



Modélisation de l'évolution du trait de côte et de la protection du littoral dans le golfe de Tunis

Item Type	Journal Contribution
Authors	Ben Mouelli, I.; Bejaoui, B.; Raïs, S.; Brahim, M.
Citation	Bull. INSTM, 29. p. 41-52
Publisher	INSTM
Download date	08/02/2023 14:07:25
Link to Item	http://hdl.handle.net/1834/242

MODELISATION DE L'EVOLUTION DU TRAIT DE COTE ET DE LA PROTECTION DU LITTORAL DANS LE GOLFE DE TUNIS

Béehir BEJAOUI ¹, Mouldi BRAHIM ¹, Imed Ben MOUELLI ² et Samira RAIS ³

1 : Institut Nationale des Sciences et Technologie de la Mer (INSTM) – 28, rue 2 mars 1934 -Salammbô, 2025-Tunisie,

2 : Afrique Travaux (AT),

3 : Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT) – BP 37, 1002 Tunis Belvédère.

ملخص

نمذجة تطوّر الخط الساحلي وحماية الشريط الساحلي بخليج تونس : اهتمت هذه الدراسة بتطوّر واستقرار الشريط الساحلي بضفة أحواز تونس الشماليّة عن طريق نمذجة علميّة بواسطة رمز (UNIBEST) ولهذا الغرض تمّت دراسة المراجع التي تهتمّ بمكونات المحيط الساحلي والعوامل الطبيعيّة (المدّ والجزر والأمواج) والحوجز الحامية. تطلبت هذه الدراسة تقسيم هذا الشريط الساحلي إلى عدّة مقاطع ولعدم وجود المعطيات اللازمة وقعت الدراسة على مقطعتين اثنتين طول الشريط الساحلي. بيّنت نمذجة تطوّر الشريط الساحلي بأحواز تونس الشماليّة أنّ هناك موقعين متعرّضين للانجراف. الأول، على مستوى قمرت ما بين فندق تور بلاص وفندق ميقرارا والثاني على مستوى المعهد الأعلى للدراسات التجاريّة. وللحدّ من الانجراف في هذه المناطق بيّنا في هذه الدراسة بواسطة النمذجة العلميّة بعض الحلول والتي تتمثّل في وضع كاسرات الأمواج أو زرع الرواسب. **كلمات مفاتيح** : الأمواج، انعكاس الأمواج، حمل الرواسب، كاسرات الأمواج.

RESUME

Ce travail s'intéresse à l'étude de l'évolution et de la protection du littoral de la banlieue Nord de Tunis par modélisation à l'aide du code UNIBEST. Pour ce faire, une étude bibliographique a été élaborée concernant la morphologie des côtes, les facteurs naturels (houle, marée) l'influençant ainsi que les différents ouvrages de protection utilisés.

L'étude du littoral de la banlieue Nord de Tunis a nécessité la subdivision de la région en zones d'étude afin de valider les hypothèses de base du modèle UNIBEST. La procédure de calage est effectuée seulement sur une zone.

La modélisation de l'évolution du littoral de la banlieue Nord de Tunis a montré l'existence de deux sites menacés par l'érosion : Le premier site correspond à la côte de Gammarth entre les hôtels " *La Tour Blanche et Migara* ", tandis que le second site se situe à Carthage au niveau de l'Institut des Hautes Etudes Commerciales (IHEC).

Des solutions de protection ont été recommandées dans ce travail. Elles consistent soit à l'implantation de brise-lames ou d'épis soit à un rechargement artificiel. L'efficacité de ces solutions de protection est testée par UNIBEST.

Mots clés : Houle, Déferlement, Diffraction, Réfraction, Rivage, Transit littoral, Transport en travers, Brise-lames, Modèle numérique.

ABSTRACT

Modelisation of evolution of coast line and protection of littoral in the gulf of Tunis : This study is interested with the evolution and protection of the coast of the North Suburb of Tunis by modélisation with UNIBEST model. To do so, a review of literature was elaborated concerning the coast morphology, the natural factors (wave, tide) affecting it, as well as concerning the means and structures of protection used.

The study of the coast of the North Suburb of Tunis required its division in areas of the study in order to respect the basic hypothesis for the UNIBEST model. The calibration procedure was done on one zone.

The modelling of the coast line evolution in the North Suburb showed that there are two sites which are affected by erosion: The first is the coast at Gammarth between the hotels " *La Tour Blanche and Migara* " and the second one is situated at Carthage near the Institute of the High Commercial Studies (IHEC).

Some protective solutions have been recommended in this work. They consist either on the implantation of breakwaters and groynes, or on beach nourishment. The efficiency of these solutions was tested by "UNIBEST".

Key Words: Swell, Breaking, Diffraction, Refraction, Shore, Long-shore Transport, Cross-shore Transport, Breakwaters, Numerical model.

INTRODUCTION

Les zones littorales ont toujours présenté un grand intérêt dans le monde entier et sont, aujourd'hui, le siège d'activités multiples (loisirs, commerce, agricole). Ces zones connaissent un recule spectaculaire suite aux actions érosives des facteurs naturels (houle, marée, vent) et anthropiques (Aménagement et constructions balnéaires). Ces facteurs sont à l'origine, en général d'un déséquilibre sédimentaire au niveau des côtes qui se manifeste par une érosion plus moins importante et rapide.

La dégradation du littoral est un problème inéluctable de portée internationale, elle affecte l'environnement et nuit au paysage côtier et aux stratégies économiques (tourisme) du pays. Il devient, par conséquent de plus en plus nécessaire de protéger ces zones littorales afin qu'elles continuent d'assurer les fonctions qui leurs ont été confiées. Cette étude de protection nécessite l'analyse des différentes interactions possibles qui existent entre les paramètres naturels.

Plusieurs travaux ont été effectuées sur l'étude de l'évolution et la protection des lignes de rivages sous l'action des facteurs naturels. Ces études se classent en deux types :

- 'Les études de suivis' qui consistent à suivre l'évolution des lignes de rivages en fonction du temps afin de localiser les zones les plus attaquées et les zones qui peuvent être menacées par l'érosion côtière.

- 'Les études de prévision' qui nécessitent l'utilisation d'un modèle mathématique qui tient compte de la plupart des données du problème. Ce type d'études nécessite en plus des données propres à la région d'études (bathymétrie, étendue de la plage, granulométrie de sables, ...,etc.), une statistique des différentes variables océaniques (houle, marée, vent).

Cette étude avait pour objectif de simuler à l'aide d'un modèle numérique, l'état futur du littoral dans le golfe de Tunis (côte de Cap Gammarth à la Goulette). Elle pourrait servir à prendre les mesures préventives nécessaires à la préservation de ces zones bordières.

Nous présentons dans la première partie de ce travail, les équations fondamentales du modèle UNIBEST [Delft Hydraulics, 1994]. La deuxième partie sera consacrée à l'étude de l'évolution du littoral de la banlieue Nord de Tunis. Enfin, nous présentons quelques solutions de protection de deux zones qui ont été jugées, les plus menacées dans ce littoral. L'efficacité de ces solutions (implantation de brise-lames et d'épis) est testée par le modèle UNIBEST.

MATERIEL ET METHODE

Pour comprendre l'évolution des traits de côtes et la stabilité du littoral dans le golfe de Tunis, nous avons utilisé le modèle UNIBEST, comme outil de prévision. Cette méthode est basée essentiellement sur les fréquences d'apparition des paramètres climatiques

(Vents, Houles). Elle donne une idée assez précise sur l'évolution future du trait de côte et de la stabilité du littoral.

