

ACTES DU COLLOQUE PLURIDISCIPLINAIRE FRANCO-JAPONAIS

OCEANOGRAPHIE

LES AMENAGEMENTS COTIERS ET LA GESTION DU LITTORAL
MARSEILLE 16-21 SEPTEMBRE 1985

Fascicule 1

Océanographie physique et dynamique sédimentaire

Editeurs scientifiques :
Hubert J. CECCALDI
Gisèle CHAMPALBERT

第一回日仏海洋学会

沿岸域利用と管理

於 マルセイユ市 1985年 9月16日-21日

テーマ1 海洋物理及び推積力学



Société franco-japonaise d'Océanographie

TABLE DES MATIERES

Fascicule 1 : Océanographie physique et dynamique sédimentaire

Hubert J. CECCALDI - Avant propos	1
Jean-Marie PERES - Allocution d'ouverture du Colloque.....	11
Masafumi ICHIKAWA, Hiroshi YOSHIOKA et Hideaki KUNISHI - Sur le spectre des courants périodiques littoraux d'une gamme de fréquence très large. Long-term observation of currents in a coastal area.....	15
Masahide TOMINAGA - Sur la théorie d'engendrement des ondes longues sur le plateau continental par déviations de la pression atmosphérique. Influences of shelf wave with inertial period generated by circular air pressure system upon coastal sea.....	23
Jean-Claude SALOMON - Modèles mathématiques de courantologie en zone littorale. Mathematical models of circulation for the littoral zone.....	35
François OTTMANN - Impacts des opérations de remblaiements dans l'aménagement littoral. Impact of filling operations in seashore arrangement.....	45
Pascal GALICHON - Analyse des facteurs d'évolution de la Pointe d'Arçay : quantification de sa progression. Pointe d'Arçay evolution factors analysis : quantification of its growth.....	53
Jean-Paul BARUSSEAU - Phénomènes d'évolution de côtes en Afrique de l'Ouest (Sénégal et Mauritanie). Processus de sédimentation et d'érosion sur le littoral. Sedimentation and erosion on West African coast : examples in Mauritania and Senegal.....	63
Jean-Louis JOUANNEAU, Jérôme GRANBOULAN, Alain FERAI, Michel VILLEROT - Etude des paramètres sédimentologiques de la crème de vase dans le système fluvio-estuarien de la Gironde. Study of the sedimentological properties of fluid mud in the fluvio-estuarine system of the Gironde estuary.....	75
Alain GROVEL - Génie côtier et hydrodynamique. Coastal engineering and hydrodynamics.....	91

• André GUILCHER - Les problèmes de gestion du littoral dans le Finistère (Ouest de la Bretagne). Problems in coastal management in Finistère (Western Brittany)...	101
• Louis-Robert LAFOND - Une dynamique sédimentaire complexe : le cas de la côte Ouest du Cotentin . Complex Coastal dynamics : the example of the Western Coast of the Cotentin Peninsula.....	109
• Toyoki KAWABATA, Tsunetaka HASEGAWA, Kousou KAYATA - Techniques de développement des herbiers de phanérogames marines (<i>Zostera marina</i>) dans les eaux littorales japonaises. Ecology of seagrass (<i>Zostera marina</i>) and transplanting experiments.....	121
• Alexandre MEINESZ, Charles-François BOUDOURESQUE, Alain JEUDY DE GRISSAC, Jean-Pierre LAMARE, Jean-Robert LEFEVRE, André MANCHE - Aménagement et préservation du milieu marin littoral en région Provence-Alpes-Côte d'Azur : bilan et perspectives. Planning, management and protection of Provence-A pes-Côte d'Azur coastal areas : present state and prospects.....	133
• Alain JEUDY DE GRISSAC et Charles-François BOUDOURESQUE - Rôles des herbiers de phanérogames marines dans les mouvements des sédiments côtiers : les herbiers à <i>Posidonia oceanica</i> . Effects of seagrass meadows on coastal movement of sediments : mediterranean <i>Posidonia oceanica</i> beds.....	143
• Yves DESPEYROUX - Hydrodynamique sédimentaire en baie de Canche. Hydrodynamical study of the Canche estuary.....	153
• Juichi KATOH - Les brise-lames flottants. Floating breakwaters.....	161
• POSTERS- RESUMES:	
• Marie-Christine BERTRANDY, Pierre LABORDE, Jean-Marie PERES Jean-Claude ROMANO - Une "eau rouge" à <i>Noctiluca miliaris</i> entre l'embouchure du Rhône et Marseille, en juin 1984. A red tide of <i>Noctiluca miliaris</i> between the mouth of the Rhône and Marseilles, in June 1984.....	183
• Pierre-Marie LE HUCHER, Gabriel CHABERT D'HIERES, Michel CREPON, Christian LE PROVOST, Claude MILLOT - Projet de modélisation hydrodynamique du Bassin occidental de la Méditerranée. Project for marine modelling in occidental basin of Mediterranean sea.....	185

COOPERATIONS SCIENTIFIQUES FRANCO-JAPONAISES

Nécessité de coopérations scientifiques entre la France et le Japon

Dans de nombreux domaines scientifiques, la France et le Japon ont des activités complémentaires : en informatique, en techniques spatiales, en aéronautique, en biotechnologies, en techniques de transports, en Sciences humaines, en Sciences économiques, et dans beaucoup d'autres domaines encore; ces complémentarités sont évidentes. Elles apparaissent de plus en plus nécessaires aux deux pays qui ne sont ni l'un ni l'autre des Supers-Grands, et qui aspirent l'un et l'autre à une indépendance dans leurs choix de société et dans leurs destins.

Mais l'éloignement et la barrière des langues, pour ne citer que ces deux obstacles majeurs, rendent les coopérations de tous ordres difficiles entre les deux pays.

Aussi faut-il, avec patience, continuité, voire acharnement, rechercher dans tous les secteurs actifs des Sciences - et il faut prendre le mot Sciences dans son acception la plus large - les zones de complémentarité et les points de convergence, puis s'appuyer sur les seconds pour faire fructifier les premiers.

Cet effort de fond doit être réalisé de la façon la plus large possible, dans tous les domaines des sciences mathématiques, physiques, chimiques, naturelles, biologiques, humaines, économiques, sociales, religieuses, etc, sans oublier les coopérations purement techniques car les progrès techniques sous-tendent, et souvent précèdent les découvertes scientifiques fondamentales.

Afin de participer à cet effort dans notre pays, le Ministère des Affaires étrangères organise tous les quatre ans des Colloques franco-japonais dans diverses disciplines comme la Médecine, la Physique du solide, la Biologie, la Géographie, les Sciences sociales, les Etudes orientales, par exemple. Chacun d'eux s'appuie sur l'existence, les activités et le dynamisme des sociétés scientifiques franco-japonaises et en dernière analyse, sur la volonté des hommes, collègues et amis qui les constituent dans chacun des deux pays.

Le désir d'oeuvrer ensemble, comme l'amitié, ne se décrète pas, et il est réaliste de s'appuyer sur les relations personnelles déjà établies entre chercheurs.

Coopérations franco-japonaise en Océanographie

Pour la première fois, en 1985, l'Océanographie a été retenue comme discipline devant faire l'objet de réunions scientifiques franco-japonaises spécialisées. En effet, dans le domaine de l'Océanographie, les coopérations établies entre le Japon et la France vont en se renforçant d'année en année. Les plongées des bathyscaphes français FNRS III en 1958, puis avec l'Archimède en 1967, ont été suivies par des échanges personnels ponctuels durant des années, dans divers domaines, en particulier en aquaculture. Récemment, l'étude des fosses profondes japonaises a été entreprise dans le cadre de l'opération KAIKO grâce aux engins de plongée profonde comme le Nautile. Ils ont eu au Japon un très grand retentissement.

Les thèmes pour lesquels des complémentarités scientifiques évidentes existent entre les deux pays sont nombreux : plongée profonde, pêche, récolte et utilisation du krill, technologie marine et sous-marine, conchyliculture et aquaculture, ouvrages en mer, énergie thermique des mers, géologie, tectonique des plaques et télédétection pour ne citer que les plus importants.

De façon concrète, les échanges et les programmes réalisés ou à développer trouvent des cadres formels différents : rencontres officielles entre l'Agence des Pêches et l'Institut Français de Recherches pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER), invitations de chercheurs français par la Japanese Society for the Promotion of Science (JSPS), par le Ministère de l'Education nationale - ou Mombusho - au Japon, échange de jeunes chercheurs et de scientifiques de haut niveau dans les programmes JSPS - Centre National de la recherche scientifique (CNRS), relations entre Universités ou entre les deux Sociétés franco-japonaises d'Océanographie. Une bonne harmonisation de ces échanges est favorisée par les activités scientifiques et les capacités d'accueil de la Maison franco-japonaise de Tokyo.

Premier Colloque scientifique franco-japonais en Océanographie

L'Océanographie ayant été intégrée aux disciplines des Colloques scientifiques pluridisciplinaires franco-japonais de 1985, des réunions préparatoires se sont tenues au Ministère des Affaires étrangères, à la Direction générale de la Coopération scientifique et technique, sous la direction de M. P. GUILLEMIN.

Il a été convenu que l'harmonisation générale des différentes réunions de ce quatrième Colloque, par grandes disciplines, serait faite par M. M. DUPUIS, ancien Conseiller scientifique de l'Ambassade de France à Tokyo.

Le thème gestion du littoral et aménagement côtiers a été proposé dès le départ, et ce choix a été confirmé après une large consultation des spécialistes français des diverses disciplines des Sciences de la Mer. Ainsi, à côté des opérations scientifiques bipartites déjà largement entamées et en cours d'évolution, avec le succès que l'on sait pour Kaiko, le thème consacré aux aménagements côtiers trouvait ainsi une place très complémentaire des programmes établis.

A l'issue de réunions tenues en Juin 1984 au Ministère de l'Industrie et de la Recherche, et après plusieurs contacts aussi bien en France qu'au Japon, avec nos collègues français et japonais spécialistes de diverses disciplines se rapportant aux aménagements côtiers, un programme équilibré a été établi, dont la mise en place et la coordination m'ont été confiées. L'objectif du colloque est de comparer les situations françaises et japonaises, ainsi que les solutions qui ont été trouvées dans chacun de ces deux pays, pour promouvoir les aménagements et améliorer la gestion des zones côtières.

SOCIÉTÉS FRANCO-JAPONAISES D'OcéANOGRAPHIE

L'intérêt des relations avec la France dans le domaine de l'Océanographie s'est concrétisé depuis une quinzaine d'années par la création au Japon d'une Société franco-japonaise d'Océanographie, de statut spécifiquement japonais. Elle a pris l'initiative de fonder le journal scientifique La Mer, ouvert en particulier aux chercheurs japonais et français, et acceptant des publications scientifiques publiées en japonais, en français, et en anglais.

Suivant le même processus, l'intérêt des relations avec le Japon s'est à son tour concrétisé en France par la création d'une Société franco-japonaise d'Océanographie de statut français, qui est naturellement la partenaire privilégiée de son homologue japonaise.

Les échanges établis entre ces deux Sociétés sont fructueux, continus et très utiles, chacune tenant l'autre informée de ses activités. Par ailleurs chacun des membres français reçoit personnellement des informations spéciales et exclusives sous forme de courts bulletins d'information concernant les nouveautés scientifiques et techniques caractéristiques de l'Océanographie japonaise ou reçoivent des conseils sur leurs voyages à entreprendre, ou encore des indications sur le mode de vie au Japon, sur les habitudes des laboratoires et sur les règles non écrites à observer.

Comme pour d'autres Sociétés franco-japonaises créées dans les domaines littéraires, économiques, juridiques, scientifiques ou techniques, c'est à la Société franco-japonaise d'Océanographie qu'est revenue la responsabilité d'organiser le premier Colloque franco-japonais d'Océanographie. Au Japon, le Président, le Professeur M. TOMINAGA, le Secrétaire Général, le Professeur K. TAKANO, et K. TAKAGI nous ont accordé tout leur appui, et nous les en remercions vivement.

ORGANISATION DU COLLOQUE

Patronage, intérêt et appui des Ministères et des grands organismes de recherche

Plusieurs Ministères ont montré un vif intérêt pour le Colloque ainsi que pour les contacts directs qui ont été établis à cette occasion. C'est ainsi que le Colloque a bénéficié du haut patronage officiel et de l'aide des Ministères du Plan et Aménagement du territoire, des Relations extérieures, de l'Agriculture, du Redéploiement industriel et Commerce extérieur, de l'Education nationale, de l'Environnement, de la Recherche et de la Technologie, et des Secrétariats d'Etat auprès du Ministre de l'Education nationale, chargé des Universités, et auprès du Ministre des Transports, chargé de la Mer. Une mention particulière doit être faite au Ministère des Relations extérieures, et à MM. P. GUILLEMIN et J.-F. STUYCK-TAILLANDIER.

D'autre part, le Président du Conseil régional Provence Alpes Côte d'Azur, et Monsieur le Président du CEPRALMAR, Président du groupe Mer à l'Assemblée nationale, ont également apporté leur haut patronage. Nous leur exprimons ici notre vive reconnaissance pour le soutien moral, matériel et financier dont il nous ont fait bénéficier, en particulier grâce à l'Office régional de la mer et au CEPRALMAR.

Par ailleurs, huit personnalités scientifiques membres de l'Académie des Sciences ont bien voulu nous accorder leur soutien moral. Ce sont MM. Maurice FONTAINE, ancien Président de l'Académie des Sciences, Constantin VAGO, Jean DORST, Henri LACOMBE, Jean-Marie PERES, François GROS, et Ivan ASSENMACHER. Nous leur en sommes très reconnaissants.

M. le Professeur M. FONTAINE nous a fait l'honneur d'assister personnellement au Colloque, et M. le Professeur J.-M. PERES a prononcé l'allocation d'ouverture du Colloque ; qu'ils en soient tous deux sincèrement et chaleureusement remerciés.

De plus, tant au plan régional qu'à celui du grand Marseille, les personnalités directement concernées par le développement des sciences, des techniques et de l'économie ont toutes accordé leur appui moral au Colloque, ce qui nous a été d'un grand réconfort, et leur soutien matériel, ce qui a définitivement assuré son succès.

Une mention toute particulière doit être faite à la Chambre de Commerce et d'Industrie de Marseille, et en particulier à son Président, M. H. MERCIER, et à son Directeur général, M. H. O'BYRNE, dont les encouragements et l'appui ont été décisifs ; qu'ils reçoivent ici l'expression de notre gratitude.

M. le Professeur F. DOUMENGE, dont la grande connaissance du Japon est inappréciable, nous a fait bénéficier de ses conseils et de ses encouragements ; qu'il en soit ici bien vivement remercié.

Le Centre d'Océanologie de Marseille, (UA CNRS 41), dirigé par M. le Professeur F. BLANC, a assuré une grande partie de la logistique de préparation du colloque ; que les membres du Comité de direction de ce centre soient ici cordialement remerciés.

Enfin, le Colloque a bénéficié de l'aide du CNRS, PIRO et PIREN, de l'Université d'Aix Marseille II, de l'IFREMER, de la Municipalité de Marseille, de l'Association Naturalia et Biologia, de l'Ecole Pratique des Hautes Etudes, de l'Office du Tourisme de Marseille, de la Chambre régionale de Commerce et d'Industrie, de l'Association Marseille-Congrès, auxquels nous adressons nos sincères remerciements.

Organisation au Japon

Au Japon, la préparation du Colloque doit son succès aux efforts du Président de la Société franco-japonaise d'Océanographie, le Président, le Professeur M. TOMINAGA, ainsi qu'à son Secrétaire général, le Professeur K. TAKANO. Une mention particulière doit être faite pour le Professeur R. HIRANO, qui a pris de nombreux contacts personnels avec les meilleurs spécialistes japonais dans chacun des thèmes du Colloque. Nous lui devons une bonne part de la qualité et de la représentativité de la délégation japonaise ; ses efforts méritent des remerciements très chaleureux.

M. F. SIMARD, Vice-président de la Société franco-japonaise française, en adjoignant de longue durée au Japon, a pris de nombreux contacts, tant auprès de scientifiques qu'auprès de sociétés privées japonaises. Sa très bonne connaissance des problèmes d'aménagements côtiers, en France et surtout au Japon ont fait de lui une pièce maîtresse de l'organisation du Colloque. M.C. DELMAS et Y. HENOCQUE, de la Mission scientifique de l'Ambassade de France à Tokyo nous

ont fait profiter de leur expérience scientifique et de leur connaissance du monde scientifique japonais. De plus, M. Y. HENOCQUE a pris de nombreux contacts personnels qui se sont avérés indispensables pour une bonne coordination du Colloque, côté Japon ; qu'ils en soient vivement remerciés.

M. le Professeur J. KATOH et M. J.-M. THIERRY nous ont fait bénéficier de leurs connaissances et de leur expérience des nouvelles méthodes d'aménagements côtiers japonais. Nous leur exprimons ici toute notre reconnaissance.

Enfin, M. A. BERQUE, Directeur de la Maison franco-japonaise de Tokyo nous a fait de très intéressantes suggestions et nous a prodigué ses encouragements ; qu'il en soit vivement remercié ici.

Traduction simultanée

Une mention particulière doit être décernée à l'équipe des traducteurs, placée sous la responsabilité de Melle A. NISHIKAWA, et comprenant M. H. YAGI, M. T. MIMURA, M. D. BAILLY, M. F. SIMARD, M. J.-M. THIERRY, M. LIET CHIM. Toute cette équipe de jeunes océanographes japonais parlant français, et de jeunes océanographes français parlant japonais ont effectué des traductions simultanées d'excellente qualité durant les conférences, après une longue préparation préalable de chacune d'elles. De plus, ils ont participé très activement aux tables rondes, pour servir d'intermédiaires entre spécialistes homologues. Ainsi avons nous pu tenir l'ensemble du colloque en n'utilisant que les deux seules langues française et japonaise, évitant ainsi les déformations et les malentendus inhérents à l'utilisation d'une langue étrangère intermédiaire que seuls de rares acteurs présents dominaient réellement.

NOS INVITES JAPONAIS

La délégation japonaise était dirigée par le Professeur T. OKAICHI, Doyen de la Faculté d'Agriculture de l'Université de Kagawa, spécialiste de Biochimie marine et d'eaux rouges toxiques.

Par ordre alphabétique, les membres de la délégation étaient :

- . M. T. AKIMICHI, du Musée national d'Ethnologie à Osaka,
- . M. Y. FUKUYO, de l'Université de Tokyo,
- . le Pr K. HIRAYAMA, de l'Université des Pêches de Nagasaki,
- . M. M. ICHIKAWA, de la Météorologie nationale à Tokyo,
- . M. T. ICHIMURA, de la Société de Pêcheries Taiyo S.A. à Tokyo,
- . le Pr S. IWAKIRI, de l'Université de Kagoshima,
- . M. M. KAKIMOTO, de la Division d'Agriculture, des forêts et de la pêche de la Préfecture de Niigata,
- . le Pr J. KATOH, de l'Université des Pêches de Tokyo,
- . M. T. KAWABATA, de la Compagnie d'électricité Chugoku à Hiroshima,
- . le Pr M. KAYAMA, de l'Université de Hiroshima,
- . M. H. KINOSHITA, de l'Institut de recherches sur l'Ecologie marine à Niigata
- . M. S. KOBORI, Directeur de la Société Oceanautes S.A. à Tokyo,
- . le Pr S. KOSUGE, du Département d'Ingénierie civile océanique à Shimizu,
- . le Dr T. MIMURA, de l'Université de Tokyo, et du Centre d'Océanologie de

- Marseille,
- . le Dr S. NAGASAWA, de l'Ocean Research Institute de Tokyo,
 - . le Pr M. NAKAGAWA, de l'Université de Hiroshima,
 - . le Pr T. NEMOTO, de l'Ocean Research Institute de Tokyo,
 - . M. H. OKAMOTO, de la Société de télédétection Pasco S.A. à Tokyo,
 - . le Dr M. SEKI, de l'Institut des Sciences biologiques de l'Université de Tsukuba,
 - . le Pr S. OKUSA, de la Faculté des Sciences et de Technologie marines de l'Université de Tokai,
 - . le Dr H. YAGI, de l'Université des Pêches de Tokyo, et du Centre d'Océanologie de Marseille,
 - . M. T. YAMANE, de l'Association pour la promotion et le développement des pêches côtières de Tokyo,
 - . M. T. YOSHIMURA, de la Division des analyses chimiques de l'Agence maritime de sécurité à Yokohama.

DEROULEMENT DU COLLOQUE

Inauguration

Le Colloque a été officiellement inauguré le lundi 16 Septembre 1986 à 09h30 au CMC1, 2, rue Henri Barbusse à Marseille. La séance inaugurale a été coprésidée par M. J. ROUDIER, Chef de Cabinet de M. G. LENGAGNE, Secrétaire d'Etat à la Mer et par M. le Professeur T. OKAICHI, Chef de la Délégation japonaise, Doyen de la Faculté d'Agriculture de l'Université de Kagawa. Les personnalités qui ont également présidé à l'inauguration officielle ont été M. le Pr J.-M. PERES, de l'Institut, M. B. DECOMPS, Directeur de la Recherche au Ministère de l'Education nationale, M. C. LOMBOIS, Recteur de l'Académie d'Aix-Marseille, M. R. PORTET, Président de la 3ème Section de l'Ecole Pratique des Hautes Etudes, M. M. PEPRATX, Président de l'Office régional de la Mer, M. J.-P. NIGOSSIAN, Délégué régional du Ministère de la Recherche et de la Technologie.

Trois cent vingt spécialistes français ont été nommément identifiés et recensés et ont participé au Colloque; chacun d'eux a disposé d'une importante documentation d'origine française et d'origine japonaise.

Thèmes développés au cours du Colloque

Dans le cadre du thème Océanographie physique et dynamique sédimentaire, les principaux sujets suivants sont abordés : théorie d'engendrement des ondes longues, étude des courants périodiques littoraux, modèles mathématiques de courantologie, impact des opérations de remblaiement, processus de sédimentation et d'érosion en zone littorale, caractéristiques physico-

chimiques des sédiments, techniques de développement et rôle sédimentaire des herbiers de phanérogames et étude des brises-lames flottants. Les responsables de ce thème ont été le Pr S. OKUSA, le Dr M. ICHIKAWA, le Pr A. GUILCHER et le Pr L.-R. LAFOND.

Le second thème principal concerne les études biologiques, microbiologiques, écologiques, physiochimiques, écotoxicologiques et économiques des eaux colorées toxiques, ou eaux décolorées, ou encore red tides. Les responsables de ce thème ont été le Pr T. OKAICHI, le Dr C. ALZIEU et le Dr P. LASSUS.

Le troisième thème concerne le rôle de la télédétection par satellite dans les aménagements côtiers. Les principaux aspects abordés sont : l'importance de la télédétection dans la cartographie des zones littorales, dans l'étude du phytobenthos et dans l'étude de la pollution des eaux côtières. Les responsables de ce thème ont été le Dr H. OKAMOTO, le Dr R. CHESSELET.

L'étude des microorganismes et de la microbiologie des eaux côtières constitue le quatrième thème abordé. Les aspects écologiques, biochimiques et toxicologiques constituent l'essentiel des communications. Les responsables de ce thème ont été le Dr T. NEMOTO et le Dr A. BIANCHI.

Le cinquième thème regroupe les études des caractères biologiques des eaux côtières. Les principales communications et discussions concernent le devenir de la matière organique en milieu marin, l'évaluation de la biomasse et l'influence des rejets industriels urbains et des effluents thermiques sur la zone littorale et sur l'écologie et la physiologie des organismes marins. Les responsables de ce thème ont été le Dr M. YOSHIMURA, le Pr M. KAYAMA, le Dr M. LEVEAU et le Pr N. VICENTE.

L'étude des récifs artificiels est abordée dans le sixième thème avec comme principaux sujets les modèles naturels, la structure des peuplements, l'importance économique, l'évaluation des impacts des aménagements récifaux et ses perspectives de développement. Les responsables de ce thème ont été le Dr T. YAMANE et le Dr D. BELLAN-SANTINI.

Le thème exploitation des ressources concerne la mise en valeur des pêches et des cultures marines dans la bande littorale, les systèmes de gestion, l'estimation des stocks, les programmes de repeuplement, et les caractéristiques bioéconomiques ainsi que les stratégies d'aménagement de l'espace littoral. Les responsables de ce thème ont été le Dr J. AKIMICHI, le Dr J. IWAKIRI, le Dr DOUMENGE et le Dr J.-P. TROADEC.

La dernière journée du Colloque constitue le troisième Symposium franco-japonais sur l'aquaculture, le premier ayant eu lieu à Montpellier en 1983 et le second à Sendai en 1984. Les principaux sujets abordés sont l'étude de la physiologie, de la nutrition, de l'excrétion et du métabolisme des poissons et des crustacés et des animaux de très petite taille que l'on élève afin qu'ils servent de proies vivantes. Les responsables de ce thème ont été le Pr K. HIRAYAMA, le Pr H. NAKAGAWA, le Pr M. FONTAINE et le Pr R. BILLARD.

Nous tenons à remercier chaleureusement toutes ces personnalités scientifiques de premier plan, qui ont chacune structuré et organisé les séances dont elles avaient la responsabilité. Leur expérience, leur savoir-faire et leur compétence a largement contribué au succès du Colloque et à sa haute tenue scientifique.

AUTOUR DU COLLOQUE SCIENTIFIQUE

Présentations documentaires

Pendant la durée du Colloque, un effort particulier a été réalisé pour les présentations de films, de diaporamas, de documents vidéo, de photographies et de posters. Ces présentations ont été ouvertes à dessein à un public plus large que celui des spécialistes participant au Colloque, et en particulier aux étudiants en Océanographie et en Biologie marine. Une centaine de tableaux scientifiques ont ainsi été installés, dont un nombre important provenait du Japon. Dix films japonais ont également été projetés dans une salle spécialement équipée, située à proximité immédiate des salles de conférences.

Visites scientifiques

Plusieurs visites scientifiques se sont déroulées dans le cadre de ce Colloque, en particulier :

- la visite des nouvelles plages artificielles de Marseille, sous la direction de deux ingénieurs spécialisés, M. BARTHELEMY et M. CONTINO,
- la visite de la société d'intervention sous-marine COMEX, grâce à l'amabilité de M. H. DELAUZE, et sous la conduite de Melle JATTEAU,
- la visite de l'Institut national de Plongée professionnelle INPP, grâce à l'amabilité de son Directeur M. P. GAVARRY, de M. M. AVON et de M. A. CAPPETTI,
- la visite des installations portuaires de Fos-sur-mer, sous la direction de M. le Commandant ODY,
- la visite des installations conchylicoles de l'Etang de Thau grâce à M. J. Lacombe, Président du CEPALMAR et de M. R. RAIMBAULT de l'IFREMER,
- la visite de la Station de lagunage de Meze.

Quelques autres visites spécialisées ont eu lieu dans divers laboratoires de recherche.

Réceptions

Plusieurs réceptions ont eu lieu pendant le Colloque, les unes d'évidente courtoisie et d'hospitalité, les autres motivées par l'intérêt qui s'est attaché à mettre en contact les spécialistes japonais invités avec des spécialistes français.

Il nous est particulièrement agréable de remercier, à cette occasion :

- la Municipalité de Marseille a invité les participants du Colloque dans les salons d'honneur de l'Hôtel de Ville et en particulier M. J.-V. CORDONNIER et Mme M.-P. LOUISET,
- le Consul général du Japon, M. Y. IMAGAWA, qui a reçu la délégation japonaise au cours d'un dîner,
- la Chambre de Commerce et d'Industrie de Marseille, qui a organisé une

réception dans les salons d'honneur du palais de la Bourse, et en particulier M. M.-P. MARION et J. AUBERLINDER qui ont personnellement reçu les participants du Colloque,

- la Chambre régionale de Commerce et d'Industrie, qui a organisé un très intéressant dîner-débat dans les salons du CMCI, et en particulier M. J. DEVERGNE et M. B. DEYDIER,

- l'Université d'Aix-Marseille II, qui a organisé une remise de diplômes de l'Université à chacun des membres de la délégation japonaise ainsi qu'une réception, et en particulier M. le Professeur G. SERRATRICE, Président de l'Université et M. J. FIOL, Secrétaire général de l'Université,

- l'Institut national de Plongée professionnelle, qui a organisé un apéritif d'accueil lors de la visite de ses installations, et en particulier MM. P. GAVARRY, M. AVON et A. CAPPETTI.

Exposition au Musée d'Histoire de Marseille

En liaison étroite avec ce Colloque et en coopération avec la Société franco-japonaise d'Océanographie, le Musée d'Histoire de la Ville de Marseille a organisé une excellente exposition intitulée :

MARSEILLE : EVOLUTION ET AMENAGEMENT DU SITE LITTORAL

Cette exposition a eu pour but de montrer les modifications des aménagements côtiers du littoral marseillais au cours de l'évolution du site géologique et géographique dans lequel la ville s'est développée.

L'amabilité et la grande compétence de Mme M. MOREL, Conservateur, de M. C. BADET et de Melle M. AUBERT ont permis d'exposer à cette occasion de magnifiques et très anciennes gravures et lithographies, constituant ainsi une exposition passionnante, qui a eu un grand succès auprès du public marseillais.

L'exposition a été inaugurée le lundi 16 Septembre à 19.00 h par M. G. DEFFERRE, Maire de la Ville de Marseille, et plusieurs membres de la Municipalité.

Impact sur le grand public

Plusieurs journaux nationaux, régionaux et locaux ont rendu compte des activités du Colloque, de son intérêt et de ses prolongements. Une excellente émission de télévision lui a été consacrée sur FR3, ainsi que des informations radiophoniques, sur les chaînes officielles et plusieurs chaînes locales.

PUBLICATION DES ACTES DU COLLOQUE D'OCEANOGRAPHIE

Chacun de ces thèmes fait l'objet de la publication d'un fascicule séparé. Ce choix a été décidé afin de ménager l'avenir et de préserver l'intérêt de chacune des disciplines océanographiques considérées. S'il s'avérait que l'une

ou plusieurs de ces disciplines montre une forte croissance dans un avenir à court ou à plus long terme, ce qui est extrêmement souhaitable, les chercheurs des deux pays trouveraient alors dans le contenu de ces premiers fascicules et dans leur présentation, un cadre tout à fait adéquat pour poursuivre et développer des échanges déjà établis, et des contacts déjà engagés.

C'est déjà le cas pour le domaine de l'aquaculture, pour lequel des programmes coordonnés ont été réalisés, et des échanges de plus de vingt chercheurs ont déjà eu lieu pour le développement de recherches ayant donné lieu à soutenances de thèses et à publications scientifiques.

Les textes des communications fournis par les auteurs suivant les instructions reprises au préalable ont été reproduits tels quels. Nous avons tenu à faire paraître aussi les résumés des posters, chaque fois que leurs auteurs l'ont souhaité et nous les ont fait parvenir. Ces résumés sont regroupés à la fin de chacun des fascicules. Melle G. CHAMPALBERT a assuré dans tout ce domaine une tâche importante, et la mise en forme des textes a été réalisée par Mme M.-C. GUIHOU, Mme M. GROSJEAN et Mme F. CONSTANS. Qu'elles trouvent ici l'expression de toute notre reconnaissance pour le travail accompli.

La publication a bénéficié de l'aide matérielle de la Chambre de Commerce et d'Industrie de Marseille. Que M. H. MERCIER et M. H. D'BYRNE en soient une nouvelle fois remerciés avec chaleur. Sans leurs efforts soutenus, la publication de ces fascicules n'aurait sans doute pas vu le jour. De plus, les efforts soutenus et amicaux de Mme L. MICHEL, responsable du service de la reprographie et de ses collaborateurs, méritent également nos biens sincères remerciements.

PERSPECTIVES

Le but du Colloque n'était pas de se limiter à une rencontre académique, mais de bâtir des programmes de coopérations scientifiques et techniques à développer dans les années à venir, en privilégiant des contacts personnels de qualité entre scientifiques homologues. Il a parfaitement atteint son but, grâce aux réunions de travail par thèmes et à la faveur des rencontres amicales qui se sont déroulées pendant toute la durée de cette semaine.

Le prochain Colloque interdisciplinaire franco-japonais, homologue et successeur de celui-ci, organisé par le Ministère des Affaires étrangères et nos collègues japonais aura lieu en 1988 au Japon.

Le développement des aménagements côtiers, tant au Japon qu'en France, se fera à moyen et à long terme, à une échelle que de nombreux spécialistes n'hésitent pas à qualifier de fantastique. Nul doute qu'alors les échanges établis à Marseille en 1985 constitueront le point de départ de développements fructueux.

Hubert J. CECCALDI
Directeur de Laboratoire
Ecole Pratique des Hautes Etudes
Président de la
Société Franco-Japonaise d'Océanographie
Coordinateur général du
Colloque Franco-Japonais d'Océanographie

ALLOCUTION D'OUVERTURE DU COLLOQUE

PAR M. LE PROFESSEUR JEAN-MARIE PERES
DE L'INSTITUT

CENTRE D'OcéANOLOGIE DE MARSEILLE,
STATION MARINE D'ENDOUME, RUE DE LA BATTERIE DES LIONS, 13007 MARSEILLE

C'est avec un grand plaisir que je participe aujourd'hui à l'ouverture du IV^e Colloque pluridisciplinaire franco-japonais, organisé par Monsieur Hubert CECCALDI, dans cette ville de Marseille, où j'ai préparé ma thèse d'Etat sur un sujet de biologie marine, avant d'y revenir comme Professeur et Directeur de la Station Marine d'Endoume de 1947 à 1982. Maintenant, à la retraite depuis octobre 1984, j'ai décidé d'y finir mes jours en continuant à travailler sur des problèmes d'océanologie qui m'ont toujours passionné.

C'est vous dire combien le vieux marseillais d'adoption que je suis sait gré à M. CECCALDI de m'avoir convié à cette inauguration. Malheureusement, des engagements antérieurs ne me permettent pas de participer aux discussions, ce que je regrette profondément. M. CECCALDI est aussi, d'ailleurs, un marseillais d'adoption qui, replié d'Algérie en 1962 au moment où ce pays a accédé à l'indépendance, a gravi dans mon service les échelons de la hiérarchie universitaire avant de devenir directeur à l'E.P.H.E. Et c'est à Marseille qu'il a trouvé, dans la physiologie, l'écophysiologie et la biochimie des invertébrés marins et, plus tard, l'aquaculture, une voie de recherche qu'il développe avec ses nombreux élèves. Je saisis l'occasion de ce colloque pour lui dire mon estime et mon affectueuse amitié.

Je suis heureux aussi de constater que les plus hautes autorités de la Région Provence-Alpes-Côte-d'Azur et de la Ville de Marseille ont encouragé la tenue de ce colloque en témoignage de l'intérêt qu'elles portent aux échanges - de toutes sortes - entre le Japon et la France et plus spécialement Marseille.

Car ces échanges ont bien besoin d'être intensifiés car, en définitive, le français moyen connaît mal le Japon. Bien sûr, ce français moyen sait que

le Japon a réussi, après la deuxième guerre mondiale, une révolution industrielle qui en fait une puissance de premier rang. Beaucoup de français savent aussi que le Japon a, sinon la première flotte de pêche du monde, tout au moins celle qui a le meilleur rendement. Certes, ceci est naturel dans un pays aussi insulaire et dont les populations côtières ont toujours tiré une bonne partie de leur alimentation de la mer, dans certaine mesure par nécessité, mais plus encore par goût. Car il y a toute une gastronomie japonaise, à base de produits de la mer, que les touristes occidentaux ignorent trop souvent. Ils ne savent pas ce qu'ils perdent.

Ainsi sommes-nous particulièrement heureux d'accueillir aujourd'hui une forte délégation de savants et ingénieurs japonais, issus de diverses organisations scientifiques et techniques oeuvrant dans le domaine des sciences de la Mer. Dans ce vaste domaine, la science et la technique japonaise sont souvent à la pointe du progrès.

J'en donnerai quelques exemples. C'est au Japon qu'est née l'aquiculture moderne des espèces marines et la gamme des espèces élevées et la plus étendue et les performances les plus élevées du monde. En outre, il s'agit la plupart du temps d'espèces "nobles" pour le consommateur japonais ... même si quelquefois elles ne sont pas forcément des plus prisées dans les pays occidentaux. Et c'est encore les japonais qui ont persévéré pendant près de deux décennies pour utiliser les excédents de leurs écloséries pour faire du repeuplement de leurs eaux côtières.

Qui a fait les premiers récifs artificiels scientifiquement étudiés ? A vrai dire, je ne suis pas sûr que ce soit les japonais, mais ce qui est certain, c'est que ce sont les japonais qui, après les premiers essais - peu encourageants - ont persévéré et couvrent aujourd'hui leurs côtes de centaines d'hectares de récifs artificiels.

Et c'est encore au Japon que sont nées de nombreuses techniques nouvelles de traitement des produits de la pêche et de leurs dérivés aux fins d'alimentation ou de produits industriels. Et je pourrais facilement allonger la liste.

Peut-être, d'ailleurs, certains des auditeurs s'étonnent-ils en écoutant mon propos de ne m'entendre évoquer que des recherches ou des techniques que l'on considère comme du domaine de la simple application. Naguère encore, dans les commissions nationales françaises, la recherche se voulait orientée vers des objectifs purement scientifiques et ce n'est que depuis cinq ou six ans qu'on a commencé, dans notre pays, à parler de recherche "finalisée", ou encore de "recherche d'amont", comme si l'expression de "recherche appliquée" avait un

caractère indécent pour les "vrais scientifiques". Nous n'en sommes plus là, heureusement.

Mais il est certain que nos collègues japonais ont su trouver, bien avant nous, les voies de la finalisation de leurs recherches fondamentales et que leurs compatriotes ingénieurs, administrateurs, hommes politiques et les chefs d'entreprises, ont su trouver les voies et les moyens de faire fructifier les résultats que les scientifiques avaient obtenus.

