INFLUENCE DU DEBIT FLUVIAL SUR LA MAREE ESTUARIENNE : APPLICATION A LA LOIRE

O.A. KHALIFA M.A. (1) ; Y. RIOU (2) ; P. THOMAS (3)

(1) Laboratoire de Mécanique et Géomécanique - 2 rue de la Houssinière - 44072 NANTES CEDEX

(2) Laboratoire de Génie Civil - Ecole Centrale de Nantes
1 rue de la Noë - 44072 NANTES CEDEX

(3) Laboratoire de Génie Civil - IUT de ST NAZAIRE
BP 420 - 44600 SAINT NAZAIRE

ABSTRACT

The noticeable tonnage increase of ships steaming up the Loire in order to supply the ports of Saint Nazaire, Montoir, Donges, Cordemais and Nantes has resulted in higher costs for channel maintenance, owing to regular dredging operations. Significant savings can be realized on dredging costs by optimizing ship movements according to tide. A Channeling application program, modelizing fluid an ship movements, has been devised so as to simulate ship paths. It was quickly made obvious that the accuracy of the Channeling application program depended on that of water height prediction in the channel based on harmonic analysis method. A comparative study concerning tide observation and tide prediction allowed to underscore the influence of the river flowrate. In this study, an original method is suggested, based on statistical analysis of data tides (Every 5min) during 6 years in Saint-Nazaire, Donges, Cordemais, Le Pellerin and Nantes. These studies are subjected to contracts between the Port Autonome of Nantes/Saint-Nazaire and the Institut Universitaire de Technologie of Saint-Nazaire.

1. INTRODUCTION

Les estuaires sont des régions à grands potentiels industriel et économique. Les transports fluviaux à coûts réduits favorisent l'implantation d'industries lourdes. Cet intérêt a rendu ces régions stratégiques. En France les trois grands estuaires de la Seine, de la Loire et de la Gironde abritent de très grands ports français. La concurrence européenne de plus en plus sévère exige l'utilisation de navires de plus en plus grands et des temps d'escale de plus en plus courts. Ceci oblige les ports fluviaux à effectuer des dragages d'entretien des chenaux afin d'assurer la sécurité de la navigation dans une zone de dynamique sédimentaire intense.

De substantielles économies peuvent être réalisées sur ces opérations de dragage. très coûteuses, si on maîtrise la hauteur d'eau dans le temps et en tout lieu.

Aussi le Port Autonome de Nantes - Saint-Nazaire (PANSN), en collaboration avec notre équipe de recherche, a lancé un programme d'étude du "chenalage" dans la Loire. Ce programme vise à tirer le meilleur parti de ce phénomène périodique qu'est la marée, en rationalisant le mouvement des navires en fonction du marnage dans la Loire et des tirants d'eau des navires. Sa mise en oeuvre a nécessité d'une part une grande quantité de mesures fiables, et d'autre part l'élaboration de codes de calcul réalisant une prédiction marégraphique "en continu" et simulant l'écoulement hydrodynamique fluvial.

Dans ce document, nous allons présenter successivement :

. les mesures marégraphiques en Loire réalisées par le PANSN,

. les logiciels de prédiction de marée, élaborés depuis 1986 ((2),(3),(4)), avec une analyse critique de certains résultats inexploitables par le programme de chenalage.

. une étude statistique des mesures relatives à plusieurs années d'observation de la marée permettant de corriger les prédictions erronées.

2. LA MESURE MAREGRAPHIQUE EN LOIRE

La Loire est équipée d'une douzaine de marégraphes échelonnés entre la station d'Oudon, située environ 20 km en amont de Nantes, et la station de Saint Gildas à l'embouchure. En 1978, le PANSN a équipé 6 de ces stations, d'automates capables de numériser les informations acquises par le marégraphe, de les coder et de les acheminer par voie hertzienne vers une station de regroupement. Chacune de ces stations est autonome et émet une information toutes les 5 minutes.