1. Le modèle UNIBEST

UNIBEST est un modèle développé par « DELFT HYDRAULICS » en 1994. Il est basé sur la discrétisation par éléments finis des équations gouvernant la propagation de la houle, le courant littoral et le transport en travers et la ligne de côte. Les études de simulation de la ligne de côte sont basées sur l'équation de conservation de la masse des particules solides. L'application du modèle UNIBEST n'est valable que sous certaines hypothèses :

- les hypothèses morphologiques : le littoral doit être uniforme, c'est à dire que les lignes bathymétriques sont presque parallèles et que le profil transversal relatif est en équilibre.

- les hypothèses sédimentologiques : la granulométrie doit être uniforme et de même dimension,

- les hypothèses hydrodynamiques : les facteurs hydrodynamiques telles que la houle caractérisée par sa période T, sa hauteur significative Hs et sa direction de propagation par rapport au profil transversal de la côte, doivent être constants. Pour tenir compte des différentes houles nous avons choisi les caractéristiques de la houle dominante (période, hauteur, et direction) comme entrée du modèle.

2. Formulation mathématique du modèle UNIBEST

Le modèle UNIBEST est composé de trois sous-programmes dépendants.

UNIBEST-LT : *Uniform Beach Sediment Transport-Longshore Transport;*

UNIBEST-TC : *Uniform Beach Sediment Transport-Time Dependent Coastal profil model;*

UNIBEST-CL : *Uniform Beach Sediment Transport-Coast-Line dynamics.*

UNIBEST-LT

Le programme UNIBEST-LT a pour rôle essentiel d'estimer la valeur du transit littoral, pour chaque formule de transport, en se basant sur le calcul du courant littoral dû à la marée, à la houle ou leurs actions combinées, tout le long du profil transversal de la côte. Il est basé sur les équations suivantes :

1. Equations du modèle de propagation de la houle

C'est un système formé des équations de la conservation de l'énergie de la houle (1), de la quantité de mouvement selon l'axe des x (3) et de la loi de Snell (4).

$$\frac{d}{dx} \left(C_g \frac{E}{\omega_r} \cos \alpha \right) + \frac{D_b}{\omega_r} + \frac{D_f}{\omega_r} = 0 \quad (1)$$

x : axe longitudinal,

E : énergie de la houle,

C_g : vitesse de groupe,

α : angle d'incidence de la houle (angle entre la direction de la houle et le profil transversal),

D_b : dissipation de l'énergie de la houle due au déferlement,

D_f : dissipation de l'énergie de la houle due au frottement,

ω_r : fréquence relative de la houle,

$$\omega_r = \omega - k V \sin(\alpha) \quad (2)$$

V : vitesse du courant,

k : nombre d'onde de la houle dans la direction de la propagation.

ω : fréquence propre de la houle ($2\pi/T$),

$$\frac{d}{dx}(S_{xx}) + \rho gh \frac{d\xi}{dx} = 0 \quad (3)$$

$$k \sin(\alpha) = C^{te} \quad (4)$$

S_{xx} : contrainte de cisaillement selon l'axe des y ,

ξ : dénivellation du niveau de la mer due à l'action de la houle,

h : profondeur de l'eau,

g : l'accélération de la pesanteur,

ρ : masse volumique de l'eau de mer,

T : période de la houle.

2. Equations du courant longitudinal

Il s'agit de l'équation de conservation de la quantité de mouvement projetée sur l'axe des y .

$$\frac{d}{dx}(S_{xy}) + \rho gh \frac{dh_0}{dy} + \rho \frac{g}{C_{ch}} V V_{tot} = 0 \quad (5)$$

S_{xy} : composante, selon l'axe des y , du tenseur de radiation,

h_0 : profondeur de l'eau au repos,

C_{ch} : coefficient de Chezy,

V_{tot} : vitesse totale,

U_{rms} : vitesse orbitale des particules d'eau.

$$V_{tot} = \sqrt{V^2 + U_{rms}^2} \quad (6)$$

3. Equations de transit longitudinal

Dans le modèle de transport de sédiment six formules empiriques de transport sont programmées.

- Formule de CERC (1984),
- Formule de England-Hansen (1979),
- Formule de Bijker (1971),
- Formule de Van Rijn (1992),
- Formule de Baillard (1981),
- Formul de Vander Mer-Pilarczyk (1992).

UNIBEST-TC

Le programme UNIBEST-TC a pour rôle d'estimer la valeur du transit en travers en fonction du temps, pour

chaque formule de transport, dû à l'action combinée de la houle et de la marée, tout le long du profil transversal à la côte. Il est basé sur les équations suivantes :

1. Equations du modèle de propagation de la houle

C'est un système formé des équations de la conservation de l'énergie de la houle (1), de la conservation de la quantité de mouvement selon l'axe des x (3) et de la conservation de la quantité de mouvement selon l'axe des y (5).

$$\rho g h_i \frac{D_t}{\omega} k \sin(\alpha) = A \rho \frac{1 + \sin^2 \alpha}{\sqrt{\pi}} \alpha \sqrt{f_c} U_1 V \quad (7)$$

i_y : gradient longitudinal du niveau d'eau du à la marée,

D_t : dissipation de l'énergie due à la turbulence,

f_c, f_w : facteurs de frottements,

U_1 : amplitude de la vitesse orbitale correspondant à H_{rms} .

A : coefficient de calage.

2. Equations du modèle du courant de retour

Le modèle du courant de retour est utilisé en divisant le milieu, selon la verticale, en trois couches, la couche de surface, la couche du milieu et la couche du fond. L'effet de la couche de surface sur les autres couches est évalué par une contrainte de cisaillement effective, τ donnée par :

$$\tau = \rho \nu_t \frac{u_b^2 k}{C} \sin(2kh) + \frac{D_t}{C} \quad (8)$$

ν_t : viscosité turbulente,

u_b : amplitude de la vitesse oscillatoire proche du fond,

C : vitesse de propagation de la houle.

Pour la couche de milieu et la couche du fond, les équations de la conservation de la quantité de mouvement sont données respectivement par :

$$\frac{\partial}{\partial z} (\nu_t \frac{\partial U}{\partial z}) = \frac{\partial}{\partial x} (<u^2> - <v^2>) + g \frac{\partial <Z_s>}{\partial x} \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} (\nu_t \frac{\partial U}{\partial z}) = \frac{\partial}{\partial x} (<u^2> - <v^2>) + g \frac{\partial <Z_s>}{\partial x} + \frac{\partial <uw>}{\partial z} \quad (10)$$

$< >$: symbole de la moyenne temporaire,

$< Z_s >$: élévation moyenne de l'eau due à la houle,

u, w : composantes de la vitesse orbitale de la houle,

U : courant secondaire.

3. Equations de transport en travers

Le transport en travers est estimé par des formules empiriques. L'évaluation du transport en travers au niveau de la Banlieue Nord a été effectuée par la formule de Baillard projetée sur l'axe des x . La formule commentée est présentée dans Bejaoui et al. (1997).

4. Equations du changement morphologique du fond

Les changements morphologiques du fond sont évalués en utilisant l'équation de la conservation de la masse. Selon l'axe transversal, cette équation est donnée par :

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial q_{tr}}{\partial xr} = 0 \quad (11)$$

xr : coordonnée transversale,
 q_{tr} : transport en travers,
 z : profondeur de l'eau.

UNIBEST-CL

Le programme UNIBEST-CL a pour rôle d'estimer l'évolution du trait de côte et d'observer l'impact des ouvrages de protection implantés le long de la côte en se basant sur l'effet du gradient du transit littoral évalué par le modèle UNIBEST-LT et du transport en travers évalué par l'unité UNI-TC. Le modèle UNIBEST-CL est composé de deux sous unités. La sous unité SHOWTS qui a pour rôle de calculer le transit littoral en se basant sur les caractéristiques de la houle diffractée. La sous unité STRUCT, sert à l'estimation du transit littoral en présence des structures (épis, brise-lames) sur la plage. Il est basé sur l'équation de la conservation de la masse :

$$h_c \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial Q_s}{\partial x} + q_b = 0 \quad (12)$$

Q_s : transport longitudinal de sédiment,
 h_c : profondeur active du profil transversal,
 q_b : terme source ou puits.

