



# ETUDE GLOBALE DU TRANSPORT SÉDIMENTAIRE DANS LE GOLFE DU MEXIQUE

J. CORNEJO VELASCO et J. LOPEZ OLIVARES

Ecole Supérieure d'Ingénierie et d'Architecture, Institut National Polytechnique, Mexico

## Résumé

*Les ports, les lagunes littorales et les estuaires mexicains du Golfe du Mexique sont soumis à des taux de sédimentation très variables, étant par endroits fort élevés selon les caractéristiques des sédiments et les conditions hydrodynamiques locales. Les ouvrages de protection côtière réalisés sur ce littoral pour contrôler la sédimentation et l'érosion présentent un comportement incertain et mal connu. Devant cette problématique, le Laboratoire d'Hydraulique de l'Institut National Polytechnique du Mexique a entrepris cette étude sur le transport global des sédiments dans le Golfe du Mexique.*

*Un nombre de travaux préalables concernant le transport sédimentaire en divers sites du Golfe du Mexique réalisés depuis 1955 sont à la base de cette recherche. Parmi les moyens utilisés, on remarque des levés bathymétriques espacés dans le temps, des photographies aériennes et des pièges à sédiments. L'analyse de la houle incidente et la caractérisation des sédiments sont deux aspects primordiaux qui sont abordés.*

*Les recherches en Génie Côtier menées partout dans le monde depuis déjà plusieurs décennies ont permis d'acquérir un degré considérable de connaissances au sujet du transport sédimentaire en milieu marin. Cette recherche, conduite en accord avec les développements récents de la discipline, a permis d'évaluer le débit annuel et la direction du transport sédimentaire le long des côtes mexicaines du Golfe. La dynamique globale a pu également être décelée. En effet, un transport littoral prédominant vers la frontière avec les Etats Unis est constaté.*

## INTRODUCTION.

Le développement des activités économiques sur les côtes mexicaines du Golfe du Mexique est d'une importance de premier ordre pour ce pays, alors, l'étude des phénomènes sédimentologiques sur ces côtes est actuellement une priorité.

Le mouvement des sédiments lié à la houle et aux courants marins, entraîne dans certains sites une forte sédimentation (Tampico-Tamaulipas ; Tuxpan-Veracruz et Coatzacoalcos-Veracruz), laquelle requiert l'entreprise de travaux onéreux de dragage d'entretien et la construction d'ouvrages de protection (brises-lames, épis). On constate, dans plusieurs sites du Golfe du Mexique, que la vie utile des ouvrages de protection a été dépassée ; dans d'autres sites, le comportement des ouvrages vis-à-vis de la dynamique sédimentaire est mal connu.

Un deuxième problème lié au transport sédimentaire est l'érosion de plages, notamment dans les régions de Tabasco et de Campeche. Si cette érosion est souvent naturelle, elle est parfois liée aux aménagements portuaires. Les principales conséquences de ce

phénomène sont la destruction des ouvrages de Génie Civil et la perte de terrains. La construction d'épis a été la solution la plus couramment utilisée afin de lutter contre l'érosion ; cependant, dans certains sites l'érosion s'est poursuivie, même après la construction de ces ouvrages.

Devant les problèmes de sédimentation et d'érosion qu'affectent les côtes du Golfe du Mexique, il est indispensable de connaître les mécanismes du transport sédimentaire littoral. Ceci devient impératif aux environs des ouvrages en opération, en construction et en projet, ainsi que sur les plages soumises à l'érosion.

Cette étude devra éclaircir quel est le volume annuel et le sens général du transport sédimentaire, de même que la répartition du débit solide dans la zone côtière. Evidemment, ces descriptions vont varier d'un site à un autre, selon une interdépendance existant entre la dynamique des fonds et les régimes généraux de la houle et des courants. Les caractéristiques des sédiments jouent ici un rôle primordial.

