progrès récents réalisés dans les modèles à éléments finis, permettent de lever ces difficultés et d'espérer pouvoir réaliser des modèles tri-dimensionnels hydrauliques opérationnels à brève échéance.

Par contre, des difficultés persistent, par suite même de la conception de ces modèles mathématiques qui nécessitent une connaissance très précise des lois mathématiques, sur la représentation des phénomènes sédimentaires qui ne sont, dans l'état actuel, abordés que d'une façon très globale dans des cas simples et schématiques. Ces modèles mathématiques peuvent par contre être utilisés pour définir les conditions aux limites des modèles physiques.

Les modèles PHYSIQUES SEDIMENTOLOGIQUES permettent d'étudier avec beaucoup plus de précisions les phénomènes sédimentaires et les évolutions des fonds même dans des cas aussi complexes que ceux dus aux problèmes d'envasement. Plus de quarante années d'expérience apportent des éléments pour apprécier la validité de tels modèles à condition de les réaliser suivant des normes bien précises tant pour leurs échelles de similitude que de la représentation des phénomènes hydrauliques et océanographiques avec leurs successions dans le temps et de la représentation des sédiments naturels à l'aide de matériaux artificiels ayant les mêmes comportements sous les mêmes actions hydrauliques réduites aux échelles de similitude.

Ces modèles physiques représentent en général des secteurs géographiques plus restreints que les modèles mathématiques allant de quelques kilomètres de littoral pour les modèles maritimes à une cinquantaine de kilomètres pour les modèles d'estuaires.

Ils ont l'avantage sur le plan sédimentologique, de pouvoir visualiser directement les déplacements des matériaux et les évolutions des fonds avant et après aménagement d'un site et d'avoir une bonne précision dans les phénomènes constatés même dans des cas très complexes où interviennent simultanément courants, houles et transports densimétriques dans les courants de densité.

Si leur durée de construction reste assez grande (1 à 2 mois), leur tarage ou étalonnage est maintenant assez rapide et la durée des essais se déroule à l'échelle des temps sédimentologiques du modèle, c'est-à-dire en 8 heures environ pour la représentation d'une année dans le cas d'un modèle maritime sédimentologique et de 2 à 3 heures dans le cas d'un modèle d'estuaire soumis à l'envasement. Ce "temps de calcul" restera encore longtemps inférieur à celui d'un modèle tri-dimensionnel mathématique où l'on voudrait introduire le transport sédimentaire.

En fait l'association entre modèles mathématiques et modèles physiques - ou modèles hybrides - offre les meilleures garanties techniques et économiques pour les recherches hydrosédimentaires. Il n'y a pas concurrence entre ces deux types d'études mais complémentarité et les études récentes qui ont été réalisées en apportent la preuve.

A l'issue de toutes ces études sur les données existantes, les mesures en Nature, les études théoriques et sur plans et les recherches à l'aide des modèles réduits physiques et/ou mathématiques, il restera encore une étape importante de réflexion et d'analyse de l'ensemble des résultats en vue d'aboutir à l'ELABORATION DU PROJET. On devra, en particulier, malgré la masse des renseignements obtenus, se poser le problème de savoir si aucun paramètre n'a été négligé et, surtout, si le projet retenu qui apparaît parfaitement viable pour les objectifs que l'on a fixés, reste parfaitement valable à long terme sur l'environnement et sur l'équilibre écologique d'un site. Il s'agit là de faire une estimation entre avantages et inconvénients d'un aménagement sur le plan technique, économique, écologique et en dernier lieu humain en tant que qualité de la vie.

On rentrera alors dans la phase de construction des ouvrages et du suivi de leur influence pour bien s'assurer que rien n'a été oublié et que les prévisions basées sur le maximum des connaissances technologiques que l'on peut avoir, se trouvent bien confirmées par la Nature.

\* \* \*

\*

## BIBLIOGRAPHIE

## **BIBLIOGRAPHIE**

- [1] *Les facteurs essentiels de la dynamique sédimentaire dans le cadre de la construction des ouvrages en mer. Nécessité de leur étude à différentes échelles dans l'espace et dans le temps - C. MIGNIOT - A. S.T.E.O. 10ème Colloque - Janvier 1982.*
- [2] *Erosion et sédimentation en mer. Manuel sur l'Hydrodynamique Sédimentaire (2ème partie) - L.C.H.F. - S.T.C. - 1989.*
- [3] *Etude de la dynamique sédimentaire marine, fluviale et estuarienne - C. MIGNIOT - Thèse Doctorat es-Sciences - PARIS-SUD - 1982.*
- [4] *Influence d'un ouvrage maritime sur l'évolution d'un littoral sableux - S. MANOUJIAN - XVIIIe journées de l'Hydraulique - S.H.F. - Septembre 1984.*
- [5] *Les problèmes d'ensablement des Ports Marocains - L. CHARROUF - Thèse Doctorat - PARIS-SUD - 1989.*
- [6] *Influence des extractions d'agrégats en mer sur l'équilibre des littoraux - J. VIGUIER et C. MIGNIOT - Houille Blanche - 1979.*
- [7] *Etude sur les mouvements des sédiments pelitiques dans les modèles d'estuaire soumis à la marée - L.C.H.F. - D.P.V.N. - Décembre 1970.*
- [8] *Etude comparative des mouvements sédimentaires de quelques estuaires - B. BELLESSERT - Houille Blanche n° 8 - 1972.*
- [9] *Dynamique sédimentaire estuarienne - C. MIGNIOT - Institut océanographique - Océanis Vol. 6 - 1980.*
- [10] *Les matières en suspension dans les estuaires - C. MIGNIOT - Comité Français de Géologie de l'Ingénieur - Octobre 1983.*
- [11] *Navigabilité dans les chenaux envasés - J. VIGUIER et J.M. ROQUES - L.C.H.F. - S.T.C. - Avril 1986.*
- [12] *Guide d'hydraulique fluviale - E.D.F. Direction Etudes et Recherches - M. RALETTE - Avril 1981.*
- [13] *Rejets des produits de dragage à l'aval d'un barrage sur l'Oued HAMIZ - J. VALEMBOSIS et C. MIGNIOT - Houille Blanche n° 2 et 3 - 1973.*
- [14] *Les domaines d'études en sédimentologie - C. MIGNIOT - Journées prospectives sur l'environnement littoral - 3ème Session - Centre Océanologique de Bretagne - Février 1980.*

- [15] *Etude de la radioactivité naturelle le long des côtes du Languedoc. Evaluation des transits sédimentaires - A. RIVIERE et S. VERNHET - 1955.*
- Radioactivité naturelle des sédiments marins au large des côtes de l'Estérel - G. COURTOIS et F. ANGUENOT - Compte-rendu à l'Académie des Sciences T. 264 - 29 Mai 1967.*
- [16] *Mesures des caractéristiques mécaniques des vases déposées dans les chenaux de navigation - C. MIGNIOT - XVIIIème journées S.H.F. - Septembre 1984.*
- [17] *Les apports des techniques nucléaires à la sédimentologie dynamique - Bilan et références - A. CAILLOT - Rapport ORIS-SAR 107/C287 - Juillet 1989.*
- [18] *Manuel sur l'Hydrodynamique Sédimentaire - 1ère partie - S.T.C. et L.C.H.F.-SOGREAH - N° 51078 R1 - 1989.*
- [19] *Utilisation des jauges nucléaires de densité pour étudier et mesurer au laboratoire et in situ la formation et la concentration des dépôts de vase - G. MEYER, D. CHAMBELLAN, A. CAILLOT, C. MIGNIOT - Isotope hydrologie - AIEA - SM 270/78 - 1984.*
- [20] *Erosion aux abords des ouvrages - J. CARPENTIER - L.C.H.F. SOGREAH - S.T.C. - 1989.*
- [21] *Shore Protection Manual - Volume 1 - U.S. Army - Coastal Engineering Research Center - Fort Belvoir - Virginia 22060.*
- [22] *Essais de théorie de l'évolution des formes de rivage de plages de sables et de galets - R. PELNARD CONSIDERE - XVIIIe journées de l'Hydraulique - S.H.F. Marseille - 1986.*
- [23] *Dynamique sédimentaire maritime - Principes Généraux - J.P. MONTAZ - SOGREAH - Cours E.N.S.M.G. - 1986.*
- [24] *Représentation des transports et des dépôts de sédiments dans des modèles maritimes - C. MIGNIOT - Journée technique sur la simulation en hydraulique maritime - O.T.H. - Mars 1972.*
- [25] *Validité des modèles réduits sédimentologiques maritimes - J. P. LECLERC - SOGREAH-L.C.H.F. - Mission Interministérielle de la mer - Décembre 1985.*
- [26] *Etude sur modèle du transport littoral. Conditions de similitude - J. VALEMBOIS - Coastal Engineering - Vol. 9 Ch. 18 - 1960.*
- [27] *Essais de synthèse des lois de début d'entraînement des sédiments sous l'action d'un courant en régime continu - R. BONNEFILLE - Bulletin C.R.E.C. N° 5 - 1963.*

- [28] *Cours d'hydraulique maritime* - R. BONNEFILLE - ENSTA - Editions Masson - 1980.
- [29] *Reproduction des triages granulométriques sur modèle réduit* - J. LAURENT - Publication n° 38 de l'Association Internationale de l'Hydrologie - Rome - 1951.
- [30] *Reproduction des phénomènes d'envasement sur modèle réduit* - C. MIGNIOT - L.C.H.F. - P.A.B. - 1968.
- [31] *Aménagements fluviaux - Essais sur modèles réduits de 1988-1989 - Spécifications et coûts* - D.F.R. SOGREAH - Juin 1989.
- [32] *Exposé sur les problèmes d'envasements étudiés au L.C.H.F.* - C. MIGNIOT - L.C.H.F. - 1984.
- [33] *Mécanismes d'évolution du littoral. Question II l'Hydraulique et la maîtrise du littoral - Rapport général et complément au rapport général* - C. MIGNIOT et F. BIESEL - XVIIIe journées S.H.F. Marseille - Septembre 1984.
- [34] *Définition des paramètres hydrosédimentaires à prendre en considération sur modèles mathématiques sédimentologiques* - L.C.H.F. SOGREAH et S.T.C. P.M.V.N. - Mars 1988.
- [35] *Prise en compte des courants de densité dus aux mises en suspension dans les modèles mathématiques maritimes à fonds mobiles* - F. BIESEL - Rapport II.9, XVIIIe journées Hydraulique S.H.F. - 1984.
- [36] *Exemples d'application d'une modélisation numérique du charriage sous l'action des courants* - B. LATTEUX et Y. COEFFE - S.H.F. R.13 - Marseille 1984.
- [37] *Note sur les outils disponibles à SOGREAH pour la modélisation mathématique en sédimentologie marine* - L. HAMM - Paramètres à prendre en considération sur modèles mathématiques - Annexe 1 - SOGREAH - LCHF - STC - Mars 1988.
- [38] *Présentation d'un modèle de transport littoral sous l'action de la houle* - P. PECHON et Y. COEFFE - L.N.H. - XVIIIe journées de l'hydraulique - S.H.F. Marseille - 1984.
- [39] *Modélisation numérique des phénomènes en sédimentologie côtière* - B. LATTEUX - E.N.P.C. - Formation Continue - Mai 1989.
- [40] *New method for tidal current computation* - J.P. BENOUE, J.A. CANGE, J. FEILLET, A. HAUGUEL et F.M. HOLLY - A.S.C.E., Vol. 108 Wn3 - Août 1982.
- [41] *The dimensionnal modelling of wind - induced in coastal and harbour areas* - L. HAMM, J.M. USSEGLIO, B. QUETIN - Processus international - Conference Birmingham - B.H.R.A. - 1985.

- [42] *Méthodes de modélisation du transport et de la dispersion de polluants rejetés en mer* - B. QUETIN et J.M. USSEBLIO-POLATERA - XVIIIe journées de l'hydraulique - S.H.F. Marseille 1984.
- [43] *Simulation numérique de l'érosion des vases de retenue par les crues* - J.B. BOUCHARD, M. CORDELLE, J. LORIN - Houille Blanche n° 3/4 - 1989.
- [44] *La modélisation du transport solide par charriage à l'aide d'un modèle aux éléments finis* - J.P. TANGUY, G. DHATT, M. FRENETTE, P. MONADIER - Houille Blanche n° 3/4 - 1989.
- [45] *Numerical models for sediment transport in suspension in coastal areas* - B. LATTEUX - Ch. TEISSON - Euromech Colloquium 192 - Munich 1985.
- [46] *New advances in numerical modelling of suspended sediment transport in the Loire estuary* - I.A.H.R. - Copenhagen 1988.
- [47] *Modèles mathématiques et modèles physiques en hydraulique* - J. FISCHER - Bulletin P.C.M. - Ponts et Chaussées - 1985.

**MOYENS D'ETUDE DES PHENOMENES SEDIMENTAIRES**

**A N N E X E**

**CARACTERISTIQUES DE DIFFERENTS MATERIAUX  
SUSCEPTIBLES D'ETRE UTILISES EN MODELE REDUIT  
POUR REPRESENTER LES SEDIMENTS NATURELS  
NON COHESIFS ET COHESIFS**

**-000-**



**CARACTERISTIQUES DE DIFFERENTS MATERIAUX  
SUSCEPTIBLES D'ETRE UTILISES EN MODELE REDUIT  
POUR REPRESENTER LES SEDIMENTS NATURELS  
NON COHESIFS ET COHESIFS**

**-o0o-**

La représentation fidèle en modèles réduits physiques des mouvements sédimentaires des différents sédiments naturels, soumis aux actions hydrodynamiques, nécessite de disposer de matériaux artificiels répondant aux critères de similitude et ayant des caractéristiques bien définies de densité, de granulométrie, de forme, de rugosité de surface, d'angle de frottement interne et, pour les sédiments cohésifs, de floculation, tassement, viscosité et rigidité.

Le respect de ces caractéristiques physiques permettra de représenter correctement en similitude le comportement des particules artificielles sous les différents phénomènes hydrauliques et gravitaires : vitesses de chute, pentes d'équilibre des talus sous l'eau et hors d'eau, tassement, courants de turbidité, début d'entraînement sous l'action des courants et des houles agissant seuls ou simultanément, débits solides en suspension et en charriage, conditions de dépôts, modifications des rugosités de surface, triages granulométriques...

Par ailleurs, les matériaux artificiels utilisés sur les modèles réduits ne devront pas subir de modifications incontrôlées en présence du milieu aqueux par suite, par exemple, de leur porosité qui risque d'entraîner une variation de la densité des particules au cours du temps d'immersion, des variations physico-chimiques de leurs constituants, de la présence de micro-algues qui introduisent une cohésion entre les grains, de leur charge électrique tributaire des conditions de broyage... Les caractéristiques de l'eau (sels dissous, température et viscosité - qui peut varier du simple au double entre l'été et l'hiver), seront également des paramètres à prendre en considération pour la représentation des mouvements sédimentaires en modèles réduits ainsi que les conditions de mise en place des matériaux au cours du nivellement des fonds, un sable tassé artificiellement ne se comportera pas comme un sable déposé sous l'eau, une vase mise en place à une concentration donnée n'aura pas le même comportement qu'une vase décantée naturellement...

Les différents matériaux plastiques disponibles depuis une quarantaine d'années permettent d'avoir un éventail de matériaux artificiels très diversifiés et les méthodes de broyage possible par broyeur à marteaux ou à boules fournissent des possibilités d'obtenir des particules de différentes formes allant depuis le grain arrondi aux particules les plus plates schématisant les débris coquilliers.

Dans le domaine de la représentation des vases et des limons, les progrès sont encore plus spectaculaires grâce aux traitements physico-chimiques que l'on peut faire subir aux mixtures de sédiments très fins et qui permettent d'obtenir avec un même matériau pulvérulent et un traitement approprié de l'eau, une multitude de mixtures respectant les lois de similitude des sédiments cohésifs.

Dans cette annexe relative aux caractéristiques des différents matériaux susceptibles d'être utilisés en modèle réduit, nous ne donnerons pas tous les détails de préparation des "sédiments artificiels" - ces préparations restant un peu la propriété des laboratoires d'hydraulique - mais fournirons des indications précises pour aborder la représentation correcte des sédiments naturels sur les modèles réduits sédimentologiques.

Nous examinerons successivement :

- \* la représentation des matériaux non cohésifs : blocs, enrochements, galets, graviers, sables,
- \* la représentation des matériaux cohésifs : vases, limons et boues.

## I. REPRESENTATION DES MATERIAUX NON COHESIFS

### I.1. BLOCS ET ENROCHEMENTS

La représentation des blocs et gros enrochements est assurée si les forces statiques qui maintiennent les blocs en place sont en rapport constant avec les forces dynamiques qui tendent à emporter ces mêmes blocs.

Théoriquement, un enrochement de grande dimension devrait être en similitude si l'on réduit ses dimensions géométriques aux échelles du modèle - et notamment son volume - et si l'on respecte la même densité qu'en nature. Un enrochement de 1 m<sup>3</sup>, sur un modèle au 1/100e, serait représenté par un élément de 1 cm<sup>3</sup> ayant même coefficient de forme et même densité apparente sous l'eau que l'élément naturel. Un galet de 1 dm<sup>3</sup> serait représenté par un grain de sable grossier de 1 mm<sup>3</sup>.

La réduction dimensionnelle de l'élément conduit à des modifications de la porosité du milieu et si l'on respecte la même densité qu'en nature un terme correctif doit être introduit pour compenser ces effets de porosité (Le Méhauté - phénomènes de percolation dans les massifs en enrochements).

Pour les études de stabilité d'ouvrage sous l'action des houles, on s'efforce de respecter sur le modèle les mêmes densités relatives qu'en nature, un faible écart de densité relative entraînant des différences très appréciables de stabilité.

De même on s'efforce de respecter la même rugosité de surface des blocs et enrochements. Un bloc parfaitement lisse en alliage plastique ayant la même densité relative qu'un bloc naturel en béton relativement rugueux, n'aura pas la même stabilité. On devra augmenter artificiellement la rugosité du bloc modèle en procédant à une usure artificielle de son état de surface par abrasion par exemple.

Enfin, si pour des raisons pratiques, on ne pouvait respecter exactement la même densité relative que celle du bloc ou de l'enrochement naturel de même forme et de même rugosité, on devrait, pour obtenir la même stabilité sous l'action des houles, écrire que :

$$\frac{A - A_o}{A_o} \frac{L}{H} = \frac{a - a_o}{a_o} \frac{l}{h}$$

"A" et "A<sub>o</sub>" étant le poids spécifique des blocs ou enrochements et de l'eau en nature.