Et puis, je n'oublie pas non plus que j'ai été parmi les premiers océanographes français à venir travailler au Japon. C'était avec le bathyscaphe français, lors des premières plongées à caractère scientifique de ces engins qui ouvraient à l'homme l'accès aux plus grandes profondeurs océaniques. C'est le grand journal "Asahi Shimbun" qui avait été le "sponsor" de la première expédition (je dirai plus tard dans quelles conditions) du bathyscaphe français FNRS 3 en 1958 et qui a été pour moi la première occasion de visiter un peu le Japon, avec une série de plongées, au large de Sendai, à partir du petit port d'Onagawa. J'y suis revenu en 1967 pour l'opération Japon II avec le nouveau bathyscaphe français Archimède, remorqué depuis Toulon jusqu'au Japon, pour plonger cette fois dans la fosse du Japon, à partir du port de Yokosuka.

Ces deux campagnes en mer profonde au large du Japon sont certainement parmi les meilleurs souvenirs de ma longue carrière. J'avais été nommé membre du comité CNRS qui gérait les bathyscaphes français, puis j'en étais devenu le président. C'est dans ces conditions que, lors de la deuxième campagne au Japon, j'ai été reçu par S.M. l'Empereur Hirohito qui m'a fait visiter son musée privé consacré essentiellement à la faune de la baie de Sagami et m'a questionné longuement sur nos observations. A ma connaissance, l'Empereur du Japon est le seul monarque qui ait acquis une formation de biologiste marin et qui soit l'auteur de publications scientifiques originales. Un exemple à méditer pour les autres chefs d'Etat.

En terminant, je voudrais rappeler le souvenir du Professeur Tadayoshi SASAKI, dont je n'ai appris la disparition le 11 octobre 1983, qu'en lisant le numéro de novembre 1984 de la revue "La Mer", organe de la Société franco-japonaise d'Océanographie. Je veux rappeler aujourd'hui son rôle capital dans la coopération franco-japonaise dans le domaine de l'étude des océans. Bien évidemment c'est lui qui fonda la Société qui nous réunit aujourd'hui. Mais on sait moins, sans doute, que c'est le Professeur SASAKI qui eut l'idée d'inviter le bathyscaphe français à exécuter une série de plongées au large du Japon. C'était au mois de février 1956 et nous étions, le Commandant Houot et moi, en train de préparer

notre campagne de plongées au Portugal. C'était trop beau pour être vrai et nous n'osions pas espérer que ce projet se réaliserait.

Eh bien, le Professeur SASAKI trouva, au Japon même, les moyens financiers nécessaires à cette expédition et le 19 mai 1958, le bathyscaphe FNRS 3 arrivait à Yokohama. Ainsi a-t-il été le premier savant japonais à plonger à plus de 3000 m, en juin 1958. C'était justice car le Commandant Houot et moi-même n'avions jamais pensé que l'invitation formulée par le Prof. SASAKI se réaliserait aussi rapidement et dans des conditions aussi remarquables. Depuis cette réussite mémorable, dont il fut l'artisan, l'équipe du bathyscaphe n'eut pas d'ami plus efficace et plus attentionné que notre cher SASAKI et c'est justice aussi que le gouvernement français lui ait donné la Légion d'Honneur en 1974. Pour les "anciens" des trois campagnes des bathyscaphes au Japon, le souvenir de Tadayoshi SASAKI, qui est aussi le fondateur et le premier président de votre association, est resté étonnement vivace. Je voulais vous le dire.

Vous voyez que j'avais tout de même quelques raisons personnelles de tenir à vous saluer, chers hôtes du pays du Soleil Levant. En outre, j'ajouterai que M. CECCALDI ayant demandé à notre Académie des Sciences de l'Institut de France de se faire représenter à l'ouverture du présent colloque, c'est donc aussi au nom de notre Compagnie que je vous souhaite la bienvenue à Marseille. Mon confrère, le Professeur Maurice FONTAINE, ancien Président de l'Académie, est attendu pour présider la dernière journée de vos travaux.

Je souhaite que ce séjour à Marseille vous soit aussi agréable que possible et je suis sûr que M. CECCALDI et ses collaborateurs feront tout pour cela. Je souhaite aussi que cette semaine soit pour tous les participants des deux pays l'occasion d'échanges de vues fructueux dans une atmosphère d'amitié et je vous donne rendez-vous au Japon ... par exemple à l'occasion du cinquième colloque franco-japonais auquel j'espère bien participer pour revoir votre pays d'où je n'ai rapporté que de bons souvenirs.



J.M. PERES

Membre de l'Académie des Sciences

COLLOQUE FRANCO-JAPONAIS D'OcéANOGRAPHIE
Marseille 16-21 Septembre 1985

Fascicule 1 : Océanographie physique et dynamique sédimentaire
Sur le spectre des courants périodiques littoraux
d'une gamme de fréquence très large
Long-term observation of currents in a coastal area

Masafumi ICHIKAWA¹, Hiroshi YOSHIOKA² et Hideaki KUNISHI³
¹ ASSOCIATION JAPONAISE DE METEOROLOGIE 2-9-2, KANDA, NISHIKI-CHO, CHIYODA-KU, TOKYO, 101
² UNIVERSITE DE KYOTO, INSTITUT DE RECHERCHES SUR LA PREVENTION DES RISQUES MAJEURS NATURELS, GOKASHO, UJI
³ UNIVERSITE DE KYOTO, INSTITUT DE GEOPHYSIQUE, KITASHIRAKAWA, SAKYO-KU, KYOTO, JAPAN

Résumé :

Dans le but de définir les caractéristiques des courants dans la baie de Tanabe, sur l'Océan Pacifique, les courants ont été observés pendant 2 années consécutives avec un courantomètre à ultra-sons. Les résultats de l'analyse des mesures ont été les suivants : (1) Le flux permanent de la baie varie systématiquement en fonction des changements du vent dominant. (2) Les changements brusques de température de l'eau et les modifications de vitesse du courant sont liés. (3) Bien que le courant dépende ordinairement des changements de direction du vent, sur les périodes de 10 et 27 jours il est en corrélation avec les modifications du niveau moyen de la mer. Ce phénomène indique la présence d'un courant ayant son origine loin de la baie de Tanabe et se propageant jusqu'à l'intérieur de la baie. (4) Les courants observés sur une période de quelques jours à un mois sont plus forts en hiver, et, inversement, les courants observés sur une courte période (10 heures à 1 jour) sont plus forts en été. (5) Le flux permanent à l'intérieur de la baie a été plus fort que l'année précédente durant l'été 1982, alors qu'au même moment était observée une modification dans la répartition des densités au large de la baie.

Abstract :

A two-year long observation of the current was carried out with the aid of an ultra-sonic current meter in order to discover the characteristics of the currents in Tanabe Bay which faces the Pacific Ocean. The results obtained from the data analysis are as follows: (1) The constant flow in the bay varies systematically corresponding to changes of the prevailing wind. (2) The abrupt changes of water temperature in the bay correlate with the changes of current velocity. (3) Currents with a period of ten or twenty-seven days have a correlation to the changes of mean sea level, though the constant flow usually correlates to the change of wind. This fact suggests that there exists a flow which originates far from Tanabe Bay and which reaches the bay. (4) Currents with a period of few days to one month become energetic in winter, on the other hand, those with a shorter period become energetic in summer. (5) Constant flow in the bay increased in the summer of 1982, when the density stratification of offshore water was intensified compared to that of the year before.

3.2 恒流の季節変動

まず恒流の長期変動をみるために、恒流の進行ベクトルを月毎に描いた (Fig. 4)。恒流は等深線 (南西と北東を結ぶ) に沿う傾向が強く、冬季には北東に、夏季には南西に向うことが大きな特徴である。特に冬季に著しく北東に向うことは、この時期北西の風が卓越するため湾内に反時計まわりの風成環流が形成され、その流れが等深線に沿うからである。前節でも触れたように、82年8月から12月にかけての恒流変動は前年と比較して様相が異なる。すなわち、82年8、9月の恒流の流速値は前年の同じ月の3倍にあたる6 cm/s程にも及び、11月においても恒流は依然南東に向い、12月になってはじめて流向は北東となる。しかるに81年では、すでに10月から恒流は北東に向っている。この82年の夏季から秋季の特徴的な恒流変動には、外洋の海況変動が関係していると考えられているが、それについては3.5節で詳しく述べたいと思う。

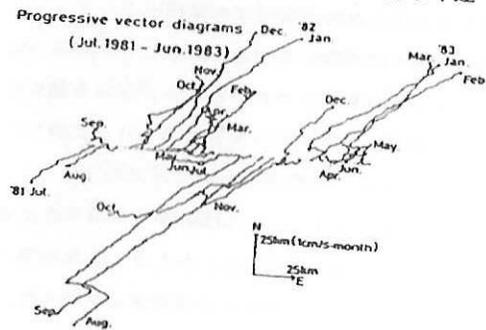


Fig. 4 Changes in constant flow.

3.3 数日から1ヶ月程度の流れの変動

2年に及ぶ流速や水温、風速等の記録には、周期数日から十数日程度の変動が絶えず出現している。以下では、これらの変動の特性と、相互の関連について考察する。

(a) 各変動のスペクトル解析結果

2年間の流速、風速、水位および水温変動に対し、数日から1ヶ月程度の変動周期に注目してパワースペクトルを計算したものを Fig. 5 に示す。各スペクトルには様々な周期にピークが現われているが、全体としては、周期4日、7日、10日の各前後、および40日前後に共通し

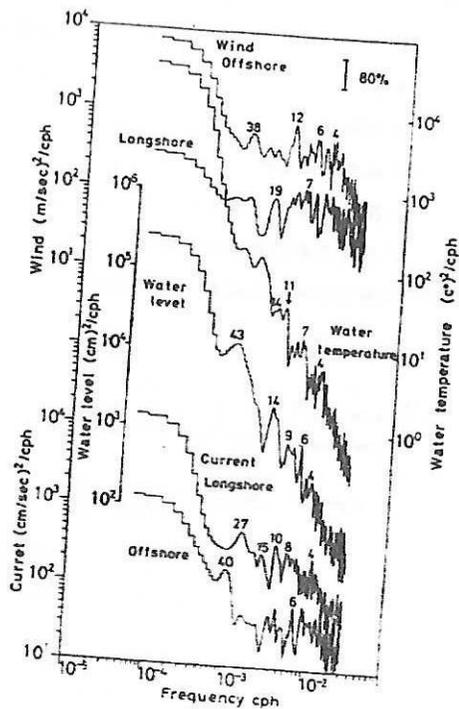


Fig. 5 Power spectra of water level, current, wind, and water temperature from July, 1981 to June, 1983. Numerals indicate the period of spectral peaks in days.

てピークが存在する。一般的には4日あるいは7日前後という周期は、気象現象における総観気圧場の変動周期である。また10数日という周期は冬季紀伊水道に存在する海洋フロントの変動のタイムスケールでもある。従って、これらの周期帯での各変動現象の相互の関連が注目されるので、次項では、各変動間の相関について述べる。

(b) 流速と水温の相関解析

流速と水温、特に強い流れと水温の急変現象との関連は、Fig. 3 でみる限り明瞭ではなかったが、水温の異なる水塊が流れとなって去来することを想定して2年間のデータから流速の訂線成分と水温のコヒーレンスを求めた (Fig. 6)。これによれば、周期1.7、3.6、8.5日程度での相関が比較的高い。周期1.7日での相関の理由はよくわからないが、周期3.6、8.5日の相関については、国司ら¹⁾が観測塔での水温記録から求めた水温急変現象の生起時間間隔、すなわち3~4日および7~8日に対応する変動周期である。したがって、従来、水温の急変としてのみ捉えられていたこの現象は、流動とも密接に関連していることがわかる。

(c) 流速と風速および水位との相関

風速および水位の変動が、恒流とどの程度関連しているかをみるために、Fig. 7 のような線型関係を想定して相関解析を行なった。結果を偏コヒーレンス (partial coherence) の形で Fig. 8 に示す。なお、解析にあたっては卓越成分として風速では沖合成分、流速では訂線成分を選んだ。

まず水位と流速の関係をみると、周期4、10、27日等で両者の相関が比較的高い。一方、風速と流速の間では、周期数日から10数日にかけて様々の周期に相関が見られる。全体的に水位よりは風速の方が流速との対応がよいが、流速と水位の相関が比較的高い周期10、27日において、流速と風速との相関がほとんどみられないことは興味深い。流速のパワースペクトル (Fig. 5) には周期10日および27日に顕著なピークが存在するが、これらの周期では流速変動は専ら水位変動に関連しているのである。

以上のような解析によれば、田辺湾周辺を吹く風によって直接的に形成される流れと、外洋の海況変動に関連して水位変動を伴って田辺湾に及ぶ流れとの区別が可能である。

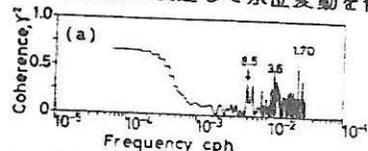


Fig. 6 Coherence between water temperature and current (July, 1981 to June, 1983).

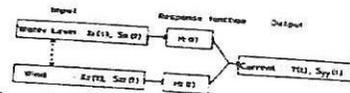


Fig. 7 Two-input linear system.

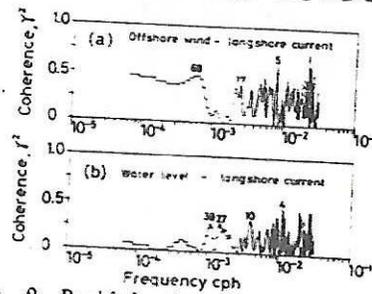


Fig. 8 Partial coherences among current, water level and wind.

3.4 流れのエネルギーの季節変化

次に、周期半日から10数日程度の流れ変動特性を調べる為に、パワースペクトルの経時変化を求めた (Fig.9)。スペクトルの計算は、2年間のデータから1ヶ月づつずらしてとり出す3ヶ月間のデータ22組について行なっている。

最も特徴的なことは、半日周潮に対応する際立ったエネルギーピークの連なりが出現していることで、このピークでは2年間を通してその周期、エネルギーの大きさはほとんど変動しない。その他には、19、24時間および1.5、3.8日等の周期にエネルギーのピークがあり、これらには季節的な消長が見られる。しかし、ピークの連なりが時間の経過とともに、その周期を変えるようなことはない。

流れのエネルギーの季節変化をさらに詳しくみるために、適当に分割した周期帯内 (Fig.9) の平均エネルギーの経時変化を描いた (Fig.10)。周期帯域2.5~17日のエネルギー (Fig.10(a), (b)) は82年8、9月に突然増大する。これはこの時期、恒流が強化したこと、および台風による強流が出現したことの影響であろう。全体の变化傾向と比較してみても、82年の8、9月は特別な時期で、この期間を除けばエネルギー密度は夏季に小さく、秋季および冬季に大きい。エネルギーが秋季および冬季に大きくなることは、台風や冬季季節風、外洋水の突込み等の現象に関連しているものと考えられる。

一方、周期帯域10~22時間 (Fig.10(c), (d)) では、エネルギーは夏期に大きく、冬季に小さい。この傾向は長周期帯 (2.5~17日) の場合と逆である。夏季に短周期帯の流動が活発化することは、夏季の成層強化と関連しているのであろう。

最後に全周期帯 (8時間~1ヶ月) のエネルギー変化をみておく (Fig.10(e))。82年8、9月を除けば、上述した短周期帯と長周期帯のもつそれぞれの季節変動の傾向が全体としては打ち消し合い、その結果、全周期にわたる平均のエネルギー密度は年間を通して一定になっていることがわかる。

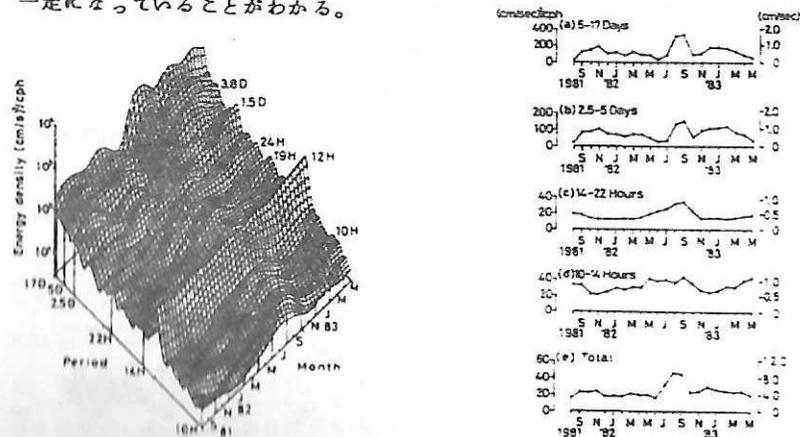


Fig. 9 Annual changes in power spectrum of the current (Aug., 1981 to May, 1983).

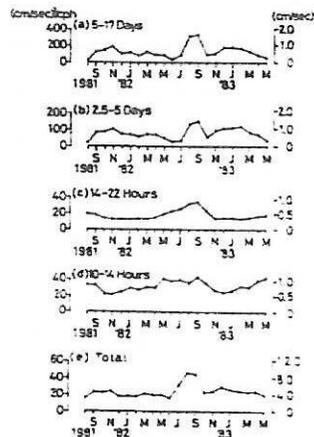


Fig.10 Variations of the current energy in each band of period.

3.5 1982年8月の田辺湾沖合の海洋構造

すでに何度か触れたように、1982年の夏季には恒流が強化されると同時に、広い周期帯に亘って流速変動のエネルギーが大きくなっていった。この特徴的な現象と沖合の海洋構造との関連を考察するために、1973年から10年間に亘って田辺湾沖の測線 (Fig.11) で水温、塩分の分布をしらべると、明らかに1982年のそれは他の年とかけはなれた値を示している。1例として81年8月と82年8月との分布を Fig.12 に示す⁶⁾

この図から明らかなように、82年の8月では50m以浅の密度成層が前年に比べかなり強まり、顕著な密度層が湾内にも存在している。この特徴的な変化は、82年の夏に近畿地方に異常降雨があり、その結果大阪湾から紀伊水道全域の表層に低塩分水が形成されたことによるものと考えられる。密度分布を詳しく解析していないので詳細はわからないが、密度成層が強化することは沖合に向っての水平密度勾配の増大をもたらすであろうから、その結果、例えば岸に沿って北上する地衡流が強まることが考えられる。このような沖合の流動場の変動を考えれば、湾内の恒流が大きくなったこともうなづける。

一方、82年の夏に強い密度成層が湾内および沖合に存在したことは、恒流の強化以外に、内部モードの波動を強化し、その結果流速変動のエネルギーも大きくなったものと推察される。

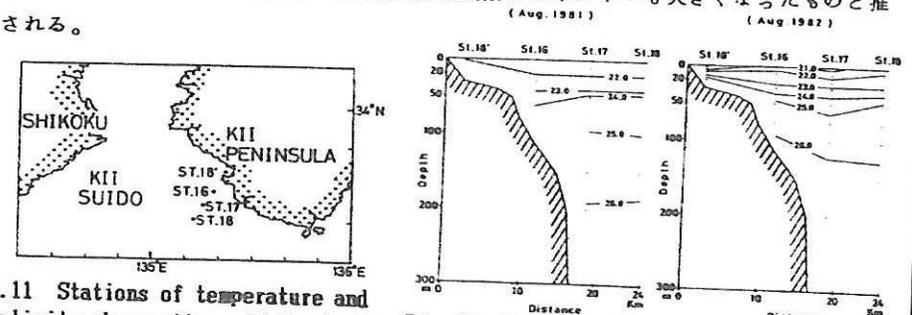


Fig.11 Stations of temperature and salinity observation off Tanabe Bay. Fig.12 Vertical distribution of density.

最後に、本研究は海象 (流れ) 観測グループ (代表土屋義人) による協同研究の一部であり、協力をいただいた多くの協同研究者に感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) 國司秀明・西島也・由佐悠紀: 白浜海洋観測塔における水温変動について、京都大学防災研究所年報、第8号、PP. 479~493、1965
- 2) 永田豊: 湾内水温の急変現象と外洋条件、沿岸海洋研究ノート、19、PP. 103~111、1982
- 3) 秋山秀樹・柳哲雄: 宿毛湾における水温急変現象の機構、沿岸海洋研究ノート、22、PP. 61~66、1984
- 4) 海象 (流れ) 観測グループ (代表土屋義人): 田辺湾における流れの長期連続観測、京都大学防災研究所年報、第26号B、PP. 637~672、1983
- 5) 土屋義人・吉岡洋・柳橋輝彦・市川雅史・土子良治: 超音波式流速計による長期潮流観測について、第30回海岸工学講演会論文集、PP. 500~504、1983
- 6) 和歌山県水産試験場: 沿岸定観調査報告、昭和56年度第5次、昭和57年度第5次。

COLLOQUE FRANCO-JAPONAIS D'Océanographie
Marseille 16-21 Septembre 1985

Fascicule 1 : Océanographie physique et dynamique sédimentaire
Sur la théorie d'engendrement des ondes longues sur le plateau
continental par déviations de la pression atmosphérique*
*Influences of shelf wave with inertial period generated
by circular air pressure system upon coastal sea*

Masahide TOMINAGA*
JAPAN WEATHER ASSOCIATION, 2-9-2 KANDANISHIKI-CHO, CHIYODA-KU, TOKYO, JAPAN

Résumé :

Il a été procédé à une analyse dynamique des ondes longues sur le plateau continental engendrées par un orage dont on suppose que la distribution de la pression est circulaire horizontalement.

On applique la transformée de Fourier-Laplace conventionnelle en supposant que la pente est égale dans la partie inférieure et que le paramètre de Coriolis f est constant. Le long de la côte, il y a élévation du niveau de l'eau du fait de l'effet du vent à l'intérieur de l'orage lorsque celui-ci se déplace parallèlement à la côte vers la droite face à la côte. Accompagnés d'élévations périodiques de la surface de l'eau, il y a apparition de courant horizontaux quasi-géostrophique avec une divergence ou une convergence non-nulle et une période de calme dans la direction x . Théoriquement, les zones de convergence et de divergence sont séparées par une ligne de non-divergence parallèle à la côte. Mais pour déterminer si cette ligne existe réellement, près de la côte ou loin au large, il est nécessaire de poursuivre l'étude dans l'avenir à l'aide de la méthode quantitative. La théorie ci-dessus peut être appliquée au mélange des eaux côtières.

Abstract :

Shelf waves of inertial period generated by a storm, of which pressure distribution is assumed horizontally circular, and its fluctuation is assumed as a type of error function, is analyzed dynamically. Conventional Fourier-Laplace transform is applied assuming a uniform bottom slope and Coriolis parameter f be constant. Along the coast, increase in water level due to wind stress inside the storm occurs when the storm progresses parallel to the coast to the right facing to the offshore. Accompanied by the periodical elevations of water surface, horizontal quasi-geostrophic currents occur with non-zero divergence or convergence with inertial period along x direction. Theoretically, convergence and divergence area also are demarcated by a non-divergence line parallel to the straight coast, however to decide where this line exists actually, namely near the coast or far offshore will be left future by numerical method. Application of the above theory to the mixing of coastal water may be feasible.

* Texte présenté par le Professeur Masafumi ICHIKAWA.

§ 1 基礎概念

数100kmにわたって連なるほぼ直線状海岸から近似的に一樣な海底傾斜 α^* で沖にひろがる陸棚上の海水を考え、海面上を気圧系が海岸線と平行に一樣な速度 U で進行するものと仮定する。低気圧は typhoon, hurricane のように円形対称とし、その域内の気圧降下量は

$$P^* = -P_0 e^{-r^*/L} \quad (1.1)$$

で与えられる。 r^* は低気圧中心からの距離、 $r^* = L$ なるとき $P^* = -P_0 e^{-1}$ で L を気圧系の特性半径とする。海岸線を x 軸、沖に向かって y 軸をとり、流速の x, y 成分を u, v, g を重力加速度とする。長さは $U^2/g\alpha$ を、時間 t は $U/g\alpha$ を、速度は U を単位として各物理量を無次元化して $*$ をとり除いてEulerの運動方程式と連続方程式を気圧系と共に動く座標系に準拠して書き下すと

$$\left. \begin{aligned} u_x - u_x - \delta v + \frac{\zeta_x}{\alpha} &= -P_x + \frac{\tau(x)}{\alpha} \\ v_x - v_x + \delta u + \frac{\zeta_y}{\alpha} &= -P_y + \frac{\tau(y)}{\alpha} \\ \zeta_x - \zeta_x + \alpha_y (u_x + v_y) + \alpha v &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

こゝにくは静水面からの無次元化された昇降 (de'nivellation) で $U^2/g\alpha$ を単位に、 P, τ は無次元化された気圧降下量と水面に作用する風のストレスでそれぞれ $\rho U^2, \rho_0 g$ を単位とする。こゝに ρ, ρ_0 は海水、空気の密度である。また $\delta = fU/g\alpha, f = 2\omega \sin\phi, \omega$ は地球の自転の角速度で $7.29 \times 10^{-5} \text{ rad} \cdot \text{sec}^{-1}$ 、 ϕ は緯度である。

(1.1)の r^* は気圧系が海岸から沖合 a なる距離を進むときは $r^* = x^2 + (y-a)^2$ 、無次元量で $r^2 = x^2 + (y-a)^2$ となるから $L = g\alpha L^*/U^2$ と記せば

$$P = -P_0 \exp\left[-\frac{x^2 + (y-a)^2}{L^2}\right] \quad (1.3)$$

と表わされる。(1.2)式の τ は、低気圧系内の傾度風を等圧線半径が大きいから準地衡風と考えてよいので C を係数として

$$\tau = \rho_0 CW^2 \quad (1.4)$$

である。 W の絶対値 W は近似的に

$$W = \frac{1}{\rho_0 f} \left| \frac{dP^*}{dr^*} \right| = \frac{2P_0^* r^*}{\rho_0 f L^*} e^{-(r^*/L^*)^2} \quad (1.5)$$

• 海底傾斜は長い陸棚帯を考えると $h = h_0 e^{-\alpha y}$ とする方が現実的である。

(1.5)を(1.4)に代入し $\tau^*/\rho_0 g$ の絶対値を τ とすれば

$$\tau = \frac{CW^2}{g} = \tau_0 \left(\frac{r}{L}\right)^2 e^{-2(r/L)^2} \quad (1.6)$$

こゝに無次元ストレス τ_0 は

$$\tau_0 = \frac{C}{g} \left(\frac{2P_0^*}{\rho_0 f L^*}\right)^2 \quad (1.7)$$

$\tau(x), \tau(y)$ は τ の x, y 成分だから

$$\left. \begin{aligned} \tau(x) &= \frac{x}{r} \tau = x r \frac{\tau_0}{L^2} e^{-2(r^2/L^2)} \\ &= \tau_0 \left(\frac{x}{L}\right)^2 \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{y-a}{x}\right)^2\right] e^{-2r^2/L^2} \\ \tau(y) &= \frac{y-a}{r} \tau = \tau_0 \frac{x(y-a)}{L^2} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{y-a}{x}\right)^2\right] e^{-2r^2/L^2} \end{aligned} \right\} \quad (1.8)$$

こゝに、沿岸に沿う陸棚波の1波長は $y-a$ よりも大きいことを利用した。なお(1.8)中の r は $[x^2 + (y-a)^2]^{1/2}$ とするべきである。

以上の議論により、(1.2)は P と τ のinputによって陸棚上に U なる速度で海岸線に沿って進む長周期の edge waveが生ずることが予想される。その機構(mecanisme)は風のストレスによって沿岸に水が部分的に堆積しそれが波を誘発するものと思われる。(1.2)を解くためにFourier-Laplace transformation (FLTと略記する)を使うのが便利である。例えば u のFLTを \bar{u} と記せば

$$\bar{u}(x, s) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\kappa x} dx \int_0^{\infty} u e^{-st} dt \quad (1.9)$$

この逆変換(IFLTと記す)は

$$u(x, t) = \frac{1}{4\pi^2 i} \int_{-\infty+i\epsilon}^{\infty+i\epsilon} e^{st} ds \int_{-\infty}^{\infty} \bar{u}(x, s) e^{-i\kappa x} d\kappa \quad (1.10)$$

で定義する。

§ 2 運動方程式の慣性周期波動解

(1.2)式右辺の大気からのinputは P と τ であるが、顕圧海水(la couche barotrope)の表面に気圧変動が働いても慣性周期($T_i = 2\pi/f$)の変動は生じないと予想される。

(1.2)のFLTをとると $\sigma = s + i\epsilon$ と置いて

$$\left. \begin{aligned} \sigma \bar{u} - \delta \bar{v} - \frac{i\kappa}{\alpha} \bar{\zeta} &= i\kappa \bar{P} + \frac{\tau(x)}{\alpha} \\ \sigma \bar{v} + \delta \bar{u} + \frac{\zeta_y}{\alpha} &= -\bar{P}_y + \frac{\tau(y)}{\alpha} \\ \sigma \bar{\zeta} - i\alpha x y \bar{u} + \alpha y \bar{v}_y + \alpha \bar{v} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

となる。まず、 τ の作用がないものとして(2.1)から \bar{u}, \bar{v} を消去すると

$$y \bar{\zeta}_{yy} + \bar{\zeta}_y + \left(x^2 y - \sigma^2 - \frac{i\kappa \delta}{\alpha} + \delta^2\right) \bar{\zeta} = \alpha \bar{Q} \quad (2.2)$$

こゝに

$$\bar{Q} = y \bar{P}_{yy} + \bar{P}_y - (\kappa^2 y - \frac{i\kappa\delta}{\sigma}) \bar{P} \quad (2.3)$$

(2.2) は la fonction de Laguerre $Ln(2\kappa y)$ を使い、両辺をその函数で展開して解くが詳細は省略し、 $n=0$ なる基本モードのみの解を求めると

$$\bar{\delta} = \frac{\pi P_0 \alpha \kappa^2 L^2 e^{-\kappa(y+a)} \operatorname{erfc}(\frac{\kappa L}{2} - \frac{a}{L})}{(\sigma - i\kappa)(\sigma - \sigma_1)(\sigma - \sigma_2)} \quad (2.4)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= i \left(\sqrt{|\kappa| + \frac{\delta^2}{4}} - \frac{\delta}{2} \right) \\ \sigma_2 &= -i \left(\sqrt{|\kappa| + \frac{\delta^2}{4}} + \frac{\delta}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

である。(2.10) に代つて (2.4) の IFLT を求めるとき、慣性周期をもつ解 \bar{Q} が存するならば、inverse Fourier integral において κ -平面上の積分函数が $\kappa = \delta$ なる pole を持たなければならない。なぜならそのとき $e^{i\delta x}$ なる factor を生じ、 x に対して無次元の静止 x' 座標は $x' = x + t$ で定義されることにより $e^{i\delta t} = e^{i\delta x}$ なる慣性周期項が現われるからである。そのためには (2.4) が $\sigma = i\delta$ なる pole を有しなければならないが、たゞちにわかるように \bar{Q} にそのような pole はないから $\bar{Q} = 0$ である。従つて気圧偏差のみによつて慣性周期の陸棚波は生じないことが証明された。しかし傾圧成層 (la couche baroclinique) を考えるときは事情は一変するが今は論じない。

次に (2.1) 右辺の風のストレスの項だけを残して同じように考察してみよう。このときは \bar{Q} の微分方程式 (2.2) の右辺 \bar{Q} の代りに \bar{T} を導入すればよい。

$$\bar{T} = \left[-\delta \frac{\partial \bar{r}^{(x)}}{\partial y} - \sigma \frac{\partial \bar{r}^{(y)}}{\partial y} + i\kappa \left(\bar{r}^{(x)} + \frac{\delta}{\sigma} \bar{r}^{(y)} \right) \right] y + \bar{r}^{(x)} - \frac{\delta}{\sigma} \bar{r}^{(y)} \quad (2.6)$$

$\bar{r}^{(x)}$, $\bar{r}^{(y)}$ は (1.8) に F.T. を施せば求まる。その計算は容易でないが幸いに解析的に進行でき

$$\left. \begin{aligned} \bar{r}^{(x)} &= B(\kappa) \exp \left[-2 \left(\frac{y-a}{L} \right)^2 \right] \left[1 - \frac{\kappa^2 L^2}{4} + 2 \left(\frac{y-a}{L} \right)^2 \right], \\ \bar{r}^{(y)} &= i B(\kappa) \exp \left[-2 \left(\frac{y-a}{L} \right)^2 \right] \kappa \cdot \frac{y-a}{L} \left[1 + 2A(\kappa) \left(\frac{y-a}{L} \right)^2 \right], \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

となる。こゝに

$$B(\kappa) = \frac{r_0 L e^{-\kappa^2/8}}{16 \sqrt{2} \pi^{\frac{3}{2}} (\kappa + i\sigma)}, \quad \kappa = \kappa L \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} A(\kappa) &= \kappa^2 / 8 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \kappa^{2n}}{2^{2n} (2n+1)n!} \\ &= \kappa^2 / 8 \left(1 - \frac{\kappa^2}{2^2 \times 3} - \frac{\kappa^4}{2^4 \times 5 \times 2!} - \frac{\kappa^6}{2^6 \times 7 \times 3!} + \dots \right) \end{aligned} \quad (2.9)$$

である。(2.7) を (2.6) に代入し $Y = (y-a)/L$ とおけば

$$\bar{T} = B(\kappa) e^{-2Y^2} f_1(Y), \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} f_1(Y) &= -Y(Y+L) \left\{ \delta (\kappa^2 - 8Y^2) + \frac{\kappa\delta}{\sigma} (1 + 2AY^2) \right\}, \\ &- B \frac{\delta}{\sigma} \left(1 - \frac{\kappa^2}{4} + 2Y^2 \right) + i\kappa(Y+L) \left\{ \sigma \left[1 + (6A-4)Y^2 - 8AY^4 \right] \right. \\ &\left. + 1 - \frac{\kappa^2}{4} + 2Y^2 \right\} + i\kappa B Y (1 + 2AY^2) \end{aligned} \quad (2.11)$$

を導くことができる。 $f_1(Y)$ は Y に関する 5 次の多項式であるが

$$f_1(Y) = \sum_{n=0}^5 a_n(\sigma, \kappa) Y^n \quad (2.12)$$

と置くことが可能で $a_n(\sigma, \kappa)$ は複素数である。

さらに $Y = \frac{\xi}{2\kappa} - L$, $L = \frac{a}{L}$ と置けば風のストレスによる \bar{r} は (2.2) から (2.4) を導いたのと同じ方法で

$$\bar{r} = \frac{\sigma e^{-\kappa y} S}{(\sigma - i\delta)(\sigma - \sigma_1)(\sigma - \sigma_2)} \quad (2.13)$$

$$S = - \int_0^{\infty} e^{-\xi/2} \bar{T} \left(\frac{\xi}{2\kappa} \right) d\xi$$

となるが $\kappa = 2\kappa \left(\frac{w}{\sqrt{2}} + L - \frac{\kappa}{4} \right)$ によつて ξ を w に変換すると

$$e^{-\xi/2} \bar{T} \left(\frac{\xi}{2\kappa} \right) = B(\kappa) e^{-\kappa w} + \kappa^2 / 8 e^{-w^2} f(w)$$

なる形を得る。従つて (2.8) を使つて

$$S = \frac{r_0 L \kappa e^{-\kappa L}}{16 \pi^{\frac{3}{2}} (\kappa + i\sigma)} K(w_1), \quad (2.14)$$

$$\text{こゝに } K(w_1) = \int_{w_1}^{\infty} e^{-w^2} f(w) dw, \quad (2.15)$$

$$w_1 = \sqrt{2} \left(\frac{\kappa}{4} - L \right)$$

となる。 $f(w)$ は (2.12) から導かれ、上記の Y , ξ , w の関係より $Y = w/\sqrt{2} - \kappa/4$ となることを使えば

$$f(w) = f_1 \left(-\frac{\kappa}{4} \right) + \sum_{r=1}^5 \frac{f_1^{(r)} \left(-\frac{\kappa}{4} \right)}{r!} \left(\frac{w}{\sqrt{2}} \right)^r \quad (2.16)$$

となる。

(2.14)を(2.13)に代入して ζ_r にILFTを施すと

$$\zeta_r = \frac{1}{4\pi^2 i} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\kappa(x+t)} \int_{-i\infty+\epsilon}^{i\infty+\epsilon} \zeta_r e^{\sigma t} \alpha \sigma, \epsilon \rightarrow 0 \quad (2.17)$$

となるが, (2.13), (2.14)から

$$\int_{-i\infty+\epsilon}^{i\infty+\epsilon} \zeta_r e^{\sigma t} d\sigma = -\frac{\tau \alpha L k e^{-kL}}{16\pi^{\frac{3}{2}}} K(w_1) e^{-\kappa y} \times \int_{-i\infty+\epsilon}^{i\infty+\epsilon} \frac{\sigma e^{\sigma t} d\sigma}{(\kappa+i\sigma)(\sigma-i\delta)(\sigma-\sigma_1)(\sigma-\sigma_2)} \quad (2.18)$$

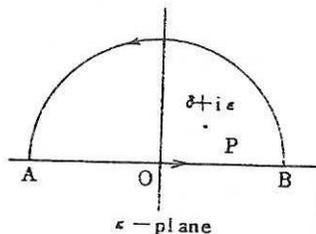
である。この積分を積分函数の pole $\sigma = i\delta$ における留数 (residue) を使って評価 (évaluer) すると

$$-\frac{2\pi\delta e^{i\delta t}}{(\kappa-\delta)(|\kappa|-2\delta^2)}$$

となって慣性周期項 $e^{i\delta t}$ が現われる。従ってこの結果を(2.18)に代入, さらに(2.17)を書き下すと

$$\zeta_r = \frac{\tau \alpha L^2 \delta}{32\pi^{\frac{5}{2}} i} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{K(w_1) \kappa e^{-|\kappa|(y+a)} e^{-i\kappa(x+t)+i\delta t}}{(\kappa-\delta)(|\kappa|-2\delta^2)} d\kappa \quad (2.19)$$

この積分を求めるとき複素 κ 平面にて図のような積分路を考え, 半円の半径 R を限りなく大きくする。半円上に沿って $\kappa = R e^{i\theta}$ であるが



$\kappa = \delta$ としたとき $e^{i(-\kappa+\delta)t} = 1$ となるので半円上で

$$|e^{-i\kappa x}| = |e^{-iR x (\cos\theta + i\sin\theta)}| = e^{R x \sin\theta} \quad (2.20)$$

