



IMPACTS PHYSIQUES ET SÉDIMENTOLOGIQUES D'UN PORT DE PLAISANCE

HAMMAMET-SUD (TUNISIE)

P. FARNOLE et G. QUEFFEULOU

Sté ERAMM - 06560 Valbonne

Abstract

In Tunisia, on the north shore of Hammamet bay, there is an integrated touristic resort at Hammamet-sud, which is being built at the moment. The resort is meant to be equipped with a yachting harbour and with a marina. The sedimentologic environment presents itself as a long beach of sand. However, it constitutes a delicate context because of the problems generally caused by harbour on that kind of coast.

The analysis of the sedimentologic situation of this site on its original state, was led both by :

- in situ measures which consist in observations of the morphology, in fluorescent sand which was followed through ;

- by mathematic simulations of hydraulic conditions at the open sea brought back to the coast by a software refraction which allows the development of essential elements on the sedimentary transit.

The approach allowed therefore a definition of the sedimentary dynamics. It showed essentially transports into the profile of the coast and alternate transits translate however into a resultant of 13000m³/year towards the South. Then, it will be possible to give elements about the consequences of a yachting harbour on the sedimentary environment notably by the application of the Pelnard Considere theory.

Les études préliminaires à l'aménagement d'un port de plaisance sur le site d'Hammamet-sud ont été confiées à la Société SEMAH qui regroupe plusieurs sociétés dont le Groupe Camille Rayon, ERAMM, ACRI ainsi que le Pr. R. Bonnefille en tant que consultant. Les principaux résultats concernant les aspects physiques, morphologiques et sédimentologiques ainsi que les impacts sédimentologiques sont synthétisés dans cette publication.

I SITUATION

La station touristique d'Hammamet-sud est localisée sur la côte est de la Tunisie dans la partie septentrionale du golfe d'Hammamet. Celui-ci s'étend sur 50km de littoral dont les principales caractéristiques sont les suivantes (fig. 1) :

- une plaine basse de type marécageuse (sebkha) colonisée par un couverture végétale halophile,
- une dune bordière de faible extension et discontinue,
- une plage de sable large d'une quarantaine de mètres en équilibre,
- un trait de côte orienté nord-nord est / sud-sud ouest, entrecoupé d'oueds à faibles débits.

La zone d'aménagements touristiques s'étend sur 3,5 km

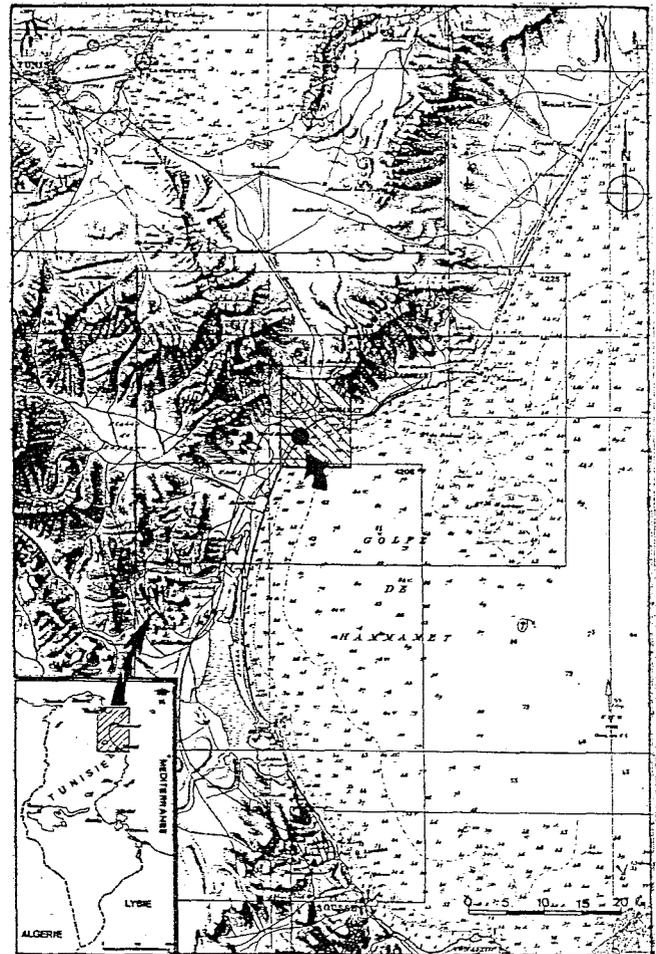


Fig. 1 : Situation géographique

de côtes et environ 1 km de largeur, entre la route nationale G.P. n°1 (Tunis à Rhadamès) et le trait de côte. L'emplacement prévu pour la Marina est localisé au nord de la zone d'aménagement de la station touristique intégrée sur le site de Bir el Buïta .