"a" et "a<sub>o</sub>" étant le poids spécifique des blocs ou enrochements et de l'eau en modèle.

"L" et "H" la dimension des blocs ou enrochements et la hauteur des vagues en nature.

"l" et "h" la dimension des blocs ou enrochements et la hauteur des vagues en modèle.

Si l'échelle linéaire du modèle est "m" et "P" et "p" le poids des blocs en nature et sur modèle, on aura :

$$\left(\frac{P}{p}\right)^{1/3} \frac{mh}{H} = \left(\frac{A}{a}\right)^{1/3} \frac{a - a_o}{a_o} \frac{A_o}{A - A_o}$$

La Figure 1 ci-contre donne la relation entre les volumes des blocs de densité différente offrant la même stabilité du talus sous la houle. Si par exemple sur le modèle on utilise un matériau de densité relative de 1,1 (densité réelle de 2,1) pour représenter un bloc d'ophite de densité 2,90 (densité relative de 1,90 sous l'eau), on devra utiliser un élément ayant un volume 5,3 fois plus important que celui donné par la simple réduction géométrique des échelles. Dans l'exemple précédent un galet de 1 dm<sup>3</sup> de densité 2,9 sera représenté par un élément de 5,3 mm<sup>3</sup> de densité 2,10.

Une limite dimensionnelle des éléments du modèle devra être donnée en fonction de l'épaisseur relative de la couche limite et des phénomènes de percolation.

## 1.2. REPRESENTATION DES GRAVIERS ET GALETS

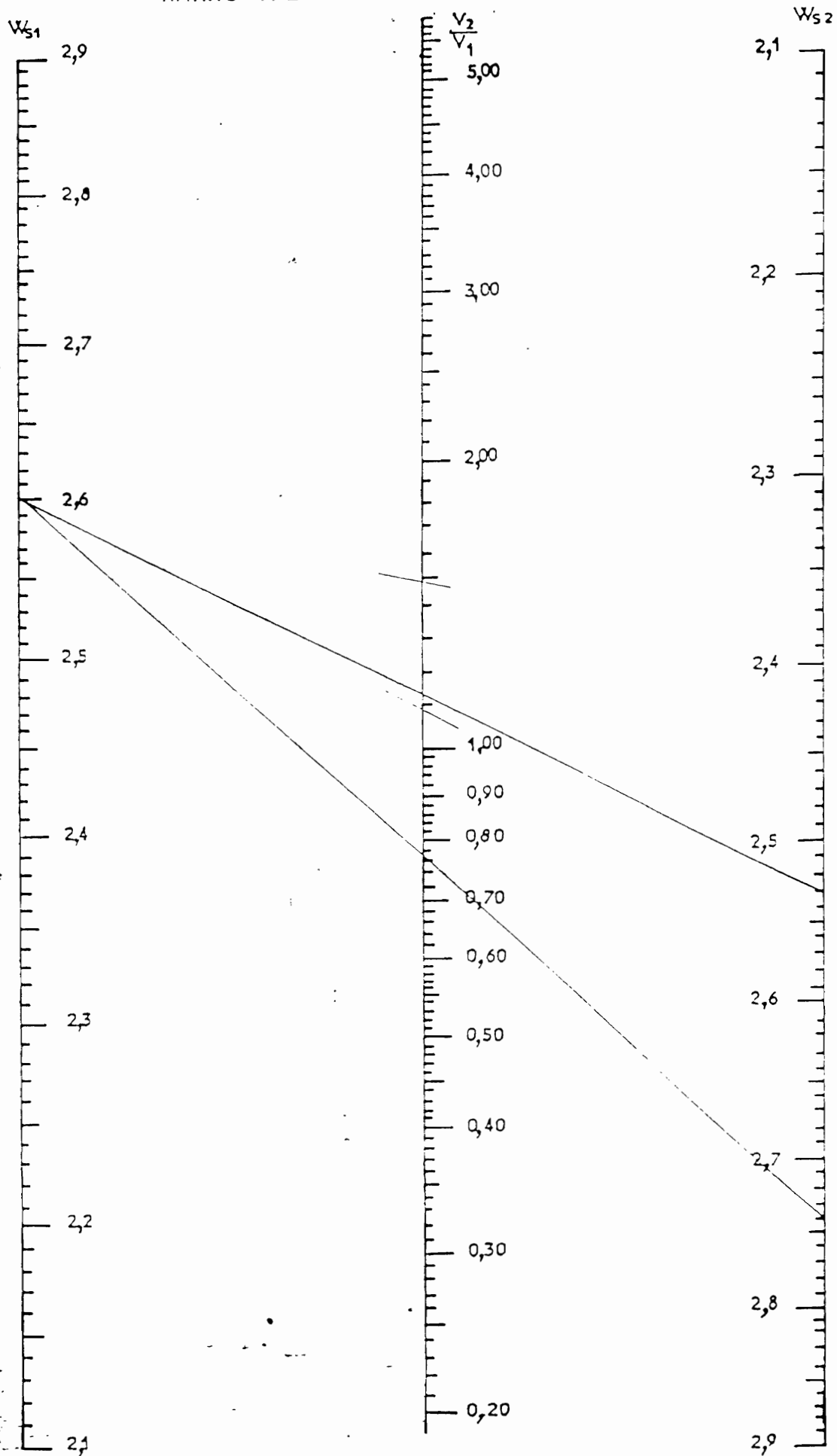
Le choix du matériau modèle susceptible d'être utilisé pour représenter les graviers et galets, sera basé sur des critères de similitude de vitesses de chute en eau calme, de début d'entraînement sous les actions hydrodynamiques, des débits solides sous l'action des houles et des courants, des pentes des talus et d'une façon plus sommaire des

# RELATION ENTRE LES VOLUMES DE BLOCS DE DENSITES DIFFERENTES

OFFRANT LA MEME STABILITE DU TALUS SOUS LA HOULE

RELATION BETWEEN VOLUMES OF DIFFERENT DENSITY STONES

HAVING THE SAME SLOPE STABILITY UNDER WAVES



phénomènes de percolation dans le massif de galets ou graviers et de l'épaisseur relative par rapport à celle de la couche limite.

La simple diminution géométrique des particules en fonction des échelles géométriques du modèle n'est plus suffisante pour répondre à tous ces critères en faisant appel à des matériaux de même densité que le sédiment naturel et il faut modifier, dans de nombreux cas, la densité relative du matériau artificiel pour y parvenir dès que la granulométrie des galets ou graviers devient faible ou que les échelles géométriques du modèle sont trop grandes.

Par exemple, si l'on veut conserver la vitesse de chute d'un gravier de 22 mm de diamètre aux échelles de similitude d'un modèle non distordu au 1/100e, on devrait adopter des grains de sable de 0,75 mm (vitesse de chute 0,09 m/s) et de même densité que les graviers naturels (dont la vitesse de chute serait de 0,96 m/s) alors que la réduction géométrique conduirait à des particules plus fines de 0,22 mm. Pour ces grains de sable du modèle 0,75 mm, la contrainte tangentielle de début d'entraînement sous l'action d'un courant serait de 0,75 N/m<sup>2</sup> et la vitesse critique de frottement de 2,7 cm/s, c'est-à-dire 1,8 fois supérieure à celle donnée par la similitude dynamique. Il y aurait incompatibilité entre les similitudes propres à chaque type de comportement hydraulique et il faudrait adopter des grains de sable en similitude géométrique pour avoir des vitesses critiques de frottement équivalentes. Cet impératif conduit à représenter les graviers par des sables trop fins n'ayant pas une perméabilité suffisante et pour lesquels les facteurs de cohésion commencent à intervenir.

En adoptant des matériaux artificiels de plus faible densité, on contourne cette difficulté et l'on se rapproche d'un comportement correct, aux échelles de similitude, du matériau artificiel.

### **I.3. REPRESENTATION DES SABLES**

Comme pour les galets et graviers, la représentation des sables en modèle réduit nécessite de respecter en similitude les vitesses de chute, le début d'entraînement, les débits solides, les pentes d'équilibre, l'épaisseur relative des particules par rapport à la couche limite... mais en plus le rapport entre les transports en charriage et en suspension pour les différentes fractions granulométriques contenues dans les sables naturels. Ce dernier critère se retrouve dans les triages granulométriques identiques - à un facteur dimensionnel près - en modèle et en nature. Par ailleurs des problèmes de débits solides relatifs sous les actions respectives des houles et des courants sont à prendre en considération pour l'évaluation des échelles des temps sédimentologiques.

Il n'est plus question d'utiliser des matériaux ayant la même densité que les sédiments naturels mais d'utiliser des matériaux artificiels de densité appropriée s'étalant entre 1,1 et 1,8 par exemple.

#### I.4. MATERIAUX ARTIFICIELS SCHEMATISANT LES SEDIMENTS NATURELS NON COHESIFS

De très nombreux matériaux artificiels ont été utilisés sur les modèles réduits sédimentologiques : charbons de différentes catégories (anthracite, lignite...), pierres ponce (dont la densité apparente variait avec la granulométrie et le temps d'immersion dans l'eau), sciures de bois ayant subi des traitements appropriés, polystyrène, ébonite, hostalit, bakélite, Styène-Acrylo-Nitryl (S.A.N.), nacre artificielle, styvarène, P.V.C. broyé, polopass, sables siliceux de Fontainebleau, tangué, brique broyée...

Tous ces matériaux ont fait l'objet de recherches en laboratoire pour préciser leurs densité, granulométrie, vitesses de chute en eau calme, vitesses d'érosion par les courants, début d'oscillation par la houle, et plus rarement débits solides en charriage et en suspension et comportement sous les actions cumulées des courants et de la houle.

Ces études, réalisées très souvent pour des cas particuliers, n'ont pas fait l'objet - en dehors de quelques travaux spécifiques [1 - 2 - 3 - 4] - de publications ou même de notes internes, ce qui rend délicat leur synthèse.

Au L.C.H.F. on s'est très rapidement orienté - dès 1950 - vers l'utilisation de la bakélite broyée (densité 1,38) à l'aide d'un broyeur à marteaux et d'un tamisage avec séparateur des poudres par hydro-cyclone et tamisage mécanique en 6 catégories pour les grains. Vers les années 1960 la nacre artificielle de densité 1,22 a complété cette gamme de matériaux artificiels et le S.A.N. de densité 1,07 a été introduit quelques années plus tard pour représenter certains transports fluviaux s'effectuant principalement en suspension.

Les matériaux poreux (pierre ponce...) ou organiques (charbons, sciures de bois...) étaient progressivement abandonnés au L.C.H.F. à l'état pur et utilisés uniquement, dans des cas très particuliers, en étant mélangés à des matériaux "inertes" comme pour les études du Mont-Saint-Michel où la représentation de la tangué naturelle a nécessité de prendre un mélange de nacre artificielle (densité 1,22) et de sciure de bois très fine traitée.

- 
- [1] *Etude des sédiments pélagiques. Propriétés physiques. Actions hydrodynamiques. Représentation en modèle réduit - 1963 - LCHF-FDES - Ministère de l'Industrie - C. MIGNIOT.*
- [2] *Etude en canal, choix des matériaux mobiles pour le Port de Zeebrugge (Juillet 1981) - LCHF-LRH - Ben Abdallah - S. MANOUJIAN - C. MIGNIOT.*
- [3] *Propriétés du Styène-Acrylo-Nitryl (S.A.N.) - Décembre 1983 - LCHF - C. ESCURIER - G. MOGUILNY.*
- [4] *Modèles réduits des plages - choix de matériaux mobiles - 1983 - T. COTTIN - N. PERDREAU - SOGREA.*

Dans ce paragraphe nous essaierons de rassembler le maximum de renseignements sur ces matériaux artificiels non cohésifs.

#### I.4.1. Origine des matériaux artificiels - densité - granulométrie

L'origine des matériaux artificiels susceptibles d'être utilisés sur les modèles est très diversifiée. Certains produits (bakélite, polopass. ..) sont des déchets de matières moulées que l'on broie ensuite à des granulométrie appropriées. Des sociétés comme M.I.O.N. (Vitry), PLASCO (Huninge), COLORPLASTIC (Bagnolet), S.D.D.N. (Méru)... ont de tels déchets à l'état brut. Dans d'autres cas on peut directement se procurer des "granules" plastiques auprès des fabricants et les conditionner ensuite pour leur utilisation en modèle (broyage, usure artificielle, tension superficielle...).

Les densités de ces matériaux sont rappelées ci-après et couvrent une gamme assez étendue.

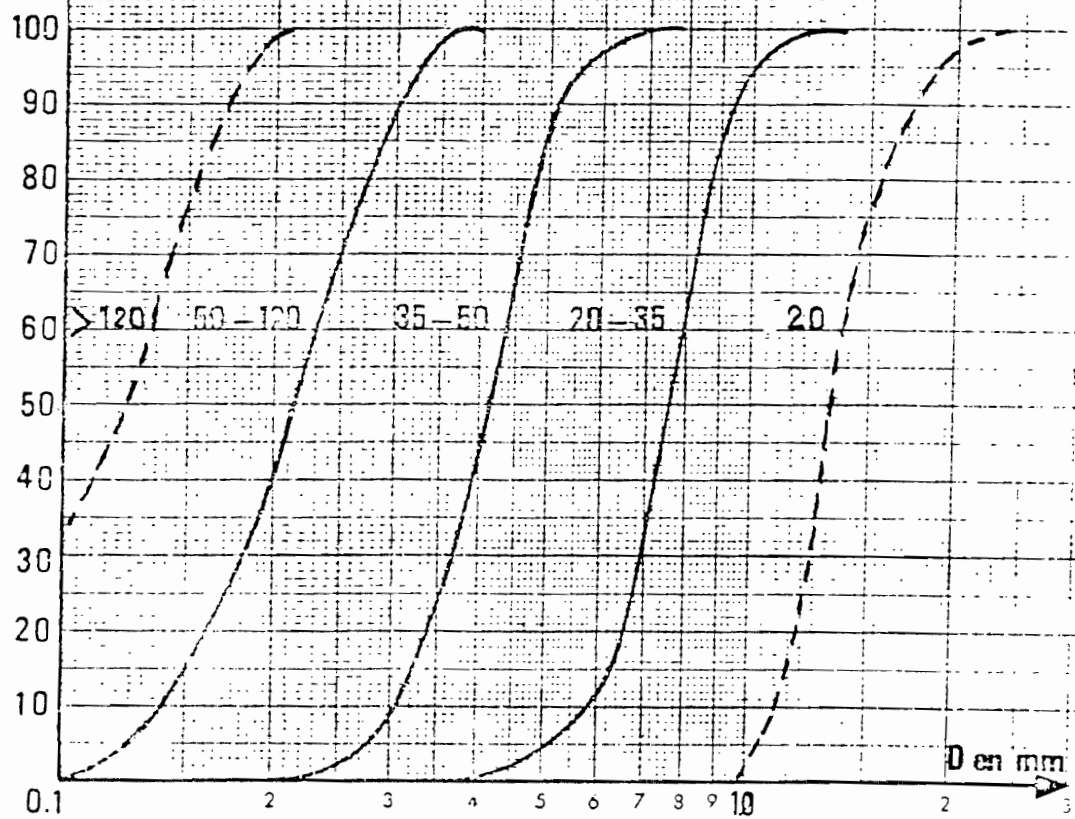
NATURE	SABLE FONTAINEBLEAU	BRIQUE CONCASSEE	EBONITE	ANTHRACITE	BAKELITE	HOSTALIT Z	PVC BROYE	LIGNITE
Densité	2,6	2,0	1,59	1,45	1,38	1,36	1,35	1,28
NATURE	PONCE LIPARI	POLOPASS PLASCO	NACRE	SCIURE CATIJENE	STYRENE-ACRYLO-NITRYL	POLYSTYRENE ET STYVARENE	RODODENE	-
Densité	1,25	1,25	1,22	1,15	1,07	1,05	1,03	-

Le sable de Fontainebleau, les bakélites, la nacre artificielle, la sciure traitée au catijène, le S.A.N. (Styrène-Acrylo-Nitryl) et le polystyrène cristal sont les plus souvent employés. Au L.C.H.F. la préférence allait à la bakélite, nacre et S.A.N. compte tenu de leur facilité à être broyées à des éventails granulométriques appropriés, à leur stabilité dans le temps et à leur facilité de mouillage.

Après broyage à l'aide d'un broyeur à marteaux (grains arrondis) ou à boules (grains plats) les matériaux sont tamisés en 5 classes granulométriques différentes : 0,1-0,3 mm ; 0,30-0,50 mm ; 0,50-0,90 mm ; supérieurs à 0,90 mm et inférieurs à 0,10 mm {Figure 2}.

En mélangeant ces stocks granulométriques dans des proportions déterminées on peut reconstituer la répartition granulométrique d'un secteur géographique déterminé. Les actions hydrodynamiques agissant sur ce stock granulométrique devront entraîner un triage granulométrique comparable à celui mesuré en nature (à un coefficient dimensionnel près).

### Courbes granulométriques





### I.4.2. Vitesses de chute en eau calme

Pour chaque matériau susceptible d'être utilisé pour schématiser en modèle réduit les sédiments naturels, on a mesuré la vitesse de chute des particules élémentaires de différents diamètres (eau, température à 20°C). Les Figures 3 et 4 donnent ces vitesses de chute ainsi que la relation entre le nombre de Reynolds "R" et le coefficient de traînée "C<sub>x</sub>" qui permet d'avoir une évaluation de la forme des grains.

A titre indicatif, nous indiquons dans le tableau ci-après quelques valeurs des vitesses de chute mesurées pour les matériaux les plus couramment utilisés.