となる。もし storm (orage) が海岸に平行に沖にむいて右手に進むならば x は storm の中心を原点とする運動座標系だから, storm の後面では $x < 0$ である。従って $R \rightarrow \infty$ のとき(2.20)が0になるためには $\sin\theta > 0$, 即ち大半円は κ 平面の上半面に存在し, pole $\kappa = \delta + i\epsilon$ をその中に含むから $\epsilon \rightarrow 0$ としたとき Cauchy の積分定理によって

$$\zeta_r = \frac{\tau \alpha L^2 \delta K(w_0)}{16\pi^{\frac{3}{2}} (1-2\delta)} e^{-\delta(y+a)-i\delta x} \quad (2.21)$$

を得る。ここで $k_0 = \delta L = fL/U$ と記せば

$$w_0 = \sqrt{2} \left(\frac{k_0}{4} - L \right) = \sqrt{2} \left(\frac{\delta L}{4} - L \right) \quad (2.22)$$

静止系では $x' = x + t$, 次元のある量で $x^* = x' - Ut^*$ となるから(2.21)の周期項は

$$e^{-i\delta x} = e^{-i\delta(x'-t)} = \exp\left[-i\delta \frac{g\alpha}{U^2} (x' - Ut^*)\right] = \exp\left[-i \left(\frac{f}{U} x^* - f t^*\right)\right]$$

と表わされ, ζ_r の実部 (real part) をとって

$$\text{Re} \zeta_r = \frac{\tau \alpha L^2 \delta K(w_0)}{16\pi^{\frac{3}{2}} (1-2\delta)} e^{-\delta(y+a)} \cos[\delta(x'-t)] \quad (2.23)$$

となる。これは風のストレスによって生ずる海面の上昇下降を表わし, 静止系からみて波長は $\lambda = 2\pi U/f$ 周期は $T = 2\pi/f = \pi/\omega \sin\phi$ である。沿岸における振幅は $K(w_0)$ 以外の量は storm の規模, 進行速度, 海底傾斜などにより直ちに確定するが, $K(w_0)$ は現在 black box である。しかし, (2.15), (2.16)から

$$K(w_0) = P(w_0) e^{-w_0^2} + Q(w_0) \frac{\sqrt{\pi}}{2} \text{erfc } w_0 \quad (2.24)$$

なる形を呈することは明らかである。(2.12)を参照すると $P(w_0)$, $Q(w_0)$ は実数 w_0 を変数とする複素函数だから

$$P = P_1 + iP_2, \quad Q = Q_1 + iQ_2, \quad K(w_0) = K_1 + iK_2$$

と置けば

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= P_1 e^{-w_0^2} + Q_1 \frac{\sqrt{\pi}}{2} \text{erfc } w_0 \\ K_2 &= P_2 e^{-w_0^2} + Q_2 \frac{\sqrt{\pi}}{2} \text{erfc } w_0 \end{aligned} \right\} \quad (2.25)$$

と表わすことができる。 P_1, P_2 等を w_0 の函数で表わすのは長い骨の折れる (lengthy tedious) 代数を行わなくてはならないので本論文では扱わない (本稿終りをみよ)。

§ 3. 慣性周期の流れについて

(2.1)第1, 第2式の \bar{P}, \bar{P}_y の項をとった式から \bar{u}, \bar{v} を解くと

$$\left. \begin{aligned} \bar{u} &= \frac{i\kappa \zeta_r - \delta \bar{\zeta}_r y}{\alpha(\sigma^2 + \delta^2)} + \frac{\sigma \bar{\zeta}_r(x) + \delta \bar{\zeta}_r(y)}{\alpha(\sigma^2 + \delta^2)} \\ \bar{v} &= -\frac{i\kappa \delta \bar{\zeta}_r + \sigma \bar{\zeta}_r y}{\alpha(\sigma^2 + \delta^2)} + \frac{-\delta \bar{\zeta}_r(x) + \sigma \bar{\zeta}_r(y)}{\alpha(\sigma^2 + \delta^2)} \end{aligned} \right\} \quad (2.26)$$

こゝには風のストレスによる(2.21)で与えられるものを考えるから ζ_r と記した。

(2.13)から $\bar{\zeta}_r y = -\kappa \bar{\zeta}_r$ であるから

$$\left. \begin{aligned} \bar{u} &= \frac{\kappa \bar{\zeta}_r}{\alpha(\delta - i\sigma)} + \frac{\sigma \bar{\zeta}_r(x) + \delta \bar{\zeta}_r(y)}{\alpha(\sigma^2 + \delta^2)} \\ \bar{v} &= \frac{i\kappa \bar{\zeta}_r}{\alpha(\delta - i\sigma)} + \frac{-\delta \bar{\zeta}_r(x) + \sigma \bar{\zeta}_r(y)}{\alpha(\sigma^2 + \delta^2)} \end{aligned} \right\} \quad (2.27)$$

これらの右辺第1項を $\bar{u}_\zeta, \bar{v}_\zeta$; 第2項を $\bar{u}_\tau, \bar{v}_\tau$ と略記しよう。即ち $u = \bar{u}_\zeta + \bar{u}_\tau, \bar{v} = \bar{v}_\zeta + \bar{v}_\tau$ である。明らか $K\bar{v}_\zeta = i\bar{u}_\zeta$ となっている。 $\bar{u}_\tau, \bar{v}_\tau$ については右と同じ関係は直ちに得られない。

(1) 先ず \bar{u}_ζ の I L F T を求めよう。

$$\begin{aligned} u_\zeta &= \frac{1}{4\pi^2 i} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\kappa(x+t)} d\kappa \int_{-i\infty+\epsilon}^{i\infty+\epsilon} e^{\sigma t} \bar{u}_\zeta d\sigma, \quad \epsilon \rightarrow 0 \\ &= \frac{1}{4\pi^2 i} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\kappa(x+t)} d\kappa \int_{-i\infty+\epsilon}^{i\infty+\epsilon} \frac{\kappa \bar{v}_\zeta}{\alpha(\delta-i\sigma)} e^{\sigma t} d\sigma \end{aligned}$$

(2.21) を代入して

$$= \frac{-\tau_0 L^2}{64\pi^2 \alpha} \int_{-\infty}^{\infty} \kappa^2 e^{-\kappa(y+a)} K(w_1) I(\kappa) e^{-i\kappa(x+t)} d\kappa \quad (2.28)$$

こゝに

$$\begin{aligned} I(\kappa) &= \int_{-i\infty+\epsilon}^{i\infty+\epsilon} \frac{\sigma e^{\sigma t} \alpha \sigma}{(\sigma^2 + \delta^2)(\sigma - \sigma_1)(\sigma - \sigma_2)(\kappa + i\sigma)} d\sigma \\ &= \pi i \left[\frac{e^{i\delta t}}{(\kappa - \delta)(|\kappa| - 2\delta^2)} + \frac{e^{-i\delta t}}{|\kappa|(\kappa + \delta)} \right] \end{aligned}$$

となるから (2.28) に代入して $\epsilon = \pm \delta$ における留数から

$$\begin{aligned} u_\zeta &= -\frac{i\tau_0 L^2}{64\pi^2 \alpha} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\kappa^2 e^{-|\kappa|(y+a)} K(w_1)}{(\kappa - \delta)(|\kappa| - 2\delta^2)} e^{i\delta t - i\kappa(x+t)} d\kappa \right. \\ &\quad \left. + \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\kappa| e^{-|\kappa|(y+a)} K(w_1)}{\kappa + \delta} e^{-i\delta t - i\kappa(x+t)} d\kappa \right\} \\ &= \frac{\tau_0 L^2 \delta}{32\pi^2 \alpha} e^{-\delta(y+a)} \left\{ \frac{K(w_{01})}{1-2\delta} e^{i\delta a} + K(w_{02}) e^{-i\delta a} \right\} \quad (2.29) \end{aligned}$$

を得る。(2.25) を参照すれば

$$\begin{aligned} K(w_{01}) e^{i\delta a} &= \{ K_1(w_{01}) + ik_2(w_{01}) \} e^{i\delta x} \\ &= \{ K^2(w_{01}) + K_2^2(w_{01}) \}^{\frac{1}{2}} \exp i(\delta x + \varphi(w_{01})), \end{aligned}$$

$$\tan \varphi(w_{01}) = \frac{K_2(w_{01})}{K_1(w_{01})} = \frac{P_2(w_{01}) + Q_2(w_{01}) E(w_{01})}{P_1(w_{01}) + Q_1(w_{01}) E(w_{01})},$$

$$E(w) = \frac{e^{-w^2}}{\sqrt{\pi}} \operatorname{erfc} w$$

である。 $K(w_{02}) e^{-i\delta a}$ については上式の w_{01} を w_{02} と置き、 δx を $-\delta x$ と置けばよいから再び三角函数の和の公式を使って (2.29) の実数部分をわかり易い次の形に整えることができる。

$$u_\zeta = \frac{\tau_0 L^2 \delta}{32\pi^2 \alpha} e^{-\delta(y+a)} W_\zeta \cos(\delta x - \beta) \quad (2.30)$$

こゝに

$$K_1^2(w_0) + K_2^2(w_0) = R^2(w_0)$$

と記せば

$$W_\zeta^2 = \left(\frac{R(w_{01})}{1-2\delta} \right)^2 + R^2(w_{02}) + \frac{2R(w_{01})R(w_{02})}{1-2\delta} \cos[\varphi(w_{01}) + \varphi(w_{02})],$$

$$\tan \beta = \frac{R(w_{01}) \sin \varphi(w_{01}) - (1-2\delta) R(w_{02}) \sin \varphi(w_{02})}{R(w_{01}) \cos \varphi(w_{01}) + (1-2\delta) R(w_{02}) \cos \varphi(w_{02})}$$

である。 $v_\zeta = iu_\zeta$ であるから

$$v_\zeta = -\frac{\tau_0 L^2 \delta}{32\pi^2 \alpha} e^{-\delta(y+a)} W_\zeta \sin(\delta x - \beta) \quad (2.31)$$

(2) u_τ, v_τ を求めること

$$\begin{pmatrix} u_\tau \\ v_\tau \end{pmatrix} = \frac{1}{4\pi^2 i} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\kappa(x+t)} \alpha \kappa \int_{-i\infty+\epsilon}^{i\infty+\epsilon} \begin{pmatrix} \bar{u}_\tau \\ \bar{v}_\tau \end{pmatrix} e^{\sigma t} d\sigma \quad (2.32)$$

こゝに (2.27) から

$$\left. \begin{aligned} \bar{u}_\tau &= \frac{\sigma \bar{r}(x) + \delta \bar{r}(y)}{\alpha(\sigma^2 + \delta^2)} \\ \bar{v}_\tau &= \frac{-\delta \bar{r}(x) + \sigma \bar{r}(y)}{\alpha(\sigma^2 + \delta^2)} \end{aligned} \right\}$$

である。 $\bar{r}(x), \bar{r}(y)$ は (2.7) で与えられるが簡単のため $y-a = LY$ を使って

$$\left. \begin{aligned} M(\kappa) &= 1 - \frac{\kappa^2}{4} + 2Y^2, \\ N(\kappa) &= \kappa(y-a) \{ 1 + A(\kappa) Y^2 \} \\ &= \kappa LY \{ 1 + A(\kappa) Y^2 \} \end{aligned} \right\} \quad (2.33)$$

と置けば

$$\left. \begin{aligned} \bar{u}_\tau &= \frac{\tau_0 L}{16\sqrt{2}\pi^2 \alpha} e^{-2\tau^2} e^{-\kappa^2/4} \frac{\sigma M(\kappa) + i\delta N(\kappa)}{(\sigma^2 + \delta^2)(\kappa + i\sigma)}, \\ \bar{v}_\tau &= \frac{\tau_0 L}{16\sqrt{2}\pi^2 \alpha} e^{-2\tau^2} e^{-\kappa^2/4} \frac{-\delta M(\kappa) + i\sigma N(\kappa)}{(\sigma^2 + \delta^2)(\kappa - i\sigma)} \end{aligned} \right\} \quad (2.34)$$

を得る。

さらに

$$J u = \int \frac{i\infty + \epsilon \sigma M(\kappa) + i\delta N(\kappa)}{-i\infty + \epsilon (\sigma^2 + \delta^2)(\kappa + i\sigma)} e^{\sigma x} d\sigma, \quad \epsilon \rightarrow 0$$

と置けば

$$J u = \pi i \left\{ \frac{M(\kappa) + N(\kappa)}{\kappa - \delta} e^{i\delta x} + \frac{M(\kappa) - N(\kappa)}{\kappa + \delta} e^{-i\delta x} \right\} \quad (2.35)$$

と計算されるから (2.32) より

$$\begin{aligned} u_r &= \frac{1}{4\pi^2 i} \cdot \frac{\tau_0 L e^{-2r^2}}{16\sqrt{2}\pi^{\frac{3}{2}}\alpha} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-k^2/8} J u e^{-i\kappa(x+i)} d\kappa \\ &= \frac{\tau_0 L e^{-2r^2}}{64\sqrt{2}\pi^{\frac{5}{2}}\alpha} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \frac{M(\kappa) + N(\kappa)}{\kappa - \delta} e^{i\delta x - i\kappa(x+i)} e^{-k^2/8} d\kappa \right. \\ &\quad \left. + \int_{-\infty}^{\infty} \frac{M(\kappa) - N(\kappa)}{\kappa + \delta} e^{-i\delta x - i\kappa(x+i)} e^{-k^2/8} d\kappa \right\} \\ &= \frac{i\tau_0 L e^{-2r^2}}{32\sqrt{2}\pi^{\frac{3}{2}}\alpha} e^{-(\delta i)^2/8} \{ [M(\delta) + N(\delta)] e^{i\delta x} + [M(-\delta) - N(-\delta)] e^{-i\delta x} \} \end{aligned}$$

(2.33) をみると明らか

$$\begin{aligned} H(Y) &= M(\delta) + N(\delta) = M(-\delta) - N(-\delta) \\ &= 1 - \frac{\delta^2 L^2}{4} + 2Y^2 + \delta L Y \{ 1 + A(\delta L) Y^2 \} \end{aligned} \quad (2.36)$$

となるから

$$u_r = \frac{\tau_0 L e^{-(\delta i)^2/8}}{32\sqrt{2}\pi^{\frac{3}{2}}\alpha} H(Y) i (e^{i\delta x} + e^{-i\delta x}) \quad (2.37)$$

を得る。

次に

$$J v = \int \frac{i\infty + \epsilon - \delta M(\kappa) + i\sigma N(\kappa)}{-i\infty + \epsilon (\sigma^2 + \delta^2)(\kappa + i\sigma)} e^{\sigma x} d\sigma, \quad \epsilon \rightarrow 0$$

とおけば

$$J v = -\pi \left\{ \frac{M(\kappa) + N(\kappa)}{\kappa - \delta} e^{i\delta x} + \frac{M(\kappa) - N(\kappa)}{\kappa + \delta} e^{-i\delta x} \right\}$$

となるが (2.35) と比べると $J v = i J u$ であるから (2.32) より明らか $v_r = i u_r$ を得る。従って $v_c = i u_c$ なることとあわせて $v = i u$ となって u と v の位相差は 90° である。簡単のため κ storm の中心が海岸線上を通過するものと仮定すれば $L=0$ で $Y=y/L=\eta$ と置く。また $w_0 = \sqrt{2}\delta L/4$ である。

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \frac{\tau_0 L^2 \delta}{32\pi^{\frac{3}{2}}\alpha (1-2\delta)} K\left(\frac{\sqrt{2}}{4}\delta L\right), \\ a_2 &= \frac{\tau_0 L^2 \zeta}{32\pi^{\frac{3}{2}}\alpha} K\left(-\frac{\sqrt{2}}{4}\delta L\right), \\ b &= \frac{\tau_0 L}{32\pi^{\frac{3}{2}}\alpha} e^{-(\delta i)^2/8} \end{aligned} \right\} \quad (2.38)$$

と略記すれば (2.29) と (2.37) を加えて

$$\begin{aligned} u &= u_c + u_r = [a_1 e^{-\delta L \eta} + i b e^{-2\eta^2} H(\eta)] e^{i\xi} \\ &\quad + [a_2 e^{-\delta L \eta} + i b e^{-2\eta^2} H(\eta)] e^{-i\xi} \\ &= A_1 e^{i(\xi + \phi_1)} + A_2 e^{-i(\xi - \phi_2)} \end{aligned} \quad (2.39)$$

$$\begin{aligned} \text{よって } A_1^2 &= a_1^2 e^{-2\delta L \eta} + b^2 e^{-4\eta^2} H^2(\eta), \\ A_2^2 &= a_2^2 e^{-2\delta L \eta} + b^2 e^{-4\eta^2} H^2(\eta), \\ \tan \phi_1 &= \frac{b}{a_1} H(\eta) e^{-2\eta^2 + \delta L \eta}, \\ \tan \phi_2 &= \frac{b}{a_2} H(\eta) e^{-2\eta^2 + \delta L \eta}, \\ H(\eta) &= 1 - \frac{\delta^2 L^2}{4} + \delta L \eta + 2\eta^2 + \delta L A(\delta L) \eta^3 \end{aligned}$$

(2.39) の実部をとって

$$\text{Re } u = W(\eta) \cos(\xi - x) \quad (2.40)$$

ここに $W^2(\eta) = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos(\phi_1 + \phi_2)$,

$$\tan x = \frac{A_1 \sin \phi_1 - A_2 \sin \phi_2}{A_1 \cos \phi_2 + A_2 \cos \phi_1}$$

及び $\text{Re } v = \text{Re}(i u) = -\text{Im } u$

$$= -W(\eta) \sin(\xi - x) \quad (2.41)$$

(2.40), (2.41) は storm の中心が海岸線上にあって、沖に向かって右側に進行するとき生ずる慣性周期の陸棚波 (2.23) に伴う流速変動の x, y 成分を表わしている。

この流れの場合における発散 (divergence) D は

$$\begin{aligned} D &= \frac{\partial}{\partial \xi} (\text{Re } u) + \frac{\partial}{\partial \eta} (\text{Re } v) \\ &= -[W'(\eta) + W(\eta)] \sin(\xi - x) \end{aligned} \quad (2.42)$$

で表わされるがもし $W'(\eta) + W(\eta) = 0$, または

$$W(\eta_c) = e^{-\eta_c}$$

を満すような $\eta_c > 0$ が存在するならば $\eta > \eta_c$ なる沖合と $\eta < \eta_c$ なる岸側では発散と収束が交互に生ずる筈である。沿岸海域における水平発散、収束は上昇または下降流の原因となり海水沿直混合に一役を演ずる (jouer un rôle) と思われる。

本論文は純粋に理論的で実際の観測値との比較、数値例などは今後の課題に残した。この概念が l'aménagement côtier を力学的に考察する基礎のひとつともなれば幸である。

Note :

$L=0$ のときの (2.25) の P, Q を解析的に表現した式は次のようである。
 $w_0 = \sqrt{2} k_0 / 4, k_0 = \delta L = fL^* / U$ である。

$$P_1 = \frac{\sqrt{e}}{16} \frac{f^2 L^*}{g\alpha} \left(1 - \frac{77}{64} K_0^2 - \frac{45}{16} A_0 \left(1 - \frac{3}{10} k_0^2 + \frac{115}{1656} k_0^4 \right) \right)$$

$$P_2 = \frac{\sqrt{2}}{8} \left(-\delta + \left(\frac{33}{64} - \delta \right) k_0 + \frac{1}{4} \left(\frac{33}{32} + \delta \right) k_0^2 - \left(\frac{13}{64} - \frac{\delta}{4} \right) k_0^3 + \frac{9}{32} A_0 k_0^3 \left(1 + \frac{11}{9} k_0 + \frac{49}{144} k_0^2 \right) \right)$$

$A_0 = A(k_0)$ は (2.9) をみよ。

$P_1 \approx O\left(\frac{f^2 L^*}{g\alpha}\right), P_2 \approx O\left(\frac{fL^*}{U}\right)$ の order だから

$P_1 / P_2 \approx O(\delta) = O(10^{-2})$

$$Q_1 = \frac{17}{64} \delta k_0^2 \left(1 - \frac{8}{17} k_0^2 \right) - \frac{45}{64} \delta A_0 \left(1 + \frac{k_0^2}{40} - \frac{59}{180} k_0^4 + \frac{k_0^6}{90} \right),$$

$$Q_2 = \frac{1}{128} \left(1 + 64\delta + \left(\frac{1}{2} + 64\delta \right) k_0 - \left(\frac{67}{4} - 16\delta \right) k_0^2 + 8 \left(1 - 2\delta \right) k_0^3 \right) + \frac{9}{64} k_0 A_0 \left(1 - \frac{k_0}{12} + \frac{k_0^2}{48} - \frac{4}{9} k_0^3 + \frac{k_0^4}{18} \right)$$

$K_0 = \frac{fL^*}{U} \approx \frac{1}{2}$ とすると $A_0 \approx 1$ だから Q_2 の leading term は

$\frac{5}{64} Q_1$ の leading term は $\frac{45}{64} \delta$ となり $\delta = O(10^{-2})$ のとき $Q_1 < Q_2$ となり Q_1 を省略してよい。結局

$$K(w_0) \approx i \left(P_2 e^{-k_0^2/8} + Q_2 \frac{\sqrt{x}}{2} \operatorname{erfc} \frac{\sqrt{x}}{4} k_0 \right)$$

の如く近似してよい。従って $K(w_0)$ の実部 K_1 は虚部 K_2 に比して省略してよい。

以上の近似に従えば (2.38) の a_1, a_2 は純虚数で $K(\pm \frac{\sqrt{2}}{4} \delta L) \approx i K_2 (\pm \frac{\sqrt{2}}{4} \delta L)$ であるから $a_1 = i \bar{a}_1, a_2 = i \bar{a}_2$ と記すことができ (2.39) は単に

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} u &= - \left(\bar{a}_1 e^{-\delta L \eta} + b e^{-2\eta^2} H \right) \sin \xi + \left(\bar{a}_2 e^{-\delta L \eta} + b e^{-2\eta^2} H \right) \sin \xi \\ &= \left(\bar{a}_2 - \bar{a}_1 \right) \sin \xi \\ &= \frac{r_0 L^2 \delta e^{-\delta L \eta}}{32 \pi^2 \alpha} \left[K_1 \left(-\frac{\sqrt{2}}{4} \delta L \right) - \frac{K_1 \left(\frac{\sqrt{2}}{4} \delta L \right)}{1-2\delta} \right] \sin \delta x \end{aligned}$$

でよい。

Fascicule 1 : Océanographie physique et dynamique sédimentaire
Modèles mathématiques de courantologie en zone littorale
Mathematical models of circulation for the littoral zone

Jean-Claude SALOMON
CENTRE D'OCEANOLOGIE DE MARSEILLE, FACULTE DES SCIENCES DE LUMINY
70, ROUTE LEON-LACHAMP, 13288 MARSEILLE CEDEX 9

Résumé

Les modèles mathématiques connaissent un grand succès dans le domaine de l'aménagement du milieu marin littoral. Ils fournissent à peu de frais des informations que l'on ne pourrait obtenir autrement, ni par la théorie mathématique, ni par des mesures in situ.

Dans cet exposé, les principaux types de modèles mathématiques sont passés brièvement en revue et classés en quatre grandes catégories : Les modèles à une dimension, à deux dimensions en plan horizontal ou vertical et les modèles à trois dimensions. L'intérêt du choix d'un type de modèle adapté à chaque problème est souligné.

Pour faciliter la comparaison des résultats obtenus dans chaque cas, on a respecté une unité de lieu : La baie et l'estuaire de la Seine.

Abstract

Mathematical models prove to be very successful in the fitting up of marine littoral zones. With relatively low expenses, they give a lot of informations one could neither obtain through the use of the mathematical theory alone, nor by in situ measurements.

In the following text, the main types of mathematical models are briefly reviewed, classifying them in four general categories : One-dimensional, two-dimensional models in vertical or horizontal plane and three-dimensional ones. The attention is focused on the interest of choosing the right type of model for every problem.

To compare the results obtained in each case a unique place has been retained : The bay of Seine and its estuary.

1. INTRODUCTION

En matière d'aménagements côtiers et de gestion du littoral, dès qu'on porte intérêt au milieu liquide, la courantologie est la première des données de la nature qu'il faut prendre en compte. Les masses d'eau, en se déplaçant, exercent des efforts sur les fonds et sur les ouvrages, entraînent dans leurs déplacements une multitude de constituants solubles ou non (particules sédimentaires, substances chimiques, organismes végétaux ou animaux) et créent les conditions de leur mélange.

Ce paramètre est donc à la base de la plupart des activités de l'homme dans le milieu côtier et, à ce titre, doit constituer le premier point d'intérêt pour les aménageurs et les gestionnaires de l'environnement.

Les moyens dont dispose l'investigateur, pour obtenir cette information, sont expérimentaux ou bien théoriques, mais dans tous les cas, le milieu littoral demeure particulièrement difficile à appréhender. La variabilité des phénomènes, leur diversité et leur intensité, imposent un effort de mesure si considérable que l'on est souvent contraint d'y renoncer. L'analyse théorique, quant à elle, bute sur un obstacle infranchissable : Les équations qui décrivent le comportement du système sont bien connues, mais hélas insolubles. Les plus grandes difficultés tiennent à leur nature non linéaire, ce qui signifie que toutes les composantes du mouvement sont liées entre elles, et à ce que les frontières solides, qui imposent des contraintes aux courants, ont une morphologie quelconque et ne peuvent s'exprimer sous une forme analytique.

Ces caractéristiques, qui opposent l'océanographie hauturière à celle du milieu côtier, limiteraient l'hydrodynamique à l'étude de cas d'école, forcement éloignés de la réalité, si l'informatique ne venait au secours de la théorie physique.

On peut envisager de résoudre les équations de l'hydrodynamique, aussi compliquées soient elles, et tenir compte avec précision de la forme des fonds en faisant appel à la résolution numérique par ordinateur. On construit donc des séquences de calcul, que l'on dénomme modèle mathématique ou modèle numérique.

Un intérêt majeur de cette technique est encore de permettre des simulations, c'est à dire que l'on peut se placer dans des situations hypothétiques de changement de la forme du domaine ou des conditions aux limites et connaître comment le mouvement de l'eau en serait affecté.

2. GENERALITES

Les modèles de courantologie résolvent les équations d'évolution d'une masse d'eau dont on a fixé les limites, à la condition de fournir sur ces frontières une série d'indications qui précisent à quelles sollicitations la masse d'eau se trouve exposée.

Ils constituent un excellent moyen d'investigation capable de donner des informations sous une forme à la fois synoptique et continue, qui a largement modifié le rôle de la mesure : On mesure des conditions aux limites, on étalonne et on vérifie les modèles à l'aide de quelques observations effectuées avec discernement, mais on confie au modèle la charge de couvrir l'espace d'intégration (spatial et temporel).

Le besoin de disposer de conditions aux limites pour les modèles littoraux s'est donc posé de façon croissante au cours des dernières années et l'une des raisons pour lesquelles le littoral atlantique et celui de la Manche ont été plus étudiés que celui de la façade méditerranéenne tient en partie à ce problème de conditions aux limites : Le signal "marée", qui est prédominant sur ses rivages, est en effet plus facile à définir sur la frontière extérieure que ne le sont les courants dus au vent ou à la circulation thermo-haline.

En théorie, tous les modèles de circulation devraient être tridimensionnels. Quelques prototypes de ce genre ont été présentés au cours des dernières années, mais demeurent encore des outils peu communs. Le plus souvent une description bidimensionnelle est suffisante et on se limite à des modèles en plan vertical ou en plan horizontal. Ces derniers sont désormais les plus

fréquemment employés en matière d'aménagement littoral. Leur technologie se perfectionne encore, mais on en possède une grande expérience et l'aspect novateur se situe plutôt dans l'usage qui en est fait.

Les modèles en plan vertical sont plus originaux. Ils sont plus délicats à mettre au point ou à utiliser, et les équipes qui en disposent sont moins nombreuses. Ils se révèlent pourtant très utiles en donnant accès aux mécanismes physiques de type barocline et de manière générale à tous les phénomènes pour lesquels la dimension verticale est importante, tel le transport des sédiments fins.

Les modèles à une dimension, enfin, sont les plus simples et les plus anciens. Ils ne concernent guère la recherche mais leur intérêt demeure entier car ils sont utilisés dans une proportion croissante pour répondre à des besoins de type industriel, parfois par les industriels ou aménageurs eux-mêmes.

3. MODELES UNIDIMENSIONNELS

Les modèles unidimensionnels schématisent la masse d'eau d'une manière que l'on qualifie de filaire, c'est à dire que seules sont considérées la valeur moyenne des courants dans une section de l'écoulement et la moyenne des niveaux sur la largeur.

Cette simplification, qui est rarement acceptable, limite beaucoup leur possibilité d'emploi. Elle est toutefois suffisante pour des voies d'eau peu profondes et beaucoup plus longues que larges, comme le sont les chenaux. Les lois physiques étant très sévèrement simplifiées, il s'introduit des paramètres arbitraires, dont dépend la solution, et qui font entrer dans cette technique une bonne part d'empirisme.

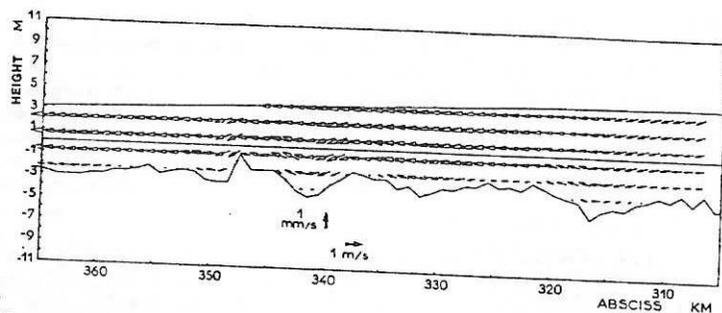
Les estuaires internes de la Loire, et surtout de la Seine (figure n°1), sont des sites d'application très indiqués pour ce type de modèle. Comme il a été signalé plus haut, ils bénéficient d'une grande expérience, et nombre d'aménagements aujourd'hui visibles dans ces estuaires ont été étudiés de cette manière. La nouveauté réside actuellement dans le transfert de la maîtrise d'oeuvre vers le secteur industriel qui les utilise à ses propres fins. Ainsi, le Port Autonome de Rouen emploie l'un de ces modèles pour aider à la gestion du trafic des navires et mieux planifier ses travaux de dragage.

4. MODELES BIDIMENSIONNELS EN PLAN VERTICAL

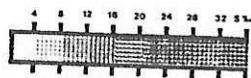
Lorsque les gradients latéraux des grandeurs hydrodynamiques sont assez faibles pour que des valeurs moyennes sur la largeur soient significatives, ces modèles effectuent une description de la nature dans un plan vertical disposé longitudinalement.



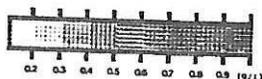
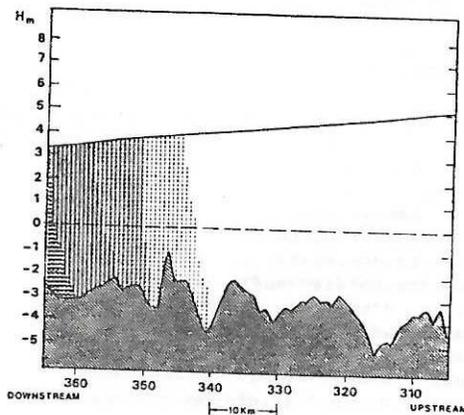
Figure n°1 : L'estuaire de la Seine. Location map for the Seine estuary.



Vitesses.
Velocities.



Salinités.
Salinities.



Turbidités.
Turbidities.

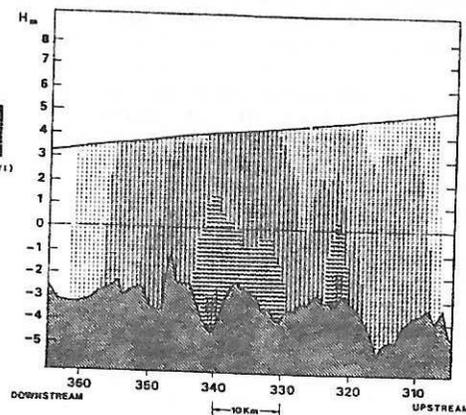


Figure n°2 : - Un exemple de champs de vitesses, de salinité et de turbidité dans l'estuaire intérieur de la Seine, durant le jusant.
- An example of velocity, salinity and turbidity fields in the inner part of the Seine estuary, during ebb.

Les informations que l'on en retire sont particulièrement utiles quand une variation horizontale de densité provoque une modulation du terme de gradient de pression au long de la verticale et donc une modification des courants.

Un tel modèle a été écrit, voici quelques années, pour les courants de marée dans l'estuaire de la Seine.

Le secteur situé à l'amont du Havre se prête bien à cette schématisation et l'on a obtenu de précieuses indications sur la courantologie instantanée (vitesses et écarts de phase à chaque niveau) et résiduelle, ainsi que sur la dynamique du système nodal. Ce type de modèle est le seul, avec les modèles à trois dimensions, qui permette de calculer le transport des sédiments fins de manière convenable, en tenant compte des flux verticaux turbulents, des vitesses de chute des particules ou des efforts exercés sur les fonds.

La figure n°2 (in Salomon, 1981) illustre ces résultats.

5. MODELES BIDIMENSIONNELS EN PLAN HORIZONTAL

Depuis une quinzaine d'années ces modèles ont remporté des succès très probants. Ils ont été longuement améliorés et bien que leur niveau de complexité soit très supérieur à celui des modèles à une dimension, ils sont devenus l'outil numérique habituel pour répondre aux questions d'aménagement littoral.

Deux techniques numériques se sont affrontées : La méthode des différences finies et celle des éléments finis. Cette dernière, plus récente et plus élaborée mathématiquement, est aussi plus lourde d'emploi et plus coûteuse. Elle n'a pas démontré sa supériorité dans les applications au domaine littoral car la conviction de mieux suivre la forme de la côte est souvent illusoire dans le cas d'estuaires ou de côtes en pente douce. Certaines méthodes aux différences finies peuvent également utiliser un maillage curviligne ou irrégulier, mais on a souvent intérêt, pour un même coût financier, à diminuer la dimension d'un maillage régulier.

En dehors de ces aspects de "technique numérique" que l'on doit pouvoir omettre puisque la solution physique est indépendante de la manière dont on l'a déterminée, ces modèles ont fait progresser notre compréhension de la circulation des masses d'eau, d'une manière considérable.

On a pris conscience que l'on ne réalisait pas des modèles de sites, mais des modèles de certains processus physiques dans ces sites. La simplification des équations de Navier-Stokes, la délimitation d'un domaine et sa schématisation, le choix d'un pas de temps et la durée de la simulation jointe aux incertitudes des conditions aux limites et à certains effets numériques font qu'un modèle n'est apte à reproduire qu'un nombre limité de phénomènes physiques dont le secteur que l'on considère peut être le siège.

A partir de cette constatation, il est possible de mieux cerner les questions auxquelles on entend apporter une réponse et éviter des déboires ultérieurs en situant l'essentiel de l'effort de réflexion au niveau du choix des facteurs physiques importants et de la définition des caractéristiques du modèle.

A titre d'illustration, considérons la circulation résiduelle engendrée par la marée dans la baie de la Seine : On a construit, par le passé plusieurs modèles mathématiques des courants de marée dans la Manche et donc dans la baie. Il était tentant de conclure ces études par des cartes de courants résiduels (eulériens).

Ces champs de vecteur ne représentent pas la circulation des masses d'eau à long terme, qui est une grandeur lagrangienne, et qui est la seule à posséder une signification physique. Pourtant, grâce à une couverture spatiale et temporelle assez serrée, les modèles peuvent donner accès aux déplacements en simulant la trajectoire de particules fictives (figure n°3). Pour décrire correctement ces trajectoires il est clair que le maillage doit avoir une taille nettement inférieure à l'excursion de la marée. On en déduit un rapport

critique entre le courant de marée et la taille maximum admissible pour le d'espace, que peu de modèles ont respecté jusqu'ici.

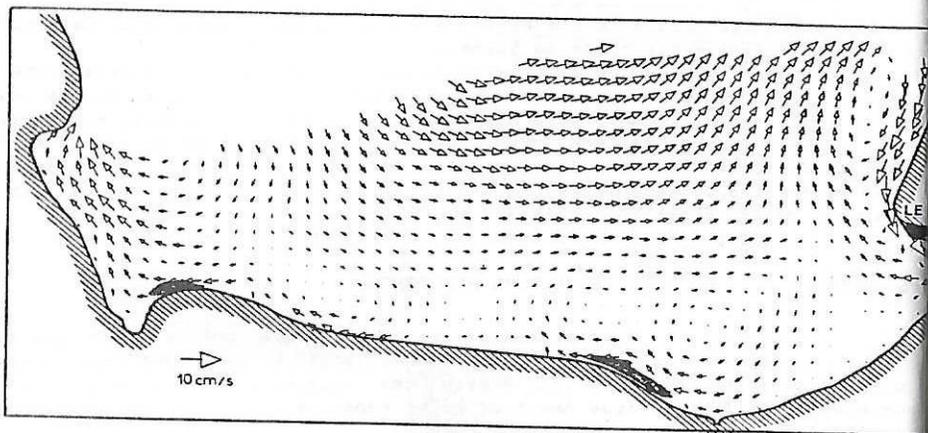


Figure n°3 : Circulation résiduelle de Lagrange dans la baie de la Seine. Lagrangian residual velocity field in the bay of Seine.

On démontre simplement : $Dx < 8000 * A / (H)^{\frac{1}{2}}$

où : Dx est le pas de discrétisation spatiale; A est l'amplitude de l'onde de marée et H est la profondeur.

On peut poursuivre l'analyse et, en se fondant sur la correspondance des échelles d'espace et de temps, établir une relation entre la taille du domaine et la durée sur laquelle cette opération "résiduelle" doit être effectuée.

On pourrait encore, si l'on disposait ici de plus d'espace, montrer comment ces modèles sont utilisés, non plus pour décrire, mais pour analyser certains mécanismes très fins, en séparant les effets propres à chaque terme des équations, comme la combinaison des variations de profondeur et de la force de Coriolis qui engendrent des courants résiduels littoraux.