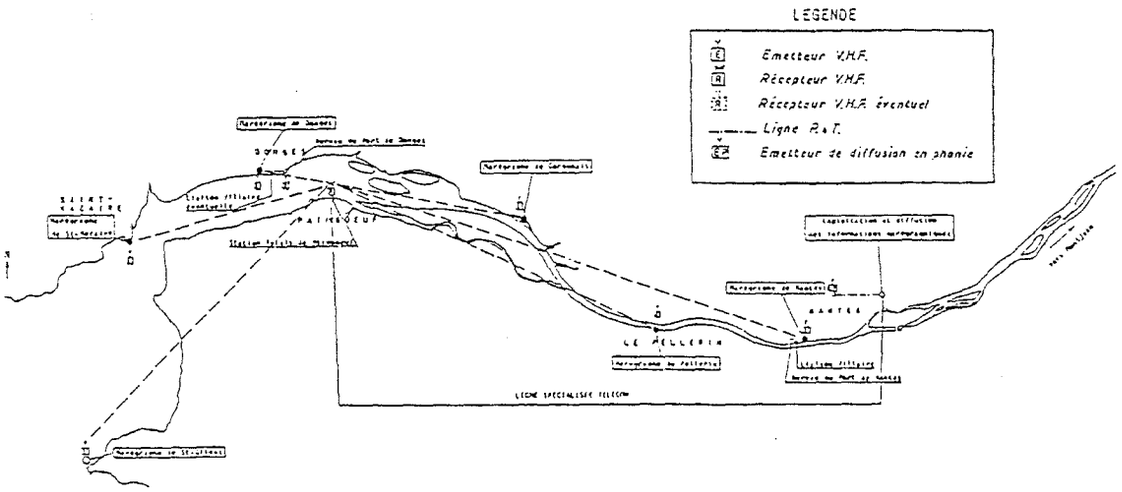


Fig.1: La Loire et son réseau de stations marégraphiques

3. LA PREDICTION MAREGRAPHIQUE ET SES LIMITES

La méthode de prédiction utilisée est celle de l'analyse harmonique. Son principe est basé sur l'analyse de l'onde marégraphique résultante en un lieu. Cette dernière est décomposée en plusieurs ondes de période bien définie correspondant aux mouvements de certains astres. L'application de cette méthode au site qui nous concerne, a fait l'objet de travaux en 1986 et 1987: (2), (4).

Dans une étude antérieure (1), nous avions souligné l'importance de la prédiction marégraphique dans la fiabilité des résultats proposés par le logiciel de chenalage. Nous avions noté, à cette occasion, que cette méthode rend bien compte de la forme des marégramrnes aux lieux mentionnés cidessus. Toutefois, l'accent avait été mis sur les limites de validité de la méthode harmonique, notamment dans la détermination des cotes de pleine mer (PM) et de basse mer (BM) pour les lieux situés en amont. Ceci a été expliqué par le vent et le débit fluvial qui conditionnent de manière notable ces niveaux, et dans une moindre mesure par la présence des ondes de petit fond rendant délicate, d'un point de vue numérique, l'analyse harmonique. En effet ces paramètres de vent et de débit ne peuvent être traités dans notre étude, compte tenu de leur caractère non périodique. Ils auraient même tendance à perturber l'analyse harmonique lorsque celle-ci porte sur une année dont le régime hydraulique est particulier.

Nous présentons, ci-dessous, les principaux résultats de l'étude comparative (I) realisée sur les hauteurs PM et BM, prédites et observées. Ces résultats concernent toute l'année 1985, aux lieux suivants: Saint Nazaire, Donges, Cordemais, Le Pellerin et Nantes. Ils nous ont permis de quantifier les imprécisions obtenues en appliquant la méthode harmonique. Nous avons exprimé cette comparaison en termes de moyenne et écart type, par référence à la notion de pied de pilote généralement utilisée par le personnel du PANSN pour la sécurité de la navigation. Les tableaux présentés ci-dessous. ne différencient pas les écarts types relatifs aux PM (BM) de vives eaux, de ceux relatifs aux PM (BM) de mortes eaux. L'étude détaillée (I) n'a pas, en effet, révélé de relation directe entre ces écarts et les coefficients de marée. Aussi, nous avons convenu d'estimer globalement la validité des cotes de PM (BM) fournies par l'analyse harmonique en tout lieu. Conscients de l'importance de cette correction, nous l'avons ainsi mise en oeuvre lorsque cet écart n'était pas acceptable pour toute valeur du coefficient de marée.

