

50376
1985
13

THESE présentée à l'Université des Sciences et
Techniques de Lille pour obtenir le titre de
DOCTEUR DE TROISIEME CYCLE
en Océanologie



par Yves DESPEYROUX

**ETUDE HYDROSEDIMENTAIRE
DE L'ESTUAIRE DE LA CANCHE
(Pas-de-Calais)**

soutenu le 7 Fevrier 1985 devant la commission d'examen :

- . P. DEBRABANT Président
- . H. CHAMLEY } Rapporteurs
- . C. CASTAING }
- . A. RICHARD }
- . J.M. DELATTRE } Examineurs
- . C. BECK }



L'ESTUAIRE VU D'ETAPLES

BU
LILLE



L'ESTUAIRE VU DU LARGE

BU
LILLE

- AVANT-PROPOS -

La thèse de troisième cycle est une longue course d'endurance, dont l'aboutissement a été le fruit d'une collaboration entre plusieurs personnes, auxquelles il m'est agréable d'exprimer mes remerciements.

Monsieur le Professeur H. CHAMLEY m'a témoigné sa confiance en me proposant un sujet d'orientation nouvelle pour son laboratoire. Je tiens à le remercier et lui exprimer ma gratitude pour m'avoir fréquemment encouragé et avoir suivi ce travail en étant un interlocuteur attentif de même qu'un correcteur exigeant et rigoureux.

Monsieur le Professeur P. DEBRABANT a montré un vif intérêt aux différents problèmes géologiques et me fait l'honneur de présider ce jury. Je tiens à lui exprimer ma gratitude.

Monsieur P. CASTAING a continué de me suivre dans mon travail malgré la distance et mes silences souvent prolongés. Il peut voir enfin l'aboutissement de trois années d'attente et je lui sais gré de participer à ce jury.

Monsieur le Professeur A. RICHARD a toujours manifesté de l'intérêt aux problèmes littoraux et a accepté de faire partie de ce jury. Je l'en remercie bien vivement.

Monsieur J.M. DELATTRE, responsable du service des eaux à l'Institut Pasteur de Lille, a suivi ce travail et n'a pas eu peur, lors de diverses sorties, d'y contribuer activement. Après une attente un peu longue, il peut lire et juger un travail qu'il a supervisé sous une autre présentation. Pour son aide et sa compréhension je le remercie chaleureusement.

J'exprime toute ma sympathie à Monsieur C. BECK, maître assistant, qui vient de se tourner vers des domaines plus littoraux.

Tout au long de ce travail, j'ai bénéficié de l'aide de nombreux scientifiques que je tiens à remercier tout particulièrement :

- Madame M. ROSSET-MOULINIER, de l'Ecole Normale Supérieure de Montrouge, qui a bien voulu consacrer une partie de son temps pour la détermination des foraminifères ;

- Monsieur A. BLONDEAU, de l'Université Pierre et Marie Curie, qui a déterminé les Nummulites avec rapidité ;

- Mademoiselle M. LABRACHERIE, chargé de recherche à la faculté de Bordeaux, qui s'est penchée sur les bryozoaires ;

- Monsieur J.M. DEWARUMEZ, de la station marine de Wimereux, qui s'est intéressé à la macrofaune ;

- Monsieur T. HOIBIAN, de la faculté de Bordeaux, qui, malgré un travail plus urgent a identifié les différentes espèces d'ostracodes ;

- Monsieur J.M. JOUANNEAU, chargé de recherche à la faculté de Bordeaux, qui s'est occupé de l'analyse géochimique des sédiments de l'estuaire et à relire la dernière partie de mon manuscrit ;

- Monsieur le Professeur J. SOMME, géographe de la faculté de Lille, m'a apporté par ses suggestions et critiques des informations essentielles sur l'évolution quaternaire de cette région.

J'ai bénéficié de la compréhension et du dévouement de Monsieur E. OUDART de l'Institut Pasteur, dont la patience a été soumise à rude épreuve, en supportant pour une grande part les missions; qu'il trouve ici un témoignage de mon amitié.

Je remercie Monsieur J.P. COLBEAUX qui en suivant d'un peu plus loin ce travail n'en a pas moins gardé sa porte ouverte pour tout ce qui se rapportait à la géologie du Nord.

Les Ponts et Chaussées Maritimes de Boulogne et d'Etaples ont mis à ma disposition tous les documents intéressant mon étude et j'ai pu apprécier la disponibilité de Monsieur DHORME à Boulogne et de Monsieur DELARUE à Etaples.

J'ai profité de la qualification et de l'expérience de Monsieur J.L. PELLETIER du Service Régional de l'Aménagement des Eaux, et je le remercie très vivement de sa participation désintéressée lors des différentes missions menées conjointement avec l'Institut Pasteur de Lille.

Sans la précieuse aide technique de Monsieur P. RECOURT qui a toujours travaillé avec diligence et abnégation, je n'aurais jamais pu dénouer tous les problèmes rencontrés tant sur le terrain qu'au laboratoire.

J'associe à mes remerciements tous mes amis qui ont contribué par leur soutien et leur sympathie à la réalisation de ce travail; Il y a ceux qui n'ont pas eu peur de braver le froid, la solitude et de participer aux différentes missions : Véronique BONDUELLE, Chantal QUISTHOUDT, Daniel BENTLEY, Bertrand BLAISE, Jean Mari CANDILLIER, Philippe CLABEAU, Hervé COULON, Bernard DATCHARRY, Jean François DECONINCK, Stéphane DEWEZ, Thierry IMBERT, Frédéric LECUYER, Jérôme ORANGE, Gille POREL, Jean PRYGIEL ; et ceux qui, au laboratoire, par les différents travaux, n'en ont pas moins participé à sa réalisation : Sophie BECKARY, Anne BOUQUILLON, Anne Marie CANDILLIER, Sylvie CRASQUIN, Catherine DHERVILLEZ, Christine COMBLE, Valéria HORVAI, Armelle PIETTE et Thierry HOLTZAPFFEL.

La dactylographie a été effectuée avec célérité et efficacité par Madame F. DUJARDIN qui en un tour de 'frappe' arrive à retourner les situations. Le tirage 'off set' a été confié à Madame A. BREBION dont je ne saurais vanter la qualité de son travail. Enfin Monsieur R. BALLENGHIEN a assuré la reliure. Ils savent tous trois que ma reconnaissance leur est acquise.

J'exprime mon amitié à Monsieur J. CARPENTIER qui, en tout temps et à toute heure a réussi à mettre en images les différents aspects de ma thèse : de la photographie aérienne à la micro-photo.

Pour Patricia qui, pendant une longue période a su peiner et garder son calme sur les premiers déchiffrages, j'espère que les jours suivants seront meilleurs et plus prometteurs.

Et pour finir, je ne pourrai oublier ceux qui, de loin ont été les soutiens passé et présents de ce travail, et c'est pour cela que j'associe aujourd'hui ma famille, parents et tantes, souvent restés en retrait et à qui je dois beaucoup.

INTRODUCTION

INTRODUCTION

L'étude qui fait l'objet du présent mémoire s'inscrit parmi une série de travaux pluridisciplinaires suscités par l'Etablissement Public Régional Nord - Pas-de-Calais et l'IFREMER. Ces travaux sont destinés à mieux connaître les divers milieux et l'état de pollution du secteur côtier. Les différents thèmes se rapportent notamment à la connaissance de l'état de pollution du littoral Nord - Pas-de-Calais (HYDROBIOS I, 1980), à la pollution chimique des moules et des coques (Institut Pasteur de Lille, 1982), au recensement des micropolluants des sédiments sur le littoral (HYDROBIOS II, 1983) et aux aspects hydrobiologiques, sédimentologiques, bactériologiques et molysmologiques de différents estuaires (Etude pluridisciplinaire, 1983).

L'étude présentée ici a permis d'aborder le problème des flux de particules et de la pollution dans les milieux de transition que constituent les estuaires, "plans d'eau côtiers ouverts à l'océan où se produit une dilution de l'eau de mer par l'eau douce" (PRITCHARD, 1967). Par ce travail, nous nous sommes préoccupés à mieux comprendre le piégeage et le largage des matières minérales et organiques dans les domaines privilégiés où la partie inférieure d'une zone fluviale est soumise aux mouvements alternatifs de la marée. En effet, la concentration des particules en un secteur de l'estuaire est liée à l'hydrodynamisme, à la dilution et aux relations eau/sédiments. De ce fait, une étude de la pollution doit être précédée d'une bonne approche sédimentologique et hydrologique. C'est dans cette optique que se situe la présente étude. Elle est centrée, du point de vue géographique et thématique, sur l'estuaire de la Canche, localisé au Sud du Boulonnais à proximité du Touquet.

Depuis plus d'un demi-siècle, divers auteurs se sont penchés sur ce secteur du littoral. GOSSELET (1902), DUBOIS (1924) et DUTERTRE (1926) ont décrit le cadre géologique et la géographie régionale, en tentant une première interprétation paléogéographique. DEMANGEON (1905) et BRIQUET (1930) ont analysé l'évolution et l'histoire de l'estuaire, reprises plus récemment par BONNEFILLE et ALLEN (1970).

La morphologie et la géographie actuelles de l'estuaire et de sa région ont été analysées par ROBINE (1962) et VERGER (1968), tandis que l'évolution de la sédimentation holocène a été abordée tout d'abord par MARCE et PUTALLAZ (1968), puis par MONTAIGNE (1973) et LE FOURNIER (1974, 1980). MARIETTE (1971), MUNAUT et GILOT (1977) ont tenté d'identifier sur le littoral canchois, les avancées et retraits de la mer liés aux fluctuations climatiques de l'Holocène.

A la suite de GHESTEM (1966), DESAUNAY (1973) a étudié la productivité de l'estuaire, tandis que DUVAL (1973) a consacré son travail à l'écosystématique végétale de la Basse-Canche.

Une étude hydrologique du bassin de la Canche a été réalisée par GERIN (1966). Elle a été complétée par diverses approches hydrologiques devant et dans l'estuaire: BONNEFILLE et ALLEN (1970), ORANGE (1983), BENTLEY (1984).

Le présent travail vient compléter ces précédentes études afin de constituer du point de vue sédimentaire et hydrosédimentaire un état de référence sur les caractéristiques actuelles de l'estuaire. L'étude sédimentologique s'inscrit dans une

approche pluridisciplinaire, hydrodynamique, hydrologique et molysmologique, menée parallèlement.

Le plan adopté dans le mémoire est le suivant :

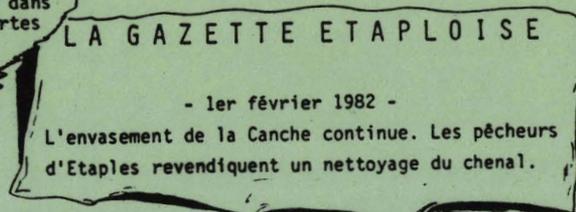
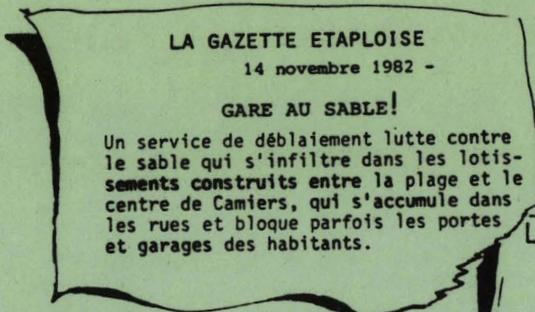
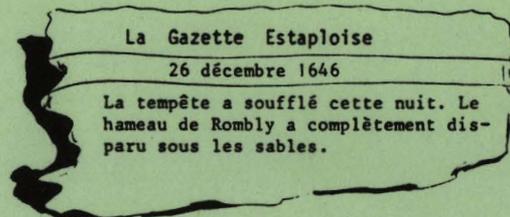
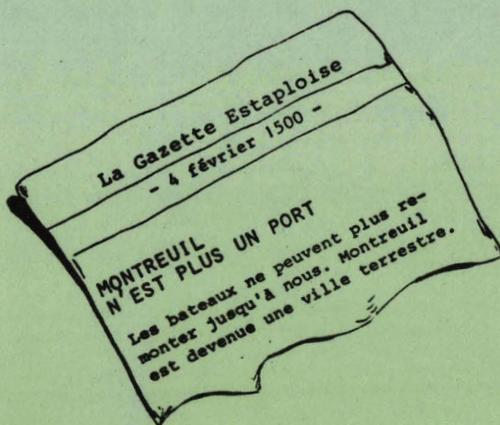
La première partie est consacrée au cadre physiographique et historique, puis aux caractères morphologiques et sédimentologiques de l'estuaire.

La deuxième partie concerne l'étude des phénomènes hydrologiques régissant la circulation des eaux fluviales et marines, ainsi que leur mélange.

La troisième partie correspond à l'étude de la dynamique sédimentaire et plus particulièrement à celle des matières en suspension. Elle est complétée par une approche géochimique des eaux et des sédiments.

PREMIERE PARTIE

Evolution morphologique et sediments



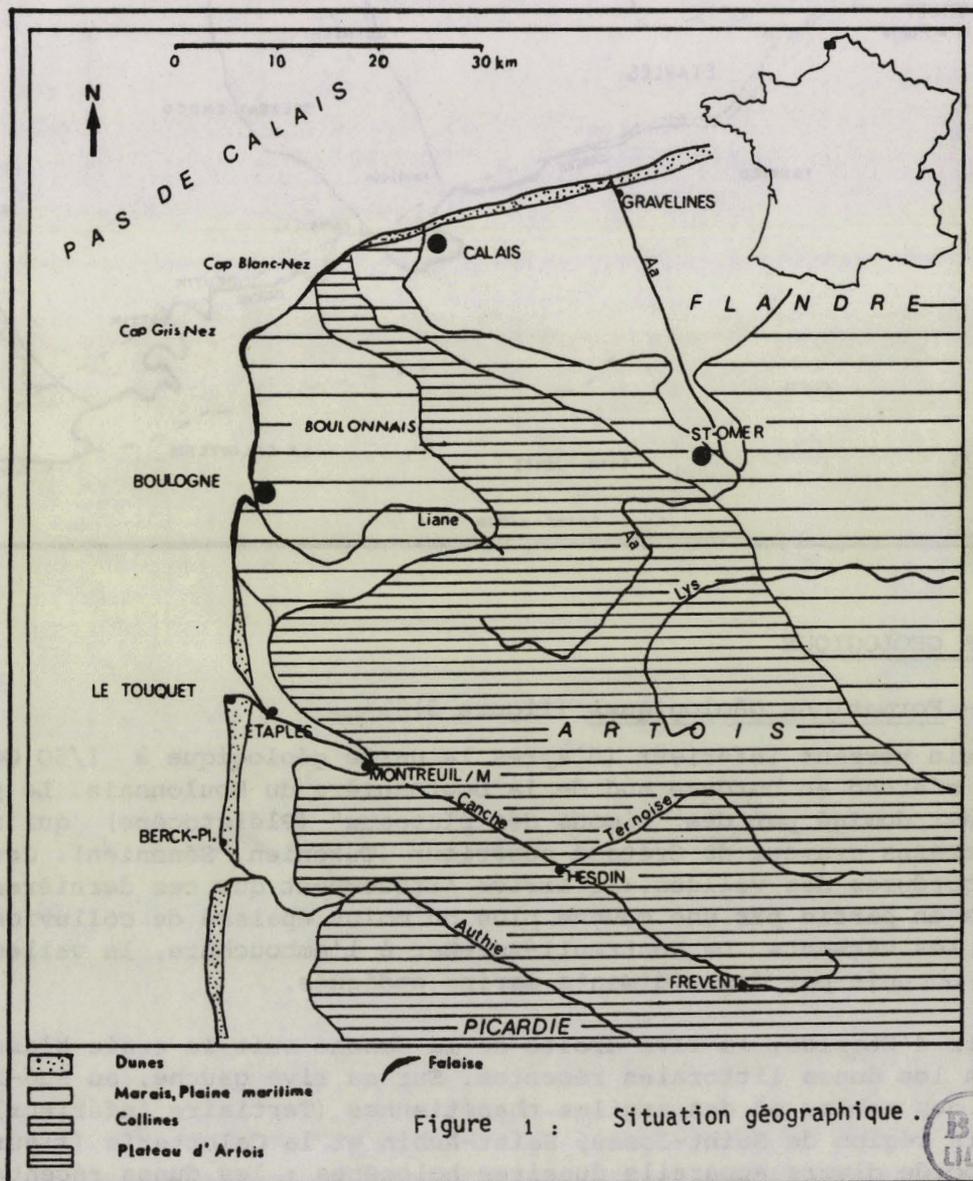
- CHAPITRE I -

GEOLOGIE ET EVOLUTION MORPHOLOGIQUE

I - CADRE GENERAL

I.1 - CADRE GEOGRAPHIQUE

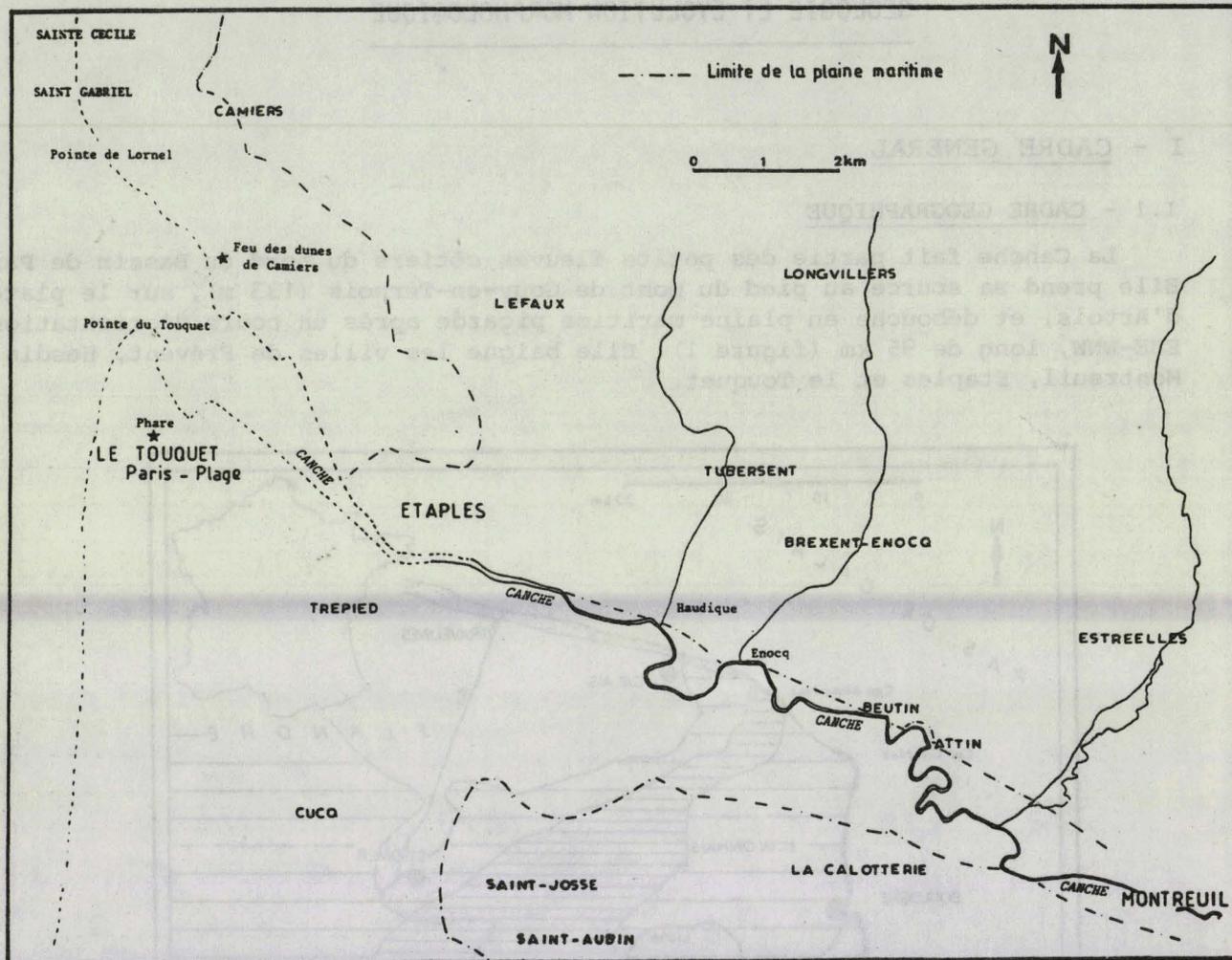
La Canche fait partie des petits fleuves côtiers du nord du Bassin de Paris. Elle prend sa source au pied du mont de Gouy-en-Ternois (133 m), sur le plateau d'Artois, et débouche en plaine maritime picarde après un cours d'orientation ESE-WNW, long de 95 km (figure 1). Elle baigne les villes de Frévent, Hesdin, Montreuil, Etaples et le Touquet.



Son estuaire échancre la partie septentrionale de la plaine maritime picarde, qui s'étend des falaises jurassiques du Boulonnais (au Nord), aux falaises créta-cées du Pays de Caux (au Sud). Il s'ouvre en Manche orientale à hauteur de la

ville du Touquet-Paris-Plage, et détermine une zone de transition entre le domaine continental et le domaine marin (figure 2).

Figure 2 : CADRE GEOGRAPHIQUE DE LA BASSE CANCHE



I.2 - CADRE GEOLOGIQUE

I.2.1 - Formations géologiques (figure 3)

Le bassin versant inférieur (d'après la carte géologique à 1/50 000 de Montreuil) s'étend en bordure sud de la boutonnière du Boulonnais. Le paysage de la vallée est dominé par des "limons des plateaux" (Pléistocène) qui reposent sur les terrains crayeux du Crétacé supérieur (Turoniën, Sénonien). Ceux-ci marquent les bordures des vallées. Il arrive fréquemment que ces dernières soient recouvertes en partie par une couche plus ou moins épaisse de colluvions qui adoucissent les versants. De Montreuil-sur-Mer à l'embouchure, la vallée de la Canche est occupée par des sédiments marins endigués.

A partir d'Etaples, la rive droite de la Canche suit la craie blanche sénonienne puis les dunes littorales récentes. Sur sa rive gauche, au Sud-Est du port d'Etaples, des sables et des argiles thanétiennes (Tertiaire inférieur) affleurent dans la région de Saint-Josse, Saint-Aubin et la Calotterie (figure 2). Puis, le fleuve borde divers appareils dunaires holocènes : les dunes récentes (postérieures au Moyen-Âge), les dunes historiques (1 000 ans après J.-C.), et les

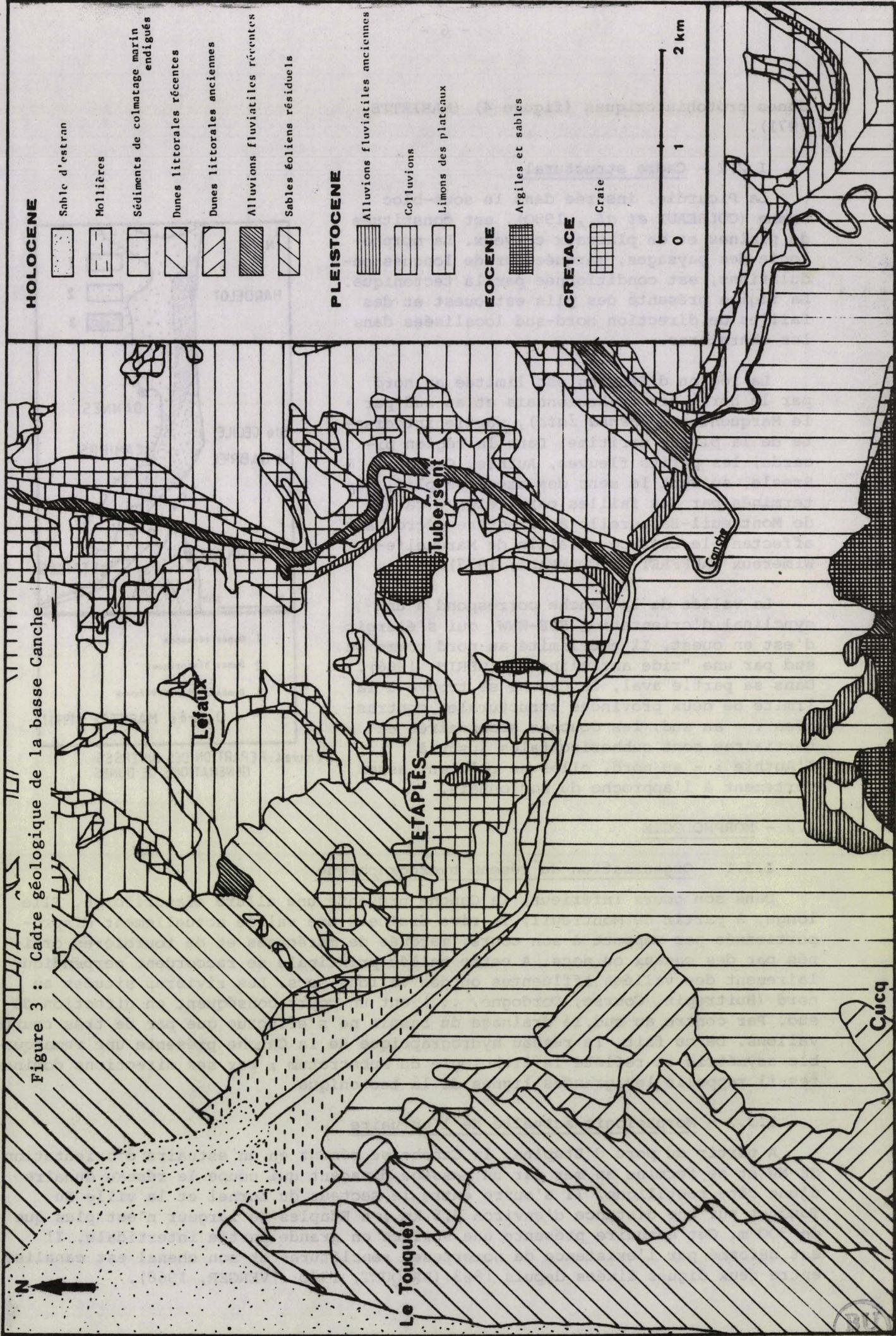


Figure 3 : Cadre géologique de la basse Canche

dunes protohistoriques (figure 4) (MARIETTE, 1971).

I.2.2 - Cadre structural

La Picardie, insérée dans le sous-bloc Somme (COLBEAUX *et al.*, 1980), est constituée de plaines et de plateaux crayeux. La morphologie des paysages, marquée par de longues ondulations, est conditionnée par la tectonique. La région présente des plis est-ouest et des failles de direction nord-sud localisées dans les charnières.

La région d'Etaples est limitée au nord par le horst Artois-Boulonnais et au sud par le Marquenterre (*sensu lato*), partie intégrante de la plaine maritime. Dans la région picarde, les petits fleuves, Authie, Canche, Bresle, suivent le sens des axes des plis, déterminés par des failles parallèles : faille de Montreuil-Bassurelle à caractère décrochant affectant le Crétacé ; faille de Marguelfe-Wimereux (AUFFRET et COLBEAUX, 1977).

La vallée de la Canche correspond à un synclinal d'orientation ESE-WNW, qui s'élargit d'est en ouest. Il est limité au nord comme au sud par une "ride anticlinale" (GERIN, 1966). Dans sa partie aval, la Canche se trouve à la limite de deux provinces structurales contrastées : - au sud, les couches secondaires et tertiaires sont subhorizontales jusqu'à l'Authie ; - au nord, elles se relèvent assez fortement à l'approche du Boulonnais.

I.3 - MORPHOLOGIE

I.3.1 - Organisation du réseau hydrographique

Dans son cours inférieur, la Canche présente une allure méandriforme. Elle longe, à partir de Montreuil, la rive droite d'une vallée actuellement disproportionnée par rapport à son cours, marquée de marécages et de tourbières drainés par des canaux ou nocs. A cette vallée principale se raccordent perpendiculairement des vallées affluentes ou des vallons secs. Les rivières situées au nord (Huitrepin, Course, Dordogne, ...) ont un cours conséquent en direction du sud. Par contre, au sud, le drainage du bassin ne s'effectue que par de très courts vallons. De ce fait, le réseau hydrographique de la Canche présente une remarquable asymétrie et reflète la lithologie du substratum ; par ses directions dominantes il rappelle les grandes lignes de la tectonique.

I.3.2 - Morphologie actuelle de l'estuaire

A partir du port d'Etaples, la Canche se résout en un estuaire d'orientation SE-NW et se termine en mer par un passage divagant qui coupe le réseau dunaire d'une côte rectiligne. Il s'ouvre entre le secteur du Lornel et la ville du Touquet sur une distance d'environ 2,5 km ; à Etaples sa largeur n'est plus que de 300 m. Cet estuaire présente une surface en grande partie intertidale. Il est déformé par l'existence de nombreuses renclôtures et son chenal est canalisé entre deux digues fixées depuis 1863 (BRIQUET, 1930 ; VERGER, 1968).

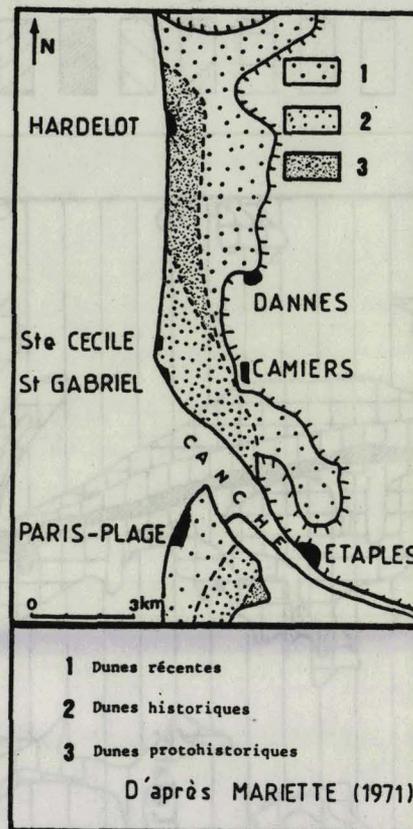


Figure 4: REPARTITION DES DIVERSES GENERATIONS DE DUNES

Son embouchure (figure 5), typique des estuaires picards, présente une barre littorale, ou poulier, au sud (banc du Pilori) opposée à une rive en érosion, ou musoir, au nord dans le secteur du Lornel, faisant face à la ville du Touquet. Le chenal atteint la mer par un cours sinueux qui change souvent de position. Actuellement, il contourne le banc du Pilori et décrit une courbe concave dans le secteur du feu des dunes de Camiers.

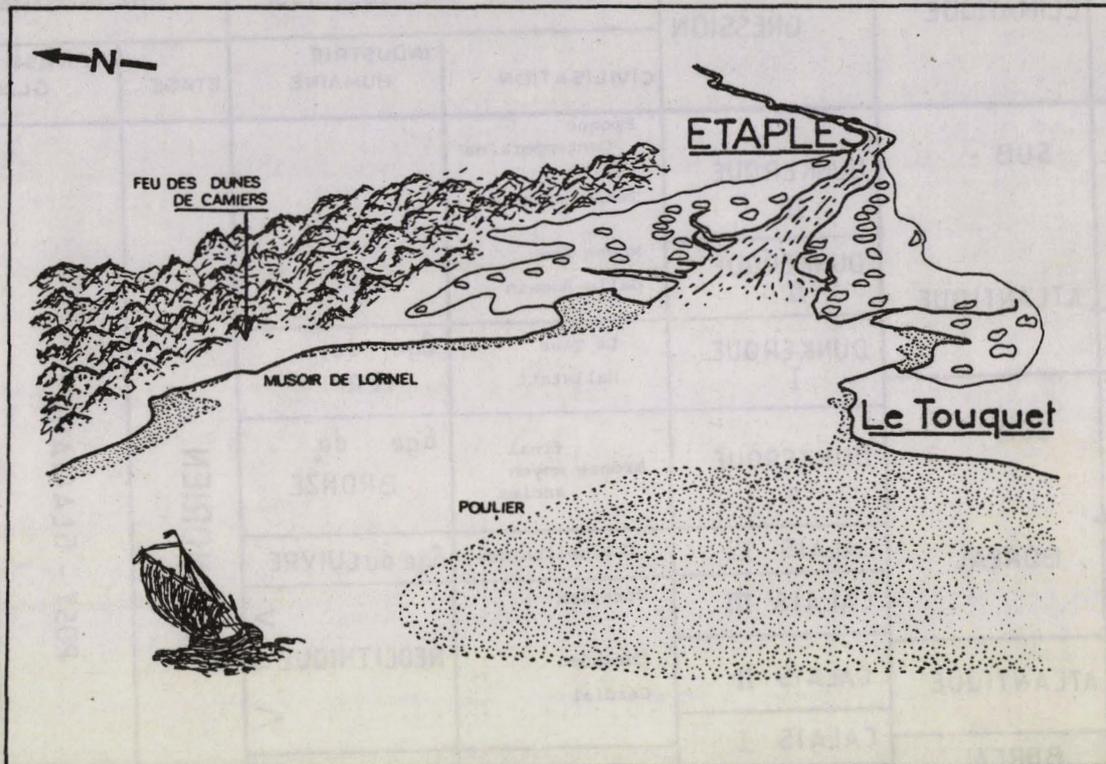


Figure 5 : EMBOUCHURE DE LA CANCHE VUE DU LARGE

II - HISTOIRE HOLOCENE DE LA REGION

II.1 - GENERALITES

Les variations climatiques du Quaternaire, responsables des variations du niveau marin, ont influencé la sédimentation, la morphologie, et les biocénoses. Retraçons succinctement l'histoire du littoral canchois inséré dans un ensemble plus vaste qu'est la Picardie.

Les études palynologiques, complétées par des datations C^{14} , ont fourni des renseignements importants sur les conditions et les changements climatiques. Ainsi, les études de H. MARIETTE (1971), M. TERS (1973, 1976), A. V. MUNAUD et E. GILOT (1977) sur la région picarde ont permis d'établir les variations du niveau marin et les conditions climatiques qui ont régné tout au long de cette époque. Grâce à ces informations nous allons tenter de suivre les variations du niveau de la Manche et de retracer l'histoire climatique au cours des derniers 10 000 ans. Le tableau synthétique (n° 1) reproduit les différentes corrélations entre les divisions stratigraphiques utilisées par l'ensemble des auteurs. Habituellement les avis concordent sur le plan de la chronologie générale, mais des désaccords apparaissent dès que l'on aborde une étude plus régionale.