L'estimation de l'évolution du trait de côte par UNIBEST-CL est basée sur l'équation de la conservation de la masse dans le sens longitudinal. Chaque tronçon est modélisé seul, en imposant des conditions adéquates à chaque extrémité. Le modèle UNIBEST propose trois conditions aux limites :

la côte n'évolue pas au cours du temps ($\partial y / \partial t = 0$) (présence des roches ou de revêtement),
 une évolution du trait de côte parallèle à elle-même ($\partial \theta / \partial t = 0$), avec $\partial x / \partial y = 0$,
 un transit littoral variable en fonction du temps,

APERÇU HISTORIQUE DE L'EVOLUTION DE LA COTE

Côte de la Goulette à Salammbô : Au sud de la pointe de Salammbô, sur 200 mètres environ l'érosion de la plage s'est poursuivie en raison de la détérioration des épis [MEH et SOGREAH, 1978]. La plage ne peut plus reculer car la laisse a atteint les aménagements (murs de soutènement, maisons). La seule plage restante stable est celle de la Goulette grâce à la présence des épis qui ont été construits en 1981.

3. Les données hydrodynamiques :

Faute de données du vent au large, une statistique du vent à la station de Tunis-Carthage couvrant une période de 20 ans (entre 1970 et 1990) est utilisée pour estimer la houle. Les estimations ont été basées sur le

Côte de Salammbô à Cap Carthage : Les deux zones, à proximité des ports puniques et au Nord de la plage d'Amilcar ont connu une légère régression, alors qu'une plage s'est formée au sud du port de Sidi Bou Said.

Côte de Cap Carthage à Cap Gammarth : Cette zone a connu entre 1947 et 1996 un recul presque général. La seule plage intacte se situ au Nord de la Coupole longe de 700 environ.

SUBDIVISIONS DES ZONES

Afin de respecter les hypothèses d'UNIBEST, le littoral de la banlieue Nord doit être divisé selon les trois critères présentés plus hauts. Ainsi, le littoral de la banlieue Nord de Tunis est subdivisé en quatre zones. Soient, de Cap Gammarth à la Marsa, de la Marsa à la Coupole, de la Coupole à Sidi Bou Said et de Sidi Bou Said à Salammbô.

LES ENTREES DU MODELE UNIBEST

1. La profondeur de fermeture

C'est la profondeur à partir de la quelle se déroule effectivement le phénomène de transport. Elle a été déterminée par la formule empirique de Halermeir [Dean, 1991].

$$h_f = 2.28 H_{s0} - 68.5 \frac{H_{s0}^2}{gT^2} \quad (13)$$

h_f : profondeur de fermeture,
 H_{s0} : hauteur significative de la houle au large.

2. Profils d'équilibre :

Il dépend des conditions hydrodynamiques et de la granulométrie du milieu. Le choix du profil d'équilibre est basé sur le critère de Dean. Il correspond à une erreur quadratique ε minimale (équation 15).

$$H_r(xr) = A_1 xr^{2/3} \text{ avec } A_1 = 0.067 W_s^{0.44} \quad (14)$$

$$\varepsilon = \frac{\sum_i [H_r(xr) - H_d(xr)]^2}{\sum_i H_r^2(xr)} \quad (15)$$

H_r : profondeur de l'eau à la position transversale xr par rapport à la côte,
 H_d : profondeur de Dean à la position xr,
 W_s : vitesse de chute des particules.

Pour chaque zone, quelques profils transversaux ont été choisis, leur nombre dépend de la longueur du littoral étudié et de la bathymétrie du fond.

diagramme de Bonnefille (1992) donnant la hauteur et la période en fonction des caractéristiques du vent (durée d'action, vitesse, fetch). Les caractéristiques de la houle dominante (T_{dom}, H_{dom} et α_{dom}) sont calculées avec les formules de CERC (1975). Dans les tableaux I et II sont

répertoriés respectivement les estimations de la houle dans le golfe de Tunis et les caractéristiques de la houle dominante.

Les courants de marée dans le golfe de Tunis sont faibles, leur vitesse est souvent inférieure à 10 cm/s. Le marnage dans le golfe de Tunis est en moyenne égal à 0.42 m [MEH et HP, 1996].

$$T_{dom} = \frac{\sum_i p_i T_i}{\sum_i p_i} \quad H_{sdom} = \left[\frac{\sum_i p_i H_{si}^2 T_i}{T_{dom}} \right]^{1/2}$$

$$\alpha_{dom} = \text{Arctg} \left[\frac{\sum_i p_i H_{si}^2 T_i \sin \alpha_i}{\sum_i p_i H_{si}^2 T_i \cos \alpha_i} \right] \quad (16)$$

- T_i : période de la houle n° i,
- T_{dom} : période de la houle dominante,
- p_i : pourcentage d'occurrence de la houle n° i,
- H_{si} : Hauteur significative de la houle n° i,
- H_{sdom} : Hauteur significative de la houle dominante,
- α_i : direction de la houle n° i par rapport au profil transversal,
- α_{dom} : direction de la houle dominante par rapport au profil transversal.

Tableau I : Estimation de la houle dans le golfe de Tunis

Direction	H_s (m)	T (s)	Durée (j)
N	0.8	6.5	16.4
NNE	0.4	6.1	14.3
NE	0.3	5.9	11.7
ENE	0.35	6	9.49
E	0.18	4.3	30
ESE	0.4	6.4	20.8
SE	0.3	5.8	13.1
SSE	0.35	5.3	9.1
S	0.25	6.1	16.4
SSW	0.45	6.14	12
SW	0.32	5.9	29.9
WSW	0.33	6	26.6

Tableau II : Caractéristiques de la houle dominante

Zone	T_{dom} (s)	H_{sdom} (m)	α_{dom} (°)
Cap Gammarth - Marsa	3.6	0.31	13
Marsa - Coupole	5.1	0.4	-10
Coupole - Cap Carthage	5.3	0.35	-17
Cap Carthage -	5.2	0.36	5

Salammbô			
----------	--	--	--

CALAGE DU MODELE

Le calage a été effectué simultanément sur les trois composantes du modèle (UNI_TL, UNI_TC, UNI_CL), sur un tronçon 1 km de long, situé entre La Marsa et la Coupole (figure1).

Le calage a concerné les paramètres hydrodynamiques, les coefficients des formules de transport, la limite de la zone dynamique x_{rb} , correspondant à la hauteur de fermeture et la limite de la zone de transport. Le tableau III présente les résultats du calage du modèle.

Tableau III : Résultats du calage du modèle

Equations	Paramètres	Valeurs
Equations Hydrodynamiques	γ	0.72
	α	0.98
	f_{ω}	1
	k_r	0.06
	k_s	0.028
Formules de transport	n	0.4
	epss	0.022
	epsb	0.13
Limite de la zone dynamique	x_{rb} (m)	350
Limite de la zone de Transport	x_{r1} (m)	375

La figure 1 présente le résultat du calage. Elle montre une concordance entre le trait de côte observé par la carte bathymétrique et celle simulée par le modèle. L'erreur quadratique est égale à 1,2.