On retiendra que ces modèles sont des outils de très grande valeur dont il est indispensable de posséder une bonne maîtrise lorsque l'on travaille en milieu littoral, et que la nouveauté se déplace du plan de la technique numérique à celui de l'usage que l'on en fait en recherche appliquée ou fondamentale.

6. MODELES TRIDIMENSIONNELS

Dans les zones littorales, même peu profondes, les courants montrent généralement de grandes différences sur la verticale. Le frottement sur le fond, la force du vent, la topographie irrégulière et les gradients de densité très intenses au voisinage des estuaires, se conjuguent pour créer une circulation réellement tridimensionnelle. Cet aspect a souvent été passé sous silence parce que difficile à observer et à mesurer, mais les moyens de calcul modernes permettent d'étudier cette question à l'aide de la modélisation numérique.

On peut traiter le problème en découplant le calcul du champ moyen horizontal de celui de la structure verticale (Heaps, 1980 ; Nihoul, 1977 ; SALOMON et al, 1981) ou bien celui des modes barotropes et baroclines (Sheng et al, 1978 ; Blumberg et al, 1980), ou encore résoudre directement le système tridimensionnel des équations de Navier-Stokes. Cette dernière famille se sépare elle-même en modèles "à couches" (Leendertse et al, 1978) et en modèles à "valeurs ponctuelles" (Thouvenin et al, 1984).

Chaque technique possède, bien entendu, ses avantages et ses inconvénients, de sorte que, ici encore, la réflexion que l'on se doit de mener au stade initial du choix du type de modèle le mieux approprié à fournir une réponse aux questions que l'on se pose, est absolument essentielle.

Le site de la baie de Seine a été successivement l'objet de modélisations tridimensionnelles par découplage des champs horizontaux moyens, et de la structure verticale, ainsi que d'un modèle totalement tridimensionnel en valeurs ponctuelles. Ce dernier a la particularité de conserver un maillage fixe, et d'ajuster le nombre de points de calcul à la taille instantanée du domaine qui varie au gré de la marée.

Cette technique, qui utilise des points de calcul virtuels, a été décrite en détail par B. Thouvenin (Thouvenin et al, 1984).

Ces modèles sont encore largement perfectibles. Le paramétrage des coefficients d'échanges turbulents est souvent schématique et des conditions aux limites précises sont rarement disponibles. Mais ils fournissent d'ores et déjà de très bonnes informations sur les variations de phase et d'intensité des courants au long des verticales, leur changement de direction près du fond, l'action des gradients de densité qui créent une circulation inversée entre le fond et la surface ainsi que des mouvements verticaux ou encore sur l'action du vent. Ce dernier aspect est illustré sur la figure n°4 (in Le Hir et al, 1985) où l'on peut observer à quel point le relief des fonds (plus que la forme de la côte) guide les courants en profondeur.

7. CONCLUSION

La technologie des modèles mathématiques de courantologie, apparue il y a une vingtaine d'années, n'a cessé de progresser et leur emploi s'est généralisé. Nul doute que le développement rapide de l'informatique accélérera encore cette évolution.

Les quatre grandes familles que l'on a présenté ici sont schématiques et cachent en réalité nombre de variantes plus ou moins élaborées et performantes.

Tous les mécanismes dynamiques qui ont une influence sur la courantologie ne sont généralement pas pris en compte et chaque simplification se traduit par une part d'arbitraire sous la forme de coefficients ou de paramètres d'ajustement. Les modèles les plus simples dans leur formulation finale, sont donc ceux qui sont les moins généraux parce qu'ils comportent la plus grande part d'empirisme. D'une manière analogue aux modèles physiques, ils conservent l'empreinte de leur concepteur, dont l'expérience et le sens physique sont essentiels.

Les modèles les plus récents sont plus complets et plus généraux. Ils raffinent le formalisme des lois et multiplient les facteurs pris en compte. Leur conception faisant appel à des compétences toujours plus étendues, ce sont désormais des équipes de mathématiciens, de numériciens, d'informaticiens et de physiciens qui les mettent au point et laissent la disposition des gestionnaires de notre littoral des outils incomparables.

Le devoir des aménageurs est de suivre l'évolution de cette technique et d'y faire appel sans cesse davantage.

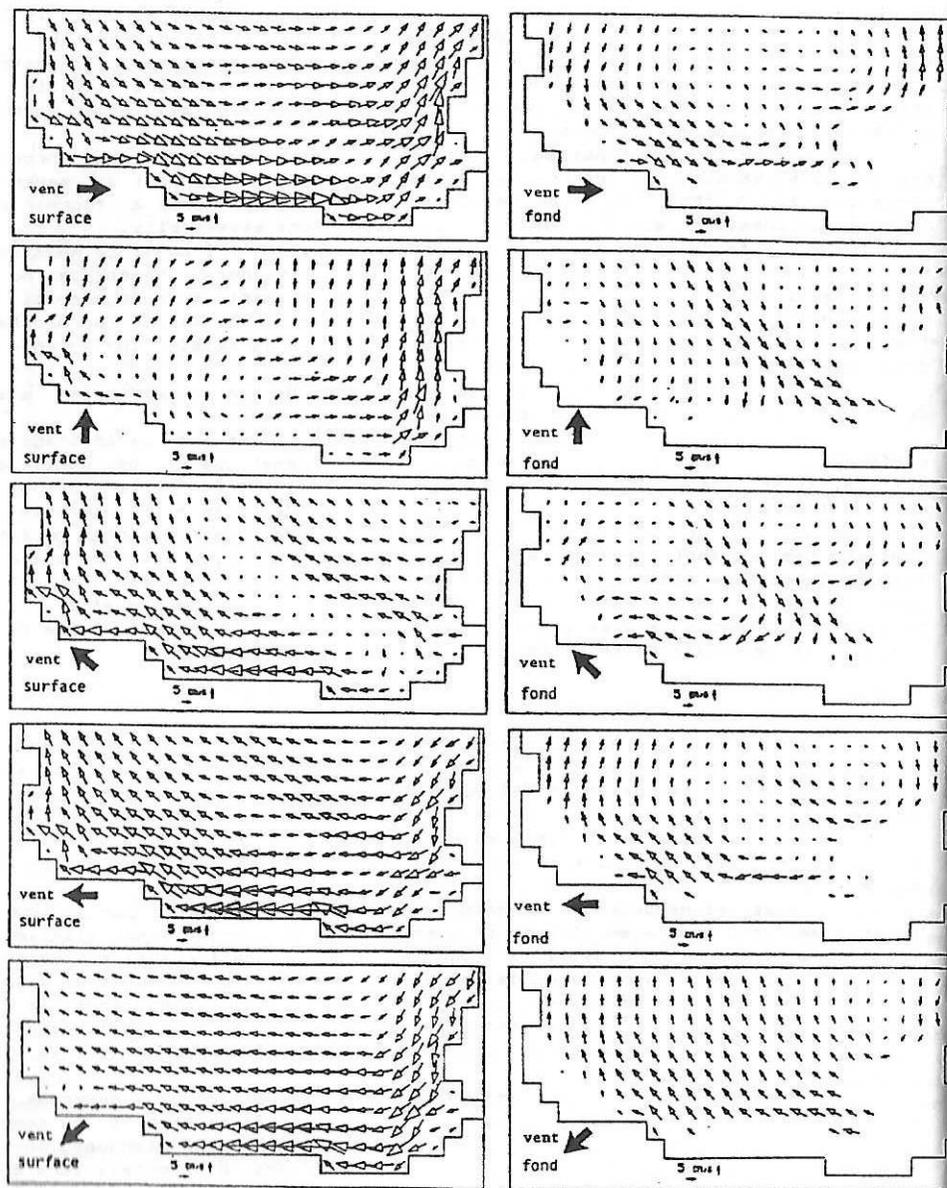


Figure n°4 : Simulation tridimensionnelle des courants dus au vent.
 Three-dimensional simulation of wind induced currents.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BLUMBERG A. et MELLOR G.L. (1980). A coastal ocean numerical model. Lecture notes on coastal and estuarine studies. Mathematical modelling of estuarine physics, ed. Sundermann, Springer Verlag, Berlin, 203-214.

HEAPS N.S. (1980). Spectral method for the numerical solution of the three dimensional hydrodynamic equations for tides and surges. Mathematical modelling of estuarine physics, ed. Sundermann, Springer Verlag, Berlin, 75-89.

LEENDERTSE J.J. et LIU S.K. (1978). A Three dimensional turbulent energy model for non homogeneous estuaries and coastal sea systems. In : Hydrodynamics of estuaries and fjords, ed. J.C.J. Nihoul, Elsevier, Amsterdam, 387-405.

LE HIR P., SALOMON J.C., LE PROVOST C., CHABERT D'HYERES G., MAUVAIS J.L. (1985) Approche de la circulation résiduelle en baie de Seine. Colloque Baie de Seine, Caen 24-26 avril.

NIHOUL J.C.J. (1977). Three dimensional model of tides and storm surges in a shallow well mixed continental sea. In : Dynamics in atmosphere and oceans, ed. J.C.J. Nihoul, Elsevier, Amsterdam, 29-47.

SALOMON J.C. (1981). Modelling the turbidity maximum in the Seine Estuary. In Echohydrodynamics, editeur J.C.J. Nihoul, Elsevier, Amsterdam.

SALOMON J.C. (1985). Courantologie calculée en baie de Seine. Colloque Baie de Seine, Caen 24-26 avril.

SALOMON J.C. et LE HIR P. (1981). Etude de l'estuaire de la Seine. Modélisation des phénomènes physiques. Université de Bretagne Occidentale, 286 p.

SHENG Y.P., LICK W., GEDNEY R.T., et MOLLS F.B. (1978). Numerical computation of three dimensional computation in lake Erié. A comparison of a free surface model and a rigid-lid model. J. Geophys. Oceanogr., 8 :713-727.

THOUVENIN B. et SALOMON J.C. (1984). Modèle tridimensionnel de circulation et de dispersion en zone côtière à marée. Océanologica Acta, Vol.7, N°4 : 417-429.

COLLOQUE FRANCO-JAPONAIS D'OCEANOGRAPHIE
Marseille 16-21 Septembre 1985

Fascicule 1 : Océanographie physique et dynamique sédimentaire

Impacts des opérations de remblaiements
dans l'aménagement littoral

Impact of filling operations in seashore arrangement

François OTTMANN

UNIVERSITE DE NANTES, LABORATOIRE DE GEOLOGIE MARINE
2, RUE DE LA HOUSSINIÈRE, 44072 NANTES CEDEX

Résumé :

La réalisation des remblais est envisagée du point de vue de leurs nuisances, pendant et après leur réalisation. Les avantages et les inconvénients, les conséquences sur l'environnement marin sont étudiés pour chacune de ces diverses activités.

On analyse les conséquences sur l'environnement marin, notamment celles d'ordre géologique liées à la turbidité des eaux, aux modifications des fonds etc...

Enfin, on met en lumière l'aspect cyclique et répétitif de ces faits qui modifient à la longue totalement l'aspect et l'équilibre du littoral.

Abstract :

Filling operations are considered under the point of view of their nuisances during and after their execution, whereas the advantages, the disadvantages and the consequences upon the marine environment are discussed for each one of these different activities.

The after-effects upon the marine environment - notably those of geological order connected with water turbidity, sea-bottom modifications, etc, are further analysed.

Finally, the Author brings to light the cyclical and recurring aspect of those facts that, in the long term, totally modify the aspect and the balance of the littoral.

1.- INTRODUCTION

Lors des grands aménagements littoraux, les dragages et les remblais comptent parmi les travaux les plus importants. Les premiers visant à faciliter la navigation, les seconds à préparer de nouveaux espaces industriels-portuaires et parfois même des zones urbanisées ou touristiques.

Ces opérations et leurs conséquences font souvent l'objet de critiques des écologistes littoraux, fréquemment d'ailleurs par suite de méconnaissance des techniques employées. C'est pourquoi, nous allons rappeler quelques notions générales sur ces problèmes.

1.2. - On distingue plusieurs types de dragages :

- d'entretien qui consistent à enlever les sédiments récemment déposés dans les chenaux de navigation ou les bassins. ils portent sur des sédiments récents, souvent vaseux, et souvent pollués (hydrocarbures, métaux lourds, matière organique, etc... détritiques divers),

- d'approfondissement, on creuse les chenaux en attaquant des formations géologiques vieilles parfois de millénaires et donc exemptes de pollution, mais qu'il faut évacuer,

- d'extraction de sables ou agrégats, on recherche tout des matériaux de qualité, assez près du lieu d'emploi ou de vente. Ce sont en général des formations fossiles, anciens rivages ou terrasses alluviales que l'on tente d'exploiter en profondeur sur de faibles surfaces afin de limiter l'impact sur le milieu marin.

De même, du point de vue de la méthode de dragage, on distingue les dragages mécaniques (pelle, godets, etc...) qui se prêtent mal aux remblais, et les dragages par aspiration. Ces dragues fonctionnent comme de gigantesques aspirateurs et surtout peuvent refouler les matériaux dragés directement à terre ou vers la zone de remblais, au moyen de longs tuyaux flottants.

2.- LES REMBLAIS

Souvent en vue d'aménager des zones portuaires on est amené à faire de vastes remblais.

Là aussi, il faut distinguer :

- les remblais, réalisés par voie terrestre, avec des matériaux routiers, à partir de matériaux de carrière ou marins venant d'un dépôt, les conséquences sont plus limitées sur le milieu marin, surtout s'ils sont réalisés à l'arrière de digues de rétention,

- les remblais réalisés par voie hydraulique où des dragues refoulent par des tuyaux un mélange de sédiments et d'eau (dans les proportions de 1 à 10 ou 12 fois en volume).

Les sables et les graviers restent en place, et les fines (vases) sont évacuées avec les eaux et retournent à la mer. On retrouve les mêmes problèmes de turbidité que pour la phase des dragages par aspiration.

Ce mode de remblai offre de gros avantages pour la mise en place de zones de baignade sans les aléas des problèmes de circulation routière.

D'autre part, le remblai hydraulique permet des travaux dans une frange de 1 à 2 km de large, parallèle au littoral, et souvent en bordure de quais en eau profonde, d'où son intérêt pour les travaux portuaires et touristiques sur le littoral.

Enfin, il est incontestablement parmi les plus économiques d'où son extrême développement dans les aménagements littoraux. C'est pourquoi, nous allons l'étudier plus particulièrement.

2.1. - Localisation des remblais

Par rapport à la côte, on peut définir :

- ceux off-shore ou gagnés sur la mer, comme les immenses remblais de la baie de Tokio,

- ceux liés au littoral même, souvent de type touristique ou urbain :

. vastes remblais et autoroutes de la baie de Rio (Botafogo, Flamengo, etc...),

.. "bords de Mer" gagnés en partie sur la dune et plus encore sur la plage (ex: la promenade des Anglais à Nice, la Croisette à Cannes, le remblai de la Baule, parmi les plus célèbres en France),

. ceux gagnés sur les "zones humides", marais roselières, vasières latérales, lagunes littorales, etc..., dont on parle beaucoup moins.

3.- CONSEQUENCES DES REMBLAIS

Alors que les dragages modifient assez peu la morphologie des lieux, puisque agissant sur le fond sous l'eau, les remblais bouleversent profondément le paysage, l'écologie, voire l'économie du littoral.

Nous allons examiner leurs conséquences sur le milieu pendant leur construction, puis après, à court et long terme.

3.1. - Pendant les travaux

3.1.1.- Turbidité des eaux de rejet - Pour la mise en place de remblais, rappelons et c'est essentiel, qu'il faut déverser 10 à 12 fois plus d'eau que de sable. Cette eau doit retourner à la mer chargée des sédiments fins, et les rejets de fines prennent alors une ampleur souvent non soupçonnée. A titre d'exemple, donnons ici un rapide calcul :

- pour un remblai de 2 m sur 1 km², il faudra mettre en place 2 millions de m³ de sédiments. Compte tenu des pertes proportionnelles aux fines, il faudra par exemple refouler 2,6 millions de m³ de sable vaseux à 30 % de vase, et environ 30 millions de m³ d'eau, en général salée. Ces eaux retournent à la mer chargées de 600.000 m³ soit 1 million de tonnes de vase (en poids sec)... correspondant à une concentration de 33 g/litre, c'est-à-dire des eaux très boueuses. Ces turbidités obligent par exemple à interrompre certains travaux dans les zones touristiques pendant la saison balnéaire.

De même, d'importantes précautions doivent être prises pour éviter le dépôt des vases sur des zones conchylicoles, par exemple : le refoulement en jusant ou en flot seulement; choix d'un sédiment à refouler très sableux, pur si possible, ou avec peu de fines.

Enfin, lorsque les zones de remblais s'effectuent au voisinage de fonds à végétaux (prairies à cymodocées ou à posidonies ou champs d'algues), ces plantes souffrent particulièrement des éléments fins.

Ainsi, Astier et al en 1984 ont montré qu'un remblai de 22 ha au Mourillon près de Toulon a détruit ou endommagé environ 200 ha de

prairies sous marines, soit 10 fois la surface du remblai ayant déjà lui-même recouvert 20 ha de fonds à végétaux.

3.1.2.- Problème du sel - Si des précautions ne sont pas prises lors des remblais en site terrestre, l'eau salée de refoulement peut s'étendre sur l'arrière pays, détruire les récoltes et saliniser la nappe phréatique.

Ceci est arrivé à Récife (Brésil) vers 1960 où une vaste zone humide avec cultures, et habitations alimentées par puits fut stérilisée.

3.1.3.- Problèmes liés aux tuyauteries de refoulement qui gênent parfois la navigation ou la circulation sur le remblai.

3.2.- Après les travaux

3.2.1.- Conséquences sur la morphologie

- Des espaces marins sont devenus terrestres. La forme du littoral change, surtout dans le cas de remblais off-shore qui forment des zones saillantes exposées aux houles et courants, et des rentrants s'accumulent les sédiments et les débris flottants.

3.2.2.- Conséquences sur l'hydraulique

- Les courants littoraux peuvent être arrêtés déviés, modifiant les zones de dépôt ou d'érosion comme cela est arrivé dans l'estuaire de la Loire après un dépôt de dragage de 10 millions de m³ (Ottmann et Mougani, 1984)

- Les houles sont souvent fort affectées par les remblais. Les pentes douces des vasières ou des plages amortissant les houles sont remplacées par des digues d'enrochement, ou des murs subverticaux dans leur ancienne zone de déferlement. Elles peuvent se relâcher sur ces obstacles, parfois s'amplifier et amener la destruction des ouvrages. Ainsi pour les "bords de mer", le mur du remblai provoque un ressac violent conduisant à un raidissement du profil de la plage et même à sa disparition (ex: Nice).

- Certaines zones d'estuaire peuvent se trouver retrécies par les remblais. Les courants y seront plus violents et l'écoulement des crues plus difficile, car elles auront perdu une partie de leur zone d'expansion.

3.2.3.- Conséquences sur l'hydrologie

Les remblais sont en général bordés de digues d'enrochement supprimant ainsi toute berge naturelle. C'est ce que j'ai appelé "l'artificialisation" des berges qui dans l'estuaire de la Loire atteignent 78 % en 1978 (Ottmann, 1978). Il convient de rappeler l'importance des échanges sédimentologiques, biologiques, géochimiques entre l'eau, les sédiments, la végétation comme l'ont montré de nombreuses thèses réalisées au laboratoire (travaux de Gouleau, Diara, Boutelier, Sornin: voir bibliographie in fine).

Du seul point de vue hydrologique, insistons sur le pouvoir de réoxygénation des eaux jusqu'à 300 %, l'enrichissement en silicium, magnésium et nutriments des eaux qui s'écoulent des vasières à basse-mer. Les eaux enrichies permettent le développement des premiers maillons de la chaîne alimentaire d'où la haute productivité des vasières.

Ceci m'a fait dire, par boutade, que du point de vue de la productivité, empierrement des rives produit le même résultat que si les agriculteurs empieraient leurs champs (Ottmann, 1978)!

3.2.4.- Conséquences sur le drainage de l'arrière pays

La technique du refoulement hydraulique valable jusqu'à 1 ou 2 km maximum va limiter les remblais à la frange littorale. Ce sera donc en général des remblais étroits, alignés le long du littoral.

Les remblais ainsi réalisés sur les berges de l'estuaire de la Loire ont empêché l'écoulement des eaux de pluies sur les terrains qui se trouvaient derrière. Ces prés de fauche ou de pâture se sont rapidement transformés en zones hydromorphes, marécageuses, envahies par les joncs. Elles ont perdu leur valeur agricole, et leurs propriétaires ont tenté de s'en défaire en les vendant pour les remblayer et en faire de nouvelles zones industrielles...

3.2.5.- Destruction des zones humides

Depuis le début du siècle, on a remblayé environ 10.000 ha de zones humides, dans l'estuaire de la Loire, de Nantes à Saint-Nazaire, sur un ensemble estimé de l'ordre de 30.000.

De nombreux étiers ont été plus ou moins comblés dont les bras de Cordemais, du Migron, l'étier de La Taillée et de Martigné. Aussi a-t-on tenté de "classer" en zone protégée un certain nombre de zones humides afin de maintenir des coupures vertes entre les remblais. Je ne m'étendrai pas ici sur le rôle écologique de ces zones humides maintenant bien connu du point de vue sédimentologique, biologique, pêche, refuge et nidation des oiseaux. C'est sans doute dans cette destruction définitive et irrémédiable des zones humides que résident les plus graves atteintes à l'environnement marin.

En effet, si l'on peut parfois justifier la destruction des zones humides par des implantations industrielles, ce n'est pas toujours le cas :

Dans la plupart des estuaires français, de vastes remblais réalisés à la fin de la décennie 70-80 sont, par suite de la crise, restés totalement inoccupés jusqu'à présent : 700 ha à Lavau, 400 ha au Carnet, quelques centaines d'hectares à Montoir rien que pour l'estuaire de la Loire. Il doit en être de même au Verdon en Gironde et dans la basse Seine.

3.2.6.- Aspect socio-touristique

La transformation des zones humides naturelles en remblais industrialo-portuaires s'accompagne trop souvent, hélas, d'une privatisation des berges par des clôtures diverses. Ainsi le bord de mer ou de l'estuaire devient-il inaccessible aux promeneurs, aux pêcheurs, aux amoureux et poètes venant rêver au bord de l'eau... Depuis 20 ans, environ 5 km de berges de l'estuaire de la Loire se sont trouvées englobées dans des installations, et interdites d'accès, alors que la libre circulation sur le bord est une légitime revendication.

4.- ASPECT CYCLIQUE DES DRAGAGES/REMBLAIS/INDUSTRIALISATION

L'augmentation des tirants d'eau des navires, surtout au cours des 50 dernières années, conduit à de nombreux travaux d'approfondissement dans tous les ports du monde. Ces dragages se sont accompagnés de vastes remblais pour utiliser les matériaux dragués et créer de nouvelles zones industrielles. Très vite après leur installation, ces industries ont demandé un nouvel approfondissement donc de nouveaux dragages et de nouveaux remblais.

Ainsi, dans l'estuaire de la Loire, les premiers remblais de la zone industrialo-portuaire de Montoir (entre Donges et Saint-Nazaire) furent

terminés vers les années 72, bordant un chenal de -10,5m(CM). Quelques industries s'y installèrent, regrettant de n'avoir pas un tirant d'eau supérieur.

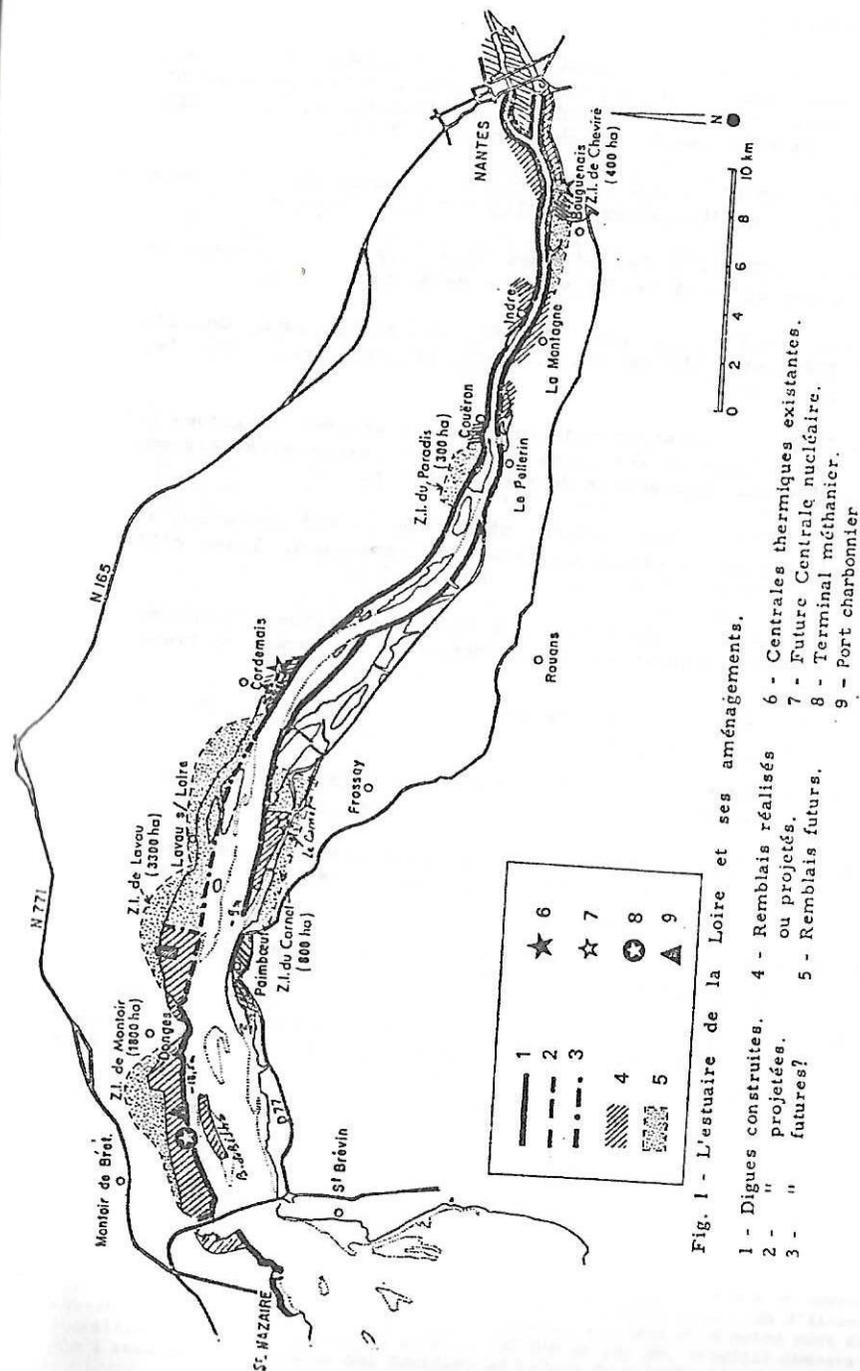
C'est alors que surgissent deux projets : le Terminal Méthanier et le Port charbonnier qui exigeaient des profondeurs supérieures. Aussi, entre 1979-1981 fut réalisé un nouveau programme de travaux pour porter l'accès à -13,25 m, avec dragage de 53 millions de m³ de matériaux, et des nouveaux remblais sur 2000 ha environ (Montoir, Lavau, Le Carnet). Ces nouveaux remblais devaient accueillir de nouvelles industries lourdes, projet qui fut interrompu par la crise économique des dernières années .

Toutefois, en vue de rentabiliser ces investissements et favoriser l'installation d'industries nouvelles sur ces zones remblayées et restées vierges, on envisage de porter le chenal à 14,50 m jusqu'à Donges, et 11 m au Carnet..... ce qui entraînera sans doute de nouveaux remblais!

5.- Conclusions

Au terme de ce travail, il apparaît que les phases de remblaiement sont parmi les travaux d'aménagement maritime, celles qui perturbent le plus l'écologie du littoral, nettement plus que les dragages eux-mêmes. Elles sont en effet irréversibles car la surface remblayée est à jamais soustraite au milieu naturel.

Leur aspect cyclique et répétitif, notamment par les destructions successives des zones humides ou des prairies sous-marines, apportent certainement les plus fortes transformations du milieu littoral avant les bouleversements socio-économiques qui vont découler de l'industrialisation.



BIBLIOGRAPHIE

- ASTIER J.M., MORETEAU J.C, TAILLEZ Ph. et VICENTE N. (1984). - Impact de aménagements sur la zone infralittorale méditerranéenne. 18èmes Journées de l'Hydraulique, Marseille, 11-13 sept. L'Hydraulique et la maîtrise du littoral, rapport V-12.
- BOUTELIER P. (1978). - Les roselières et l'oxygénation des eaux estuariennes Colloque "Estuaires et Deltas" U.O.F., Montpellier.
- BOUTELIER P. (1979). - Le rôle des roselières dans l'estuaire de la Loire Thèse de 3° Cycle, Université de Nantes, 136 p.
- DEMAURE J.C. (1979). - Les contraintes écologiques de l'aménagement de l'estuaire de la Loire. Penn ar Bed, vol. 12, fasc. 2, n° 9 p. 57-72.
- DIARA M. (1983). - Echanges hydrologiques et sédimentologiques entre l'estuaire de la Loire et ses zones marginales (vasières-étiers-marais). Thèse de 3° Cycle, Université de Nantes, 226 p.
- GOULEAU D. (1975). - Les premiers stades de la sédimentation sur les vasières littorales atlantiques. Rôle de l'émersion. Thèse d'Etat, Université de Nantes, 242 p. + 123 p. annexe, 8 pl.
- LAHUEC G. (1973). - Contribution à l'étude de quelques problèmes géologiques liés au dragage en mer. Thèse de 3° Cycle, Université de Nantes, 230 p.
- MACQUET J.F.(1973). - Aménagement de l'estuaire de la Loire. Sc Hydrotechnique de Fr., 21-22 juin, p. 15.
- MANAUD F. et MOMBET Y. (1980). - Evaluation des zones humides estuariennes littorales. Contrat C.N.E.X.O., 80/5855/F - O.R.E.A.M. Nantes.
- OTTMANN F. (1971). - Problèmes géologiques liés aux aménagements portuaires Coll. int. Exploitation des Océans, Bordeaux, 9-12 mars, thème t. 1, 38 p. 7 fig.
- OTTMANN F. (1979). - Conséquences des aménagements sur le milieu estuarien. J. Rech. Océanogr., vol. IV, n° 2, p. 11-24.
- OTTMANN F. et MOUGANI B. (1984). - Les modifications dans la répartition des sédiments et dans la circulation des eaux consécutives à un dépôt dragage dans la partie aval de l'estuaire de la Loire. 18èmes Journées de l'Hydraulique, Marseille 11-13 sept. Rapport V-9

COLLOQUE FRANCO-JAPONAIS D'OCEANOGRAPHIE
Marseille 16-21 Septembre 1985

Fascicule 1 : Océanographie physique et dynamique sédimentaire
Analyse des facteurs d'évolution de la Pointe d'Arçay ;
quantification de sa progression
*Pointe d'Arçay evolution factors analysis ;
quantification of its growth*

Pascal GALICHON
ECOLE NATIONALE DES TRAVAUX PUBLICS DE L'ETAT, 2, RUE ALFRED-FOUILLEE, 75013 PARIS

Résumé

La flèche littorale de la Pointe d'Arçay (Vendée-France), longue d'environ 6 km se développe au N-E du Pertuis Breton depuis plus de deux siècles et demi sous la forme de crochons (ou crochets) sédimentaires successifs.

Les facteurs dynamiques qui interviennent dans sa constitution sont tout d'abord analysés.

L'étude de la marée, faite à partir de 600 courbes marégraphiques à principalement permis d'établir :

- a - que son amplitude dans le secteur de la Pointe d'Arçay est supérieure à celle des ports de référence qui l'entourent (unité de hauteur = 2,98 m)
- b - la courbe donnant la durée d'immersion en fonction de l'altitude,
- c - que les ondes quarts et sixièmes diurnes sont relativement importantes à cause des frottements et autres phénomènes non linéaires,
- d - qu'il existe un effet de stockage de la marée dans le Pertuis Breton mis en évidence par l'analyse du rapport durée du flot sur durée du jusant.

En l'absence de mesure en nature, la houle a été évaluée en partant de la houle au large, obtenue à partir du modèle DSA V de la météo marine, puis sa propagation a été étudiée avec des programmes de réflexion et diffraction. De cette étude ressortent principalement trois points :

- a - les houles au large ont une amplitude H 1/10 mensuel variant de 2 à 4 m et des directions variant de 245° à 300° avec une prédominance pour 285°,
- b - à l'entrée du Pertuis Breton les houles ont perdues 50 % à 90 % de leurs énergies et leurs directions se concentrent autour de 285° plus ou moins 5°,
- c - du fait de la complexité de la bathymétrie du Pertuis Breton la propagation de la houle y est perturbée et est difficilement quantifiable. Cependant, l'obliquité de la houle sur la Pointe d'Arçay semble être de 30° et la hauteur de l'ordre de 0,80 à 1,50 m.

L'analyse des facteurs inertes a été faite à partir de l'étude granulométrique du crochon terminal, celle-ci associée à des études antérieures en laboratoire a permis de proposer une théorie sur la formation et l'évolution des crochons : lorsque l'angle houle - trait de côte dépasse 55° il peut se former une structure sédimentaire telle que l'angle de 55° soit conservé car il correspond à un angle d'équilibre en transit saturé et la formation pivote lorsque le transit décroît.

Enfin l'analyse des cartes et photographies aériennes a permis de proposer d'une part une loi de progression de la Pointe d'Arçay (son taux d'allongement semble proportionnel à la racine carrée de son âge) et d'autre part de quantifier le transit littoral à environ 200 000 m³ par an, résultat comparable à ceux obtenus à l'aide des formules de calcul du transit littoral.

Abstract

The littoral sans spit of the Pointe d'Arcay (Vendée-France) which marks the Pertuis Breton N-E extremity, is nearly 6 km long and the succession of hooks makes it grow since more than two and half centuries.

In first the dynamic factors are analysed.

The tide study done with 600 tidal curves gives mainly the following results :

- a - the tide amplitude is higher than in the surrounding ports,
- b - the immersion duration time in fonction of the height,
- c - the quarter and sixth diurnal tidal waves are relatively quite important, this is due to the friction and others non linear effects,
- d - a stockage effect of the tide in the Pertuis Breton is shown with the study of the ratio flood duration versus ebb duration.

Whithout local measures, the waves have been estimated offshore with the Meteo-Marine prediction model DSA 5 and their propagations with refraction and diffraction mathematical models.. The main results are :

- a - the monthly H_{1/10} varies from 2 to 4 m and their directions from 245° to 300° with a majority from 285°,
- b - at the Pertuis Breton entrance waves have loose 50 to 90 % of their energies and their directions are 285° more or less 5°,
- c - due to the Pertuis Breton complex bathymetry, the wave propagation is very pertubed and is quantifiable with difficulty. Meanwhile the wave obliquity at the Pointe d'Arcay seems to be nearly 30 and the wave height from 0,80 to 1,50 m.

The inert factors analysis is done from the last hook grainsize study, that one associated to previous laboratory experiments allowed to propose a hook formation and evolution theory : when the angle between the coast and the wave is more than 55 a sedimentary structure could be formed so that the angle of 55 could be conserved because it corresponds to an equilibrium angle when the littoral transit becomes saturated and the hook turn inside when the littoral transit decreases.

At least charts and aerial pictures analysis allowed to propose on the one hand a progression law of the Pointe d'Arcay (its elongation rate seems to be proportional to its "age" square root) and in the other hand a quantification of the littoral transit to 200 000 m³ per year, result comparable with those obtain with littoral transit formulae.

FIGURES

- Fig. 1 : Localisation de la Pointe d'Arcay (crochons et plateforme)
Pointe d'Arcay localization (hooks and platform)
- Fig. 2 : Détermination de l'Unité de hauteur
height Unity determination
- Fig. 3 : Taux d'immersion en fonction de l'altitude
immersion rate in terms of the altitude
- Fig. 4 : Cycles du rapport -durée du flot/durée du jusant, d'une demi -lunaison
Cycles of ratio -flood Direction/Ebb duration of an half lunation
- Fig. 5 : Plans de houle d'approche A et local B (programme VAG-STCPMVN)
Approach and local Waves propagation map (Program VAG-STCPMVN)
- Fig. 6 : Pourcentage d'énergie pénétrant dans le Pertuis Breton
Energy percent which enter in the Pertuis Breton
- Fig. 7 : Zones granulométriques du crochon terminal
Grain sizes sectors of the terminal hook
- Fig. 8 : Variations des indices granulométriques
Grain sizes parameters values
- Fig. 9 : Evaluations du taux d'allongement de la Pointe d'Arcay
Lengthening rate evaluations of the Pointe d'Arcay
- Fig.10 : Schéma de modélisation de la Pointe d'Arcay
Pointe d'Arcay modelisation diagram

I - INTRODUCTION

La Pointe d'Arçay, flèche littorale sableuse longue de 6 km, se développe depuis environ 250 ans sur la façade atlantique du département de la Vendée (France). Elle est une des formes de comblement du Pertuis Breton et marque plus particulièrement l'embouchure du Lay. Sous l'action du transit littoral, elle progresse vers le Sud-Est grâce à la formation successive de crochons (ou crochets) sédimentaires qui se développent sur une plateforme sédimentaire préalablement constituée (Fig.1).

Les facteurs dynamiques (marée et houles) qui interviennent seront d'abord analysés. Ensuite, l'analyse granulométrique du crochon terminal mettra en évidence les caractéristiques des secteurs qui le constituent et avec l'aide des études antérieures en laboratoires, une théorie sur le développement des crochons est proposée. Puis l'analyse des cartes et photographies aériennes nous permettra de quantifier la progression et de la modéliser. En conclusion, les résultats obtenus seront comparés à ceux résultant de l'application de formules de transit littoral.