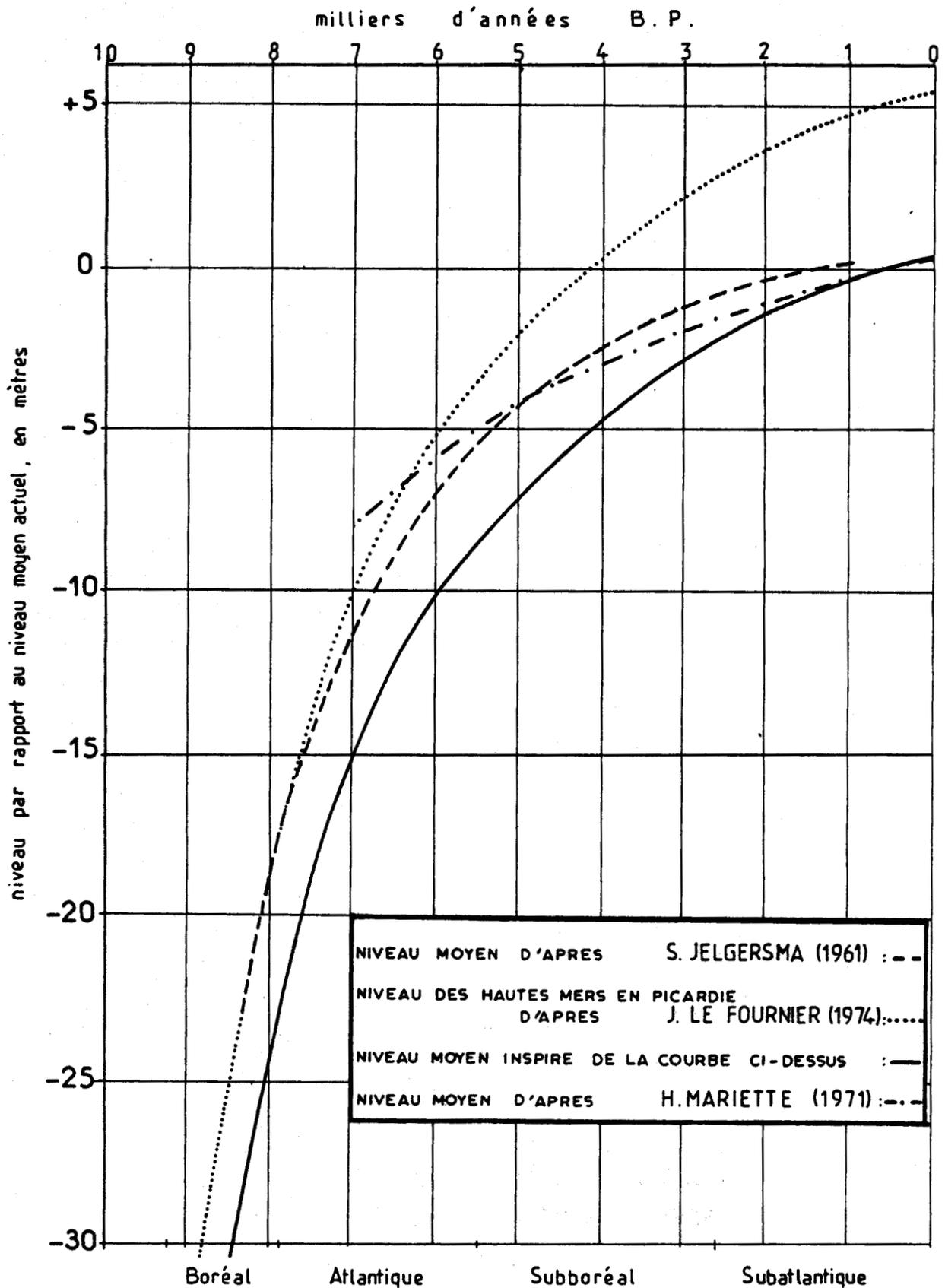
II.1.1 - Variation du niveau marin

Trois études reportées sur la figure 6 concernent des travaux sur la transgression flandrienne aux Pays-Bas (JELGERSMA, 1961), dans le Boulonnais (MARIETTE, 1971) et sur le littoral picard (LE FOURNIER, 1974). Malgré la marge

AGE B.P.	SEQUENCE PALEO - CLIMATIQUE	TRANS - GRESSION	SUBDIVISION ARCHEOLOGIQUE		CHRONOSTRATIGRAPHIE					
			CIVILISATION	INDUSTRIE HUMAINE	ETAGE	PHASE GLACIAIRE				
2000	SUB - ATLANTIQUE	DUNKERQUE III	Epoque Contemporaine		FLANDRIEN	POST - GLACIAIRE	HOLOCENE			
		DUNKERQUE II	Temps moderne							
2800		DUNKERQUE I	La Tène Hallstatt	âge du FER						
3800	SUB - BOREAL	DUNKERQUE 0	final Bronze moyen ancien	âge du BRONZE						
		CALAIS IV	Chalcolithique	âge du CUIVRE						
5500	ATLANTIQUE	CALAIS III	Vérazien	NEOLITHIQUE =						
		CALAIS II	Chasséen Cardial							
7500	BOREAL	CALAIS I								
8900	PREBOREAL		Tardenoisien	MESOLITHIQUE				WEICHSELIEN	PLENIGLACIAIRE	PLEISTOCENE
10200	DRYAS récent		Sauveterrien							
11000	ALLERÖD		Azilien							
12000	DRYAS moyen		Magdalénien	PALEOLITHIQUE						
13000	BÖLLING									
14000	DRYAS ancien									
15000					Solutréen	SUPERIEUR				

TABLEAU 1 : CORRELATIONS ENTRE LES DIFFERENTES DIVISIONS STRATIGRAPHIQUES

Figure 6 : VARIATIONS PROBABLES DU NIVEAU MARIN PENDANT L'HOLOCENE



d'erreur des datations et les conditions locales particulières (variation du mar- nage, possibilité de tassement), ces trois études aboutissent à une certaine si- militude dans l'évolution du phénomène transgressif. Elles indiquent un relève- ment d'abord rapide du niveau marin qui s'amortit peu à peu.

Au cours de la dernière glaciation la mer se trouvait à 120 m sous le niveau actuel. La cartographie des nappes alluviales sous-marines (ROBERT, 1969 ; AUFFRET et ALDUC, 1977 ; ALDUC, 1979) montre la présence de paléo-vallées (figure 7). Ces études corroborent les hypothèses déjà émises quant à l'existence d'un fleuve unique en Manche (DEMANGEON, 1905 ; GUILCHER, 1951 ; DUJON, 1969). En effet, il semblerait que les différents fleuves de la mer du Nord (Elbe, Weser, Rhin, Meuse, Escaut, ...) bloqués par un inlandsis septentrional, se seraient regroupés pour s'écouler au travers du Pas-de-Calais (DUJON, 1969). Ce fleuve unique, en

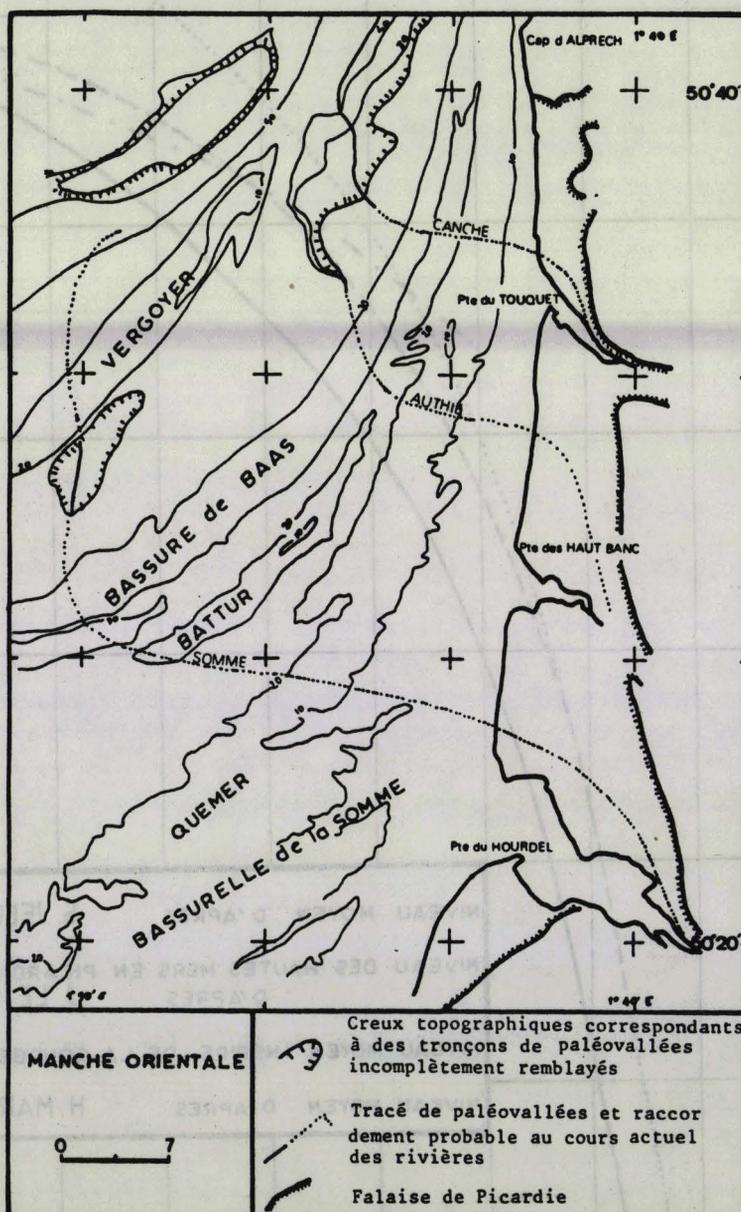


Figure 7 : SCHEMA MORPHOLOGIQUE
d'après ROBERT (1969)

empruntant la Manche alors asséchée, aurait déversé ses eaux en Atlantique. Il aurait drainé également tous les petits fleuves picards que l'on connaît à l'heure actuelle, dont naturellement la Canche.

La fonte rapide des glaces provoque une brusque remontée de la mer entre 18 000 et 9 500 ans B. P. (figure 8). Vers 9 700 ans B. P., le niveau moyen des mers oscille autour de la cote - 60 m pour s'élever au niveau - 30 m, vers 8 200 ans B. P. (MORZADEC, KERFOUN et DELIBRIAS, 1972). Comme en témoigne la datation au C^{14} de tourbières immergées dans l'axe du Pas-de-Calais, les bassins de la Mer du Nord et de la Manche se rejoignent vers 8 500-9 000 ans B. P. (DUJON, 1971 ; POMEROL, 1977 ; COLBEAUX *et al.*, 1980), ce qui leur confère un régime de courants totalement différent. A partir de ce moment, la vitesse de remontée des eaux décroît régulièrement (SHEPARD, 1964 ; S. JELGERSMA, 1961). Vers 7 900 B. P., la mer remonte jusqu'à la cote - 20 m pour atteindre vers 7 000 ans B. P. le niveau - 10 m admis par de nombreux auteurs (AUFFRET et LARSONNEUR, 1975 ; LARSONNEUR *et al.*, 1982), puis la cote - 6 m vers 5 100 ans B. P. (LEFEVRE, 1972). Autour de 3 500 ans, on retrouve dans la région canchoise le niveau marin à - 4 m par rapport à la cote actuelle ; puis ce dernier est décelé à la cote - 3 m qui correspondrait à la période du Bronze récent (\approx 3 200 ans B. P.). Dans le secteur de Camiers, à l'époque gauloise, le niveau marin est à la cote - 2 m et à la cote - 1 m vers 2 100 ans B. P., durant la Tène (MARIETTE, 1971). Au Subatlantique, la remontée de la mer se fait sentir surtout au III^{ème} siècle après J.-C. et semble atteindre son maximum tout au début du 4^{ème} siècle à un niveau très proche de l'actuel. La transgression flandrienne s'est manifestée par une remontée très rapide du niveau marin entre 8 000 et environ 6 000 ans B. P. A partir de cette époque, le niveau marin a continué de monter, mais de façon plus lente, jusqu'à sa cote actuelle.

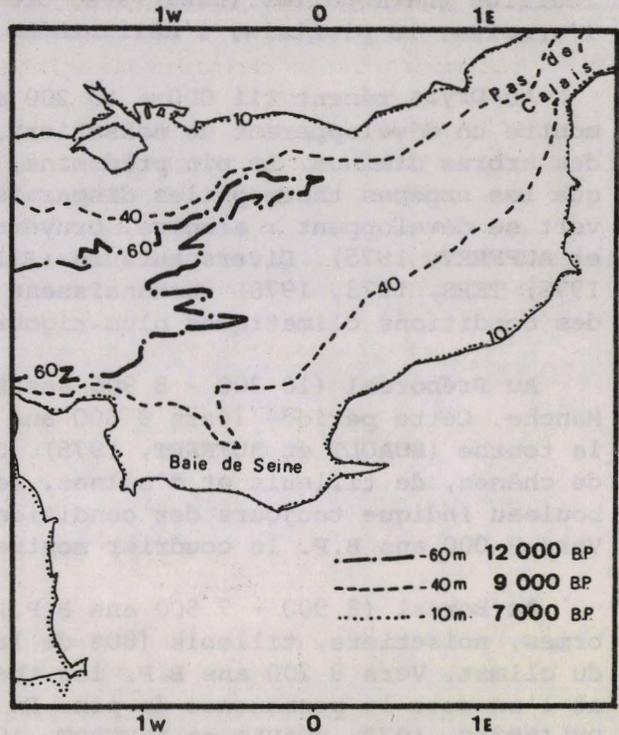


Figure 8 : PALEOLIGNES DE RIVAGE AU COURS DE L'HOLOCENE modifié d'après LARSONNEUR *et al.* (1982)

II.1.2 - Fluctuations climatiques

La remontée du niveau marin représentée par une courbe de type hyperbolique qui s'amortit au cours du temps, s'est accompagnée d'une évolution climatique. Celle-ci est particulièrement documentée par les données palynologiques.

Vers 18 000 ans B. P., la Manche était une plaine émergée, occupée en grande partie par des tourbières avec une flore arborescente de climat froid, dominée par le pin sylvestre (BOURDIER, 1963).

Au Tardiglaciaire (tableau 1), l'étude des spores et des grains de pollen permet de constater un réchauffement climatique du Dryas ancien à l'Allerröd. Vers 12 600 ans B. P., les graminées et cypéracées reflètent une végétation de type steppique. Le cortège des plantes herbacées est caractéristique d'un paysage ouvert. Les arbres se réduisent presque uniquement aux pins et bouleaux, avec une prédominance de ces derniers ; cela indique des conditions climatiques assez rigoureuses (ELHAI et LARSONNEUR, 1969 ; MORZADEC et DELIBRIAS, 1972).

A l'Allerød (12 000 - 11 000 ans B.P.), le développement des fougères et des pins, ainsi que la diminution marquée des herbacées (DELIBRIAS et *al.*, 1969) témoigneraient d'un réchauffement climatique. On constate également le développement des feuillus thermophiles (coudriers, ormes). Les herbacées sont représentées par l'armoise, le plantain, l'hélianthème et des graminées.

Au Dryas récent (11 000 - 10 200 ans B.P.), l'étude de l'association végétale montre un développement de noisetiers, de chênes et d'ormes; mais la proportion des arbres diminue. Le pin prédomine, le bouleau et le saule augmentent, tandis que les espèces thermophiles disparaissent. Les plantes de terrain sec et découvert se développent : armoise, bruyère, ... (MORZADEC et DELIBRIAS, 1972; HUAULT et AUFFRET, 1975). Divers auteurs (ELHAI et LARSONNEUR, 1969; HUAULT et AUFFRET, 1975; TERS, 1973, 1976) reconnaissent après l'Allerød un paysage découvert sous des conditions climatiques plus rigoureuses.

Au Préboréal (10 200 - 8 900 ans B.P.), la mer est toujours absente de la Manche. Cette période (vers 9 500 ans B.P.) marque le début de la formation de la tourbe (HUAULT et AUFFRET, 1975). C'est la phase du pin accompagné d'ormes, de chênes, de tilleuls et d'aulnes. Le noisetier se développe, et la présence du bouleau indique toujours des conditions steppiques (MORZADEC et DELIBRIAS, 1972). Vers 9 000 ans B.P. le coudrier montre un développement brutal et rapide.

Au Boréal (8 900 - 7 500 ans B.P.), l'assemblage floristique (pins, chênes, ormes, noisetiers, tilleuls (80% de la population)) témoigne du réchauffement du climat. Vers 8 200 ans B.P. les thermophiles et le noisetier se développent et l'on note la permanence du pin. En revanche, le bouleau régresse (MORZADEC et DELIBRIAS, 1972; HUAULT et AUFFRET, 1975).

La limite Boréal-Atlantique est caractérisée par une diminution de l'orme.

L'Atlantique (7 500 - 5 500 ans B.P.) est une période favorable à la formation de forêts. Elle est caractérisée par un optimum climatique plus chaud que l'actuel. Le développement de l'aulne indique un climat humide bien établi. Le paysage est constitué par l'assemblage floristique suivant : le chêne, le pin, le noisetier, l'orme, le tilleul et les chénopodiacées (ELHAI et LARSONNEUR, 1969). Cette association floristique indique la proximité du milieu marin. La limite Atlantique-Subboréal est marquée par une diminution des proportions de l'orme.

Au Subboréal (5 500 - 2 800 ans B.P.), la succession floristique est caractérisée par les chénopodiacées, le chêne, le noisetier, le tilleul, le pin et l'aulne (ELHAI et LARSONNEUR, 1969; MUNAUT et GILOT, 1977). L'orme par contre tend à disparaître.

Le début du Subatlantique est marqué par l'apparition du hêtre et présente une flore tempérée où dominent le noisetier, le chêne, l'aulne, le bouleau et le tilleul. L'abondance de l'aulne reflète une humidité assez forte. Le haut niveau marin, en individualisant certains secteurs, permet d'induire des variations climatiques locales. Cette période semble être caractérisée dans le secteur de la Canche, par une végétation halophile de schorre (MARIETTE, 1971).

En résumé, le climat se réchauffe du Bölling (14 000 - 13 000 ans B. P.) au Subboréal, avec diverses fluctuations climatiques intermédiaires. L'Atlantique présente un optimum climatique attesté par le développement des forêts à proximité du domaine marin, tandis que le Subatlantique présente une détérioration du climat à saisons contrastées. Nous retrouvons toujours à peu près le même assemblage floristique dont les proportions spécifiques varient selon les climats : pin, chêne, noisetier, tilleul, bouleau. Depuis le Boréal, l'abondance de l'orme diminue et ce dernier tend à disparaître pour être remplacé au Subatlantique par le hêtre.

II.1.3 - Approche sédimentologique

a) Evolution du littoral d'après la dynamique sédimentaire

Dans la plaine maritime picarde, on constate des fluctuations au sein des séries sédimentaires. Ces variations retranscrivent les allées et venues de la mer sur le littoral. MONTAIGNE (1973) essaye de retrouver les unités stratigraphiques du Calaisien et du Dunkerquien décrites par DUBOIS (1924) en plaine maritime flamande.

D'autres études, dont celles de JELGERSMA (1961) au Pays-Bas, MARIETTE (1971) dans le Boulonnais, et LE FOURNIER (1974) en plaine maritime picarde reconnaissent également des changements de la position relative de la ligne de rivage (figure 9). Pour ces auteurs, ces fluctuations n'évoluent pas de façon aussi régulière que le suggèrent ces différentes courbes.

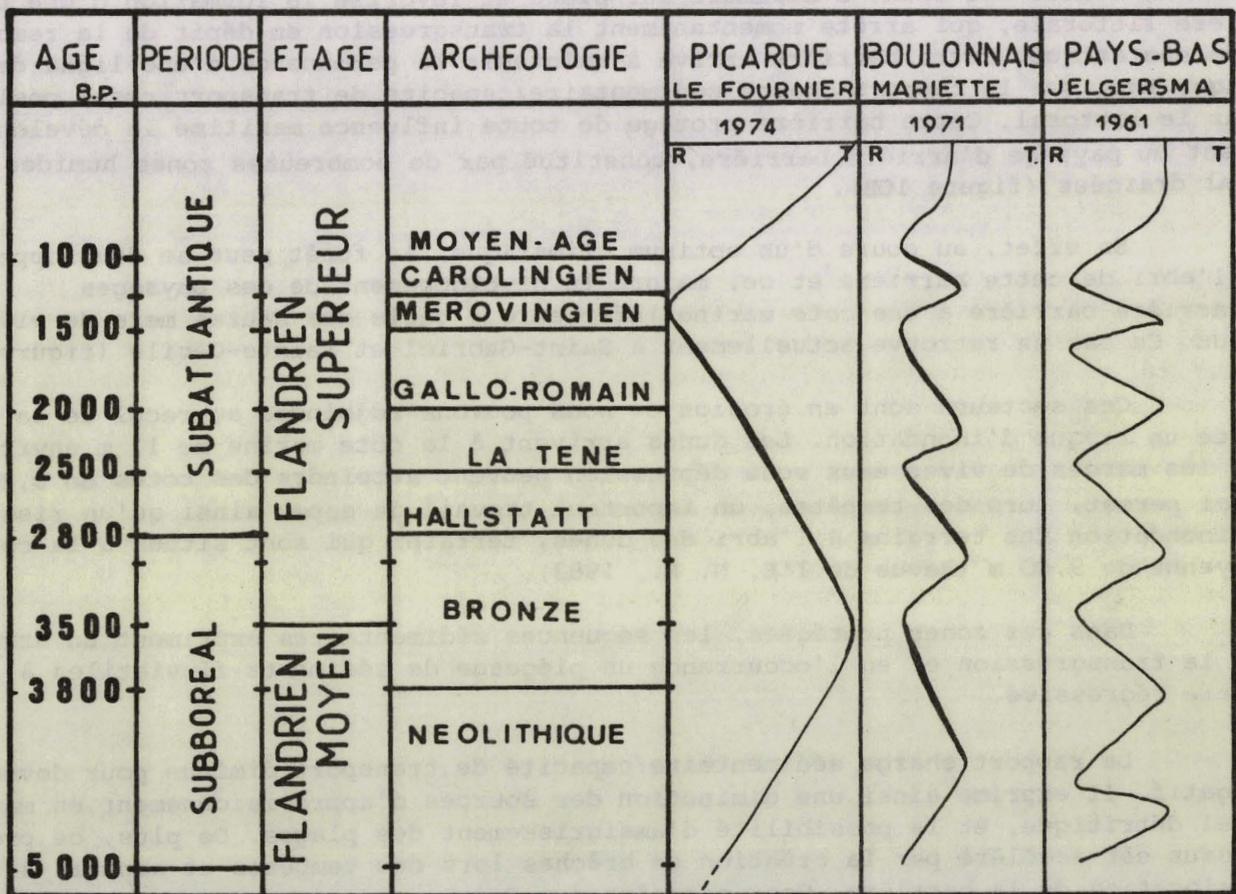


Figure 9 PHASES TRANSGRESSIVES, ET REGRESSIVES A L'HOLOCENE
modifié d'après MARIETTE (1971)

Les fluctuations schématisées dans la figure 9 laissent présager des variations du niveau marin et donc des phénomènes transgressifs et régressifs ; pourtant ces fluctuations semblent indépendantes du niveau de la mer. En effet, celui-ci montre une montée rapide au début de l'Holocène qui s'atténue à l'approche des temps historiques (cf § II.1.1). Ces allées et venues de la mer pourraient également être tributaires de phénomènes tectoniques et/ou de tassements différentiels tout au long de l'Holocène. Pourtant dans le secteur de la Canche, région assez calme, de tels phénomènes ne sont guère envisageables (BOURDIER, 1974).

Ces phénomènes transgressifs et régressifs ne peuvent donc s'expliquer que par la formation et la dislocation successives de plusieurs barrières littorales. Cette hypothèse s'appuie sur l'étude de LE FOURNIER (1974).

Au début de l'Holocène, la transgression flamandaise mobilise et redistribue les dépôts terrigènes. A partir de 9 000 - 8 000 ans B. P., à l'ouverture du Pas-de-Calais, s'installe un régime de courants équivalent à celui existant de nos jours (AUFFRET et LARSONNEUR, 1975 ; LARSONNEUR *et al.*, 1982). Vers 7 000 ans B. P., la cote - 10 m est atteinte, permettant l'envasement des basses vallées (figure 10A). La capacité de transport des courants côtiers se révèle insuffisante pour compenser l'importance des apports détritiques remaniés. L'excès de ces apports, dû à la montée des eaux, s'accumule sur place et favorise la formation d'une barrière littorale, qui arrête momentanément la transgression en dépit de la remontée eustatique. Cette barrière arrive à maintenir la permanence d'une ligne de rivage, tant que le rapport charge sédimentaire/capacité de transport reste positif sur le littoral. Cette barrière protège de toute influence maritime le développement du paysage d'arrière barrière, constitué par de nombreuses zones humides mal drainées (figure 10B).

En effet, au cours d'un optimum climatique, la forêt peut se développer à l'abri de cette barrière et ce, malgré le développement de ces paysages d'arrière barrière à une cote marine inférieure à celle des hautes mers de vives eaux. Ce cas se retrouve actuellement à Saint-Gabriel et Sainte-Cécile (figure 2).

Ces secteurs sont en érosion et nous pouvons adjoindre au recul de la côte un risque d'inondation. Les dunes arrivent à la cote marine de 11 m environ et les marées de vives eaux sous dépression peuvent atteindre des cotes de 9,20 m. Ceci permet, lors des tempêtes, un important travail de sape, ainsi qu'un risque d'inondation des terrains à l'abri des dunes, terrains qui sont situés à la cote moyenne de 9,00 m (Revue de l'E. N. R., 1983).

Dans ces zones protégées, les séquences sédimentaires expriment un arrêt de la transgression et en l'occurrence un piégeage de sédiments fluviatiles à série régressive.

Le rapport charge sédimentaire/capacité de transport diminue pour devenir négatif. Il exprime ainsi une diminution des sources d'approvisionnement en matériel déritique, et la possibilité d'amaigrissement des plages. De plus, ce processus est accéléré par la création de brèches lors des tempêtes et aboutit à la dislocation de la barrière. Ceci entraîne, en même temps qu'une érosion intense, une invasion marine des secteurs littoraux. Ce déséquilibre favorise une deuxième édification du cordon littoral en arrière de la première (figure 10C).

Les sédiments de la première barrière sont repris et réintroduits dans un nouveau cycle sédimentaire, et la transgression pousse en direction du continent le prisme littoral sableux ; ces matériaux qui le composent, alimentent la plage sous-marine et l'égalisent.

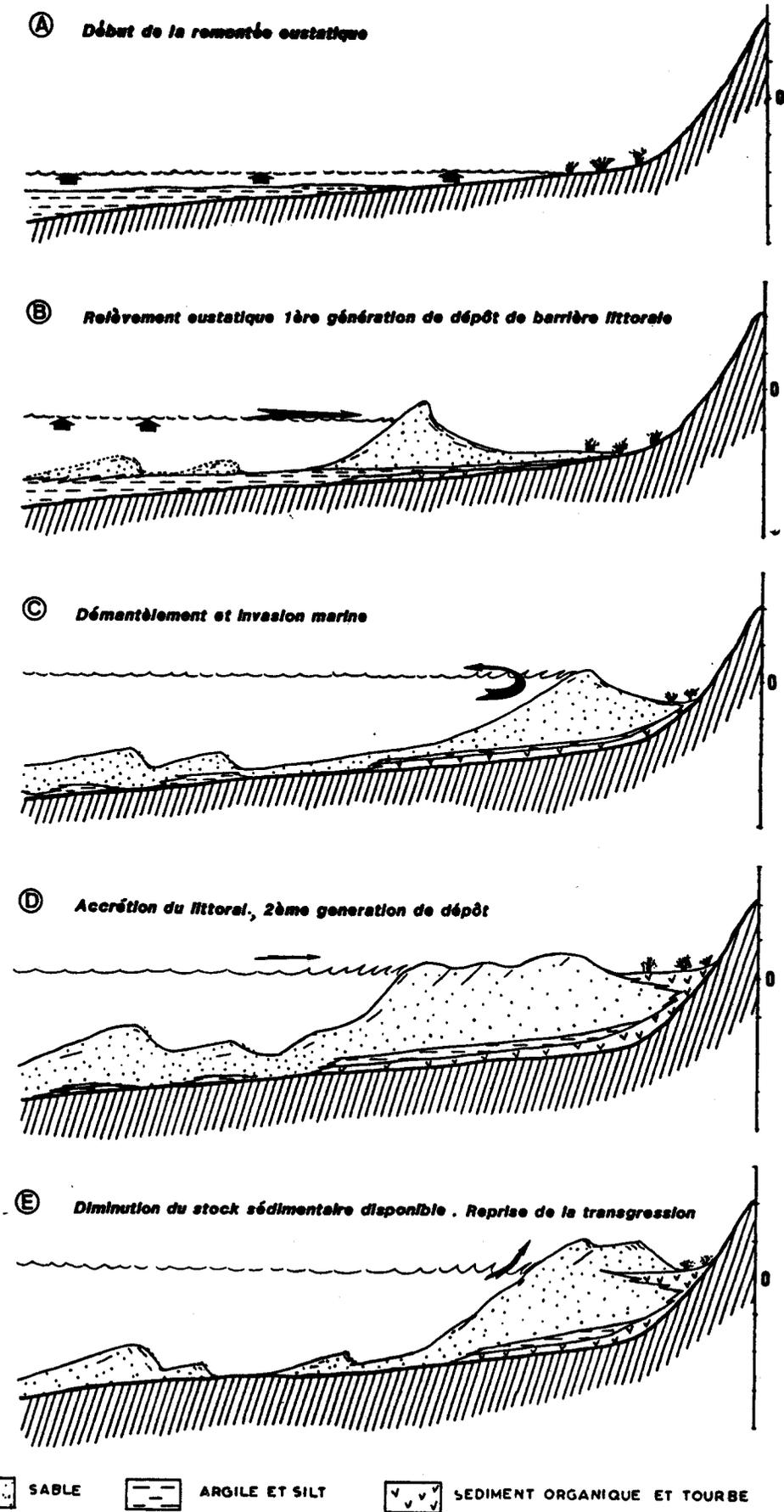


Figure 10 : INFLUENCE RELATIVE DE LA FORMATION ET DE LA DISLOCATION D'UN CORDON LITTORAL SUR LES SEQUENCES SEDIMENTAIRES EN PICARDIE d'après HAGEMAN(1969), LE FOURNIER(1980), ALLEN et al. (1981)

Cette édification de barrière s'effectue par la mobilisation d'appréciables quantités de matériel détritique sous l'action de la dynamique littorale. Il s'ensuit une augmentation du rapport charge sédimentaire/capacité de transport au niveau des plages (figure 10D).

L'établissement d'un profil d'équilibre et la diminution du rapport charge sédimentaire/capacité de transport favorise l'avancée de la mer vers l'intérieur des terres. En effet, les apports n'arrivent plus à compenser l'érosion liée au transfert littoral. On assiste ainsi à un démantèlement de la barrière (figure 10E). Plus tard, en se rapprochant des terres, l'ancien matériel est repris pour participer à une nouvelle édification du cordon.

En raison du ralentissement eustatique, le façonnement des barrières se réalise suivant l'horizontale par accrétions des lignes de rivages. Ainsi pour **SOMME** (1977), les termes de transgression et régression dunkerquiennes doivent être entendus dans un sens de déplacement horizontal de la ligne de rivage et ne pas impliquer une élévation ou une diminution du niveau de la mer.

LE FOURNIER (1974) propose l'existence de deux générations de barrières littorales (8 000 - 6 000 ans B. P. et 4 000 - 2 500 ans B. P.) suivies de périodes de démantèlement (6 000 - 4 000 et 2 500 à l'actuel). Les apports sédimentaires ne pouvant plus compenser le déficit induit par le transfert littoral, la morphologie sous-marine n'est plus en équilibre avec les caractéristiques hydrodynamiques du milieu. On assiste donc depuis l'époque romaine à une phase de démantèlement.

En résumé, depuis le début de la transgression flandrienne, la combinaison des différents facteurs dynamiques : houle, élévation du niveau de la mer, mobilisation des sables fossiles, transfert littoral, compétence et capacité des courants, ... contribue à présenter des phénomènes transgressifs et régressifs dans les séries sédimentaires. En effet, ces derniers reconnus, en milieu littoral ne seraient pas dûs sur le littoral picard à des variations du niveau marin, mais à la présence et à la dislocation des barrières littorales dont l'existence éventuelle est liée à une dynamique littorale. D'ailleurs, des bancs au large résultant de cette destruction ont été préservés et fossilisés (LE FOURNIER, 1980).

Parfois l'existence de tempêtes violentes, la fréquence de vents forts durant plusieurs années successives peuvent favoriser une pénétration de hautes marées à l'intérieur des terres et marquer un phénomène transgressif de type catastrophique.

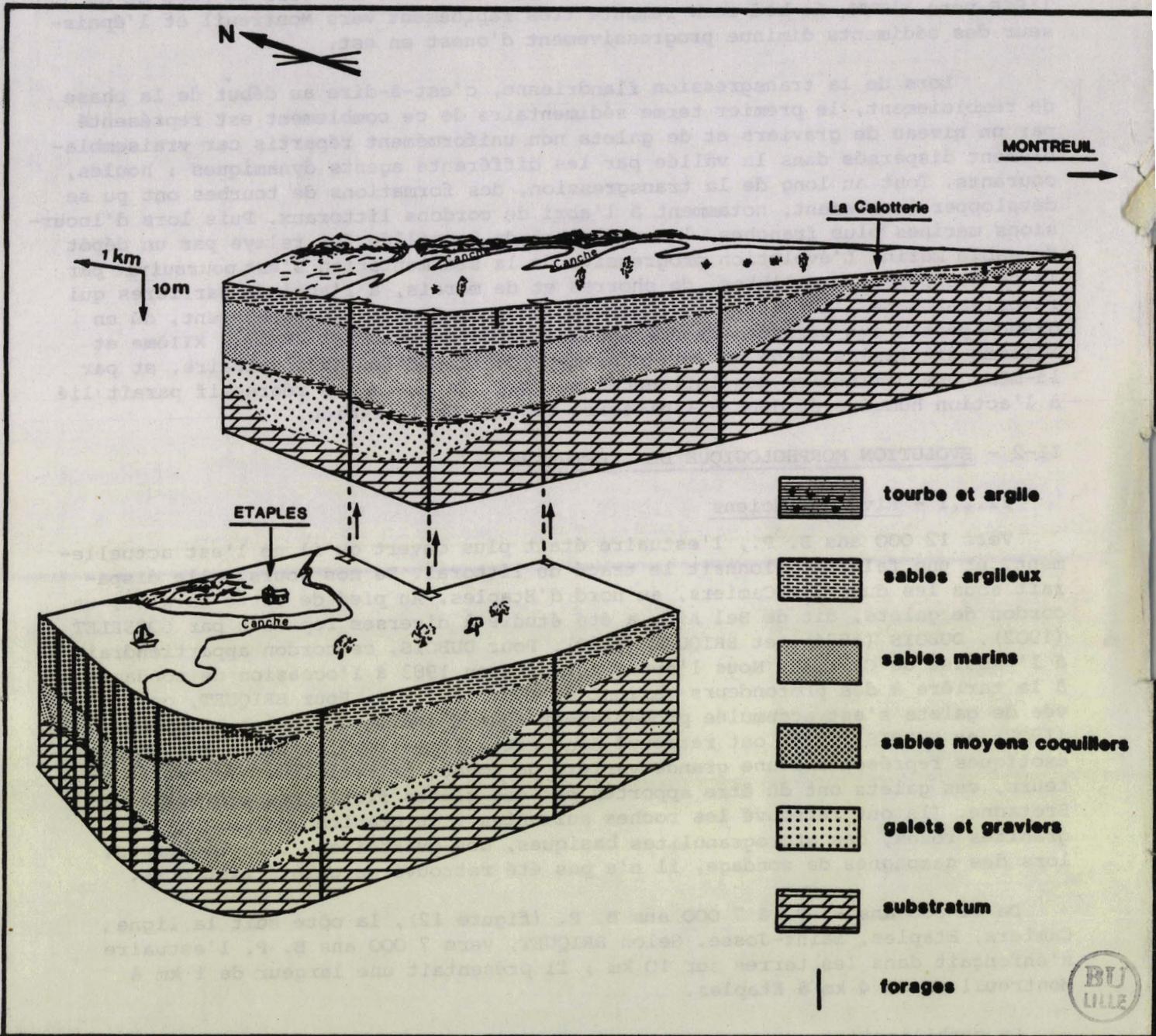
Ces allées et venues de la mer sont liées à l'existence et au démantèlement d'un cordon, simple arbitre de la confrontation mer-continent.

b) Evolution paléogéographique de la basse vallée de la Canche

Cette évolution dépend des variations du niveau marin, des stocks sédimentaires disponibles et du régime d'écoulement du fleuve lié aux climats qui ont régné sur la région. L'ensemble de ces facteurs a présidé au comblement de l'estuaire. La répartition des différents faciès rencontrés au sein des formations de remblaiement montre que les conditions dynamiques de mise en place des dépôts ont été très différentes dans le passé de ce qu'elles sont à l'heure actuelle. Une représentation graphique synthétique des divers événements intervenus est proposée sur la figure 11.

Ce bloc diagramme a été établi à partir de 13 forages, de nombreux sondages à la tarière et d'une prospection électrique entreprise par le B. R. G. M. (A. MARCE et J. PUTALLAZ, 1968 ; L. CREMILLE, 1972 ; J. RICOUR, 1974).

Figure 11 : EVOLUTION DES SEQUENCES SEDIMENTAIRES DANS LA BASSE VALLEE DE LA CANCHE AU COURS DE L'HOLOCENE



Au cours du dernier bas niveau marin, la morphologie et le régime des fleuves étaient très différents de ce qu'ils sont actuellement. Le niveau marin étant vers la cote - 60 m, le bed-rock se trouvait dénudé à l'emplacement du chenal, et en partie recouvert par des galets d'âge vraisemblablement pléistocène.

Ces formations étaient soumises à un ravinement latéral, ainsi qu'à un creusement longitudinal. Leur érosion était conditionnée par différents facteurs

tels que la nature lithologique des terrains et la tectonique anté-quaternaire. Cette dernière contrôla l'emplacement de ce creusement dont l'orientation est liée à la présence de failles et de synclinaux.