II DONNEES PHYSIQUES

II.1 Les conditions de vent

Les statistiques de vents au large d'Hammamet correspondent aux données Sea & Swell qui sont le

résultat d'observations des navires transitant au large de la côte tunisienne (fig.2). Les vents dominants en fréquence

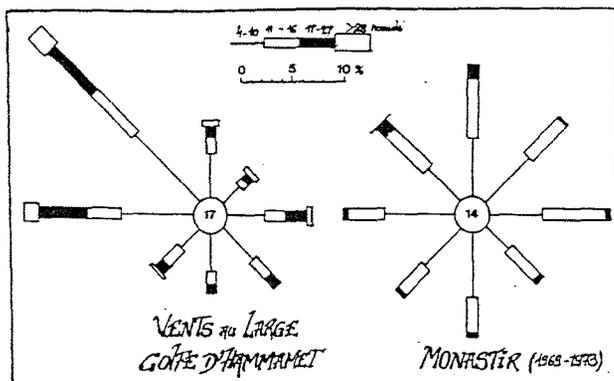


Fig. 2 :Données de vent au large d'Hammamet (Sea & Swell) et à la côte (Monastir)

et en intensité proviennent du secteur nord-ouest à ouest (42%). A l'inverse, les vents de secteurs maritimes intéressant le golfe d'Hammamet (sud-est à nord-est) ne représentent que 22%.

Les données disponibles sur les vents à la côte sont celles de la station météorologique de Monastir, où l'on dispose de 3 mesures journalières de 1969 à 1973. Les vents dominants proviennent du secteur nord-ouest à nord et sont rarement supérieurs à 15 m/s.

II.2 Les courants

Un courant général nord-sud circule au large des côtes tunisiennes avec des vitesses moyennes de l'ordre de 0,2 à 0,3 m/s. Aux abords du golfe d'Hammamet, un contre-courant se met en place avec une orientation sud-nord. Les courants induits par la marée sont insignifiants dans le golfe.

II.3 Les fluctuations du niveau de la mer

Un suivi du niveau d'eau a été effectué à Port-El-Kantaoui afin d'établir une corrélation avec les données météorologiques (Monastir). Le niveau moyen mesuré au

cours du mois de mai 1993 est de +0,078 NGT. Le zéro NGT correspond à +0,41 CM. Des mesures synchrones avec le site d'Hammamet-sud ont permis d'extrapoler le niveau moyen à +0,13 NGT à Hammamet, avec des fluctuations journalières n'excédant pas 0,2 m. L'estimation des surcotes induites par la conjugaison de marée de vive-eaux et de vent d'afflux serait de +1,1 m CM, soit environ +0,6 m NGT. A l'opposé, Les vents dominants d'ouest ont une action notable sur le reflux des masses d'eau. Le marnage en vive-eaux exceptionnelle est de +0,40 m.

II.4 Les houles

Le golfe d'Hammamet est ouvert aux régimes de houles de N-E à S S-E. L'estimation de la houle repose sur 2 approches méthodologiques (fig.3) :

- données de houle au large (Sea & Swell),
- données de vent à la côte (Station Météorologique de Monastir).

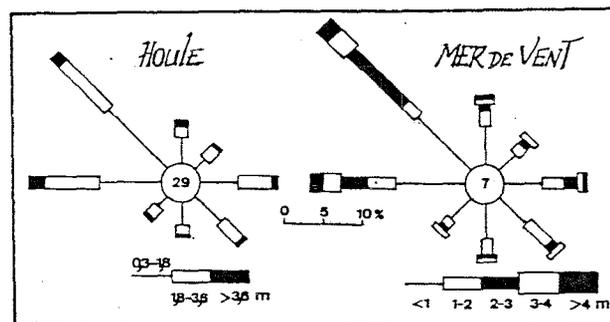


Fig. 3 : Rose de houles et de mers de vent au large du golfe d'Hammamet (Sea & Swell)

La première méthode repose sur les observations des navires au large qui donnent une bonne approche de la hauteur significative ou H1/3 avec toutefois une surestimation de l'ordre de 10%. Les houles susceptibles d'atteindre le littoral nord du golfe d'Hammamet représentent 22% soit 80 j/an (tabl. 1).