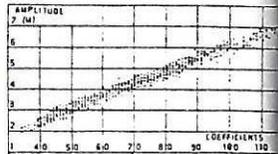
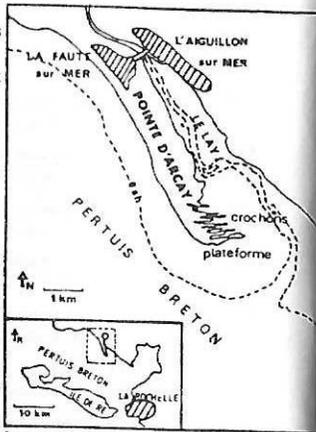
II - ANALYSES DES FACTEURS DYNAMIQUES

A - La marée

Son étude a été faite à partir de l'analyse de 600 courbes marégraphiques enregistrées à environ 4 km au Sud-Est de la Pointe d'Arçay et entre Décembre 1979 et Juin 1981. La comparaison de la fréquence des coefficients des marées enregistrées avec les fréquences obtenues par Gougenheim (1958) sur un Saros montre que nous avons un échantillonnage de bonne qualité puisque l'écart relatif reste inférieur à 10 %. Quatre résultats sont à noter particulièrement.

1 - Détermination de l'unité de hauteur U :

L'unité de hauteur d'un lieu est la valeur qui, multipliée par le coefficient de marée (celui ci est constant pour une marée donnée sur tout le littoral français), donne la valeur de l'amplitude de la marée. Connaissant les coefficients des marées enregistrées et pouvant obtenir l'amplitude de chaque marée (prise comme le quart de la somme des amplitudes entre la pleine mer et les deux basses mers qui l'encadrent) la valeur de U a été obtenue en calculant la pente de la droite donnant l'amplitude en fonction du coefficient (Fig.2). La valeur trouvée est de 2,98 m, valeur supérieure à celles des deux ports de référence qui l'encadrent (2,67 m à La Rochelle et 2,35 m aux Sables d'Olonne). Ces écarts ne sont pas négligeables et montrent qu'il existe un gonflement particulier de l'onde de marée dans ce secteur mis aussi en évidence par l'étude des ondes quart et sixième-diurnes.

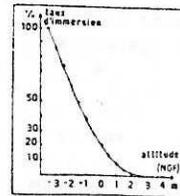


2 - Importance des ondes quart et sixième-diurnes :

Les valeurs obtenues par la décomposition en séries de Fourier sont comparées à celles obtenues pour La Rochelle et St Gildas. L'onde quart-diurne prend une valeur de 28 cm dans le secteur de la Pointe d'Arçay alors qu'elle vaut 25 cm à La Rochelle et 19 cm à St Gildas. De même les ondes sixième-diurnes sont supérieures. Ceci caractérise l'influence des frottements sur le fond, ainsi qu'un phénomène de résonance dans le fond du Pertuis.

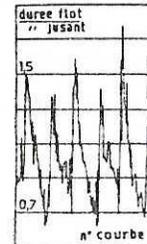
3 - Taux d'immersion en fonction de l'altitude :

La détermination de ces taux a une double importance, d'une part d'un point de vue dynamique elle permet de définir les durées d'action des houles et des courants en fonction de l'altitude et d'autre part d'un point de vue biologique elle permet de mieux implanter les espèces cultivées. Pour chaque coefficient de marée a été déterminée une courbe moyenne qui a permis de calculer les taux d'immersion tous les 50 cm, ces taux étant pondérés par la fréquence d'apparition du coefficient obtenue à partir de la courbe de Gougenheim (Fig.3).



4 - Effet de stockage :

L'effet de stockage est mis en évidence par l'analyse du rapport durée du flot sur durée du jusant (Fig.4) d'une morte eau à la suivante le cycle se décompose ainsi : à la morte eau le rapport est d'environ 1,5 puis il décroît jusqu'à 0,7 deux marées avant la morte eau suivante, le rapport valant 1 à la vive eau. Ce phénomène semble être dû à un effet de stockage : quand les marées augmentent d'amplitude le bassin n'a pas le temps de se vider qu'une autre arrive, réciproquement quand l'amplitude diminue le bassin dispose de plus de temps pour se vider qu'il ne lui en faut pour se remplir.



Les courants de marée n'ont pas fait l'objet d'une étude spécifique dans le cadre de ce travail. Cependant des travaux antérieurs (LCHF 1977 ; LCHF 1980) montrent qu'ils restent inférieurs à 4 m/s et se propagent en contournant l'extrémité de la flèche.

B - La houle

En l'absence de données de houles sur l'ensemble du Pertuis Breton, la houle a été évaluée à partir de différents modèles mathématiques. Le premier DSA 5 permet la prédiction de la houle au large, les deux autres VAG et RECIF permettent d'étudier la propagation de la houle en ne tenant compte respectivement que de la réflexion seule ou de la réflexion et de la diffraction (P. Aristaghes - C. Hereus, 1985).

1 - Evaluation de la houle au large :

La méthode de la densité spectro angulaire (DSA) est basée sur le calcul de vagues fictives caractérisées par une période et une direction (il y a 6 périodes et 12 directions possibles) qui sont analysées en tenant compte de trois phénomènes sa propagation, sa croissance due au transfert d'énergie entre le vent et la mer puis son amortissement (R. Gelci et E. Devillaz, 1969). Les résultats moyennes sur la dernière décennie obtenus au point Nord Gascogne (46,1 N - 2,3 W) montrent que les hauteurs H 1/10 mensuelles varient de 3,7 m en hiver à environ 2 m en été, l'écart type étant de l'ordre de la moitié et une analyse plus détaillée de certains mois indique que la direction prédominante est WNW.

2 - Propagation de la houle :

Etant donné l'importance de la zone de propagation, il a été utilisé un système gigogne. Des plans d'approche partant du plateau de Rochebonne jusqu'à l'entrée du Pertuis ont d'abord été établis puis en fonction des résultats obtenus des plans locaux qui étudient la pénétration dans le Pertuis ont été tracés (Fig.5).

a - Evaluation de la houle à l'entrée du Pertuis Breton

Cette évaluation a été faite à partir des plans d'approches tracés pour 4 périodes (7, 10, 13 et 16 s)

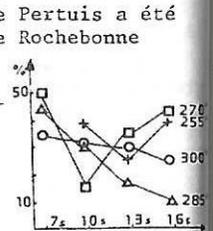
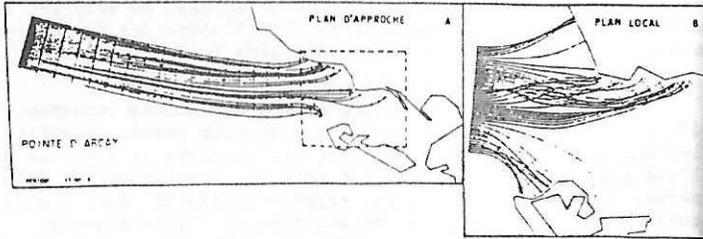
et 4 directions (255°; 270°; 285° et 300°). Pour 255° et 300° la réfraction sur les bancs de Rochebonne introduit des croisements d'orthogonales importants et le programme RECIF a alors été employé.

L'étude des variations de direction de propagation a été faite en retenant deux secteurs de mesure l'un à une vingtaine de kilomètres de l'entrée et l'autre à l'entrée même. Ce choix repose sur le fait que nous avons un double pivotement des houles (Fig. 5A). Le premier pivotement est du au fait que sur le plateau continental les crêtes de houles tendent à se mettre parallèles aux isobathes. Il est à remarquer que même les houles les plus longues n'arrivent pas à atteindre cette direction et que le pivotement se fait d'autant plus sensible que la houle au large est oblique par rapport au plateau continental. Le deuxième pivotement est dû à la présence de la fosse de Chevarache qui marque le Pertuis Breton. Cette fosse tend à faire pivoter les houles dans une direction proche de celle de son axe. Ainsi, suite aux deux pivotements principaux que subissent les différentes houles, alors qu'au large les directions vont de 255° à 300°, à l'entrée du Pertuis (sauf pour T = 7 s, 300°) les directions de houles sont de 280° à 5° près.

L'évaluation du pourcentage de l'énergie pénétrant dans le Pertuis a été faite en essayant de tenir compte de l'influence du plateau de Rochebonne (Fig.6). Les maxima sont obtenus pour une période de 7 s car les houles courtes, associées aux faibles périodes, ne sont pas suffisamment réfractées et conservent donc une grande partie de leurs énergies. Mais pour T = 16 s de fortes valeurs (environ 45 %) sont aussi obtenues pour 255° et 270° car ces houles sont suffisamment importantes pour être réfractées-diffractées par le plateau de Rochebonne vers l'entrée du Pertuis Breton.

b - Propagation de la houle dans le Pertuis Breton

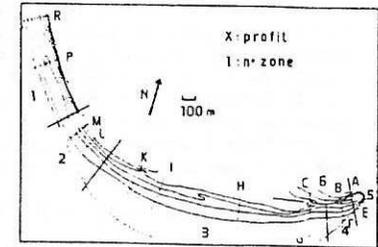
A partir des résultats de l'étude précédente, la propagation de la houle dans le Pertuis Breton a été étudiée en utilisant le programme VAG avec les hypothèses suivantes : 7 s - 280° et 295°; 10 s - 275° et 285°; 13 s - 275° et 280°; 16 s - 275° et 280°; les hauteurs étant prises à +1 m et +5 m. Les bancs du Grouin du Cou au nord et la Pointe de la Baleine au sud ont tendance à focaliser sur eux l'énergie de la houle, ceci étant d'autant plus sensible que la période de la houle augmente (Fig.5 B). Ils constituent donc des lieux où la houle est fortement perturbée. On note aussi que globalement 2/3 des houles qui pénètrent dans le Pertuis ont tendance à pivoter vers le Nord, ceci est particulièrement sensible sur la côte de la Tranche sur Mer qui borde le nord du Pertuis. Inversement, plus les houles sont longues moins elles affectent le centre du Pertuis



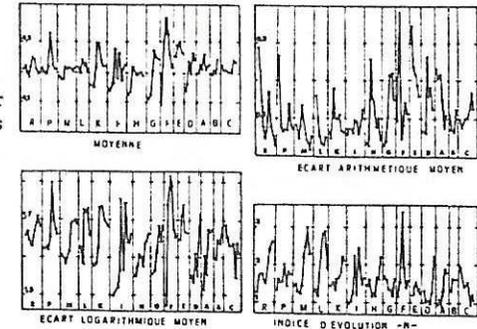
Seules les houles de faibles périodes qui pénètrent dans l'axe du Pertuis se propagent profondément à l'intérieur de celui-ci pour dissiper leurs énergies sur les faibles profondeurs qui caractérisent son comblement par l'Est. Ainsi la quantification de la houle qui parvient à la Pointe d'Arçay est délicate mais il semble que l'obliquité soit de l'ordre de 30° et les hauteurs d'un maximum allant de 0,8 m à 1,5 m selon les saisons.

III - ANALYSE DES FACTEURS INERTES

Cette analyse se basera sur l'analyse granulométrique de 99 échantillons répartis en 14 profils sur le dernier crochon pour mettre en évidence les différents triages qui s'y effectuent car ils constituent des signatures de la dynamique. On y dissociera principalement 6 zones (Fig.7). Les indices dynamiques globaux, définis par Rivière, 1977, ont été retenus car ils tiennent compte de l'ensemble des données de tamisage et font intervenir la vitesse de chute des sédiments ce qui, comme l'a montré une étude précédente, (Galichon, 1984), donne des résultats plus satisfaisants que les indices granulométriques classiques. La moyenne caractérise la taille du sédiment, l'écart arithmétique moyen (EAM) la dispersion et l'écart logarithmique (ELGM) la dissymétrie. Le quatrième indice d'évolution de Rivière, N, caractérise l'énergie du lieu et correspond au fait que les courbes granulométriques peuvent s'exprimer avec une bonne corrélation sous la forme $y = ax^N + b$ (Fig.8).



La première, zone d'érosion peu large et rectiligne, a une limite avec la plateforme fortement marquée par des sables bimodaux. Elle se caractérise par des variations relativement faibles dans un même profil car les sédiments provenant de l'érosion de la dune n'ont pas encore subi assez d'actions hydrodynamiques pour que les classes granulométriques soient suffisamment séparées. L'indice N montre une concentration d'énergie en pied de dune car celui-ci est directement attaqué par les houles ce qui y crée un couloir préférentiel d'énergie.



La deuxième, zone d'équilibre érosion-sédimentation, marquée par une forte courbure du trait de côte, se caractérise par des sédiments plus évolués (ELGM). Une décroissance régulière du grain moyen marque le bas de plage alors que l'indice N prend de fortes valeurs en haut de plage. Car c'est à partir de ce secteur que l'énergie peut trouver pleinement son expression granulométrique.

La troisième, zone principale par sa taille, a une forme de croissant. Le triage granulométrique amorcé dans les zones précédentes s'y poursuit.

La quatrième est caractéristique par la diversité des valeurs prises par les différents indices, reflet de l'hétérogénéité des actions. En fonction de l'importance relative des houles par rapport aux courants, cette zone peut se déplacer vers l'extrémité de la flèche.

La cinquième, extrémité du crochon, se caractérise morphologiquement par des pentes élevées. Les écarts entre les valeurs prises par les différents indices diminuent. Un triage sélectif s'effectue, résultat de la décroissance de

L'énergie des houles qui se diffractent autour de l'extrémité du crochon et qui se poursuit dans la dernière zone.

Principe de formation des crochons

L'évolution des indices granulométriques a montré que l'essentiel de l'énergie se concentre en pied de dune dans la zone d'érosion qui est suivie par un secteur dont le trait de côte a une forte courbure. Par conséquent il existe un lieu où le transit est saturé et où l'angle entre le trait de côte et la houle est supérieur à 55°. Or des études en laboratoire (G. Sauvage de St Marc et G. Vincent, 1954), ont montré d'une part que le maximum (transit saturé) est atteint pour une obliquité de 55° et que d'autre part l'orientation d'une structure sédimentaire dépend de l'intensité du débit solide par rapport au transit saturé, l'équilibre étant particulièrement instable au delà de 55°. Lorsque le débit solide diminue il se produit un pivotement de la structure vers l'intérieur. Ainsi il peut se former un crochon qui ne se plaque pas au précédent, et qui se développe sur une plateforme préalablement constituée (l'analyse granulométrique montre bien la limite entre ces deux structures) et il pivote vers l'intérieur lorsque le débit solide décroît. L'analyse des photographies aériennes confirme cette analyse et permet de quantifier les phénomènes.

IV - QUANTIFICATION DE LA PROGRESSION

Ce travail a été effectué à partir de collections de cartes (LCHF, 1977) et de photographies aériennes (F. Verger, E. Auphan, C. Moniot, 1971) qui ont été complétées et numérisées à l'aide d'un système informatique.

Evolution du crochon terminal

Son allongement annuel varie de 45 à 110 m par an sans qu'un cycle n'apparaisse nettement. On peut estimer que son accroissement volumique, dont les variations sont nettement moindres, est de l'ordre de 27500 m³ / an. Cette part modeste (environ 15 %) du transit littoral utilisé à la constitution des crochons et l'absence de données relatives à la progression de la plateforme ne permettent pas de confirmer la thèse de Meistrell, 1966 sur l'opposition de phase entre la progression du crochon et celle de la plateforme.

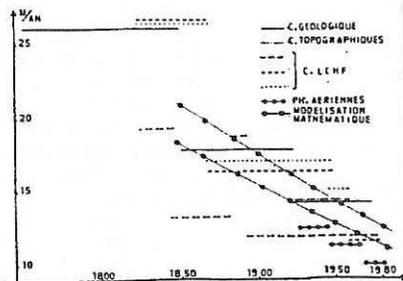
Rythme de formation des crochons

J. Lorin (dans LCHF, 1977) donne les axes des crochons avec leurs dates et déduit qu'il se forme environ 1 crochon tous les 11 ans, résultat comparable à celui obtenu à partir des photographies aériennes (1 par décennie). Certains auteurs ont noté que cette périodicité correspondait à celle de l'activité solaire qui favoriserait la puissance des tempêtes. Or si le rythme de formation des crochons dépend de ce phénomène planétaire, cette périodicité devrait se retrouver sur l'ensemble du globe. Les données disponibles sur d'autres flèches littorales ne confirment pas cette thèse mais n'autorisent pas à l'écarter.

Régime de progression général de la flèche

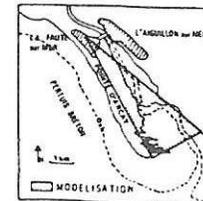
L'analyse des documents permettant de calculer le taux annuel de progression de la Pointe d'Arçay suivant son axe principal montre (Fig.9) que celui-ci a varié de 26 m/an dans les années 1750-1800 à environ 10-11 m/an aujourd'hui. Pour expliquer un tel phénomène deux hypothèses de départ peuvent être faites, ou le débit solide décroît ou il reste quasi constant.

Une diminution du débit solide peut être due principalement à deux raisons, une diminution du stock sédimentaire ou un changement des conditions hydrodynamiques. Or l'analyse morphologique des



anciens crochons ne montre pas de diminution dans leurs développements ni de changement dans leurs directions, phénomènes qui, comme le montre des études en laboratoire, auraient du se produire s'il y avait eu diminution du débit solide. Aussi le stock sédimentaire ne semble pas décroître puisque l'enracinement de la flèche semble s'engraisser depuis une vingtaine d'années. Quant à une modification des conditions hydrodynamiques, rien ne semble la justifier, hormis une surélévation du niveau marin (30 cm en 2 siècles) ce qui aurait plutôt tendance à accroître le débit solide la dune pouvant être attaquées par les houles.

Un débit constant sera donc admis pour modéliser l'évolution de la flèche de la manière suivante : la Pointe d'Arçay est assimilée à triangle rectangle dont l'un des angles fait 25°, angle correspondant à l'obliquité du trait de côte avec l'axe principal de la flèche (Fig.10) et dont on fait croître la surface régulièrement. Ce travail a été fait pour des taux variant de 24240 à 36360 m²/an et 5 angles différents (23 à 25). Pour chaque pas de calcul (3 ans) le taux d'allongement et la longueur totale de la flèche ont été calculés car pour juger ce modèle trois paramètres ont été retenus : le taux d'allongement en 1850 (20 m/an), le taux d'allongement en 1982 (10 m/an) et la longueur de la flèche en 1982 (5300 m). Les résultats obtenus montrent que les cas compris entre 25700 et 30300 m²/an donnent une modélisation satisfaisante et le report de l'ensemble des taux d'allongement annuel calculés pour ces cas sur la figure 9, donnant les taux d'allongement nature, le confirme. Ainsi deux conclusions principales se dégagent, d'une part le taux d'allongement de la Pointe d'Arçay décroît proportionnellement à la racine carrée de son "âge" et d'autre part si l'on considère des hauteurs de dépôts variant de 6 à 8 m, le débit solide peut être estimé de l'ordre de 180000 à 210000 m³/an.



CONCLUSION

Si l'on effectue une évaluation du transit littoral à partir de formules telles que celles de LCHF (Q = Kg/c)H²T SIN(7a/4) (Migniot, 1982) et en utilisant les données qui ont été analysées dans les deux premières parties on obtient un transit littoral d'environ 183000 m³/an. Cette concordance de résultats entre la modélisation de la progression et les formules de transit, permet de valider une méthode par rapport à l'autre et d'estimer le transit avec moins d'incertitudes.

BIBLIOGRAPHIE

ARISTAGHES P., HEREUS C., 1985, Théorie de la houle, houle réelle, propagation de la houle. S.T.C. P.M.V.N. Compiègne (Ed. provisoire)
 GALICHON P., 1984, Comparaison de la représentation de la dynamique sédimentaire par différents indices granulométriques. XVIIIème journées de l'hydraulique S.H.F. Marseille.
 GELCI R., DEVILLAZ E., 1969, Le calcul numérique de l'état de la mer. Cours ENSTA Paris.
 GOUGGENHEIM A., 1958, Sur la Fréquence des coefficients de marée. Bull. Astronomique 1.20. Fasc. 2.
 L.C.H.F., 1977, Comportement de la digue du génie (Rapport)
 L.C.H.F., 1980, Aménagement de la Basse Vallée du Lay (Rapport)
 MEISTRELL F.J., 1966, The Spit platform concept : Laboratory observation of spit development. Th. of Geology department (Edmonton ALBERTA)
 MIGNIOT C., 1982, Etude de la dynamique Sédimentaire, marine, fluviale et estuarienne. Th. d'Etat PARIS XI
 SAUVAGE de ST MARC G., VINCENT G., 1956, Transport littoral, formation de flèches et de tombolos. IVème journées de l'hydraulique S.H.F. PARIS
 VERGER F., AUPHAN E., MONTOT C., 1971, Carte géomorphologique conçue comme un modèle dynamique. Mém. et doc.CNRS. Serv. de documentation et cartographie V.12 n°5.

COLLOQUE FRANCO-JAPONAIS D'OCEANOGRAPHIE
Marseille 16-21 Septembre 1985

Fascicule 1 : Océanographie physique et dynamique sédimentaire
Phénomènes d'évolution de côtes en Afrique de l'Ouest
(Sénégal et Mauritanie)
Processus de sédimentation et d'érosion sur le littoral
*Sedimentation and erosion on West African coast:
examples in Mauritania and Senegal*

Jean-Paul BARUSSEAU
LABORATOIRE DE RECHERCHES DE SEDIMENTOLOGIE MARINE, UNIVERSITE DE PERPIGNAN,
AVENUE DE VILLENEUVE, 66025 PERPIGNAN

Résumé

L'objet de cette communication est de souligner le caractère incomplet de la connaissance des phénomènes littoraux à un niveau régional en Afrique, première étape d'une gestion rationnelle et d'aménagements bien intégrés au cadre naturel.

Par une étude des facteurs et des phénomènes morphologiques et sédimentologiques du littoral de la Mauritanie et du Sénégal entre 14°N et 21°N, on montre:

- que les unités morphosédimentaires sont d'étendue variable,
- que certaines unités peuvent s'étendre sur plusieurs pays,
- que dans un contexte général bien déterminé du bilan érosion-sédimentation, il peut y avoir des évolutions locales inverses,
- que le rôle des échanges dans le profil est considérable.

En conclusion, dans des régions où les bases scientifiques de la connaissance sont insuffisantes, des installations légères de défense des côtes sont un moyen de ne pas introduire de perturbations majeures de l'équilibre côtier.

ABSTRACT.

The West african coastline between 13° N and 21°N exhibits a various pattern of large embayments, deltaic promontary, estuaries and straight regularized coasts. Offshore, except in the southernmost part (The Gambia and Casamance region), the shelf is rather narrow with a slope exceeding 0.2%, a value higher than the world average slopes. An isolated but important feature is the Cayar canyon whose head reaches the surf zone. The climatic regime is presently dominated by an arid trend which is inherited from the post-glacial evolution with its alternating humid and arid phases in a general context of stagnation. Since 4000 yrs B.P. a major feature of the climatic regime of this part of the world is aridity. Accordingly the major sediment input is due to winds blowing from

the Saharan dune belt. A second source is also indirectly aeolian since fossil dune fields are now eroded by the wave action. No significant fluvial input contributes to the beach and shore face sedimentation except to the South. The tide is microtidal (S.T.: 1.5m max.) and the most important factor contributing to the sediment transport is the wave action. Entrainment by waves is imparted by the prominent north-south component of longshore drift. Hence, longshore transport is a major feature of the coastal evolution with obvious morphological consequences (spits, local erosions). However offshore-onshore transport may be emphasized as a main process which prevents the fine sand to contribute to the littoral budget. Consequently the studied area can be divided into five sedimentary compartments with respect to source and sink, to the direction of the input-output balance and finally to a dominant resulting process which characterizes each compartment. 1) The aeolian supply in the progressive north coast of the Banc d'Arguin region. 2) The dynamic equilibrium with a light trend to erosion in the central Senegal-Mauritania coast. 3) The sediment starvation and the resulting unprotected coast in the Cap-Vert rocky promontary. 4) The self-nourishment in the erosion-sedimentation cells of the "Petite-Côte". 5) The fluvial supply dominated coast of the Gambia and Casamance to the South of the studied area.

Several "rules" may be outlined from the observations :

- morphosedimentary units do not observe political borders and management must not to overlook this fact.
- local evolutions may be in an opposite direction in relation to the regional evolution.
- erosion may be occur in a divergence zone.
- on such a coast where natural evolution is too badly known important coastal engineering practices should be wary of negative consequences even far from the place of the works.

La région étudiée (fig. 1) s'étend sur 1350 km de côte, entre 13°N et 21°N, bordant les territoires de trois pays : Sénégal, Gambie et Mauritanie. La côte est généralement basse si l'on excepte les deux vastes promontoires rocheux du Cap Blanc et du Cap Vert et un certain nombre d'avancées rocheuses plus discrètes (Cap Tégarat, Cap Iouit, Cap de Naze...). En outre, des saillants sédimentaires matérialisent l'articulation des différentes régions morpho-sédimentaires (Cap Timiris, Pointe de Sangomar) ou le fonctionnement post-glaciaire du fleuve Sénégal.

Du Nord au Sud, on rencontre la vaste baie peu profonde du Banc d'Arguin et ses dépendances (Baie du Lévrier, Baie d'Arguin, Baie de St Jean), la côte régularisée qui forme le tronçon le plus long du littoral sénégal-mauritanien entre le Cap Timiris et la presqu'île du Cap Vert, le promontoire du Cap-Vert fortement avancé dans l'océan, la côte semi-régularisée au Sud de Dakar et jusqu'au delta du Saloum, enfin la côte à estuaires du Sud du Sénégal où se jettent les bras estuariens du Saloum, du Diomboss, de la Gambie et de la Casamance.

Au large, la plateforme, d'abord très large et très peu profonde (20m) au niveau du Banc d'Arguin, devient plus étroite du Nord au Sud jusqu'au Cap-Vert, passant de 60 à 2 km. Par contre, au Sud du Cap Vert, elle s'élargit, atteignant rapidement 60 km au large du Saloum et près de 100 km au large de la Casamance.

L'inclinaison de la plateforme est en moyenne plus forte que les valeurs communément rencontrées sur les plateaux continentaux (0,07 à 0,13% selon Vanney, 1977); elles vont de 0,11 à 2,2% mais les valeurs les plus fréquentes sont entre 0,2 et 0,3% pour toute la partie comprise entre le Cap Timiris et la Gambie. Au Nord du Cap Timiris, le gradient de la plateforme est infime (0,02% sur le Banc d'Arguin); au Sud de la Gambie il demeure plus faible (0,06%) que la limite inférieure de la fourchette indiquée par Vanney.

Parmi les caractères morphologiques de la plateforme susceptibles d'affecter l'évolution littorale, la vallée sous-marine de Cayar joue un rôle singulier de limite entre deux compartiments morphosédimentaires (Ruffman *et al.*, 1977; Barusseau, 1983; 1985). La tête de ce canyon s'ouvre, en effet entre la ligne de rivage et la zone des brisants et piège donc une très importante fraction du matériel littoral en transit longitudinal, ce qui se traduit par :

- une réduction considérable de l'épaisseur du revêtement meuble et du volume des structures littorales (plages et dunes) au Sud.
- un changement de composition de certains traceurs minéraux (ilménite).
- une intensification des processus d'érosion côtière et une sous-alimentation de la presqu'île du Cap-Vert.

I - LES FACTEURS DE L'EVOLUTION LITTORALE.

Le régime de la marée est microtidal au large des côtes de Mauritanie et du Sénégal. Il s'agit d'une marée semi-diurne dont l'onde provient du Sud. Le décalage atteint 1 h entre Dakar et Nouakchott (Mannevy, 1958). Le marnage moyen est voisin de 1m (Einsele *et al.*, 1974; Ruffman *et al.*, 1977). Les courants induits peuvent être très forts dans certains passages resserrés du Banc d'Arguin

masse d'air sus-jacente, avec une périodicité de 3 à 4 jours (Tetzlaff et Wolter, 1980). Un maximum de concentration se situe entre 17° et 21°N (Diaz et al., 1976). Les retombées provenant de ces nuages de poussières, reprises par les vents circulant au niveau du sol, conditionnent un apport lithométrique non négligeable (Stein et Sarnthein, 1983).

Au sujet des apports sédimentaires, 7 sources de matériel ont été distinguées dans la région.

- les dunes modernes,
- l'érosion des massifs dunaires ogoliens,
- les apports lithométriques,
- l'érosion des falaises et des bancs,
- le matériel relique des fonds du plateau continental,
- la production biodétritique,
- les apports fluviatiles.

Les trois premiers jouent un rôle important jusqu'à la latitude du Siné-Saloum, les deux suivants ne semblent pas avoir d'influence notable sur l'évolution littorale sauf en des secteurs très limités (Cap Blanc). La production biodétritique assure un renouvellement de la fraction carbonatée qui ne semble jamais inférieures à 20% du matériel sableux; toutefois il s'agit d'un matériel constamment renouvelé qui ne contribue pas à modifier les tendances évolutives du littoral. Enfin les apports fluviatiles ne sont sensibles que dans le secteur le plus méridional où ils exercent leur influence plus sur la plateforme médiane et externe que sur l'avant-côte et la zone de rivage. Toutefois plus au Sud, en Guinée-Bissau les apports fluviaux (silts et argiles) interviennent en abondance dans l'édification d'une large avant-côte (delta des Bijagos) mais d'étaient également jusqu'à la limite du rebord (Mac Grail, 1977; Kudrass et Newton, 1984).

Dans ces conditions la contribution dominante demeure l'ensemble des apports éoliens qui se déversent directement (dunes modernes et apports lithométriques) ou sont érodés par les houles (dunes ogoliennes). Seule la région nord (Banc d'Arguin) bénéficie du déversement de dunes mobiles provenant de la région du Cap Juby (Coursin, 1964; Clos-Arceuduc, 1965). Selon Sarnthein et Walger, ce processus apporte annuellement 100000m³ à la mer. Les lithométriques donnent lieu à des évaluations très dispersées allant de 20000m³/an.km à 1 million m³/an.km. D'après des mesures de Diallo (1983), à Nouakchott la zone littorale recueillait 0.8.10⁶m³/an.km, tandis qu'à Dakar l'apport se réduirait à 0,15.10⁶m³/an.km. Quant aux matériaux érodés des massifs dunaires ogoliens, il n'existe pas d'évaluation précise mais tous les auteurs soulignent leur recul rapide (Hébrard, 1978; Einsele et al., 1974; Barbey et al., 1975).

II - LES MECANISMES ET LES RESULTATS.

1 - La dérive littorale.

Sur la plus grande partie du littoral sénégal-mauritanien il est possible d'envisager une estimation du transit littoral dans la mesure où le faible marnage et la bonne connaissance statistique de la houle au large permettent

l'application de modèles relativement simples, tel celui exprimé par la formule de Sauvage de St Marc et Vincent modifiée par Larras

$$Q = K.g.H^2.T.f(\alpha).t/C.$$

- K : coefficient dépendant de la granulométrie du matériau; $K = 0,18.10^{-5}.D^{1/2}$
(D: dimension moyenne du sable en mm),
- H : hauteur de la houle considérée (en m),
- T : période correspondante (en s),
- f(α) : facteur d'obliquité,
- t : durée d'action de la houle considérée (en s),
- C : cambrure (C = H/L; L : longueur d'onde de la houle).

Les calculs ont été faits en tenant compte des secteurs de houles actives et en fonction de l'orientation du trait de côte et de la granulométrie du sédiment. Tous les résultats indiquent un transit sédimentaire vers le Sud (Barusseau, 1980; 1985):

- Région de Nouakchott : 0,98.10⁶m³/an,
- Promontoire deltaïque du fleuve Sénégal: 0,47.10⁶m³/an,
- Côte au Nord de Cayar : 0,45.10⁶m³/an,
- "Petite Côte" : 0,025.10⁶m³/an.

Les valeurs obtenues montrent une évolution en deux étapes de la réduction du transit littoral du Nord au Sud. Entre Nouakchott et la frontière sénégal-mauritanienne, le transit littoral subit une diminution d'un facteur 2. Au Sud de Cayar et de la presqu'île du Cap-Vert, la décroissance est beaucoup plus sévère, atteignant presque un facteur 20. Cette limite drastique est à imputer au double effet de la récupération du matériel par le canyon et du rétrécissement de la plateforme qui exacerbe la dispersion offshore.

2 - Les échanges dans le profil.

Les mouvements de sédiments ayant une composante transversale par rapport aux isobathes sont très mal connus. Seules des méthodes utilisant des mesures réelles de vitesse d'écoulement, en grand nombre, au niveau du fond, permettent de les mettre en évidence (Vincent et al., 1981), mais la théorie de ce mécanisme n'est pas clairement posée (Komar, 1976) et aucune prévision ne semble actuellement possible (Inman et Bowen, 19863) même si des études récentes apportent des éléments de réponse dans des conditions expérimentales convaincantes (Ishida et al., 1983).

En conséquence, on se bornera ici à mettre en évidence qualitativement le mécanisme. Un exemple tout à fait significatif de son influence a été mis en évidence au Nord du canyon de Cayar (fig. 3). Dans cette région, les fonds de la plateforme interne (jusqu'à -50m) sont recouverts d'un manteau sédimentaire qui efface la rive nord de l'incision du canyon et adoucit le flanc de la vallée. La relation avec la sédimentation se traduit par un envahissement de plus en plus important de la vallée sous-marine comme on s'approche de la

BIBLIOGRAPHIE

- BARBEY, C., CARBONNEL, J.P., DUPLAIX, S., LE RIBAUT, L. et TOURENCO, J. 1975. Etude sédimentologique de formations dunaires en Mauritanie occidentale. Bull. Inst. fond. Afr. noire, 37, A, 2, 255-281.
- BARUSSEAU, J.P. 1980. Essai d'évaluation des transports littoraux sableux sous l'action des houles entre Saint-Louis et Joal (Sénégal). Bull. Assoc. sén. Et. Quat. afr., 58/59, 31-39.
- BARUSSEAU, J.P. 1983. Le Canyon de Cayar et son éventail profond. Unpubl. rep., CNRS, A.T.P. Géologie et Géophysique des Océans, 13 p., 1 tabl., 5 fig.
- BARUSSEAU, J.P. 1985. Evolution de la ligne de rivage en République islamique de Mauritanie. Unpubl. rep., UNESCO, 104 p., 40 fig., 6 tabl.
- BEIN, A. and FUTTERER, D. 1977. Texture and composition of continental shelf to rise sediments off the northwestern coast of Africa: an indication for downslope transportation. Meteor "Forsch.-Ergebnisse, C", 27, 46-74.
- CHAMLEY, H. et DIESTER-HAASS, L. 1982. Effets du déplacement de l'embouchure du fleuve Sénégal, au Quaternaire Supérieur, sur la sédimentation de la marge ouest-africaine. C.R. Ac. Sc., Paris, 11, 295, 673-678.
- CLOS-ARCEDUC, A. 1965. Les fleuves de sable entre le Maroc et la Mauritanie et la théorie des barkhanes. C. R. Ac. Sc., Paris, 261, 3637-3639.
- COURSIN, A. 1964. Observations et expériences faites en avril et mai 1956 sur les barkhanes du Souhel-el-Abiod (Est de Port-Etienne). Bull. Inst. fond. Afr. noire, XXVI, A, 3, 989-1022.
- DIALLO, A.D. 1983. La manifestation des lithométéores sur le littoral sénégalomauritanien : aspects climatologiques et sédimentologiques. Mém. Dpt Geogr., n. publié, Dakar, 74 p. ronéot.
- DIAZ, H.F., CARLSON, T.N. and PROSPERO, J.M. 1976. A study of the structure and dynamics of the Sahara air layer over the northern equatorial Atlantic during BOMEX. NOAA techn. mem., ERL W19-PO-32, 61 p.
- EINSELE, G., HERM, D. and SCHWARTZ, U. 1974. Sea level fluctuation during the past 6000 years at the coast of Mauritania. Quaternary Research, 4, 282-289.

- HEBRARD, L. 1978. Contribution à l'étude géologique du Quaternaire du littoral mauritanien entre Nouakchott et Nouadhibou (18°-21° lat. N). Participation à l'étude des désertifications au Sahara. Doc. Lab. Géol. Fac. Sc. Lyon, 71, 210 p., 59 fig.
- INMAN, D.L. and BOWEN, A.J. 1963. Flume experiments on sand transport by waves and currents. Proc. 8 th Conf. Coastal Eng., 137-150.
- INSTRUCTIONS NAUTIQUES, 1981. Afrique - Côte Ouest - Nord de Cape Palmas. Serv. Hydrogr. et Océanogr. Marine, C, 4, 363 p.
- ISHIDA, A., HAYASHI, I., TAKAHOSHI, M. and KIOKA, W. 1983. Modeling of onshore-offshore sediment transport over a rippled sand bed. Coast. Eng. in Japan, 26, 77-89.
- KOMAR, P.D. 1976. Nearshore currents and sediment transport and the resulting beach configuration. In : Marine sediment transport and environmental management. D. Stanley and D.J.P. Swift, ed., John Wiley and Sons, 13, 241-254.
- KOOPMAN, B.J., LEES, A., PIESENS, P. and SARNTHEIM, M. 1978. Skeletal carbonate sands and wind-derived silty marls of the Sahara coast : Baie du Lévrier, Arguin Platform, Mauritania. "Meteor" Forsch. - Ergebnisse, C, 30, 15-57.
- KUDRAY, H.R. and NEWTON, R.S. 1984. Side-scan sonar surveying on the continental shelf off Sierra Leone. "Meteor" Forsch. - Ergebnisse, C, 38, 49-58.
- Mc GRAIL, D.W. 1977. Sedimentologic and physical oceanographic evidence of a shelf edge counter current off Guinea Bissou, Guinea and Sierra Leone. J. Sed. Petr., 47, 2, 915-925.
- MANNEVY, P. 1958. Mission hydrographique de la côte ouest d'Afrique. J. Levé sur les côtes de Mauritanie. Ann. Hydrogr., 4e s., 9, 44-53.
- RUFFMAN, A., MEAGHER, L.J. et STEWART, J. Mc G. 1977. Bathymétrie du talus et du plateau continental du Sénégal et de la Gambie, Afrique de l'Ouest. In : Le Baffin, levé au large du Sénégal et de la Gambie, Min. Pêches et Env., Ottawa, 1, 21-97.
- SARNTHEIM, M., THIEDE, I., PFLAUMANN, V., ERLENKEUSER, H., FUTTERER, D., KOOPMANN, B., LANGE, H. and SEIBOLD, E. 1982. Atmospheric and oceanic circulation patterns off northwest Africa during the past 25 million years. In : Geology of the northwest african continental margin, V. von Rad, K. Hinz, M. Sarntheim and E. Seibold, ed., 24, 545-604.
- SARNTHEIM, M. and WALGER, R. 1974. Der äolische Sandstrom aus der W-Sahara zur Atlantikküste. Geol. Rundsch., 63, 3, 1065-1067.