. Etude comparative des pleines mers

Le tableau 1 constitue une synthèse des résultats statistiques pour les PM aux différents lieux. L'écart moyen entre la prédiction et l'observation est faible, bien qu'aucune correction relative à la pression atmosphérique n'ait été apportée. On peut estimer que l'écart type, pour les 4 premiers lieux, est acceptable compte tenu de la précision recherchée dans cette étude appliquée. Il convient également de remarquer que cet écart type varie très peu entre Saint Nazaire et Le Pellerin. Il semblerait donc qu'en aval du Pellerin cette valeur représente les "surcotes" et "décotes" de PM liées aux conditions de vent et de pression atmosphérique. Par contre en amont de ce lieu, la hauteur PM serait en outre sensible aux variations de débit de la Loire. La marée à Saint Nazaire n'étant pas perturbée par les ondes de petit fond, nous pouvons par ailleurs estimer, au vu des écarts types, que l'analyse harmonique de l'onde marée jusqu'au Pellerin a été réalisée correctement.

P.M.	Saint-Nazaire	Donges	Cordemais	Le Pellerin	Nantes
Moyenne (cm)	- 1	+1	+1	+1	+2
Ecart type (cm)	± 13	± 16	± 15	± 14	± 22

Tableau 1: écarts des pleines mers entre la prédiction et l'observation pour 1985

. Etude comparative des basses mers

Le tableau 2 représente l'ensemble des résultats statistiques pour les BM aux différents lieux. On remarque que, pour Cordemais, Le Pellerin et Nantes UB, les écarts entre l'observation et la prédiction ne sont pas acceptables. Ils ne peuvent satisfaire les services de navigation du PANSN pour des raisons de sécurité. L'écart maximum enregistré sur 1985 est de 0.8m à Nantes et 0.4m à Cordemais. De plus le traitement ultérieur de ces prédictions conduit à des aberrations dans l'estimation des régimes de courant au moment de la renverse.

B.M.	Saint-Nazaire	Donges	Cordemais	Le Pellerin	Nantes
Moyenne (cm)	+1	+1	+1	-1	-6
Ecart type (cm)	±12	±13	±21	±49	±46

Tableau 2: écarts des basses mers entre la prédiction et l'observation pour 1985

Ces résultats confirment la proposition émise précédemment à propos des PM. Nous observons une zone où l'écart type varie peu et dont la valeur est sensiblement égale à celle déterminée, entre Saint Nazaire et Le Pellerin, pour les PM. Cet écart type augmente de manière significative en amont de Cordemais, ce qui laisse supposer qu'il représente bien les variations de BM liées au débit de la Loire.

Au vu de ces résultats, il a été convenu de déterminer directement les hauteurs PM et BM de marée, sujettes à des perturbations liées au débit, et dont l'analyse harmonique ne peut rendre compte. Ces hauteurs corrigées sont déterminées en fonction des conditions de débit de la Loire, maîtrisées par les services du PANSN, et des hauteurs PM (BM) à Saint Nazaire, correctement estimées par l'analyse harmonique et éventuellement adaptées aux conditions de vent particulières. Par la suite, ces valeurs permettront de corriger, par simple homothétie, la reconstitution de l'onde marée établie à l'aide des constantes déterminées par l'analyse harmonique.

La relation entre les paramètres de vent et les surcotes de marée étant très mal maîtrisée pour l'instant, il ne sera pas fait explicitement état de ce paramètre. Par contre nous pouvons admettre que l'écart type de 14 cm représente une valeur moyenne de l'influence du vent et de la pression atmosphérique sur les hauteurs PM et BM de marée.

4. DETERMINATION DES HAUTEURS PM et BM

La méthode de détermination de ces hauteurs consiste à écrire que la hauteur PM (BM) de marée, en tout lieu situé entre Cordemais et Nantes, est fonction de :

. la hauteur PM (BM) à l'embouchure (Saint Nazaire), indépendante du débit fluvial.

. la hauteur en amont en un lieu hors de portée de l'onde marée (Montjean).

La hauteur PM (BM) à l'embouchure, est une hauteur observée tenant compte de l'effet du vent et de la pression atmosphérique. Graphiquement, la fonction "BM", dont les entrées sont les cotes BM à Saint Nazaire et le niveau à Montjean, décrit l'enveloppe des BM en tout lieu intermédiaire: figure 2. Le schéma de principe de la fonction "PM" est identique.