Données Sea&Swell	0,3 / 1,5 m	1,5 / 3 m	>3m	total
NORD-EST	0,8% (3j)	0,9% (3,3j)	0,2% (0,7j)	1,9% (7j)
NORD NORD-E	1,6% (5,8j)	1,5% (5,5j)	0,4% (1,5j)	3,5% (12,8j)
EST	2,4% (8,8j)	2,1% (7,6j)	0,5% (1,8j)	5,0% (18,2j)
EST SUD-E	2,3% (8,4j)	1,9% (6,9j)	0,4% (1,5j)	4,6% (16,8j)
SUD-EST	2,2% (8,0j)	1,6% (5,8j)	0,3% (1,1j)	4,1% (14,9j)
SUD SUD-E	1,8% (6,6j)	1% (3,6j)	0,2% (0,7j)	3,0% (11j)
TOTAL	11,1% (40,5j)	9% (32,9j)	2% (7,3j)	22,1%(80,7j)

Tabl. 1 : Fréquence des houles (% et j/an) par classe de hauteur

La seconde méthode permettant d'estimer les caractéristiques de la houle au large est la méthode SMB (Sverdrup-Munk-Bretschneider) se basant sur les statistiques de vent associées aux longueurs de fetch.

Dans le golfe d'Hammamet, les épisodes de vents forts

n'excèdent pas des durées d'une dizaine d'heures avec des vitesses maximales de 15 à 20 m/s, donc des houles complètement développées que pour des fetchs courts de l'ordre de 200 km. Pour un vent de 15 m/s soufflant pendant au moins 12 heures, on obtiendrait une houle de

hauteur significative de 3,70 m et une période de 9 s (d'après l'abaque de Bretschneider).

Les études antérieures basées sur les mesures de vent à Monastir et de houle à la côte (Sousse) conduisent à des hauteurs de houles plus faibles que celles citées ci-dessus (LCHF, 1978, SOGREA, 1984, STUDI, 1989). La

hauteur significative et la période de la houle abordant le golfe d'Hammamet seraient :

- provenance du secteur nord-est à sud-est : 3m et 7s,
- provenance du sud : 2m et 5s.

DIRECTION	PERIODE	LARGE		CÔTE		OBLIQUITE
est nord-est	5s	2m	65°	0,45m	95°	30°
	7s	3m	65°	0,90m	105°	20°
est	5s	2m	90°	1,50m	105°	20°
	7s	3m	90°	2,45m	110°	15°
est sud-est	5s	2m	110°	1,80m	115°	10°
	7s	3m	110°	2,50m	120°	5°
sud-est	5s	2m	135°	1,95m	130°	-5°
	7s	3m	135°	3,00m	125°	0°
sud sud-est	5s	2m	155°	1,75m	150°	25°

Tabl. 2 : Caractéristiques de la houle au large et à la côte

Les plans de réfraction réalisés par la Société ACRI mettent en relief une obliquité résiduelle de la houle marquée vers le sud (tabl. 2). Des phénomènes de convergences apparaissent pour les houles de 5 et 7s provenant de est nord-est à sud sud-est du fait de hauts-fonds au large du site.

III TRANSPORTS SEDIMENTAIRES

III.1 Transport longitudinal

L'application de formules empiriques permet le calcul du transit sédimentaire à partir des statistiques de houles au large et de leur transfert à la côte par réfraction. Notre choix s'est portée sur la formule du LCHF (Laboratoire

Central d'Hydraulique de France) qui s'est avérée la plus adaptée au contexte local.

$$Q \text{ (m}^3\text{/s)} = K \cdot g \cdot T \cdot H^2/H_0 \cdot L_0 \cdot f(\alpha)$$

Le budget quantitatif global, dépendant du spectre de houle au large, est défini à partir des données Sea & Swell et à partir des statistiques sur les vents à Monastir et l'utilisation de l'abaque de Bretschneider.

a) à partir des vents à Monastir

La distribution des fréquences des occurrences des vents est répartie selon les cinq provenances de la houle susceptible d'atteindre le site. Les hauteurs significatives de houle déterminées par l'abaque de Breitschneider sont $H_0=1$ et $H_0=2$ m. Il en résulte un transit sédimentaire annuel moyen (tabl. 3) :