- SHAFFER, G. 1976. A mesoscale study of coastal upwelling variability off NW-Africa. "Meteor" Forsch. - Ergebnisse, A, 33-70.
- STEIN, R. and SARNTHEIN, M. 1983. Late Neogene events of atmospheric and oceanic circulation offshore northwest Africa: high resolution records from deep-sea sediments. Palaeoecology of Africa, vol. 16.
- TETZLAFF, G. and WOLTER, W. 1980. Meteorological patterns and the transport of mineral dust from the north african continent. Palaeoecology of Africa, 12, 31-42.
- VANNEY, J.R. 1977. Geomorphologie des plates-formes continentales. Doin, éd., Paris, 300p.
- VINCENT, C.E., SWIFT, D.J.P. and HILLARD, B. 1981. Sediment transport in the New-York bight, north american atlantic shelf. Mar. Geol., 42, 369-398.

Fascicule 1 : Océanographie physique et dynamique sédimentaire
Etude des paramètres sédimentologiques de la crème de vase
dans le système fluvio estuarien de la Gironde
*Study of the sedimentological properties of fluid mud
in the fluvio-estuarine system of the Gironde estuary*

Jean-Marie JOUANNEAU¹, Jérôme GRANBOULAN², Alain FERAL², Michel VILLEROT²
¹ INSTITUT DE GEOLOGIE DU BASSIN D'AQUITAINE, U.A. C.N.R.S. 197, INSTITUT D'OCEANOLOGIE,
UNIVERSITE DE BORDEAUX I, 351, COURS DE LA LIBERATION, 33405 TALENCE,
² DIRECTION DE L'AMENAGEMENT ET DE L'ENVIRONNEMENT MARITIMES, PORT AUTONOME,
152, QUAI DE BACALAN, 33082 BORDEAUX

Résumé :

L'exécution de prélèvements de crème de vase dans l'estuaire de la Gironde, au cours des dix dernières années, a permis de préciser les domaines de variations spatiotemporelles des différents paramètres sédimentologiques. L'étude a conduit à mettre notamment en évidence :

- des variations temporelles de ces paramètres, en particulier à l'échelle saisonnière et également pour des périodes plus courtes (une dizaine de jours) ;
- les fluctuations concernant les caractéristiques granulométriques, les teneurs en quartz et en argiles, la composition du cortège minéralogique.

L'information obtenue par ce type de recherche contribue à préciser les modalités des processus hydrosédimentaires. Au-delà d'une connaissance purement fondamentale, les résultats ont des implications directes pour l'optimisation du développement et de l'aménagement d'un grand estuaire.

Abstract :

The systematic sampling of fluid mud made over the past ten years in the Gironde Estuary, has enabled, both the domain of sedimentological parameter variations on this formation to be determined as well as the time-space distribution of the value of such parameters to be deduced.

From this study, can be seen :

- the time-span variations of these parameters on a seasonal scale as well as for shorter periods (10 days) ;
- such variations involve the dimensional characteristics, the content in quartz and clay, the composition of the clay spectrum.

The information provided by this type of research contributes, of course, to the analysis of the estuarine hydro-sedimentological mechanisms. Over and above a purely fundamental knowledge, the results obtained, have direct implications on optimizing the management and operational development of a large estuary.

INTRODUCTION

L'estuaire de la Gironde est un des principaux estuaires d'Europe occidentale (fig. 1). Il est de type macrotidal. Le débit fluvial moyen est de l'ordre de 1 000 m³/s et varie entre 200 m³/s en régime d'étiage à plus de 5 000 m³/s en crue.

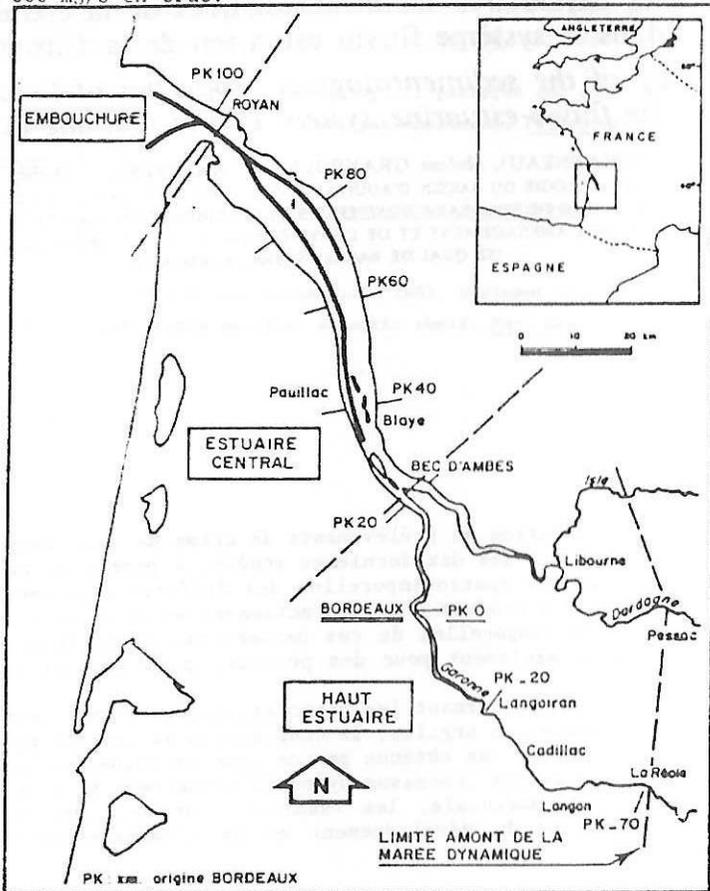


FIG. 1 : CADRE SCHEMATIQUE DE L'ESTUAIRE DE LA GIRONDE
SCHEMATIC FRAMEWORK OF GIRONDE ESTUARY

Tout le long de l'estuaire est installé le complexe portuaire du Port Autonome de Bordeaux. La desserte des installations amont (Bassens-Bordeaux) s'effectue par un chenal (d'une centaine de kilomètres de longueur) qui nécessite d'importants travaux de dragages d'entretien. En effet, l'estuaire est le siège d'une importante sédimentation fine.

L'objet de cette étude est de déterminer les domaines de variations des paramètres sédimentaires et les distributions spatio-temporelles des valeurs de ces paramètres, dans le but d'optimiser l'aménagement et l'entretien des voies d'accès.

I - CADRE HYDROSEDIMENTAIRE

I.1 - Caractéristiques générales des matières en suspension à l'entrée du système estuarien

Les apports en suspension d'origine fluviale estimés à la limite

amont de la marée dynamique (environ 150 km de la mer) sont de l'ordre de 2.10⁶ t à 2,5 10⁶ t/an (Laboratoire Central d'Hydraulique de France 1969 Jouanneau 1982).

L'étude des caractéristiques des suspensions introduites à La Réole (tableau I) dans le système fluvio-estuarien de la Gironde a montré :

TABLAU I - CARACTERISTIQUES GENERALES DES MATIERES EN SUSPENSION A L'ENTREE DU SYSTEME ESTUARIEN (LA REOLE)
GENERAL CHARACTERISTICS OF SUSPENDED MATTER IN THE BEGINNING OF THE ESTUARINE SYSTEM
(Modifié d'après Jouanneau 1982)

DATES	GRAMULOMETRIE (X)					MINERAUX ARGILEUX (% phase argileuse)			MINERAUX NON ARGILEUX (% phase totale)				C.O.P. (%) Phase totale	Qfl m ³ /s				
	Sable (>60 µm)	SILT			Argiles < 2 µm	Sm	I	K	C	Sm/I	Q	C			D	F.alc.	F.plg.	
		Grossier 60-20 µm	Moyen 20-6 µm	Fin 6-2 µm														
16.03.1976						28	54	9	9	0,52	A	f	nd	f	f	2,4	781	
9.04.1976											f	f	nd	A	nd		4,0	942
2.09.1976	0	9	31	32	28						f	MA	nd	M	M		3,7	242
19.10.1976						22	52	13	13	0,42	f	MA	nd	A	nd		2,4	838
16.02.1977	3	4	13	12	68	34	40	11	15	0,85	AA	tf	nd	nd	nd		3,3	1944
22.02.1977	3	9	17	11	60	37	43	6	14	0,86	AA	f	nd	nd	f		3,1	1574
3.03.1977						15	58	14	13	0,26							4,9	806
18.04.1977						36	41	11	12	0,88	AA	tf	nd	f	f		4,6	806
11.05.1977											MA	tf	nd	f	f		4,1	886
21.06.1977						11	65	17	12	0,17	MA	f	nd	M	M		2,3	915
22.09.1977											AA	f	nd	M	nd		6,7	291
25.10.1977	0	9	18	23	50	13	46	20	21	0,28	MA	f	nd	M	nd		2,6	825
22.02.1978	5	4	17	22	52	22	48	12	18	0,46	MA	f	tr	M	nd		2,4	2280
9.03.1978	4	5	20	28	43	31	43	12	14	0,72	f	f	tr	f	tr		2,4	1336
18.04.1978	0	9	25	22	44												4,6	826
30.05.1978	2	5	19	24	50	40	42	6	12	0,95	f	f	nd	tr	nd		2,6	1261
22.06.1978	0	6	31	29	34	42	40	6	10	1,05	f	AA	nd	nd	f		2,6	696
24.07.1978											AA	tf	nd	f	f		4,15	376
18.09.1978											f	MA	nd	f	f		8,40	220
16.10.1978	0	5	20	24	51												13,1	179
21.02.1979	5	10	17	20	48												3,5	995
21.03.1979	10	3	17	22	48												3,5	945

LEGENDE - Minéraux non argileux : Q = quartz - A : abondant > 40 % - AA : assez abondant 30-40 % - MA : moyen, abondant 20-30 %
f : faible 10-20 % - tf : très faible < 5 %
C = calcite mêmes symboles avec A : > 20 % - AA : 15-20 % - MA : 10-15 % - f : 5-10 % - tf : < 5 %
D = dolomite - nd : non déterminable - tr : traces
F.alc., F.plg. = feldspaths alcalins, plagioclases avec : A : abondant > 5 % - M : moyen 2-5 %
f : faible < 2 % - tr : traces
C.O.P = carbone organique particulaire.
Qfl = débit fluvial du jour considéré en m³/s.

Période de forts débits fluviaux

Les différentes fractions granulométriques ont les teneurs moyennes suivantes :

argiles : 50 % ; silt fin : 20 % ; silt moyen : 20 % ; silt grossier : 5 % ; sable : 5 %.

La part du quartz est de l'ordre de 30 à 40 % et celle des argiles et micas de 45 à 55 %. Cette répartition souffre toutefois d'exception. En effet, des suspensions prélevées en crues ont révélé des charges très importantes d'argiles et micas (plus de 70 %) et des teneurs en quartz faibles (moins de 20 %).

Les variations de pourcentages de quartz, d'argiles et micas pendant les forts débits fluviaux dépendent de l'origine géographique de la crue et aussi de l'époque à laquelle elle se produit. En outre, selon Latouche (1971) :

- les crues pyrénéennes sont caractérisées par l'illite et la chlorite ;
- les crues provenant de la région toulousaine par les smectites (comme celles issues de l'Isle) ;
- les crues de Haute-Dordogne par la kaolinite ;
- les crues intégrant le bassin versant par un cortège mixte.

Période d'étiage

La teneur en sable est alors pratiquement nulle et le taux d'argiles augmente (55 %).

Les argiles et micas constituent l'essentiel de l'éventail lithologique (60 - 70 %). Le quartz revêt alors des proportions comprises entre 10 et 20 %.

I.2 - Processus sédimentaires estuariens

L'action conjuguée du débit fluvial et de la marée est responsable de la formation d'un vaste stock de sédiments fins en suspension : le bouchon vaseux (Glangeaud 1938). Ce bouchon vaseux au sein duquel les concentrations atteignent 0,2 à 1 g/l en surface et 1 à 10 g/l près du fond représente environ 2 ans d'apports fluviaux (4 à 5.10⁸ t).

Le bouchon vaseux migre au cours de l'année (fig. 2). En période d'étiage il se situe à l'amont d'Ambès et en période de forts débits fluviaux il se localise dans le bas estuaire.

La décantation des suspensions du bouchon vaseux, préférentiellement aux étales de courants de mortes eaux, entraîne une sédimentation générale de l'estuaire. L'envasement est particulièrement aigu dans certains secteurs du chenal de navigation. Des formations fines turbides (la crème de vase de concentration de 50 à 500 g/l) se constituent en lentilles de plusieurs kilomètres de longueur et de 1 à 3 m d'épaisseur.

Au-delà d'un certain seuil de concentration estimé à 500 g/l d'après des études en canal effectuées par le Laboratoire National d'Hydraulique (1970-1971) et le Laboratoire Central d'Hydraulique de France (1970) cette vase n'est plus remise en suspension (Allen et al. 1977) par les courants de marée. La crème de vase est facilement détectée par l'échosondeur (fig. 3). Mais cette technique ne permet pas d'apprécier les variations verticales de densité ou de concentration. Or des recherches sur d'autres estuaires ont montré que la navigation serait possible jusqu'à une concentration de l'ordre de 300 g/l (Kirby et al. 1980).

Le problème est de déterminer le fond navigable par des mesures verticales de la densité. Dans ce but, différentes sondes ont été mises au point (gammadensimétrique : Anguenot-Caiveau 1980, acoustique : Granboulan et al. 1984).

En particulier, la mise au point et l'étalonnage de la sonde acoustique par le Port Autonome de Bordeaux (Granboulan et al. 1985) a conduit à l'établissement d'une relation linéaire entre l'atténuation d'une onde ultrasonore et la concentration (fig. 4). La qualité de l'étalonnage mené à partir de 48 échantillons (693 couples de valeurs expérimentales) est traitée par l'estimation du coefficient de corrélation linéaire : 0.990.

Toutefois, on note entre les points extrêmes pour une atténuation donnée une variation de concentration de 50 à 60 g/l. La droite empirique de régression donnerait en première approximation une valeur de concentration avec une précision de 25 à 30 g/l.

Ces variations pourraient être attribuées à la granulométrie et

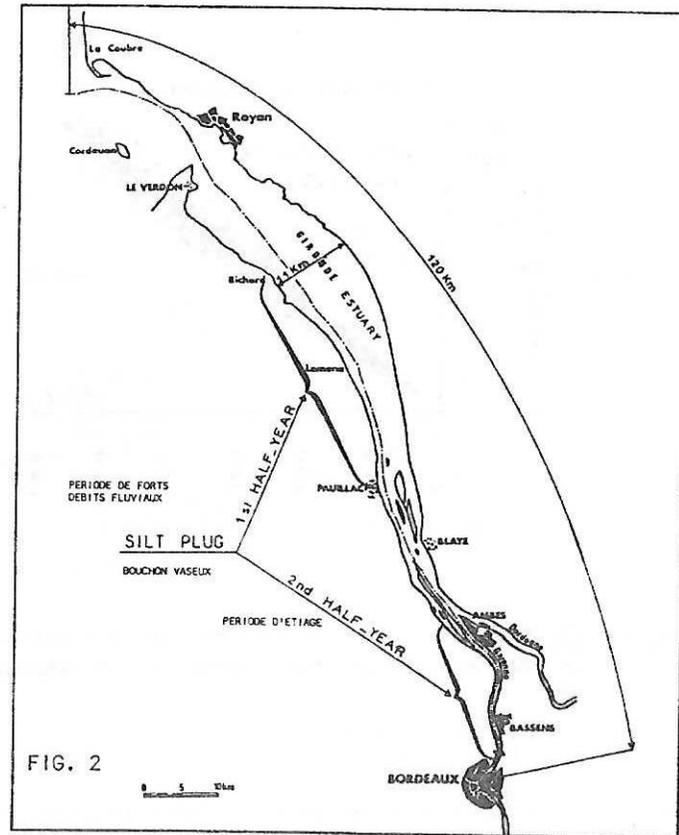


FIG. 2

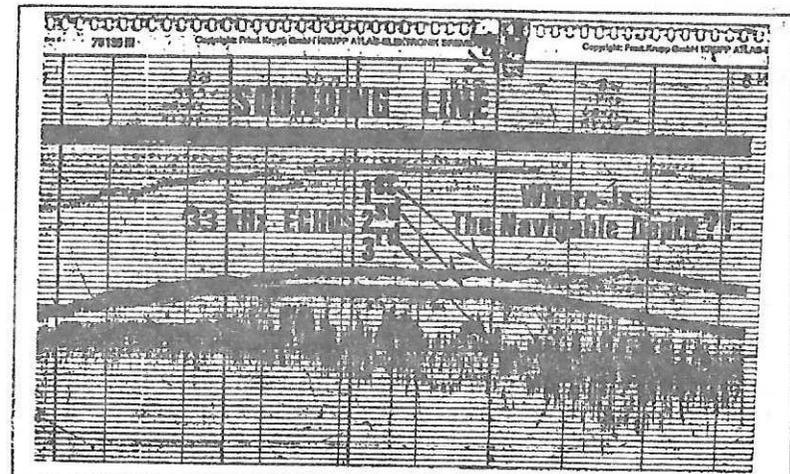


FIG. 3 - EXTRAIT D'UNE BANDE DE SONDRAGE DE L'ESTUAIRE DE LA GIRONDE (SONDEUR DESO 20 ATLAS) (Granboulan et al. 1984)
EXTRACT FROM A SOUNDING TAPE OF THE GIRONDE ESTUARY (SOUNDER ATLAS DESO 20)

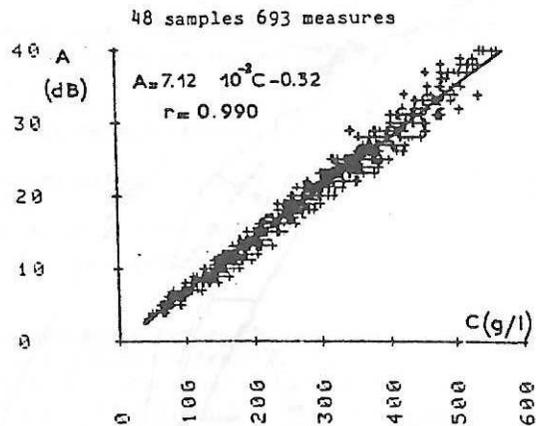


FIG. 4 : ETALONNAGE DE LA SONDE SEDIMENTOMETRIQUE A ULTRASONS (PORT AUTONOME DE BORDEAUX)
CALIBRATION OF THE ULTRASONIC PROBE (PORT OF BORDEAUX AUTHORITY)

(d'après Granboulan et al. 1985)

à la composition des différents sédiments. C'est pourquoi en Gironde une recherche systématique des domaines de variations des caractéristiques physico-chimiques de la crème de vase a été entreprise.

En outre, ce type d'approche a d'autres applications dans le domaine de la rhéologie et d'une manière générale sur la connaissance de la genèse de cette formation turbide en estuaire.

II - RESULTATS

II.1 - Etude granulométrique

II.1.1 - Résultats généraux

Ces résultats obtenus à partir de 115 prélèvements de crème de vase recueillis entre 1976 et 1979 sont reportés sur la figure 5.

La crème de vase se caractérise par une très forte proportion d'argiles (50-60 %). La teneur en sable est très faible, voire nulle et le pourcentage de silt grossier (60-20 µm) est réduit (2 à 5 %).

Ainsi, la crème de vase serait constituée essentiellement par des argiles (<2 µm) et par des silts moyen et fin (fraction 20 à 2 µm).

II.1.2 - Répartition spatiale

II.1.2.1 - Répartition longitudinale

La répartition longitudinale des paramètres granulométriques est examinée pour des lentilles de crème de vase reconnues sur les passes aval et parfois dans la fosse de Trompeloup au cours de 6 missions (tableau II).

Globalement, il n'apparaît pas de tendance d'évolution longitudinale des paramètres dimensionnels, ceci est également vrai sur le plan latéral.

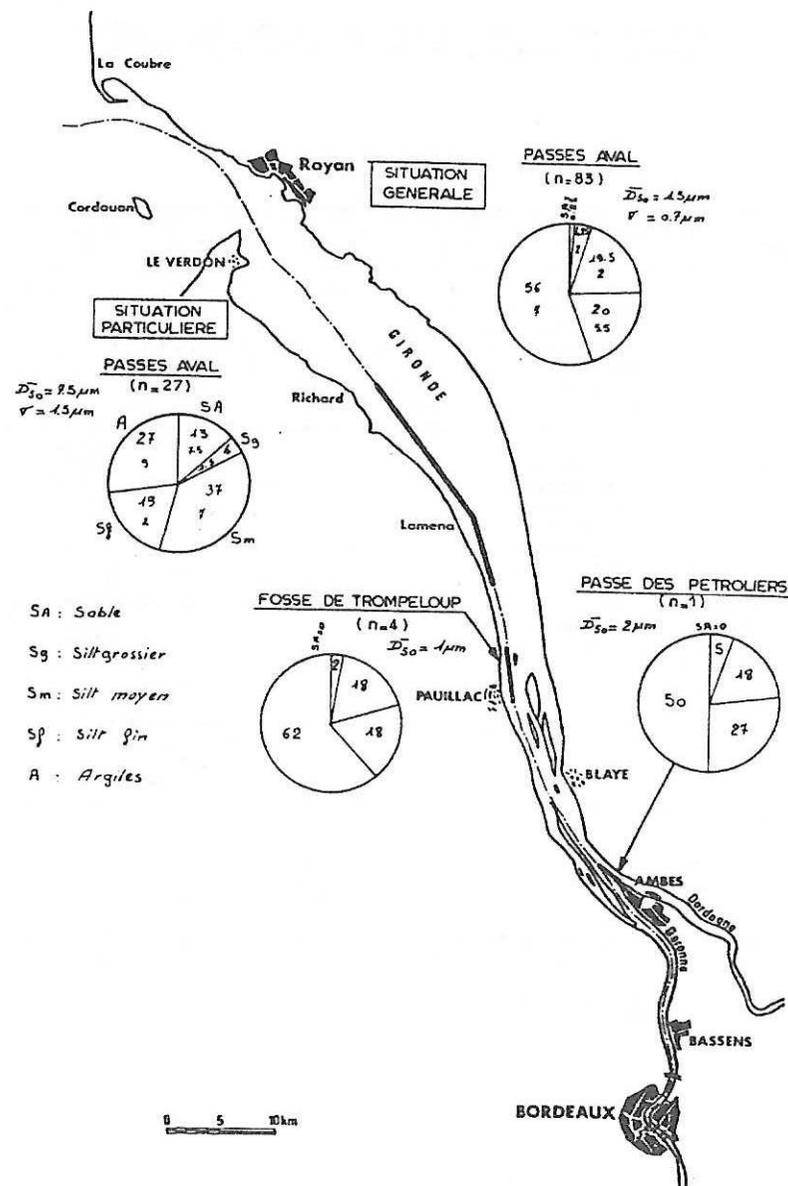


FIG. 5 : CARACTERISTIQUES GRANULOMETRIQUES GENERALES DE LA CREME DE VASE

GENERAL GRANULOMETRIC FEATURES OF FLUID MUD

TABLEAU II : REPARTITION LONGITUDINALE DES PARAMETRES GRANULOMETRIQUES DANS DES LENTILLES DE CREME DE VASE
LONGITUDINAL REPARTITION OF GRANULOMETRICAL PARAMETERS IN FLUID MUD LAYERS

PARAMETRE	MISSION 2/12/76 (n° 9) PK 66-75	3/11/77 (n° 8) PK 48-68,5	22/11/77 (n° 13) PK 59-75	6/12/77 (n° 15) PK 50,5-68,5	18/01/78 (n° 13) PK 67-71,5	17/02/78 (n° 17) PK 53,5-66
D ₅₀ (µm)	$\bar{x} = 2 \mu\text{m}$ Augmentation au PK 72 due à 1 prélèvement sur lequel D ₅₀ = 7 µm	1 µm D ₅₀ un peu + élevé au PK 60 (1.8 µm)	1 µm	1 µm	1.4 µm	1.8 µm
Teneur en sable (>60 µm)	$\bar{x} = 0.25 \%$ Pas d'évolution longitudinale significative	Pas de sable	Pas de sable	Pas de sable, sauf 1 échantillon (1%) au PK 60	Pas de sable sauf 2 échantillons avec (0.5%) (PK 60 et 66)	0.5 % Teneur en sable + élevée au PK 61 (1 à 2%)
S I L T fin (6-20 µm)	$\bar{x} = 13$ $\sigma = 5$ Pas d'évolution longitudinale	3 2 Teneur un peu + forte au PK (9%)	3 1 Pas d'évolution longitudinale	2 1 Pas d'évolution longitudinale	3 2 Teneurs un peu + élevées au PK 60 ($\bar{x} = 9\%$)	3 2 Teneurs un peu + élevées au PK 61 ($\bar{x} = 9\%$)
Silt moyen (20-6 µm)	$\bar{x} = 24$ $\sigma = 2$ Pas d'évolution longitudinale	18 2 Pas d'évolution longitudinale	20 2 Pas d'évolution longitudinale	19 4 Teneurs légèrement + faibles au PK 55 ($\bar{x} = 12\%$)	20 4 Pas d'évolution longitudinale	18 3 Pas d'évolution longitudinale
Silt fin (6-2 µm)	$\bar{x} = 11$ $\sigma = 2$ Pas d'évolution longitudinale	18 1 Pas d'évolution longitudinale	18 3 Pas d'évolution longitudinale	18 1 Pas d'évolution longitudinale	19 3 Pas d'évolution longitudinale	25.5 3 Pas d'évolution longitudinale
Argiles (<2 µm)	$\bar{x} = 51.75$ $\sigma = 6$ Pas d'évolution longitudinale	61 3 Teneurs + faible au PK 55 (52%)	59 4 Pas d'évolution longitudinale	61 5 Pas d'évolution longitudinale	58 6 Taux d'argiles un peu + élevé au PK 67 ($\bar{x} = 62\%$)	53 4 Taux d'argiles un peu + faible au PK 61 ($\bar{x} = 46\%$)

n° = nombre de prélèvements

II.1.2.2 - Répartition verticale

Les données exploitées proviennent de 30 verticales étudiées lors de 8 campagnes. Trois types de situation ont été rencontrés. Le plus fréquent se traduit par une diminution avec la profondeur du taux d'argiles corrélative avec une augmentation des teneurs en silts grossier et moyen.

Cet état serait l'indice d'une crème de vase générée à une même époque. Les particules grossières dont la vitesse de chute est plus élevée sont rencontrées en plus grand nombre vers la base du lit de vase.

Deux générations de dépôt se traduiraient par deux séquences de diminution et d'augmentation sur la verticale respectivement des teneurs en argiles et en silts grossier et moyen.

Les deux autres situations reconnues correspondent soit à une absence d'évolution verticale soit même à une augmentation avec la profondeur du contenu argileux (cas rencontré 1 fois). Ces deux dernières situations résulteraient de remaniements de la crème de vase par des travaux de dragage.

II.1.3 - Répartition dans le temps

L'exploitation des données est fournie par 7 missions. Les résultats sont indiqués sur la figure 6.

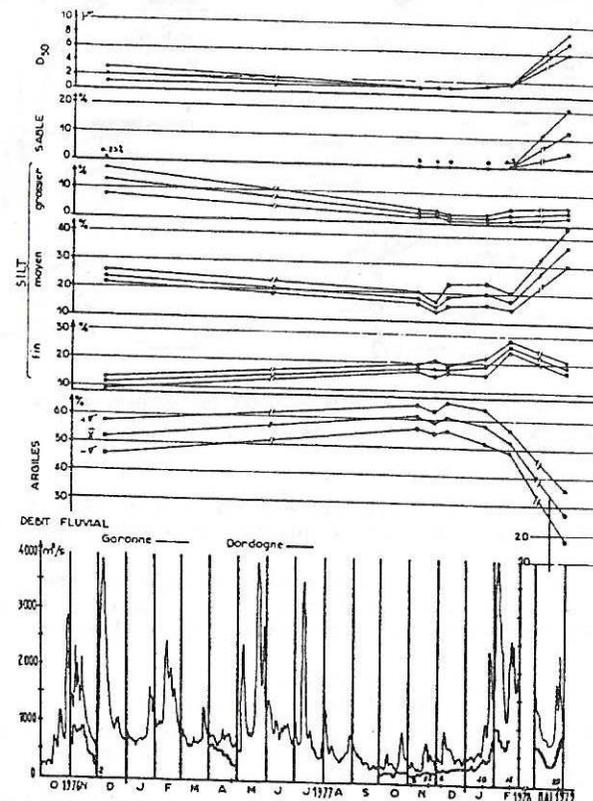


FIG. 6 : REPARTITION SAISONNIERE DES PARAMETRES GRANULOMETRIQUES DE LA CREME DE VASE SUR LES PASSES AVAL

SEASONAL REPARTITION OF GRANULOMETRIC PARAMETERS OF FLUID MUD IN THE LOWER REACHES

Les classes granulométriques les plus sujettes à des variations sont : argiles, silts moyens et sables alors que les proportions de silts fins et grossiers sont pratiquement constantes.

Dans le détail, les données acquises en mai 1979 à l'aval présentent l'originalité suivante : les teneurs en sables et en silts moyens ont augmenté très sensiblement. Ces modifications résulteraient de la conjugaison de forts coefficients de marée et d'une crue de la Garonne dans les 3 jours précédant l'échantillonnage, ce qui n'est pas le cas des autres situations.

II.2 - Etude lithologique et minéralogique

II.2.1 - Résultats généraux

Les résultats de l'évaluation des teneurs moyennes des composants lithologiques et minéralogiques sont reportés sur la figure 7.

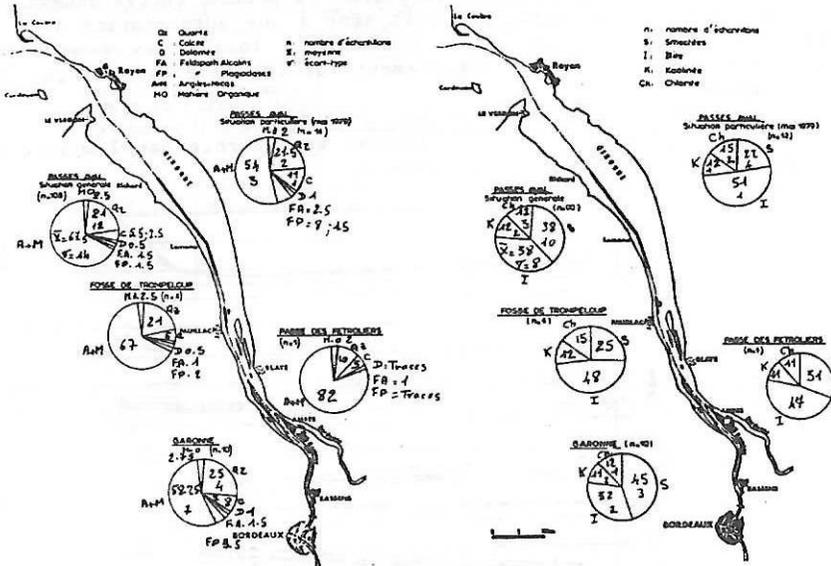


FIG. 7 : COMPOSITION LITHOLOGIQUE ET MINERALOGIQUE DE LA CREME DE VASE
LITHOLOGICAL AND MINERALOGICAL COMPOSITION OF FLUID MUD

Les argiles et micas (58 - 67 %) voire 82 % dans l'échantillon unique (passe des Pétroliers) et le quartz (21 - 25 %) sont les deux composants lithologiques majeurs.

En ce qui concerne les minéraux argileux, smectites et illites sont les minéraux cardinaux (environ 75 % du cortège) la kaolinite et la chlorite ont des teneurs moyennes comprises entre 11 et 15 %.

II.2.2 - Répartition spatiale

II.2.2.1 - Répartition longitudinale

Deux types de répartitions longitudinales ont été mis en évidence. Le premier concerne la répartition générale amont-aval. Le second se rapporte aux différences au sein d'une même unité de crème de vase à l'aval.

II.2.2.1.1. - Répartition générale amont-aval

Les valeurs moyennes sont mentionnées dans le tableau III. On remarque :

- une diminution vers l'aval du taux de quartz, de calcite et de feldspaths (notamment plagioclases) ;
- une augmentation vers l'aval des teneurs en argiles + micas ;

- une stabilité des pourcentages de dolomite et de matière organique.

TABLEAU III : REPARTITION GENERALE AMONT-AVAL DE LA COMPOSITION LITHOLOGIQUE ET MINERALOGIQUE
GENERAL REPARTITION UPSTREAM-DOWNSTREAM OF LITHOLOGICAL AND MINERALOGICAL COMPOSITION

DATES	SITES	QUARTZ	CALCITE	DOLOMITE	FELDSPATHS ALCALINS	FELDSPATHS PLAGIOCLASES	MATIERE ORGANIQUE	ARGILES + MICAS	SMECTITES (%)	ILLITE (%)	KAOLINITE (%)	CHLORITE (%)
4/11/77	Zone de Bordeaux (n° = 2)	31	12	0	3	5	2.75	46.25	46	33	10	11
3/11/77	Fosse de Tropelecoup (n° = 2)	25.5	7.5	0	1	2	2.5	61.5	25	51	12	12
	Passes aval (n° = 6)	25	7	0	2.5	2	2.5	61	23	54	11	12

n° : nombre de prélèvements

En ce qui concerne les minéraux argileux, il existe une diminution amont-aval des smectites, une augmentation amont-aval des illites et une bonne homogénéité des pourcentages de kaolinite et de chlorite.

II.2.2.1.2 - Evolution au sein de même îlots de crème de vase

Les résultats rapportés dans le tableau IV montrent qu'il n'existe pas d'évolution significative des cortèges minéralogiques au sein d'une même lentille de crème de vase.

II.2.2.2 - Répartition verticale

- homogénéité verticale des teneurs de chaque élément lithologique (situation la plus fréquente : 28 verticales sur 38 étudiées) ;
- accroissement avec la profondeur du taux de quartz avec corrélativement réduction de la proportion d'argiles et micas (10 verticales sur 38).

En ce qui concerne les minéraux argileux, l'homogénéité verticale du cortège est la règle (21 verticales sur 26) ; dans les 5 autres cas, on observe une augmentation avec la profondeur des teneurs en illite accompagnée d'une diminution de celles des smectites.

Cette évolution rencontrée dans l'estuaire de la Loire (Galenne 1974) s'expliquerait :

- par la taille plus petite des particules de smectites. Les flocons formés lors des processus de floculation auraient un diamètre plus réduit et chuteraient donc moins rapidement ;
- et/ou par la succession de dépôts de deux (ou plus) générations.

II.2.3 - Répartition dans le temps

- les fluctuations saisonnières majeures décelées sont relatives au quartz et aux argiles + micas qui présentent des variations inverses ;
- l'évolution des teneurs en calcite et feldspaths (notamment plagioclases) est semblable à celle du quartz (en général pourcentages les plus élevés en décembre 1976 et mai 1979, les plus faibles en avril 1977 et février 1978) ;

TABLEAU IV : REPARTITION LONGITUDINALE DE LA COMPOSITION LITHOLOGIQUE ET MINERALOGIQUE DES LENTILLES DE CREME DE VASE

MISSION PARAMETRE	2/12/76 (n = 9)	3/11/77 (n = 8)	22/11/77 (n = 13)	6/12/77 (n = 15)	18/01/78 (n = 13)	17/02/78 (n = 17)
ARGILES + MICAS	$\bar{x} = 29$ $\sigma = 17$ Teneur moyenne plus élevée au PK 69 (44 %) au lieu de (20 %)	$\bar{x} = 61$ $\sigma = 4$ Pas d'évolution longitudinale	$\bar{x} = 65$ $\sigma = 5$ Teneur un peu plus faible au PK 62 (57 %) au lieu de (65 %)	$\bar{x} = 70$ $\sigma = 2$ Pas d'évolution longitudinale	$\bar{x} = 67.5$ $\sigma = 5$	$\bar{x} = 79$ $\sigma = 4$
QUARTZ	$\bar{x} = 55$ $\sigma = 15$ Teneur moyenne plus faible au PK 69 (40 %) au lieu de (60 %)	$\bar{x} = 25$ $\sigma = 2$ Pas d'évolution longitudinale	$\bar{x} = 21$ $\sigma = 3$ Teneur un peu plus forte au PK 62 (70 %) au lieu de (20 %)	$\bar{x} = 17$ $\sigma = 2$ Pas d'évolution longitudinale	$\bar{x} = 17$ $\sigma = 3$	$\bar{x} = 11$ $\sigma = 3$
CALCITE	$\bar{x} = 8$ $\sigma = 3$ Teneur moyenne un peu plus élevée au PK 72 (12 %) au lieu de (7-8 %)	$\bar{x} = 7$ $\sigma = 1$	$\bar{x} = 6$ $\sigma = 1$	$\bar{x} = 5.5$ $\sigma = 0.5$	$\bar{x} = 8.5$ $\sigma = 1$	$\bar{x} = 6$ $\sigma = 1$
DOLOMITE	"traces"	"traces"	$\bar{x} = 0.75$	$\bar{x} = 1.5$	$\bar{x} = 1.5$	$\bar{x} = 0.5$
FELDSPATHS ALCALINS	$\bar{x} = 2$ $\sigma = 1$	$\bar{x} = 2.5$ $\sigma = 1$	$\bar{x} = 2$ $\sigma = 1$	$\bar{x} = 1.5$ $\sigma = 0.5$	$\bar{x} = 2.5$ $\sigma = 1$	$\bar{x} = 0.5$
FELDSPATHS PLAGIOCLASES	$\bar{x} = 3.5$ $\sigma = 1$	$\bar{x} = 2$ $\sigma = 1$	$\bar{x} = 2.5$ $\sigma = 1$	$\bar{x} = 2.5$ $\sigma = 0.5$	$\bar{x} = 0.5$	$\bar{x} = 0.5$
MATIERE ORGANIQUE	$\bar{x} = 2.5$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 2.5$ $\sigma = 0$	$\bar{x} = 2.75$ $\sigma = 0.25$	$\bar{x} = 2.5$ $\sigma = 0.25$	$\bar{x} = 2.5$ $\sigma = 0.25$	$\bar{x} = 2.5$ $\sigma = 0.25$
	2/12/76 (n = 9)	3/11/77 (n = 8)	22/11/77 (n = 13)	6/12/77 (n = 15)	18/01/78 (n = 13)	17/02/78 (n = 7)
SMECTITES	$\bar{x} = 36$ $\sigma = 3$ Teneurs un peu plus élevées au PK 72 (39 %)	$\bar{x} = 23$ $\sigma = 3$ Pas d'évolution longitudinale	$\bar{x} = 45$ $\sigma = 4$	$\bar{x} = 20$ $\sigma = 6$ Teneurs plus élevées au PK 50.5 (25 %)	$\bar{x} = 40$ $\sigma = 3$ Pas d'évolution longitudinale	$\bar{x} = 48$ $\sigma = 3$ Teneurs plus élevées au PK 59.5 (54 %)
ILLITE	$\bar{x} = 39$ $\sigma = 1$	$\bar{x} = 54$ $\sigma = 3$	$\bar{x} = 33$ $\sigma = 2$	$\bar{x} = 50$ $\sigma = 4$ Teneurs moins élevées au PK 50.5 (44 %)	$\bar{x} = 36$ $\sigma = 1.5$ Pas d'évolution longitudinale	$\bar{x} = 31$ $\sigma = 2$ Teneurs moins élevées au PK 59.5 (27 %)
KAOLINITE	$\bar{x} = 11$ $\sigma = 2$	$\bar{x} = 11$ $\sigma = 1$	$\bar{x} = 11$ $\sigma = 2$	$\bar{x} = 13$ $\sigma = 2$	$\bar{x} = 12.5$ $\sigma = 2.5$	$\bar{x} = 10$ $\sigma = 2$
CHLORITE	$\bar{x} = 14$ $\sigma = 2$ Teneurs plus élevées au PK 66 (18 %)	$\bar{x} = 12$ $\sigma = 2$ Teneurs plus élevées au PK 63 (17 %)	$\bar{x} = 11$ $\sigma = 1$	$\bar{x} = 17$ $\sigma = 2$	$\bar{x} = 11.5$ $\sigma = 2$ Teneurs plus élevées au PK 71.5 (15 %)	$\bar{x} = 11$ $\sigma = 2$ Pas d'évolution longitudinale

- le taux de matière organique présente une parfaite stabilité temporelle (2-2,5 %).