Les différents forages ainsi que les sondages électriques montrent en rive gauche que le substratum crayeux s'approfondit du sud vers le nord et de l'ESE vers l'WNW. Le bed-rock remonte très rapidement vers Montreuil et l'épaisseur des sédiments diminue progressivement d'ouest en est.

Lors de la transgression flandrienne, c'est-à-dire au début de la phase de remblaiement, le premier terme sédimentaire de ce comblement est représenté par un niveau de graviers et de galets non uniformément répartis car vraisemblablement dispersés dans la vallée par les différents agents dynamiques : houles, courants. Tout au long de la transgression, des formations de tourbes ont pu se développer localement, notamment à l'abri de cordons littoraux. Puis lors d'incur-sions marines plus franches, le comblement de la vallée fut relayé par un dépôt de sable marin. L'évolution progressive de la sédimentation s'est poursuivie par le développement de slikkes, de shorres et de marais, à l'abri de barrières qui favorisent dans l'arrière pays l'existence de marécages. Ce comblement, dû en grande partie aux périodes de défrichement et d'endiguement (XIème, XIIème et XIIIème siècles) a amené un rétrécissement de la section de l'estuaire, et par là-même une diminution des influences marines. Ce phénomène régressif paraît lié à l'action humaine et donc à l'histoire récente de la région.

II-2 - EVOLUTION MORPHOLOGIQUE DE L'ESTUAIRE

II.2.1 - Rivages anciens

Vers 12 000 ans B. P., l'estuaire était plus ouvert qu'il ne l'est actuellement, et une falaise jalonnait le tracé du littoral. De nos jours, elle disparaît sous les dunes de Camiers, au nord d'Etaples. Au pied de cette falaise, un cordon de galets, dit de Bel Air, a été étudié à diverses reprises par GOSSELET (1902), DUBOIS (1924), et BRIQUET (1930). Pour DUBOIS, ce cordon appartiendrait à l'"Assise de Calais". Nous l'avons retrouvé en 1983 à l'occasion de sondages à la tarière à des profondeurs variant de 0,5 m à 2,5 m. Pour BRIQUET, cette levée de galets s'est accumulée probablement sous l'action de houles. GOSSELET (1902) et DUBOIS (1924) ont retrouvé dans cette formation littorale des galets exotiques représentant une grande variété de roches cristallines. Selon les auteurs, ces galets ont dû être apportés par des glaces flottantes provenant de Bretagne. Ils ont retrouvé les roches suivantes : du granite gneissique, des granites roses, des microgranulites basiques, des quartzites, ... Toutefois, lors des campagnes de sondage, il n'a pas été retrouvé de galets exotiques.

De 11 000 ans B. P. à 7 000 ans B. P. (figure 12), la côte suit la ligne Camiers, Etaples, Saint-Josse. Selon BRIQUET, vers 7 000 ans B. P. l'estuaire s'enfonçait dans les terres sur 10 km ; il présentait une largeur de 1 km à Montreuil et de 4 km à Etaples.

La stabilisation apparente du trait de côte ainsi que l'amélioration climatique facilitaient la fixation des forêts à l'Atlantique, au Subboréal et au Subatlantique. Des témoins de cette forêt se retrouvent sous la forme de bancs de tourbe sur les grèves de Saint-Gabriel, Sainte-Cécile et du secteur du Lornel.

Du XIème au XIIIème siècles, commencent les grands travaux de conquêtes sur la mer et de défrichement (DEMANGEON, 1905 ; BRIQUET, 1930 ; VERGER, 1968). Au XVIIIème siècle (figure 13) l'estuaire est bien ouvert et davantage orienté à l'ouest. Le havre de Trépiéd est connu dès 1640. En 1650, Montreuil-sur-mer est toujours accessible par la mer (BRIQUET, 1930). Au nord de l'embouchure, le littoral présente une indentation à proximité de la localité actuelle de Danne (figure 12).

Les étapes de l'envasement sont masquées par l'extension de renclôtures. Une série de digues découpe en compartiments la plaine au sud de la Canche. Parmi ces digues, on reconnaît celle qui marquait le rivage au XVIII^e siècle (figure 14) et derrière laquelle s'abritait le faubourg de Trépiéd. Le cours inférieur, à partir de Montreuil, présente un nombre plus important de méandres. Le débit étant pratiquement constant et la vitesse d'écoulement ralentie, le fleuve doit augmenter sa capacité en étalant son lit et en formant des méandres. Les zones intertidales occupent encore des surfaces considérables et la Canche se termine par un estuaire présentant des chenaux anastomosés. La partie sud de l'embouchure a nettement progradé et dessine deux terminaisons sableuses représentant deux générations de pouliers dont le plus récent et le plus externe porte le nom de "Pointe du Touquet". Au nord, à hauteur de la ville de Danne, quelques étangs dont l'étang du roi, témoignent d'une ancienne présence marine.

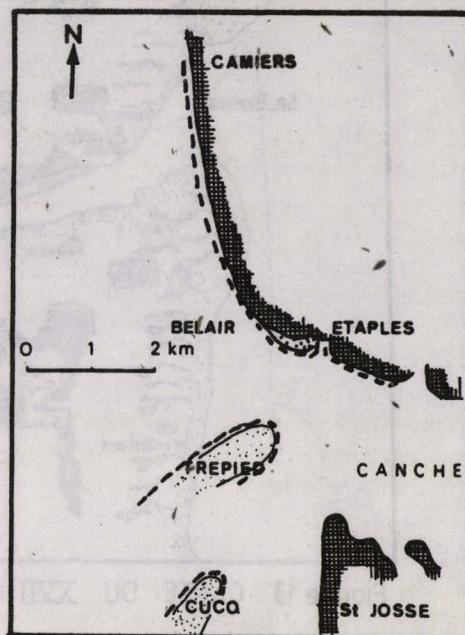


Figure 12: LIGNE DE RIVAGE AU FLANDRIEN INFERIEUR in BRIQUET (1930)

II.2.2 - Rivages actuels

Les études sur l'évolution récente du trait de côte reposent sur les travaux de BRIQUET (1930), du Laboratoire National d'Hydraulique (L. N. H.) (1970) ainsi que sur les photographies de la mission aérienne I. G. N. 1981 : les lignes de rivage des années 1758, 1878, 1835, 1927 sont tirées de la thèse de BRIQUET, celles des années 1878, 1935, 1966, du rapport du L. N. H. (1970). Celles de 1981 sont tracées à partir de photographies de la mission aérienne couleur I. G. N. 1981.

Ces différents traits de côte ont été portés à une même échelle à l'aide d'un Stéréozoom Transfer Scope (Z. T. S.) de Bausch et Lomb dans le but de comparer les morphologies successives. Sur les trois figures correspondantes (15, 16, 17), le feu des dunes de Camiers et le phare de la Canche au Touquet servent de points de repère et permettent d'apprécier les déplacements du trait de côte.

De 1758 à 1878 (figure 15)

A partir du XIX^e siècle, une série de travaux d'aménagement est entreprise afin d'améliorer la navigation entre le port d'Etaples et la mer. De 1835 à 1878 on construit une digue sur la rive gauche et on la prolonge par étapes successives. Elle atteint vers 1870 une longueur de 3 150 m. En rive droite, et durant l'année 1847, un quai en charpente est édifié.

A l'embouchure, le feu fixe qui avait été établi dans le secteur du Lornel en 1833 doit être déplacé en 1863. En 1874 il fut remplacé par le feu actuel.

Le poulier de la pointe du Touquet s'accroît vers le large et s'allonge dans le même temps à l'intérieur de l'estuaire. L'avancée de cette flèche littorale fut évaluée à 350 m, de 1835 à 1878. Cet accroissement s'opère par phases successives (BRIQUET, 1930). Il s'amorce par l'extension au large de la ligne de

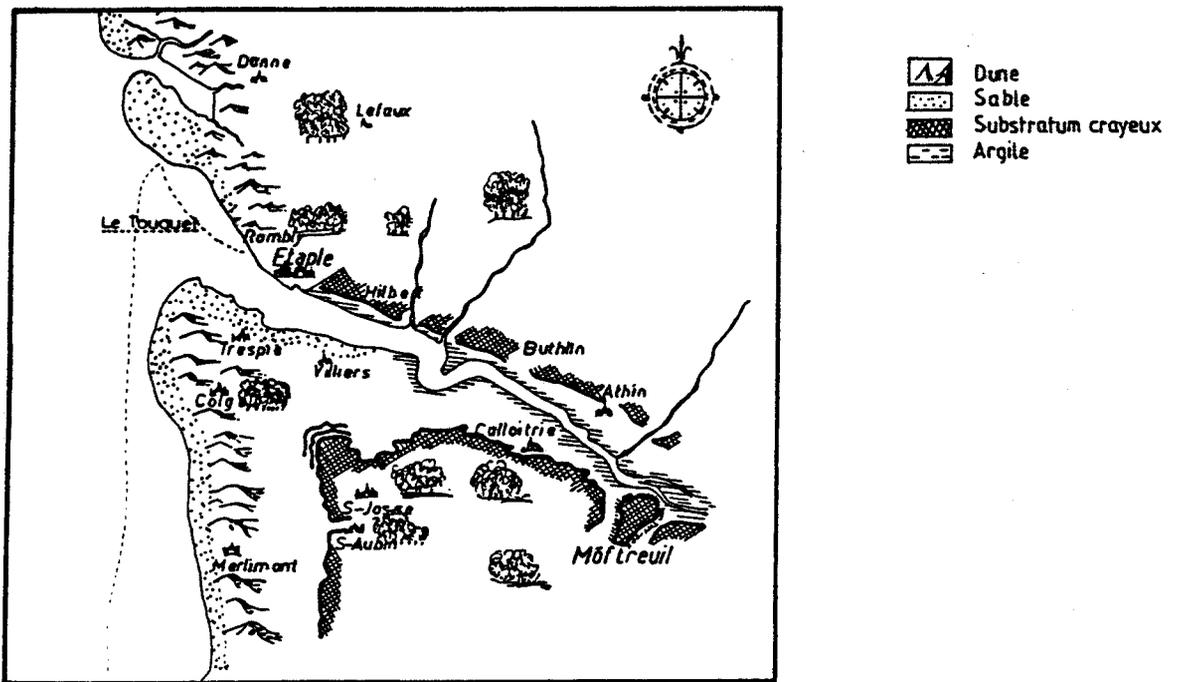


Figure 13 : CARTE DU XVII^e siècle in LEROY (1979)



Figure 14 : CARTE DU XVIII^e siècle de CASSINI

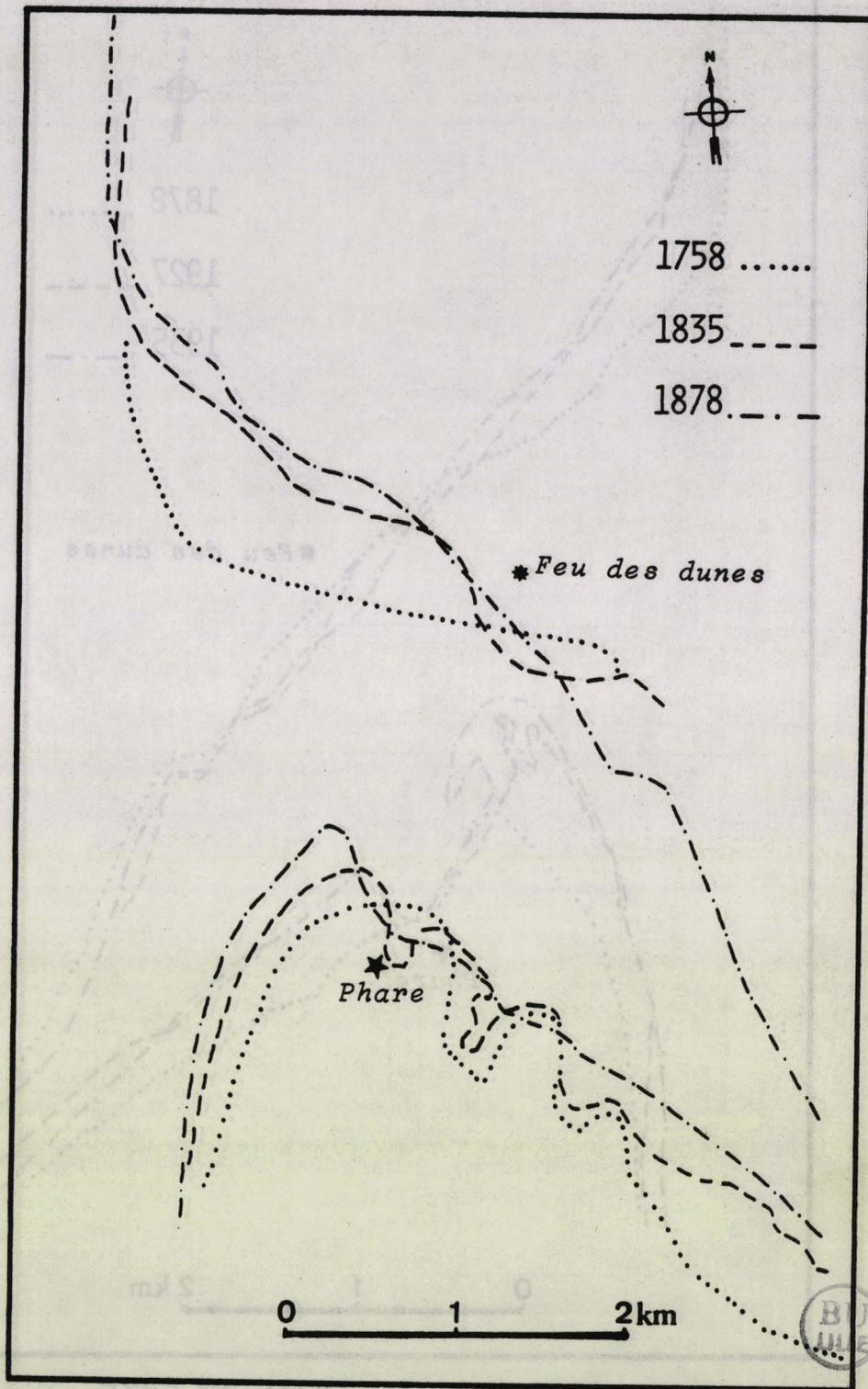


Figure 15 : VARIATION DU TRAIT DE COTE

rivage, en avant de la pointe, d'un promontoir sableux.

Dans le même temps le musoir, qui divise le courant de flot, recule sous l'action de celui-ci. De 1835 à 1878, ce recul est évalué à environ 200 m.

De 1878 à 1935 (figure 16)

Cette période est caractérisée par le renforcement et les réparations des digues ainsi que du quai, puis son remplacement en 1934 par un ouvrage en béton. Les endiguements se poursuivent, et en 1924, une vaste étendue de mollières a été

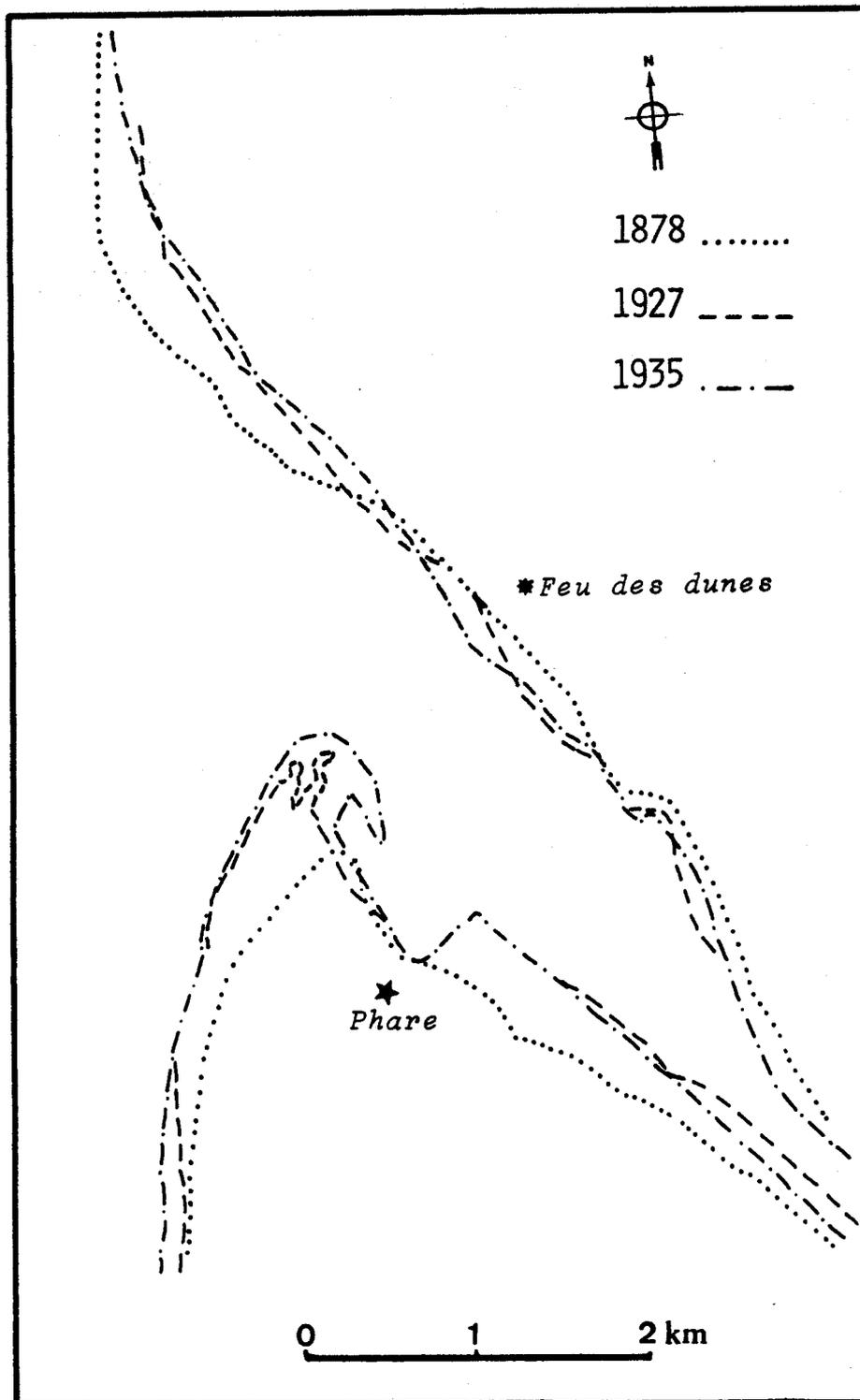


Figure 16 : VARIATION DU TRAIT DE COTE

renclose sur la rive gauche, en aval du pont d'Etaples pour l'installation du champ de course du Touquet.

Au cours de cette période, on constate une avancée spectaculaire de la pointe du Touquet évaluée à 650 m. Par contre le banc du Pilori ne prograde que sur une distance d'environ 380 m, favorisant par là-même, sous l'effet des agents naturels, un recul de l'ordre de 250 m de la rive nord.

De 1935 à 1981 (figure 17)

De nouveaux travaux de remblaiement se poursuivent avec la création d'une

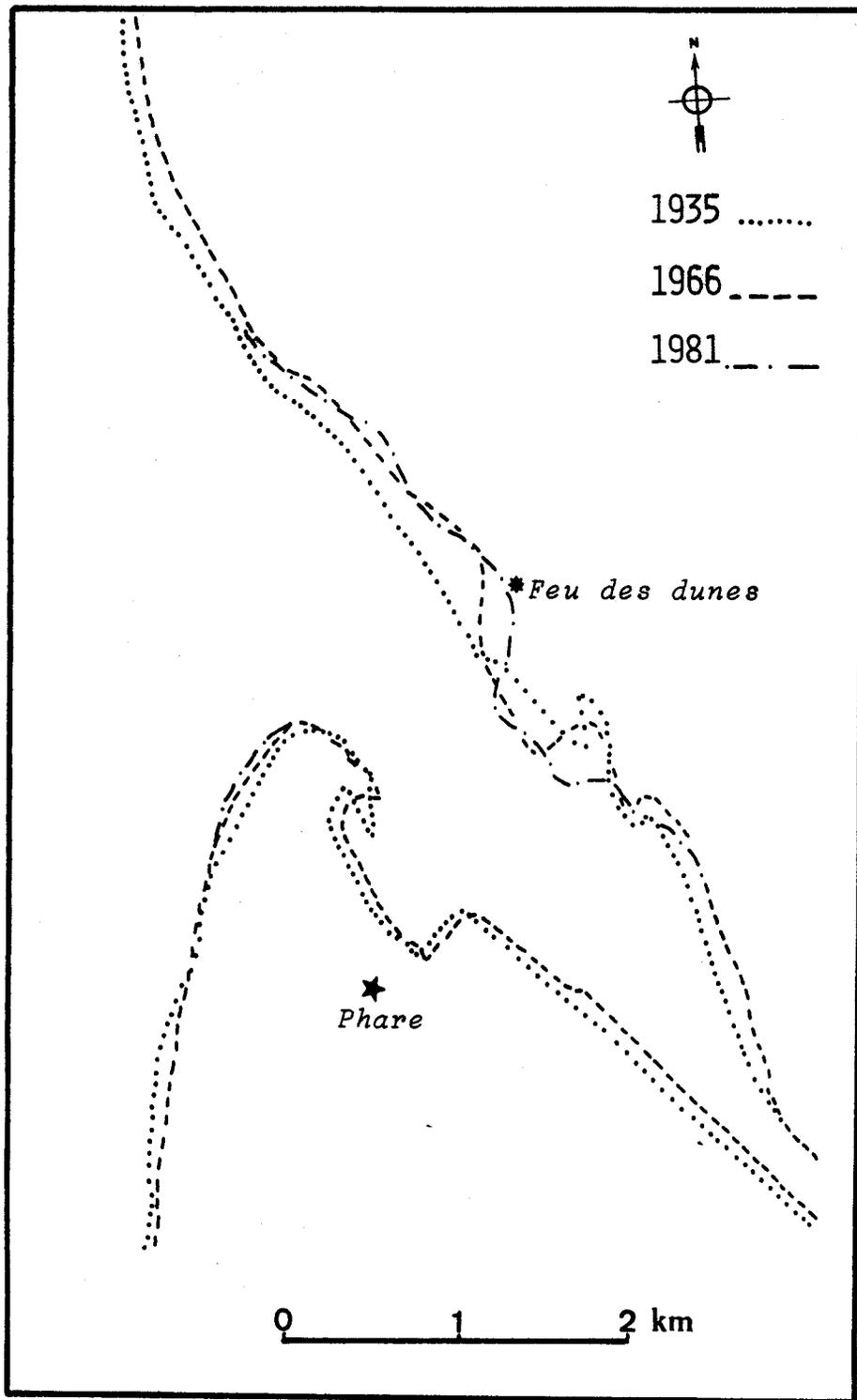


Figure 17 : VARIATION DU TRAIT DE COTE

digue insubmersible en amont du pont d'Etaples. En 1953 et 1961, des dragages furent entrepris dans le chenal menant à la mer. En octobre 1983, des épis sont installés en face du port d'Etaples dans le but de désensabler le chenal lors de la vidange de l'estuaire.

En approchant du Touquet, la côte s'engraisse et, de 1937 à 1947, le littoral a avancé de 160 m. Le banc du Pilori ne progresse pas vers le nord mais se courbe vers l'intérieur. De 1947 à 1967, le banc du Pilori avance de 500 m. Le rivage nord de l'estuaire s'est érodé et de nombreux blockhaus sont maintenant sur l'estran. De 1947 à 1977, le recul est évalué à 125 m. Le comblement de l'estu-

aire s'accroît, les matériaux pris devant l'estuaire allant combler l'intérieur.

L'axe de l'estuaire est toujours en progression vers le nord.

II.2.3 - Conclusion

Comme le constate SOMME (1977), pour d'autres secteurs plus septentrionaux, à un littoral en falaise a succédé un littoral de plage. La falaise ancienne est devenue morte alors que la mer était encore toute proche.

L'évolution de l'estuaire est essentiellement caractérisée par les mouvements de la ligne de rivage et par le développement d'une dissymétrie liée à une accumulation sédimentaire en rive sud, à une érosion en rive nord et à une migration des sables vers l'est.

Les facteurs de ces mouvements sédimentaires en baie de Canche sont : la houle, les courants de marée et le vent. Ils seront décrits dans un chapitre ultérieur.

Le vent favorise une migration des dunes vers l'intérieur des terres. Ces formations éoliennes constituent une unité transgressive sur les anciens marais (moulières) et sur la falaise morte qu'elles recouvrent maintenant.

La mer fait disparaître toutes traces de sinuosité du rivage dont certaines étaient connues au temps de Cassini sous les noms de "l'Anse au beurre" et de "l'Anse à l'avoine" (figure 13). A l'embouchure, les courants de marée affouillent le pied des dunes et entaillent des escarpements en rive nord. Ils favorisent l'attaque des houles auxquelles la proximité du chenal donne plus de hauteur. En considérant la période allant de 1758 à 1981, on constate un recul de la pointe du Lornel de plus de 2 km. En revanche, sur la rive sud, le banc du Pilori progresse vers le nord. Ce double mouvement, avancée du poulier et recul du musoir, produit une déviation générale de l'embouchure vers le nord (figure 12).

Depuis l'époque dunkerquienne I, l'axe de l'estuaire progresse vers le nord, et semble pivoter autour de la ville d'Étaples (TRICART, 1951).

Ainsi, en même temps que nous assistons à une régularisation du trait de côte, l'estuaire en se colmatant progressivement, prend une direction de plus en plus oblique à la ligne de rivage, et est déporté au NE par rapport à l'axe de la vallée.

III - CONCLUSION

La période flandrienne se caractérise par une importante transgression qui décrit une courbe d'allure générale hyperbolique.

Nous assistons au début de cette période à une phase de comblement intense et rapide, jusqu'à l'ouverture du Pas-de-Calais (9 000 - 8 500 ans B. P.) qui engendre une dynamique littorale proche de l'actuelle. Depuis cette époque le littoral est soumis de façon alternative à la formation et à la dislocation d'un vaste cordon littoral en même temps qu'à la poursuite ralentie de la transgression.

Les sédiments terrigènes remaniés sont déposés sur les bordures littorales, et repris par les courants littoraux ; mais le transfert littoral ne peut contrecarrer l'importance des apports et l'excès s'accumule sous forme de barre littorale, façonnée par divers facteurs dynamiques : courants, houles, vents, ... Cette construction permet le développement d'un paysage d'arrière barrière, souvent mal drainé. En fonction des régimes climatiques, de l'importance des vents et des tempêtes, la forêt peut, ou non, se développer à proximité du domaine marin.

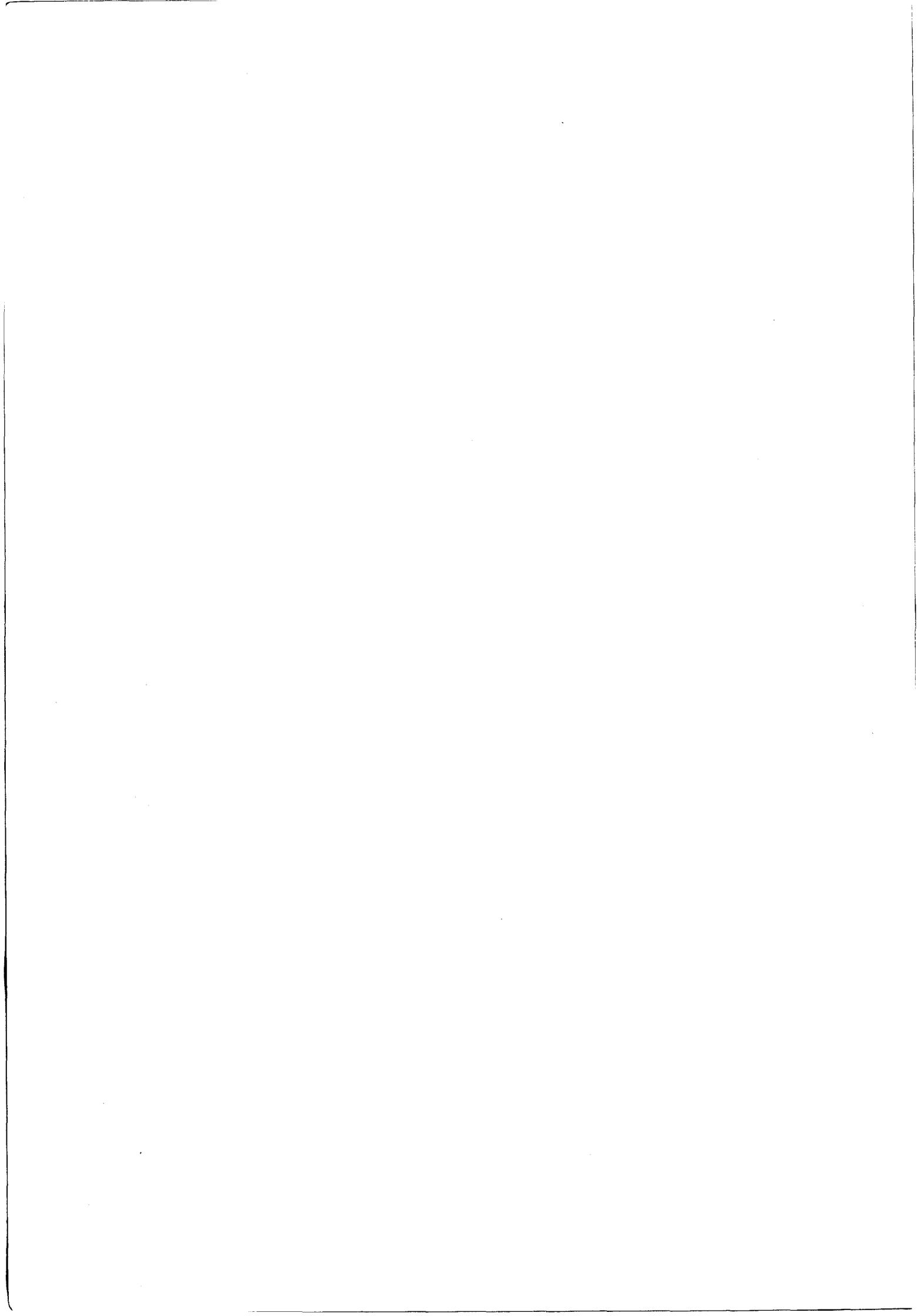
La transgression se poursuivant de façon ralentie, des paysages d'arrière barrière se trouvent à une cote marine inférieure à celle des hautes mers. L'importance des apports sédimentaires diminuant, la barrière littorale commence par être érodée sous le travail continu de dérive due au transfert littoral. Cette érosion peut être facilitée durant les périodes d'instabilité climatique qui développent les effets de sape par l'intermédiaire des tempêtes, des houles et des vents violents.

La dislocation de la barrière arrivant à son terme permet une invasion marine sur les terres. Ceci se traduit, dans les sédiments, par des séries transgressives. Ces sédiments sont de nouveau redistribués et rassemblés sous forme d'une deuxième barrière, à l'arrière de la première. Un nouveau cycle sédimentaire reprend, lié au rapport charge sédimentaire/capacité de transport existant sur le littoral (LE FOURNIER, 1974).

Ainsi, l'alternance de séries régressives et transgressives au sein des séquences sédimentaires est principalement due à l'action combinée des apports sédimentaires, de la dérive littorale, des courants de marée, du climat, des apports fluviaux ainsi qu'éoliens, de la formation et de la dislocation de barrières littorales.

Depuis les temps historiques, nous assistons à une régularisation du trait de côte et à un colmatage de l'estuaire. Ce dernier phénomène résulte d'actions tant naturelles qu'anthropiques, ainsi qu'à une migration de sables vers l'intérieur des terres.

A l'embouchure, l'engraissement de la rive sud, opposée à l'érosion de la rive nord détermine une dérive de l'axe de l'estuaire en direction du nord.



- CHAPITRE II -

NATURE ET REPARTITION DES SEDIMENTS

L'approche sédimentologique regroupe deux types d'études : l'un sur la répartition des sédiments superficiels à partir de 192 prélèvements, l'autre sur l'évolution récente de la sédimentation grâce à 32 sondages à la tarière. Les figures 18 et 19 indiquent la localisation de l'ensemble des prélèvements superficiels et des sondages à la tarière retenus. Les missions ont été regroupées durant les mois de mai-juin 1982 en ce qui concerne les sédiments superficiels, et courant juillet 1983 pour ce qui est des divers sondages.

Les échantillons recueillis dans le cadre de cette étude furent soumis à une analyse granulométrique sur sédiment naturel non décarbonaté, selon des techniques classiques d'analyse exposées en annexe I. Une cartographie détaillée fut réalisée à partir des diverses caractéristiques des sédiments superficiels. Le détail en est donné par CHAMLEY et DESPEYROUX (1983). Enfin, une tentative de cartographie synthétique des différents sondages disponibles a permis de suivre l'évolution sédimentologique durant les dernières décennies.

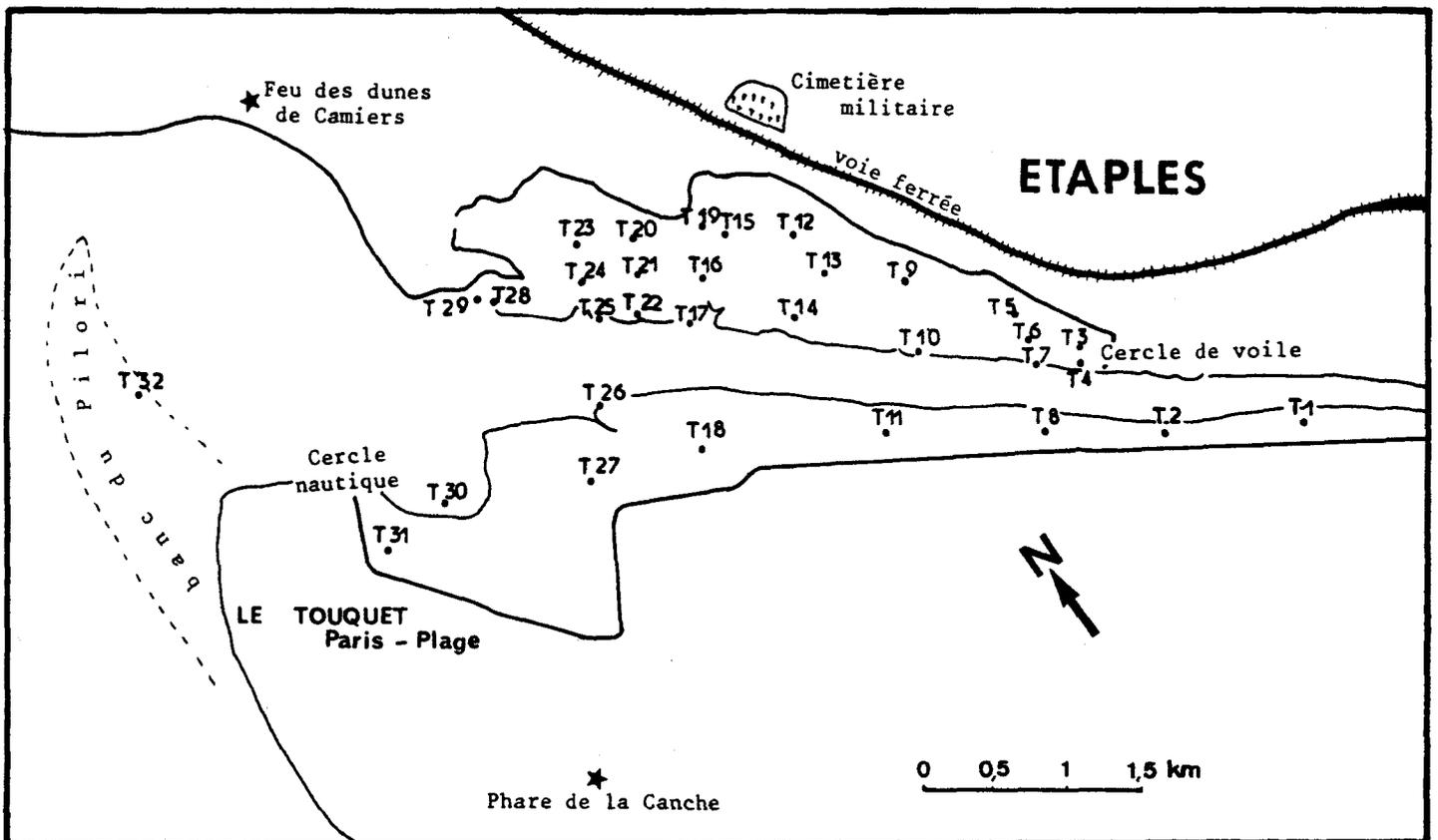


Figure 18: LOCALISATION DES SONDRAGES A LA TARIERE

I - NATURE ET REPARTITION DES SEDIMENTS SUPERFICIELS

I.1 - DISTRIBUTION DES FACIES

La répartition des sédiments est contrôlée par l'action conjointe du vent, des houles, des courants, des marées, du stock sédimentaire, ainsi que par la nature des particules offertes à la sédimentation. La variation de ces différents paramètres à la surface de l'estuaire définit des entités sédimentaires. Leur organisation en domaines reflète en grande partie une distribution latérale depuis le centre de l'estuaire jusque sur ses bordures. L'ensemble des biocénoses, des thanatocénoses et des types de sédiments nous conduit à la notion de faciès. Il en a été différencié cinq : le faciès sableux, les faciès des sables et vases, de la slikke, du schorre, et celui des sables humifères et des tourbes (figure 20).