PROVENANCE DE LA HOULE	PERIODE (s)	NBRE DE J/ AN		TRANSIT (LCHF)
		$H_0=1$ m	$H_0=2$ m	
est nord-est	7	10,3	0,8	-900
est	7	11,5	1,3	-7800
est sud-est	7	9,3	1,4	-8100
sud-est	7	7,0	0,9	+4800
sud sud-est	5	6,3	0,8	+4000
TOTAL		44,4	4,9	-8000(sud)

Tabl. 3 : Calcul du transit littoral à partir des vents à Monastir

Le transit sédimentaire annuel moyen serait de 8000m^3 vers le sud

A titre indicatif, le transit sédimentaire obtenu à partir de la formule du LNH serait de $30\ 000\text{m}^3$. Par rapport aux analyses de terrain, cette valeur nous paraît être surestimée.

b) à partir des données au large (Sea & Swell)

L'estimation du transit sédimentaire à partir des statistiques de houle au large, semble a priori une démarche logique, notamment en ce qui concerne le spectre directionnel de la houle. Par contre, les amplitudes peuvent être légèrement surestimées. L'application de la formule du LCHF pour la rose des houles au large permet d'aboutir aux valeurs suivantes de transports sédimentaires sur le site d'Hammamet-sud (tabl. 4). Le transit sédimentaire moyen annuel serait de 13000m^3 vers le sud.

DIRECTION	H ₀ =1m T = 5s	H ₀ =2m T = 5s	H ₀ =3m T = 7s	TOTAL
NN-EST	100 m ³	220 m ³	340 m ³	-660 m ³
EST	3 900m ³	7 700m ³	2 970m ³	-14 570m ³
E S-EST	1 900m ³	3 420m ³	2 940m ³	-8 260m ³
SUD-EST	1 480m ³	2 370m ³	1 480m ³	+5 330m ³
S S-EST	2 250m ³	1 800m ³	1 050m ³	+5 100m ³
SUD				23 500 m ³
NORD				10 500 m ³
BILAN				13 000 m³

Tabl.4 : Calcul du transit littoral à partir des roses de houle (Sea & Swell)

III.2 Transport transversal

Les contraintes tangentielles induites par le courant orbital de la houle entraînent un mouvement sédimentaire dont la limite inférieure de remaniement atteint -12m (diamètre médian 180 µm) pour des vagues de hauteur de 2 à 3 m. En période de forte agitation, l'ensemble des fonds littoraux et infralittoraux jusqu'à l'herbier de Posidonies pourrait être remaniés. Toutefois, un transport significatif n'interviendrait que pour des profondeurs plus faibles d'après la formule du LCHF :

$$d = H/2 (\log D(\text{mm}) - 4,5)$$

soit : $d = -8$ m pour des houles de hauteur $H=3$ m ($D=180$ µm) et $d=-5,2$ m pour des houles de 2 m.

Au niveau de la barre (-2NGT), on observe des rides symétriques de 0,4 m de longueur d'onde, témoins des mouvements sédimentaires alternatifs sur les fonds, correspondant à des houles de 2m d'amplitude et 5 s de période.

On admet que les quantités transportées perpendiculairement à la côte sont proportionnelles au bilan d'énergie de la houle. Le maximum serait ainsi atteint entre l'estran et la barre avec des volumes de 30 000 à 50 000m³/an/km.

III.3 Mesures in-situ du transport sédimentaire

Des expérimentations de traceurs fluorescents au niveau de l'estran ont permis un suivi in-situ du transport sédimentaire. Les résultats obtenus indiquent (fig. 4) :

- une forte dispersion des sédiments vers le large en période d'agitation ,
- l'absence de courant de dérive littorale induisant un transit latéral des sédiments dans les petits fonds,
- un mouvement préférentiellement dans le profil avec une légère dérive vers le sud lors des déplacements entre la barre et le trait de côte.

IV EVOLUTION DU RIVAGE

IV.1 Evolution ancienne et actuelle du trait de côte

Depuis le siècle dernier, le littoral d'Hammamet-sud n'a pas présenté d'évolutions marquantes, voire même depuis l'antiquité comme l'attestent les ruines romaines de Putput (près du débouché de l'Oued Moussa)