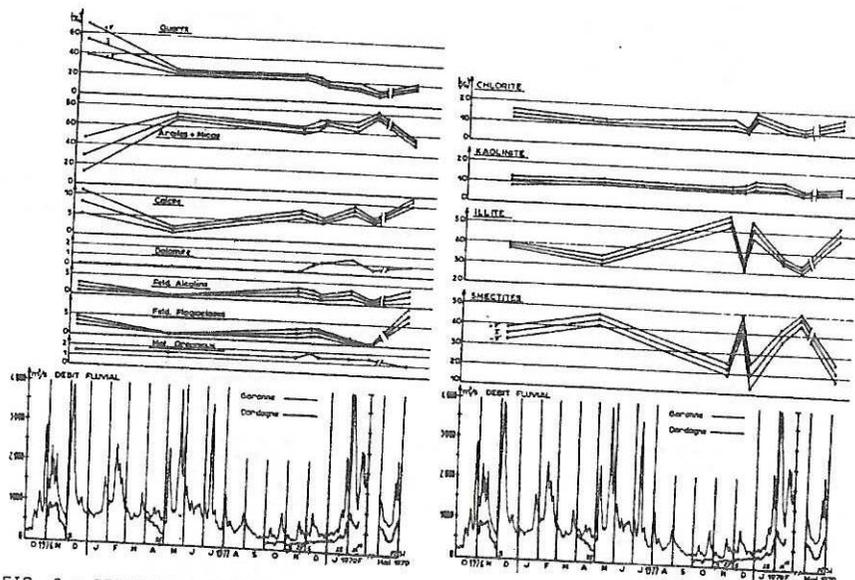


FIG. 8 : REPARTITION SAISONNIERE DES COMPOSANTS LITHOLOGIQUES ET DES MINERAUX ARGILEUX (PASSES AVAL)
SEASONAL REPARTITION OF LITHOLOGICAL COMPONENTS AND CLAY MINERALS (LOWER REACHES)

En ce qui concerne les minéraux argileux, les variations temporelles se traduisent essentiellement par des fluctuations en smectites et illite.

Ces fluctuations saisonnières sont toutefois délicates à interpréter car elles requièrent :

- la connaissance des mécanismes de formation de lentilles de crème de vase par des suspensions estuariennes, fluviales ou les deux ;
- la détermination des caractéristiques lithologiques et minéralogiques des suspensions fluviales introduites dans le système fluvio-estuarien, caractéristiques qui varient selon l'origine géographique et l'époque des crues (cf. § I.1).

En intégrant les données relatives au régime fluvial, aux déterminations effectuées sur les suspensions fluviales, au comportement des minéraux argileux dans l'estuaire (notamment les smectites), nous avons pu déceler l'origine prédominante des suspensions génératrices de dépôts de crème de vase :

MISSION	CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES		DEBIT FLUVIAL	ORIGINE PREDOMINANTE DES SUSPENSIONS GENERATRICES DE LA CREME DE VASE
	Cortège lithologique	Cortège minéralogique		
2/12/76	Fortes proportions de quartz : 55 % Faibles teneurs en argiles + micas : 30 %	Cortège mixte Smectites : 35 % Illite : 40 %	Crues fin octobre - mi-novembre. Précipitations automnales → suspensions riches en quartz. Crues intéressent la totalité du bassin versant, d'où fortes proportions de smectites et d'illite.	Fluviale
26/04/77	Fortes teneurs en argiles + micas : 70 % Faibles teneurs en quartz : 25 %	Smectites dominantes : 45 % Illite : 30 - 35 %	Débites fluviaux moyens en avril. Origine centrale du bassin versant Garonne, d'où fortes proportions de smectites.	Fluviale.
3/11/77	Teneurs élevées en argiles + micas : 60 % Faibles teneurs en quartz : 25 %	Illite dominante : 55 % Smectites : 25 %	Pas de débits fluviaux importants avant cette date, excepté ≈ 1000 m ³ /s : fin octobre (origine non pyrénéenne)	Estuarienne
22/11/77	Teneurs élevées en argiles + micas : 65 % Faibles taux de quartz : 20 %	Smectites dominantes : 45 % Illite : 30 - 35 %	Débit fluvial moyen novembre en provenance zone centrale du bassin versant Garonne.	Fluviale
6/12/77	Fortes teneurs en argiles + micas : 70 % Faibles teneurs en quartz : 20 %	Illite dominante : 50 % Smectites : 20 %	Pas de débits fluviaux importants entre le 22/11/77 et le 6/12/77	Estuarienne
18/01/78	Teneurs élevées en argiles + micas : 65 % Faibles teneurs en quartz : < 20 %	Cortège mixte Smectites : 40 % Illite : 35 %	Débites fluviaux moyens 1ère quinzaine de février	Estuarienne avec part fluviale
16 et 17/02/78	Teneurs très élevées en argiles + micas : 80 % Taux de quartz réduit : 10 %	Smectites dominantes : 45 - 50 % Illite : 30 - 35 %	Crue début février.	Fluviale
28 au 31/05/79	Teneurs en argiles + micas : 50 - 60 % Teneurs en quartz : 20 % Teneurs élevées en feldspaths plagioclases (8 %) et calcite (10 %)	Illite dominante : 50 % Smectites : 20 - 25 %	Crue le 25 mai.	Fluviale et estuarienne

CONCLUSION

A une échelle longitudinale, pour une époque donnée, la crème de vase présente une bonne homogénéité. La granulométrie, la lithologie et la minéralogie ne varient pas de façon significative.

Il n'en est pas de même à l'échelle saisonnière ni même à une échelle de temps plus réduite (décade). Les variations concernent les caractéristiques dimensionnelles, les teneurs en quartz et en argiles, la composition du cortège argileux.

- en périodes de crues : la fraîcheur et la diversité des apports fluviaux les alors importants s'enregistrent rapidement dans les formations de crème de vase
 - * la fraîcheur par une augmentation de diamètre médian, des teneurs en quartz, en feldspaths ;
 - * la diversité par des modifications du cortège argileux (marqueur des différents sous-bassins versants).
- en période d'étiage : les apports terrigènes sont alors réduits, on observe un affinement général des suspensions et une augmentation des teneurs en illite vers l'aval.

Cette étude a également contribué à préciser les mécanismes sédimentaires estuariens (notamment repérage de l'origine prédominante des suspensions génératrices des dépôts de crème de vase).

Au-delà d'une connaissance fondamentale, les résultats obtenus ont des implications directes pour l'aménagement et la gestion d'un grand estuaire.

BIBLIOGRAPHIE

- ALLEN G.P., CASTAING P., JOUANNEAU J.M. 1977
Mécanismes de remise en suspension et de dispersion des sédiments fins dans l'estuaire de la Gironde
Bull. Soc. Géol. France, Paris (7) t XIX n° 2 p. 167-176
- ANGUENOT F., CAIVEAU G. 1980
Mesure de turbidité à l'aide de jauges à radioéléments à absorption et à diffusion de photons
Rapport ORIS/SAR/S/80/2/A 48 FA - janvier 1980
- GALENNE B. 1974
Les accumulations turbides de l'estuaire de la Loire - Etude de la "crème de vase"
Thèse 3e cycle, Nantes, 323 p.
- GLANCEAUD L. 1938
Transport et sédimentation dans l'estuaire et à l'embouchure de la Gironde - Caractères pétrographiques des formations pluviales, saumâtres, littorales et néritiques
Bull. Soc. Géol. France Paris, Sér. 5, t VIII p. 599-630
- GRANBOULAN J., ROUX J., CHAUMET-LAGRANGE M., LACOMBE G., FOURCASSIES C. 1984
Measuring the navigable depth in a muddy channel
2nd International Hydrographic Technical Conference - september 1984 - Plymouth
- GRANBOULAN J., CHAUMET-LAGRANGE M., VILLEROT M. 1985
A new instrument for optimizing the maintenance of estuary channels - The ultrasonic probe measures vertical density gradients in muddy channels
2nd International Port Exhibition featuring Harbour construction, harbour technology, harbour organisation, information - Hambourg 7-10 mai 1985

JOUANNEAU J.M. 1982

Matières en suspension et oligo-éléments métalliques dans le système estuarien girondin - Comportement et flux
Thèse Doct. ès. Sc. Université Bordeaux I, n° 732, 150 p., 62 fig. 31 tabl.

KIRBY R., PARKER W.R., VAN OOSTRUM W.H.A. 1980

Définition du fond marin sur les routes de navigation passant dans des zones de vase
Revue hydrographique Internationale Monaco LVII (1) janvier 1980

LATOUCHE C. 1971

Les argiles des bassins alluvionnaires aquitains et des dépendances océaniques - Contribution à l'étude d'un environnement
Thèse Doct. ès. Sc. Université Bordeaux I n° 344, 2 t., 415 p., 96 fig.

LABORATOIRE CENTRAL D'HYDRAULIQUE DE FRANCE 1969

Estuaire de la Gironde - Synthèse des phénomènes naturels - Etude de l'évolution des fonds
Rapport général MIGNIOT C. - GERLIER P. MD/CP/MB/LCHF/713030/

LABORATOIRE CENTRAL D'HYDRAULIQUE DE FRANCE 1970

Etude des propriétés physiques de la vase de la Gironde - Tassement et rigidité initiale
Commande PORT AUTONOME DE BORDEAUX HC 17.232
Rapport général MIGNIOT C.-BELLESORT B. MD/CP/MB/LCHF/705030/16

LABORATOIRE NATIONAL D'HYDRAULIQUE 1970

Etude expérimentale de la dynamique des sédiments fins - Description de l'installation et étude du début d'entraînement
Rapport n° 1 BONNEFILLE R. - CORMAULT P. HCO42 R 701 7 737 DHM octobre 1970

LABORATOIRE NATIONAL D'HYDRAULIQUE 1971

Etude expérimentale de la dynamique des sédiments fins - Conditions de transport en suspension de la vase naturelle
Rapport n° 2 BONNEFILLE R.-CORMAULT P.-KOVACS J. HCO42/25 R 701 septembre 1971

COLLOQUE FRANCO-JAPONAIS D'OCEANOGRAPHIE
Marseille 16-21 Septembre 1985

Fascicule 1 : Océanographie physique et dynamique sédimentaire
Génie côtier et hydrodynamique
Coastal engineering and hydrodynamics

Alain GROVEL
UNIVERSITE DE NANTES, ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE MECANIQUE
1, RUE NOE, 44072 NANTES

RESUME : Le port de LORIENT (FRANCE) est un parfait exemple des influences mutuelles de l'hydrodynamique et du Génie Côtier.

Ce port fut créé il y a de cela trois siècles, sur une côte sujette aux effets de la houle, des courants marins ou d'estuaire et comprenant de nombreux types d'équipements naturels ou artificiels : îles, rade, goulet, estuaires étiers, chenaux...

Cet article montre comment cette expérience de trois siècles peut être reliée à celle d'autres ports dans le monde.

ABSTRACT : LORIENT-HARBOUR (FRANCE) is a perfect example of mutual influence of hydrodynamics and Coastal Engineering.

This harbour was created three centuries ago, in a coast with many effects of swells, marine and estuarine currents and many types of natural or built equipments : islands, anchorage, sound, estuaries, inlets, channels...

This paper shows how this three centuries experience is reliable to other harbours in the world.

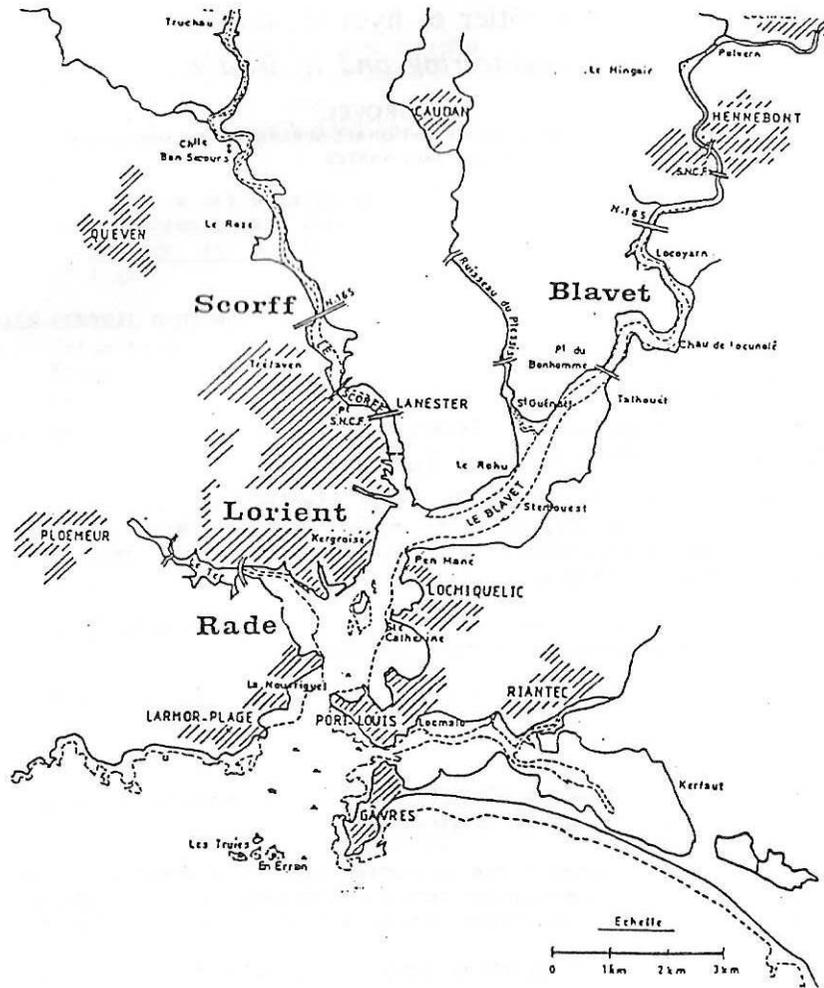


FIG 1 : Le port de LORIENT

PRESENTATION : La figure n°1 présente la situation du port de LORIENT sur une rade dans laquelle se jettent deux fleuves et la figure n°5 montre la situation générale de LORIENT sur la côte Nord Atlantique.

Les arguments qui font de cette région maritime une région type sur le plan de l'aménagement du littoral sont les suivants :

- c'est une région très aménagée et la date de début d'aménagement est bien connue (1666), création dans une zone de forêts des établissements de la Compagnie des Indes.

- on trouve sur des distances petites des phénomènes hydrodynamiques et des aménagements très divers et très complexes ; les études (depuis 20 ans) sont donc relativement aisées et applicables dans beaucoup d'autres sites.

- de fait, les résultats ont montré qu'il y avait là, concentrées dans ce grand modèle, la plupart des structures hydrauliques des zones portuaires où la marée se fait sentir. (ici 5,50 m de marnage maximum).

L'hydrodynamique :

a) l'hydrodynamique estuarienne

La figure n°2 montre comment en jusant il se forme une "lentille immobile" analogue à celle décrite par BERTHOIS en Loire (1964).

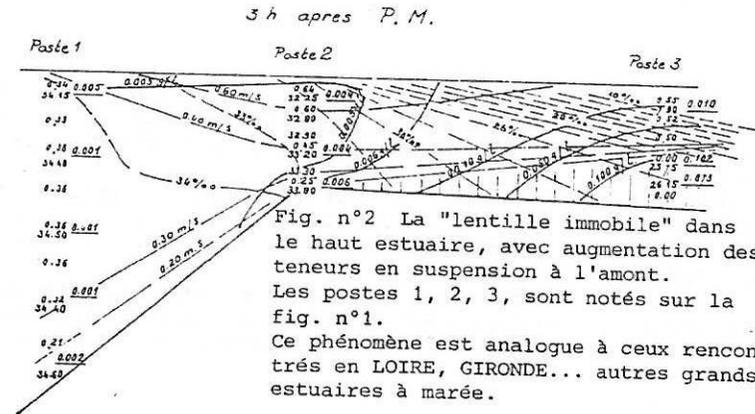


Fig. n°2 La "lentille immobile" dans le haut estuaire, avec augmentation des teneurs en suspension à l'amont. Les postes 1, 2, 3, sont notés sur la fig. n°1. Ce phénomène est analogue à ceux rencontrés en LOIRE, GIRONDE... autres grands estuaires à marée.

Ce phénomène a été décrit sous le nom de "two-layered system" par PRITCHARD (1955).

Un modèle, GROVEL (1970), a permis en utilisant les équations de PRITCHARD (1958) et les hypothèses simplificatrices de RATTRAY et HANSEN (1962), de montrer que si l'on travaillait sur un seul cycle de marée et sur une section rectiligne le phénomène pouvait être expliqué par la "convection par gravité".

Figure n°4

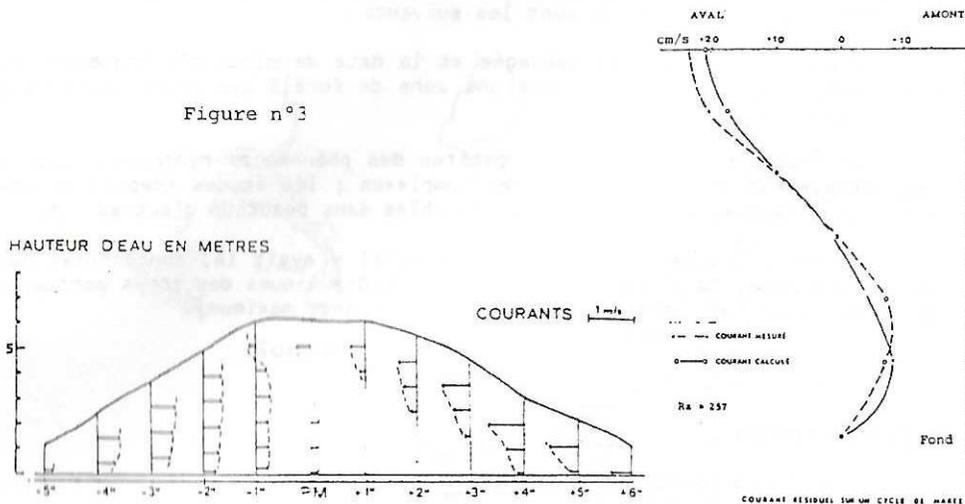
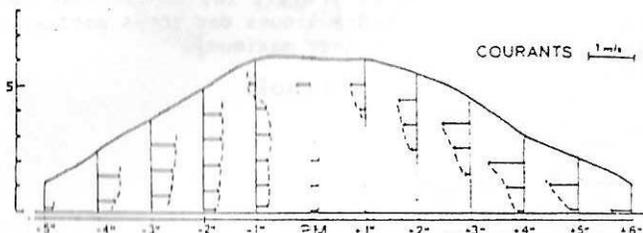


Figure n°3

HAUTEUR D'EAU EN METRES



En fait il a été démontré ici que ce que divers auteurs nomment "lentille immobile", "two-layered system" ou "mélange de convection par gravité" sont les phases successives au cours du jusant d'un seul et même phénomène.

De plus on trouve dans la zone A de la figure 1 l'estuaire typique de PRITCHARD. En zone B on trouve ce qu'il nomme estuaire "partiellement mélangé" ; et en zone C, dans la rade c'est, selon sa classification, un "estuaire homogène".

A cette structure de "lentille immobile" est toujours associée un "bouchon vaseux", GIANGEAUD (1941). Ce bouchon vaseux est présent dans le Scorff, on verra plus loin quelle fut son histoire dans le Blavet.

b) Les houles :

La figure n°5 montre comment sont amorties les houles les plus fortes de l'Atlantique, celles du Nord-Ouest. L'amortissement est proportionnel à l'écartement des orthogonales et LORIENT se situe donc dans une zone de calme.

De même la position de l'île de GROIX en brise-lame isolé de protection des passes (ouvrage classique de Génie Côtier) modère l'action des tempêtes de Sud-Ouest, toujours à craindre (voir figure n°6). Le maximum de houle (mesuré) à l'entrée des passes est de 1 mètre.

LEGENDE
Houle N - W
Période sign. au
large: 13"

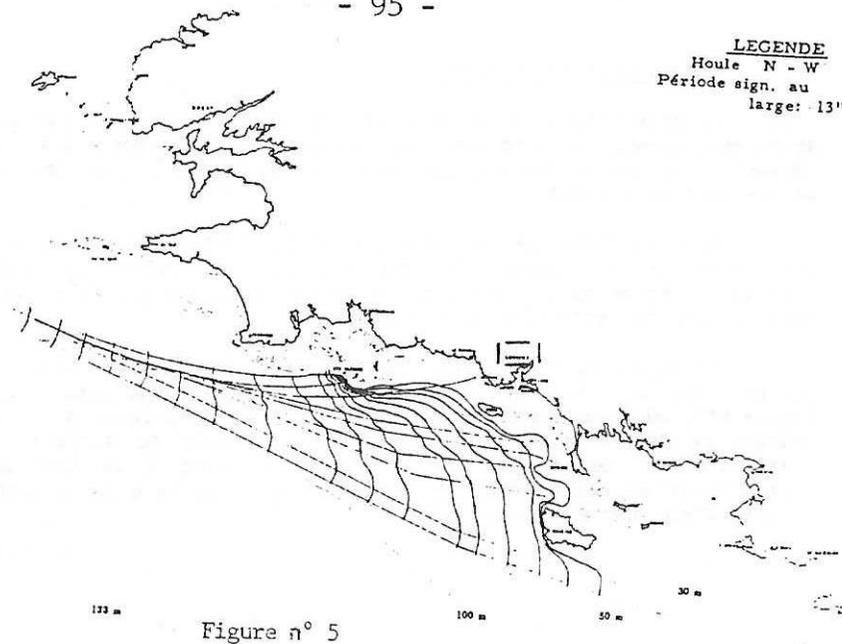


Figure n° 5

Houle du SW
Période 11"

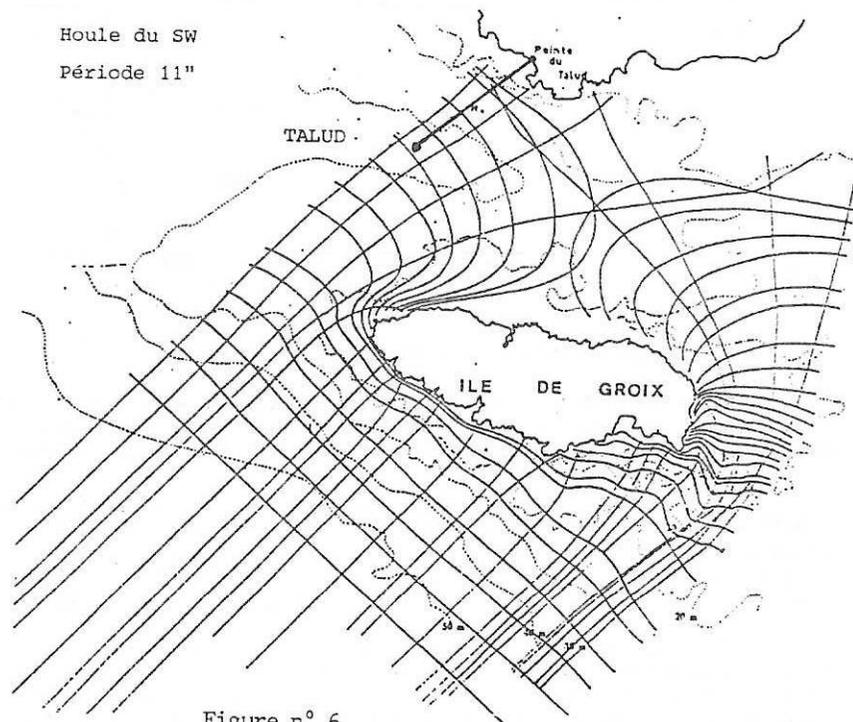


Figure n° 6

c) Les courants côtiers :

La zone située entre GROIX et la côte est balayée par les courants de marée auxquels se joignent les courants dûs au vent, les "courants de dérive". Les vents d'Ouest dominant, aussi la majorité des courants de dérive portent à l'Est.

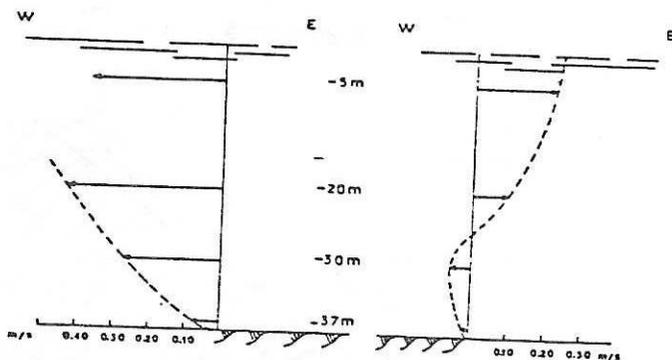
Mais la forme de la côte Sud de la Bretagne fait qu'à une longue période de vents d'Ouest, lorsque ceux-ci faiblissent ou disparaissent, succède un régime de courant dit "de pente" provoqué par l'accumulation des eaux le long de cette côte déchiquetée.

En fosse du TALUD (voir carte n°6) on se trouve donc avoir durant ces périodes des structures verticales de courant analogues à celles de la figure n°7, où le courant de fond porte toujours à l'Ouest alors qu'un léger courant de dérive à tendance à pousser les eaux de surface vers l'Est. Statistiquement cette zone est le siège de courants de fond prédominants vers l'Ouest et elle constitue le centre d'un système de compensation des apports d'eau dûs aux vents d'Ouest.

Coef : 80 Mi-Jusant

Coef : 76 Mi-Flot

Figure n°7
Profils de vitesses
(TALUD)



Le Génie Côtier :

a) L'adaptation aux conditions naturelles.

L'île de Groix forme un magnifique brise-lames naturel et la côte sous le vent a toujours vu des mouillages forains. Actuellement la Marine Nationale y entretient encore des coffres pour ses grands navires.

Le port de LORIENT s'est développé à la fin du XVIIe siècle dans le SCORFF pour des raisons de commodité. Le bois arrivait par flottaison et les vasières, qui se formaient dans cette position légèrement en aval du bouchon vaseux, permettaient de construire des installations aussi efficaces que simples : Ducs d'Albe sur pieux en bois, estacades, passerelles etc...

Tout se compliquera avec les premiers dragages... Mais l'utilisation la plus ingénieuse des conditions locales est récente ; elle concerne le lancement en 1971 d'une conduite sous-marine destinée à évacuer vers un point de non retour les résidus épurés de la station de traitement de l'agglomération lorientaise.

C'est évidemment vers le fond de la fosse du TALUD que cette conduite a été dirigée, avec le minimum de trajet en mer et perpendiculairement aux crêtes de la houle la plus conséquente à cet endroit (celle du SW) (voir figure 6). La protection de l'atterrissage est naturelle, elle aussi, car au droit de la falaise le tube plonge sous la protection des blocs de granite de 5 tonnes d'un chaos granitique sous-marin, relique des coulées de soli-fluxion sud armoricaine (GROVEL 1981)

b) La modification des phénomènes hydrodynamiques

La construction des vaisseaux de la Compagnie des Indes va entraîner une déforestation intense autour de Lorient. On peut rappeler qu'il fallait de 3000 à 4000 chênes pour construire ces navires. La sédimentation va donc s'accélérer et très vite les archives de la Compagnie notent la formation d'une barre de vase à l'entrée du Scorff. Tout indique qu'à cette époque la lentille immobile du Blavet se situe au niveau de l'embouchure du SCORFF.

En 1828 le Blavet est canalisé et relié au canal de Nantes à Brest. Son débit est donc régulé ; les conséquences ne se font pas attendre longtemps :

- la barre à l'embouchure du Scorff disparaît
- c'est une zone située 2 km en amont dans le Blavet qui s'envase.

La position moyenne de la lentille immobile, et avec elle toute la structure d'équilibre hydrodynamique du Blavet, est donc remontée vers l'amont par suite du lissage des crues et des étiages. Les courants se sont affaiblis mais la sédimentation aussi ; les sables sont stoppés, les vases vont devenir de plus en plus fines.

On commence à cette époque à entretenir les chenaux et les premières instabilités de vasières latérales sont observées. En 1920, un barrage hydroélectrique est construit à GUERLEDAN sur le BLAVET. On n'observera donc plus de grandes crues et dans le goulet qui sépare la rade de la mer ouverte le courant se renversera normalement en flot et en jusant quel que soit le débit d'eau douce, alors que les Instructions Nautiques signalaient que les forts débits maintenaient les courants en position de jusant (en surface) à tout heure de la marée. On vient d'assister là à la deuxième remontée vers l'amont de la structure hydrodynamique d'un estuaire ; surtout c'est la fin du "bouchon vaseux", fin de la sédimentation.

"La lentille immobile" existe toujours mais elle ne concentre plus que 100 mg/l de matières en suspension au maximum (300 grammes en LOIRE !). Partout ailleurs on ne mesure que 20 ou 30 mg/l. Cette disparition de l'envasement va être exploitée à fond sur le plan de l'équipement portuaire : le port de pêche industrielle est construit sur la rive droite dans une vasière qui est draguée jusqu'au rocher et entourée de quais avec une ouverture dirigée vers le goulet. Son entretien des fonds est quasi symbolique ! Une réussite ! Réussite aussi pendant longtemps que le port de commerce dont les souilles ne s'ensavent que très modérément ! Mais, du fait de travaux qui créent des surfaces d'eaux tranquilles, du fait

de l'augmentation des tonnages de navires, du fait de l'extension du port, on en est arrivé à draguer en divers points de la rade, et à dépasser le tonnage apporté par les fleuves. (L'apport de la mer par le goulet est négligeable).

Le port de Lorient est actuellement en situation de "surdragage". On assiste maintenant à des glissements superficiels des vases dans les zones où elles deviennent de plus en plus organiques par la diminution des apports minéraux.

C'est alors la marée qui est la cause de la liquéfaction en surface de certaines vases organiques où la fermentation entraîne une non saturation. Les pressions interstitielles ne se dissipent plus d'un cycle sur l'autre, et une couche de 5 à 15 cm arrive à un état d'instabilité tel qu'un courant violent, un passage de navire, un clapotis de rade, puisse provoquer le déclenchement d'un glissement. (ALEXIS, GROVEL, 1983).

CONCLUSION

Les vasières encore intactes, les ouvrages maritimes, commencent donc à souffrir de la modification des conditions hydrodynamiques provoquée par une canalisation avec barrage du plus important des fleuves débouchant sur une rade.

Les dimensions réduites de la région ont permis de mettre parfaitement en évidence un phénomène qui se reproduit partout où les aménagements des fleuves en amont risquent d'influencer tout le Génie Côtier d'une zone estuarienne.

Mais l'action de l'homme n'a pas toujours cet aspect négatif ; ainsi les houles tendent à faire de GAVRES (voir carte n°2) une île en coupant la flèche de sable qui fait la liaison avec la terre ferme.

Les confortements entrepris maintiennent cette presqu'île et toute la "petite mer" qu'elle protège dans un état, non conforme à l'évolution du rivage sous l'action des forces océaniques en présence, mais combien rassurant !

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALEXIS A. GROVEL A. (1983) "Contribution à la stabilité des talus immergés"
2° journées Universitaires - Mécanique des sols appliquée - E.N.S.G.
NANCY 19 - 20 Oct.
- BERTHOIS L. (1964) Etude de dynamique estuarienne dans le fleuve la Loire.
(4° Congrès Int.Portuaire, ANGERS, 22 - 27 juin 1964, section III, 1ère
partie p 32 - 41).
- GLANGEAUD L. (1941) Evolution morphologique et dynamique des estuaires
(Bull. A.G.F., n°140 -141 p 95 - 103).
- GROVEL A. (1970) Etude d'un estuaire dans son environnement
Thèse d'Etat, Faculté des Sciences, Université de Nantes, 370 p,
NANTES.
- GROVEL A. (1981) Environnement et pose d'une conduite sous-marine
(Revue Française de Géotechnique, 14 bis, 1981).
- PRITCHARD D.W. (1955) Estuarine circulation patterns.
(A m Soc. Civil. Eng., 81. p 717).
- PRITCHARD D.W. (1958) The equations of mass continuity and salt continuity
in estuaries. (J. Marine. Res., 17, p 412 - 423).
- RATTRAY J. HANSEN J. (1962) A similarity solution for circulation in an
estuary (J. Marine. Res., 20, p 121 - 133).

COLLOQUE FRANCO-JAPONAIS D'OcéANOGRAPHIE
Marseille 16-21 Septembre 1985

Fascicule 1 : Océanographie physique et dynamique sédimentaire
Les problèmes de gestion du littoral dans le Finistère
(Ouest de la Bretagne)

Problems in coastal management in Finistère (Western Brittany)

André GUILCHER
UNIVERSITE DE BRETAGNE OCCIDENTALE. B.P. 860. 29279 BREST

Résumé

Dans les années récentes, les études géomorphologiques sur les littoraux français ont été, notamment mais non exclusivement dans l'ouest de la Bretagne, souvent infléchies en un sens gestionnaire, dans lequel on s'est efforcé de combiner un perfectionnement de la connaissance des processus naturels, et une utilisation de cette connaissance pour une gestion, plus rationnelle qu'antérieurement, du domaine côtier et intra-côtier. L'auteur présente en cette communication un aperçu de l'important travail d'équipe qui a été fait à cet égard sur les côtes du département du Finistère, principalement dans les domaines de la protection et de la réhabilitation des dunes, de l'érosion des côtes de sable et de galets, et de la gestion des zones humides, en collaboration avec les pouvoirs publics et une association de protection de la nature.

Abstract

Problems in coastal management in Finistère, Western Brittany.

In recent years, the geomorphological studies on French shores have been, especially but not exclusively in Western Brittany, often focused on management with the double purpose of improvement of the knowledge of the natural processes, and a utilization of this knowledge in a better management of the coastal and intracoastal area. In this paper, the author gives a general idea of the work carried out in this respect by a team of geographers on the coasts of Finistère, or Western Brittany district, particularly in sand dune protection and recovery, sandy and pebbly shorelines erosion, and coastal wetlands management, in collaboration with public authorities and an association for nature protection.

Dans l'ouest de la Bretagne, les préoccupations des géomorphologues littoraux, qui appartiennent généralement à l'Université de Bretagne Occidentale (UBO, Brest) ont été, dans la période contemporaine, de plus en plus orientées vers les questions de gestion du littoral. Certes, les problèmes proprement physiques, comme ceux posés par la chronologie des formations sédimentaires côtières, ont continué d'être approfondis (exemples: Guilcher et Hallégouët 1981; Hallégouët 1982); mais les difficultés résultant des occupations conflictuelles et des dégradations anthropiques littorales, de même que les incursions de la mer en des espaces fortement occupés par l'homme, ont de plus en plus retenu l'attention des spécialistes de l'évolution des rivages. Ce qui n'est pas du tout spécial à la Bretagne, mais qui, au contraire, se situe dans un contexte général et mondial (France de l'Ouest: Groupe Sers 1985; Hirschberger et al. 1979; Laboratoire... 1981; France en général: Guilcher 1984).