I.1.1 - Faciès sableux

Il regroupe les domaines du chenal de l'estuaire, des dunes et de l'estran. Depuis Etaples jusqu'à la ville du Touquet, le chenal est limité par deux digues et coupe l'estuaire en son centre. A l'embouchure, il change souvent de position et échancre le littoral en coupant le cordon de dunes d'une côte rectiligne. Trois générations de dunes (MARIETTE, 1971) ceinturent l'estuaire du Nord au Sud. Cet ensemble est plus important dans la partie septentrionale de l'estuaire et représente une unité transgressive sur le schorre, qui se plaque sur la falaise crayeuse jouxtant la ville d'Etaples.

Le classement des sables est maximum dans le chenal ($S_o = 1,14$) ; il diminue légèrement vers l'embouchure ($S_o = 1,24$), dans les dunes ($S_o = 1,20$) et sur l'estran ($S_o = 1,17$ à $1,39$).

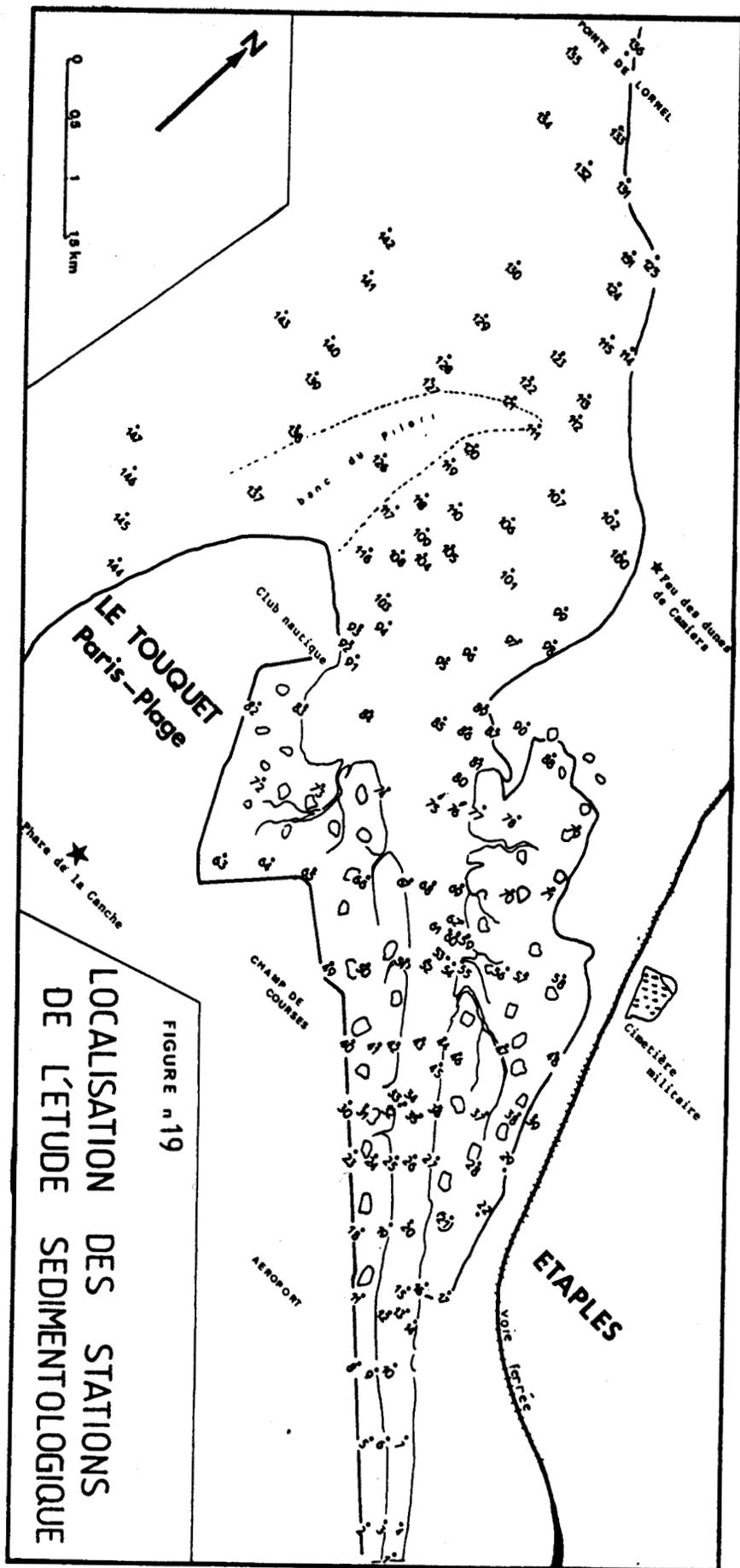
Dans le chenal, l'asymétrie des courbes, pratiquement nulle, oscille autour de 1, et se décale vers les phases grossières à la fois vers l'embouchure, dans les dunes et sur l'estran.

I.1.2 - Faciès des sables et vases

Ce faciès se développe dans la partie aval de l'estuaire, et se trouve pris en tenaille entre le flanc interne du banc du Pilori et le cercle nautique du Touquet. Autrefois y passaient les bras divagants de la Canche. Les sédiments sont souvent réduits, de couleur noirâtre et riches en matière organique. L'humification étant une réaction biochimique importante pour le stockage du carbone organique, KALINOVSKY (1983) essaya de mieux comprendre ce phénomène et de différencier, dans ce secteur de l'estuaire, les substances humiques marines des substances humiques terrestres.

↳ Cette partie de l'embouchure offre par endroits des teneurs en particules fines (inférieures à $63 \mu\text{m}$) pouvant atteindre 47 % du sédiment. Les zones plus argileuses correspondent à l'emplacement d'anciens chenaux, qui, par leur forme légèrement concave, reçoivent et stockent plus d'eau que les entablements environnants. Ces chenaux, abandonnés par le cours actuel de la Canche, sont le siège d'une décanation plus importante des suspensions. Ces milieux devenant beaucoup moins énergétiques sont plutôt des secteurs favorables à la sédimentation. Ils sont séparés par des entablements sableux riches en annélides polychètes. Leur surface est marquée par l'abondance de petits tubes arénacés et ce type de peuplement a déjà été étudié en détail en Baie de Somme (DUPONT, 1975).

Ces populations favorisent un piégeage des sédiments fins par le rejet de substances floculantes et par un ralentissement hydrodynamique dû à la présence de leur tube à la surface du sol. Le sédiment de ces entablements présente un mauvais classement avec une courbe d'asymétrie tournée vers les sédiments fins. On y trou-



ve localement une faune abondante de mollusques bivalves : de coques (*Cardium edule*) et de lavignons (*Scrobicularia plana*) dans des sédiments souvent réduits.

I.1.3 - Faciès de slikke

La slikke se développe de part et d'autre du chenal et se trouve recouverte par chaque marée. Sa surface présente une pente assez prononcée à l'intérieur de l'estuaire, et qui s'adoucit vers l'aval ; elle est souvent tapissée d'une mince couche de "crème de vase" ainsi que d'un voile de diatomées. La population benthique est caractérisée par la présence de vers (*Nereis diversicolor*), de mollusques (*Scrobicularia plana*, *Macoma*, *Hydrobia* et *Cardium*) et de petits crustacés. Les sédiments sablo-vaseux de la basse slikke ainsi que ceux de la confluence du chenal principal avec les marigots ou chenaux, sont souvent réduits ; ils deviennent moins réducteurs en remontant vers la haute slikke qui peut être colonisée par une végétation halophile de spartines (*Spartina townsendii*) et de salicornes (*Salicornia europea*). La haute slikke est souvent marquée par des intercalations beiges de silts et de sables. Les sédiments des slikkes sont caractérisés par un très mauvais classement ($0,5 < So < 4$) et présentent une asymétrie inférieure à 1 (dominance de particules fines, par rapport à la médiane).

Une microfalaise sépare le schorre de la haute slikke. Cette microfalaise est une forme d'érosion latérale et son recul se produit par le sapement de sa base. Comme l'explique VERGER (1968), ce phénomène d'érosion ne signifie pas la disparition à long terme du schorre, car un schorre de nouvelle génération peut se développer par exhaussement de la haute slikke. La microfalaise ne peut être interprétée comme une preuve de transgression ou de régression, même de courte période.

En progressant vers l'aval (figure 20) la slikke, comme du reste le schorre, s'estompe en une plage sableuse dans le secteur du Lornel.

I.1.4 - Faciès de schorre

Désigné sous le terme de "mollière" en Picardie, le schorre ou herbu s'établit de part et d'autre de la slikke, pour s'imbriquer dans le massif dunaire au Nord, et se terminer au niveau des aménagements urbains de la ville du Touquet au Sud. Il présente une remarquable asymétrie du fait de la présence des renclôtures (diques) et de l'établissement de royaons (diques insubmersibles) en rive gauche, qui permirent de soustraire les terres à l'influence de la marée. L'existence de ces digues permit l'installation du champ de course du Touquet en 1924 (BRIQUET, 1930 ; VERGER, 1968) et de l'aéroport (1936). La partie supérieure du schorre est délimitée par une laisse de mer. La mollière n'est recouverte par l'eau que lors de marées de forts coefficients. Des mares naturelles ou artificielles, auprès desquelles s'accolent des gabions (abri sommaire de chasseurs), s'éparpillent sur sa surface ; un réseau dense de chenaux indente le tapis végétal qui est dominé par une population halophile d'obiones. La couverture sédimentaire est constituée de vases compactées ; le sédiment est mal classé ($So = 3$ à 4) et présente une asymétrie inférieure à 1. Certains chenaux offrent un sédiment relativement grossier, moyennement bien classé ($So = 1,30$), avec une asymétrie tournée vers les particules fines.

I.1.5 - Faciès de sables humifères et de tourbes

Dans la partie nord de l'embouchure, la côte offre de larges estrans sableux, et le déplacement du rivage met à nu des couches d'argiles, de sables humifères associées à des tourbes. De telles formations ont été signalées par DUBOIS (1924), BRIQUET (1930), TRICART (1951), MARIETTE (1971) et TERS (1973) et décrites dans le secteur du Lornel par MUNAUD et GILOT (1977). Ces faciès représentent des dépôts d'arrière marais qui se sont développés à l'abri d'un cordon dunaire. Ils se poursuivent sur l'estran en direction de Saint-Gabriel et de Sainte-Cécile (figure 2).

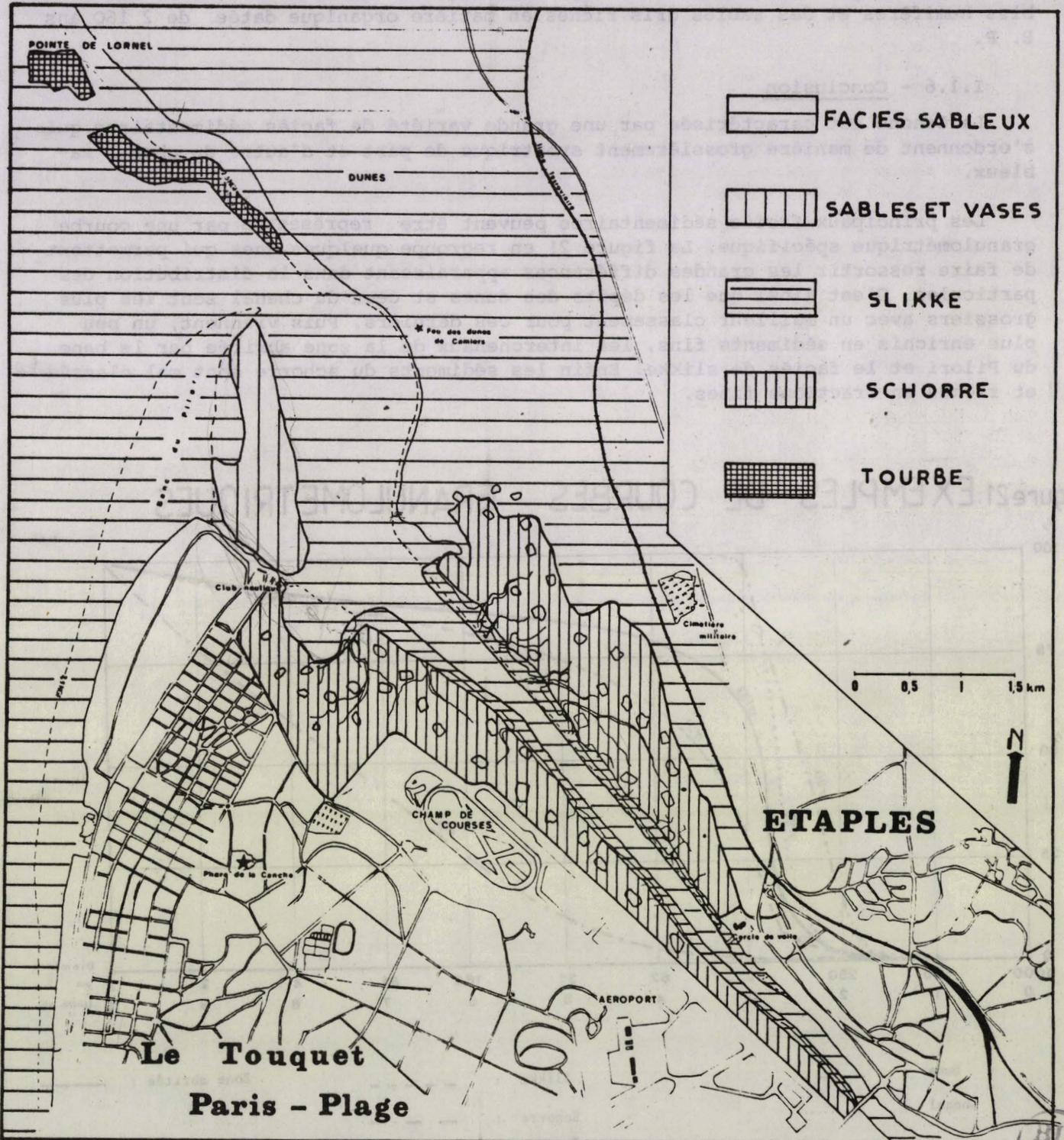


Figure 20: DISTRIBUTION DES DIFFERENTS LITHOFACIES

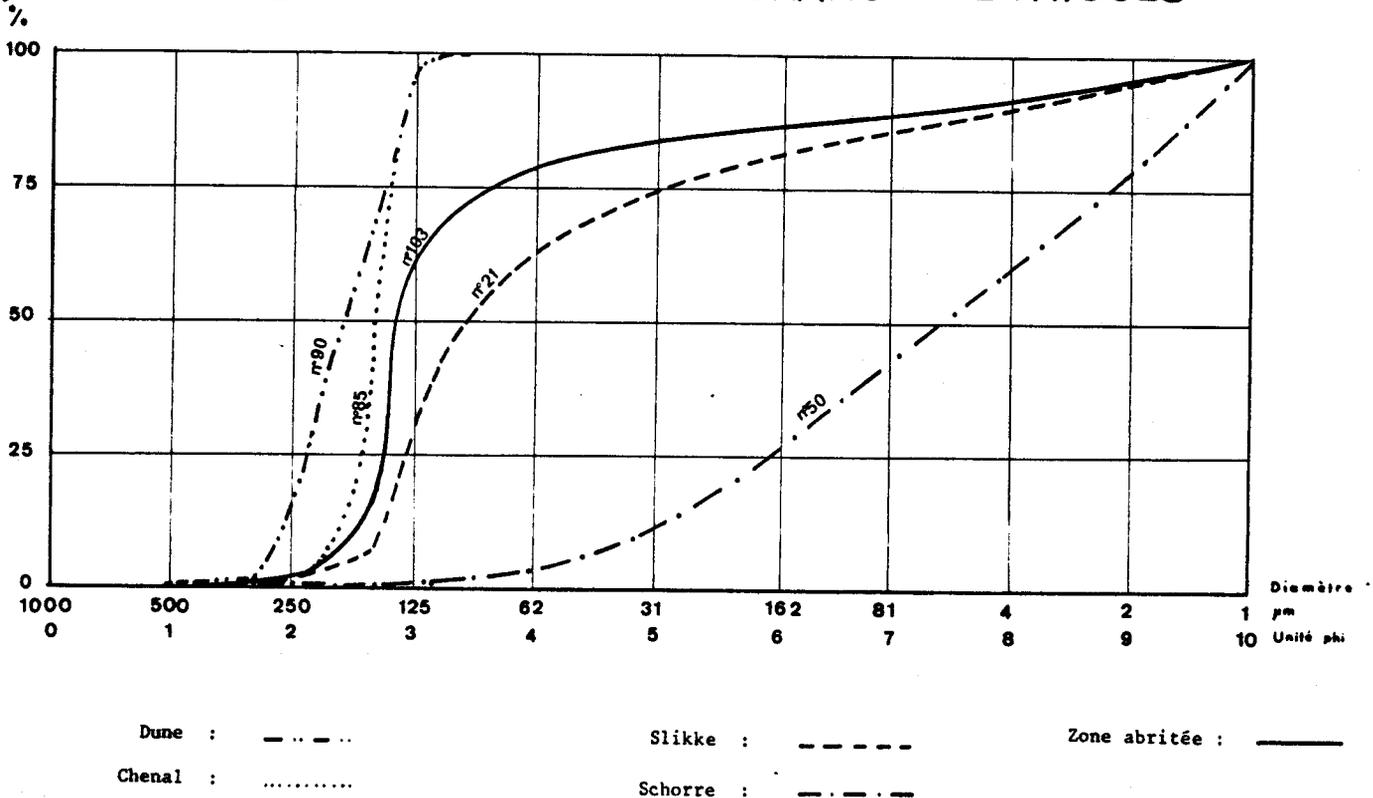
Onze unités ont été mises en évidence, qui s'échelonnent sur une période d'environ 4 700 ans, du Boréal au Subatlantique (MUNAUD et GILOT, 1977). Parmi celles qui affleurent, nous pouvons reconnaître une tourbe, datant d'environ 6 000 ans B. P., qui se poursuit dans la série par des argiles litées d'estuaires, des sables humifères et des sables gris riches en matière organique datée de 2 160 ans B. P.

I.1.6 - Conclusion

La Canche est caractérisée par une grande variété de faciès sédimentaires qui s'ordonnent de manière grossièrement symétrique de part et d'autre du chenal sableux.

Les principaux faciès sédimentaires peuvent être représentés par une courbe granulométrique spécifique. La figure 21 en regroupe quelques-unes qui permettent de faire ressortir les grandes différences apparaissant dans la distribution des particules. C'est ainsi que les dépôts des dunes et ceux du chenal sont les plus grossiers avec un meilleur classement pour ces derniers. Puis viennent, un peu plus enrichis en sédiments fins, les interchenaux de la zone abritée par le banc du Pilori et le faciès de slikke. Enfin les sédiments du schorre sont mal classés et riches en fractions fines.

Figure 21: EXEMPLES DE COURBES GRANULOMETRIQUES



I.2 - FRACTION SABLEUSE

I.2.1 - Distribution d'ensemble

La figure 22 donne la distribution des teneurs en sable (fractions granulomé-

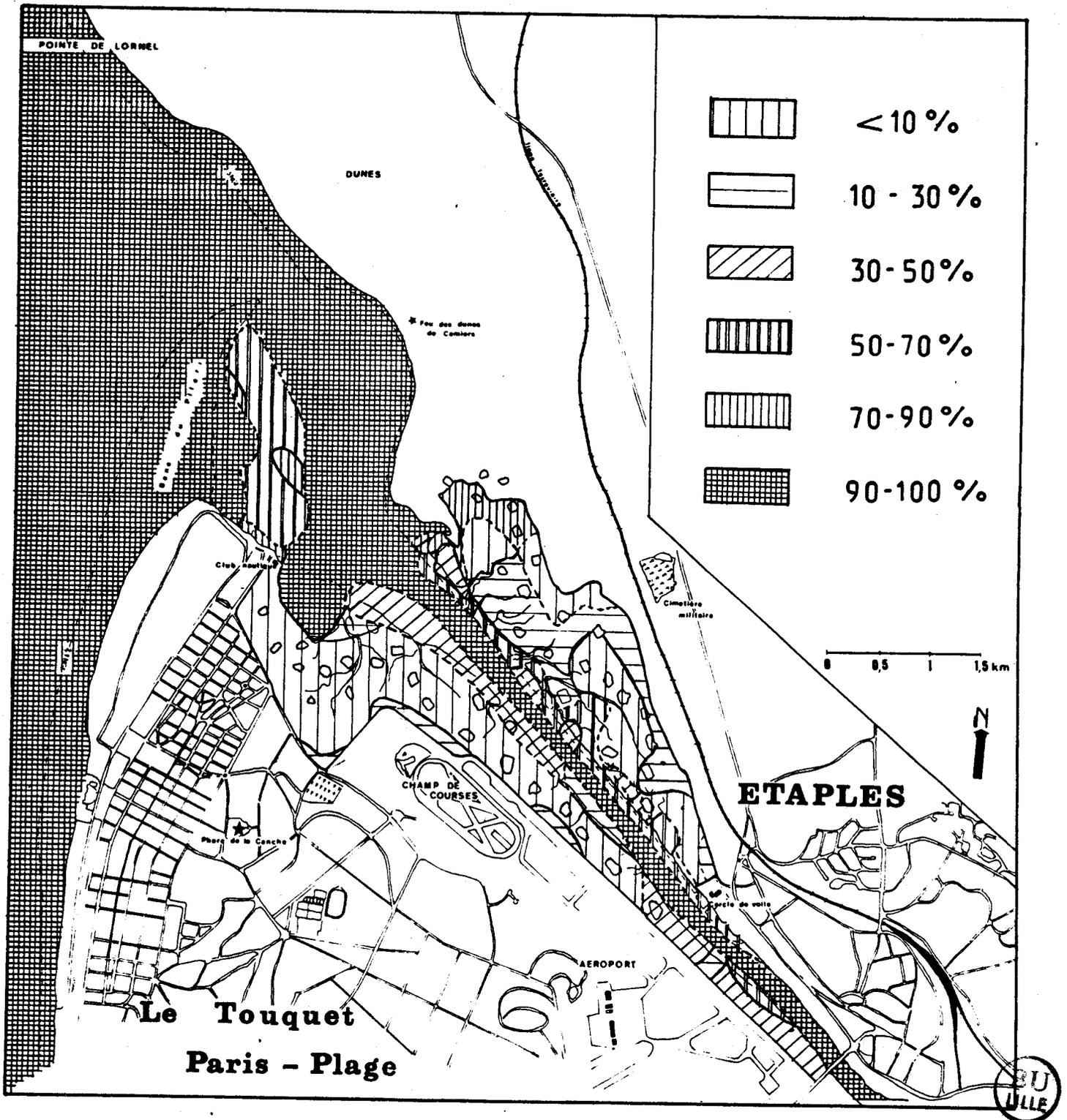


Figure 22: DISTRIBUTION DES PARTICULES SUPERIEURES A 63 μm

triques $> 63 \mu\text{m}$) et conduit à préciser la distribution des faciès précédemment décrits. Nous remarquons que des coupures nettes délimitent les zones sableuses (chenal, embouchure, dunes et estran), les zones plus enrichies en fraction fine qui regroupent les domaines de la slikke, du shore et du secteur abrité par le banc du Pilori. La partie de l'estuaire située en rive droite présente un ensablement plus prononcé qu'en rive gauche, tant sur les domaines de slikke que du schorre. Ceci témoigne de l'action prépondérante des vents d'ouest et de sud-ouest.

I.2.1 - Nature de la fraction sableuse

D'amont en aval, depuis Attin jusqu'à l'embouchure, 2 types de sables se différencient très nettement : l'un très hétérogène à l'amont contrastant avec un second plus homogène à l'aval.

A l'amont (Planche 2, photo 1), le sédiment est mal classé ($S_o = 2,4$) et présente un aspect terne et sale dû à des restes d'anciennes matrices sur un grand nombre de particules.

Ces sédiments contiennent de nombreux quartz émoussés ronds mats sales, des silex blancs (d'aspect calcédonien), des silex jaunes et brun-jaune, des débris de grès et des concrétions quartzeuses.

Ces quartz mats, sales, représentent essentiellement d'anciens quartz cimentés provenant de grès désagrégés. Les concrétions quartzeuses présentent une surface irrégulière bourgeonnante en choux-fleur.

On peut observer quelques pointements pyramidaux de quartz. Il pourrait s'agir de la silice néoformée d'origine pédologique, définie sous les termes de morille, de pringue ou de pierre morelle par CAILLEUX (1947).

La microfaune (§ I.2.5) regroupe des petits gastéropodes d'eau douce à saumâtre, ainsi que des lamellibranches de même milieu ; on y trouve des bryozoaires, des ostracodes d'eau douce et quelques foraminifères benthiques remaniés depuis les affleurements du Tertiaire.

A l'aval (Planche 2, photo 2), dès le secteur immédiatement en amont du pont du chemin de fer, se rencontrent les sables à caractère marin. Ces sédiments, malgré quelques particularités liées aux différents domaines de l'estuaire, se ressemblent. Le quartz est l'élément prépondérant, et peut dépasser des teneurs de 90 % (tableau 2).

La fraction la plus grossière des sables (400 à 800 μm) est composée d'éléments organogènes regroupant des débris coquilliers de mollusques et quelques foraminifères hérités du Tertiaire (nummulites). La fraction détritique minérale est constituée par du silex, des débris calcaires et des quartz. Au-dessous de la fraction granulométrique 160 μm , le sédiment devient plus quartzeux et les autres constituants minéraux (feldspath, mica, glauconie, minéraux lourds) sont peu abondants et de répartition assez uniforme.

Le quartz présente quelquefois une couleur jaune à jaune orangé (environ 10 %). Les sédiments renferment une grande variété d'éléments organogènes : spicules d'éponges, épines et plaques d'oursins, quelques bryozoaires, ostracodes et foraminifères. La part de ces éléments, peu importante dans les milieux énergétiques (chenal, estran, ...) augmente sur les domaines de slikke et de schorre.

I.2.3 - Morphoscopie des quartz

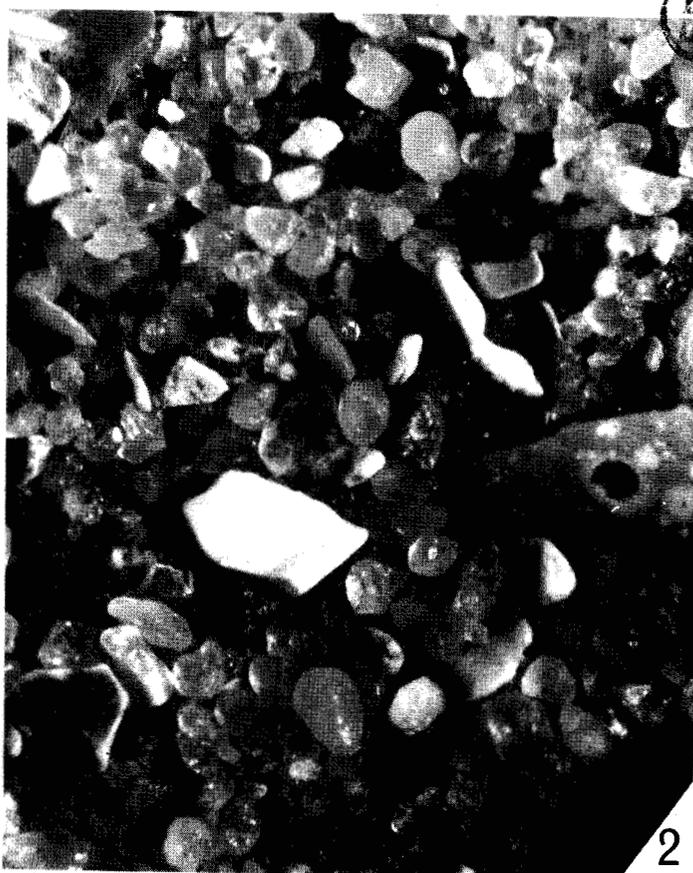
Les actions chimiques étant plus importantes en-dessous de 250 μm et les actions mécaniques au-dessus de 500 μm , les fractions granulométriques observées sont

PLANCHE 2



x15

1



x15

2

Echantillons:	% fract. minérale	% fract. organique	% quartz	% glauconie	% foraminif.	% ostracodes
Ste-Cécile	91	9	88	3	0,1	
123	95	5	90	2	0,2	--
110	72	28	52	5	3	0,7
103	76	24	59	5	2,4	1,3
90	98	2	91	4	--	--
85	94	6	74	8	0,2	0,1
78	95	5	90	4	--	--
69	67	33	52	3	6	3,3
67	52	48	49	2	8	4
52	93	7	87	3	0,4	0,4
47	53	47	36	--	8	6
45	94	6	92	0,7	0,1	--
35	88	12	81	5	--	0,6
17	70	30	55	2	4	0,6
11	44	56	34	1	14	4
4	90	10	84	4	0,2	0,2

Tableau 2 .- Répartition des constituants de la fraction sableuse.

comprises entre 250 µm et 500 µm. L'approche morphoscopique s'est effectuée de deux manières :

1) Les grains présentant une faible usure (grains anguleux et subanguleux) ont été distingués des grains caractérisés par une usure plus marquée (grains émoussés ovoïdes ou ronds).

2) Il a été tenu compte de l'aspect de surface (mat, luisant, piqueté) des diverses particules.

Dans le cours inférieur, depuis Attin jusqu'à l'embouchure, deux stocks morphoscopiques peuvent être observés :

- le premier à l'amont (Attin) est caractérisé par une grande proportion de quartz qui inclue une majorité de particules émoussées mates. Ces dernières sont picotées et sales et présentent à leur surface des traces de ciments.

- le deuxième cas dans l'estuaire et dans l'embouchure est marqué par un caractère homogène et défini par la prépondérance des émoussés luisants de façonnement marin.

Dans l'estuaire, les particules usées (émoussées, ovoïdes) présentent des proportions équivalentes à celles prévalant à l'amont. Les grains émoussés luisants montrent des proportions de 25 à 40 % variant de façon aléatoire tout au long de l'estuaire. Les particules de type émoussé mat présentent des pourcentages pouvant atteindre 30 % de la fraction granulométrique considérée, au contraire de la partie amont qui en présente environ 50 % (tableau 3). Les particules mates de l'embouchure

re sont picotées et témoignent d'une action éolienne marquée. Celles de l'amont présentent également un caractère mat accompagné d'un aspect sale sur la majorité d'entre elles.

La présence plus ou moins importante des émoussés mats (E. M.), picotés dans l'estuaire, d'aspect sale à l'amont, permet de différencier deux origines quant à l'apport de ces sables dans l'estuaire, l'un à l'amont provient certainement du remaniement de sables tertiaires du continent, et le second à l'aval dépend d'un apport marin indéniable vers l'intérieur des terres.

Echantillons	: % : émoussés : luisants	: % : émoussés : mats	: Σ : émoussés	: % : anguleux : + subanguleux
140	: 19	: 24	: 43	: 5
123	: 18	: 29	: 37	: 4
110	: 41	: 25	: 66	: 2
103	: 42	: 1	: 43	: 8
85	: 52	: -	: 52	: 3
67	: 7	: 22	: 29	: 4
90	: 14	: -	: 14	: 5
78	: 18	: 31	: 49	: 2
69	: 23	: 16	: 39	: 2
52	: 27	: 10	: 37	: 7
45	: 20	: 20	: 40	: 3
47	: 7	: 21	: 28	: 7
35	: 19	: 23	: 42	: 2
11	: 25	: 20	: 45	: 5
17	: 7	: 11	: 18	: 4
4	: 34	: 20	: 54	: 6
Ste-Cécile	: 11	: 16	: 27	: 5
Haudique	: 26	: 54	: 80	: 7
Attin.	: 20	: 57	: 77	: 1

Tableau 3 .- Distribution morphoscopique des quartz appartenant à la fraction granulométrique 250-600 μm.

I.2.4 - Etude des minéraux lourds

Une étude minéralogique des sables a été effectuée en 1953 par PUGH. L'échantillonnage a porté sur une radiale partant de l'horloge du Touquet et se poursuivant sur l'estran. Un deuxième échantillonnage a été effectué sur l'ancien cordon de Bel Air. Cette étude montre l'équivalence du cortège existant avec celui du groupe "Hollande" défini par BAAK (1936).

Nous avons effectué quelques analyses de minéraux lourds tout au long de l'estuaire, afin de rechercher d'éventuelles variations minéralogiques d'amont en aval, et de les comparer aux données de PUGH (1953). Les échantillons récoltés regroupent les stations d'Attin, n° 1, n° 113 et n° 142. Ces sables ont été traités selon la méthode décrite en Annexe I. Ils ont été déterminés une première fois sous la loupe binoculaire à l'aide d'un ouvrage du BRGM (DEVISME, 1978) et une deuxième fois sur lame avec P. CASTAING (Université de Bordeaux I).

Le cortège moyen pour tous les échantillons que nous avons trouvés (figure 23) est caractérisé par :

- | | | | |
|--------------|------|---------------|------|
| - grenat | 30 % | - zircon | 20 % |
| - tourmaline | 15 % | - staurotide | 10 % |
| - pyroxène | 10 % | - andalousite | 5 % |
| - disthène | 5 % | - amphibole | 5 % |

Les deux approches sur les minéraux lourds de la Canche conduisent à des résultats passablement différents (figure 23). PUGH trouve 4 minéraux dominants dans les cortèges : grenat, épidote, amphibole, tourmaline.

Avec P. CASTAING, nous remarquons que le cortège minéralogique est dominé par trois espèces minérales : grenat, zircon, tourmaline. La staurotide et le pyroxène de type augite sont fréquents.

Les résultats concordent avec les minéraux suivants : grenat, tourmaline ; ils sont en désaccord avec les suivants : zircon, disthène, andalousite, pyroxène, staurotide, amphibole et particulièrement avec l'épidote.

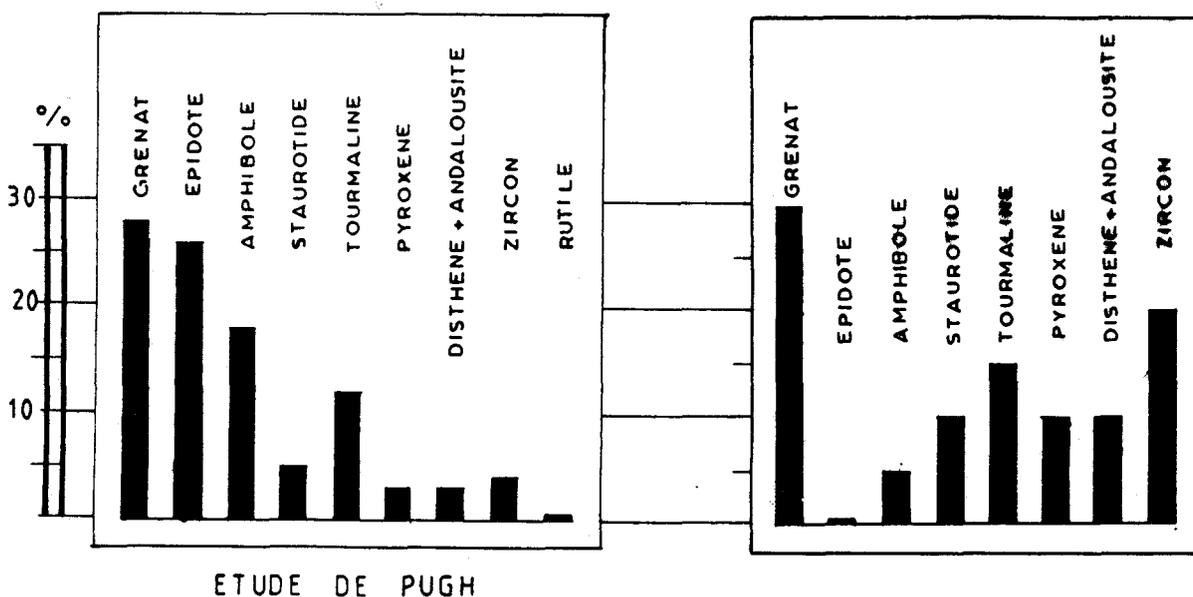


Figure 23 : MINERAUX LOURDS

Les derniers résultats montrent que les proportions de zircon ont fortement augmenté et, à un degré moindre, celles de la staurotide, du disthène, de l'andalousite et du pyroxène. Par contre, l'amphibole occupe une place moins importante dans le cortège et l'épidote a pratiquement disparu. Celle-ci devait être certainement très altérée. Pourtant, il en a été trouvé de très fraîches en Manche occidentale (AUFFRET, LARSONNEUR, 1975). Nous ne pouvons que constater ce désaccord. En ce qui concerne notre association, les minéraux sont usés, roulés, et rappellent, pour ceux d'Attin, les sables éoliens (communication de P. CASTAING). Il s'agit d'un cortège ancien attesté par le grand nombre de minéraux résistants : grenat, zircon, tourmaline.