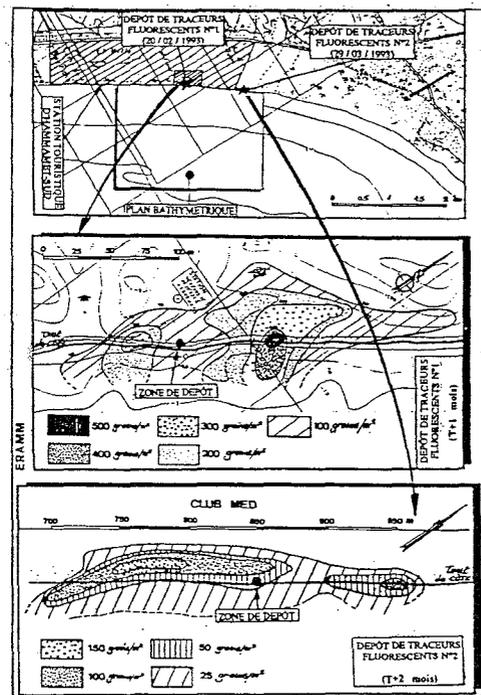


Fig. 4 : Analyse du transit sédimentaire par la technique des traceurs fluorescents

épargnées par l'érosion. Par contre, l'évolution actuelle du trait de côte entre l'oued Batten et la Citadelle d'Hammamet présente un important recul entre les oueds Faourara et Hadjar à 4500 m au nord de la zone d'aménagement (fig.5). Le traitement comparatif des photos IGN de 1962 et de 1989 permet de mesurer par photogrammétrie l'ampleur du recul qui atteint un maximum de 50 m à 60 m (soit 2 m/an). Au sud de l'oued Batten, on constate une stabilité et même un léger engraissement du trait de côte au niveau de l'hôtel Phénicia. Le volume total érodé est estimé à 50000m³ dont 40000m³ entre les deux oueds soit un déficit annuel de 1900m³.