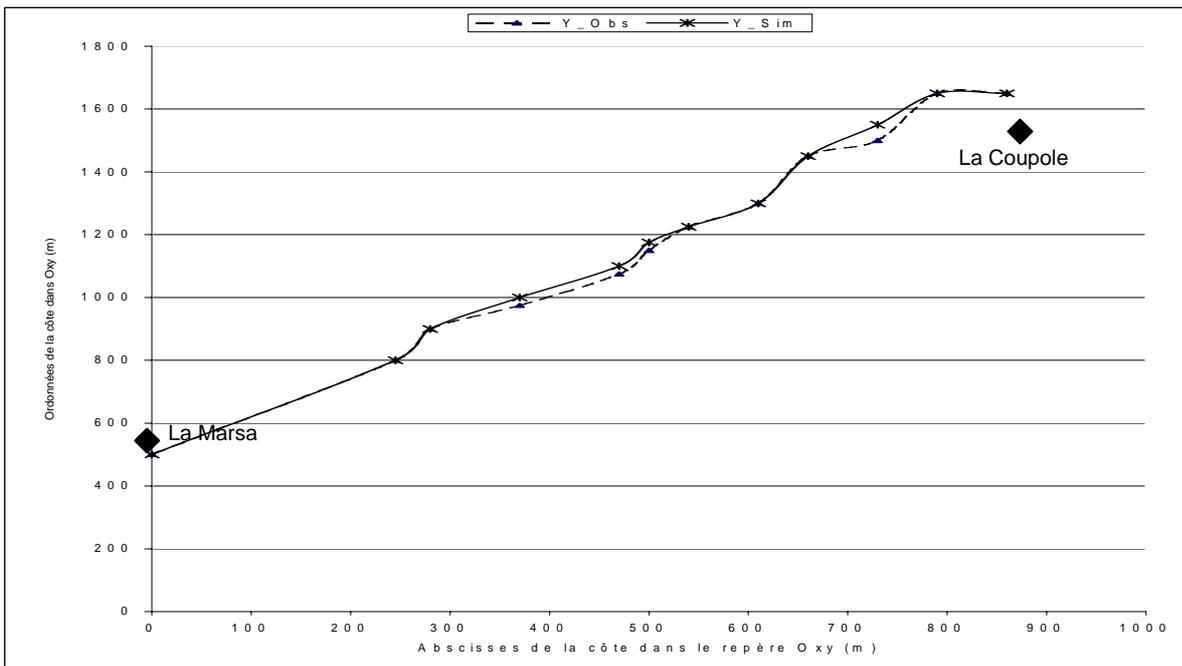


Figure 1 : Position du trait de côte observé (trait discontinu) et simulé (trait continu) par le modèle en 1996 entre la Marsa et La Coupole.

RESULTATS DES SIMULATIONS

1. Présentation des simulations

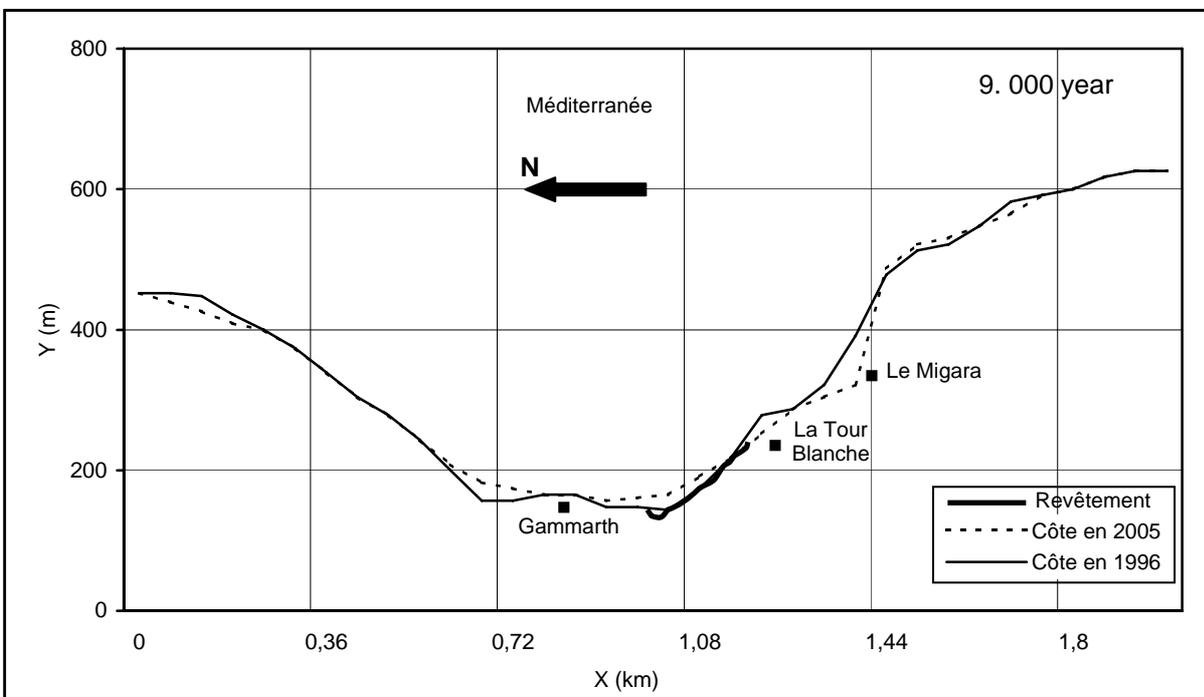


Figure 2 : Estimation de l'évolution du trait de côte observé (trait continu) et simulé (trait discontinu) par le modèle dans le banlieue Nord de Tunis.

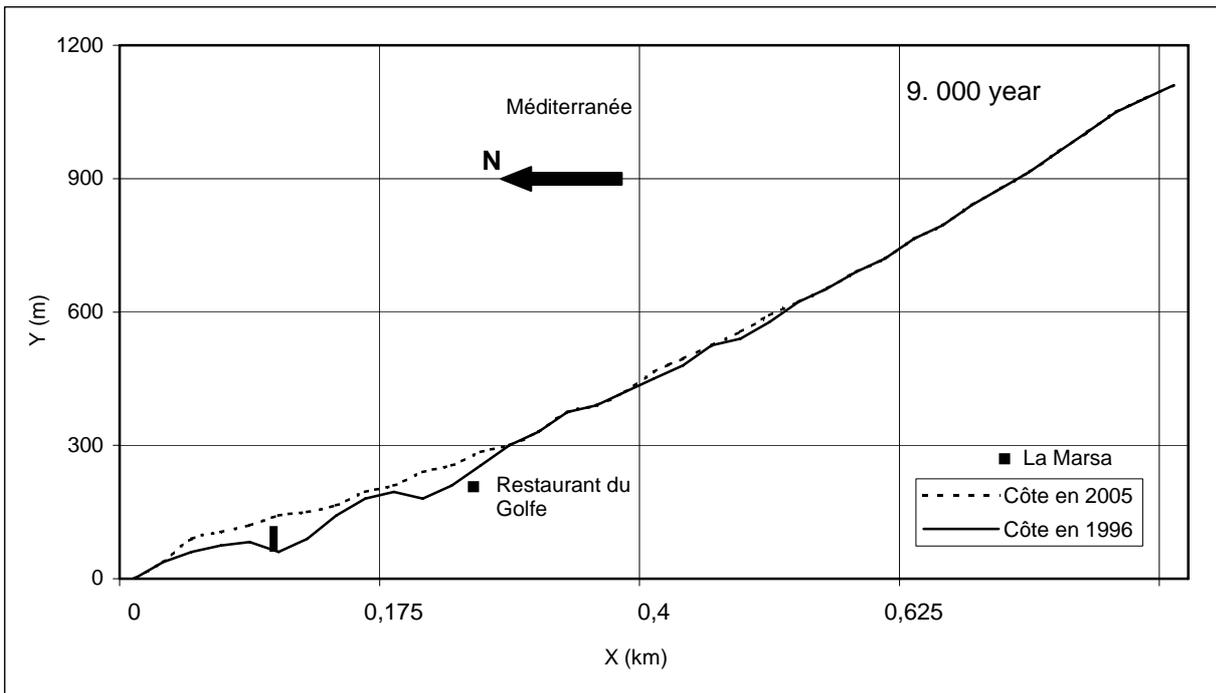


Figure 3 : Estimation de l'évolution du trait de côte observé (trait continu) et simulé (trait discontinu) par le modèle entre la Marsa et la coupole.