Vitesses de chute en mm/s (t = 20°C)						
Diamètres en mm	0,2	0,4	0,6	0,8	1	2
Sables Fontainebleau	27,5	50	75	100	125	217
Bakélite	7,5	17,5	27	36	45	79
Nacre	3	9,5	16	25	28	-
S.A.N.	2	5,5	9	12	16	-
Polystyrène	1,7	4,5	7	-	-	-

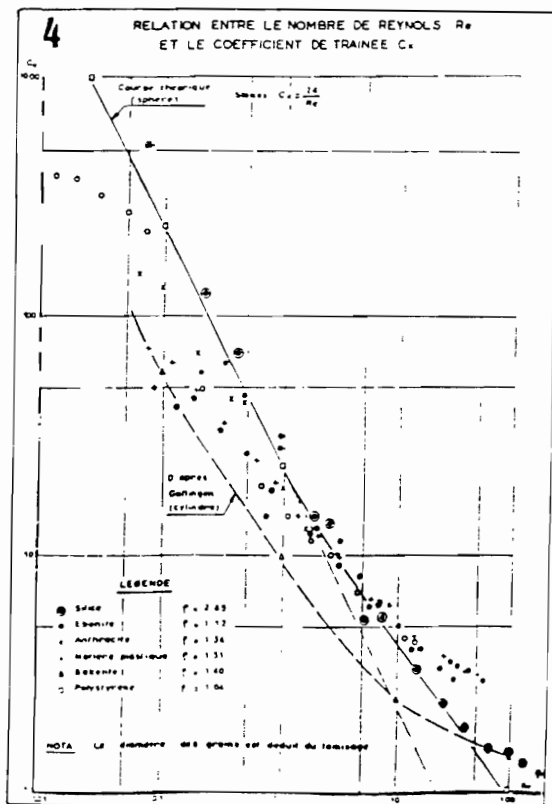
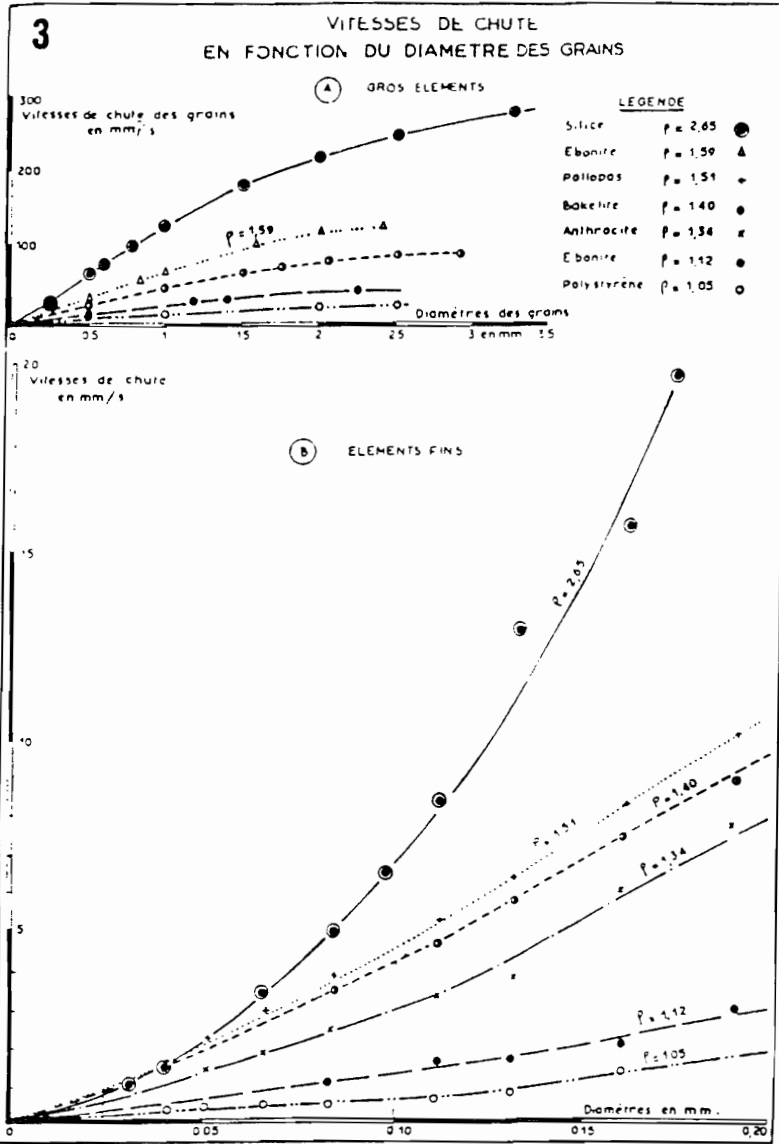
### I.4.3. Pentes d'équilibre

La pente d'équilibre des talus hors d'eau ou sous l'eau sera d'autant plus faible que le matériau sera plus fin et la densité plus grande. La forme des grains a une grande importance.

Rappelons que la pente d'équilibre des sables à sec varie entre 32 et 40° lorsque la granulométrie passe de 0,2 à 10 mm (sable arrondi).

Le tableau ci-après donne les pentes des talus hors d'eau et sous l'eau de la bakélite (densité 1,38) et de sable siliceux.

Bakélite - Pente d'équilibre en degrés							
Diamètre en mm	0,1	0,2	0,5	0,75	1	2	3
Hors d'eau	34°	32,5°	36,5°	37,8°	38,7°	41°	42,5°
Sous l'eau	32,5°	30°	30,5°	34°	35,8°	38,5°	40,5°
Sable siliceux - Pente d'équilibre en degrés							
Hors d'eau	-	30°	32,5°	34,5°	35,5°	38,3°	41°



Le S.A.N. (densité 1,07) aurait sous l'eau des pentes de 38 à 48° (creusement d'un chenal) mais cette pente tomberait à 30 - 35° par formation d'un dépôt immergé.

## I.5. COMPORTEMENT DES MATERIAUX ARTIFICIELS NON COHESIFS SOUS L'ACTION DES COURANTS

### I.5.1. Début d'entraînement par les courants

Quelque soit le matériau artificiel utilisé, le début d'entraînement des matériaux non cohésifs, d'un diamètre supérieur à 0,2 mm, peut être déterminé à partir des paramètres sans dimension (Figure 5).

$$R^* = \frac{u^*D}{\nu} \quad \text{et} \quad D^* = G^{1/3} = \left( \frac{(s-1)g}{\nu^2} \right)^{1/3} D$$

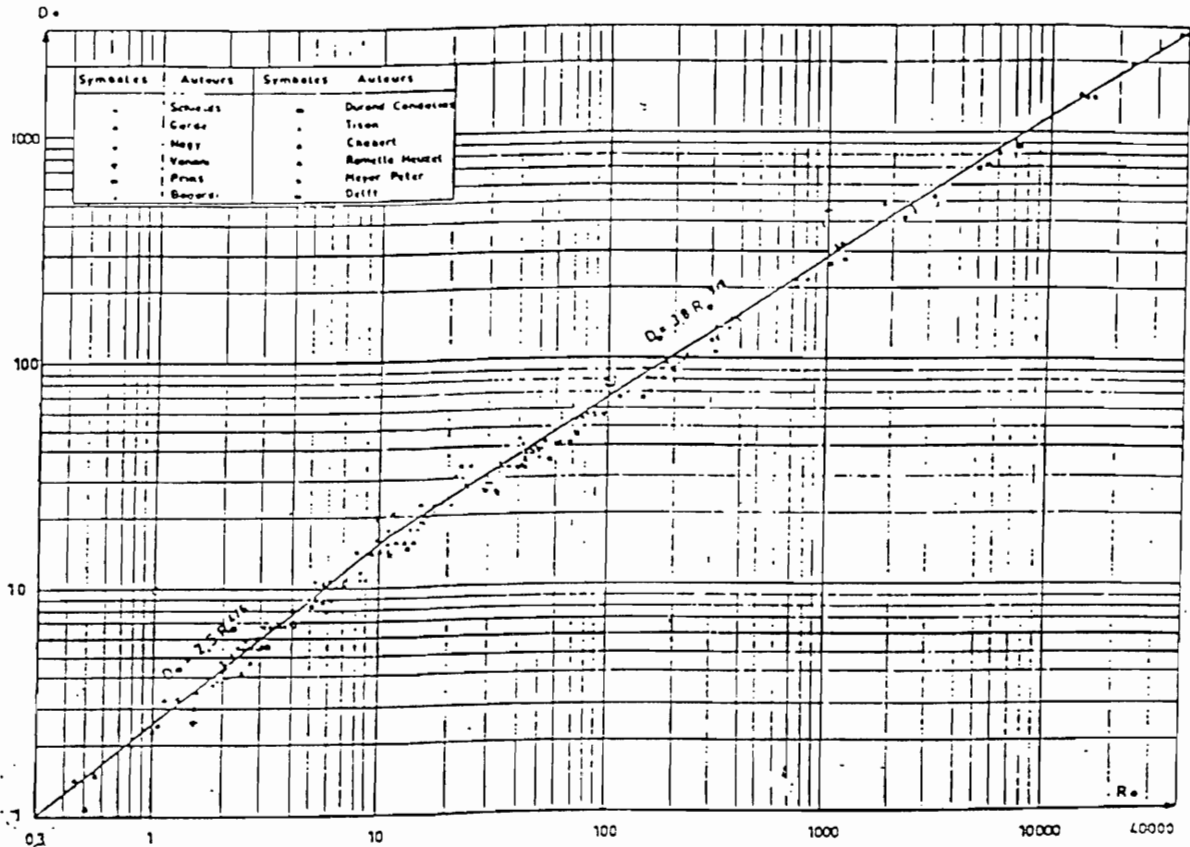
" $\nu$ " = viscosité cinématique ; "D" = diamètre de la particule ;  
 "s-1" = densité apparente du matériau sous l'eau ; "g" = accélération de la pesanteur.

- pour  $0,3 < R^* < 12$  on a :  $D^* = 2,5 R^{*4/5}$
- pour  $R^* > 12$  on a :  $D^* = 3,8 R^{*5/8}$

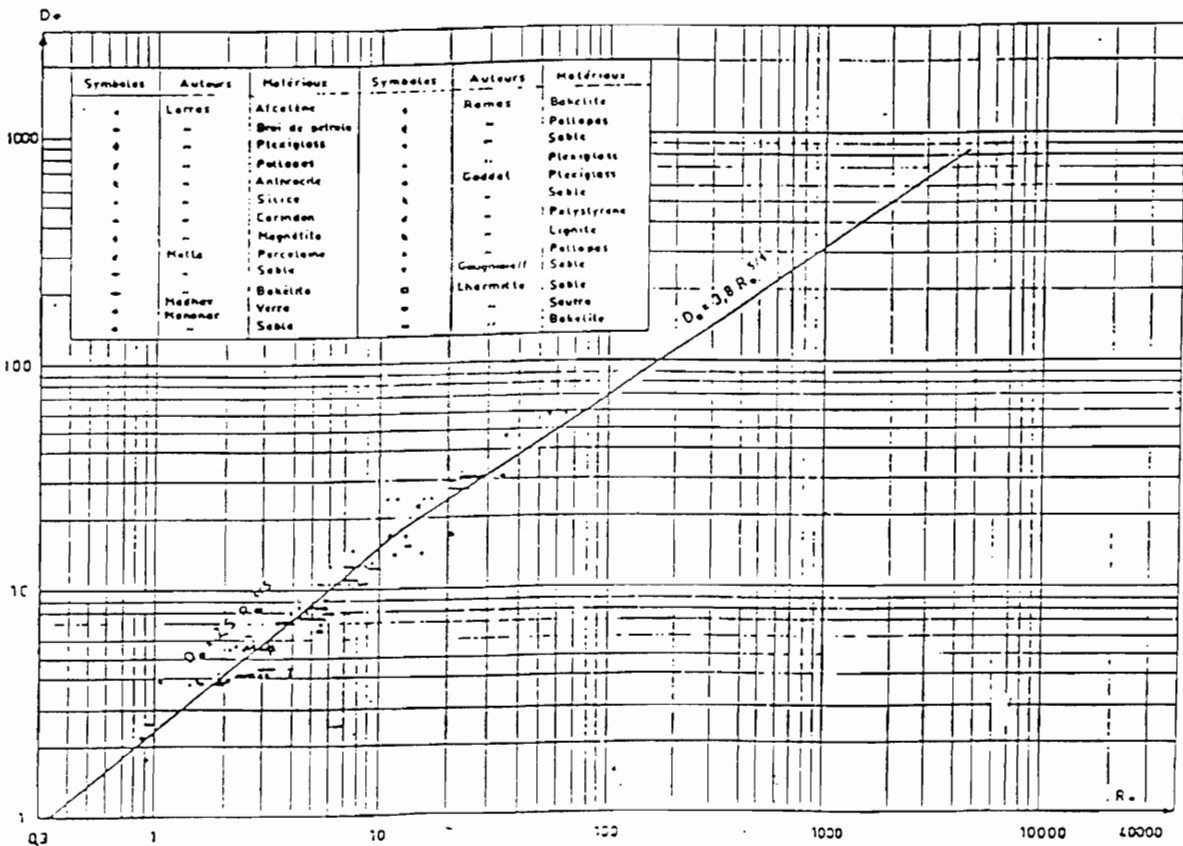
Si "D\*" est inférieur à ces valeurs, il y a mouvement, au-dessus les fonds sont stables.

Pour des matériaux fréquemment utilisés en modèle réduit, le tableau ci-après donne quelques valeurs des vitesses critiques d'entraînement mesurées en canal inclinable au L.C.H.F. pour des profondeurs d'eau de 10 et 16 cm (départ de quelques grains et départ généralisé).

Vitesses critiques d'entraînement et vitesses de frottement "u*" en cm/s					
Matériau	Diamètre mm	Profondeur 10 cm		Profondeur 16 cm	
		$\bar{U}$	u*	$\bar{U}$	u*
Bakélite 1,38	0,19	11-17	0,52-0,77	19-27	0,82-1,16
	0,31	17-25	0,82-1,22	17-25	0,77-1,14
	0,50	17,2-23	0,88-1,2	16-23	0,77-1,1
Nacre 1,22	0,21	12,2-13,8	0,55-0,63	14,8-17,2	0,64-0,74
	0,42	11,9-15,1	0,59-0,75	12,5-15,5	0,58-0,73
	0,75	11,8-16,1	0,63-0,86	11,8-17,8	0,59-0,89



**A** LOI DE DEBUT D'ENTRAINEMENT DES SEDIMENTS SOUS L'ACTION D'UN ECOULEMENT UNIFORME



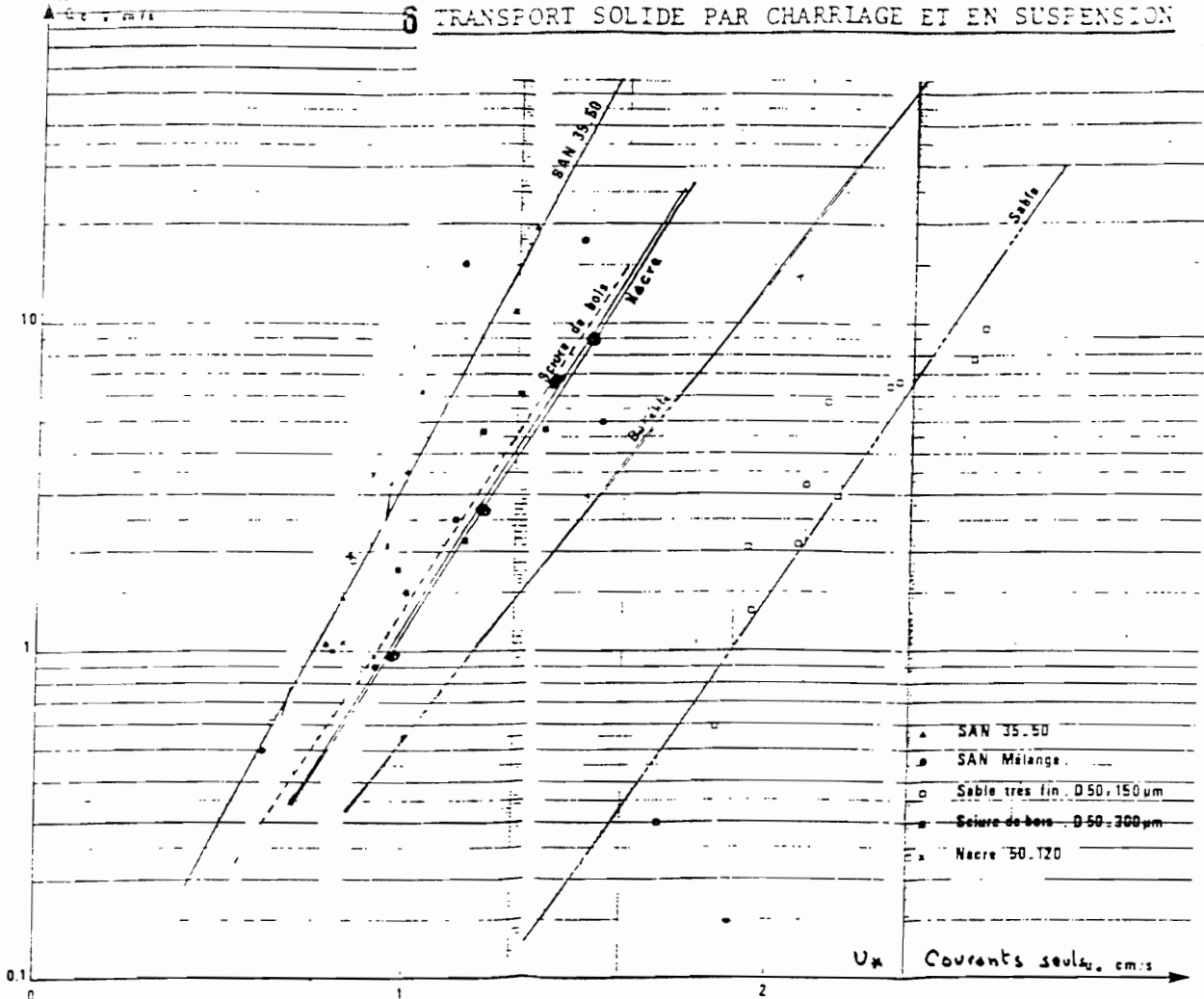
**B** LOI DE DEBUT D'ENTRAINEMENT DES SEDIMENTS SOUS L'ACTION DE LA HOULE

Vitesses critiques d'entraînement et vitesses de frottement "u*" en cm/s					
Matériau	Diamètre mm	Profondeur 10 cm		Profondeur 16 cm	
		$\bar{U}$	u*	$\bar{U}$	u*
Sciure de bois (pin)	0,30	15,2-16,5	0,73-0,79	13,4-16,3	0,65-0,74
Polystyrène 1,05	0,21	7,8-9,4	0,35-0,43	7,8-9,5	0,33-0,41
Styvarène	2,5	10,9-13,9	0,70-0,91	10,2-15	0,62-0,91
S.A.N. 1,07	0,37	9,3-11,6	0,46-0,57	7,9-10,4	0,37-0,48
	0,50	8-11	0,41-0,56	8,2-11,6	0,39-0,56
Mélange nacre + sciure bois	0,21	11-14	0,5-0,67	11,4-15,6	0,49-0,67
Sable 2,65	0,15	25-40	1,14-1,83	31,7-40	1,38-1,74