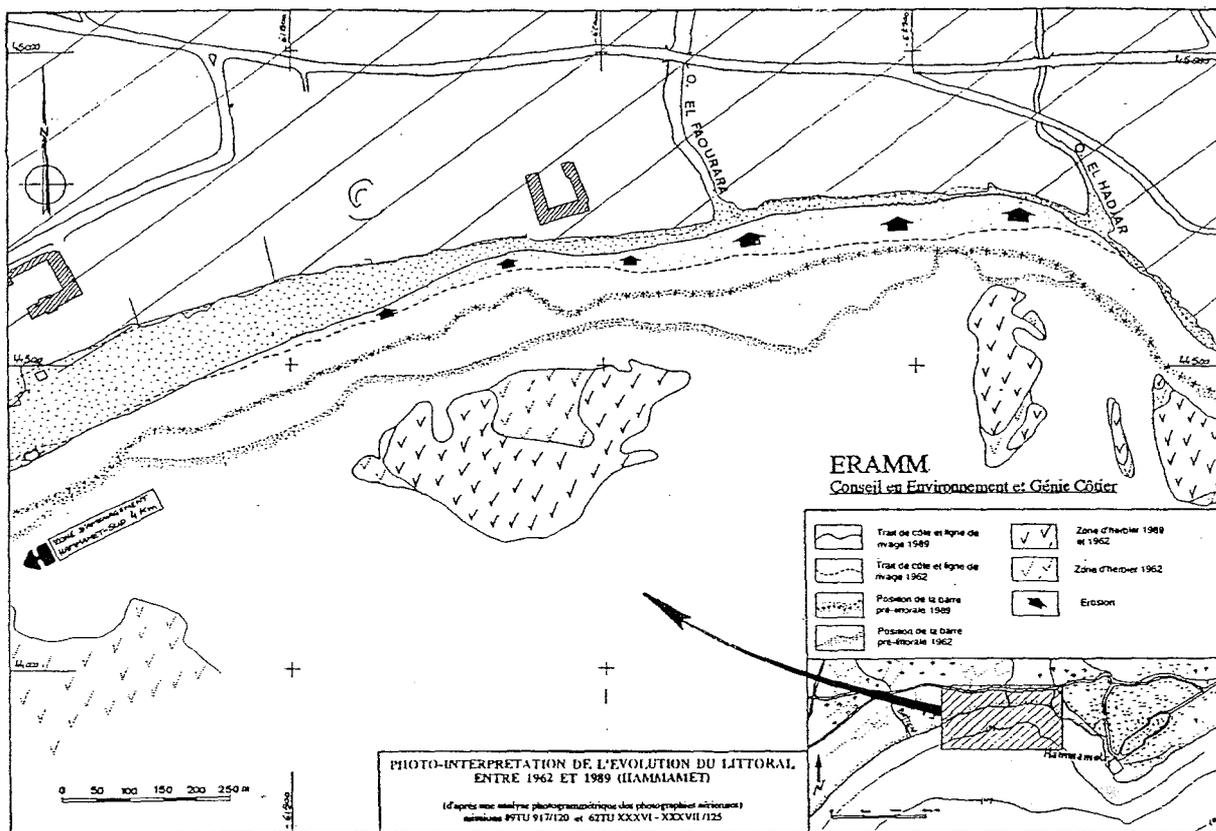


Fig. 5 : Evolution du trait de côte entre 1962 et 1989

IV.2 Tendances évolutives

La variation du niveau marin pour trois sites tunisiens (Tunis, Sousse et Sfax), enregistrée depuis le début du siècle (Pirazzoli, 1986) traduit de fortes variations en fonction de la situation géographique. En effet, deux de

ces sites, Sousse et Sfax présentent une hausse relative du niveau nettement plus élevée que la variation eustatique moyenne mesurée à Tunis (fig. 6).

- * Tunis (depuis 1890) : 1,3 mm / an
- * Sousse (depuis 1910) : 2,0 mm/an
- * Sfax (depuis 1910) : 4,3 mm/an

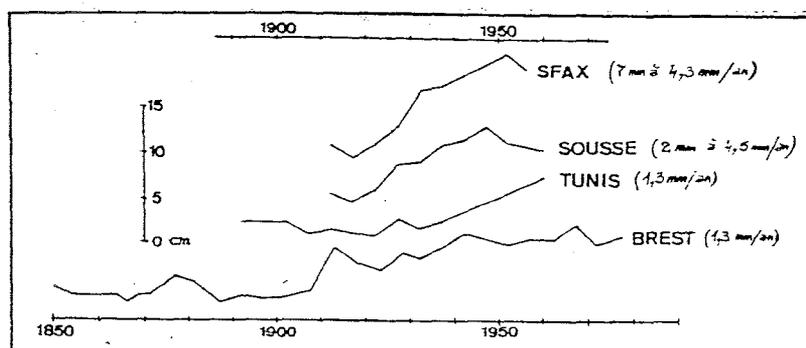


Fig. 6 : Variation du niveau marin (Pirazzoli, 1986)

L'application du principe de Bruun, signifierait qu'une surélévation du niveau marin entraînera la même surélévation du fond au détriment du haut de plage et des petits fonds. Son application au site d'Hammamet-sud se justifie compte tenu de la prédominance des mouvements sédimentaires dans le profil, des faibles apports externes

(oueds) et de la situation globale de côte équilibrée en fond de golfe.

$$X (C + Z) = a B$$

Un exhaussement du niveau moyen d'environ 2 mm/an aux abords du site (Sousse) induirait un recul du trait de côte d'environ 10 à 15 cm/an. De 1920 à nos jours, l'évolution naturelle aurait entraîné un recul du rivage de 5 m à 10 m. Cette évolution semble compatible avec l'impression de stabilité du littoral nord du golfe d'Hammamet jusqu'alors sans suivi précis.

Les tendances évolutives pour le futur laissent présager un recul de 20m à 30m pour 2050 correspondant à une hausse du niveau marin de 0,30 à 0,50m (fig. 7). Bien que comportant des incertitudes, l'exhaussement du niveau marin doit être pris en considération dans tout projet d'aménagement côtier.

V EVALUATION DES RISQUES SEDIMENTOLOGIQUES

L'emprise de l'aménagement portuaire couvre 23 hectares répartis sur 650 m de linéaire côtier et sur 350m vers la mer (fonds de -6 m). Dans ce contexte les principaux risques de perturbations prévisibles seront d'origine sédimentaire. L'aménagement d'un port sur une plage présente, à priori, un risque de déséquilibre sédimentaire important.

Compte tenu de la position de la barre pré littorale à 150 m du rivage et des faibles mouvements au-delà, ce projet peut être considéré comme un port profond car il stoppera totalement tout transit sédimentaire. Le transit résiduel de 13 000 m³/an vers le sud serait interrompu et l'unité sédimentaire du golfe d'Hammamet, scindée en deux zones sédimentologiquement indépendantes.