De par l'importance du zircon et de la tourmaline associés aux minéraux de métamorphisme (staurotide, disthène, andalousite), cet assemblage présente quelques analogies avec le cortège cauchois très riche en minéraux de ce type (BILLY, 1964). En amont, le cortège est équivalent et ne peut être contaminé par les apports marins. Une étude plus détaillée du bassin de la Canche permettrait de comprendre la distri-

bution amont-aval, ainsi que la répartition latérale des différents minéraux lourds dans l'estuaire. Une différenciation des dépôts et des apports pourrait être mise en évidence et faciliterait une meilleure compréhension des variations existant dans les cortèges.

PUGH, par un échantillonnage à différentes époques de l'année déduisit une dynamique sédimentaire. Bien qu'il n'ait pas fait ses prélèvements le long de l'estuaire, mais sur l'estran en face du Touquet, il remarque un transfert littoral maximum partant vers le Nord en été, tandis qu'en hiver, sous l'influence des tempêtes, il y a un transfert maximum vers l'intérieur et minimum vers le Nord.

En résumé, l'approche minéralogique préliminaire que nous avons effectuée demanderait à être approfondie par un échantillonnage en différentes périodes de l'année le long de l'estuaire et du littoral. Ceci permettrait de constater les variations qui peuvent s'opérer en cette partie du littoral et de déterminer les différentes sources d'approvisionnement.

I.2.5 - Etude de la faune

I.2.5.1 - Macrofaune

Elle comprend essentiellement des mollusques et plus particulièrement des gastéropodes. Dans l'estuaire, les hydrobies se trouvent dans les milieux saumâtres, dans les sédiments de schorre et aux limites de ce domaine avec la slikke. Comme lamellibranches, on peut rencontrer des coques (*Cardium edule*), des *Scrobicularia* et quelques petites tellines (*Macoma balthica*).

A l'amont, vers Haudique, la couverture sédimentaire renferme une quantité assez importante de coquilles de *Cardium edule* et de *Scrobicularia* formant un pavage de valves mêlées.

Plus en amont, à Attin, cette faune semble plus variée et diversifiée et contient une faune d'eau douce. L'association présentée dans le tableau 4 a été déterminée par J.-M. DEWARUMEZ (Station marine de Wimereux).

I.2.5.2 - Foraminifères (MOULINIER, 1967 ; DUPEUPLE *et al.*, 1972)

Les foraminifères benthiques ne constituent qu'une faible partie des sédiments (environ 3 % en moyenne). Leur abondance diminue avec le milieu énergétique (chenal, estran, ...) (tableau 2). Ils ont été déterminés par M. ROSSET-MOULINIER et les listes de résultats figurent en annexe 2. On ne retrouve pas de foraminifères planctoniques en Manche durant le Quaternaire (communication orale de Madame ROSSET-MOULINIER). Les trop grandes variations de température en seraient la cause, ainsi que les conditions physico-chimiques différentes de celles des eaux atlantiques.

Les sédiments recueillis à Attin contiennent principalement des foraminifères de la famille des Lagénidae appartenant au genre des lenticulines qui ne peuvent servir de marqueur stratigraphique.

De par son aspect sale (sa surface présentant des traces de ciment), ce foraminifère semble être remanié et repris dans les sédiments actuels.

Vers Etaples, on trouve comme espèces typiques d'estran et de schorre : *Elphidium articulatum*, *Protelphidium germanicum* et *Elphidium günteri*. Ces espèces sont accompagnées d'espèces marines dont les plus connues sont *Ammonia beccarii*, *Elphidium excavatum*, *Cribononion gerthi* et *Cibicides probatulus*. En progressant vers l'aval, on retrouve ces espèces de façon plus fréquente et accompagnées de *Quinqueloculina dunkerquiana*, *Fissurina lucida*.

Ces faunes infralittorales montrent clairement que les apports dans

Faune marine	Faune saumâtre	Faune d'eau douce	%
fam. <i>Amphictenidae</i>			
fragment du tube de			1,2
<i>Pectinaria Koreni</i>			
fam. <i>Cardiidae</i>			1,2
fam. <i>Fissurellidae</i>			1,2
<i>Emarginula</i> sp.			
opercules de Gastéropodes			11,0
	fam. <i>Hydrobiidae</i>		33,3
	<i>Hydrobia ulvae</i>		
		tubes de phryganes	2,5
		fam. <i>Cochlicopidae</i>	2,5
		<i>Cochlicopa (lubrica) ?</i>	
		fam. <i>Endodontidae</i>	3,7
		<i>discus rodundatus</i>	
		fam. <i>Pisidae-Pisa</i> spp.	14,8
		<i>Planorbis</i>	1,2
		fam. <i>Succineidae</i>	3,7
		<i>Succina patris</i>	
		fam. <i>Valvatidae</i>	19,8
		<i>Valvata</i>	
		fam. <i>Zenitidae</i>	3,7
		<i>Orychilus draparnaudi</i>	

Tableau 4 .- : Composition de la macrofaune à Attin.

l'estuaire proviennent essentiellement du milieu marin et ceci sur une distance d'environ 10 km. Ce fait est corroboré par l'existence de foraminifères remaniés de l'Eocène dont on retrouve les formations au large, dans lesquelles les formes suivantes prédominent : *Nummulites variolarius*, *Asterigerina*, *Elphidium laeve*, *Discorbis*. En effet, cette faune du Tertiaire ne se rencontre pas à l'amont, aux stations d'Attin et d'Haudique et ne peut donc provenir de l'Eocène continental. Des *Globotruncana* du Crétacé supérieur accompagnent les formes remaniées du Tertiaire.

A l'embouchure et dans les fractions granulométriques plus grossières (de l'ordre de 400 µm), on trouve des *Nummulites* éocènes examinées par A. BLONDEAU (Université Pierre et Marie Curie, Paris). Pour les stations 107, 121, 140, elles sont en général très usées, bien que fortement calcifiées, voire silicifiées. On rencontre très fréquemment *Nummulites laevigatus* (A et B) qui marquent le Lutétien inférieur. Un seul spécimen de *Nummulites planulatus* (B) juvénile a été trouvé, et cette espèce provient du Cuisien (Yprésien supérieur) du Nord de la France et de la Belgique. Les termes A et B correspondent au dimorphisme sexuel. La forme A est macrosphérique et la forme B microsphérique.

En résumé, les foraminifères actuels identifiés dans l'estuaire de la Canche comprennent essentiellement des espèces marines infralittorales ; les associations faunistiques sont dominées par *Ammonia beccarii* et *Elphidium excavatum*. A ces associations littorales et infralittorales, se mélangent localement quelques espèces peu abondantes de schorre, caractérisées par *Elphidium articulatum* et *Pro-*

telphidium germanicum.

Ceci conduit à montrer l'importance des apports sableux issus du milieu marin, apports corroborés par l'existence de foraminifères remaniés des formations de l'Eocène supérieur que l'on retrouve au large.

Les foraminifères du Crétacé supérieur ne peuvent être significatifs, les terrains de cet âge se retrouvant dans toute la région.

I.2.5.3 - Bryozoaires (détermination par M. LABRACHERIE, Université de Bordeaux I)

Ce sont des invertébrés coloniaux hermaphrodites qui vivent fixés. La colonie s'appelle le zoarium et chaque individu, le polypide, est logé dans une petite boîte : la zoécie. Les bryozoaires sont ubiquistes, mais peu abondants dans les échantillons. Les formes rencontrées appartiennent à deux groupes:

- classe des stenolaematae, ordre des cyclostomes;
- classe des gymnolaematae, ordre des cheilostomes.

Les zoécies des cyclostomes sont tubulaires et présentent sur le test une ouverture arrondie. Celles des cheilostomes sont de forme parallélépipédique. A Attin, l'association spécifique de cette faune marine conservée présente une certaine homogénéité. L'association est caractérisée par la prépondérance des cyclostomes, et des formes *Vincularia*, issues du Crétacé. A l'aval, les bryozoaires comprennent une très grande quantité de cyclostomes, très abîmés et usés, associés à des cheilostomes dont le bon état de conservation indique un apport différent. Les cheilostomes sont caractérisés par les genres *Cellaria*, *Heterocella* et *Nellia*.

Les articles de Cellariidés (*Cellaria*) pourraient provenir de la plateforme externe située dans la partie la plus profonde de la Manche occidentale. En effet, les dépôts de sables graveleux organogènes sont marqués par la présence de bryozoaires et notamment par les Cellariidés (BOILLOT, 1964 ; AUFFRET *et al.*, 1975).

BOILLOT (figure 24) remarque deux gradients dans la distribution des *Cellaria* :

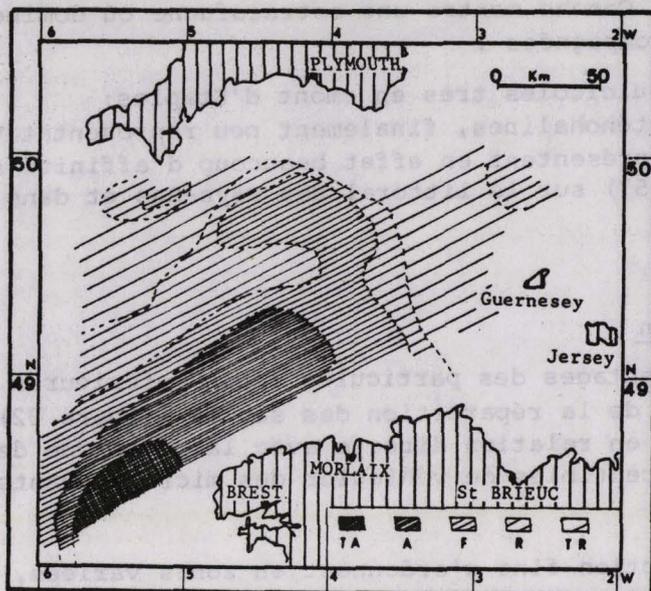
- le premier lié à l'influence Atlantique ;
- le deuxième dans le sens SE-NW.

Il pense qu'il pourrait exister un transport des articles de *Cellaria*, mais qu'il ne peut se faire à l'échelle de la Manche. Pour lui, le transport ne peut durer très longtemps sans que le grain transporté soit détruit.

I.2.5.4 - Ostracodes (détermination par T. HOIBIAN, Université de Bordeaux I)

Environ quarante huit espèces subactuelles ont été identifiées à partir d'une vingtaine d'échantillons répartis en aval, le long de l'estuaire (Annexe III). Les espèces actuelles se répartissent en différents groupes fauniques. C'est ainsi que l'on distingue :

- un ensemble d'espèces d'eau douce à oligohaline (0,2 à 5 %) ;
- un ensemble d'espèces d'environnement euryhalin (5 à 30 %) et marin.



TA : très abondant
A : abondant
F : fréquent
R : rare
TR : très rare

modifié d'après
BOILLOT (1964)

Figure 24: REPARTITION DES ARTICLES DE
CELLARIA DANS LES SEDIMENTS DE LA
MANCHE OCCIDENTALE

Dans la première zone: les espèces dulcicoles constituent la totalité des formes présentes dans les échantillons d'Attin (tableau 5). Dans la zone estuarienne amont les influences marines sont claires (entre Enocq et Ech. 25). Ces espèces sont encore assez bien représentées jusque dans l'échantillon 25 et disparaissent presque totalement dans les suivants. Leur présence plus sporadique en aval d'Etaples est probablement liée à un transport par les courants de jusant. Elles sont associées à des espèces euryhalines et marines qui soulignent l'alternance des régimes dulcicoles et saumâtres.

Dans la seconde zone: les espèces d'environnement euryhalin et marin peu profond, représentent la majorité des formes déterminées et peuvent être séparées en deux groupes:

- un groupe ubiquiste dont les espèces sont présentes dans plus de 60 % à 70 % des échantillons ;
- un groupe d'espèces qui semblent se répartir suivant une polarité amont aval, en fonction de leur aptitude à supporter la dessalure. Toutefois, l'examen des données bibliographiques concernant l'écologie de ces espèces (WAGNER, 1957, YASSINI, 1969, CARBONEL, 1973 et 1980) fait apparaître qu'une grande partie d'entre elles est associée à des biotopes phytaux et périphytaux, le plus souvent euryhalins et marins. Leur présence dans l'estuaire pourrait s'expliquer :
 - soit par transport de ces faunes, libres ou fixées sur des masses algaires venant s'échouer dans l'estuaire ;
 - soit par leur développement sur du matériel végétal issu du milieu côtier, ou des schorres avoisinants.

Le caractère euryhalin de l'ensemble des espèces citées plaide en faveur de la deuxième hypothèse. Une observation plus détaillée du milieu pourrait certainement aider à trancher cette question.

En résumé, la Canche montre une ostracofaune où dominent les espèces à caractère euryhalin accompagnées :

- d'espèces dulcicoles très en amont d'Etaples;
- d'espèces sténohalines, finalement peu représentatives sur un plan biogéographique. Elles présentent en effet beaucoup d'affinité avec celles trouvées par WAGNER (1957) sur le littoral des Pays-Bas et dans la zone des polders.

I.3 - FRACTION FINE

I.3.1 - Répartition

La carte des pourcentages des particules fines inférieures à 63 μm (figure 25) constitue le complément de la répartition des sables (figure 22). La répartition de la fraction fine est en relation directe avec la dynamique des particules en suspension qui sont susceptibles de véhiculer des micropolluants métalliques, organiques...

Ces teneurs en fraction fine s'ordonnent en zones variées, dont les coupures nettes séparent les domaines sableux (chenal, embouchure, estran) des domaines plus envasés :

- la zone à l'abri du banc du Pilori dont les proportions en fraction fine varient de 30 à 50 % du sédiment ;
- la slikke dont les teneurs fluctuent de 30 à 70 % ;
- le schorre avec des proportions de 70 à 90 %.

Nous remarquons qu'en rive gauche, le schorre et la slikke présentent un envasement plus prononcé que leurs homologues de rive droite. Cette intégration plus importante de particules inférieures à 63 μm est due à l'abri relatif des vents dominants du Sud-Ouest et d'Ouest. Ces derniers agissent sur les dunes et favorisent une migration des sables sur la partie droite de l'estuaire.

I.3.2 - Distribution des minéraux argileux

Les minéraux argileux ont été étudiés sur 41 échantillons répartis sur l'ensemble du domaine estuarien. Les échantillons analysés sont répertoriés dans le tableau en annexe IV et correspondent à des prélèvements pratiqués en période estivale. Le procédé utilisé pour la détermination a été décrit dans la partie méthodologique située en annexe I. Dans l'ensemble de l'estuaire, les minéraux reconnus dans la fraction inférieure à 2 μm sont la chlorite, l'illite, la vermiculite, la smectite, la kaolinite et les interstratifiés irréguliers : illite-smectite (10-14s), illite-vermiculite (10-14v), chlorite-smectite (14c-14s), chlorite-vermiculite (14c-14v) (figure 26).

Le cortège argileux des sédiments actuels est caractérisé par la relative importance de l'illite, de la smectite et des interstratifiés irréguliers (environ 25 % chacun). Les proportions de la kaolinite sont constantes, avec des teneurs d'environ 15 %. Les espèces les moins abondantes sont la vermiculite, parfois présente sous forme de traces, et la chlorite toujours présente (environ 5 %). La vermiculite pourrait être un produit de l'altération des chlorites (CAILLERE *et al.*, 1982). Lors de son travail sur les deux bassins versants de la Slack et de l'Aa, CALATAYUD (1981) ne l'a retrouvée que dans les argiles bleues du Callovo-Oxfordien; pour lui sa présence serait due à une altération récente.

L'abondance relative de la smectite par rapport à l'illite a été mesurée par le rapport des hauteurs des pics à 18 et 10 Å, sur les diagrammes de diffraction X des échantillons traités à l'éthylène-glycol. Les classes suivantes ont été définies : 0,4-0,6 ; 0,6-0,8 ; 0,8-1 (figure 27).

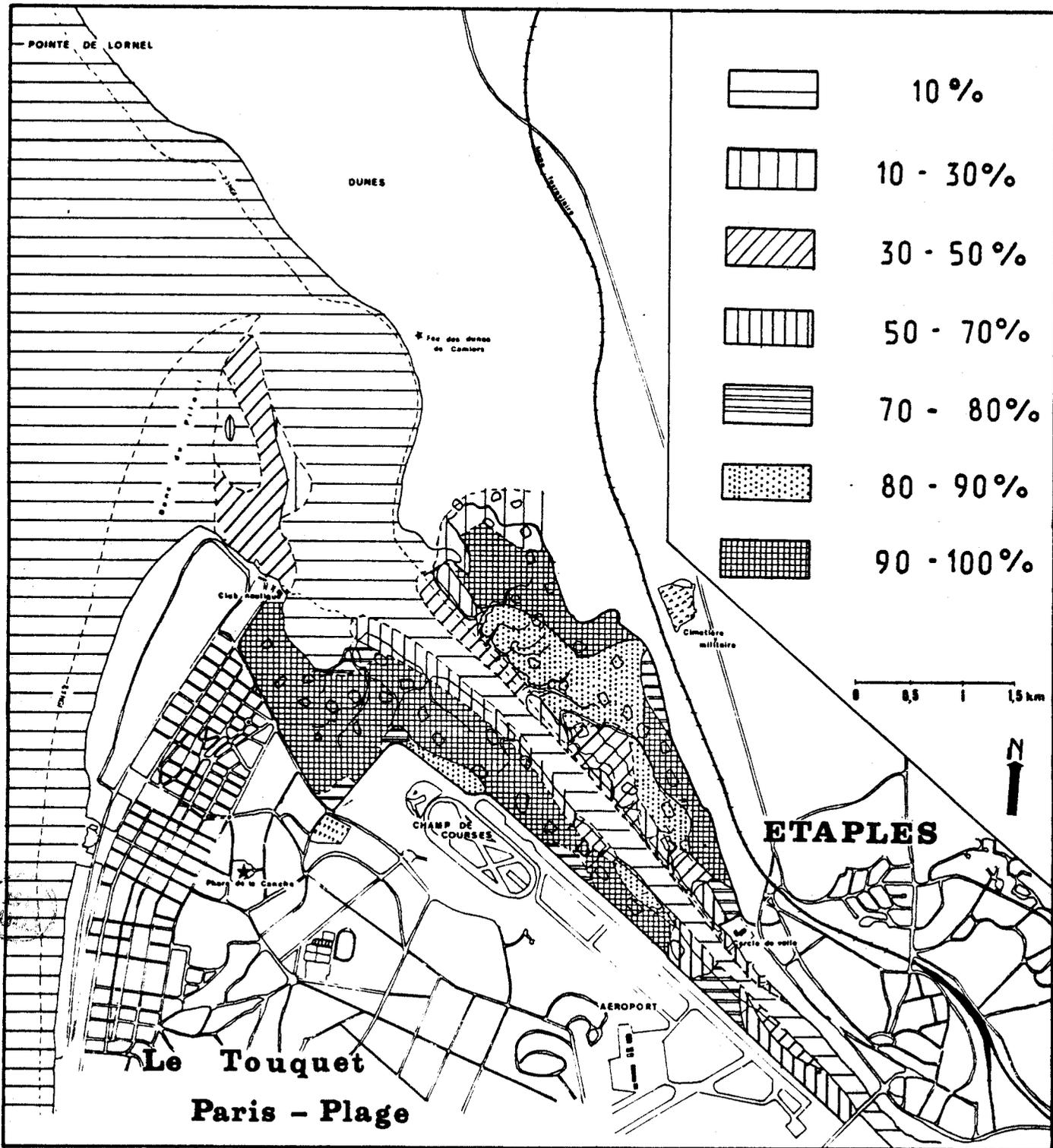


Figure 25: DISTRIBUTION DES PARTICULES INFÉRIEURES A 63 μ m

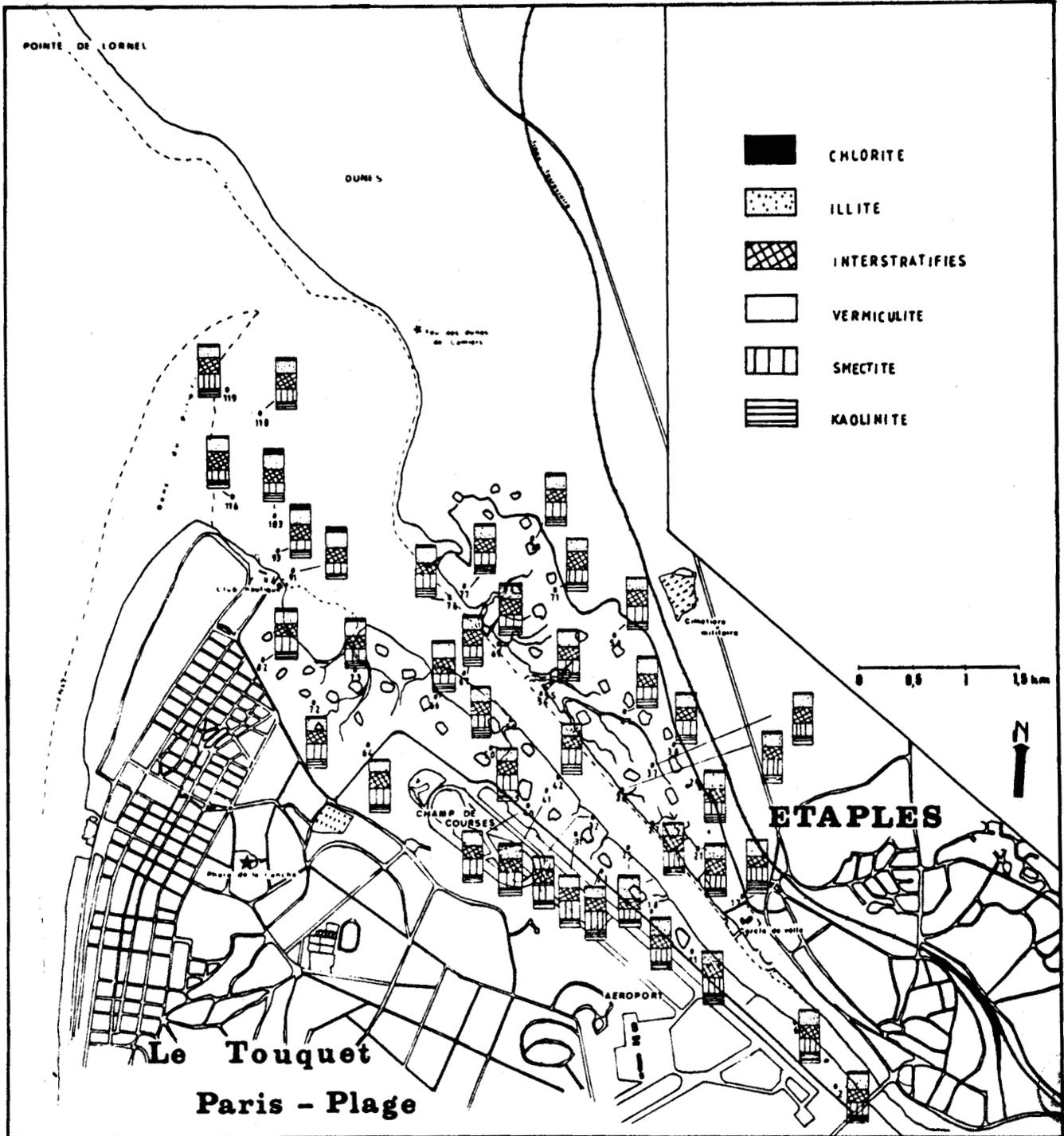


Figure 26 : DISTRIBUTION DES MINERAUX ARGILEUX

La classe 0,4-0,6 correspond aux sédiments les moins riches en smectite. Ils se répartissent en bordure du chenal, là où existe un hydrodynamisme plus marqué, et notamment en rive droite. On retrouve ces faibles teneurs dans la zone à l'abri du banc du Piloni. Elles traduisent dans ce cas une dégradation du minéral dans un milieu organique acide.

La classe 0,6-0,8 correspond aux sédiments de la partie amont de l'estuaire et de la plus grande partie des zones externes du schorre. Il s'agit de zones d'agitation moyenne, où les smectites sont moins vannées que dans le cas précédent.

La classe 0,8-1 correspond à des sédiments qui sont localisés en aval dans la zone proche du massif dunaire, et en rive gauche à proximité de la ville du Touquet. Il s'agit de secteurs à l'abri des dunes du Touquet et du pli de Camiers, où s'effectue une décantation privilégiée des particules fines à haut pouvoir de flottaison et à portance élevée.

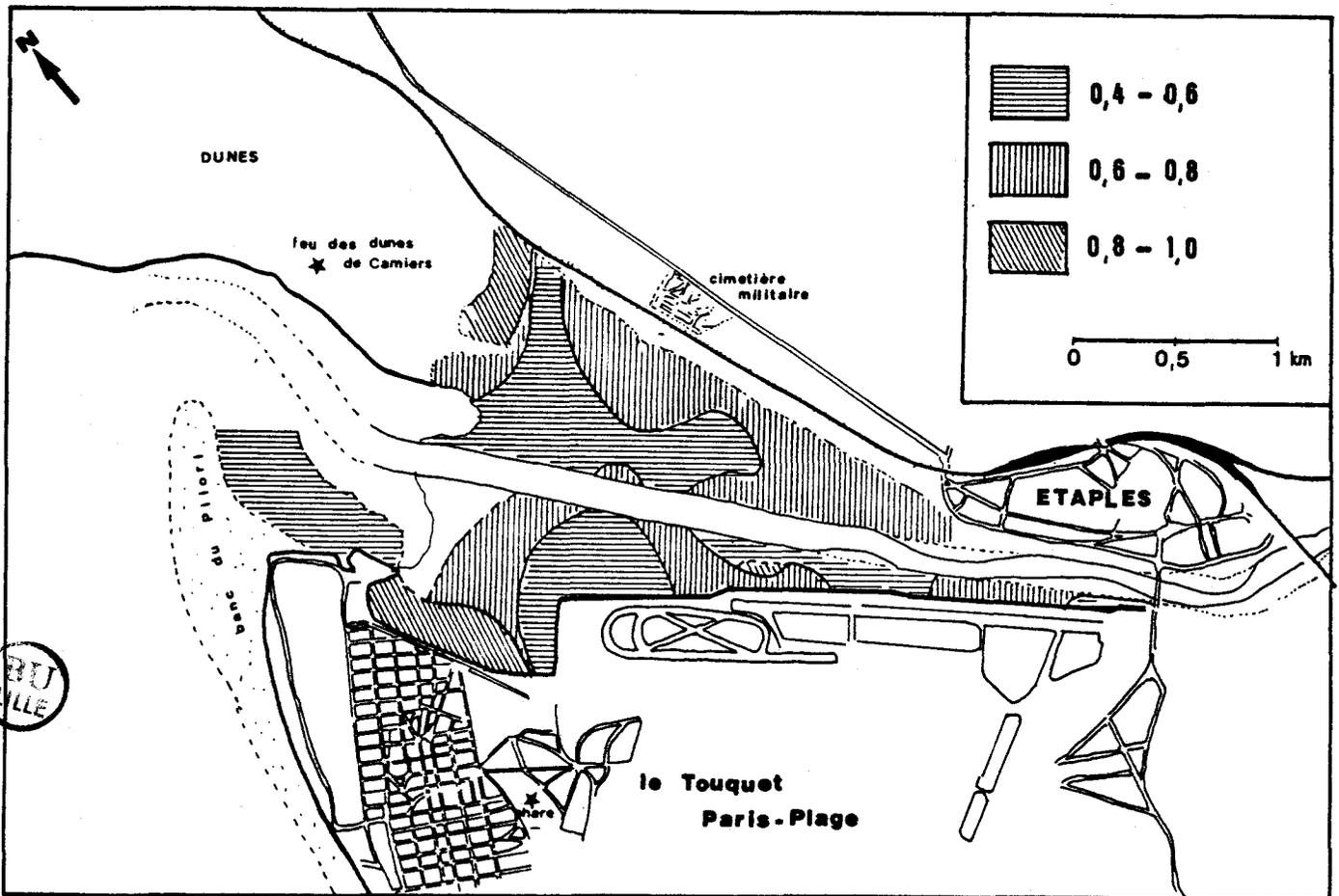


Figure 27: CANCHE, RAPPORTE SMECTITE / ILLITE

En résumé, l'estuaire est caractérisé par une distribution médiocrement ordonnée des minéraux argileux. La distribution fine des minéraux paraît correspondre d'une part à des variations de l'hydrodynamisme moyen, la smectite augmentant vers les zones protégées, d'autre part à des dégradations sélectives en milieu réducteur.

I.4 - CARACTERISTIQUES DES SEDIMENTS

I.4.1 - Mode (figure 28)

Les modes inférieurs à $63 \mu\text{m}$ caractérisent le schorre, des deux côtés de

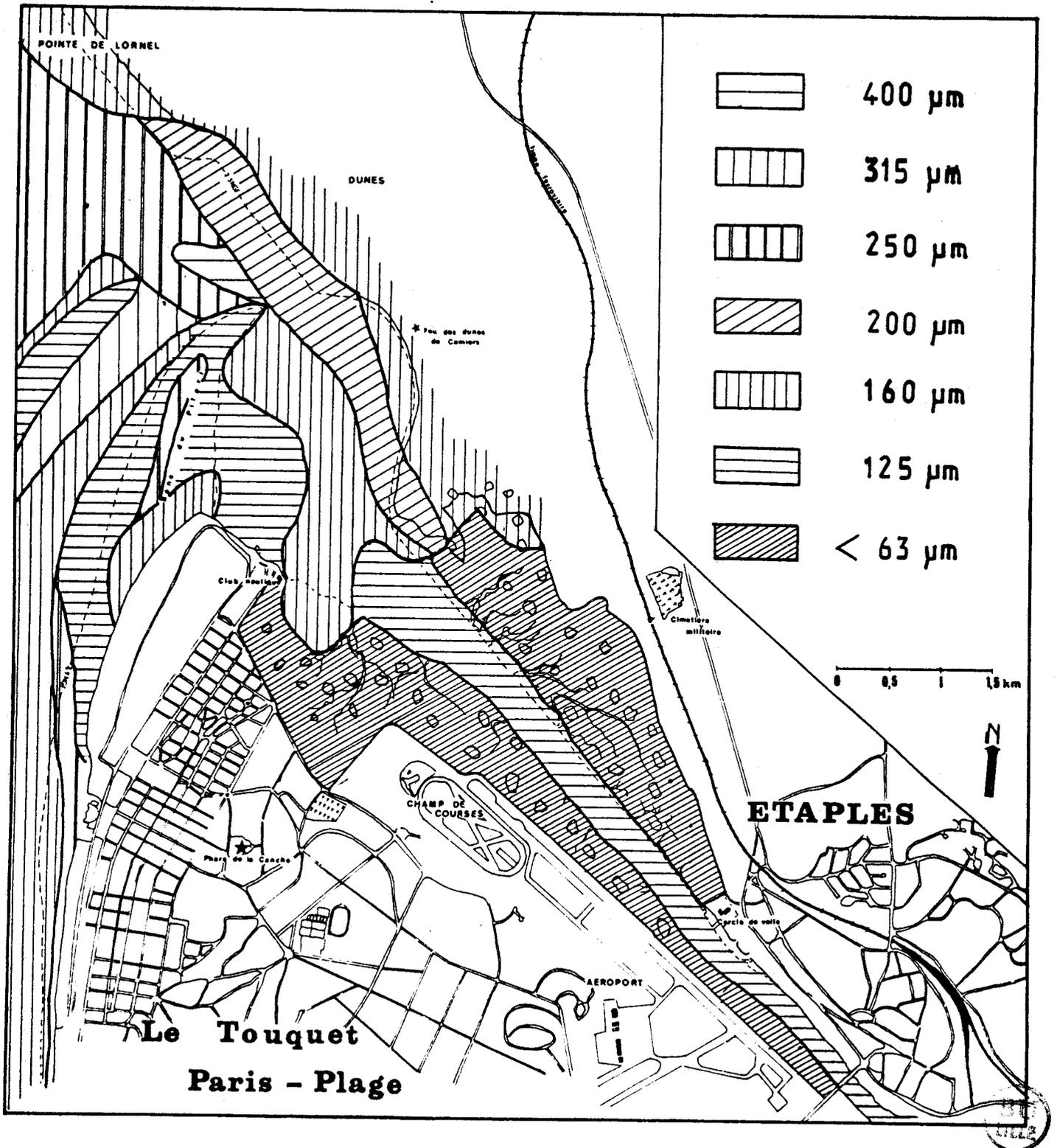


Figure 28 : DISTRIBUTION DES MODES

l'estuaire, et lui confèrent une unité granulométrique qui n'apparaissait pas dans les teneurs en sable et fraction fine. Le mode 160 μm est présent dans tout l'estuaire ; il se rencontre en mode principal ou secondaire. Le chenal comprend un sédiment bimodal à mode principal de 125 μm et accessoire de 160 μm . A l'aval les modes sont en moyenne plus élevés et traduisent des actions hydrodynamiques plus intenses.

Le mode de 400 μm est localisé à la pointe externe du banc du Pilori. Ces sédiments sont très coquilliers et les éléments calcaires sont très importants dans les fractions grossières.

Le mode de 315 μm n'est représenté qu'à l'embouchure où il dessine une bande de sable d'orientation SW-NE qui rejoint la pointe externe du banc du Pilori.

Le mode de 250 μm caractérise la partie nord-ouest de l'embouchure à proximité de la pointe de Lornel. Il dessine une crête sur la partie sommitale du banc du Pilori, ainsi qu'un liseré sur le haut estran de la plage du Touquet.

Le mode de 200 μm se développe sur la bordure nord de l'estuaire, à l'intérieur duquel il pénètre partiellement.

I.4.2 - Grain moyen (figure 29)

Le grain moyen, calculé sur l'ensemble du sédiment, est une expression simple et synthétique de la distribution granulométrique des sédiments. Il définit la présence de quatre zones principales et de trois zones accessoires.

Zones principales :

- le schorre caractérisé par un grain moyen inférieur à 125 μm ($>$ à 4 ψ).
- le chenal caractérisé par un grain moyen de 125 à 175 μm (2,5 à 3 ψ).
- le banc du Pilori, la frange littorale du Lornel et au large de l'embouchure, caractérisé par un grain moyen de 175 à 250 μm (2 à 2,5 ψ).
- le Nord et le Sud de l'embouchure caractérisés par un grain moyen de 250 à 350 μm (1,5 à 2 ψ).

Zones accessoires, elles regroupent :

- la zone abritée par le banc du Pilori.
- une petite zone située sur la pointe extrême du banc du Pilori avec un grain moyen supérieur à 700 μm ($<$ 0,5 ψ).
- une zone à grain moyen de 350 à 500 μm (1 à 1,5 ψ), qui se localise dans l'embouchure interne, à proximité du goulet, entre deux bandes sableuses de grain moyen de 175 à 250 μm (2 à 2,5 ψ). Elle présente un vannage plus important de ses éléments par l'action des houles et des courants alternatifs de flot et de jusant.

En résumé, la distribution du grain moyen et du mode permet de déceler de nets gradients granulométriques corroborant la signification des autres données granulométriques. Ils traduisent les grandes variations hydrodynamiques dans l'estuaire.

I.4.3 - Carbonates de calcium

Les teneurs en carbonates de calcium (figure 30) permettent de préciser la distribution des zones sédimentaires précédemment décrites.