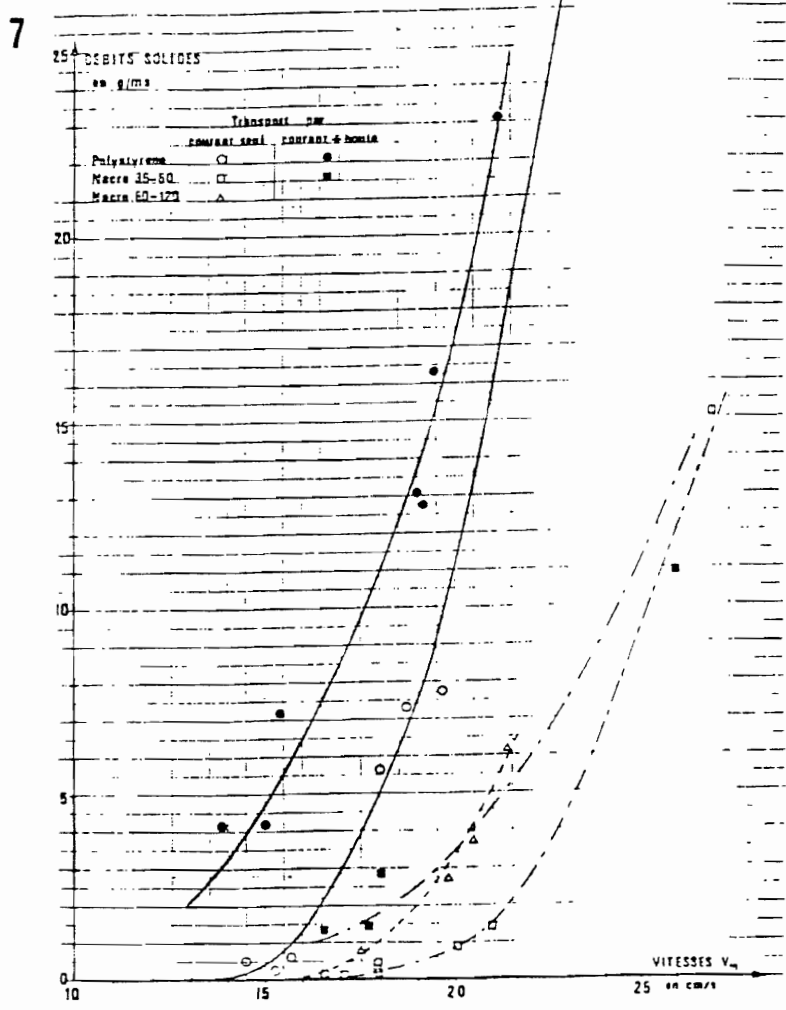
I.5.2. Débits solides en suspension et en charriage sous l'action des courants

Pour les différents matériaux utilisés au L.C.H.F. des mesures systématiques des débits solides en charriage et en suspension ont été réalisées en canal inclinable. Le choix des matériaux à utiliser en modèle réduit pour respecter cette similitude des débits solides et des rapports charriage/suspension peut être basé sur ces résultats.

Matériau	Hauteur eau (en cm)	Vitesses moy. cm/s	Débits solides en g/ms						
			15	20	25	30	35	40	45
Bakélite 0,19 mm	10	Suspension	0	0,7	2,7	5,0	7,8	14	-
		Charriage	0	0,9	2,3	3,7	5	9,5	-
	16	Suspension	0	0	0	3	8,5	10	-
		Charriage	0	0	1	3	6	6,5	-



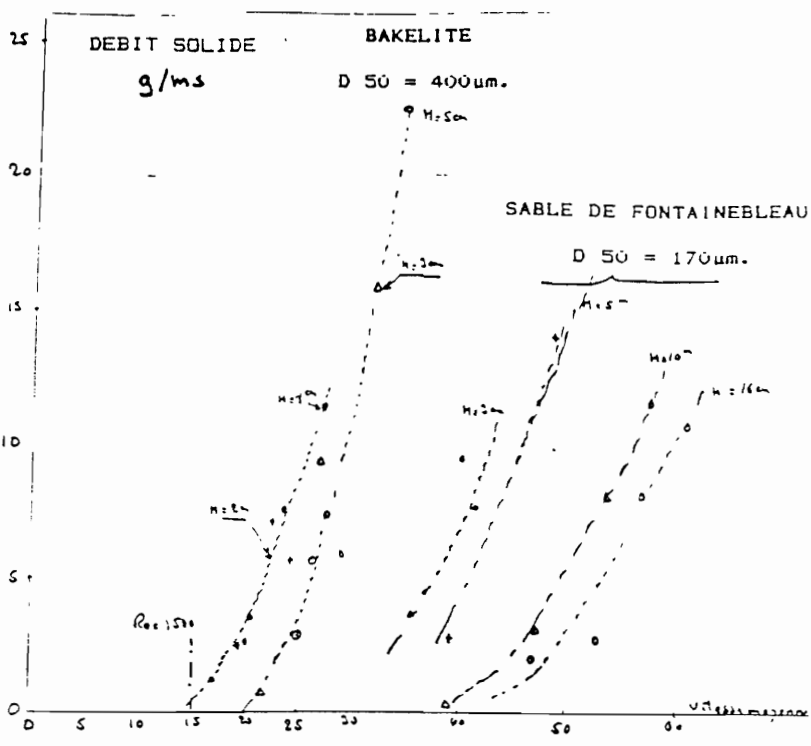
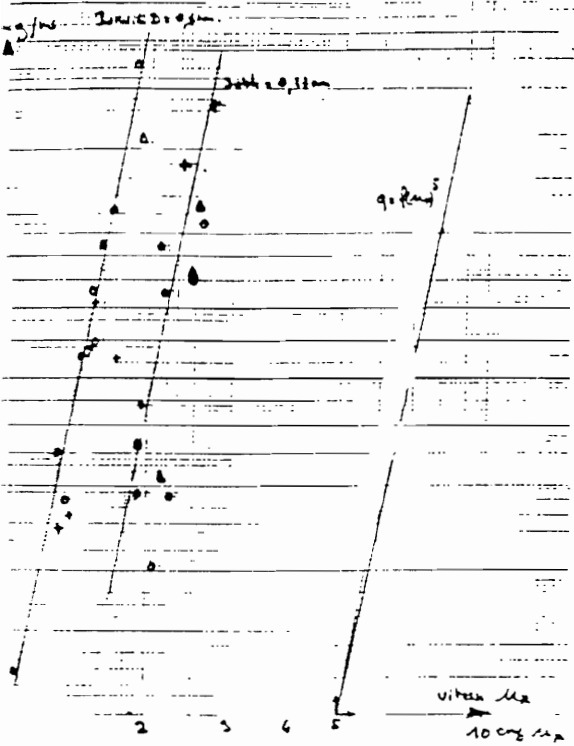
- ▲ SAN 35-50
- SAN Mélange
- Sable très fin,  $D_{50} = 150 \mu m$
- × Sciure de bois,  $D_{50} = 300 \mu m$
- \* Nacre 50-120



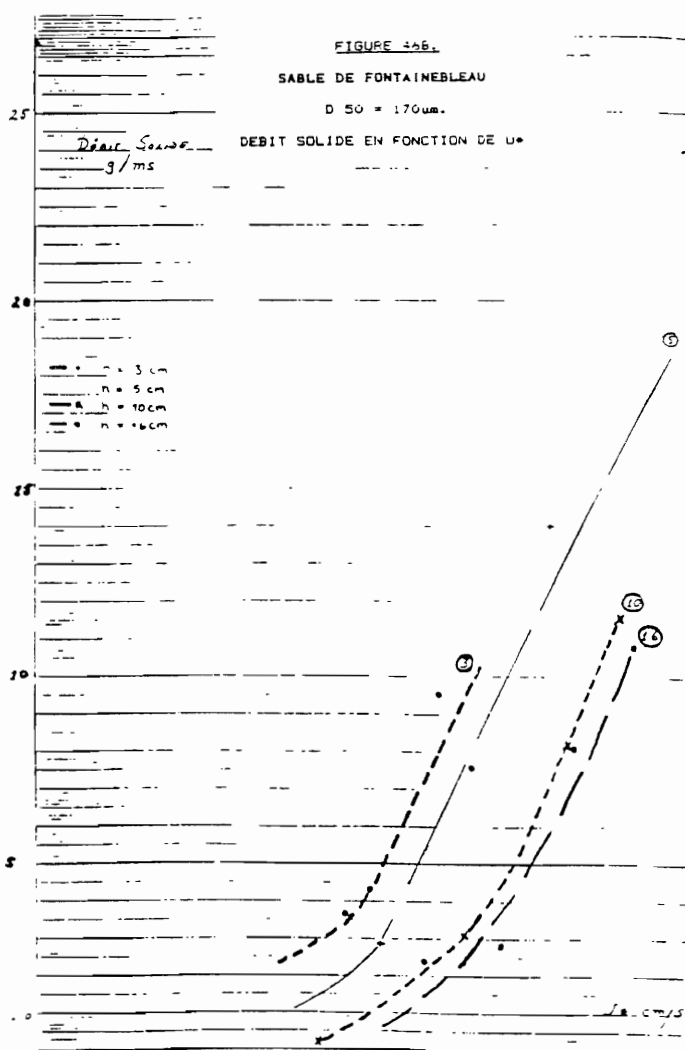
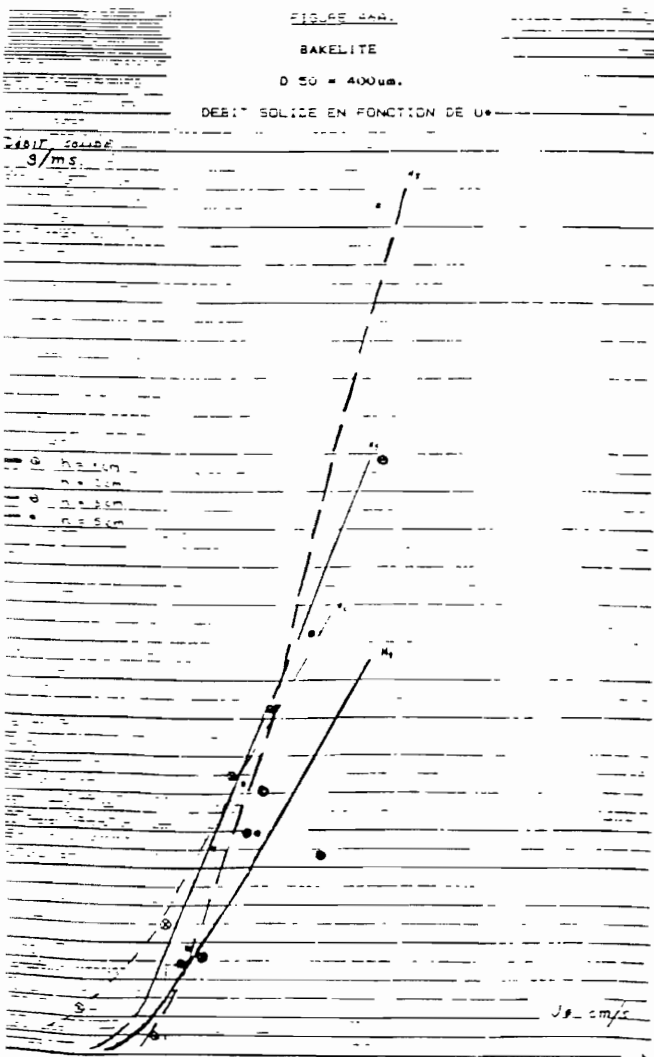
- DEBITS SOLIDES en g/m<sup>3</sup>
- Tribologie sur courant seul, courant + boue
- Polystyrene
  - Nacre 35-50
  - △ Nacre 50-120

VITESSES  $V_m$  en cm/s

Matériau	Hauteur eau (en cm)	Débits solides en g/ms							
		Vitesses moy. cm/s	15	20	25	30	35	40	45
Bakélite 0,31 mm	10	Suspension	0	0	1	2,7	6	10	16
		Charriage	0	0,4	3	5,4	8	10,8	14
	16	Suspension	0	0	0	1,5	4,6	9,5	16
		Charriage	0	0,4	2	4,8	9	15	23,5
Bakélite 0,50 mm	10	Suspension	0	0	0	0,5	1,5	3,5	6
		Charriage	0	0	1,5	4,5	9	13,5	19
	16	Suspension	0	0	0	0,4	1,5	3	5
		Charriage	0	0	1,2	3	6	10	15
Nacre 0,21 mm		Charriage + Suspension	0	3,5	13	-	-	-	-
Nacre 0,41 mm		Charriage + Suspension	0	1	9	20	-	-	-
Sciure de bois 0,30 mm	10	Suspension	0,10	2,5	6,8	14	-	-	-
		Charriage	0	1	2,6	4,7	-	-	-
	16	Suspension	0,5	2,5	7,0	14,5	-	-	-
		Charriage	0	0,8	2,3	6,5	-	-	-
S.A.N. 0,37 mm	10 et 16	Suspension	0,5	8	20	34	-	-	-
		Charriage	1,5	6,5	16	25	-	-	-
S.A.N. 0,47 mm	10 et 16	Suspension	0,3	3	16	35	-	-	-
		Charriage	2	6,5	14,5	23,5	-	-	-



DEBIT SOLIDE EN FONCTION DE  $U^*$





Matériau	Hauteur eau (en cm)	Débits solides en g/ms							
		Vitesses moy. cm/s	35	40	45	50	55	60	65
Sable	10	Suspension	0	0	2	7	15,5	30	-
		Charriage	0	0,5	2,8	7	13,5	21	-
Fontainebleau	16	Suspension	0	0	1,2	3,8	7,5	14	-
		Charriage	0	0,5	1,5	4,0	8	15	-

La Figure 6, ci-jointe, donne un aperçu de la variation des débits solides globaux, en fonction de la vitesse de frottement, pour différents matériaux susceptibles d'être utilisés en modèles réduits.

Sur la Figure 7 on trouvera également l'influence d'une houle (H = 1 cm ; T = 0,8 s) se superposant à l'action d'un courant, sur le débit solide. Pour les faibles valeurs des vitesses ce débit solide peut être doublé lorsqu'une houle se superpose sur le modèle à l'action des courants.

Sur la Figure 8 des valeurs des débits solides sous l'action de courants agissant avec de très faibles lames d'eau (1 à 3 cm pour la bakélite ; 3 à 16 cm pour le sable de Fontainebleau) sont données permettant d'établir des présomptions sur les débits solides sous l'action de chasses d'eau agissant à basse mer par exemple. On constate que les débits solides suivent une loi en cinquième puissance de la vitesse de frottement et que pour une même vitesse de frottement le débit solide est en moyenne 10 fois plus important pour la bakélite que pour le sable de Fontainebleau (Thèse JUAREZ - Octobre 1989 - Université Paris-Sud).

### I.5.3. Formation des rides - dunes et lits plats

Une attention particulière doit être faite sur les ondulations des fonds qui apparaissent en modèle et en nature et peuvent modifier les valeurs des frottements et des rugosités et, de ce fait, les lignes d'eau.

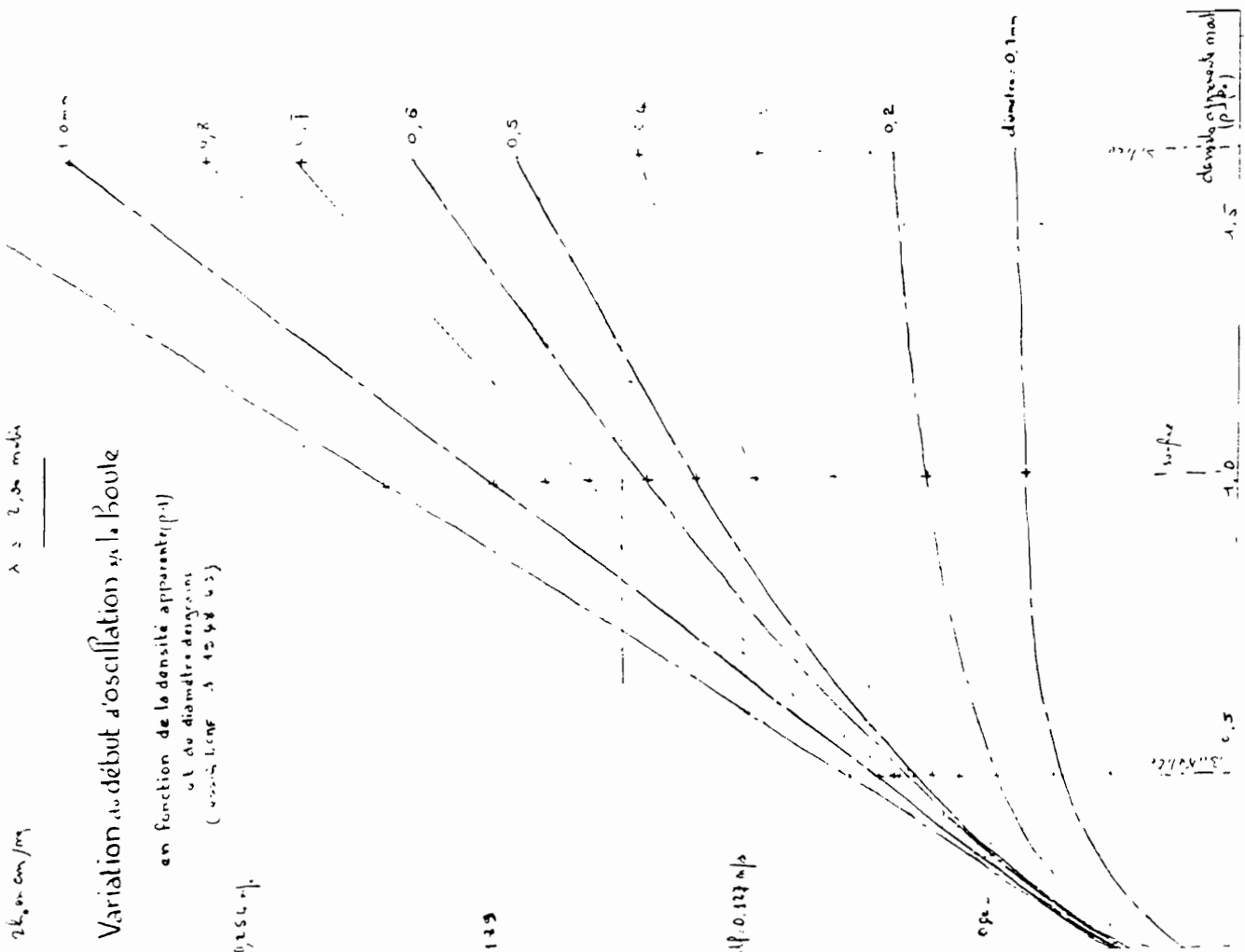
Pour chaque type de matériaux, des mesures ont été réalisées afin de donner les caractéristiques des rides et dunes en fonction :

- pour leur hauteur : du paramètre  $\tau^* = \tau/\rho'gD$
- pour la longueur d'onde : du nombre de Froude et de la densité des grains.