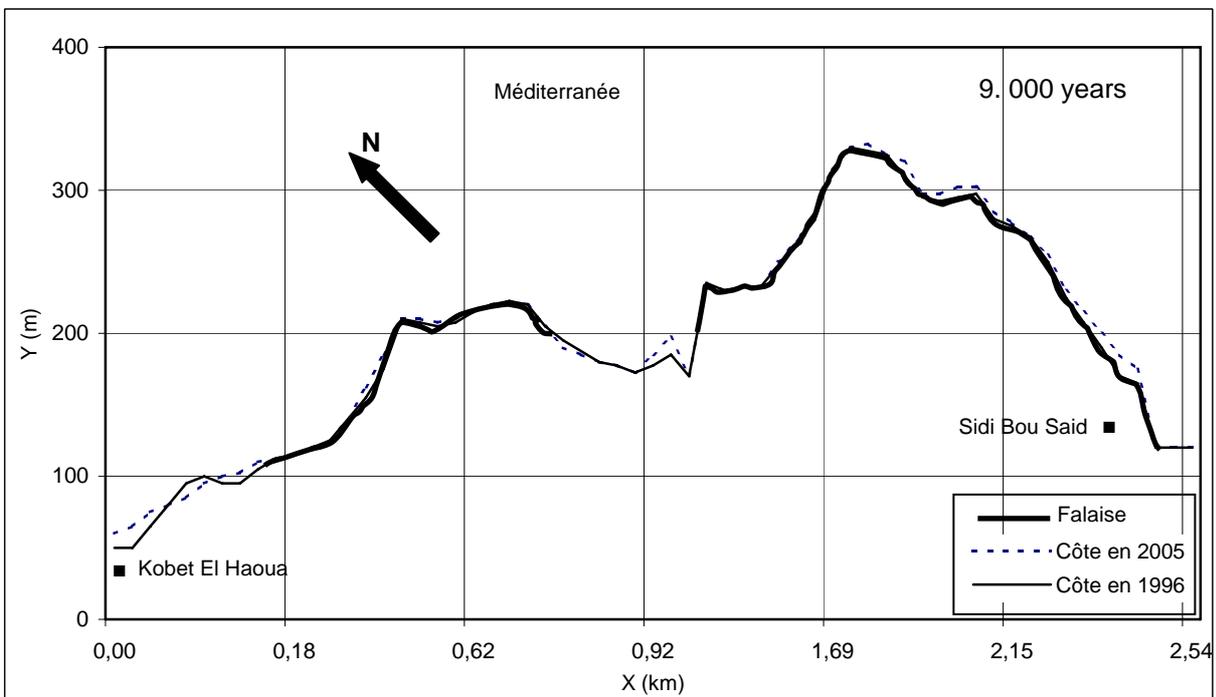


Figure 4 : Estimation de l'évolution du trait de côte observé (trait continu) et simulé (trait discontinu) par le modèle entre la coupole et Sidi Bou Said.

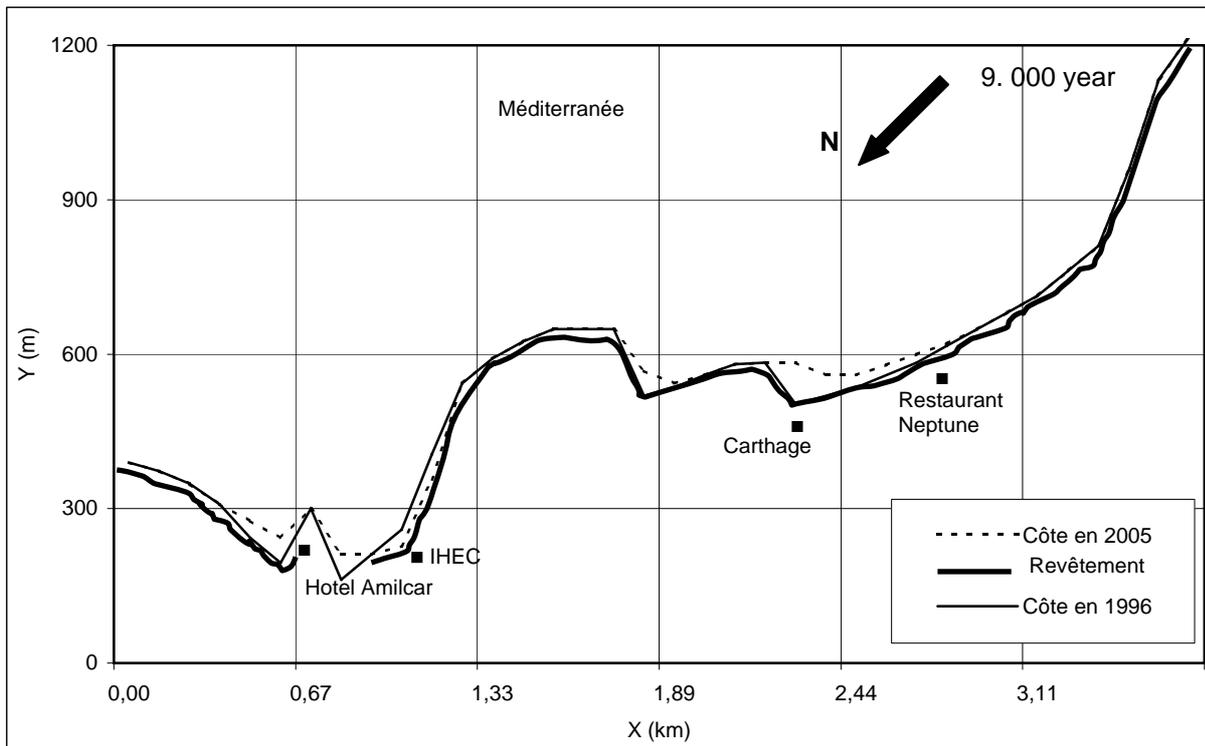


Figure 5 : Estimation de l'évolution du trait de côte observé (trait continu) et simulé (trait discontinu) par le modèle entre Sidi Bou Said et Salammbô.

2. Interprétation des résultats

Côte de Cap Gammarth à La Marsa

Le résultat de la simulation est présenté dans la figure 2. La simulation de la côte à l'horizon 2005 montre que la ligne de rivage débutant de Cap Gammarth et de longueur 500 mètres environ, tend vers une position stable ce qui est justifiée par la présence des roches formant un obstacle naturel, au moins pour le transport par charriage. Après, la côte a une tendance générale à l'engraissement (1 m/an en moyenne) ceci est essentiellement du d'une part, à la forme d'une baie qui épanouit l'énergie apportée par la houle et d'autre part à sa situation entre deux Caps (lieux de convergence des orthogonales) dont l'un forme un obstacle pour le transit littoral alors que l'autre Cap (côte de l'hôtel de la Tour Blanche) représente une source de sédiments.

La côte joignant l'hôtel de La Tour Blanche et l'hôtel Migara montre un recul très marqué à raison de 1.5 m/an en moyenne au niveau de l'hôtel de la Tour Blanche et 2 m/an environ au niveau de l'hôtel Migara. Ce recul est le résultat des agents naturels ainsi que des facteurs anthropiques. En effet, cette tranche de côte présente plusieurs aménagements touristiques qui sont de plus en plus nombreux. Ces constructions qui n'ont cessé

d'attirer la population vont finir par accentuer la faiblesse des plages et même peuvent conduire à leur disparition.