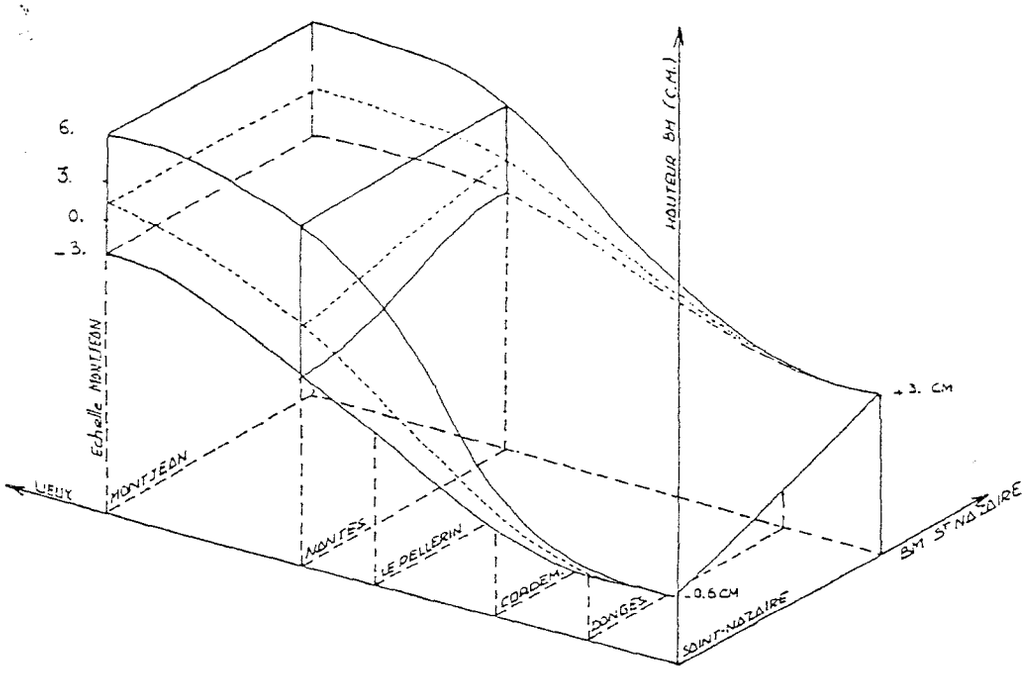


Fig. 2: Schéma de principe de la détermination des cotes BM

Le traitement de l'ensemble des données nécessaires à cette étude statistique comporte 2 étapes.

. La constitution de la base de données :

Toutes les mesures effectuées par le PANSN entre 1985 et 1990 ont été rassemblées dans différents fichiers dont chaque enregistrement correspond à une mesure de hauteur d'eau effectuée toutes les 5 minutes à Cordemais, au Pellerin et à Nantes. Chaque fichier a été traité de façon à détecter les lacunes et à éliminer les (rares) mesures aberrantes résultant d'un incident technique sur le marégraphe ou lors de la transmission. De ces fichiers, ont été extraites toutes les hauteurs PM et BM. Dans certains cas, afin de compléter les données, nous avons eu recours aux marégrammes sur support papier fournis directement par le marégraphe. La base de données actuelle, constituée de 4000 valeurs, est pauvre en hauteurs d'eau supérieures à 3,5 m à Montjean: figure 3. Son enrichissement est en cours avec des marégrammes de 1981, 1982 et 1983 riches en crues.

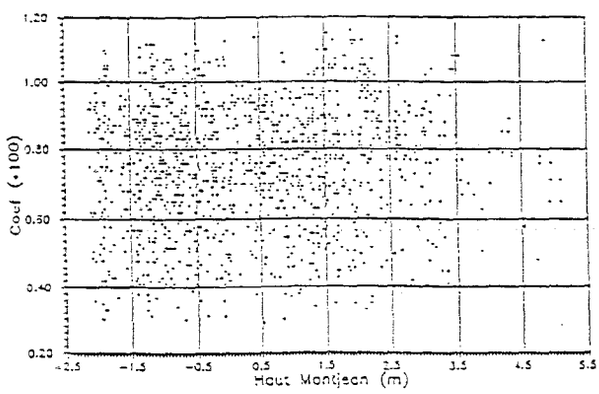


Fig. 3: Mesures de basse mer de revif disponibles dans la base de données (1985-1990)