$\lambda = 2,30 \text{ mds}$

### Variation du début d'oscillation sur la boule

en fonction de la densité apparente ( $\rho_1$ )  
 et du diamètre des grains  
 ( voir le conf. A 45 48 49 )



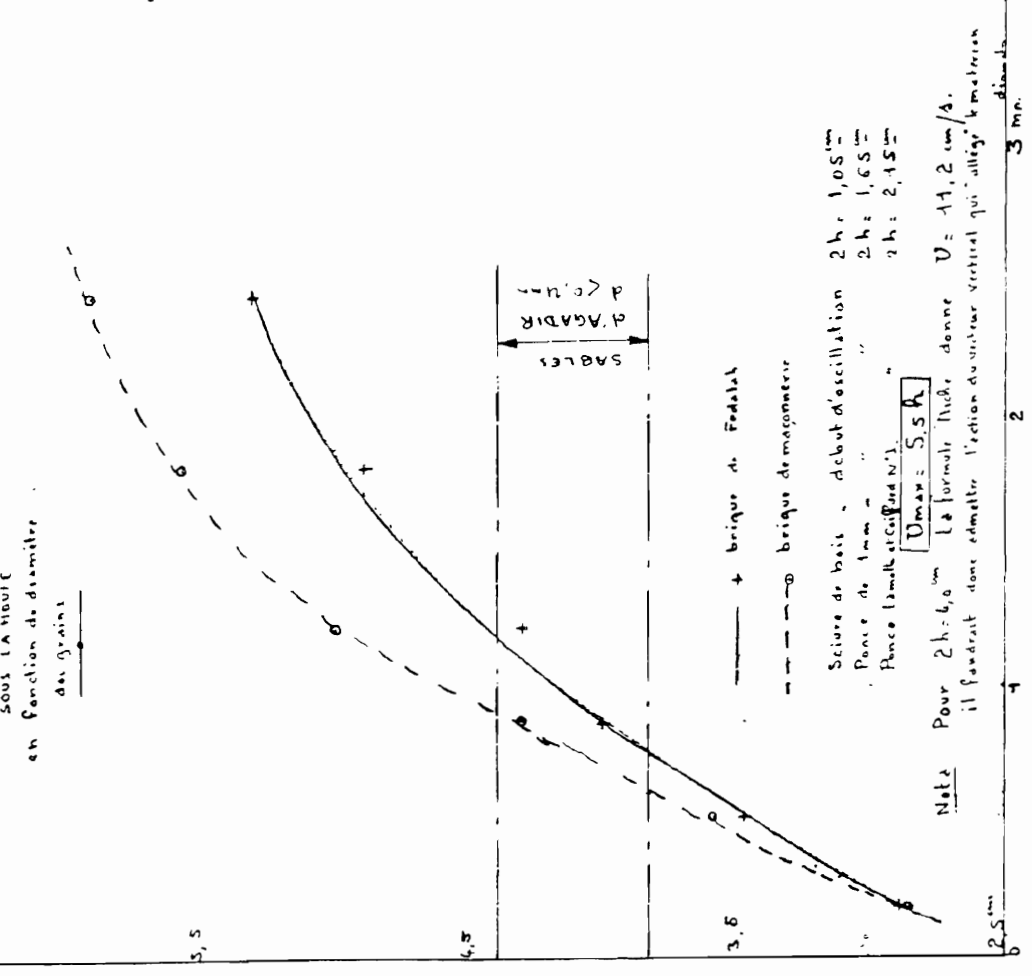
### SUR LA MISE EN OSCILLATION DES MATERIAUX

Conditions expérimentales - Les essais ont été effectués dans le petit canal de liants sur une hauteur d'eau de 15 à 16 cm. Le début d'oscillation a été noté en fonction de l'amplitude de la longueur d'onde restant constante et égal à 8 cm.

Le graphique ci-dessous nous donne les résultats pour d'un point de vue d'après d'autre part de la briques et Fedalah et de marbre.

#### COURBE donnant le DEBUT d'OSCILLATION

SOUS LA HAUTEUR  
 en fonction du diamètre  
 des grains



Sciure de bois - début d'oscillation 2 h: 1,05 m  
 Ponce de 1 mm - " 2 h: 1,65 m  
 Ponce lamelle (coefficient 1/2) " 2 h: 2,15 m

$D_{max} = 5,5 A$

Note Pour 2 h: 4,0 m La formule de Huber donne  $U = 11,2 \text{ cm/A}$ .

il faudrait donc admettre l'existence d'un facteur vertical qui allège le matériau

Des difficultés apparaissent pour conserver en similitude les pentes hydrauliques et les caractéristiques relatives des ondulations des fonds (hauteur et longueur d'onde). On s'efforce de conserver en général les mêmes pentes hydrauliques et les mêmes hauteurs relatives d'ondulation au détriment des longueurs d'onde qui ne sont pas conservées obligatoirement en similitude.

On se reportera aux études détaillées de ces phénomènes pour les différents matériaux artificiels avant de les utiliser sur un modèle réduit (*Rapport sur le choix des matériaux mobiles, L.C.H.F. 1981 ; Etude C. ESCURIER, L.C.H.F. 1983 ; Propriétés du S.A.N., L.C.H.F. Décembre 1983 ; Similitude de début d'entraînement des matériaux artificiels, T. ULRICH, SOGREAH 1985...*).

## I.6. COMPORTEMENT DES MATERIAUX ARTIFICIELS NON COHESIFS SOUS L'ACTION DE LA HOULE

### I.6.1. Début d'oscillation des particules sous l'action des houles

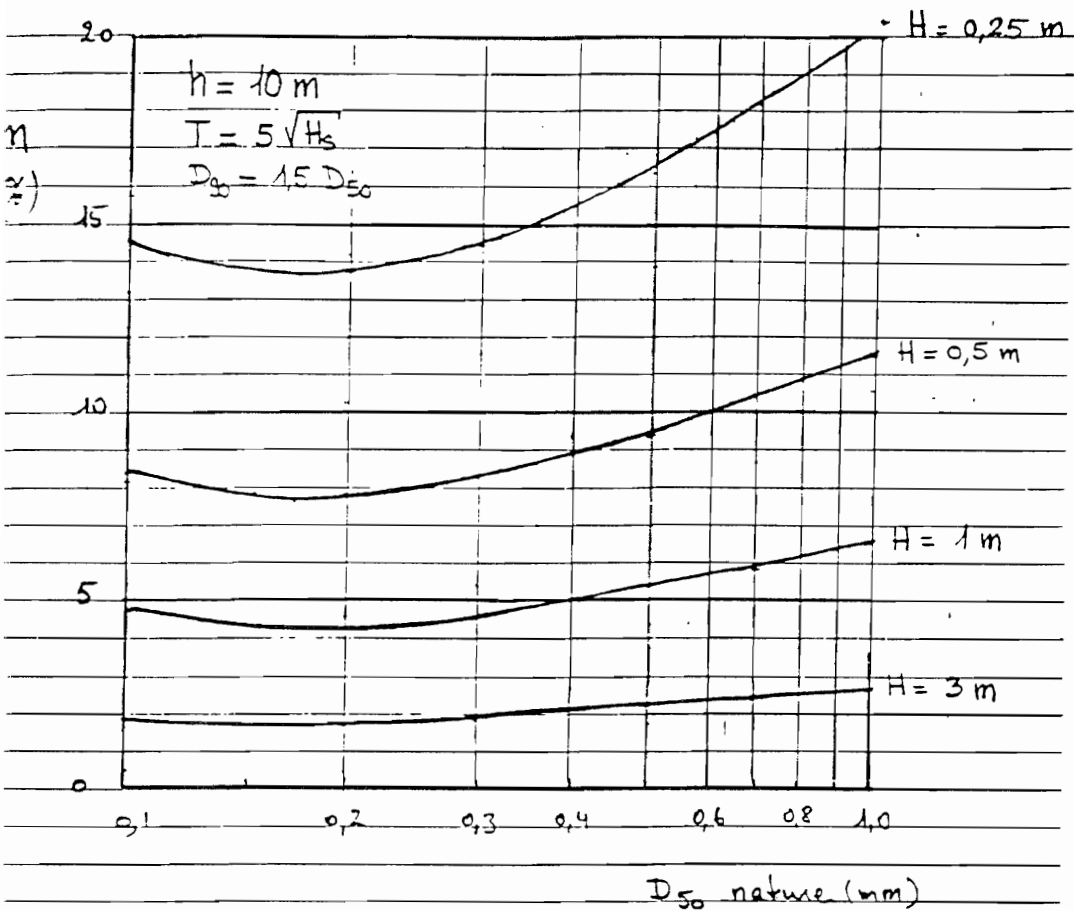
Les premières mesures sur le comportement des matériaux non cohésifs sous l'action de la houle ont été faites au L.C.H.F. au cours des années 1948 - 1949 en vue de déterminer les caractéristiques de matériaux susceptibles d'être utilisés en nature pour suivre le déplacement de sables naturels ayant le même début d'oscillation sous l'action d'une houle donnée (*Figure 9*). Le choix s'est porté sur des briques naturelles ou artificielles dont la couleur rouge permettait de les distinguer facilement des sables reposant sur les fonds.

Avec ces matériaux les missions SEKOM - L.C.H.F. du Maroc ont pu définir en nature les sens de déplacement des sables et les volumes transportés pour différents types de houle.

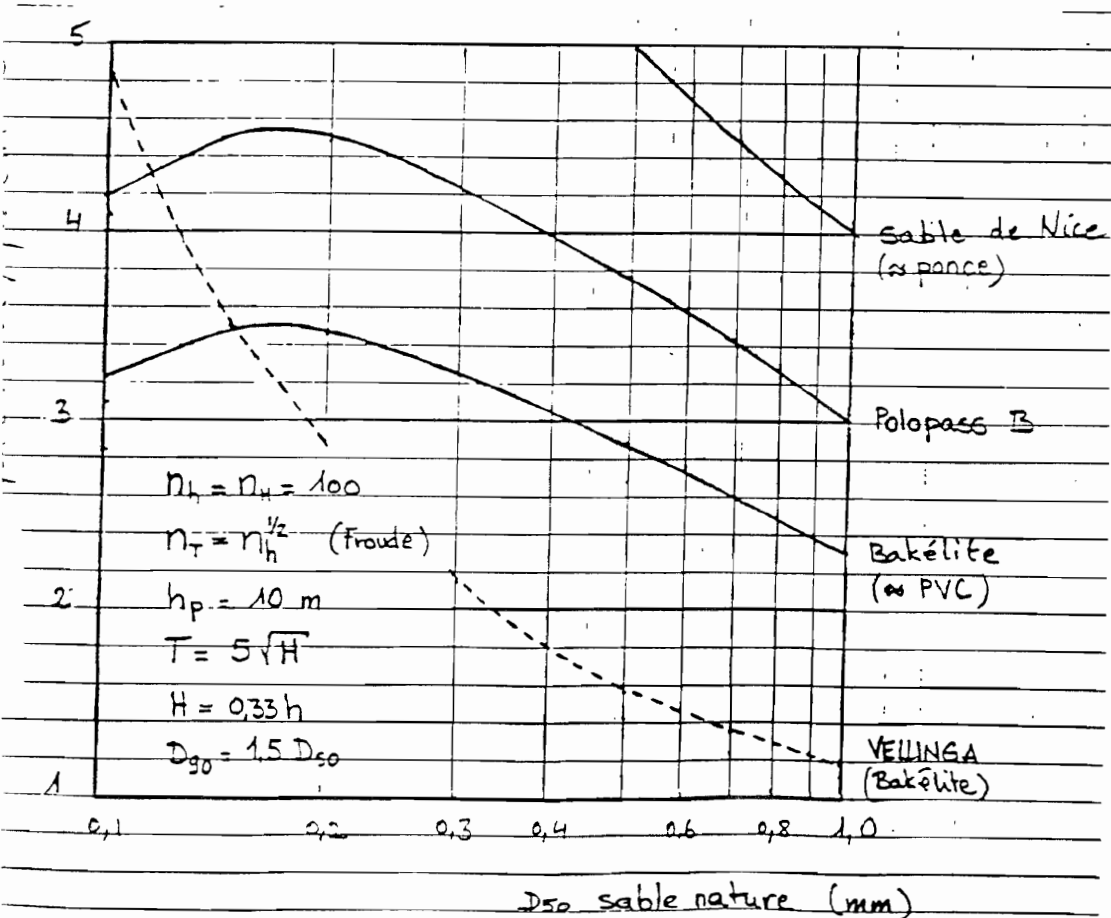
La représentation en modèle réduit de ces mouvements a conduit de rechercher des matériaux artificiels beaucoup plus légers ayant, aux échelles du modèle, des comportements analogues que les sédiments naturels (*Figure 9*). Le polystyrène, la bakélite, le soufre, les sables de Fontainebleau ont été étudiés en canal permettant dès 1949 d'orienter le choix des matériaux "maquette" dans les modèles de houle vers la bakélite (densité 1,38) qui permettait une bonne représentation de l'ensemble des phénomènes à condition d'adopter un léger coefficient de grossissement des grains du modèle par rapport aux diamètres des sables naturels, de respecter aux échelles des hauteurs, les hauteurs des vagues, de représenter les houles sous formes de "train de vagues" ayant une loi de répartition se rapprochant des lois naturelles, enfin d'adopter une "distorsion" des échelles du modèle, entre l'échelle horizontale et l'échelle verticale, de l'ordre de 2,5 à 3. Pour conserver en plus des pentes de plages convenables et les mêmes zones de déferlement des vagues, une légère correction des périodes était adoptée, les périodes du modèle étant de 10 à 15 % plus faibles que celles données par la similitude de Froude.

# MODELES REDUITS DE PLAGE

## PROFILS D'ÉQUILIBRE DES PLAGES



### PENTES EN NATURE



DE GRAAUW  
COTTIN

Mai 1986

Grâce à ces recherches applicables dès 1950 sur les modèles sédimentologiques de houle, réalisées au L.C.H.F., des résultats très valables étaient obtenus pour les prévisions des évolutions des fonds sous les mêmes actions hydrodynamiques qu'en nature.

Depuis cette époque des perfectionnements ont été apportés dans le choix des matériaux artificiels utilisés sur les modèles sédimentologiques où interviennent non seulement la houle mais les courants. L'apparition de la nacre artificielle (densité 1,22) a apporté de nouvelles possibilités.

Dans tous les cas, des limites de densité dans les matériaux artificiels étaient imposées par les risques d'obtenir sur les modèles réduits des "émulsions" de matériaux trop légers en particulier entre le déferlement et la côte, ce qui entraîne automatiquement des divergences appréciables entre le modèle et la nature.

#### **I.6.2. Influence des caractéristiques des matériaux mobiles sur le profil d'équilibre des plages**

Les études de l'influence de la nature des matériaux sur les profils d'équilibre des plages faites par SOGREAH (Mai 1986 - DE GRAAUW et COTTIN) apportent des éléments du plus grand intérêt pour le choix des matériaux mobiles dans les modèles sédimentologiques de houle. Le P.V.C. (densité 1,34), la ponce des îles Lipari (densité 1,36), le polopass B (densité 1,50), une bakélite phénopaste (densité 1,27), le plexiglass (densité 1,17) ont fait l'objet de recherches systématiques avec leurs avantages et inconvénients pour les profils de plage.

On aura intérêt à se reporter à cette étude pour le choix des matériaux mobiles en relation avec la distorsion des modèles qu'illustre la Figure 10.

La conclusion de ce rapport donne pour la bakélite : "bonne mise en suspension. Pas sensible à une sédimentation de surface apportée par des poussières lourdes du type ciment. Bonne représentation des profils avec structuration de surface due à la houle (rides). Bonne porosité du matériau lors des relevés bathymétriques". Les inconvénients étaient limités à la couleur sombre de ce matériau qui rend plus difficilement discernable l'évolution des fonds.

Pour le plexiglass, par contre, il est stipulé que ce matériau est très mal adapté à la représentation des mouvements sédimentaires et des profils de plage sous la houle.

De même, le sable siliceux reste incomplètement remanié en bas de plage sous l'action des houles courtes. Son évolution est lente ce qui le rend peu appréciable pour un avancement rapide des essais. On peut ajouter à ces inconvénients le fait que le rapport suspension/charriage n'est absolument pas représenté dans la zone de déferlement ce qui conduit à éliminer ce matériau trop dense comme, pour des raisons inverses, on a éliminé les matériaux de densité trop faible.

### I.6.3. Actions cumulées des courants et des houles

On se reportera au paragraphe I.5.2. et à la Figure 8 pour évaluer l'influence d'une houle se superposant à l'action d'un courant sur le débit solide total (charriage et suspension).

Précisons que pour les détails des conditions d'érosion, transport et dépôt des sédiments, on aura avantage à se reporter au "*Manuel d'hydrodynamique sédimentaire*" (L.C.H.F., STC-PPMVN de 1989).