Côte de La Marsa à la Coupole

Le résultat de la simulation est présenté dans la figure 3. Elle montre l'évolution de la côte de la Marsa à l'horizon 2005 à partir de sa position en 1996. La simulation de la côte montre une tendance à la stabilité due d'une part, à la morphologie uniforme de la côte et d'autre part à sa situation par rapport aux houles frontales.

Côte de La Coupole à Sidi Bou Said

La simulation en 2005 montre que la côte de la Marsa à Sidi Bou Said a une tendance générale à la stabilité due à la présence des falaises (figure 4).

Côte de Sidi Bou Said à Salammbô

L'évolution de la ligne de côte de Sidi Bou Said à Salammbô (figure 5). La ligne discontinue représente la côte simulée après 9 ans à partir de 1996, tandis que la ligne continue représente la position initiale ; observée à partir de la carte bathymétrique. D'après les simulations, la côte au niveau de l'hôtel Amilcar continue son engraissement à raison de 1m/an environ tandis que la côte au niveau de l'IHEC se dégradera et finira par une

disparition de la plage après 5 ans. La côte au niveau de Cap Carthage a une tendance générale à l'engraissement ; ceci est le résultat des revêtements le long de la côte.

La simulation de l'évolution de la côte de la banlieue Nord de Tunis montre l'existence de deux sites qui seront menacés par une érosion remarquable. Ces deux sites sont situés au niveau de Gammarth et au niveau de Carthage.

SOLUTIONS DE PROTECTIONS

1. Simulations des solutions de protections

Les deux sites à protéger sont la frange littorale comprise entre l'hôtel La Tour Blanche et l'hôtel Migara (site 1) et la plage devant l'IHEC (site 2). Les solutions de protection ont été choisies par des différentes simulations.

Le transit sédimentaire au niveau de la plage comprise entre La Tour Blanche et l'hôtel Migara est de direction Nord-ouest, le déficit sédimentaire est de l'ordre de 600 m³/m/an. Pour cette zone, deux solutions de protection ont été proposées. La première solution (figure 6) consiste à implanter une série de 3 épis dirigés contre la prédominance des houles (direction Ouest). Les caractéristiques seront présentées dans le tableau IV. La deuxième solution (figure 8) consiste à implanter deux brise-lames pour diminuer l'énergie de la houle. Les longueurs, les positions et l'espacement des deux brise-

lames sont déterminés en se basant sur les travaux de Sliti (1990). Les caractéristiques des deux brise-lames sont mentionnées dans le tableau V.

Tableau V : Dimensions des bris-lames de protection (site 1)

N° de l'épi	Longueur(m)	Position % rivage (m)	Espacement (m)	Profondeur de l'eau (m)
1	100	1202	70	1.8
2	100	1250	---	2.5

Le transit sédimentaire au niveau de la plage située devant l'IHEC (site 2) est de direction Sud-Nord et de l'ordre de 2000 m³/an. Ce transport provoquera la disparition de la plage après 10 ans environ. La solution retenue (figure 10) pour la protection de cette zone consiste à construire une série de trois épis dirigés contre la provenance des houles (direction Sud-ouest). Les caractéristiques techniques des brise-lames sont récapitulées dans le tableau VI.

Tableau IV : Dimensions des épis de protection (site 1)

N° de l'épi	Longueur de l'épi (m)	Espacement (m)
1	20	48
2	25	75
3	30	---

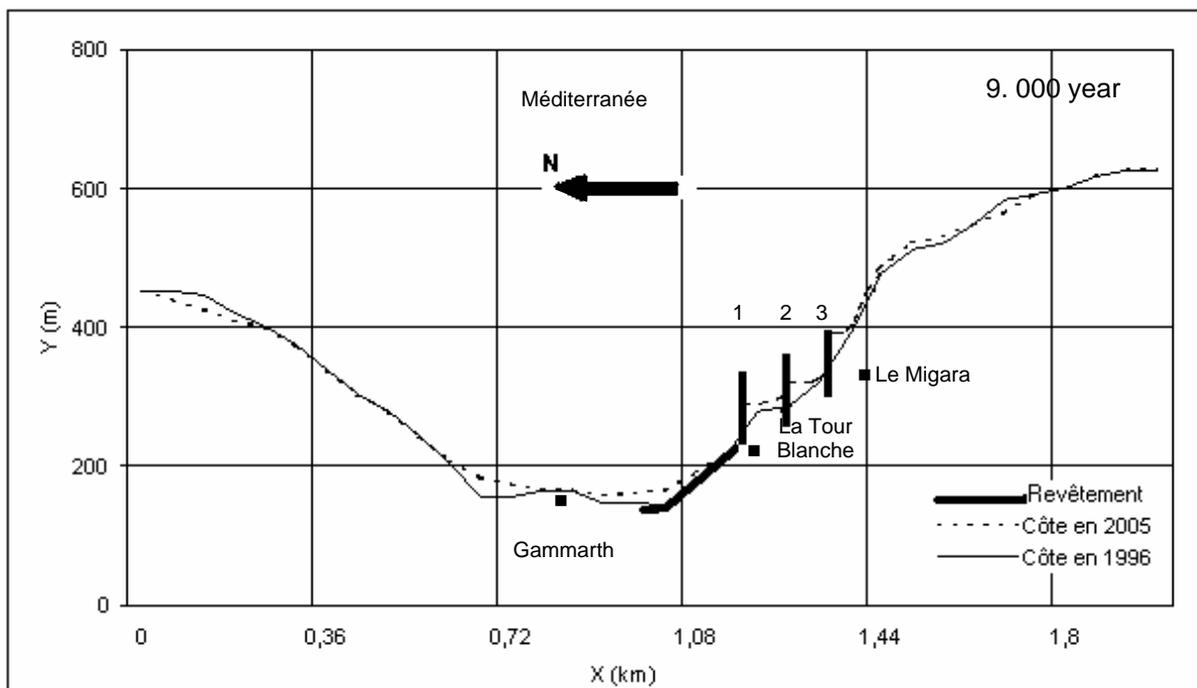


Figure 6 : Evolution de trait de côte par l'emplacement des épis par simulation entre la Tour blanche et le Migara.