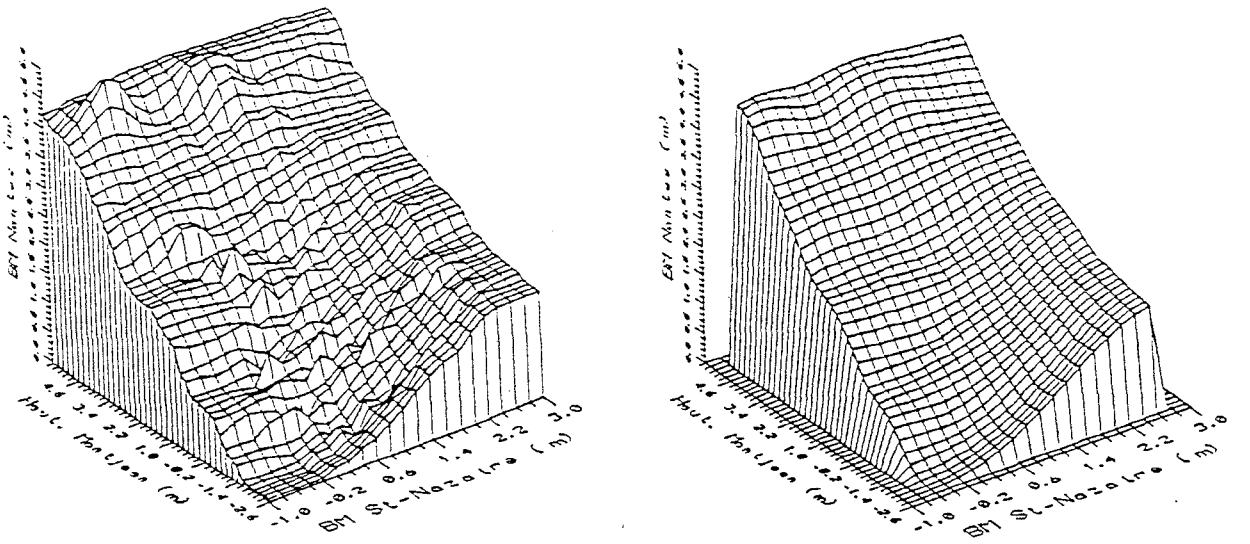
Ayant constaté que ces valeurs étaient également liées à la "condition" de la marée, nous avons séparé les hauteurs PM (BM) de revif et de déchet. Cette distinction se justifie par l'effet d'accumulation de masses d'eau en période de déchet pour les BM et en période de revif pour les PM. A chacune de ces hauteurs, il a été affecté :

. la hauteur PM(BM) correspondante à Saint Nazaire et le coefficient de marée
. la hauteur à Montjean représentative du débit fluvial,
. la pression atmosphérique, .la direction et la vitesse des vents à Saint Nazaire.

. Le dépouillement :

Avant de procéder à la détermination analytique de la fonction représentative des hauteurs PM (BM) aux lieux précédemment mentionnés, nous avons controlé graphiquement l'ensemble des résultats obtenus dans la première étape. Cette représentation a également pour but de mieux comprendre le phénomène physique de la marée à l'intérieur de la Loire. A partir des données brutes estuariennes, nous avons déterminé par interpolation les hauteurs PM (BM) à Nantes, au Pellerin et à Cordemais. en fonction des 2 paramètres liés aux contraintes océaniques et fluviales :

. la hauteur PM (BM) à Saint Nazaire suivant un pas de 0.20m,
. la hauteur d'eau à Montjean suivant un pas de 0.20m.



a: Représentation 3D"brute" b: Représentation 3D "lissée"

Fig. 4 : Hauteurs de basse mer de revif à Nantes en fonction de la marée à Saint-Nazaire et du débit fluvial

La figure 4.a représente, suivant une vue 3D, les valeurs "brutes" de BM rapportées aux noeuds du maillage régulier. Sachant que cette étude consiste à proposer des hauteurs PM (BM) "moyennes" en vue d'une amélioration de la prédiction marégraphique harmonique, nous avons procédé à un lissage de type matriciel de cette surface, respectant son allure générale. La figure 4.b représente la nouvelle vue 3D ainsi lissée.

Il convient de prendre des précautions quant au lissage de ces valeurs afin de respecter l'influence de chacun des paramètres. Un certain nombre de tests est en cours actuellement pour "optimiser" cette interpolation. Pour l'instant, la comparaison entre les valeurs interpolées et les observations a été réalisée

manuellement en ce qui conceme Nantes, lieu où les prédictions BM étaient les moins fiables. La moyenne arithmétique des écarts est de lcm, et l'écart-type de 14 cm. Nous retrouvons ainsi l'écart type déterminé dans l'étude comparative précédente et attribué aux perturbations d'origine atmosphérique: voir tableaux 1 et 2. C'est ce résultat qui nous permet de valider l'interpolation dont la représentation graphique est foumie à la figure 5.