Un trait d'ensemble de ces actions est une active collaboration avec les pouvoirs publics nationaux ou locaux et avec une association écologiste: collaboration qui s'est révélée fructueuse bien que parfois difficile à faire entrer dans la pratique, du fait de divergences d'intérêts. Bien que ce ne soit pas spécifique du Finistère, il faut le préciser dès l'abord (Bodéré et al. 1982). Une convention a été signée entre l'UBO d'une part, la Direction Départementale de l'Équipement (DDE) et le Conseil Général du Finistère d'autre part, pour l'étude en concertation des sites menacés par les progrès de la mer. Du côté des problèmes éoliens (dunes côtières), les organismes officiels sont surtout la Direction Départementale de l'Agriculture (DDA) et l'Office National des Forêts (ONF). L'association écologiste essentielle est la Société pour l'Étude et la Protection de la Nature en Bretagne (SEPNB), qui a de nombreux liens avec l'UBO pour le Finistère. L'action du Conservatoire du Littoral sera précisée à propos des dunes. En des sites divers, la collaboration des spécialistes avec les municipalités est devenue de plus en plus fréquente et fructueuse (voir le cas des dunes de Trégunc) et c'est peut-être là que l'infléchissement des conceptions des pouvoirs publics a été le plus grand. Une association, l'ARIC, qui groupe plus de 280 communes, vise à faciliter la formation et l'accès à l'information de ses membres pour les problèmes de gestion et d'aménagement. Elle a un service communes-universités, par le canal duquel ont été organisés dans le Finistère en mai 1985, pour les élus côtiers des trois départements ouest-bretons, des journées sur les problèmes d'érosion littorale et dunaire.

Protection et réhabilitation des dunes littorales.

Les dunes littorales de Bretagne posent des problèmes de conservation particuliers, du fait qu'à de rares exceptions près ce sont des dunes fossiles et non reconstituables à partir des plages auxquelles elles sont adossées. Certaines ont progressé jusqu'au XVIII^e siècle, mais l'ensemble de ces massifs avait été mis en place un peu avant ou vers le début de l'ère chrétienne, à la faveur, semble-t-il, d'une légère régression marine qui, vers 2500-2000 avant l'Actuel, avait découvert plus qu'aujourd'hui les estrans alimenteurs (Morzadec-Kerfourn 1974). La non-reconstitution actuelle des dunes bretonnes s'est trouvée avoir de graves conséquences à partir des années cinquante, du fait de l'expansion de la civilisation des loisirs et de ses conséquences connues bien ailleurs qu'en Bretagne: invasion par les véhicules motorisés, arrachement de la végétation stabilisatrice, brèches ouvertes dans la dune bordière du rivage, et recul de ce dernier. Ce qui peut parfois, en d'autres lieux, être compensé par des apports naturels de sable, ne l'est pas ici, d'où l'urgence plus grande d'arrêter les dégâts (Berrou 1971; Hallégouët 1978; Castro 1981; Ministère de l'Environnement 1984).

La politique de protection et de réhabilitation a consisté, d'une part en études sur les processus de dégradation, d'autre part en efforts de stabilisation du sable et de restauration de la végétation dunaire. Ces efforts ont été conduits par un groupe d'universitaires appartenant souvent mais pas toujours à la SEPNB, en collaboration avec les pouvoirs publics. Ces derniers incluent la DDA, l'ONF et un nombre croissant de municipalités. Un concours administratif essentiel est celui du Conservatoire du Littoral, organisme national qui, dans la mesure de ses moyens financiers, achète progressivement les massifs dunaires les plus menacés sur lesquels les travaux nécessaires peuvent ensuite être effectués avec disparition des conflits antérieurs avec les propriétaires. Certains sites sont malheureusement parvenus à un état de dégradation tel que la réhabilitation ne paraît plus possible: ainsi le site du Vougot sur la côte nord. Mais en d'autres cas de bons résultats ont pu être obtenus.

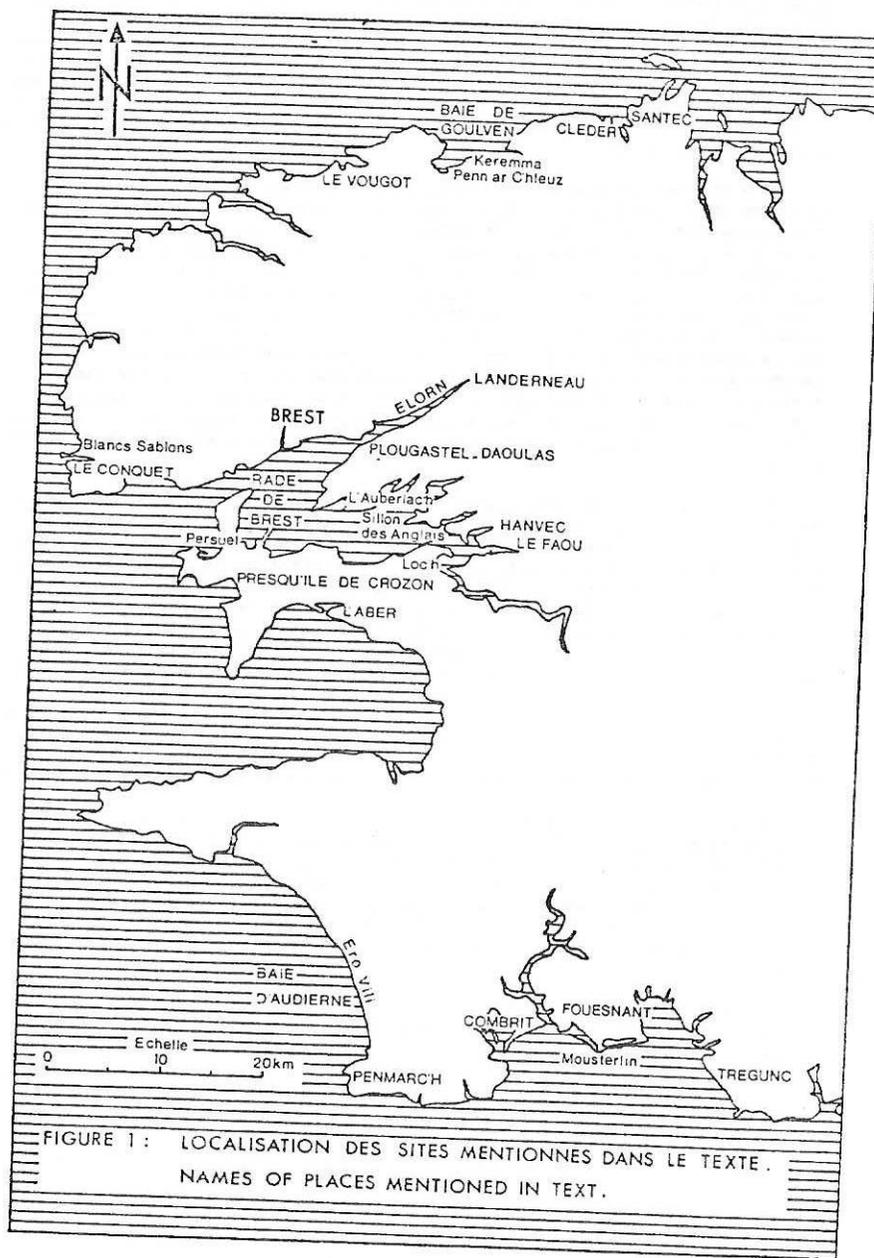


Figure n° 1

La côte Ouest du Cotentin : plan de situation
 The Western Coast of the Cotentin peninsula : location map

Le cas des dunes des Blancs Sablons, dans la commune du Conquet, peut être considéré comme une réussite typique. Sur un massif rapidement et profondément dégradé à partir de 1960, l'acquisition de 88 hectares par le Conservatoire en 1979 a permis, en collaboration entre la DDA, les scientifiques et la SEPNS, la mise en oeuvre d'une technique de fascinages brise-vents, clôtures dissuasives, escaliers en bois d'accès à la plage auxquels la circulation des piétons est limitée, et plantations d'oyats. La dissuasion a été acceptée par les usagers (cependant subsiste le problème des motos de jeunes...); les plantations ont réussi en grande partie; même là où le succès n'est pas complet, les expériences faites sont utiles pour l'avenir de ce site et pour celui d'autres.

Un autre cas encourageant est celui des dunes de Trégunc (sud du Finistère). Là comme en divers lieux les dunes ont été menacées par la pression des résidents secondaires, par la vente de terrains dunaires par des propriétaires particuliers pour y installer des caravanes, et par le camping sauvage. La municipalité a arrêté l'urbanisation à partir de 1971 par un plan directeur d'urbanisme, et par la mise des dunes en zone de préemption. Le camping a été interdit dans les dunes et reporté à proximité par arrêté du Préfet du Finistère sur demande de la commune; des étangs barrés par les dunes ont été classés; 80 ha ont été acquis par le département ou le Conservatoire, et des conventions de gestion ont été passées avec eux par la commune. Une réhabilitation, qui a partiellement réussi, a été faite par oyats protégés. Une éducation des usagers a été entreprise, et les jeunes ont été associés aux plantations pour les intéresser à l'oeuvre. C'est un cas où la part d'initiative de la municipalité et surtout du maire a été grande.

Dans la plupart des dunes bretonnes menacées, un point très important est le recul frontal du littoral, qui inquiète tout le monde, qu'il y ait eu urbanisation des dunes ou que l'on cherche à restaurer la nature. On a beaucoup discuté, et on discute encore, des moyens d'arrêter ou de ralentir ce recul. En divers cas, notamment à Cléder (côte nord), on a fait des enrochements, qui en ce lieu ont eu la faveur de la municipalité. Une opinion plus répandue, notamment chez les géographes (exemple Castro 1981), est cependant que des protections légères telles que les fascinages sont très préférables. On discute aussi de l'efficacité des épis transversaux. Mais, comme à Penn ar C'hleuz en Goulven (voir cordons littoraux), la protection frontale des dunes est très liée à la gestion de l'estran en avant d'elles, et au problème des prélèvements souvent faits sur cet estran et qui entraînent nécessairement, sauf si l'alimentation naturelle est très forte, un recul par remaniement du profil. En ce domaine, la concertation est souvent insuffisante et inefficace.

D'autres sites dunaires finistériens étudiés et traités en collaboration sont notamment ceux de Santec dans le nord et de Combrit dans le sud (Bodéré et al. 1982; Ministère... 1984). A Santec, les plantations de réhabilitation ont inclus des *Eleagnus* et des *Olearia*, qui ont réussi, mais au prix d'une introduction massive de terre végétale, ce qui modifie beaucoup le milieu initial en dénaturant son caractère dunaire. De nombreux autres sites finistériens, avec résultats des travaux, peuvent être trouvés dans Ministère ... 1984, p. 69-72.

Cordons littoraux de sable et de galets

Les bords de la rade de Brest se trouvent comporter un très remarquable ensemble de cordons littoraux de galets et graviers, de types variés, dont les matériaux sont remaniés à partir des formations quaternaires affleurant dans les falaises voisines. Depuis que ces cordons ont été inventoriés et décrits (Guilcher et al. 1957), l'un d'eux, près du Faou, a été détruit par une tempête en 1974, et d'autres ont été endommagés par l'homme. La plus grande partie d'entre eux subsiste, et constitue encore un précieux musée de formes littorales qu'il faut préserver si possible. La flèche de l'Auberlac'h, dans la commune de Plougastel-Daoulas, est une flèche de mi-baie qui est unique au monde ou du moins très rare du fait de sa pénétration profonde dans la rive d'en face, par érosion d'une terrasse quaternaire de versant par le courant de marée (fig.2). La municipalité de Plougastel a compris l'intérêt scientifique de cette accumulation et veut bien collaborer avec notre groupe à sa préservation. En octobre 1984, une tempête coïncidant avec une très grande marée y a fait des brèches, qu'on a colmatées à la pelle mécanique. L'efficacité au moins provisoire de ce travail a été constatée lors d'une autre tempête en avril 1985: on peut espérer

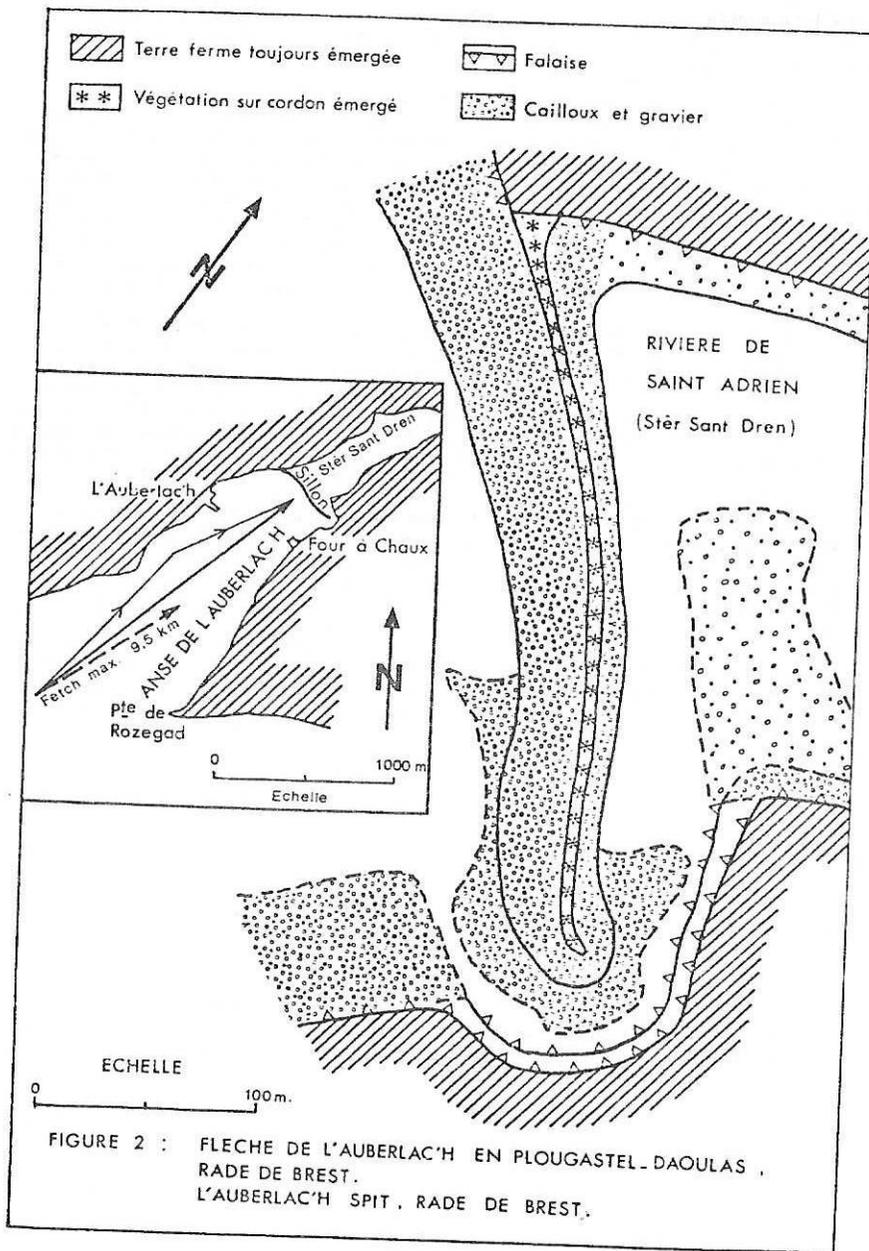


FIGURE 2 : FLECHE DE L'AUBERLAC'H EN PLOUGASTEL-DAOULAS, RADE DE BREST. L'AUBERLAC'H SPIT, RADE DE BREST.

Figure n° 2

Courbe de marée de vive eau dans le havre de Regnéville
Spring tidal curve in the Sienne estuary (havre de Regnéville)

que, moyennant une surveillance conjuguée, la gestion de cette forme très particulière pourra se poursuivre. On compte pouvoir étendre une telle gestion au Sillon des Anglais et à la flèche du Loc'h, dans l'est de la rade de Brest, qui donnent des sujets d'inquiétude.

Le grand cordon de galets (Ero Vili) qui borde le centre-sud de la baie d'Audierne est un site qui présente (Guilcher 1948; Bodéré 1971) un double intérêt: d'une part en lui-même et par sa genèse et ses antécédents morphologiques (Guilcher et Hallégouët 1981), d'autre part par les marais et zones humides qui se trouvent en arrière. Or il se trouve que ce grand cordon a été considérablement diminué par les prélèvements qui y ont été faits, d'abord par l'armée allemande durant la seconde guerre mondiale, ensuite par les entrepreneurs locaux qui ont largement suivi l'exemple. Là aussi, des efforts de protection, et de persuasion des pouvoirs locaux, ont été faits, avec des inventaires précis, stimulés par l'intérêt écologique des zones humides (Bodéré et al. 1982).

Sur la côte nord du Finistère en baie de Goulven, la flèche sableuse de Penn ar C'hleuz, qui entre dans le type "compound recurved spit" mais avec dunification sur place de "type Darss" de ses crêtes multiples successives, a fait l'objet d'un suivi détaillé (Hallégouët et Moign 1979). Une gestion s'y impose, car à un accroissement rapide a succédé, dans les derniers temps, une érosion très probablement due à des prélèvements humains excessifs de sédiments sur l'estran en avant. Cette affaire reste en cours, comportant, comme souvent, une considération simultanée des phénomènes côtiers et pré-côtiers.

Une autre flèche qui demande une concertation est celle de Moustierlin au sud de Quimper. Il y a là une accumulation littorale dont la dégradation préoccupe la municipalité de Fouesnant en même temps que la DDE, en association avec les géomorphologues brestois. On discute de savoir si l'on doit, devant les progrès de la mer, étendre et renforcer l'enrochement déjà fait, ou si un tel travail n'est pas réaliste. De même, la flèche de sable et de galets de l'Aber dans la presqu'île de Crozon est soumise actuellement à une érosion rapide. Elle barre un estuaire récemment rendu à son état précédant des aménagements considérés comme fâcheux. Un suivi devrait permettre de voir s'il s'agit de réajustements naturels et si un nouvel équilibre va être atteint. Là encore, une collaboration s'établit entre géomorphologues, sédimentologues et pouvoirs publics.

Gestion des zones humides

On peut grouper (Poncet 1984; Guilcher et al. 1985) sous le vocable de zones humides littorales, d'une part des étendues qui ont été soustraites au domaine intertidal par endiguements et sont ainsi devenues des polders, d'autre part des aires similaires découvrant à basse mer et encore couvertes par la marée haute, mais qui seraient elles aussi susceptibles d'endiguements éventuels. Il n'y a eu, pour des raisons climatiques, que quelques petits marais salants dans le Finistère (Penmarc'h; Persuel et Hanvec en rade de Brest...) (Marc Simon 1985, p. 185-189), à l'inverse du Morbihan, et leur abandon n'a pas posé de problèmes importants de réutilisation.

Les polders agricoles finistériens, peu étendus à l'inverse d'autres côtes françaises, ne sont cependant pas inexistantes; citons notamment celui de Keremma dans la baie de Goulven, créé au XIXe siècle, et il y en a pas mal d'autres, souvent très menus et dispersés. Mais ces polders finistériens sont loin d'être tous effectivement cultivés. Les mieux utilisés sont ceux qui ont des sols légers et sableux, notamment dans le nord du Finistère; quand les sols sont lourds et argileux, ils sont souvent peu appréciés, et leur endiguement n'a donc pas été une très bonne affaire. En fait, on assiste actuellement à une déprise assez répandue: en neuf sites choisis comme tests, l'évolution de 1950 à 1983 a montré que seulement quatre sont encore convenablement exploités. Il est donc peu probable qu'on assiste à une extension dans un avenir proche.

Pourtant, dans les dernières décennies, on a vu apparaître en Finistère des projets ou réalisations d'endiguements ou remblais d'étendues asséchant à basse mer, et notamment de parties d'estuaires: non plus pour y développer l'agricul-

ture, mais pour le nautisme, pour terre-pleins de marinas, voire pour résidences secondaires, ou décharges comme dans l'estuaire de l'Elorn à Landerneau. Ces empiètements ont été vigoureusement combattus par les géographes et les biologistes marins, qui ont rappelé que les aires intertidales sont essentielles pour la vie générale dans la mer proche, du fait de la productivité primaire et secondaire très forte de matière organique qui s'y fait, et des échanges avec le large qui s'y associent (crustacés, poissons, etc). Ces considérations, valables bien ailleurs que dans le Finistère, ont été assez efficacement ressenties pour qu'on ait évité, en ce département, des constructions du type du barrage d'Arzal sur la Vilaine, dans le Morbihan. Dans le Finistère comme en bien d'autres régions d'Europe y compris les Pays-Bas, les assèchements d'estrans n'ont plus la cote.

Les zones humides finistériennes endiguées antérieurement et conservées comme telles sont, cependant, considérées en divers cas comme des sites possibles pour l'aquaculture, par exemple en rade de Brest. Et l'on peut aussi utiliser aux mêmes fins aquacoles les retenues qui, autrefois, avaient été construites dans les fonds de petits estuaires pour faire fonctionner des moulins à marée. Ces derniers ont été très nombreux dans le Morbihan, où les sites favorables fourmillaient beaucoup plus que dans le Finistère: celui-ci en avait pourtant un certain nombre, et l'on peut mentionner la retenue de l'ancien moulin à marée du Conquet comme lieu adopté pour un aménagement aquacole.

Remerciements

Les deux figures accompagnant cette communication ont été dessinées par Bernard Hallégouët, qui a aussi apporté une contribution au texte par diverses remarques et informations.

Références

- BENROU (P.) 1971. Contribution à l'étude sédimentologique et morphologique des dunes du Sud-Finistère. Mémoire de maîtrise, UBO, Brest, 172 pp.
- BODERE (J.C.) 1971. Observations sur la côte de la baie d'Audierne entre Penhorz et Porz Carn. Cahiers Océanogr., vol. 23, p. 519-543.
- BODERE (J.C.), HALLEGOUET (B.), PIRIOU (N.) et Coll. 1982. Le schéma directeur de protection contre la mer du littoral finistérien, premier bilan. Actes 107e Congr. Nat. Soc. Sav., Brest, Section de Géogr., p. 235-252.
- CASTRO (C.) 1981. Les dunes du Léon et les problèmes de leur conservation. Thèse de 3e cycle, UBO, Brest, 176 pp.
- GRUPE SERS 1985. Façade atlantique. La situation conflictuelle de l'occupation littorale. Tome 2, Univ. de Nantes, 111 pp.
- GUILCHER (A.) 1948. Le relief de la Bretagne méridionale, de la baie de Douarnenez à la Vilaine. Thèse Paris, La Roche sur Yon, 682 pp.
- GUILCHER (A.) 1984. Littoraux et pré-littoraux: aménagement et gestion vus par les géographes français. In: La Recherche Géographique Française, 25e Congrès Internat. de Géogr., Paris, p. 119-128.
- GUILCHER (A.), HALLEGOUET (B.) 1981. Le haut cordon de galets pléistocène de Ruvein en Plovan (Finistère) et ses enseignements généraux. Bull. Ass. Fr. Etude Quatern., vol. 18, p. 75-82.
- GUILCHER (A.), PONCET (F.), HALLEGOUET (B.), LE DOMEZET (M.) 1985. Breton coastal wetlands: reclamation, fate, management. Journ. Shoreline Management (Londres), vol. 1, sous presse.
- GUILCHER (A.), VALLANTIN (P.), ANGRAND (J.P.), GALLOY (P.) 1957. Les cordons littoraux de la rade de Brest. Bull. Comité Océanogr. Etude Côtes, vol. 9, p. 21-54.
- HALLEGOUET (B.) 1978. L'évolution des massifs dunaires dans le Pays de Léon. Penn ar Bed, vol. 11, n° 95, p. 417-430.
- HALLEGOUET (B.) 1982. Les formations de remblaiement de la vallée de l'Elorn à Landerneau (Finistère). Bull. Ass. Fr. Etude Quatern., vol. 19, p. 167-178.
- HALLEGOUET (B.), MOIGN (A.) 1979. Progradation et érosion d'un secteur littoral sableux en Bretagne Nord: mesures et bilan. Côtes Atlantiques Europe, Colloque n° 9, CNEOX, Brest, p. 55-64.
- HINSCHBERGER (F.), CLARY (D.) 1979. Les côtes de la Manche de Granville au cap de la Hague. Aménagement et protection des sites. Côtes Atlantiques Europe, Colloque n° 9, CNEOX, Brest, p. 227-238.
- LABORATOIRE de Géographie Physique Appliquée, Univ. de Bordeaux III, et Office National des Forêts 1981. Atlas des types de dunes littorales des Landes de Gascogne. 1 vol. in-folio.
- MARC SIMON o.s.b. 1985. L'abbaye de Landévennec, de Saint Guérolé à nos jours. Rennes, Ouest-France, 315 pp.
- MINISTERE de l'Environnement 1984. Les dunes de Bretagne. Aménagement et gestion. Paris, 96 pp.
- MORZADÉC-KERFOURN (M.T.) 1974. Variation de la ligne de rivage armoricaine au Quaternaire. Mém. Soc. Géol. Minéralog. Bretagne, vol. 17, Rennes (et thèse Univ. Rennes I), 208 pp.
- PONCET (F.) 1984. Les zones humides du littoral breton. Caractères et évolution. Thèse de 3e cycle, UBO, Brest, 349 pp.

COLLOQUE FRANCO-JAPONAIS D'OCEANOGRAPHIE
Marseille 16-21 Septembre 1985

Fascicule 1 : Océanographie physique et dynamique sédimentaire

Une dynamique sédimentaire complexe :
le cas de la Côte Ouest du Cotentin

*Complex coastal dynamics :
the example of the Western Coast of the Cotentin Peninsula*

Louis-Robert LAFOND

ECOLE PRATIQUE DES HAUTES ETUDES, LABORATOIRE DE GEOMORPHOLOGIE. 91405 ORSAY

Résumé

L'action conjuguée des courants et des houles introduit une complexité très grande dans les facteurs d'évolution d'un littoral et l'action des vents puissants s'ajoute aux facteurs précédents.

L'évolution récente du littoral de la Côte Ouest du Cotentin (Manche, France) illustre remarquablement ces phénomènes. Les houles de secteur Ouest sont en effet diffusées et diffractées par de nombreux obstacles - îles et hauts fonds - sur le plateau continental proche, atteignant le rivage avec des obliquités variables selon les zones considérées et la direction initiale de la houle. Les effets seront donc fortement différenciés sur un littoral qui présente par ailleurs une structure géomorphologique homogène, avec un platier rocheux affleurant en avant d'une zone dunaire récemment développée.

La grande importance du marnage dans le golfe normand-breton induit de plus des courants de marée puissants et les vitesses relatives du flot et du jusant sont différentes, même en avant de la côte ; mais les transports sédimentaires sous l'influence des courants ne prennent tout leur développement qu'au voisinage des embouchures des petits fleuves côtiers (hâves) qui constituent les abris principaux de ce littoral.

La répartition des sédiments en zone intertidale est contrôlée par les facteurs précédents et les mouvements de sédiments sont finalement confinés à la partie haute des plages, sauf au niveau des havres où se forment à la fois des deltas sous-marins d'épandage devant la côte et des bancs internes tendant à colmater à bref délai estuaires et lagunes.

L'aménagement progressif du littoral suit parfois les phénomènes naturels, avec une poldérisation progressive des zones internes. Mais les travaux d'entretien des chenaux d'entrée des quelques ports d'échouage de la région perturbent les transits littoraux, d'autant qu'ils correspondent à des volumes d'extraction d'un ordre de grandeur comparable à celui des transits par obliquité. L'érosion côtière se manifeste dans les secteurs délaissés, à la suite de la migration des chenaux de sortie des havres ou bien à la suite de la construction de défenses frontales trop avancées en zone urbanisée.

Abstract :

The joint action of waves and currents, with some help of strong winds, complicates the present evolution of coastal areas, as exemplified on the central part of the western coast of the Cotentin peninsula (Manche, France).

Western sector waves are diffused and diffracted through numerous obstacles - islands, reefs - on the continental plateau, breaking nearshore with very different obliquities, following the area and the initial direction and characteristics of the movement: effects often oppose on a coast whose geomorphological structures (recent dunes over a flat rocky area of palaeozoic age) is rather homogenous.

An exceptional tidal range induces strong currents with different flow and ebb velocities nearshore ; but sediment movements linked to currents are catching full development within the deltaic areas of the small coastal rivers only.

Sediment distribution is under control of those factors in the intertidal zone and beach sands are all but limited to the upper tridal area with a significantly larger extension close to river mouths, where deltaic rises as well as lagoonal sedimentation are developing.

The present erosional trend is worsening due namely to sand exploitation within the entry channels of the few uncovering shelter ports, or to the building of front walls on beaches in urban areas. Most of the beach sand is now derivating from formerly well-fed dunes.

La côte Ouest de la péninsule du Cotentin (Manche, France) est directement exposée à l'action des vents et des houles de secteur Ouest provenant de l'Atlantique et particulièrement forts aux latitudes moyennes. La hauteur annuelle maximum des vagues atteint 6,1 m devant Flamanville mais seulement 1,9 m à Granville plus au Sud, à l'abri des fles et des hauts fonds du golfe normand-breton ; mais les tempêtes exceptionnelles jointes aux fortes marées du golfe (le marnage en vive-eau atteint partout 12 à 13 m sur le littoral) conduisent au développement d'une dynamique sédimentaire très active sur une côte que ne protège que très partiellement un cordon dunaire récent.

1. LA STRUCTURE DE LA CÔTE.

La côte Ouest du Cotentin suit, du Cap de la Hague à la Baie du Mont Saint Michel, une direction générale Nord-Sud qui souligne l'effondrement du golfe normand-breton et recoupe les structures plissées paléozoïques du massif armoricain.

En contrebas d'une falaise morte ancienne de 50 à 70 m d'altitude, la zone intertidale est constituée par un platier rocheux arasé, fortement redressé et diaclasé, d'âge Cambrien à Dévonien. Il est recouvert au niveau de la barrière littorale par des cailloutis et des placages de sable recouverts de dunes dont le dernier développement très récent (13^e siècle) est attesté par l'envahissement de vestiges historiques. La barrière littorale, d'une puissance de l'ordre de la dizaine de mètres, isole entre la côte actuelle et l'ancienne falaise quaternaire une zone de plaine maritime déprimée que l'alluvionnement lié au fonctionnement des estuaires ("havres") comble peu à peu.

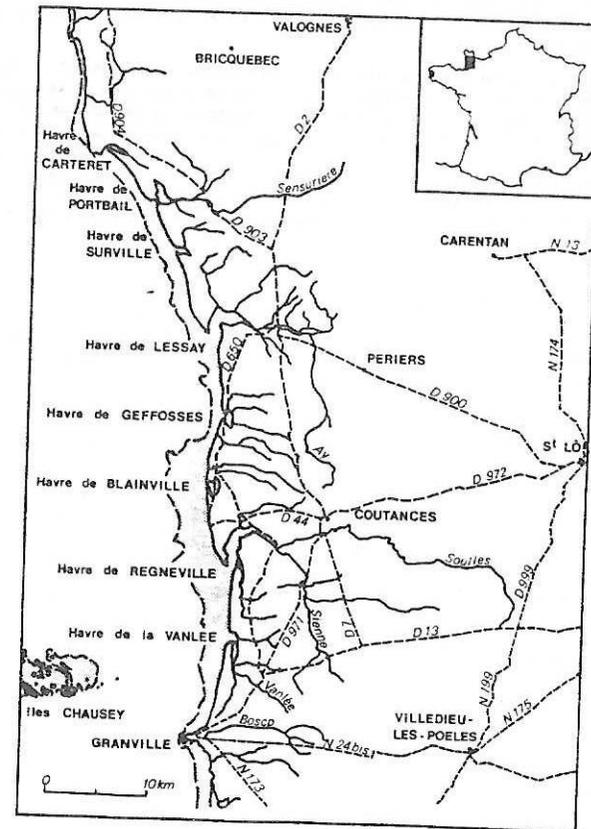


Figure n° 1

La côte Ouest du Cotentin : plan de situation

The Western Coast of the Cotentin peninsula : location map

Seuls quelques pointements rocheux en forme de caps émergent de cet ensemble, comme la Pointe du Rozel, le Cap Carteret, la Pointe du Roc à Granville et le massif granitique de Carolles, découpant la côte en secteurs plus ou moins indépendants les uns des autres : si aucun élément sédimentaire ne paraît transiter en face de Granville, les grandes plages au Sud de Carteret sont alimentées par un matériel dont l'origine est à rechercher dans les massifs dunaires de Beaubigny, au Nord. Quant aux sables "normands" qui migrent en baie du Mont Saint Michel jusqu'à la pointe du Bec d'Andaine, ils passent sans problème devant le massif de Carolles à Champeaux.

2. LES HOULES.

La réfraction des vagues sur les obstacles qui parsèment le plateau continental en avant du littoral induit des obliquités résiduelles au niveau du déferlement qui sont bien différentes selon les points considérés de la côte et selon la direction initiale du mouvement.

Des plans de vague ont été construits pour les directions NW, W et SW en considérant les houles les plus probables, qui sont les houles longues océaniques (12 s) pour l'Ouest et le Nord-Ouest et les houles locales les plus longues (7 et 9 s) pour les trois secteurs ; on a considéré en outre les houles Sud compatibles avec le fetch dans le golfe, soit 7 s. Les niveaux de référence choisis correspondent aux pleines mer de vive-eau exceptionnelles (cote marine +12 m) et aux pleines mers de morte eau moyennes (cote marine +7,50 m).

On peut montrer ainsi que les houles d'Ouest comme celles de Nord Ouest produisent des transports de sable en direction du SE et du S sur toute la partie de la côte comprise entre le Cap de Rozel au Nord et l'estuaire de la Sienna au Sud, quelle que soit la période considérée (9 ou 12 s) et quel que soit le niveau d'eau retenu pour le calcul. Des irrégularités locales liées à la diffusion des vagues en arrière des obstacles proches (rochers de la zone intertidale) délimitent cependant des sous-secteurs entre lesquels la continuité du transit n'est pas parfaite : à Gourville comme au Nord de Coutainville, une partie du sable de haute plage est rétalé vers le bas-estran.

Les houles de Sud-Ouest longues ne se manifestent que dans le Nord du secteur étudié et ne peuvent atteindre la côte qu'en passant au Nord de l'île de Jersey. Elles tournent ensuite pour engendrer finalement sur le littoral le même type de transit que précédemment, vers le Sud. Les houles courtes (7 s) engendrées dans le golfe lui-même parviennent par contre directement à la côte et provoquent donc des courants d'obliquité remontant vers le Nord. Il en va de même des houles de secteur Sud qui sont déjà bien développées sur la partie Nord du littoral. Mais ces houles courtes, peu énergétiques, n'ont finalement qu'un effet secondaire sur le mouvement général des sédiments.

Dans le secteur Sud de la côte, entre la Sienna et Granville notamment, la protection liée aux plateaux des Minquiers et des Chausey se fait plus particulièrement sentir et la côte ne reçoit plus guère de houles obliques, les secteurs Sud et SW n'offrant qu'un fetch insuffisant. Il n'y a plus de transit préférentiel vers le Sud et les sables se dispersent en avant de la côte sur les platiers rocheux, l'estuaire de la Sienna représentant d'ailleurs par lui-même une coupure majeure, mais liée cette fois à l'action des marées. De St Pair sur mer, au Sud de Granville jusqu'au Bec d'Andaine, des évidences de transit sableux dominant vers le Sud s'observent à nouveau, mais les masses de matériel mises en jeu restent plus faibles sur une côte dépourvue de toute source d'alimentation extérieure et donc soumise à une érosion sévère qu'une urbanisation presque généralisée a encore aggravée.

3. LES VENTS.

Sur toute la côte, la prédominance des flux d'Ouest est prononcée. Les vents de S, SW et W totalisent au Cap de la Hague 47,9 % des observations. Pour les vents forts supérieurs à 10 m/s, c'est 8 à 10 % des observations qui les concernent, à la fois dans les directions NE et W. L'ensemble de la côte Ouest du Cotentin est relativement abritée des flux de secteur E, mais par contre les vents d'Ouest se trouvent renforcés.

Les observations faites à Carteret montrent que les transports éoliens sur le littoral commencent à partir du seuil de 10 m/s et prennent tout leur développement vers 20 m/s. La quasi-continuité de la couverture végétale sur les dunes réduit cependant la portée de ces indications au seul secteur de l'estran, ce qui se traduira finalement par une alimentation peu abondante de l'arrière-côte : 20 tonnes par mètre linéaire et par an constituent un ordre de grandeur et il n'y a donc guère plus de 1 000 m³ de sable chaque année pour venir encombrer, par voie éolienne, le chenal de navigation du port ; ce chiffre est parfaitement négligeable en fonction de la compétence des courants de marée.

Le système dunaire mis en place, surtout depuis le 13^e siècle, le long du littoral constitue donc actuellement une formation-relique, dont le rôle dans la dynamique actuelle va se limiter à la fourniture de sable au haut estran sous l'action érosive des vagues déferlantes. Presque partout, les profils dunaires sont tronqués par une falaise d'érosion à la limite de la haute plage : plus de 10 m de hauteur dans le cas des reculs les plus marqués (Dunes de Lindbergh près de Portbail, Créances, Bréville).

4. LES MAREES.

Les marées du golfe normand-breton ont les amplitudes les plus fortes de France et sont à l'origine de courants violents au niveau du littoral. Au large, les courants sont en général de type gyrotaire et fortement dissymétriques au profit du jusant dirigé vers le Nord.

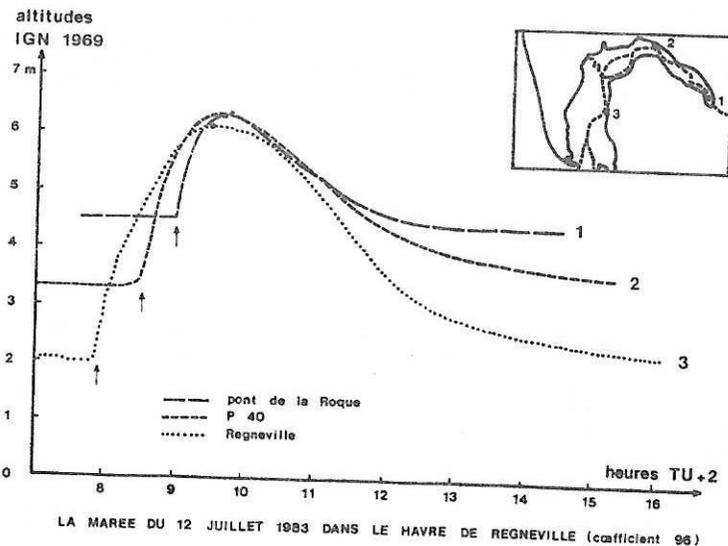


Figure n° 2 Courbe de marée de vive eau dans le havre de Regnéville
Spring tidal curve in the Sienna estuary (havre de Regnéville)