Des études formelles pour lutter contre les problèmes liés au transport sédimentaire se réalisent au Mexique depuis les années cinquante. Bien que les critères utilisés soient chaque jour plus réalistes et plus perfectionnés, le Laboratoire d'Hydraulique de l'Institut National Polytechnique du Mexique (LHIPN), observe des contradictions fondamentales entre les différentes sources de renseignements. Ces divergences sont dues à une mauvaise compréhension du fonctionnement des ouvrages de protection et aux modifications du transport sédimentaire par suite des travaux réalisés pour contrôler la sédimentation et l'érosion.

Cette étude globale du transport sédimentaire dans le Golfe du Mexique est fondée sur l'ensemble de travaux de Génie Côtier réalisés depuis 1955. Ces études font appel à des levés bathymétriques, à des photographies aériennes et aux images de satellite. L'analyse de la houle incidente et la caractérisation des sédiments sont deux aspects complémentaires qui sont abordés.

## ANTÉCÉDENTS.

Compte tenu de l'impact du transport sédimentaire sur les différentes activités économiques développées dans le Golfe du Mexique, les institutions publiques mexicaines liées à la mer ont entrepris de nombreuses études afin de bien caractériser ce phénomène. Parmi ces institutions on remarque: la Secrétairerie de la Marine Nationale (SMN), la Secrétairerie des Communications et des Transports (SCT), la Secrétairerie de la Pêche (PESCA), l'entreprise nationale du pétrole (PEMEX) et l'entreprise nationale d'électricité (CFE). Ces études sont menées en étroite collaboration entre les différentes institutions concernées et avec la participation de bureaux d'étude privés, d'instituts de recherche et d'écoles d'enseignement supérieur.

Les études réalisées ont permis d'évaluer la débit sédimentaire littoral et, dans certains sites, le transport sédimentaire dans la zone profonde. Les principales méthodes utilisées par ordre d'importance sont:

- a) l'utilisation des formules théoriques et empiriques,
- b) le suivi de l'évolution de la ligne de côte à partir des photographies aériennes et des sectionnements topographiques,
- c) l'évaluation du volume déposé ou érodé, à partir des levés bathymétriques et des sectionnements topographiques, réalisés à proximité des ouvrages de protection,
- d) l'évaluation du volume déposé dans des chenaux d'accès portuaire, dans des pièges artificiels à sédiments et aux environs des embouchures des fleuves.
- e) l'utilisation des marqueurs fluorescents et radioactifs.

L'ensemble des méthodes tient compte des caractéristiques des sédiments et de la houle incidente.

L'utilisation des photographies aériennes a souvent servi à déterminer le sens du transport sédimentaire résiduel ; ceci, à partir de la visualisation de l'évolution de la ligne de côte des deux côtés des ouvrages de protection (Tabl. I). Dans certains sites, la mesure du volume déposé ou érodé, en utilisant la troisième méthode décrite ci-dessus, conduit à des résultats opposés à ceux issus de l'utilisation des photographies aériennes.

Toute l'information disponible au sujet du transport sédimentaire dans le Golfe du Mexique est utilisée dans cette étude globale, et dans la mesure du possible, elle est complétée par l'application de l'ensemble des méthodes exposées précédemment. Une attention spéciale est mise, afin de détecter les éventuelles contradictions résultant de l'utilisation des photographies aériennes.

Une vérification permanente de l'état mondial des connaissances relatif au transport des sédiments, permet la conduite de cette étude selon les techniques de pointe et les développements récents en Génie Côtier.

## ASPECTS THÉORIQUES SUR LA MÉCANIQUE DU TRANSPORT DE SÉDIMENTS DANS LE GOLFE DU MEXIQUE.

Les sédiments du Golfe du Mexique sont essentiellement sablonneux. Sous les actions de la houle et des courants marins, on constate que ces sédiments sont soumis à deux types de transport :

Un *transport de zone profonde* derrière le lieu de déferlement de la houle, qui est simultanément affecté par la houle et par les courants,

Un *transport littoral* entre le lieu de déferlement de la houle et la remontée maximale de celle-ci ; l'importance du courant est ici négligeable.