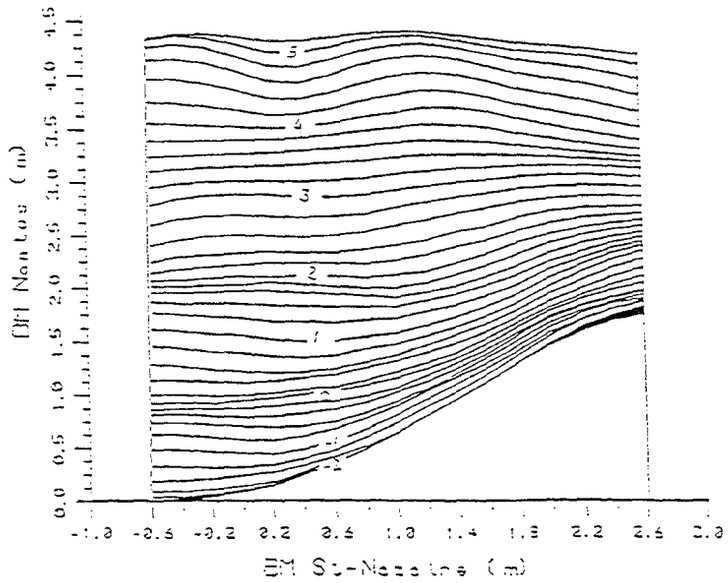


Figure 5: Abaque de prédiction des basses mers de revif à Nantes

Cette figure complète la première proposition au sujet du niveau de BM à Nantes. Au delà de 2,5m à Montjean, la hauteur BM est indépendante de la hauteur à Saint Nazaire. Pour des hauteurs inférieures à cette limite, l'influence de ce paramètre est graduelle. Elle devient prépondérante à l'étiage.

5. DEVELOPPEMENT ET CONCLUSION

Notre objectif était l'analyse d'une marée estuarienne, phénomène résultant de la superposition de contraintes océaniques et fluviales. L'essentiel du travail évoqué ici a consisté en la mise en oeuvre d'une base de données des PM (BM) en tout lieu situé entre Nantes et Saint Nazaire.

Ces données constituées à l'aide de mesures in situ effectuées entre 1985 et 1990, nous ont permis de mettre en évidence, pour chacun de ces lieux, les influences respectives des paramètres "océaniques" et "fluviaux. Leur traitement a conduit à la réalisation d'abaques fournissant les hauteurs PM (BM) que l'analyse harmonique ne pouvait prédire, notamment les hauteurs fortement influencées par les contraintes "fluviales".

L'étape suivante consistera à compléter les résultats de l'analyse harmonique avec les nouvelles hauteurs PM (BM) proposées dans ce document, afin de disposer d'une prédiction fiable en "continu". Il conviendra alors d'exploiter le programme de chenalage avec ces prédictions, pour contrôler la simulation des renverses de courant en tout lieu, pour tout coefficient de marée et pour toute valeur de débit.

REFERENCES BILIOGRAPHIQUES

(1) O.A. KHALIFA, RIOU Y., THOMAS P. "Etude de la propagation de la marée en Loire" Rapport ENSM/PANSN, 1990.

(2) PAUL J., "Propagation de la marée en Loire" Projet de fin d'études, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1986.

(3) RIOU Y., "Etude de la propagation de la marée en Loire : Phase I ; Mise au point d'un modèle hydraulique pour chenalage Nantes-Donges" Rapport ENSN/PANSN, 1987.

(4) RIOU Y., "Etude de la propagation de la marée en Loire : Phases 2 et 3 ; Prévision marégraphique" Rapport ENSM/PANSN, 1987.

(5) TEISSON Ch., "Etude statistique de surcote pour le site du Carnet", Rapport LNH, HE-42/84.13, EDF Chatou, 1984.

(6) TEISSON Ch., " Prise en compte de la tempête du 16 octobre 1987 dans l'étude statistique des surcotes au Carnet", Rapport LNH, HE-42/88.30, EDF Chatou, 1989.

REMERCIEMENTS

Cette étude a fait l'objet d'une convention entre l'IUT de Saint-Nazaire et le PANSN (Convention N°91/11 du 14/05/91). Nous tenons à remercier ici les responsables et le personnel du PANSN pour leur accueil, leur disponibilité et leur expérience de la Loire qu'ils ont bien voulu nous faire partager.