Les sédiments renfermant moins de 10 % de carbonates de calcium regroupent les sables d'estran, du chenal et de son prolongement en bordure du littoral nord de la baie de la Canche.

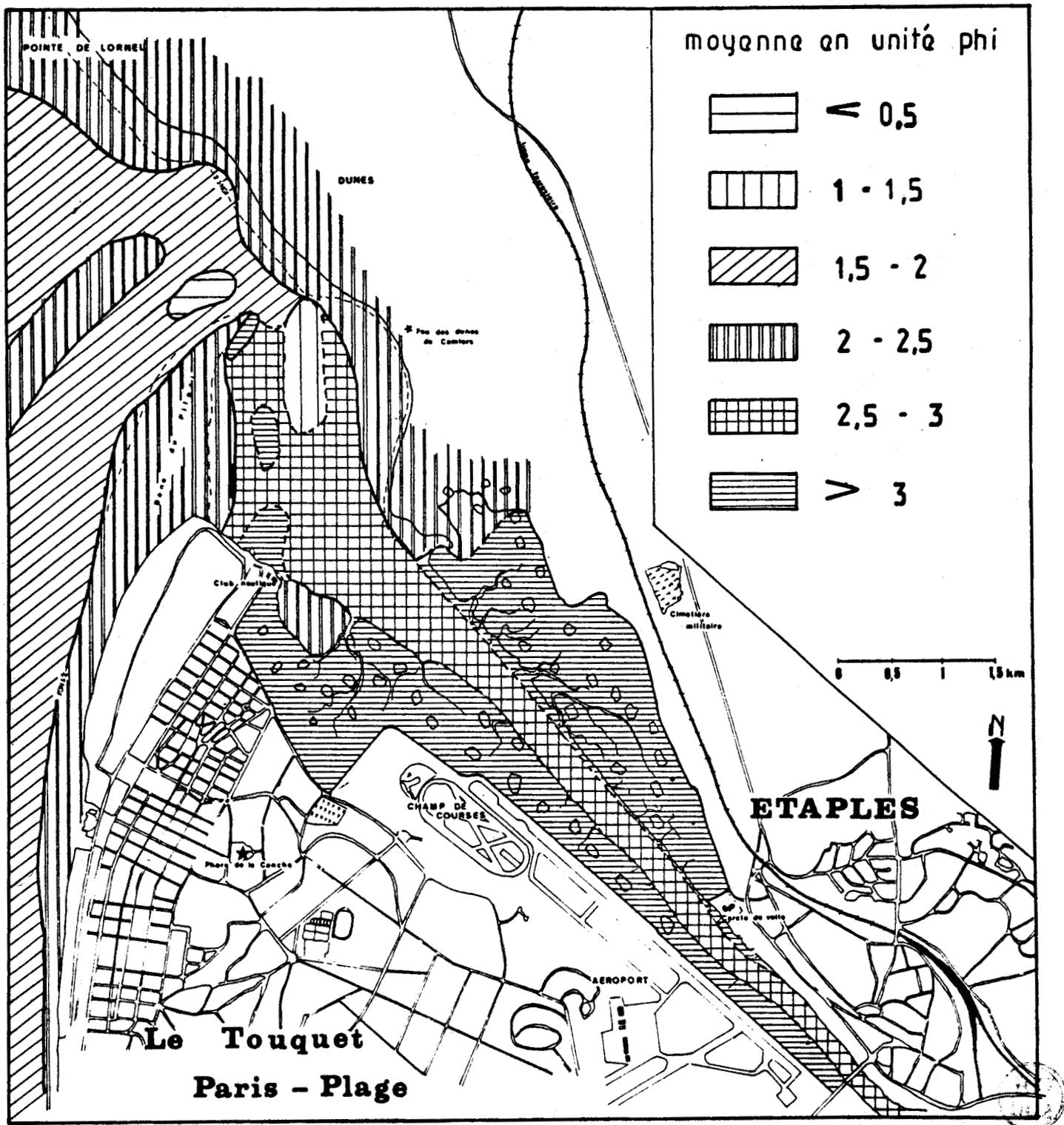


Figure 29 : DISTRIBUTION DU GRAIN MOYEN

Les teneurs de 10 à 15 % se trouvent sur la plus grande partie de l'embouchure externe et l'estran de la ville du Touquet.

Les teneurs de 15 à 20 % concernent des dépôts peu importants qui se rencontrent sur la rive droite du chenal, du cercle de voile d'Etaples à la partie médiane de l'estuaire. On les trouve également dans la zone abritée par le banc du Pilori, et localement dans l'embouchure externe.

Les pourcentages de calcaire variant de 20 à 30 %, délimitent le faciès slikke de la rive droite, depuis la partie médiane jusqu'à sa partie aval, à la limite des sables de la plage du Lornel. Ils caractérisent également une zone se situant à la pointe nord du banc du Pilori, ainsi que le domaine abrité par celui-ci.

Les teneurs de 30 à 35 % sont limitées à la rive droite de l'estuaire. Elles caractérisent des sédiments qui bordent la slikke d'amont en aval, et soulignent un réseau de chenaux adjacents au lit principal.

Les teneurs de 35 à 40 % délimitent des zones restreintes et éparses dans l'estuaire :

- sur la rive gauche, à proximité du "royon", au niveau de la slikke, localement sur le Pilori, et face au port d'Etaples ;
- sur la rive droite, en amont de l'estuaire, tout au long du schorre, dans sa partie médiane en bordure externe, et dans le prolongement de la slikke.

Les teneurs les plus élevées en calcaire (40 à 50 %) se trouvent sur le schorre. Le calcaire y est d'origine biologique, et correspond principalement à des débris fins de tests d'animaux.

En résumé, parallèlement à un enrichissement en particules inférieures à 63 μm , le pourcentage de calcaire devient plus important. La slikke de la rive gauche (30 à 35 % de sable), moins sableuse que celle de la rive droite (50 à 70 % de sable), est plus carbonatée. Les sédiments sableux ne renferment que localement de fortes proportions de débris coquilliers (zone abritée par le banc du Pilori).

I.4.4 - Carbone organique (figure 31)

Les teneurs inférieures à 0,5 % sont très fréquentes et correspondent au chenal, au goulet, à l'embouchure et à l'estran.

Les teneurs comprises entre 0,5 et 1 % se rencontrent à proximité du port d'Etaples et dans la slikke aval des deux rives. Des teneurs comparables existent localement dans la zone protégée par le banc du Pilori.

Les teneurs de 1 à 2 % sont caractéristiques de la plus grande partie du schorre et d'un liseré en bordure du club nautique du Touquet.

Les teneurs de 2 à 3 % concernent des dépôts localisés sur la rive droite en amont et sur la bordure aval près du massif dunaire, ainsi que dans les parties médiane et externe du schorre, et sur la rive gauche, à l'aval du champ de courses et à proximité du royon, ainsi que dans la partie aval du schorre.

Les teneurs supérieures à 3 % dessinent des taches isolées en rive droite près de la zone d'habitation située en amont et en rive gauche face au port d'Etaples près de l'aéroport, et près du Touquet.

En résumé, le carbone organique est relativement abondant dans les secteurs

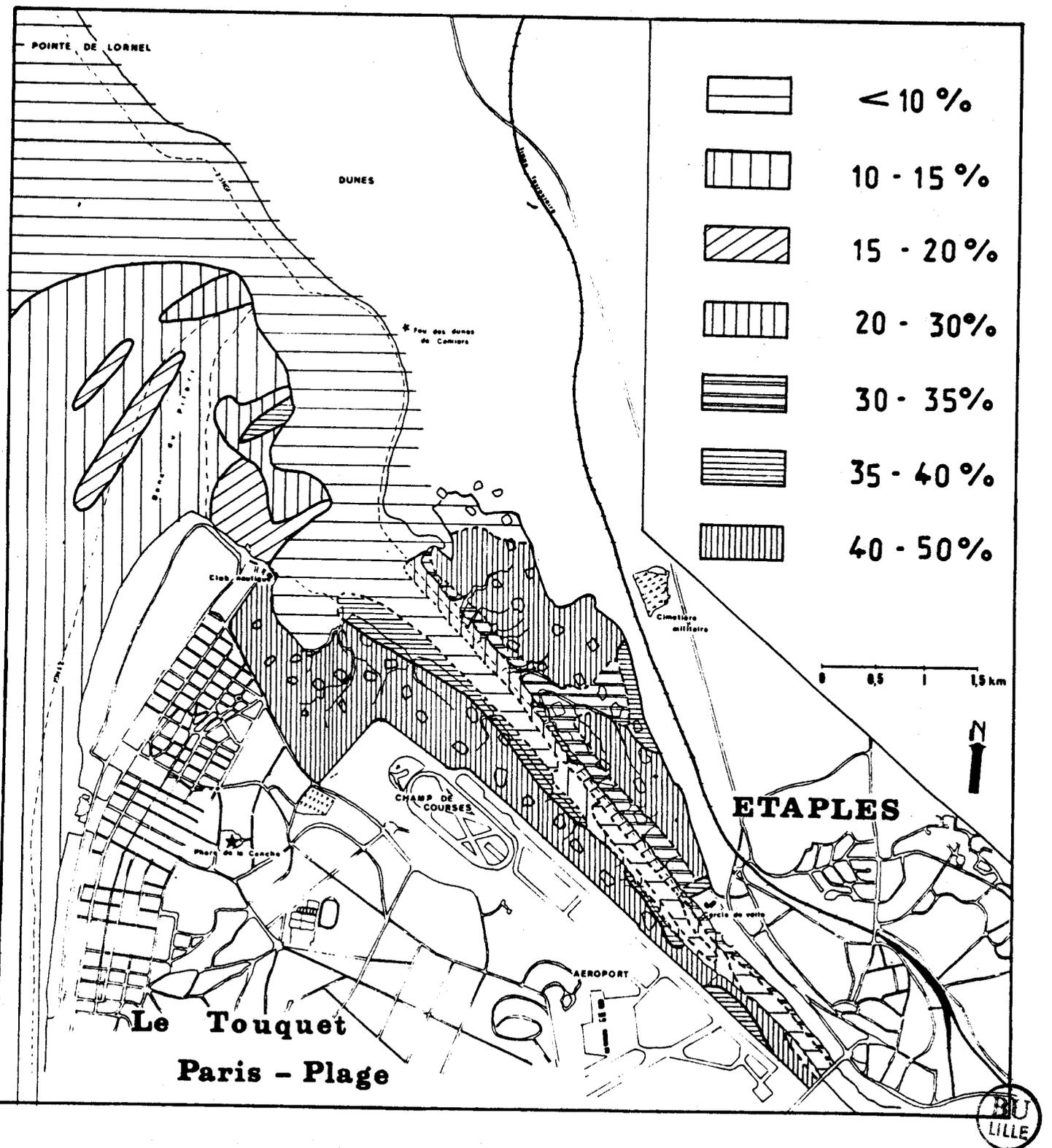


Figure 30: DISTRIBUTION DES CARBONATES

de l'estuaire riches en fractions fines, et paraît directement lié aux propriétés d'adsorption des minéraux argileux. Les teneurs maximales se situent sur le schorre puis sur la slikke et la zone abritée par le banc du Pilori.

En revanche, les dépôts sableux sont pauvres en carbone organique, avec toutefois des teneurs variables selon le lieu. Le schorre de la rive droite montre dans son ensemble une plus grande homogénéité que celui de la rive gauche. Par contre ce dernier présente des valeurs moyennes plus importantes, sans doute du fait de sa position plus à l'abri des tris hydrodynamiques.

II - EVOLUTION RECENTE DE LA SEDIMENTATION

Une trentaine de sondages à la tarière ont été effectués au cours du mois de juillet 1983, dans les zones du schorre, de la slikke et la zone abritée par le banc du Pilori (figure 19). La pénétration moyenne des différents sondages est de 2,40 m, avec une profondeur minimale atteinte de 1,20 m et une profondeur maximale de 4,20 m.

II.1 - CARACTERISTIQUES DES SEDIMENTS

Les faciès granulométriques rencontrés comprennent des galets, des sables, des sables vaseux et des vases (figure 32). Ils sont définis de la manière suivante (figure 33) :

- les sables renferment moins de 25 % de particules inférieures à 63 μm ;
- les sables vaseux comprennent 25 à 50 % de particules fines (< 63 μm) ;
- les vases sableuses sont constituées de 50 à 75 % de particules inférieures à 63 μm .
- les vases comprennent plus de 75 % de fines.

Les deux faciès dominants sont ceux des vases et des sables.

Les formations argileuses superficielles répertoriées comme des vases brunes se répartissent sur toute la surface du schorre. Leur épaisseur varie de 0,30 m à 1,40 m. Ces vases sont relayées en profondeur, dans certains secteurs du schorre, par des formations vaseuses ou des vases sableuses grises, attestant d'un milieu confiné et réducteur.

A l'aval, aux sondages T 29 et T 30, on ne retrouve plus ce faciès superficiel qui est remplacé par un faciès sableux pour le premier, et par un faciès de sables coquilliers pour le second. Ces sondages sont à la limite du schorre qui se trouve confronté en cet endroit à la pénétration des sables marins sur les deux rives, et à une migration du sable des dunes, en rive droite.

Les vases superficielles se poursuivent en profondeur par un faciès de vases sableuses que l'on retrouve dans les sondages du schorre. En bordure de ce domaine, les vases sont relayées par un faciès de sable vaseux ou de sable :

- dans la partie septentrionale jouxtant les dunes ;
- à proximité de la slikke ;
- dans la partie aval du schorre.

A l'aval, au sondage T 29, le sable recouvre une unité vaseuse qui repose elle-même sur un autre faciès sableux.

Cet agencement vertical des sondages permet de déterminer deux zones bien distinctes dont nous parlerons en deuxième partie.

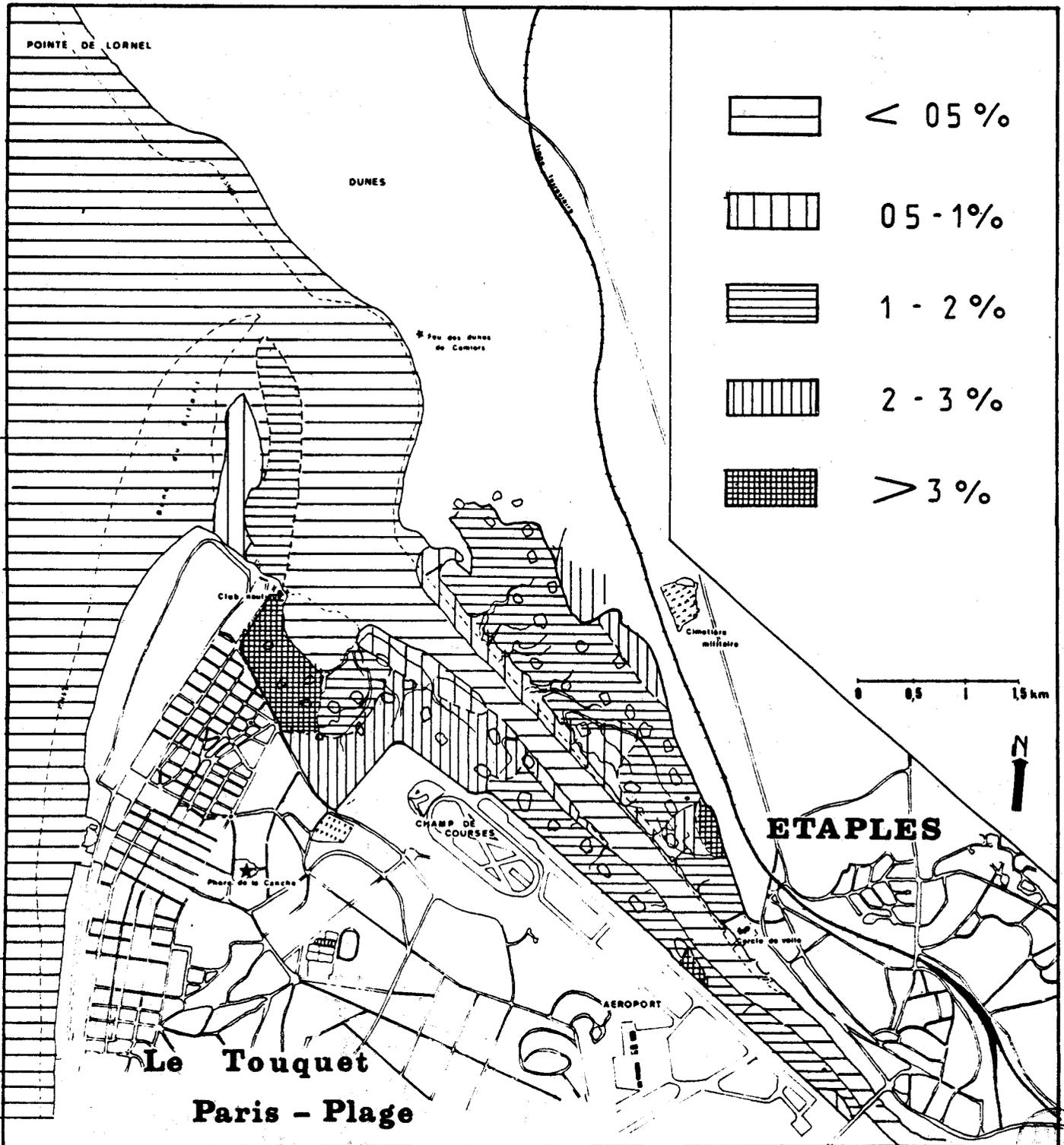


Figure 31 : REPARTITION DU CARBONE ORGANIQUE

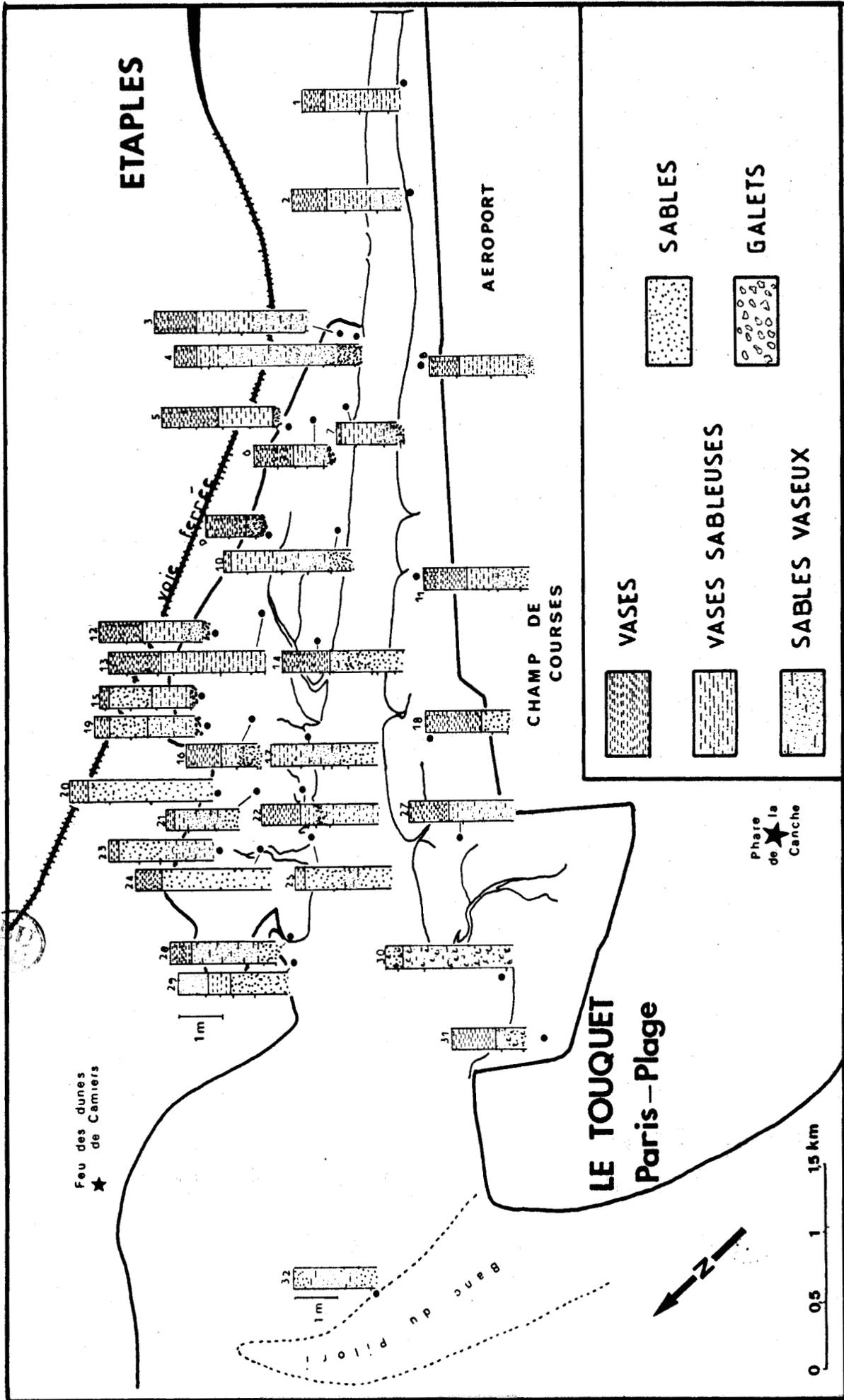


Figure 32 : PROFILS LITHOLOGIQUES D'APRES LES SONDAGES A LA TARIERE

Fig 33: Légende des figures sur les sondages

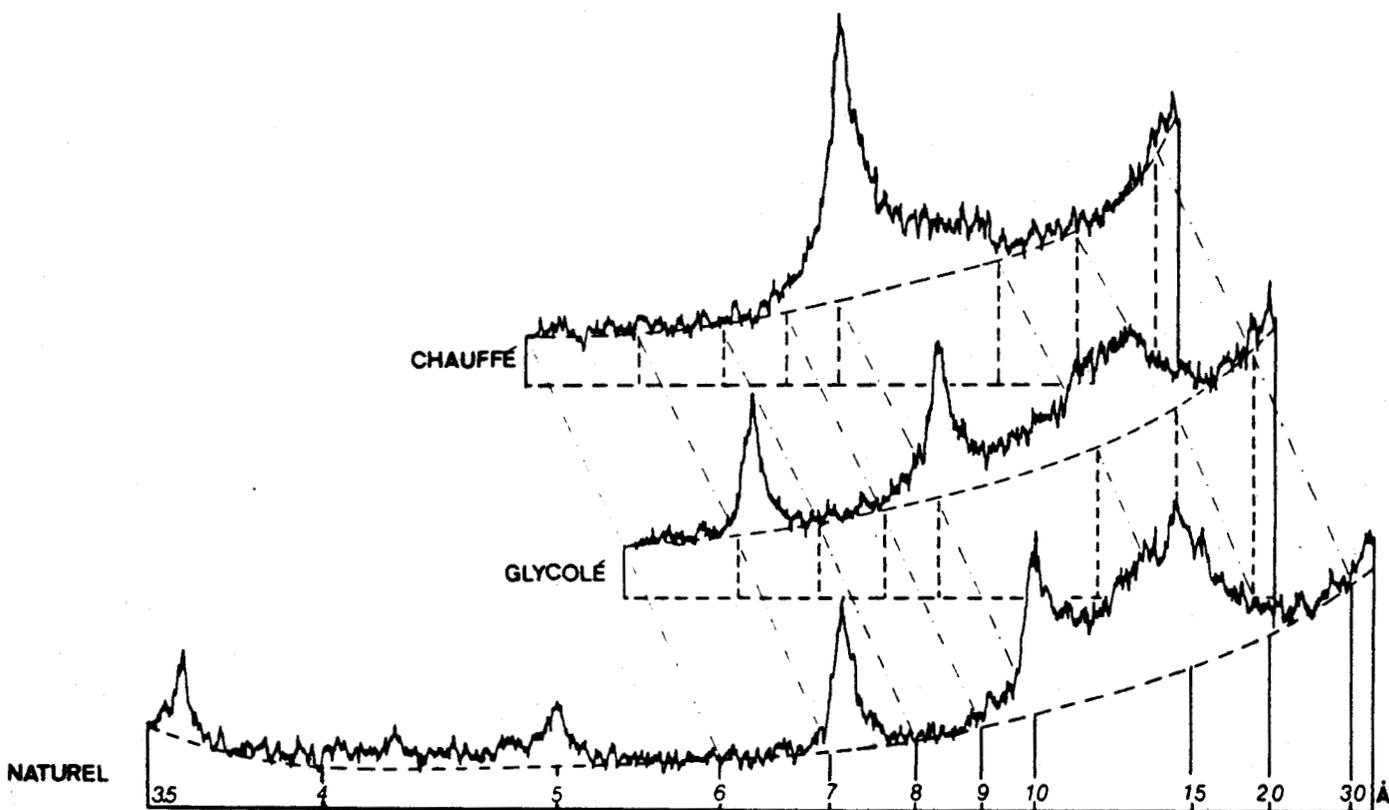
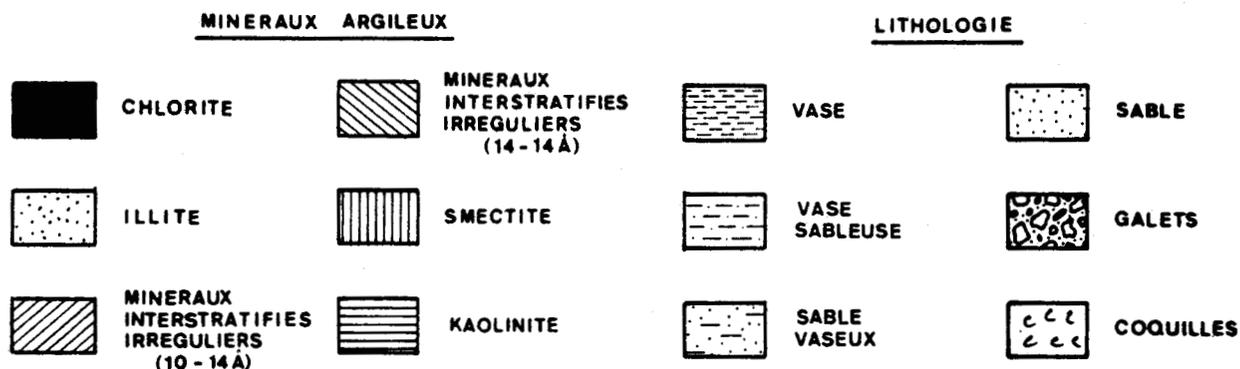


Figure 34 : DIFFRACTOGRAMME TYPE DE LA FRACTION ARGILEUSE CORRESPONDANT AUX SEDIMENTS DES SONDRAGES A LA TARIERE (TARIERE 25-3)

L'étude granulométrique permet de montrer les modes les plus importants. La fraction granulométrique 125 μm représente le mode principal et la fraction 160 μm , le mode secondaire. Certains sédiments sableux offrent un mode principal de 160 μm , accompagné d'un mode secondaire de 125 μm . On retrouve cette dernière répartition dans les sondages : T 28, T 29, T 30, T 31.

Toutefois, les sondages T 15, T 16, T 19, T 20, T 23 sont caractérisés par des sédiments à mode principal 160 μm et mode secondaire 200 μm . Il faut remarquer que ces sondages se localisent à proximité du massif dunaire qui aurait pu contaminer le secteur alentour de sables plus grossiers. Les modes des sédiments des sondages correspondent aux modes des sédiments superficiels, non directement soumis à un vannage important par les courants de marée.

Le cortège argileux type est représenté sur la figure 34 et correspond à l'échantillon T 25-3. Il renferme 5 % de chlorite, 25 % d'illite, 10 % d'interstratifiés (10-14), 5 % d'interstratifiés (14-14), 35 % de smectite et 20 % de kaolinite.

Les cortèges minéralogiques semblent être en relation avec la profondeur. Les pourcentages de chlorite sont constants (= 5 %) et ceux de la kaolinite fluctuent légèrement (de 15 à 20 %), les proportions de smectite malgré quelques petites fluctuations augmentent légèrement vers la surface et passent dans le sondage T4 de 30 % (figure 35) en profondeur à 45 % en surface. On constate un phénomène inverse à l'aval au sondage T 28.

On rencontre parfois des niveaux plus riches en débris coquilliers. Ces coquilles ou ces débris coquilliers s'observent :

- épars dans le sédiment ;
- sous forme de petits lits de 2 à 3 cm d'épaisseur (hydrobies) ;
- sous forme de lits plus épais et sont alors composés de débris de lamelibranches (*Cardium edule*).

Les contacts avec les faciès sous-jacents sont progressifs dans le cas où ceux-ci sont fins, nets dans le cas où ils sont sableux.

Les carbonates fluctuent parallèlement à la richesse en particules inférieures à 63 μm . Les sédiments sableux ne contiennent que localement de fortes proportions de débris coquilliers. Cette association des carbonates avec les sédiments fins se retrouve également dans les sédiments superficiels.

II.2 - VARIATIONS DANS L'ESTUAIRE

Comme signalé auparavant, l'évolution verticale de la sédimentation permet de distinguer deux zones :

- une zone de schorre ;
- une zone de bordure (zone septentrionale jouxtant les dunes)
(zone aval)

La zone du schorre (figures 35, 36, 37) présente une sédimentation de type "fining up". Les sédiments sont sableux à la base et s'enrichissent progressivement en fraction fine vers la surface. Les teneurs en calcaire suivent les variations des teneurs en fraction fine. Parfois quelques lits coquilliers s'insèrent dans la sédimentation des vases sableuses ou des sables vaseux. Ces sondages, en général, regroupent des sédiments de couleur grise ou nuancée, attestant d'un milieu réducteur contenant de la matière organique en quantité notable. La coloration des sédiments passe des couleurs brunes en surface à des couleurs grises, gris-bleu, gris-noir à faible profondeur (de 0,3 à 1 m). Puis, à mesure que l'on

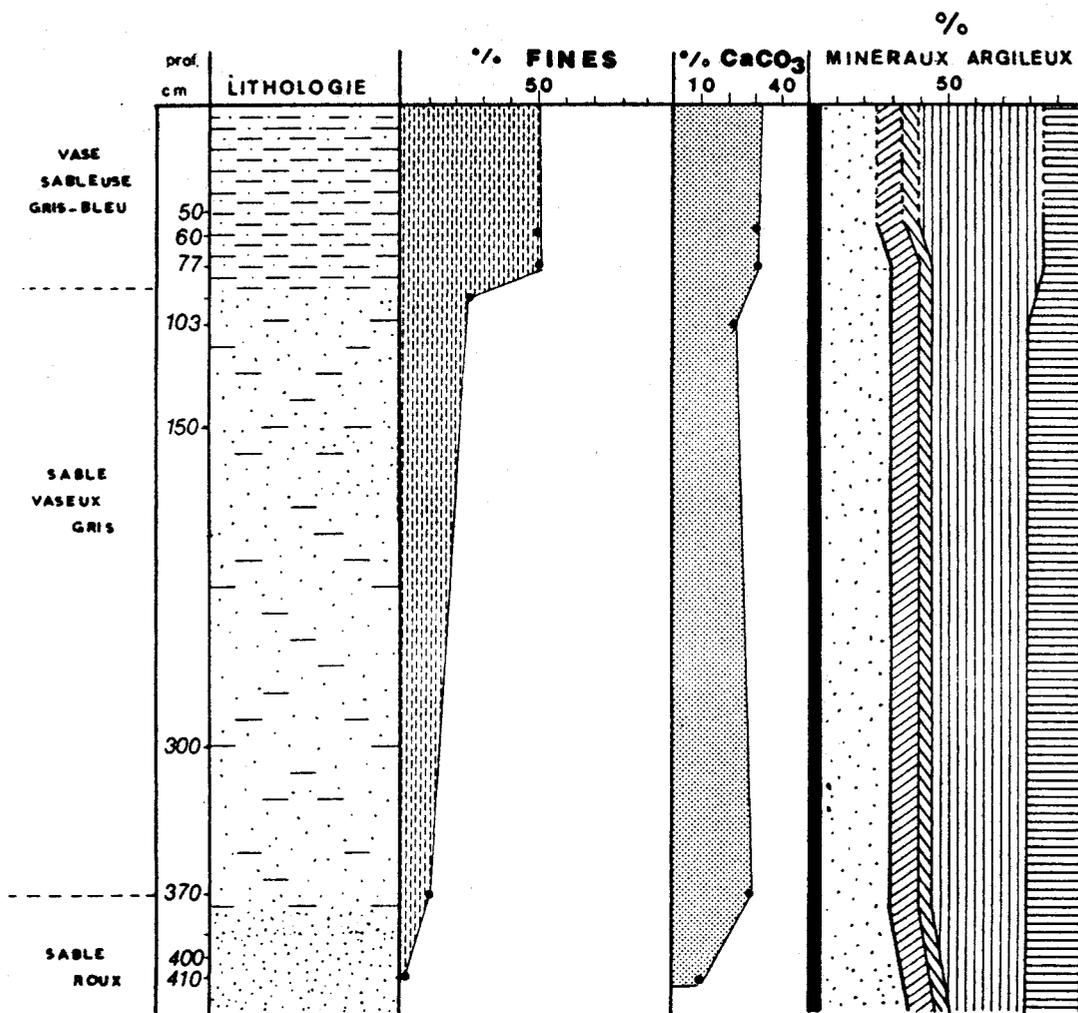


Figure 35 : Sondage 4

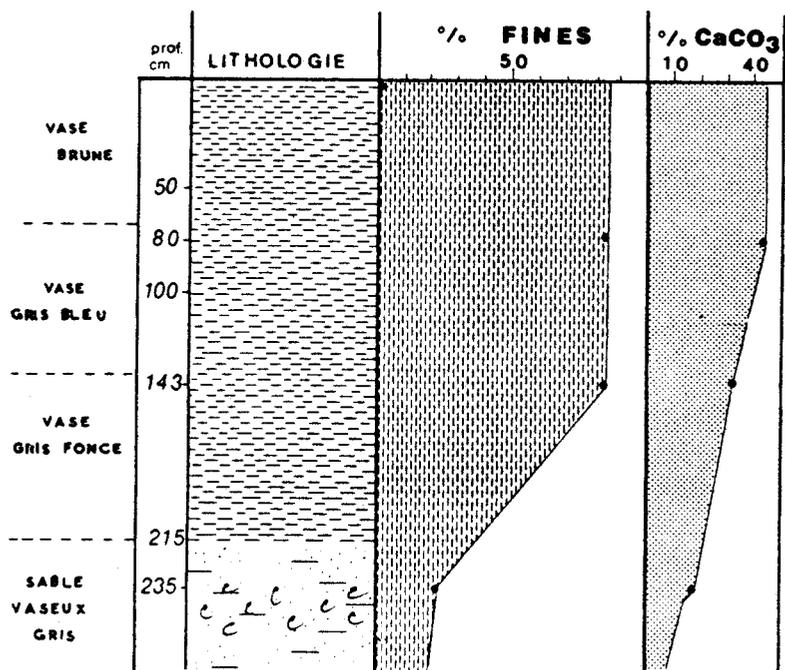


Figure 36 : Sondage 8

s'enfonce, la couleur grise devient plus délavée. Cette dernière coloration correspond souvent à des sédiments sableux se trouvant dans la nappe phréatique.

La zone de bordure se différencie par les grandes variations existant dans la sédimentation.

La zone septentrionale se définit par une succession de faciès vaseux et sableux, ainsi que par la présence de sédiments reliques (galets) à la base des sondages (fig. 38). Le passage de ces faciès se fait souvent de façon rapide : T 23, T 20, T 19, T 15, T 9. Le long du chemin, sur la partie externe du schorre, les sondages ont été arrêtés du fait de l'existence d'un sol dur à galets (T 19, T 15, T 12, T 9, T 6). Ce cordon de galets correspond selon la littérature au cordon de galets de Bel Air (DUBOIS, 1924 ; BRIQUET, 1930). Il correspond selon le dernier auteur à un cordon littoral mis en place sous l'action des houles. A partir du chemin, les galets furent retrouvés à des profondeurs variant de 0,50 m à 2,50 m, et notamment dans les sondages suivants : T 19 (0,90 m), T 15 (2,00 m), T 12 (2,40 m).

A l'aval, la succession des différents faciès traduit l'affrontement entre les influences du domaine aval marin et du domaine continental. Le sondage 30 (figure 39) présente une évolution moins nette de la sédimentation. Les sédiments sont en grande partie sableux, plus ou moins coquilliers et renferment parfois des lits à *Cardium edule*. A mi-profondeur, on assiste à une augmentation des teneurs en fines qui diminuent par la suite en profondeur. Les teneurs en calcaire suivent l'enrichissement en particules inférieures à 0,63 μ m.