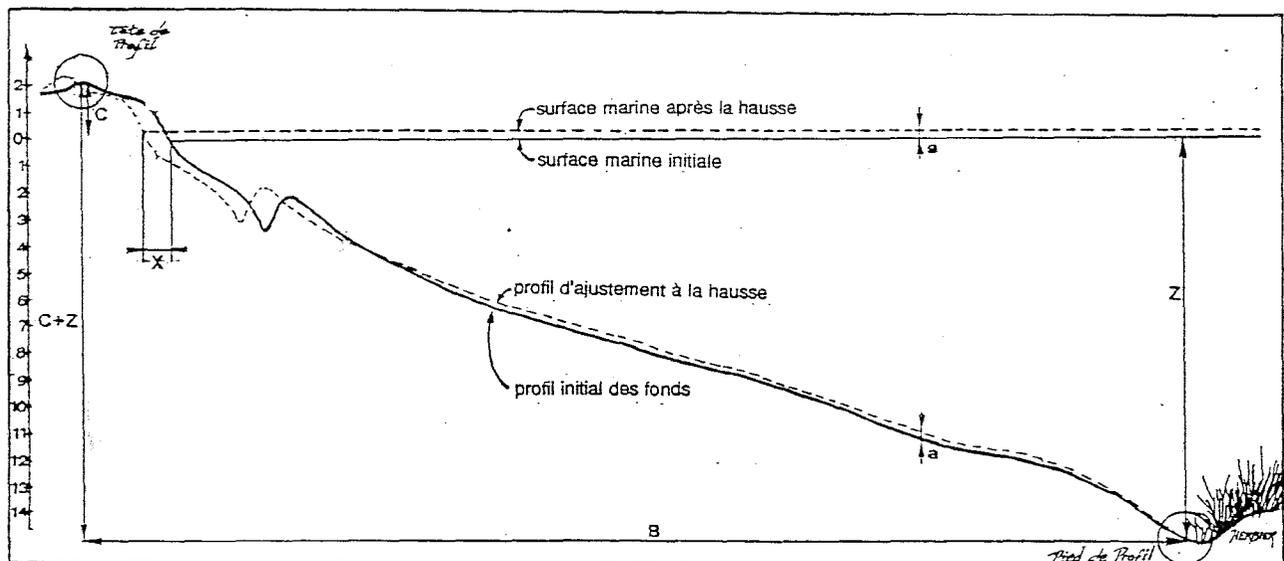


Fig. 7 : Application du principe de Bruun au site d'Hammamet

L'évolution du trait de côte peut être analysée par la théorie de Pelnard-Consideré (1956) (fig. 8), qui permet de déterminer l'impact à longue échéance des processus érosion-dépôt prévisibles au nord et au sud de l'ouvrage portuaire. Ce principe considère 2 phases essentielles: avant et après contournement de l'ouvrage.

Avant contournement, l'avancement du rivage au nord est indiqué par la relation:

$$y(0,t) = OB = (4 Q t \operatorname{tg} \alpha)^{1/2} / \Pi P$$

Le temps "t" mis pour atteindre l'extrémité de l'ouvrage de longueur "OB" sera environ de 75 ans compte tenu de la longueur de l'ouvrage (OB=220 m).

$$t = 0,78 P \cdot OB^2 / Q \operatorname{tg} \alpha$$

D'après cette théorie, le processus d'érosion au sud de l'ouvrage sera symétrique par rapport aux dépôts au nord, sauf dans la zone d'ombre de l'ouvrage où il peut se produire un courant d'expansion latéral de la houle perturbant ce schéma évolutif.

$$OB'' = OBe'' = 3 (Q t / P \operatorname{tg} \alpha)^{1/2}$$

L'évolution du trait de côte prévisionnel pour les 75 années à venir est défini dans le tableau ci-dessous. Ces valeurs, compte tenu des imprécisions sur les paramètres d'entrée, doivent être pris en considération à titre indicatif.

durée (an)	1	2	3	5	10	20	40	60	75
distance(m)									
OB''=OBe''600		850	1000	1300	1900	2700	3800	4600	5200
OB'	220	310	380	490	700	1000	1400	1700	1900
OB	25	35	45	55	80	110	160	200	220

Le contournement de l'ouvrage portuaire n'interviendrait qu'au bout de 75 années de dépôt au nord, affectant une étendue de 5 km jusqu'à l'oued Moussa voire au delà de l'oued Batten. Au sud, le recul débutant à 100-200 m du port se poursuivrait de façon marquée le long du boulevard maritime puis ensuite bien au-delà de la limite de la station touristique d'Hammamet-sud.

VI CONCLUSIONS

L'ensemble des données collectées et analysées au cours des études préliminaires ont permis de dresser un premier bilan de l'évolution morphologique et sédimentologique du littoral d'Hammamet sud.