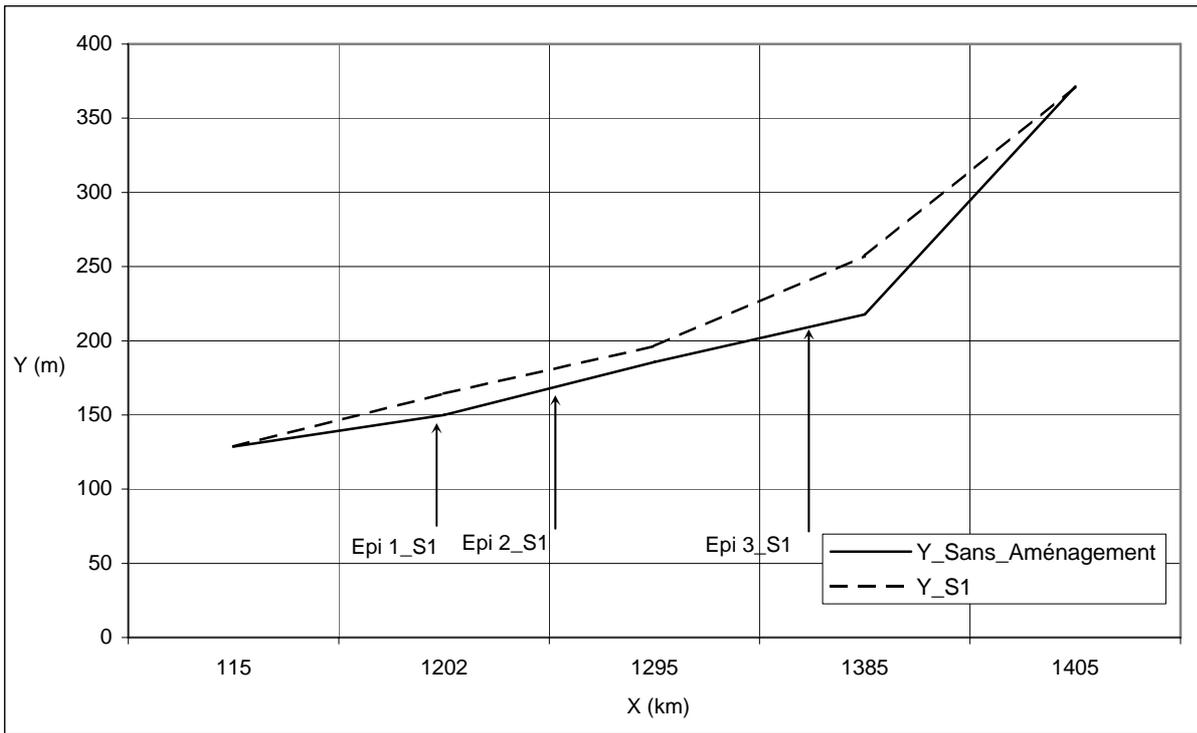


Figure 7: Evolution par simulation de trait de côte (trait continu) après emplacement des épis entre La Tour Blanche et le Migara. Le trait discontinu représente l'évolution du trait de côte par simulation sans aménagement.

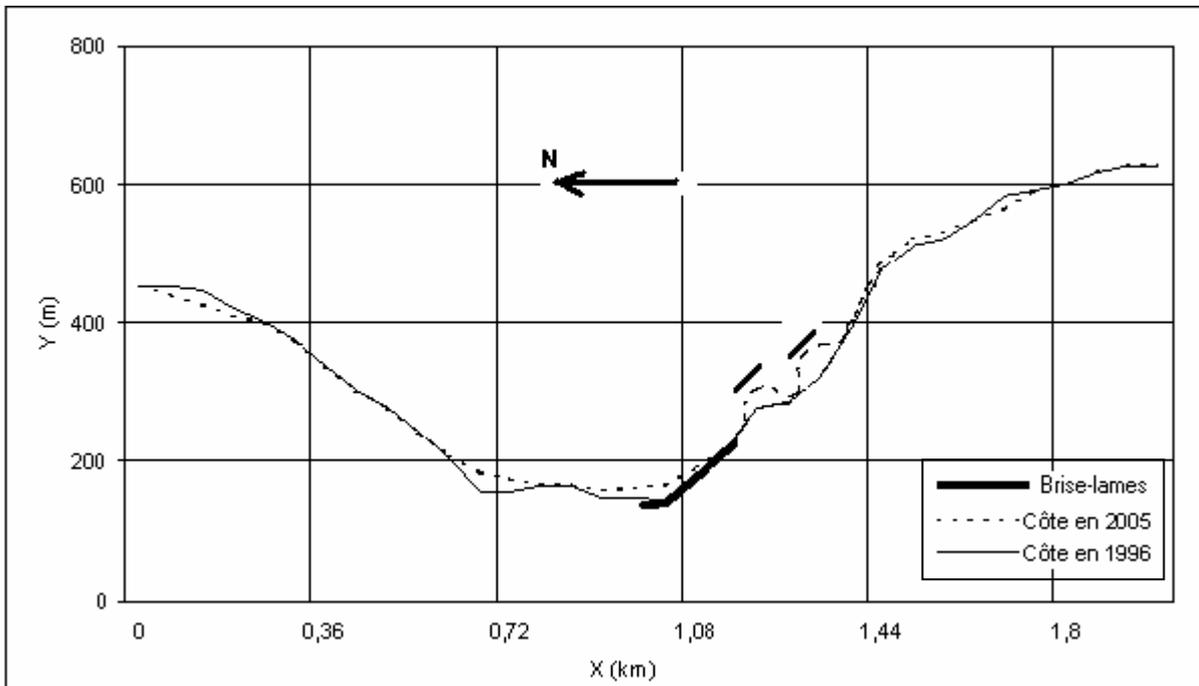


Figure 8 : Evolution de trait de côte par l'emplacement de deux brise-lames par simulation entre la Tour blanche et le Migara.

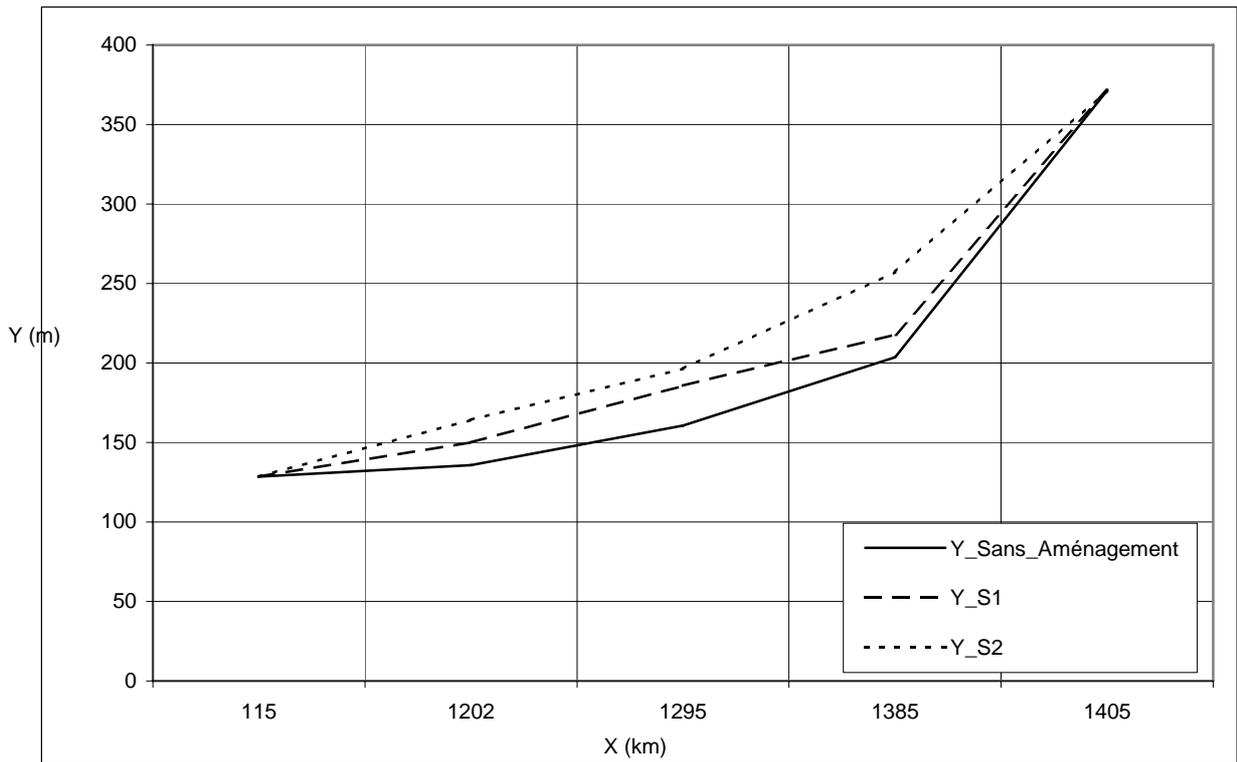


Figure 9 : Evolution du trait de côte par simulation après l'installation des épis (trait discontinu épais) et des brise-lames (trait discontinu fin). Le trait continu représente la simulation de l'évolution du trait sans aménagement.