En rive droite, au sondage 28 (figure 40), la composition minéralogique varie en sens inverse de la zone précédente avec une diminution des teneurs en smectite. Cet appauvrissement relatif peut traduire une sédimentation différentielle des minéraux argileux à l'aval, attestant d'un milieu plus énergétique et plus ouvert aux courants de marée.

Conclusion :

De ces différents sondages à la tarière, il ressort :

- la présence dans la partie septentrionale d'un sédiment relique attesté par des galets appartenant au banc de Bel Air. Il délimiterait une ancienne ligne de rivage et se serait accumulé sous l'action des houles. Pour DUBOIS (1924), ce cordon appartiendrait à l'assise de Calais ;
- un enrichissement en particules fines vers le haut ;
- un passage vers le haut de couleurs gris délavé à des gris plus soutenus, relayées par des couleurs brunes en surface ;
- une augmentation des teneurs en smectite vers la surface pour les sondages du schorre et une diminution pour les sondages de l'aval (T 28) ;
- la présence de nappes phréatiques facilitant le fluage des sables.

Le battement de ces dernières provoquerait un lessivage des sédiments et la migration des particules les plus fines.

A ces divers aspects de la sédimentation nous pouvons ajouter que :

les vases du schorre représentent le lithofaciès en plein développement. Le schorre est en concurrence en bordure septentrionale avec les dunes et la sédimentation fine prend le pas sur la sédimentation sableuse, les argiles venant recouvrir rapidement les sables. A l'aval (T 28), les influences marines et continentales sont en concurrence. Elles se traduisent dans la sédimentation par une alternance de vases et de sables. Toutefois, l'importance de la sédimentation sableuse oblitère la sédimentation fine, et témoigne d'un développement de la couverture sableuse.

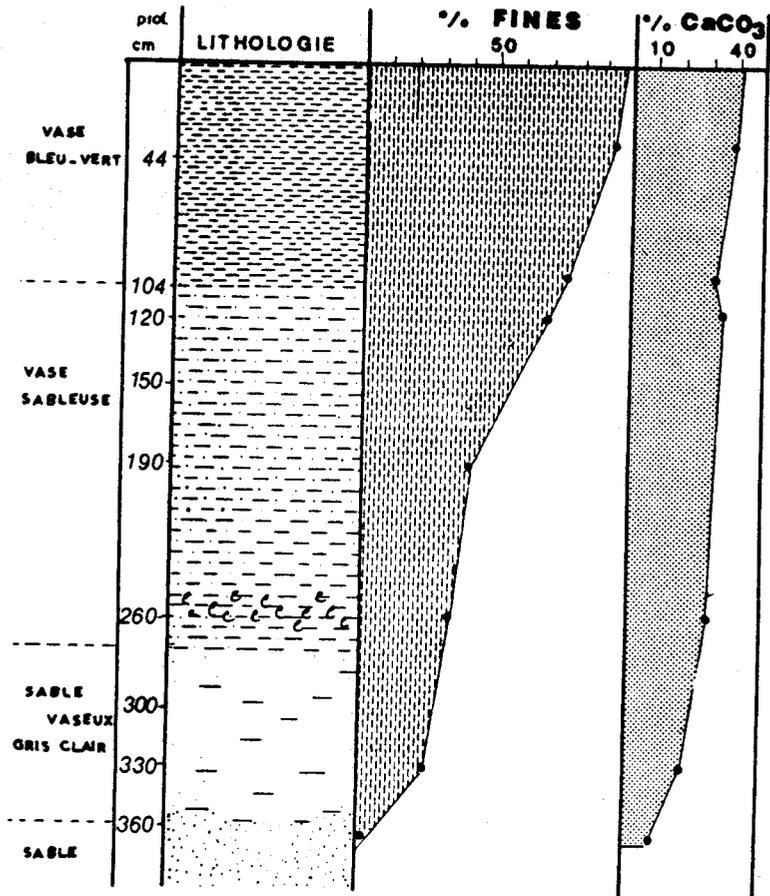


Figure 37: Sondage 13

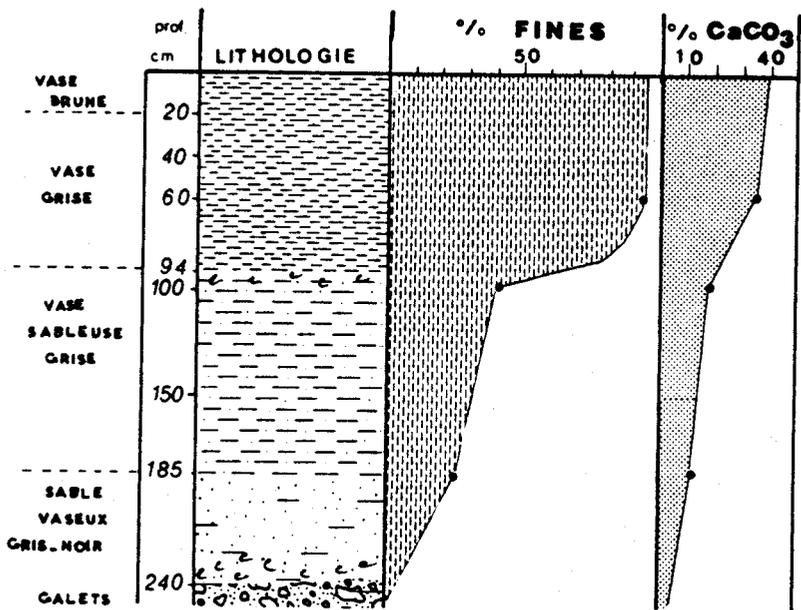


Figure 38: Sondage 12

III - CONCLUSION

Située dans une région à marnage relativement élevé (≈ 8 m), la Canche offre une surface en grande partie intertidale. Les différents faciès lithologiques (faciès sableux, slikke, schorre) présentent dans leur agencement spatial, une distribution latérale depuis le centre de l'estuaire jusque sur ses bordures.

L'étude granulométrique permet de définir et de cartographier les différents ensembles sédimentaires représentés par les faciès lithologiques : faciès sableux, faciès des sables et des vases, la slikke, le schorre et le faciès des tourbes. Elle montre de nets gradients granulométriques amont-aval et latéral, qui traduisent les grandes variations hydrodynamiques.

Les sédiments fins se rencontrent en proportions variables sur chaque bordure de l'estuaire avec les domaines de schorre et de slikke, et dans la zone abritée par le banc du Pilori. Les cortèges argileux sont dominés par la présence de l'illite, de la smectite et des interstratifiés indifférenciés (10-14) et (14-14) qui représentent chacun une proportion d'environ 25 %. Les teneurs en kaolinite et chlorite sont pratiquement constantes (≈ 15 % pour la première et 5 % pour la seconde). Sans montrer de variations significatives amont-aval, les minéraux argileux permettent d'appréhender une différenciation latérale reflétant un hydrodynamisme plus marqué en rive droite.

Les domaines sont enrichis en sable partout où l'hydrodynamique et l'aérodynamique sont plus intenses. Les sables se répartissent dans la partie centrale de l'estuaire, vers son embouchure et sur l'estran. La répartition des divers indices granulométriques permet de cerner des domaines hydrodynamiques d'intensité généralement croissante vers le large sous forme de passages préférentiels de courants de part et d'autre de l'embouchure.

L'étude de la fraction sableuse permet de différencier deux stocks sédimentaires :

- le premier, en amont, présente un caractère fluviatile à forte proportion d'émoussés mats sales ;
- le second, à l'aval, se distingue par la prépondérance d'émoussés luisants à façonnement marin.

Le matériel lithoclastique à prédominance quartzeuse, traduit une longue histoire avec apports et remaniements successifs. Il serait pour l'essentiel de ses constituants d'origine antéflandrienne (AUFFRET et LARSONNEUR, 1975 ; LARSONNEUR *et al.*, 1982). Le cortège des minéraux lourds l'atteste par la présence d'un grand nombre d'éléments résistants : grenat, zircon, tourmaline.

Le matériel bioclastique contient des faunes remaniées du Tertiaire et du Crétacé (bryozoaires, foraminifères, ...). Elles témoignent, de par leur absence en amont (Attin, Haudique) et par leur présence dans l'estuaire d'un apport marin indéniable.

Les sondages à la tarière effectués sur les mollières ont permis de mettre en évidence une évolution verticale : les sédiments deviennent plus sableux avec la profondeur. La succession lithologique est définie, de la surface vers la profondeur par des vases brunes, des vases grises, des vases sableuses grises, des sables vaseux gris et des sables. La couleur devient plus claire en profondeur. Dans la zone septentrionale, les sondages ont atteint un cordon de galets défini comme étant celui de Bel Air (DUBOIS, 1924 ; BRIQUET, 1930). A l'aval, les contacts lithologiques sont plus tranchés du fait de la proximité de diverses unités : dunes, sables marins et schorre.

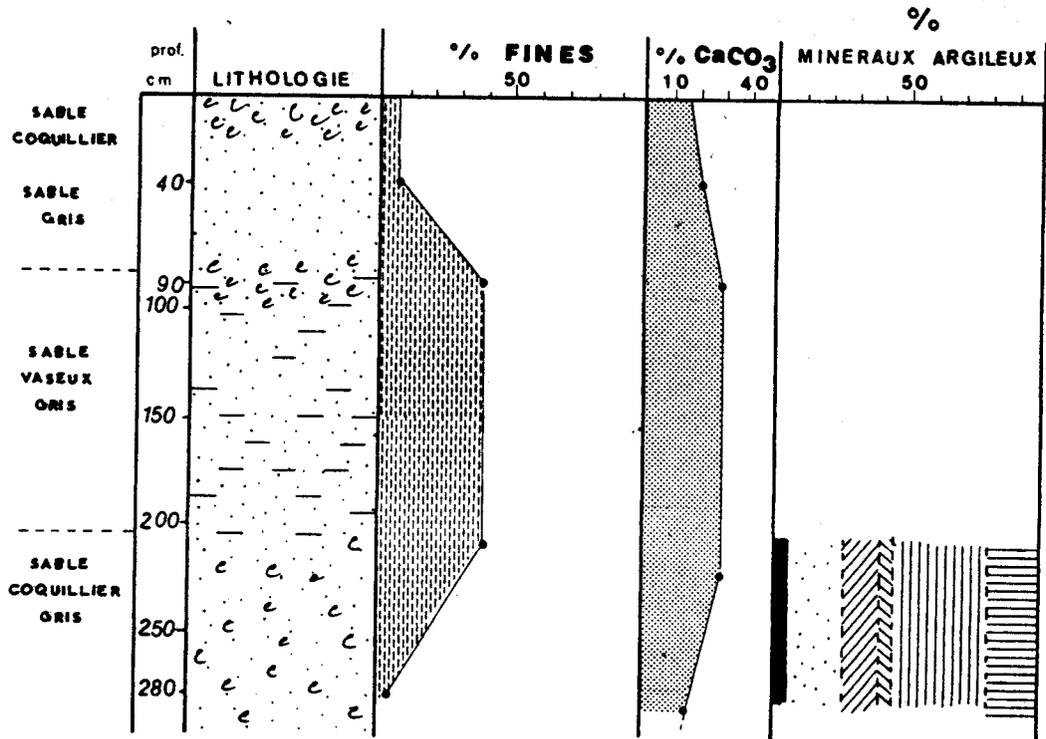


Figure 39 : Sondage 30

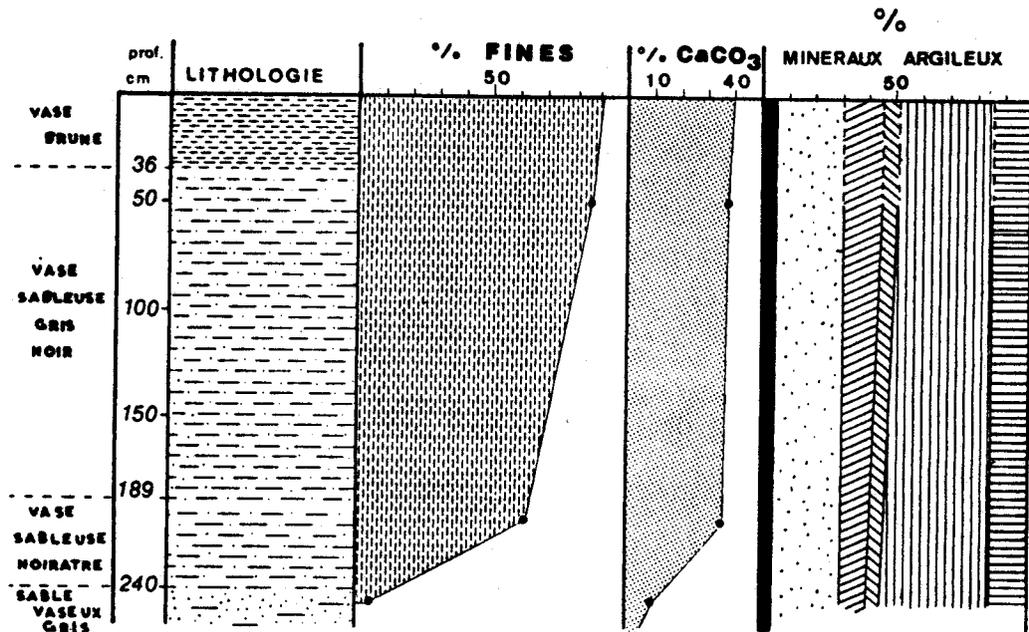


Figure 40 : Sondage 28

En profondeur, les sables des sondages témoignent certainement d'une époque encore assez proche, antérieure à l'installation des digues délimitant le chenal (1863). En effet, celles-ci empêchent le Canche de divaguer et favorisent ainsi une sédimentation susjacente riche en particules inférieures à 63 μm sur le schorre.

CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE

L'élévation du niveau marin, au début de l'époque flandrienne, décrit une courbe de type hyperbolique. La rapide élévation du niveau marin et l'importance des stocks sédimentaires remobilisés, permet le comblement rapide des basses vallées. Tout au long de la transgression, des formations de tourbes ont pu se développer localement. En effet, l'édification de cordons dunaires littoraux peuvent protéger certaines zones basses d'une invasion marine et y favoriser le développement de tourbes ou de sédiments d'eau douce. L'évolution de la sédimentation s'est poursuivie par un dépôt de sable marin, relayé au cours de l'histoire récente par les faciès de slikke, de schorre et de marais.

Les phénomènes transgressifs et régressifs observés dans les séries sédimentaires, après l'ouverture du Pas-de-Calais (8 500 - 9 000 ans B. P.), (POMEROL, 1977 ; COLBEAUX et al., 1980), sont imputables à l'existence et à l'évolution de barrières littorales (LE FOURNIER, 1980). Ces dernières dépendent des relations existant entre la morphologie sous-marine et les caractéristiques hydrodynamiques du milieu ambiant. Ces relations sont elles-mêmes liées au rapport charge sédimentaire/capacité de transport.

Selon LE FOURNIER (1974, 1980) nous sommes actuellement en période de démantèlement de barrière littorale, sur la côte picarde.

Sous la permanence de la dérive littorale et de l'action humaine, l'estuaire de la Canche n'est plus aussi ouvert qu'il l'était vers 7 000 ans B. P. L'effet de comblement induit un rétrécissement de la section de l'estuaire et donc une diminution des influences marines.

En même temps, nous assistons à une régularisation du trait de côte et, à l'embouchure de la Canche, au développement d'une dissymétrie liée à une progradation de la rive sud opposée à une ablation de la rive nord. Cette dernière est évaluée à environ 2 km depuis 1758. Nous observons également une migration des sables vers l'intérieur des terres. Ce double mouvement, avancée du poulcier et recul du musoir, détermine une dérive de l'axe de l'estuaire vers le Nord.

L'étude des sédiments superficiels a permis de différencier cinq lithofaciès : le faciès sableux, le faciès de sable et vase, la slikke, le schorre et le faciès des sables humifères et de tourbe. Leur organisation en domaines reflète en grande partie une distribution latérale depuis le centre de l'estuaire jusque sur ses bordures.

Les principaux paramètres statistiques étudiés (grain moyen, mode) permettent d'identifier des zones de passages préférentiels de courants à l'aval. La granulométrie reflète vraisemblablement la granulométrie des stocks sédimentaires disponibles. Dans l'estuaire, les sédiments sont des sables fins et présentent souvent un mode principal de 125 μm . Le mode 160 μm est ubiquiste et se retrouve souvent en mode secondaire.

Les sables de l'estuaire, caractérisés par de fortes teneurs en quartz, traduisent une longue histoire de remaniements successifs. Ceci est attesté par le cortège des minéraux lourds, constitué par un fort pourcentage d'éléments résistants : grenat, zircon, tourmaline et par des faunes tertiaires et crétacées.

La répartition des minéraux argileux ($< 2 \mu\text{m}$) est en partie aléatoire. Toutefois, on constate une variation latérale, traduisant un hydrodynamisme plus élevé en rive droite qu'en rive gauche. Les assemblages moyens sont dominés par l'illite ($\approx 30\%$). Ce minéral est associé à des smectites (25%), des minéraux interstratifiés irréguliers (10-14s), (10-14v) et (14-14) (25%), et en moindre proportion à de la kaolinite (10-15%) et de la chlorite (5%).

Les sondages à la tarière, effectués sur les mollières ont montré une certaine homogénéité de la sédimentation au cours des dernières décennies. Les profondeurs maximales atteintes (1,50 à 4,20 m) correspondent soit à un niveau de galets, soit à une nappe phréatique.

Ces sondages permettent de mettre en évidence l'existence de sédiments reliques (galets appartenant vraisemblablement à l'"Assise de Calais" (DUBOIS, 1924)) recouverts par des sédiments qui s'enrichissent en particules fines vers la surface. A l'aval la confrontation des actions éoliennes et des apports marins montrent une succession rapide entre les faciès sableux et les faciès plus enrichis en fraction fine.

DEUXIEME PARTIE

Processus hydrologiques



- CHAPITRE I -

GENERALITES SUR LES PROCESSUS HYDROLOGIQUES

Les estuaires sont le résultat récent du relèvement du niveau de la mer lors de la transgression flandrienne qui provoque l'envasement des vallées.

Ce sont des zones tampons où s'effectue l'affrontement des eaux marines et fluviales. Les eaux océaniques forment un barrage au libre écoulement des eaux douces. L'intensité de la force antagoniste développée par le fleuve dépend essentiellement de son débit au cours de la période considérée : débit de crue ou d'étiage. Inversement l'action exercée par les eaux océaniques qui pénètrent dans l'estuaire dépend de l'amplitude des marées, du secteur géographique considéré, du coefficient de marée, de la direction et de l'intensité du vent, de la pression atmosphérique, et, dans une moindre mesure, de la température qui conditionnent la viscosité de l'eau. Tous ces facteurs combinés influent sur l'équilibre fluvio-marin ainsi que sur les conditions de sédimentation.

L'action de la marée dans l'estuaire constitue le facteur le plus important, et permet de caractériser en fonction du débit fluvial les principaux types d'estuaires. Les deux facteurs conjugués : amplitude de la marée et débit fluvial, sont responsables du temps de résidence des eaux douces dans cette partie du fleuve.

Ces phénomènes ont déjà été souvent décrits et exposés, notamment par ALLEN (1972), ALLEN *et al.* (1980) et SALOMON et ALLEN (1983). Après les avoir rapidement présentés, nous nous en servirons pour caractériser, dans les chapitres qui suivent, l'estuaire de la Canche.

I - ACTION DE LA MAREE

I.1 - MODIFICATION DE L'ONDE DE MAREE

La marée océanique sans frottement sur le fond est assimilable à une onde progressive sinusoïdale (figure 41). La durée des courants de flot et de jusant est dans ce cas égale, et exclut de ce fait tout transport résiduel d'eau et de sédiment.

Lorsque l'onde de marée pénètre dans l'estuaire, trois phénomènes distincts interviennent pour la transformer :

- . le frottement sur le fond ;
- . l'effet de rétrécissement des sections en progressant vers l'amont ;
- . la réflexion de l'onde sur les berges.

- Le frottement sur le fond induit une décroissance de la vitesse de l'onde de marée, mais de façon plus prononcée au fond qu'en surface. Ce phénomène provoque une déformation de l'onde de marée, déformation qui augmente au fur et à mesure que l'onde remonte l'estuaire. Cette déformation se traduit en progressant vers l'amont, par un raccourcissement de la durée du flot et une prolongation de celle du jusant. Cette inégalité de durée entre le montant et le descendant provoque une asymétrie dans la répartition des courants, puisque le même volume d'eau doit être débité dans des intervalles de temps inégaux.

- Le rétrécissement des sections vers l'amont amplifie la marée, à condition que le frottement agissant en même temps n'ait pas un effet inverse. Trois types de situation peuvent se rencontrer (LE FLOCH, 1961 *in* SALOMON et ALLEN, 1983) (figure 42).

. Rétrécissement > Frottement : ceci correspond à un estuaire de type hypersynchrone ; l'amplitude de la marée augmente en amont de l'embouchure, pour décroître par la suite dans la partie amont de l'estuaire lorsque l'effet de frottement devient prépondérant.

. Rétrécissement = Frottement : cette caractéristique se rencontre dans un estuaire de type synchrone, l'amplitude étant constante dans l'estuaire pour décroître dans sa partie amont.

. Rétrécissement < Frottement : ce phénomène correspond à un estuaire de type hyposynchrone où l'amplitude de la marée décroît de façon continue depuis son embouchure.

Dans chaque cas, la vitesse des courants de marée suit la même évolution longitudinale que l'amplitude.

- La réflexion de l'onde de marée sur les berges peut être plus ou moins importante. Si cette réflexion est importante, à savoir si la longueur de l'estuaire est un multiple de $\lambda/4$ (λ étant la longueur d'onde de la marée), l'onde de marée passe d'une onde progressive à une onde stationnaire. En même temps, la réflexion de l'onde provoque une augmentation de l'amplitude de la marée, notamment dans les zones de réflexion. Si l'estuaire a une forme régulière, il se produit une réflexion et une augmentation de l'amplitude tout le long de l'estuaire.

1.2 - EFFET SUR L'HYDROLOGIE ESTUARIENNE

1.2.1 - Effet sur les courants

Les valeurs des courants de marée sont plus élevées en périodes de vive eau qu'en périodes de morte eau. Ces variations de marnage et de vitesse de courants contrôlent la sédimentation estuarienne. Les sédiments en suspension se déposent plus facilement en périodes de morte eau, au contraire de celles de vive eau, durant lesquelles ils sont davantage érodés et expulsés hors de l'estuaire (CASTAING et ALLEN, 1981).

1.2.2 - Effet sur le mélange des eaux douces et salées

La confrontation des eaux douces et des eaux salées détermine des zones de gradients de salinité, longitudinaux et verticaux. L'ampleur de ces gradients, fonction entre autre du débit fluvial et du marnage, détermine une "circulation estuarienne" plus ou moins prononcée et variable dans le temps. La turbulence des eaux, résultant du courant fluvial et de la marée, provoque le mélange des eaux, ainsi que sa diffusion.

La classification des estuaires la plus simple est fondée sur le rapport entre le prisme de marée (Ω), c'est-à-dire le volume d'eau introduit par le flot, et le débit fluvial (Q_{fl}).

Pour un débit fluvial donné, la classification d'un estuaire peut varier en fonction de l'amplitude de la marée. En passant d'une période de morte eau à une période de vive eau, le degré de mélange augmente (figure 43). En fonction de cette caractéristique, PRITCHARD (1955) propose une classification des estuaires :

. Estuaire à coin salé sans marée : l'eau douce fluviale s'écoule au-dessus d'une eau plus dense salée, formant une couche au fond. Nous constatons de ce fait une stratification importante (Q_{fl}/Ω est grand).

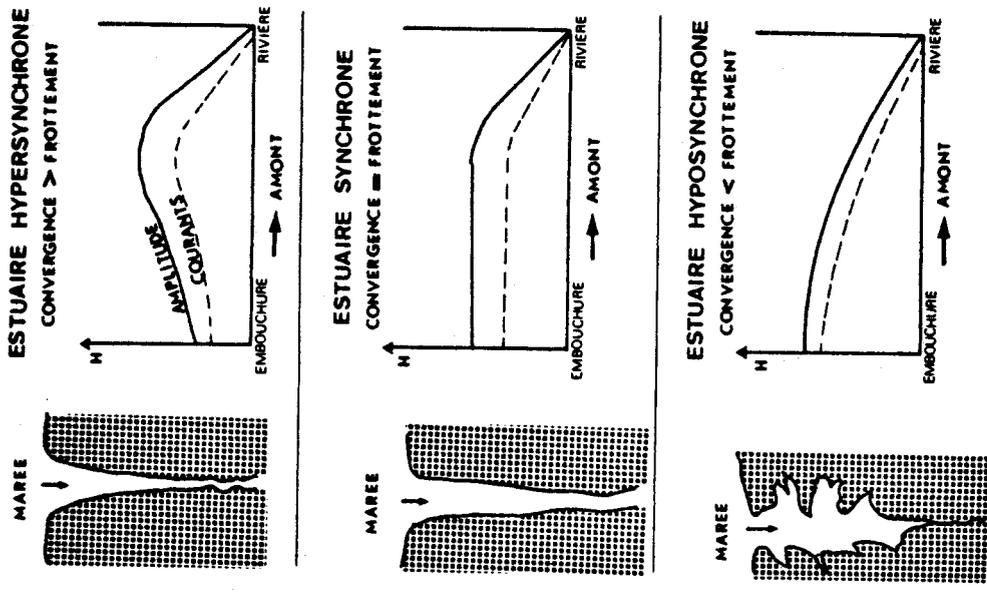


Figure 42 : MODIFICATION DE L'AMPLITUDE DE LA MAREE SELON LA VALEUR DU RAPPORT ENTRE LES EFFETS DE LA CONVERGENCE ET DU FROTTEMENT (d'après LE FLOCH, 1961; dans SALOMON et ALLEN, 1983)

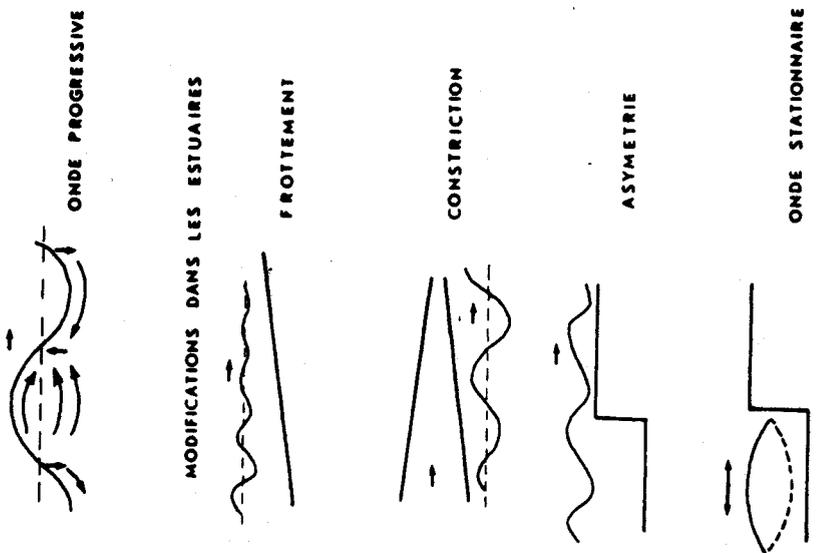


Figure 41 : MODIFICATION DE L'ONDE DE MAREE DANS LES ZONES COTIERES (dans SALOMON et ALLEN, 1983)

. Estuaire à coin salé avec marée : par rapport au premier cas, les échanges verticaux seront plus accentués (Q_{f1}/Ω diminue).

. Estuaire à coin salé partiellement mélangé : l'effet de diffusion et de mélange dû à la marée définit un gradient de salinité très réduit (Q_{f1}/Ω faible).

. Estuaire homogène : le rapport Q_{f1}/Ω est très faible. On ne constate aucun gradient vertical de salinité.

SIMMONS (1955) a repris cette classification et montre l'importance du rapport volume de marée/débit fluvial.

Selon la morphologie de l'estuaire, le mélange peut être plus ou moins bon, et s'accroît ou diminue parallèlement avec le rapport largeur/profondeur. Une crue entraîne une meilleure stratification des eaux, tandis que les forts coefficients de marée améliorent le mélange eaux douces, eaux salées, du fait de la plus grande turbulence de ces dernières. Le rôle de l'amplitude de la marée a été mis en évidence par de nombreux travaux (DYER, 1973 ; BASSOULET, 1979 ; AVOINE, 1981 ; ALLEN *et al.*, 1982 ; SALOMON et ALLEN, 1983).

Pour bien comprendre la circulation estuarienne, il convient de matérialiser les mouvements résultants correspondant aux courants résiduels, en faisant abstraction de la marée. D'une façon générale, ils se caractérisent dans l'intrusion saline par une superposition d'écoulements, vers l'amont au fond, et vers l'aval en surface (ALLEN, 1972). A l'extrémité amont de l'intrusion saline, les courants résiduels amont et aval s'annulent et forment une zone de convergence ou point nodal.

II - METHODES D'ETUDE

L'étude hydrologique de l'estuaire a été effectuée dans le cadre d'une étude pluridisciplinaire sur les estuaires du Nord - Pas-de-Calais. Cette étude pluridisciplinaire s'est déroulée en deux phases. La première année (1982-1983), elle a regroupé des hydrobiologistes (Station marine de Wimereux), des sédimentologues (Université de Lille I) et l'Institut Pasteur de Lille. La deuxième année (1983-1984), cette étude a été menée de concert par les sédimentologues et l'Institut Pasteur.

Le but de la première approche a été d'inventorier les différents paramètres et d'estimer la moyenne des flux d'éléments particuliers et dissous par des prélèvements d'eau effectués à intervalles réguliers au cours de l'année. Cette approche a eu lieu sur un petit nombre de stations fixes près de la pleine mer. Elle a été complétée par quelques cycles de marée à Etaples et en aval (contrat E. P. R., 1983 ; ORANGE, 1983).

La deuxième approche a pris en compte les divers coefficients de marée (vive eau, morte eau) et les variations du débit fluvial (crue, étiage). L'approche utilisée consiste à effectuer, durant divers cycles de marée, des mesures et des prélèvements en 4 stations réparties d'amont en aval (figure 44).

- Station 1 : lieu dit "ferme Haudique" (\approx 12 km de la mer) ;
- Station 1bis : Pont d'Enocq (\approx 14 km de la mer) ;
- Station 2 : Pont d'Etaples (\approx 7,5 km de la mer) ;
- Station 3 : Au droit de l'hippodrome, à hauteur de la balise (\approx 5 km de la mer) ;
- Station 4 : Au bout du banc du Pilori.

Chaque mission a rassemblé six personnes qui ont travaillé en binôme à chaque poste. A l'aval, les mesures ont été effectuées à partir d'un zodiac qui faisait la navette entre les stations 3 et 4.

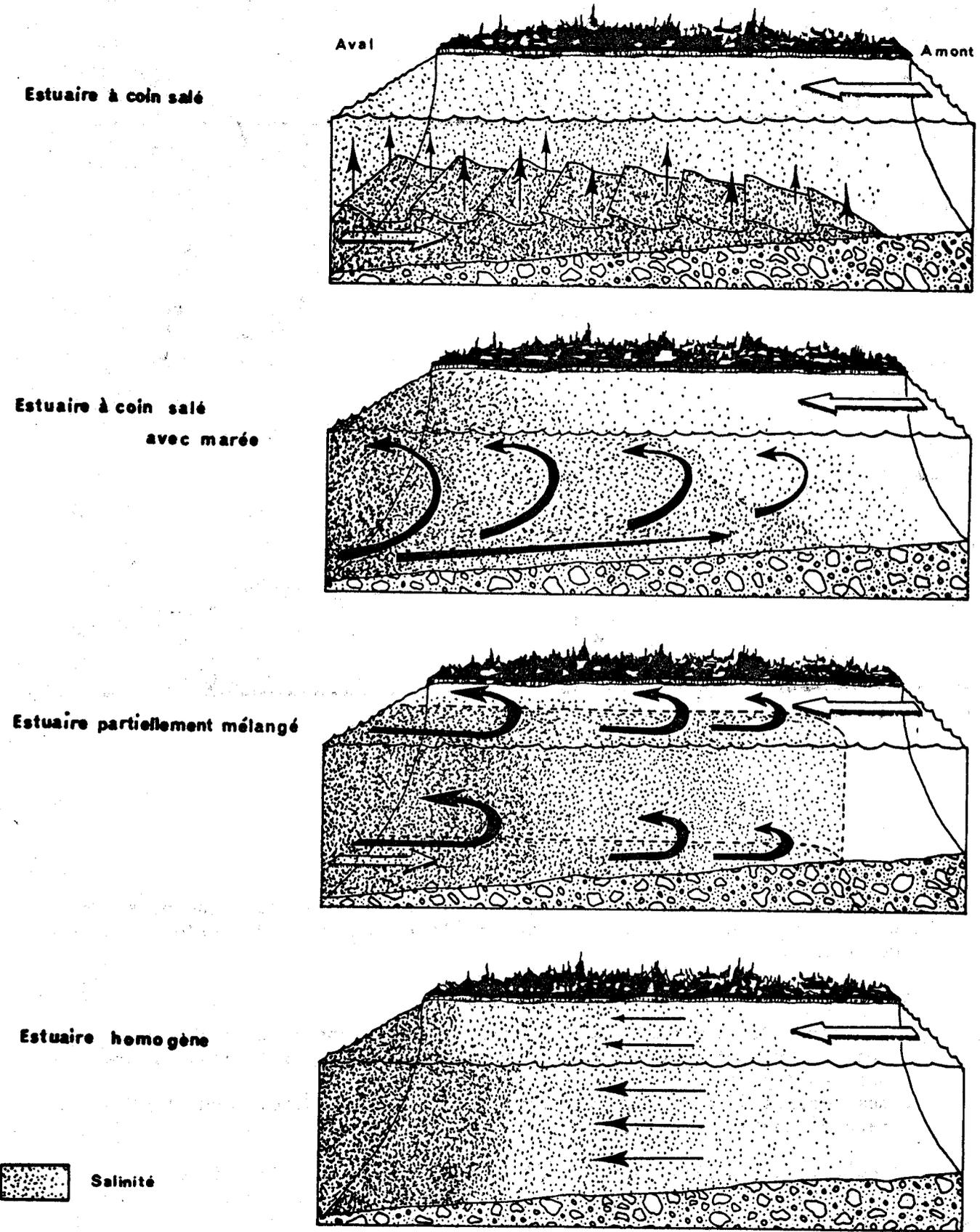


Figure 43: SCHEMA DE LA CIRCULATION ESTUARIENNE (d'après PRITCHARD, 1955; dans ALLEN, 1972)

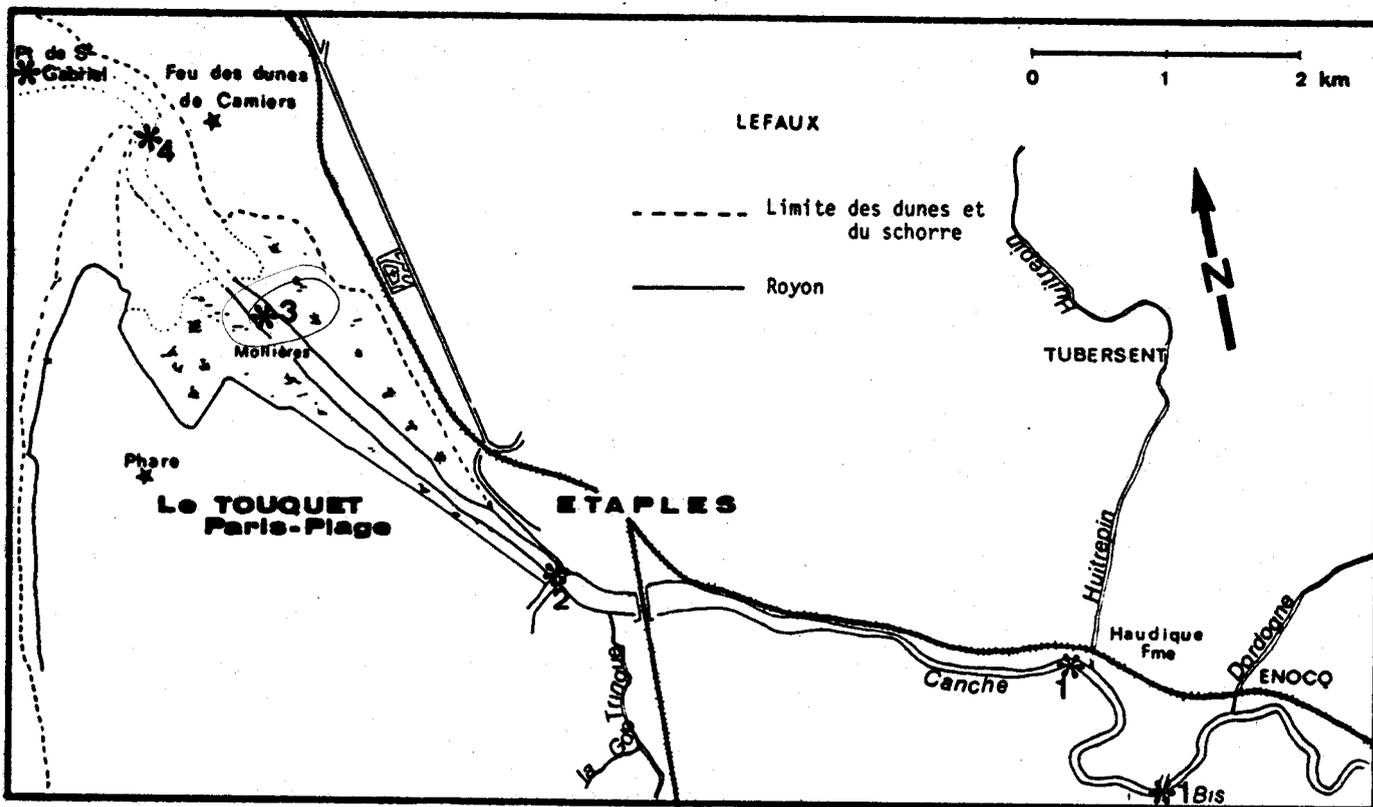


Figure 44 : STATIONS DES CYCLES DE MAREE

Les mesures effectuées sont de type eulérien, c'est-à-dire que nous avons réalisé en un point donné de l'estuaire, et durant un cycle de marée, toute une série de mesures.