### Transport de sédiments dans la zone profonde.

La condition critique de mise en mouvement en zone profonde est étudiée en utilisant un critère résumé par Bonnefille et Perneckner, dont la validité a été vérifiée pour le site de Dos Bocas-Tabasco à l'aide de marqueurs fluorescents et radioactifs.

Cette étude a montré que ces sédiments sont mis en mouvement jusqu'à une profondeur de 25 m par une houle de 2,50 m et jusqu'à une profondeur de 15 m par une houle de 1,65 m.

Le mouvement orbital de l'eau lié à la houle met en suspension les sédiments, lesquels sont par la suite transportés par le mouvement résiduel lié à la même houle et par les courants locaux de marée, de vent et de densité. Ainsi, la direction du transport dépend principalement des courants mais, lorsque ceux-ci sont nuls, le transport est dirigé vers la côte sous conditions ordinaires et vers la zone profonde sous conditions de tempête.

Le transport de sédiments dans la zone profonde doit être pris en compte dans la conception des ouvrages portuaires. En effet, la sédimentation dans les chenaux d'accès aux ports, notamment dans la partie au-delà du lieu de déferlement de la houle, est due à ce mécanisme de transport. De même, ce transport doit être considéré comme une éventuelle explication du comportement mal connu de certains ouvrages de protection en opération.

Les diverses formules existantes permettant d'évaluer le débit sédimentaire requièrent, en général, un grand nombre de données qui ne sont pas toujours simples à déterminer. Ceci limite considérablement la quantité d'outils théorico-empiriques potentiellement utilisables.

Au Mexique, la formule de Bijker (1971, 1980) est la plus largement utilisée. Ce choix est justifié par le fait que celle-ci tient compte de la plupart des facteurs jouant dans le transport sédimentaire. La formule de Bijker a été ajustée pour le site de Dos Bocas-Tabasco grâce au suivi, pendant huit mois, d'une fosse artificielle jouant le rôle d'un piège à sédiments. Cette fosse a été draguée jusqu'à une profondeur variant de 17 à 19 m (la cote initiale du fond était de -13 m) sur une largeur de 150 m et sur une longueur de 1000 m (PMSC ; J. Cornejo, 1982).

### Transport littoral de sédiments.

Le transport littoral est lié à une incidence oblique de la houle sur la côte. Les sédiments sont essentiellement mis en mouvement en suspension par la houle déferlante et transportés par les courants littoraux suivant la direction de la ligne de côte.

La théorie, les observations sur le terrain et les expériences en laboratoire montrent que le débit de transport littoral dépend linéairement de l'énergie de la houle (ou plutôt de la puissance par unité de largeur  $P_1$ ). Une série de formules ont été établies selon ce critère. Parmi ces formules, on remarque celle de Komar et Inman (1970) et Inman (1980) qui a été vérifiée et graduellement améliorée à partir de mesures en utilisant des marqueurs fluorescents. Cette formule semblable à celle du CERC (Shore Protection Manual) s'écrit :

$$q_1 = K P_1 \dots \dots \dots [N/s]$$

où  $q_1$  est le débit solide pondéral déjaugé, K un coefficient de capacité de transport de la houle qui est considéré constant et égal à 0,77 pour les sables de diamètre compris entre 0,15 et 0,25 mm et pour les houles variant de 0,50 à 2,00 m. Le terme  $P_1$  est donné par l'expression suivante :