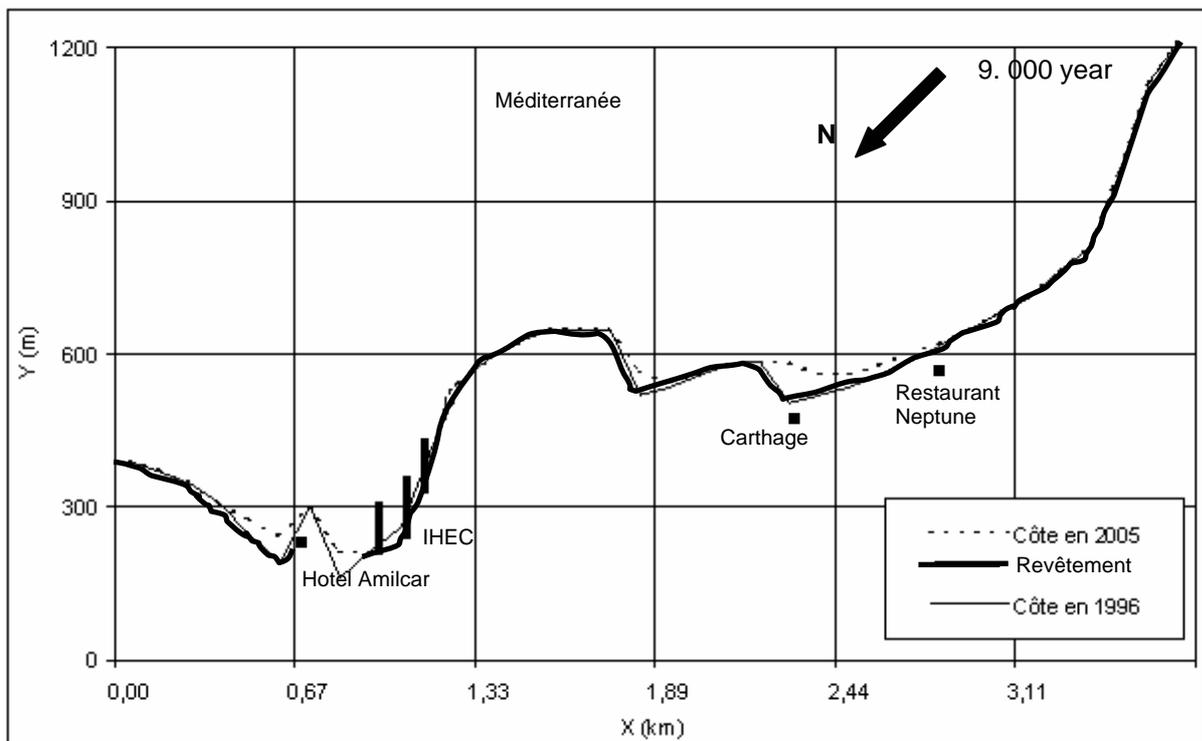


Figure 10 : Evolution de trait de côte par simulation avec emplacement des épis au niveau de l'IHEC

Tableau VI : Dimensions des épis de protection (site 2)

N° de l'épi	Longueur de l'épi (m)	Espacement (m)
1	40	70
2	30	85
3	45	---

2. Commentaires des solutions de protection proposées

La modélisation de l'état de la côte en 2005, réalisée à l'aide du modèle UNIBEST, avec la présence de trois épis montre une stabilité de la côte. A l'amont de l'épis n°3 nous observons un engraissement de la côte (figure 6). En comparant la position de la côte en 2005, sans et avec implantation des épis, nous constatons que cette solution permettra un avancement de la plage au profit de la mer avec une vitesse de 3 m/an environ (figure 7).

La modélisation de la position de la côte à l'horizon 2005, avec la présence des deux brise-lames, montre qu'au niveau de l'hôtel La Tour Blanche la côte a une tendance à la stabilité. Au niveau de l'hôtel Migara, la côte a une tendance à l'engraissement (formation d'un tombolo derrière le brise-lames (figure8).

En analysant les impacts des deux solutions de protection, nous constatons que dans les deux cas la côte, au niveau de l'hôtel Migara et de l'hôtel La Tour Blanche, connaîtra un engraissement. La figure 9 récapitule la position de la ligne de rivage pour les deux solutions proposées. Nous remarquons une stabilité plus marquée dans le cas de la deuxième solution (implantation de deux brise-lames), pour cela nous proposons cette dernière solution comme solution préliminaire.

La modélisation de la ligne du rivage devant l'IHEC à l'horizon 2005 montre que la vitesse de recul du rivage est remarquablement ralentie par la présence des épis. En comparant la position de la côte actuelle avec celle simulé en 2005 avec la présence des trois épis (figure 10), on remarque une tendance à la stabilité.

CONCLUSION

L'étude effectuée dans le cadre de ce travail, vise la prévision de l'état futur du littoral de la Banlieue Nord de Tunis. Cette étude est réalisée à l'aide du modèle UNIBEST. La prévision de l'évolution de la côte du Cap Gammarth à la Goulette a nécessité une subdivision de ce littoral en quatre zones afin que les hypothèses du modèle soient vérifiées.

Cette étude effectuée par zone a montré l'existence des sites qui connaîtront un recul très marqué. Ceux ci sont localisés au niveau de la côte touristique de Gammarth (côte située entre les hôtels La tour Blanche et Migara) et au niveau de la côte de Carthage (côte située proche de l'Institut des Hautes Etudes Commerciales). Par la suite,

des scénarios de solution de protection de ces deux zones ont été effectués.

Les solutions de protection envisagées qui consiste à construire des ouvrages de protection (brise-lames ou épis) a mis en évidence une relation étroite entre la solution de protection proposée et caractéristiques du site, à savoir les caractéristiques hydrodynamiques et morphologiques.

Les simulations de l'impact des solutions proposées, nous permet de retenir une solution pour chaque site :

- Deux brise-lames au niveau des côtes touristiques de Gammarth,
- Trois épis au niveau de l'Institut des Hautes Etudes Commerciales (IHEC).

REMERCIEMENT

Nous remercions MM. Makhoul R., Directeur, et Mejri L. Ingénieur et chef de services à la Direction Générale des Services Aériens et Maritimes pour la contribution scientifique et l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

BIBLIOGRAPHIE

- Bonnefille R., 1992 : Cours d'hydraulique maritime, 3^e édition - Ed. MASSON.
- Bécher Béjaoui, Imed Ben Mouelli et Samira Rais, 1997 : Evolution et protection du littoral dans le golfe de Tunis. Mémoire du Projet de Fin d'Etudes (PFE) – Département de Génie Civil - ENIT.
- Dean R., 1991 : Equilibrium beach profiles. Characteristics and applications. Journal of Coastal Research, vol. 7, n° 1 – ASCE.
- Delft Hydraulics, 1992 : Manual of UNIBEST.
- MEH et HP, 1996 : Etude générale pour la protection du littoral tunisien contre l'érosion marine 1^{ère} phase (6 rapports).
- Ministère de l'Equipement et de l'Habitat (MEH) et Hydrotecnica Portuguesa (HP).
- MEH et LCHF, 1978 : Etude des ports de pêche côtière. Ministère de l'Equipement et de l'Habitat (MEH) et Laboratoire Central d'Hydraulique de France (LCHF).
- Sliti M., 1990 : Fonctionnement des brise-lames dans le système marin littoral du golfe de Tunis. Thèse de Doctorat – Université de Bordeaux I.
- Van Rijn, 1990 : Handbook of sediment transport by current and waves. Delft Hydraulics, 2^{ème} édition.