A partir de techniques *in situ* de traceurs fluorescents et principalement des méthodes empiriques basées sur l'application de formules hydrauliques de transport par la houle, l'estimation du transit sédimentaire résiduel orienté vers le sud est de l'ordre de 10 000 m³/an. Les mouvements sédimentaires transversaux mobilisent, quant à eux, un volume de l'ordre de 30 m³ à 50 m³/an par mètre linéaire côtier.

L'évolution ancienne et actuelle du trait de côte est peu importante dans le secteur nord du golfe d'Hammamet à l'exception d'un important recul mis en évidence à 4500 m au nord du site, entre l'Oued Batten et la Citadelle d'Hammamet.

L'exhaussement actuel du niveau marin sur la façade est du littoral tunisien est estimé à 2 mm/an (Sousse). L'application du principe de Bruun à cet exhaussement signifierait un recul du trait de côte de l'ordre de 20 m à 30 m pour 2050.

Concernant les risques sédimentologiques consécutifs à l'aménagement portuaire, l'interruption d'un transit de 13 000 m³ vers le sud aurait pour conséquence une avancée progressive du trait de côte au nord et un recul symétrique au sud. L'application de la théorie de Pelnard Considère montre que l'évolution du littoral serait lente et que le contournement de l'ouvrage n'interviendrait qu'après 75 ans.

Bibliographie

Bonnefille R. 1992. Cours d'hydraulique maritime. 3^{ème} édition ; Ed. Masson ; 208 p.

LCHF, SGTE. 1978. Etude des ports de pêche côtière, études hydrauliques" rapport n°3A, 1978.

LCHF, SGTE. 1978. Etude des ports de pêche côtière, études sédimentologiques, rapport n°3B.

Migniot C. 1989. Manuel sur l'hydrodynamique sédimentaire et l'érosion du littoral. Secrétariat d'état à la mer. STCPMVN ; SOGREAH; LCHF; 2 vol. n°51078 R1 et n°51078, R2; 264p.

Paskoff R. 1985. Les plages de la Tunisie, études sur leur évolution" ; imp. EDITEC 14 Caen, 198p.

Pirazzoli P. 1986. Secular trends of relative sea level (RSL) changes indicated by tide-gauge records, Journal of coastal research ; SI (1), pp. 1-26.

Sanlaville C. 1983. Les côtes de la Tunisie, variations du niveau de marin depuis le Tyrrhénien, CNRS - Université de Lyon II, 189p

SOGREAH. 1984. Etude de la protection des plages des hôtels Simbad et Aladin à Hammamet, rapport 351460 r2 ; Janvier 1984

STUDI. 1989. Etude de la protection des plages contre l'érosion marine, site de Sousse-nord , rapport n°1 , 2^{ème} partie.

QUESTION de Madame MANOUJIAN :

Il est très important de tenir compte dans la sédimentation du port prévu, un très fort apport d'herbiers qui risque de combler progressivement le port (voir exemple du Port d'Hergler au Sud immédiat du site choisi)?

REPONSE

C'est effectivement un problème important car il existe une quantité de feuilles mortes et de pelotes constituées de débris de posidonies qui circulent le long du littoral d'Hammamet - Sud.

En période d'agitation, on observe leur transfert à la côte et le risque de sédimentation dans un abri portuaire existe aussi sur ce site.

Pour éviter ce phénomène, nous avons recommandé une entrée de port dissymétrique et opposée à la direction de transit résiduel.

QUESTION de M. BELORGEY

Les aménagements proposés et leur exploitation entraîneront une pollution qui détruira en partie l'herbier. Or cet herbier est un élément important dans la protection de la côte sous l'action de la houle.

Votre étude, est en ce sens très importante, car elle constitue un point zéro.

Pensez-vous après les travaux, faire le suivi de l'évolution de cet herbier ?

REPONSE

L'herbier de cymodocée est présent à partir des fonds de - 6 m, l'herbier de posidonies à partir des fonds de - 14 m soit à environ 800 m de l'ouvrage portuaire. Les effets directs induits par le port seront donc réduits sur l'écosystème. Par contre, les effets indirects (turbidité, pollution ...) devront être pris en considération et des mesures protectrices sont proposées dans ce sens :

- choix des matériaux constituant le noyau de la digue

- suivi de l'évolution des fonds du point de vue sédimentologique et biocénotique.