$$P_1 = (E C_n)_b \sin \alpha_b \cos \alpha_b \cdot [W/m]$$

SITE	VOLUME NET ESTIME (m <sup>3</sup> /an)	DIRECTION DU TRANSPORT	SOURCE
Corpus Christi, Texas	50 490	N - S	U.S. Army CERC, 1973
Corpus Christi, Texas	310 000	S - N	Caldwell
Pinellas County, FL	29 070	N - S	U.S. Congress, 1954
Galveston, Texas	256 046	W - E	CERC, 1919-1934
Brownsville, Texas	92 000	S - N	Caldwell
Sabine, Texas	5 280 000	W - E	Caldwell
Laguna Madre, Tamaulipas	30 132	N - S	Bureau Consultores S.A. pour la S.M.N. Photographie
Altamira, Tamaulipas	350 000	N - S	Régime de la houle
		N - S	Bureau Cidiport
		N - S	Bathymétrie Photographie
Tampico, Tamaulipas		N - S S - N	Photographie aérienne Bathymétrie / J.L.O.
Laguna de Tamiahua, Veracruz	39 682	S - N	Bureau Consultores S.A. pour la S.M.N.
Tuxpan, Veracruz	302 262	S - N	Bathymétrie
		N - S	Photographie
		S - N	Régime de la houle
	200 000 aprox	N - S	Bureau Consultoría Técnica pour la S.C.T. Régime de la houle E.S.I.A. - I.P.N. pour la C.F.E.
			Régime de la houle
			Bureau Consultores S.A. pour la S.C.T. Bathymétries
163 974		Dpt. Océanographie - C.F.E.	
118 520	N - S	CIFSA, Larras, 1972	
48 483 302 262	S - N S - N	Bureau Consultoría Técnica Puertos Mexicanos, 1990	
Laguna Verde, Veracruz		S - N	Photographie
Ostion, Veracruz	104 500	W - E	Bureau PMSC, 1982 pour PEMEX
Coatzacoalcos, Veracruz	111 610	W - E	Photographie
		E - W	Bathymétrie
		E - W	Régime de la houle Bureau CIFSA pour la S.M.N.
Dos Bocas, Tabasco	200 000	E - W	Photographie PMSC pour PEMEX, 1980
		E - W	Bathymétrie
		E - W	Régime de la houle
Frontera, Tabasco	350 000	E - W	Régime de la houle
			Bureau Sistemas hidráulicos y ambientales S.A. de C.V. pour la S.C.T.
		E - W	Photographie
Yucalpeten, Yucatan		E - W	Photographie
		E - W	Dpt. d'études et Laboratoire de la S.M.N.

TABLEAU I

où E est l'énergie de la houle [J/m],  $C_n$  la célérité de groupe de la houle [m/s],  $\alpha$  l'angle d'incidence, et l'indice b indique qu'il s'agit d'une valeur correspondant à la houle déferlante.

Le transport volumique littoral [ $m^3/s$ ] est donné par l'expression suivante :

$$Q_l = \frac{q_l}{[(\rho_s - \rho_o)gC_v]}$$

où  $\rho_s$  est la masse volumique du sédiment [kg/m<sup>3</sup>],  $\rho_o$  la masse volumique de l'eau [kg/m<sup>3</sup>], g l'accélération de la pesanteur [m/s<sup>2</sup>], et  $C_v$  la concentration volumique des fonds, proche de 0,60 pour les sables de taille moyenne.

A. Bailard (1984) établit une expression permettant le calcul de K pour les sables et les galets, valable dans un large domaine de hauteur de houle. Cette expression est la suivante:

$$K = 0,05 + 2,6 \sin^2(2\alpha_o) + 0,007 U_{mb}/W$$

où  $U_{mb}$  est la vitesse orbitale de l'eau au fond [m/s] et W la vitesse de chute du sédiment [m/s].

White et Inman (1981) développent une expression permettant de tenir compte de la pente de la plage, laquelle s'écrit comme suit:

$$K = 2,2 C_{rb}$$

valable pour :  $0,02 < C_{rb} < 0,42$

avec :  $C_{rb} = L_o \tan^2 \beta / \pi H_b$

où T est la période de la houle [s],  $L_o$  la longueur d'onde en eaux profondes ( $L_o = gT^2/(2\pi)$ ) [m],  $\beta$  la pente de la plage, et  $H_b$  la hauteur de la houle déferlante [m].

White et Inman (1986) ont évalué des valeurs de  $K_f = 0,67$  pour le transport par le fond et de  $K_s = 0,11$  pour le transport en suspension.

En remarquant que les formules de Komar et Inman ont atteint un degré de précision acceptable du point de vue pratique, le LHIPN travaille actuellement sur l'adaptation de ces formules aux conditions du littoral du Golfe du Mexique ; cette étude est en train de permettre la détermination de leur sensibilité et de leur concordance avec d'autres formules.