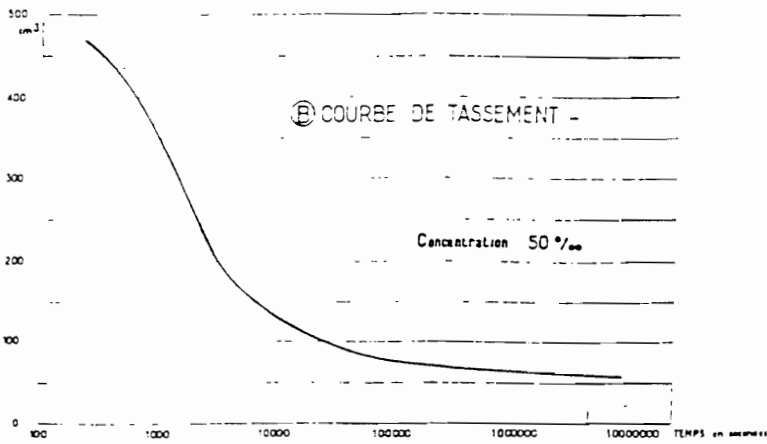
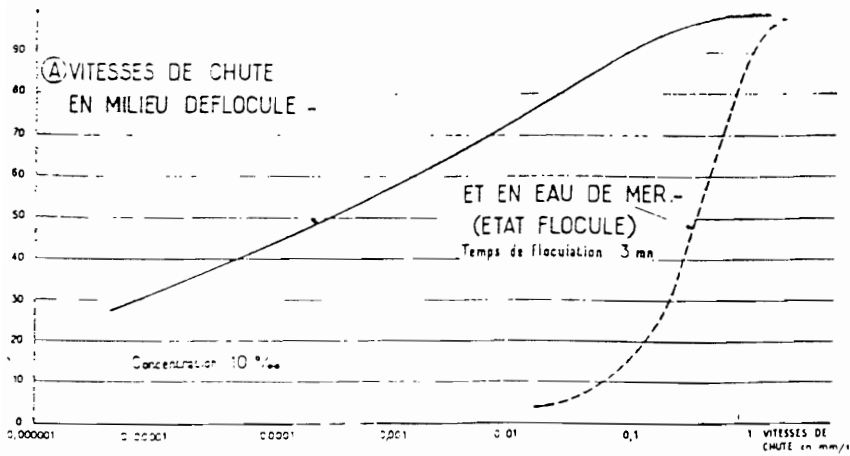
## II. REPRESENTATION DES MATERIAUX COHESIFS (vases et limons)

Comme il a été dit les matériaux cohésifs du type vases, limons ou boues, ont des propriétés physiques assez complexes et sont soumis :

- à la floculation, qui entraîne une modification de leurs vitesses de chute dans l'eau en fonction de la concentration en particules, de la dimension de ces particules, de la nature du milieu aqueux, du facteur de turbulence...
- au tassement avec élimination des eaux interstitielles et augmentation progressive de la concentration des dépôts donc de leur consolidation,
- à des problèmes de rhéologie : viscosité et rigidité initiale ou cohésion qui varieront dans le temps en fonction de l'état de tassement,
- à des conditions de reprise par les courants et par les houles en fonction de leur rigidité et de leur viscosité,
- à des transports en suspension avec des gradients de concentration ou de transport en masse près du fond, la concentration en particules solides intervenant dans ces transports,
- à des écoulements gravitaires par coulées, glissements, courants de turbidité,
- à des dépôts par "excès de charge" par rapport aux possibilités de transport par les courants ou les houles,
- etc...

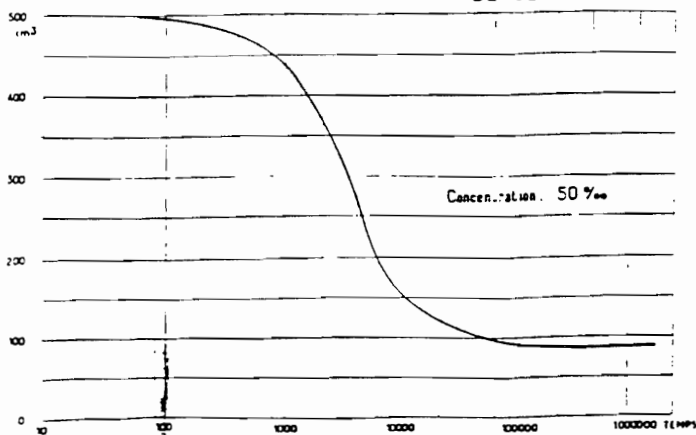
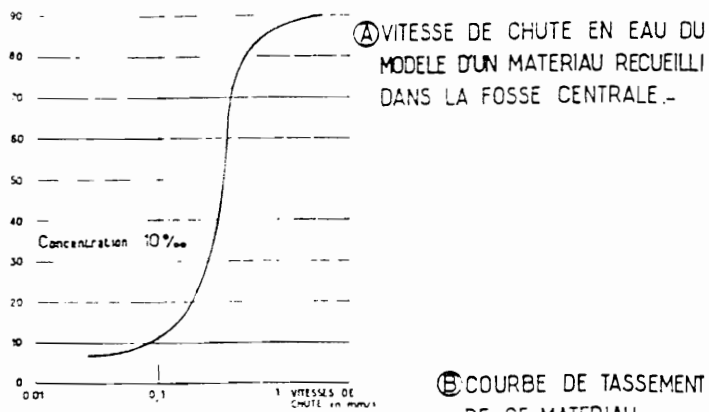
La représentation de tous ces phénomènes en modèle réduit physique pouvait apparaître du domaine de l'irréel et au début des études en laboratoire on a surtout recherché à respecter le problème du transport en suspension et de dépôt dans les zones calmes ou tourbillonnaires. Les phénomènes d'érosion et de variation des dépôts en fonction du temps semblaient trop difficiles à représenter fidèlement. Une meilleure connaissance des propriétés physiques des vases associée

## VASE NATURELLE



## MATERIAU DU MODELE

(Masse spécifique 1,40)



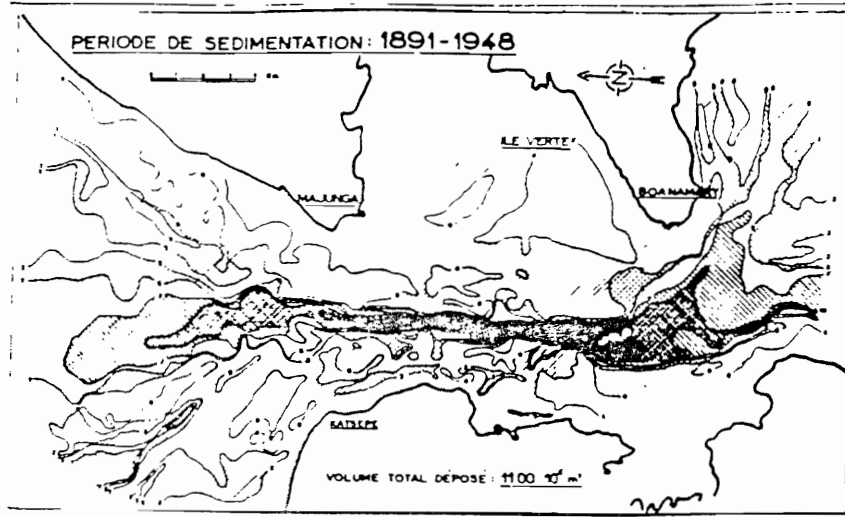
# 11 PORT DE MAJUNGA

COMPARAISON  
ENTRE LA VASE NATURELLE  
ET LE MATERIAU  
EMPLOYE SUR LE MODELE

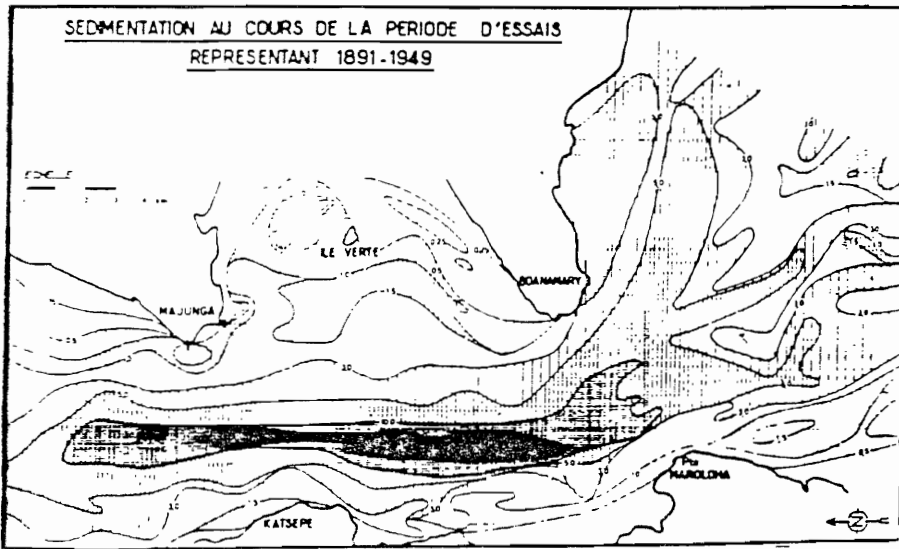
# TARAGE SEDIMENTOLOGIQUE

## EVOLUTION DES FONDS EN NATURE (PERIODE 1891-1948)

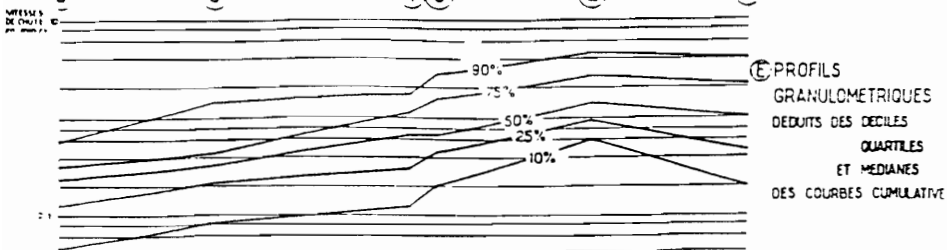
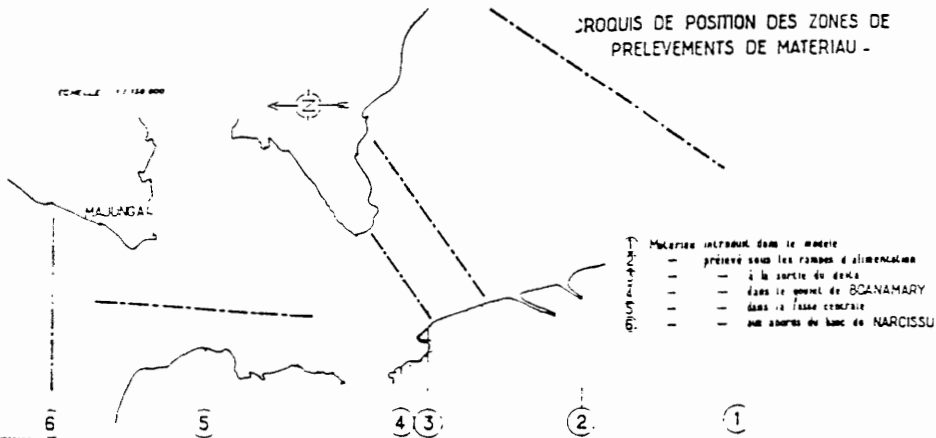
(PERIODE 1891-1948)



### EVOLUTION HOMOLOGUE SUR LE MODELE



### PROQUIS DE POSITION DES ZONES DE PRELEVEMENTS DE MATERIAU -





à des recherches sur les propriétés physico-chimiques des complexes sol-eau, allaient permettre dans les années 1960 d'aller beaucoup plus loin dans la similitude de représentation des vases en mettant au point des matériaux artificiels ayant des propriétés rhéologiques particulières et en respectant non seulement les phénomènes de floculation mais de tassement et de consolidation qui interviennent directement dans les conditions d'érosion-transport et dépôt des sédiments très fins lorsque le modèle réduit physique sédimentologique doit représenter l'ensemble des phénomènes sédimentaires.

## II.1. NATURE DES MATERIAUX ARTIFICIELS UTILISES EN MODELE REDUIT POUR SCHEMATISER LES VASES

Plusieurs types de matériaux ont été utilisés pour schématiser les vases : les poudres de bakélite dites "impalpables" obtenues par séparateur à air (densité : 1,40, diamètre : 0,005 à 0,02 mm), la sciure de bois ultra-fine (densité : 1,10, diamètre : 0,1 à 0,15 mm), S.A.N. (densité 1,07), poudre de polystyrène (densité : 1,05, diamètre : 0,15 à 0,2 mm), enfin les argiles ou les vases traitées chimiquement par des produits hydratants qui permettent dans l'état actuel d'être très proche d'une similitude correcte dans la représentation des différentes propriétés des sédiments naturels très fins.

## II.2. MATERIAUX ARTIFICIELS PLASTIQUES

### III.2.1. Poudres de bakélite

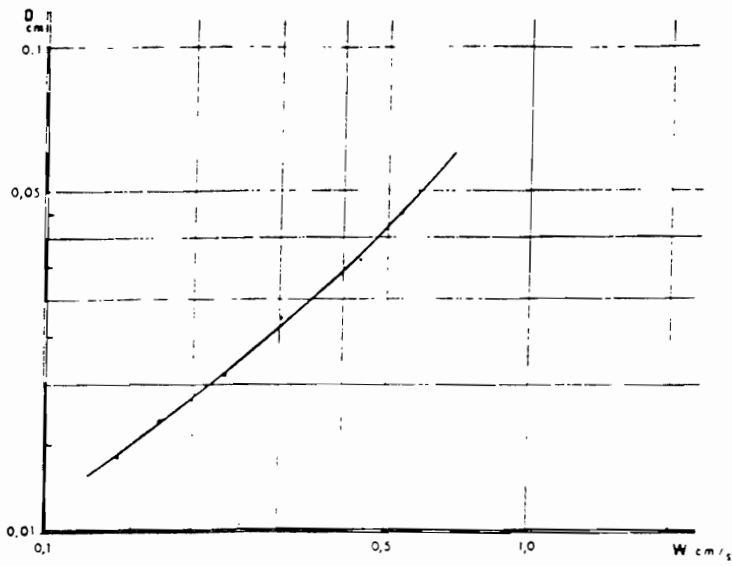
L'utilisation de poudres de bakélite, mélangées à des éléments légèrement plus grossiers schématisant les silts et les sables fins, a permis d'obtenir dès 1953 des résultats très intéressants dans la représentation des vases et des mélanges sables-vases sur les modèles réduits.

Ce matériau présente des vitesses de chute moyenne de 0,3 mm/s (0,1 à 1 mm/s) et une courbe de tassement due à la finesse des particules {Figure 11}. Il peut donc, à des échelles appropriées, se rapprocher du comportement des vases naturelles.

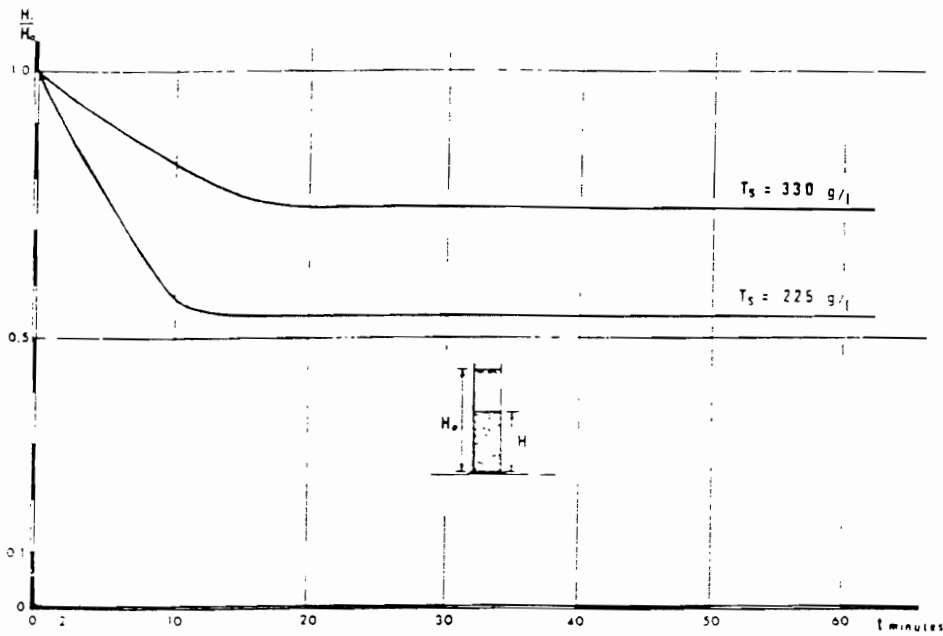
Utilisé sur les modèles de Majunga, oued Sébou, embouchure de l'Orne, rivière de Cayenne... il a permis des représentations fidèles non seulement de l'évolution des fonds mais des triages granulométriques {Figure 12}.

Cette bakélite en poudre, mélangée à des particules plus grosses, a permis de représenter simultanément avec fidélité des transports de vases et de sable (modèle de l'oued Sébou).

Ce matériau présente comme inconvénient d'avoir des propriétés de "floculation" qui varient dans le temps par suite d'une perte de la charge électrique que ses particules ont pu acquérir au cours du



VITESSE DE CHUTE EN EAU DE VILLE

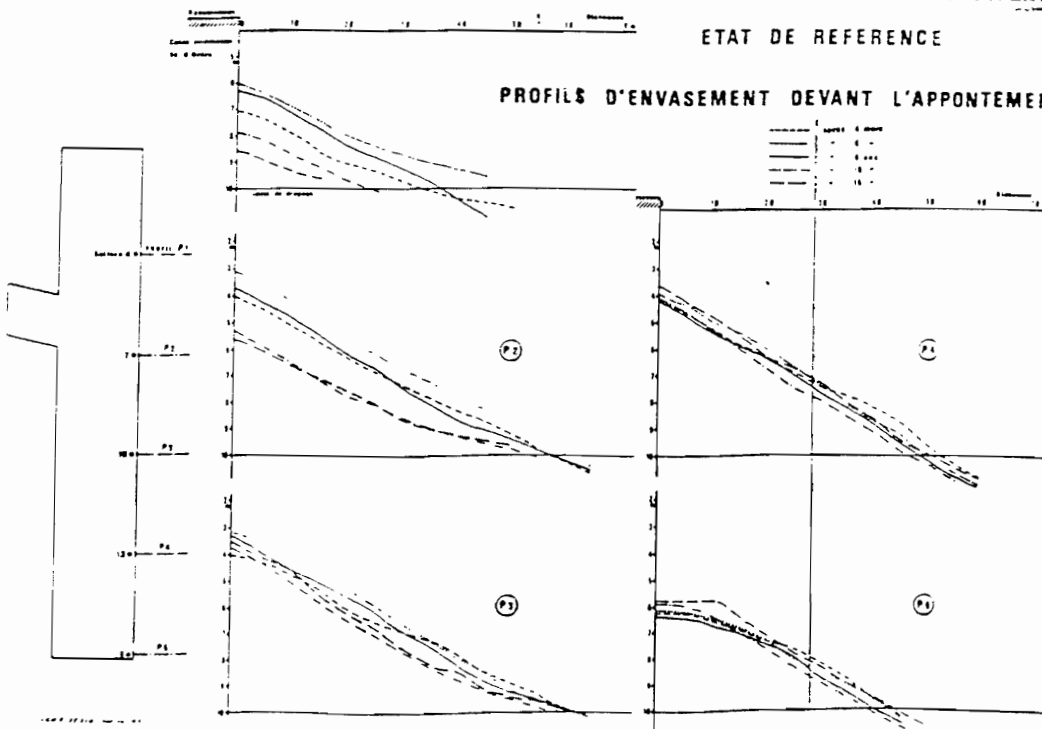


TASSEMENT EN EAU DE VILLE

EXTENSION DU PORT D'OWENDO

ETAT DE REFERENCE

PROFILS D'ENVASEMENT DEVANT L'APPONTEMENT



broyage. Sa réutilisation nécessite donc pour chaque alimentation du modèle de reprocéder à un passage du matériau préalablement séché dans le broyeur... ce qui augmente sensiblement son prix de revient malgré ses qualités indéniables pour la représentation simultanée des phénomènes d'envasement et d'ensablement.