Diverses formules ont en effet, été appliquées dans le Golfe du Mexique et on en a même établi une tout à fait originale à partir de mesures faites à l'aide de marqueurs fluorescents (R. Springal), cependant, celle-ci n'a jamais été appliquée en dehors du site concerné.

Enfin, en vertu d'une validité démontrée en divers sites du littoral du Golfe du Mexique, la formule de Larras (ou du Laboratoire Central d'Hydraulique de France -LCHF-), est celle qui a été la plus largement utilisée. Cette formule s'écrit :

$$Q = kgT H_b^2 f(\alpha_b) \quad [m^3/s]$$

où k est un coefficient qui est déterminé grâce à une expression établie au LCHF, laquelle s'écrit de la manière suivante :

$$k = 1,8 \times 10^{-6} \frac{H_o}{D^{0,5} L_o}$$

valable pour  $D > 0,5$  mm.

Pour compléter, Larras propose l'approche suivante :

$$f(\alpha_b) = \sin\left(\frac{7}{4}\alpha_b\right)$$

L'utilisation de marqueurs fluorescents dans le front maritime de Tuxpan-Veracruz, a permis d'évaluer  $k = 4 \times 10^{-4}$  (LHIPN, 1986). Le volume de sédiment déposé aux alentours du brise-lames du port d'approvisionnement de PEMEX, à Dos Bocas-Tabasco, est expliqué avec une valeur de  $k = 1,8 \times 10^{-3}$ .

Il existe également d'autres formules qui tiennent compte de la vitesse du courant littoral (Van de Graff et Van Overeem, 1979). La plus répandue de ce groupe de formules est celle de Bijker.

Des recherches sont menées partout dans le monde afin de construire des modèles mathématiques du transport littoral de plus en plus performants. Un critère fondamental à retenir dans ces recherches est la prise en compte de l'ensemble des paramètres mis en jeu dans la mécanique du transport sédimentaire. L'utilisation plus ou moins généralisée de ces outils, dépendra de la facilité d'application et de la qualité des résultats obtenus.

Enfin, il faut rappeler que l'ensemble des formulations ici présentées, ne donne que la capacité dynamique du transport littoral. Le transport réel dépend du volume de sable disponible et des variations temporelles de la houle.

## SUIVI DE L'ÉVOLUTION DE LA LIGNE DE CÔTE ET DE LA BATHYMÉTRIE.

On a constaté que l'utilisation des formules est insuffisante pour déterminer d'une manière réaliste le transport littoral net annuel sur les côtes mexicaines du Golfe du Mexique. La principale cause qui peut être avancée pour expliquer ceci est que les renseignements statistiques sur la houle proviennent des observations au large qui n'ont pas été vérifiées par les institutions mexicaines. Afin de pallier cette difficulté, on réalise des observations de la houle et des levés bathymétriques réguliers dans les différents sites d'intérêt du front maritime.

Les observations de l'évolution de la ligne de côte permettent de mesurer le degré d'érosion ou de sédimentation des deux côtés des ouvrages de protection. Selon un critère de bon sens, on conclut que le transport littoral provient principalement du côté de l'ouvrage où la ligne de côte avance le plus rapidement vers la mer.

Les observations de l'évolution de la ligne de côte réalisées grâce à des photographies aériennes, ont permis l'obtention de résultats étonnants (tabl. I), parmi lesquels on note les suivants :

La ligne de côte a avancé vers la mer au nord des brise-lames de Tampico-Tamaulipas et de Tuxpan-Veracruz, et à l'ouest de celui de Coatzacoalcos-Veracruz. Ces observations laisseraient envisager un transport net vers le sud à Tampico et Tuxpan et vers l'est à Coatzacoalcos!

Cependant, dans la plupart des photographies aériennes, on a pu observer des sédiments en suspension qui se dirigent dans un sens contraire à celui qui correspond à l'évolution manifeste de la ligne de côte.