### II.2.2. Poudres de polystyrène

Obtenues par broyage du lacqrène "cristal" ce produit a une densité de 1,05, le diamètre moyen des particules est de 0,2 mm avec des écarts entre 0,07 et 0,3 mm.

Sa vitesse moyenne de chute est de 2,3 mm/s (*Figure 13*), elle est donc supérieure à celle des vases naturelles en eau calme mais se rapproche de la similitude des vases macro-floculées aux périodes des étales de marée.

Ce matériau se tasse progressivement dans l'eau en une dizaine de minutes puis n'évolue pratiquement plus au cours du temps (*Figure 13*).

La pente d'équilibre sous l'eau du talus d'un dépôt de polystyrène est forte : la pente moyenne " $\text{tg}\alpha$ " obtenue expérimentalement est de 0,30 à 0,32 soit un angle de 16,7 à 18°.

Le début d'entraînement s'effectue pour une vitesse de frottement " $u^*$ " de 0,38 cm/s et le début de mise en suspension pour  $u^* = 0,48$  cm/s, la suspension étant généralisée pour  $u^* = 0,73$  cm/s.

Sur le modèle du port d'Owendo (1/400e en plan, 1/80 en hauteur) les mouvements des vases (contenant un pourcentage d'éléments ligneux mélangés à des argiles et à des éléments silteux très fins) ont pu être représentés très correctement notamment devant l'appontement où les dépôts s'effectuent sur 5 m d'épaisseur en quelques mois avec des pentes de talus assez fortes. Les relevés récents qui viennent d'être effectués en 1989 confirment les prévisions du modèle faites en 1978.

### II.2.3. Sciure de bois

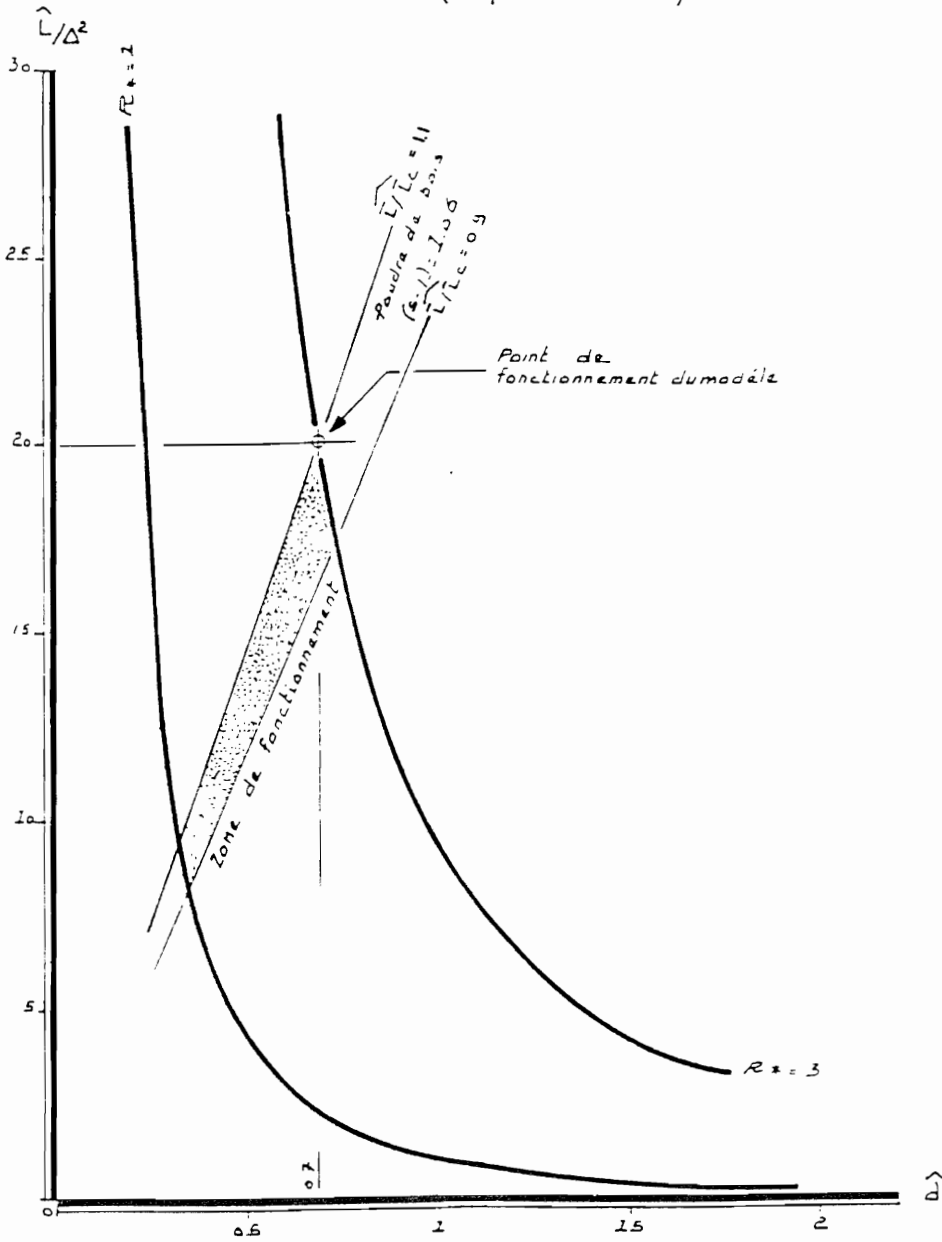
La sciure de bois a été utilisée au L.C.H.F. pour schématiser des transports de sables très fins et non pour le transport des vases.

Pour le modèle de Honfleur (1/80 en plan, 1/40 en hauteur) la poudre de bois utilisée avait une densité de 1,06 à 1,07 (saturée d'eau) et des diamètres de 0,25 à 0,40 mm.

Le choix du matériau a été fait à partir de l'abaque de similitude de Ramette (*Figure 14*) qui donne l'échelle granulométrique des particules en fonction du rapport entre l'échelle en plan et le carré de la distorsion.

NON FLEUR

ABOQUE DE SIMILITUDE  
SEDIMENTOLOGIQUE  
(d'après RAMETTE)



#### II.2.4. Styrène-Acrylo-Nitryl (S.A.N.)

De densité 1,07 ce matériau n'a pas été utilisé au L.C.H.F. pour schématiser les vases. On peut penser, compte tenu de sa faible vitesse de chute (1,7 à 2 mm/s pour des particules de 0,2 mm de diamètre) qu'il pourrait, après un broyage approprié, schématiser certaines propriétés de vases compte tenu de ses pentes d'équilibre assez fortes (30 à 35°) qui permettraient de fortes distorsions du modèle.

On retrouve un peu dans le S.A.N. (dont le comportement sous l'action des courants a été donné avec les matériaux non cohésifs) les mêmes propriétés que pour les poudres de polystyrène {Figure 15}.

#### II.3. VASES OU ARGILES TRAITÉES

Le gros progrès dans la représentation des phénomènes d'envasement sur les modèles a été en 1963 l'introduction de vases naturelles traitées chimiquement afin d'ajuster leurs propriétés physiques (floculation - vitesse de chute - tassement - rigidité) et leur comportement sous les actions hydrodynamiques (début d'entraînement en fonction du temps de tassement, débits solides, gradients de concentration des suspensions...) aux similitudes des modèles réduits physiques.

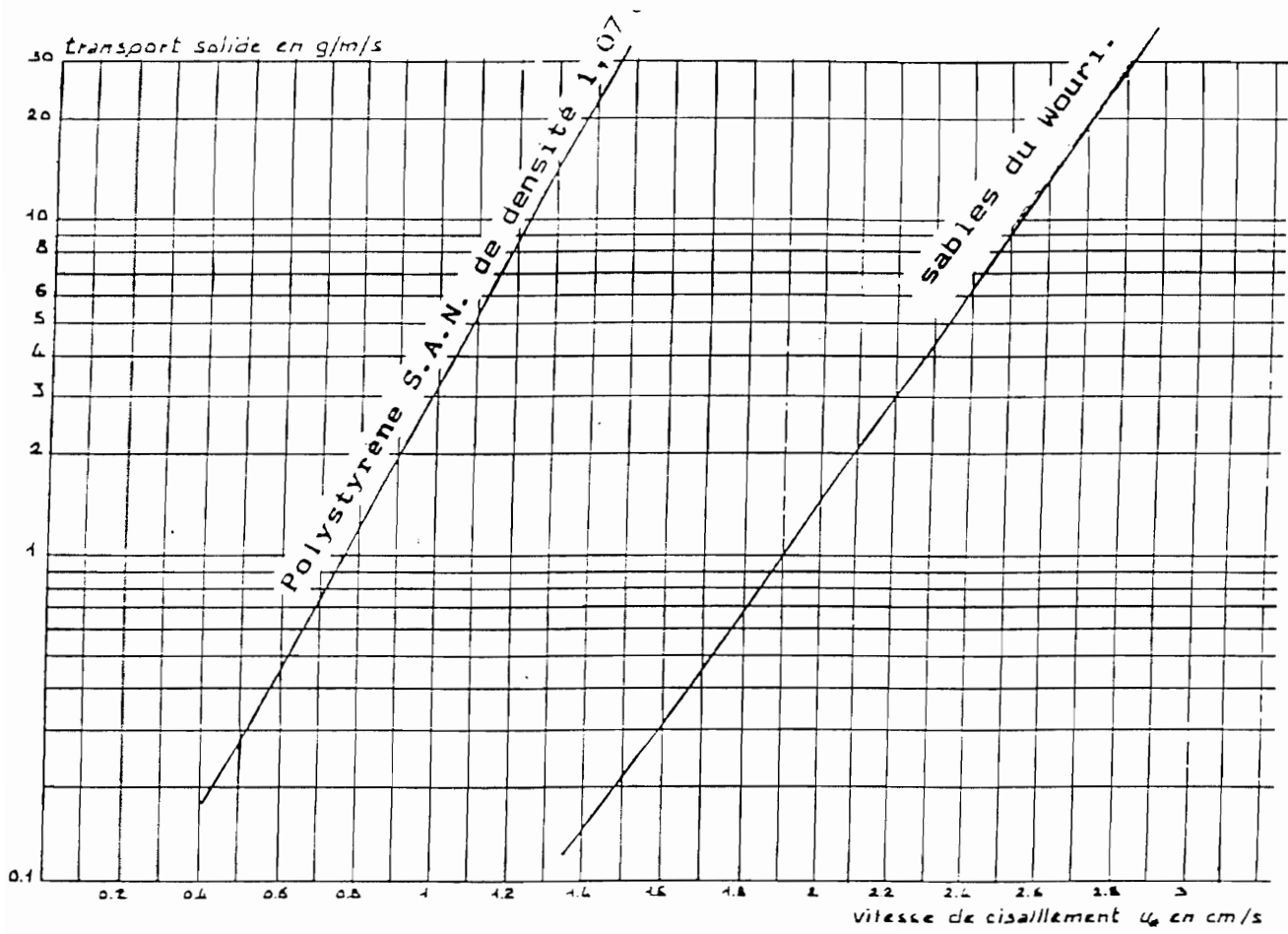
L'opération consiste à traiter des vases naturelles argileuses (illite - kaolinite - smectite) à l'aide d'ions hydratants après avoir éliminé d'une part les éléments indésirables grossiers (tamisage), d'autre part les matières organiques. Un traitement complémentaire (formol) permet de rendre ce matériau azoïque et stable. Des mélanges entre différents types de vases ou de vases et de poudres calcaires conduisent à ajuster les critères densimétriques aux critères rhéologiques donc non seulement les lois de reprise des vases artificielles par les courants ou les houles, mais les phénomènes de frottement éventuel de carène de navire dans les dépôts.

Les modèles de la Vilaine, de l'estuaire du Mahury, de l'estuaire de la Loire, de celui du Wouri (port de Douala) ainsi que différentes études de barrages (Hamiz - Fodda...) et les recherches sur la navigation dans les chenaux envasés..., ont été traités en adoptant cette technique de représentation des mixtures de vases en modèle réduit.

En utilisant une vase naturelle provenant de l'estuaire de la Loire (mélange illite, kaolinite, smectite, associé à des particules très fines de quartz) le traitement réalisé a été :

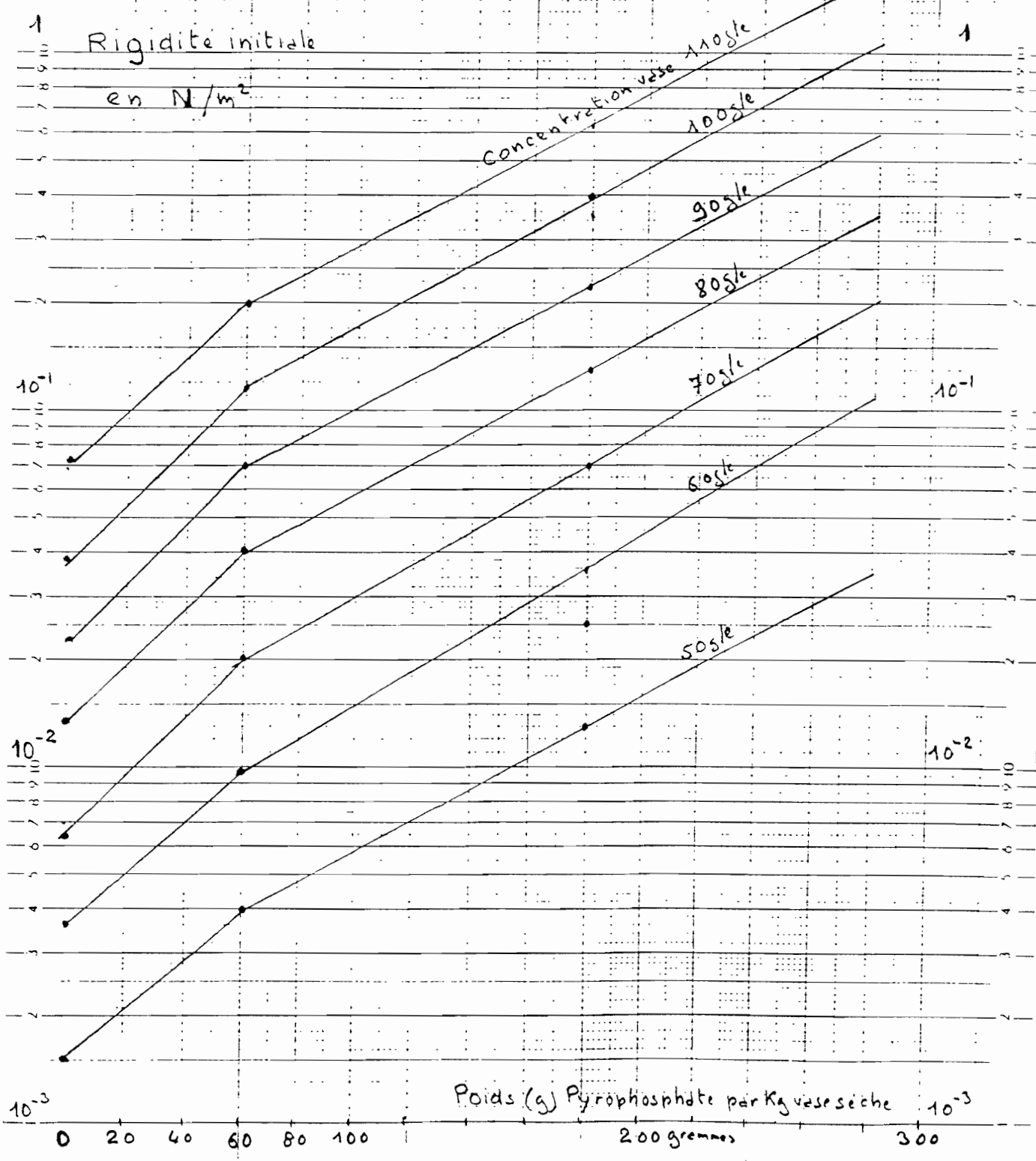
- tamisage pour éliminer les éléments grossiers (fibres, sables, etc...) - tamis de 140 microns,
- élimination des matières organiques par le permanganate à raison de 80 g par m<sup>3</sup> de vase ayant une concentration en matières sèches de 100 g/l (0,8 g par kg de vase sèche),

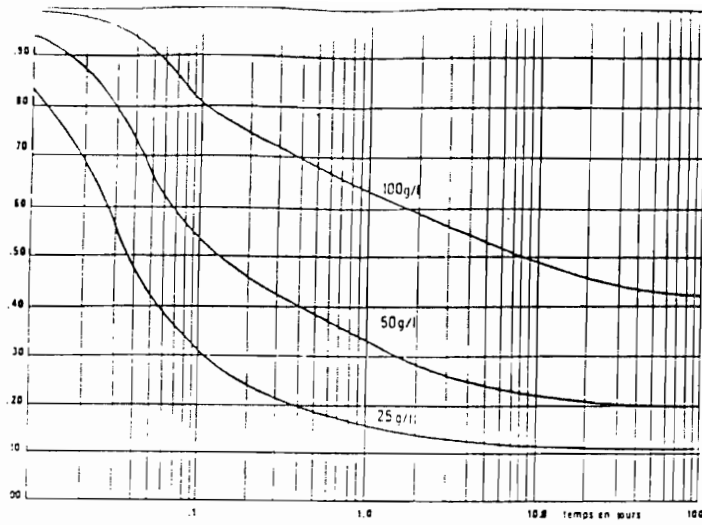
TRANSPORT DES SEDIMENTS EN FONCTION DE  $U^*$ .



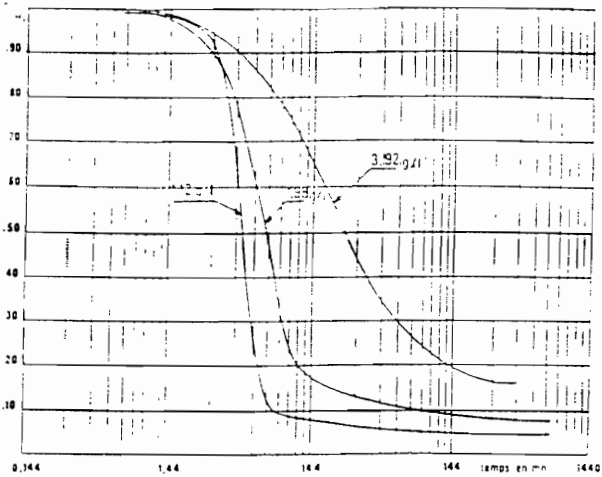
(vase Loire en eau ville)

VARIATION RIGIDITE INITIALE  
EN FONCTION TENEURS EN PYROPHOSPHATE

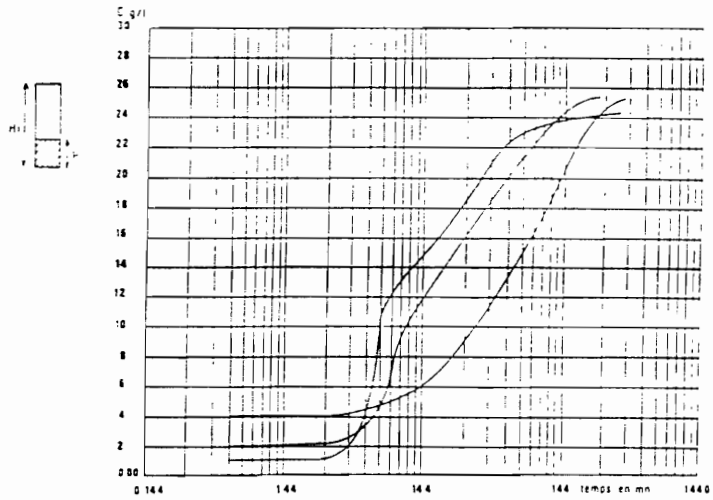




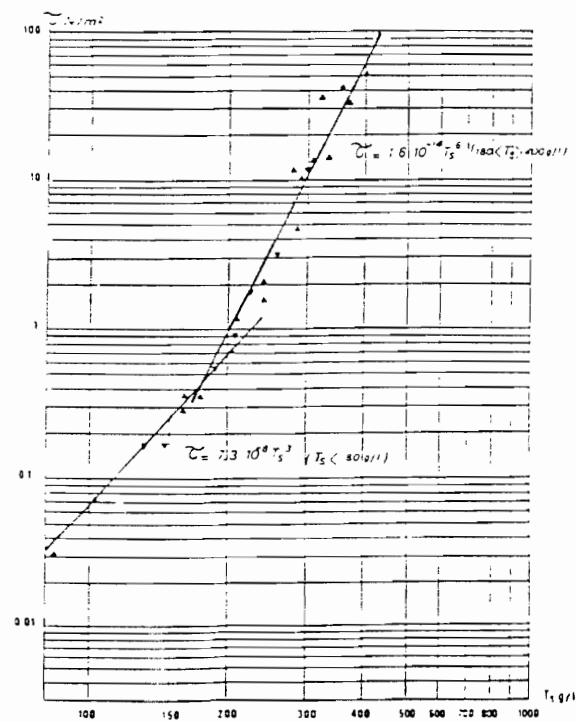
Tassement des vases-nature- (hauteur du culot)



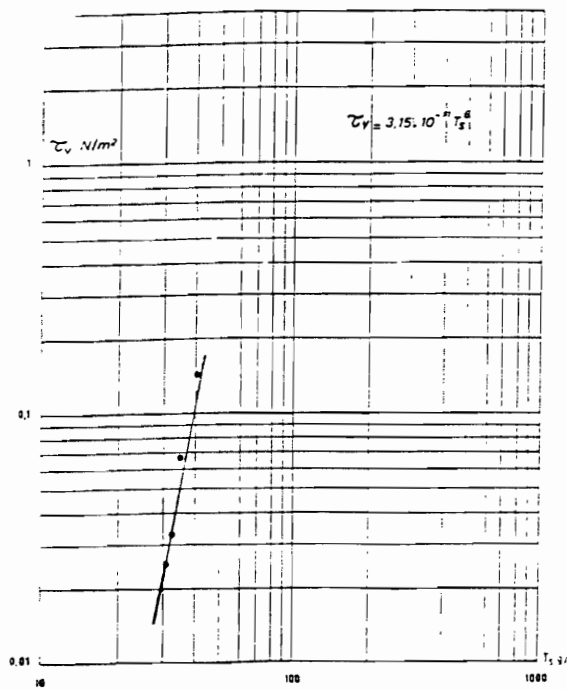
Tassement des vases-modèle- (hauteur du culot)



Tassement des vases-modèle- (concentration)



Rigidité initiale en fonction de la concentration en sédiment sec (nature)



Rigidité initiale en fonction de la concentration en sédiment sec (modèle)



- traitement en eau de ville de la suspension de vase à raison de 1/4 de pyrophosphate de sodium par poids de vase sèche,
- malaxage du produit et homogénéisation des mixtures.

Le dosage en pyrophosphate peut être ajusté pour modifier les phénomènes de floculation, tassement et rigidité des mixtures {Figure 16}.

Avec un traitement approprié de ces vases de Loire on a pu obtenir en modèle réduit :

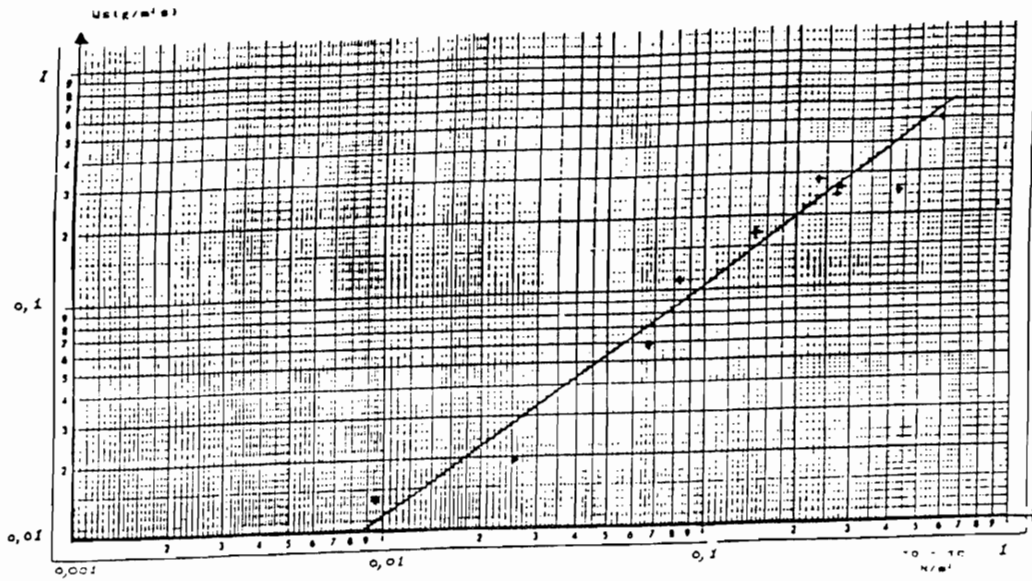
- des vitesses de chute moyenne de 0,5 à 1 mm/s conformes aux lois de similitude,
- des tassements des vases présentant, aux échelles, de grandes analogies avec la nature. En modèle l'asymptote du tassement est atteinte 20 minutes après le début du tassement. La concentration atteint alors 25 à 30 g/l de mixtures de vase pyrophosphatée ce qui correspondait pour le modèle de Douala (échelle en plan 1/600, échelle des hauteurs 1/70) à un tassement de 250 g/l après 7 jours {Figure 17},
- les rigidités sont, compte tenu du tassement, aux échelles de similitude (échelle de 1/8),
- les vitesses critiques d'érosion sont représentées aux échelles de similitude ainsi que les dépôts en marées de Morte Eau,
- les débits solides en suspension sont comparables à ceux de la nature et les rapports des turbidités à 1 m du fond varient, en fonction des coefficients de marée, de la même façon qu'en nature. Rapport de 5 à 10 entre Morte Eau et Vive Eau {Figure 18}.

Cette représentation des vases en modèle réduit a permis, aussi bien sur les modèles de l'estuaire du Wouri (port de Douala) que sur celui de la Loire, d'obtenir des représentations fidèles des mouvements sédimentaires et de prévoir dans de bonnes conditions les évolutions des fonds et les dragages après approfondissement ou modification du tracé des chenaux. Les résultats vérifiés en nature en 1989 confirment la validité des prévisions.

Pour les études de navigabilité dans les chenaux envasés, comportant l'étude du mouvement des navires au-dessus ou partiellement envasés dans des vases du chenal, des recherches encore plus poussées ont permis d'ajouter aux similitudes des vitesses de chute, tassement, rhéologie, transport des dépôts des sédiments, une similitude densimétrique et des gradients de densité dans les dépôts.

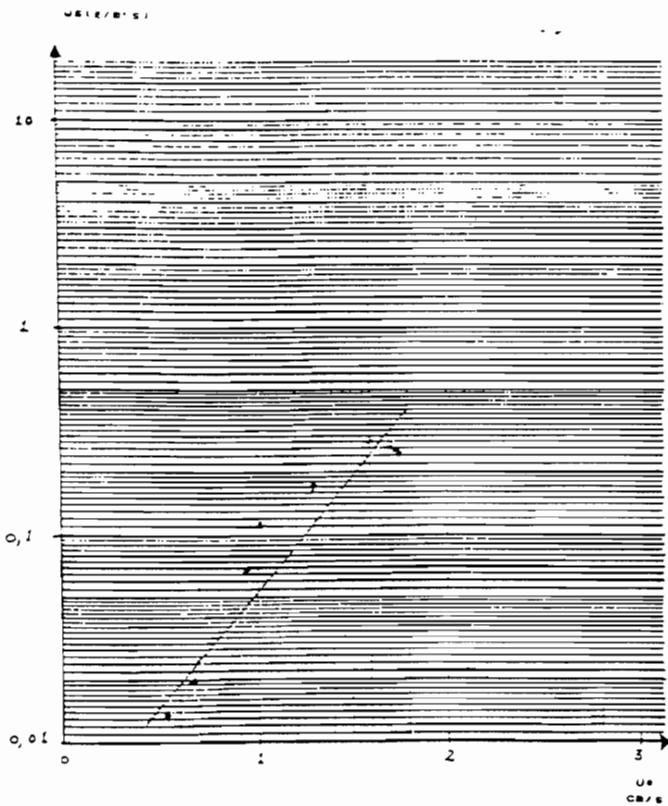
Le mélange de vases de natures différentes ou l'addition de poudre de calcaire ont permis d'obtenir des résultats satisfaisants {Figure 19}.

Précisons que ces préparations des vases en similitude nécessitent des techniques très appropriées et que des corrections doivent être

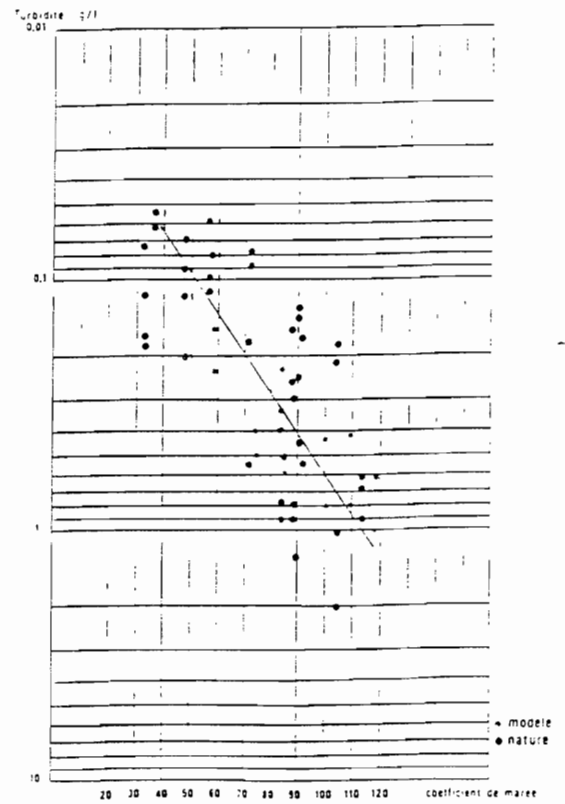


VASE DU MODELE.

DEBITS SOLIDES EN SUSPENSION SOUS L'ACTION DES COURRANTS



DEBITS SOLIDES DE LA VASE DU MODELE DU WOURI  
SOUS L'ACTION DES COURRANTS POUR UNE  
CONCENTRATION EN SEDIMENTS SECS DE  
37 g/l



Concentration en fonction du coefficient de marée

apportées en fonction des caractéristiques de l'eau de ville et de sa température. On arrive ainsi à de très grandes possibilités dans la représentation rigoureuse des phénomènes liés aux problèmes des vases et sédiments cohésifs en modèle réduit physique.

Parallèlement, un matériel sophistiqué a été mis au point par SOGREAH-L. C.H.F. pour mesurer avec précision les caractéristiques rhéologiques des dépôts de vases traitées, les concentrations dans les dépôts sur de très faibles épaisseurs ainsi que la turbidité des eaux en continu dans une gamme étendue de valeurs allant de quelques mg par litre à 10 g/l de concentration.

C'est grâce à cette méthodologie d'essais et de mesures et à des techniques très élaborées dans la représentation des sédiments naturels cohésifs ou non cohésifs, que des résultats très précis ont pu être obtenus à l'aide des modèles réduits physiques sédimentologiques permettant indirectement, par les connaissances acquises sur les propriétés physiques et le comportement des sédiments sous les actions hydrodynamiques, d'ouvrir la porte à des modèles mathématiques sédimentologiques qui apportent d'ores et déjà des compléments très utiles aux résultats des modèles physiques.

\* \*

\*

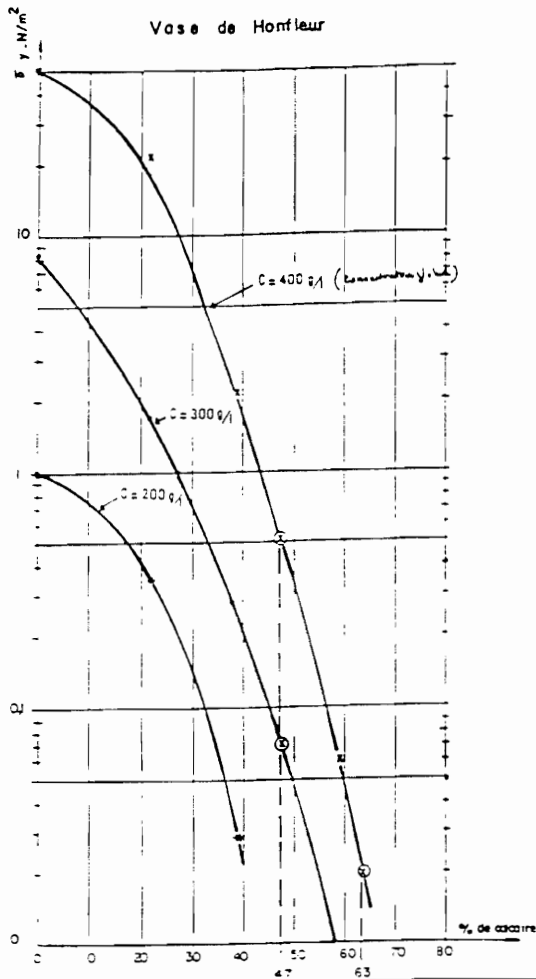
Décembre 1989

Le Conseiller Scientifique

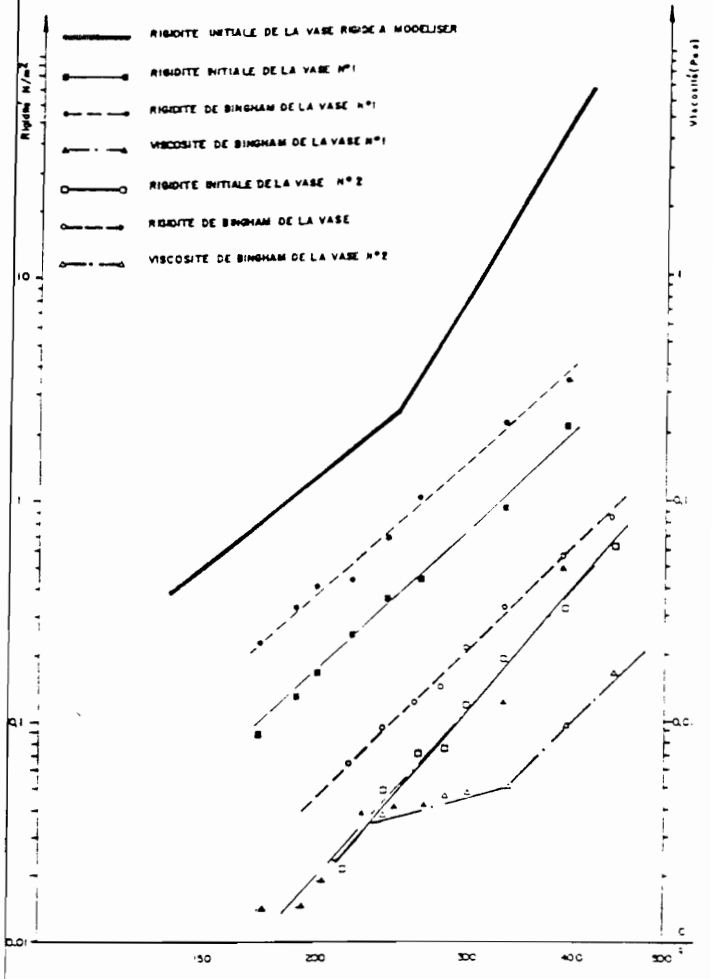


C. MIGNIOT

VARIATION DE LA RIGIDITE INITIALE EN FONCTION DU % DE CALCAIRE



VARIATION DES PARAMETRES RHEOLOGIQUES EN FONCTION DE LA CONCENTRATION



GRADIENT DE DENSITE  
Vase la plus rigide (n°1)