De même, la mesure des volumes érodés et déposés des deux côtés des brise-lames à partir des levés bathymétriques, a démontré qu'en réalité, les plus grands

dépôts se localisent au Sud des ports de Tampico et Tuxpan et à l'est du port de Coatzacoalcos. Il en résulte que le transport net littoral suit en réalité, les côtes mexicaines du Golfe du Mexique vers la frontière avec les Etats-Unis. Ceci est en accord qualitatif avec les estimations qui ont été réalisées à l'aide des formules mathématiques.

Deux arguments complémentaires tendent à renforcer cette dernière affirmation sur le sens du transport net. Ces arguments sont :

D'une part, au nord des brise-lames de Tampico et de Tuxpan et à l'est du brise-lames de Coatzacoalcos, on a constaté dans chaque cas, grâce aux cartes bathymétriques, la formation d'un fossé ayant une profondeur supérieure à 4 m. Ce fossé se forme pendant la première année qui suit la construction des brise-lames et persiste par la suite. Cette situation laisse supposer qu'un transport vers le Yucatan comblerait rapidement ces fossés, ce qui n'est pas le cas.

D'autre part, le sable de mer qui se dépose dans le goulet de ces ports, s'accumule principalement sur la marge droite. Ceci confirme un transport littoral net provenant de ce côté.

Cette étude a permis de mettre en lumière le fait que la vie de service des brise-lames de ces trois ports a été dépassée. La prolongation de ces ouvrages doit donc être envisagée afin de réduire les frais de dragage.

La durée opérationnelle de ces ouvrages a été estimée selon les méthodes classiques permettant de suivre l'évolution théorique de la ligne de côte après la construction des brise-lames. Ainsi, on a utilisé notamment la méthode de Pelnard-Considère, cependant, on a constaté un fort écart entre la théorie et les observations. En effet, les sédiments commencent à franchir les brise-lames bien avant que la ligne de côte n'atteigne la tête de ces ouvrages.

Par ailleurs, on a dû faire face à d'autres problèmes liés à l'écart entre la théorie et les observations. Par exemple, on a constaté que les profils des fonds perpendiculaires à la ligne de côte dans le Golfe du Mexique ne sont ni reliés à la houle ni aux courants selon les théories existantes.

Devant certains comportements sédimentaires encore mal compris sur les côtes du Golfe du Mexique, il sera nécessaire de continuer cette recherche au LHIPN. Il est alors indispensable de tenter d'expliquer certains phénomènes et d'établir des critères et des modèles, plus en accord avec les conditions locales.

## PERSPECTIVES.

L'étude globale du transport sédimentaire dans le Golfe du Mexique, dont les résultats les plus remarquables sont présentés ici, se développe. Les processus de compilation d'information et d'analyse de celle-ci, se mènent en collaboration avec les principales institutions liées à la mer au Mexique. De même, des campagnes de mesure, avec des marqueurs fluorescents, et des levés bathymétriques sont réalisés régulièrement dans le front maritime de Tuxpan-Veracruz. Cette étude devra conduire à terme à une meilleure compréhension des mécanismes sédimentaires dans le Golfe du Mexique et à

l'établissement d'une formule de transport qui s'adapte aux conditions intrinsèques au Golfe du Mexique.

## CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

La plupart des études de la dynamique sédimentaire, réalisées sur les côtes mexicaines du Golfe du Mexique, concordent pour affirmer que le transport littoral net est dirigé vers la frontière avec les Etats-Unis.

Le comportement des sédiments dans le Golfe du Mexique est parfois perçu différemment par les différents spécialistes concernés. Les sites ayant donné lieu à des contradictions devront être le lieu de nouvelles études afin d'éclaircir, sans ambiguïté, ces désaccords.

Il est souhaitable de susciter les échanges d'expérience entre les spécialistes en Génie Côtier qui participent aux différentes études qui se mènent dans le Golfe du Mexique. Ces échanges pourront conduire à l'uniformisation et à l'homogénéisation de nouveaux critères permettant d'étudier le transport de sédiments en tout site situé sur ce littoral.