Les mesures sur le terrain comprennent :

- . une étude de courantologie à 2 stations (stations 3 et 4) ;
- . des prélèvements d'eau en vue d'analyses (métaux lourds, minéralogiques) sur les 4 points, toutes les 2 heures ;
- . des mesures *in situ*, aux stations 4, 3, 2 : turbidité, conductivité, température, hauteur d'eau, ...

L'appareillage utilisé est décrit dans la partie méthodologie en annexe I. La figure 44 donne la position des points de mesure pour l'ensemble des campagnes hydrosédimentaires. Les conditions de marée et de débit fluvial sont indiquées sur le tableau 6 ci-après :

JOURNEE	: COEFFICIENT	: DEBIT A BRIMEUX en m ³ /s
mercredi 20 juillet 1983	: 52	: 12,5
jeudi 8 septembre 1984	: 111	: 10,8
lundi 12 mars 1984	: 38	: 13,8
lundi 19 mars 1984	: 117	: 13,4

Tableau 6 .- Dates et caractéristiques hydrodynamiques

La station de Brimeux sert de station de jaugeage pour le calcul des débits et se localise légèrement en amont de Montreuil-sur-Mer.

Pour des raisons de prudence, la station 1, située au lieu-dit Haudique, a été reportée au pont d'Enocq, et ceci pour les cycles de marée de mars 1984. En effet, lors de la mission du 8 septembre, la station 1 s'est retrouvée complètement sous eau au moment de la pleine mer.



- CHAPITRE II -

PARAMETRES HYDROLOGIQUES

I - CARACTERISTIQUES DES EAUX DE LA MANCHE

I.1 - SALINITE ET TEMPERATURE

Les données disponibles (tableau 7) concernant les températures et les salinités proviennent du large du Cap Gris-Nez (C. QUISTHOUDT, communication écrite) et du large de la Canche (DEZONNAY, 1973 ; BENTLEY, ORANGE, 1983).

I.1.1 - Eté

Les salinités varient entre 32,6 et 33,9 ‰ à l'embouchure de la Canche. Au Cap Gris-Nez, elles oscillent autour de 34,4 ‰. Pour DEZONNAY (1973), les salinités varient en surface de 34,4 ‰ sur la frange côtière à 35,05 ‰ au bateau-feu de Bassurelle.

Les températures sont relativement élevées et oscillent entre 17° et 18° C au Cap Gris-Nez, et autour de 17,7° C à l'embouchure de la Canche. La colonne d'eau est assez homogène (tableau 7), puisque, de la surface au fond, on retrouve des valeurs de température et de salinité équivalentes. BRYLINSKI *et al.* (1984) le constatent également de par l'existence de turbulences provoquées par les courants de marée importants. Toutefois, DEZONNAY constate autour de l'embouchure de la Canche une zone bien individualisée : des coupes hydrologiques effectuées sur la colonne d'eau ont montré des "eaux de salinité affaiblie existant sous une couche plus salée". Pour lui, ceci semble être dû à des eaux chargées en éléments organiques dissous.

I.1.2 - Hiver

Les températures les plus basses se rencontrent durant les mois de février, mars et oscillent autour de 6° C, quelle que soit la zone, du Gris-Nez à l'embouchure de la Canche. Les salinités varient de 33,7 ‰ à 34 ‰ et diminuent à l'approche des émissaires.

DATE	: STATION:	COORDONNEES:	PROFONDEUR:	T° surf.:	T° fond	S surf.:	S fond
:	:	DECCA	(m)	(°C)	à 2 m du fond:	(‰)	(‰)
:	:	:	:	:	(°C)	:	:
28/10/82:	3	: I32 - E2	: 17	: 13°8	: -	: 33,34	: 33,36
24/11/83:	3	: I32 - E2	: 20	: -	: 9°8	: 34,08	: 34,07
	:	: I32 - EO,7:	: 27	: -	: 9°9	: 34,14	: 34,14
13/03/84:	3	: I32 - E2	: 24	: 6°4	: 6°1	: 33,88	: 33,94
10/04/84:	3	: I32 - E2	: 22	: 6°9	: 6°9	: 34,16	: 34,20
	:	: I32 - EO,7:	: 30	: 7°	: 7°1	: 34,49	: 34,57
22/06/84:	3	: I32 - E2	: 23	: 13°7	: 13°7	:	:
	:	: I32 - EO,7:	: 31	: 13°2	: 13°	:	:
	:	:	:	:	:	:	:

Tableau 7 .- Températures et salinités relatives au Cap Gris-Nez.

I.2 - LES VENTS

Le vent est responsable de la formation des houles au large et sur le littoral, ainsi que des transports éoliens, en particulier dans les zones dunaires et intertidales. Les vents ont été répertoriés au bateau feu de Bassurelle (50°32'50" Nord et 0°57'48" Est), sur une période de deux ans (1982-1983) et au Touquet sur une période de trois ans (1981, 1982, 1983) (figures annexe V). Les données du bateau-feu font défaut pour octobre 1982, ainsi que du 10 mai 1983 à fin novembre 1983.

- Régime des vents en Manche, au bateau-feu Bassurelle.

Les vents violents supérieurs à 9 m/s sont très fréquents et se partagent en deux directions privilégiées opposées de Sud-Ouest et de Nord-Est, pour l'année 1982. Cette prédominance des vents en deux secteurs est due à l'orientation de l'axe de la Manche, canalisant les vents. En 1983, ce fait n'apparaît pas durant la période des mesures. Toutefois, les vents de Sud-Ouest sont largement prédominants comme l'indique le tableau 8.

ANNEE :	> 9 m/s		> 5 m/s	
	220° à 320° en %	160° à 40° en %	220° à 320° en %	160° à 40° en %
1983 :	32,4	9,7	47	20,2
1982 :	20	9,4	38	25,4

Tableau 8 .- Répartition des vents en Manche.

Les vents supérieurs à 9 m/s et de secteur Sud-Ouest sont particulièrement importants durant les mois de décembre et janvier. Par contre, ceux de Nord - Nord-Est sont prépondérants au cours des mois d'avril et juillet 1982.

- Régime des vents au Touquet.

Pour l'ensemble de la période regroupant les années 1981 à 1983, les vents les plus fréquents soufflent de deux secteurs (figure 45) :

- . Sud-Ouest à Ouest (plus de 25 % du total des observations) :
- . Sud-Est (environ 24 % du total des observations).

En considérant les vents supérieurs à 5 m/s on remarque :

- . un secteur maritime de Sud-Ouest à Nord-Ouest regroupant environ 23 % des vents ;
- . un secteur terrestre de Sud-Est à Nord-Est regroupant environ 12 % des vents (tableau 9).

Les vents supérieurs à 9 m/s sont moins fréquents qu'en Manche, à l'emplacement de bateau-feu de Bassurelle.

Les vents d'Ouest à Sud-Ouest soufflent toute l'année, mais leur fréquence est plus élevée en décembre et janvier, parfois en juin. C'est au cours de ces mois d'hiver qu'ils soufflent avec le plus de violence. Les vents du Nord sont plus fréquents en février et parfois en juillet et août.

En résumé, les vents dominants sont de Sud-Ouest et leur intensité maximale caractérise les saisons hivernales, tandis qu'un calme relatif marque les saisons estivales. Les roses des vents (annexe V), différentes entre 1981 et 1982, attestent, d'une année sur l'autre, de la variabilité saisonnière.

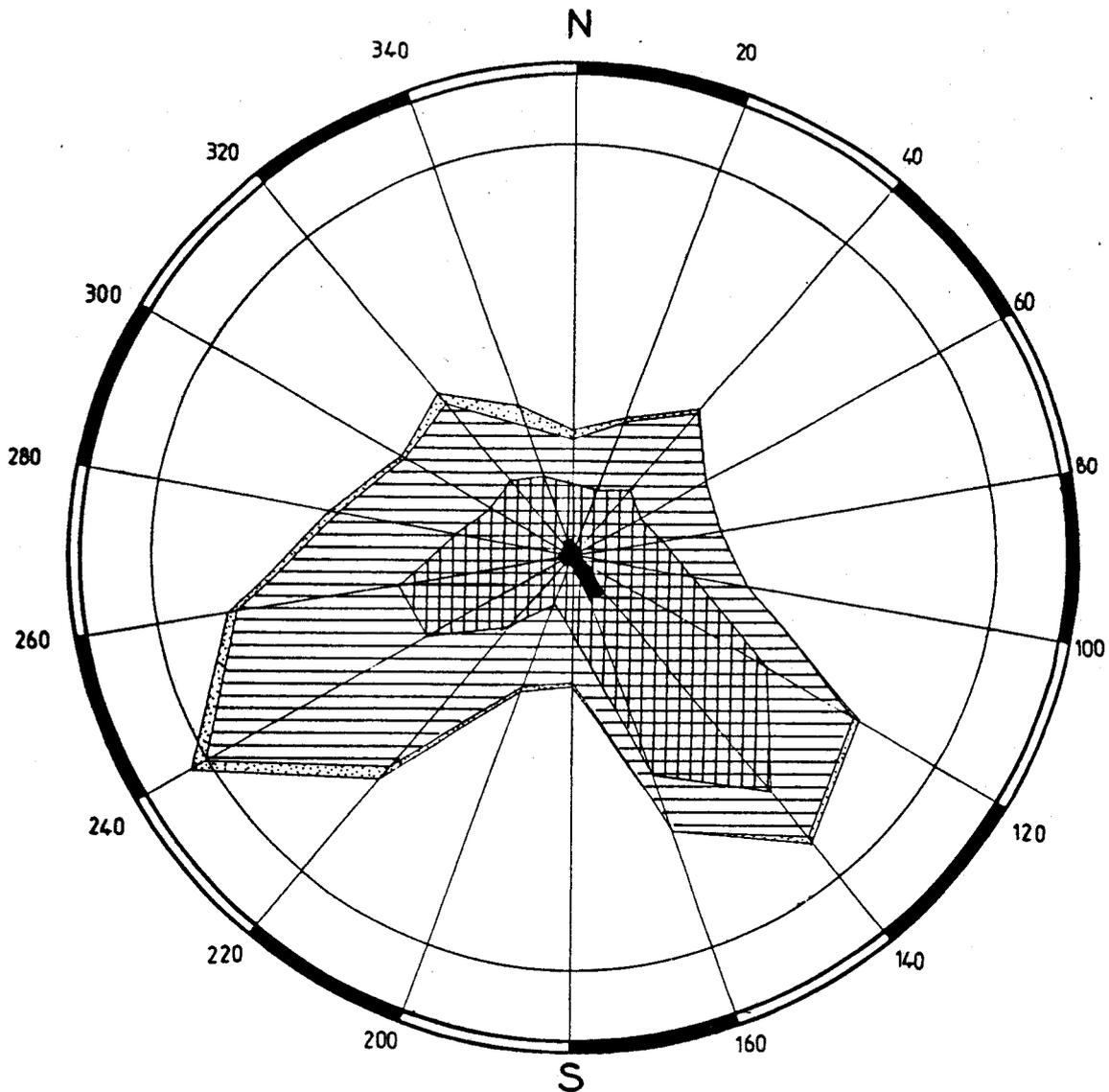


Figure 45 : FREQUENCE DES DIRECTIONS DES VENTS AU TOUQUET (1981-1982-1983)

ANNEE:	> 9 m/s		> 5 m/s	
	220° à 320°	160° à 40°	220° à 320°	160° à 40°
	en %	en %	en %	en %
1981 :	1,5	0,3	23	12
à :				
1983 :				
1981 :	1,5	0,4	24	10,4
1982 :	1,2	0,5	21,2	14
1983 :	1,7		25	11
:				

Tableau 9 .- Répartition des vents au Touquet.

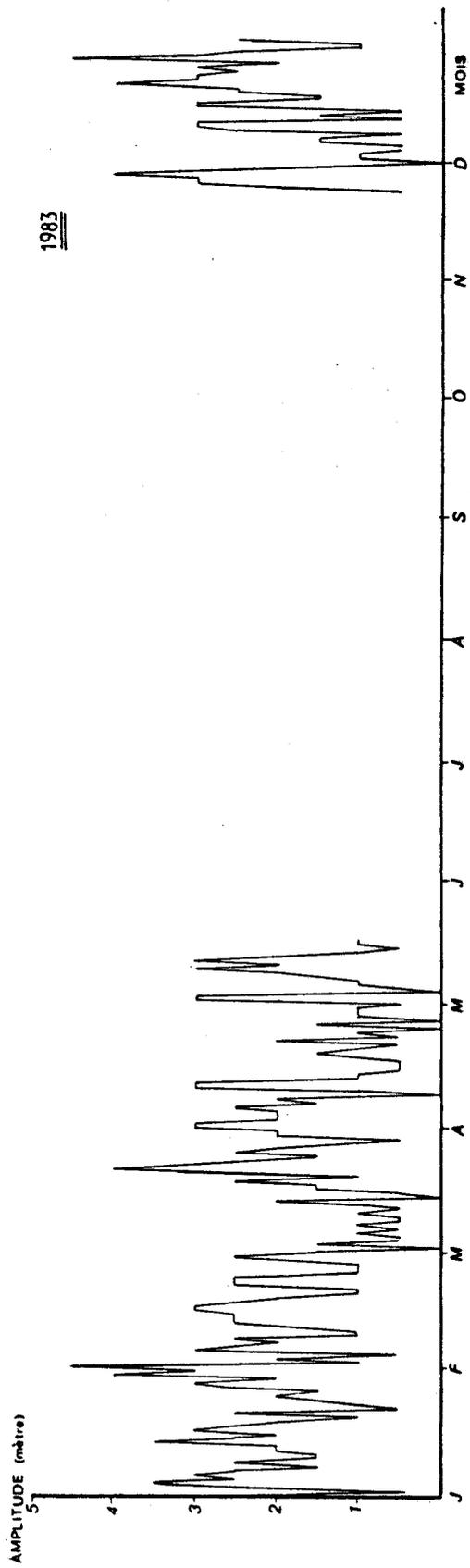
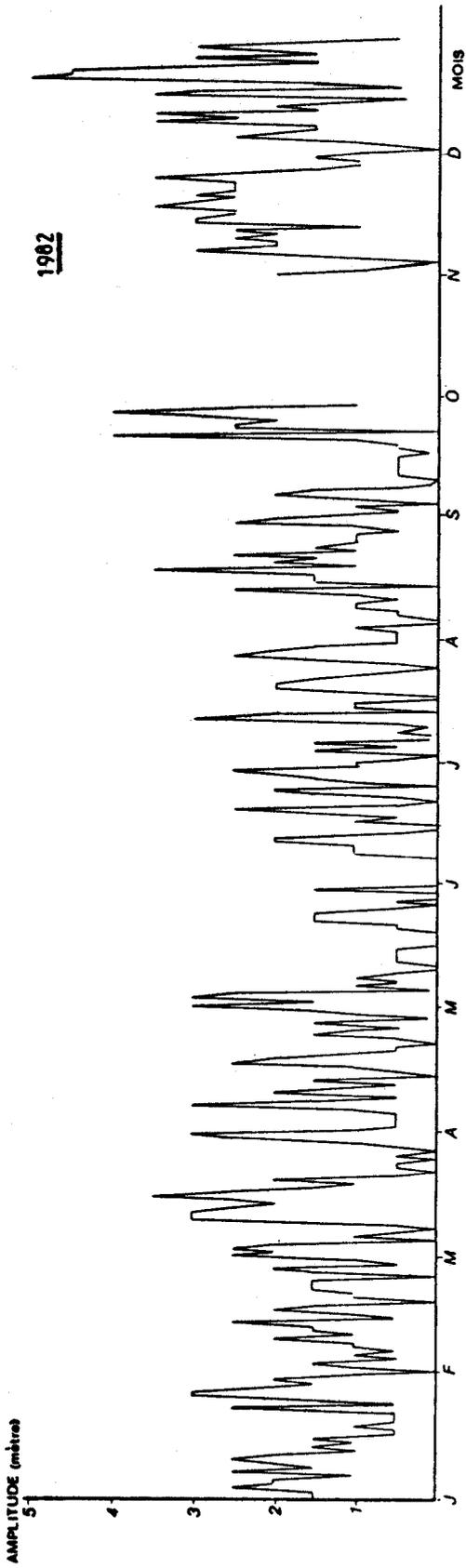


Figure 46 : AMPLITUDE DES HOULES AU BATEAU-FEU DE BASSURELLE

I.3 - LA HOULE

I.3.1 - Au bateau-feu de Bassurelle

Le régime des houles est mal connu en face de la Canche. On dispose d'une source d'informations au large, celle du bateau-feu de Bassurelle. Il est situé au large, sur la bassure de Baas (figure 7), au droit de l'embouchure de la Canche. Les mesures ont été effectuées sur une durée de deux ans (1982-1983).

La période moyenne des houles s'échelonne entre 3 et 5 secondes (figure 46). Les amplitudes présentent des valeurs de 4 m souvent atteintes. Les directions principales de la houle sont d'Ouest à Sud-Ouest (figure 47) (Ouest : 7,4 % ; Sud-Ouest : 11,4 % et Ouest-Sud-Ouest : 8,9 %), et sont calquées sur celles des vents. La période de novembre à décembre est caractérisée par des houles dépassant souvent les 3 m d'amplitude. Malheureusement, de nombreuses données font défaut, et nous ne pouvons comparer les résultats entre les deux années.

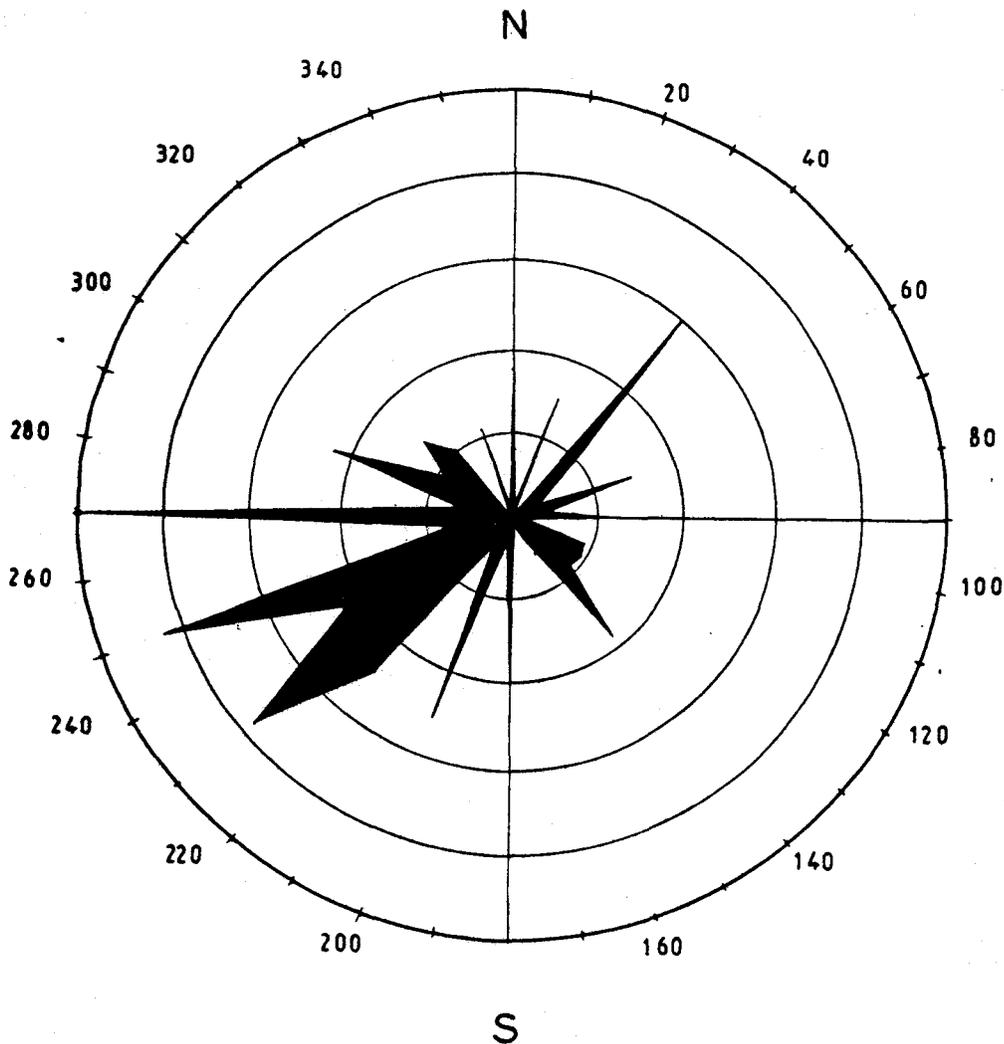


Figure 47 : PROVENANCE DE LA HOULE OBSERVEE AU BATEAU-FEU DE BASSURELLE (1982 - 1983)

I.3.2 - Au Touquet

Les données disponibles sont peu nombreuses. Relatives à l'orientation de la houle mesurée par un radar de faible portée, elles montrent l'importance des houles d'Ouest (figure 48).

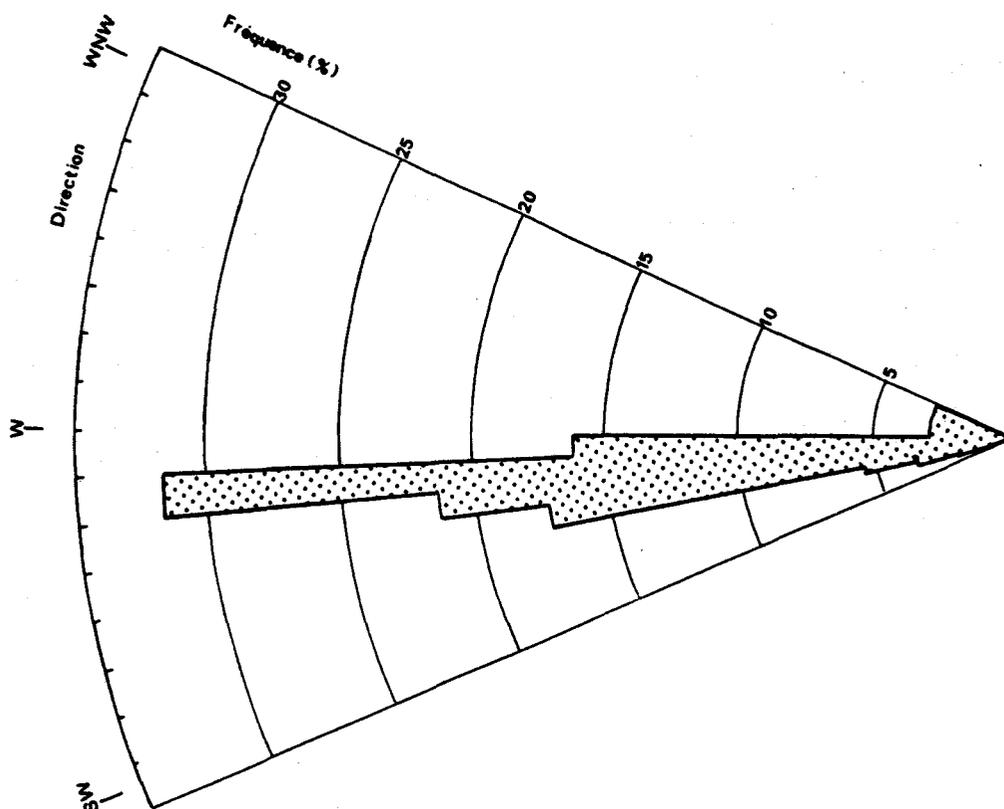


Figure 48 : **PROVENANCE DE LA HOULE OBSERVEE AU TOUQUET**

348 observations (du 25/2/66 au 28/4/67)

(d'après BONNEFILLE et ALLEN, 1970)

II - PARAMETRES HYDROLOGIQUES DE LA CANCHE

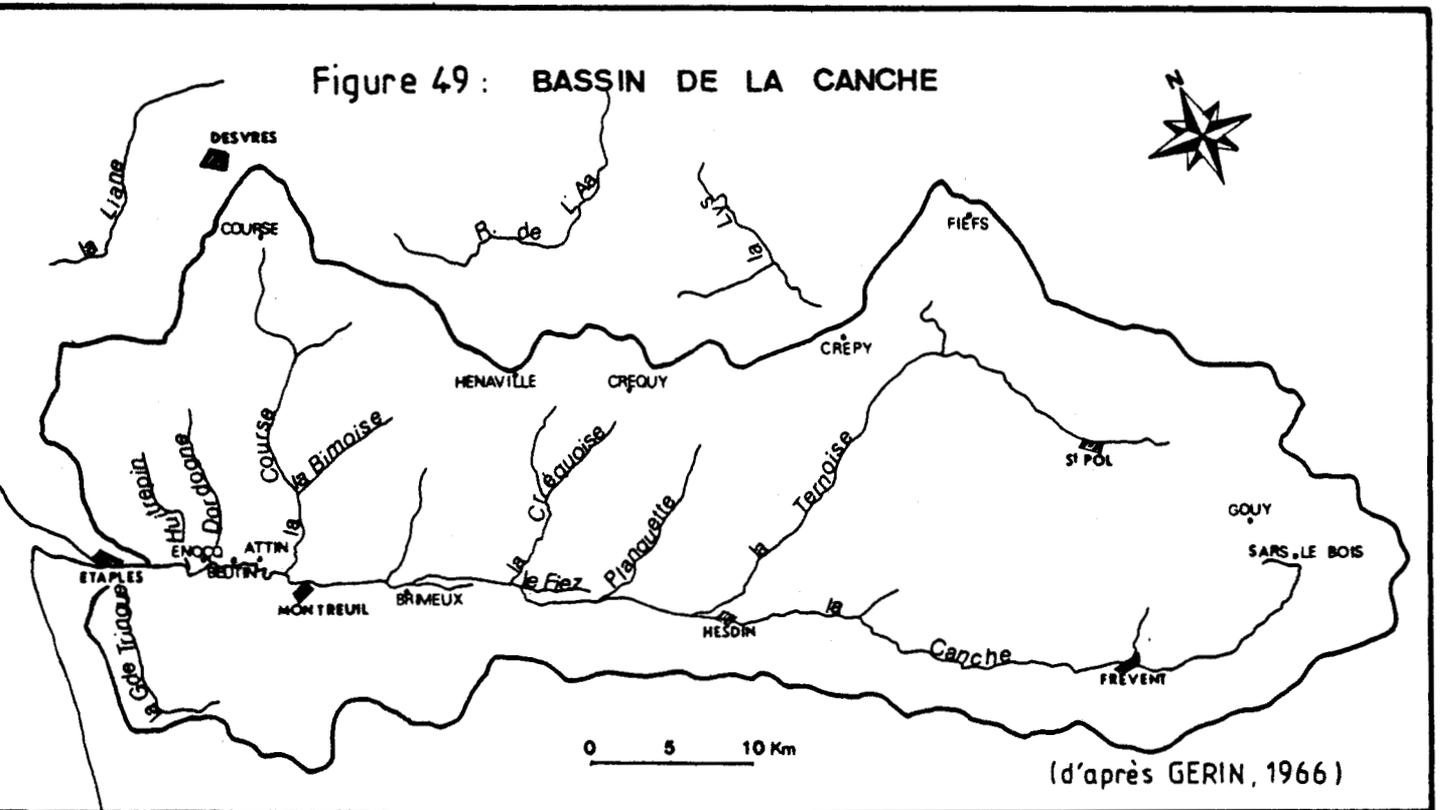
II.1 - CARACTERISTIQUES DU BASSIN VERSANT

La Canche, au long de son cours, draine un bassin versant de 1 274 km² (VERDEVOYE, PELLETIER, 1980). Après fermeture à la station de jaugeage de Brimeux, en amont de Montreuil-sur-mer, le bassin couvre une superficie de 894 km² (Service Hydrologique Centralisateur de Bassin Artois-Picardie).

La bordure nord du bassin est plus élevée que la bordure sud. Les altitudes ne sont pas très élevées et atteignent des valeurs de 191 m au Nord de la Ternoise, et de 5 m vers Enocq (≈ 14 km de la mer). La pente moyenne de la Canche de Sars-le-Bois à Beutin (figure 49) est de l'ordre de 1,3 ‰. La pente moyenne de ses affluents est beaucoup plus forte (tableau 10).

Cours d'eau	:Longueur de la rivière (km)	:Altitude des sources (m)	:Altitude des confluences	:Pente : ‰	:Débit moyen : m ³ /s
Ternoise	: 37	:St Michel 95	:Hesdin	22 : 2,2	: ≈ 4,70
Planquette	: 12	:Planque 72	:Contes	18 : 4	: 0,50
Créquoise	: 14	:Créquy 100	:Beaurainville	15 : 5	: 1,10
Course	: 22	:Course 100	:Neuville	5 : 4	: 2,70
Dordogne	: 8	:Cormont 40	:Enocq	5 : 4	: 0,12
Huitrepin	: 7,5	:Frencq 35	:Tubersent	5,5 : 3	: 0,25
:	:	:	:	:	:

Tableau 10 .- Caractéristiques des affluents de la Canche. (d'après BAQUET, 1982).



II.2 - DÉBIT DU FLEUVE

Le bassin versant reçoit des précipitations relativement abondantes (850 mm/an) pour la région Nord, qui est soumise à l'influence océanique. Les estimations de débit proviennent de la Direction Générale de la Navigation Nord - Pas-de-Calais et sont estimés à la station de Brimeux.

La Canche procure un débit moyen de $12 \text{ m}^3/\text{s}$. Selon les mesures du B.R.G.M. et de la Première Circonscription Electrique (dans BONNEFILLE et ALLEN, 1970), le débit de la Canche à Etaples est de 1,7 fois celui de Brimeux. Son régime est assez régulier (figure 50) et n'offre que peu de variations annuelles. Les débordements intempestifs de la Canche en amont d'Etaples résultent de la remontée de l'intrusion saline, lors des coefficients de vive-eau, qui repousse les eaux du fleuve vers l'amont. Cette régularité est assujettie au climat, ainsi qu'à la nature des terrains rencontrés. En effet, la nappe d'eau souterraine stocke l'eau infiltrée dans le sol qui est constitué de terrains crayeux d'âge Sénonien et Turonien supérieur. Cette eau n'atteint les cours d'eau qu'après un long cheminement, leur évitant des étiages très marqués. MANIA (1980) essaie de confronter les débits de la Canche avec les fluctuations de la nappe phréatique qui régularise le débit du fleuve. Par l'analyse de divers hydrogrammes, son étude montre les relations directes entre le débit de la Canche et les réservoirs crayeux fissurés du bassin versant.

Les nappes phréatiques amortissent les périodes d'étiage par une vidange saisonnière, et les apports brutaux issus des précipitations par une recharge des réservoirs souterrains.

On a observé ce phénomène lors des diverses missions effectuées sur la Canche. Les mois précédant les journées du 20 juillet et du 8 septembre 1983, étaient plus pluvieux que ceux précédant les journées du 12 et 19 mars 1984. Toutefois, la Canche présentait un débit plus important durant cette dernière période.

Les débits présentent une légère baisse en août et septembre. Les débits de crue ont lieu en automne et hiver. La probabilité de rencontrer des débits d'étiage et de crue sur de plus ou moins longues périodes a été donnée par VERDEVOYE et PELLETIER (1980). Nous la rappelons ci-après :

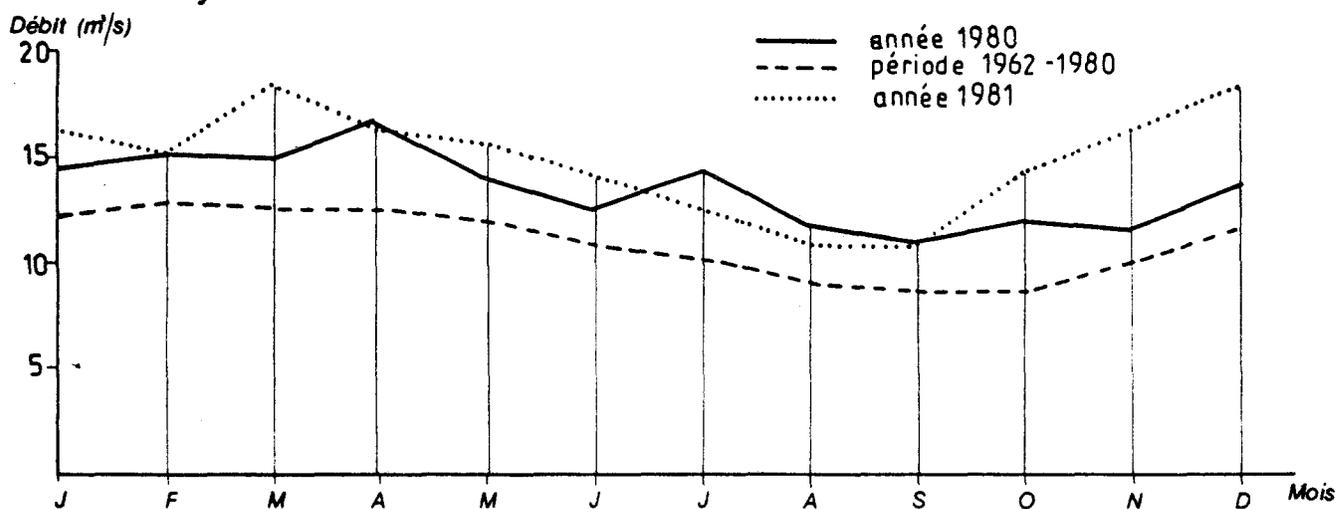
- Débit d'étiage :

- 10 jours consécutifs entre début septembre et début novembre
- 30 jours consécutifs entre mi-août et fin novembre
- 90 jours consécutifs entre mi-juillet et début décembre

- Débit de crue :

- 10 jours consécutifs entre début décembre et fin février
- 30 jours consécutifs entre début décembre et fin mars
- 90 jours consécutifs entre le 10 décembre et le 20 mai

Figure 50 : DEBITS OBSERVES A BRIMEUX



III - CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES DE L'ESTUAIRE

III.1 - INTRUSION SALINE

La position du front de salinité varie en fonction du coefficient de marée et du débit fluvial.

III.1.1 - Evolution longitudinale de la salinité

III.1.1.1 - Mesures effectuées à points fixes

Les campagnes à points fixes ont permis de suivre les variations de la salinité au cours d'un cycle de marée. Les figures 51, 52 et 53 montrent les variations de la salinité aux différentes stations de l'estuaire pour divers coefficients de marée. Les vitesses de courants reportées à ces stations correspondent à un coefficient de vive eau.

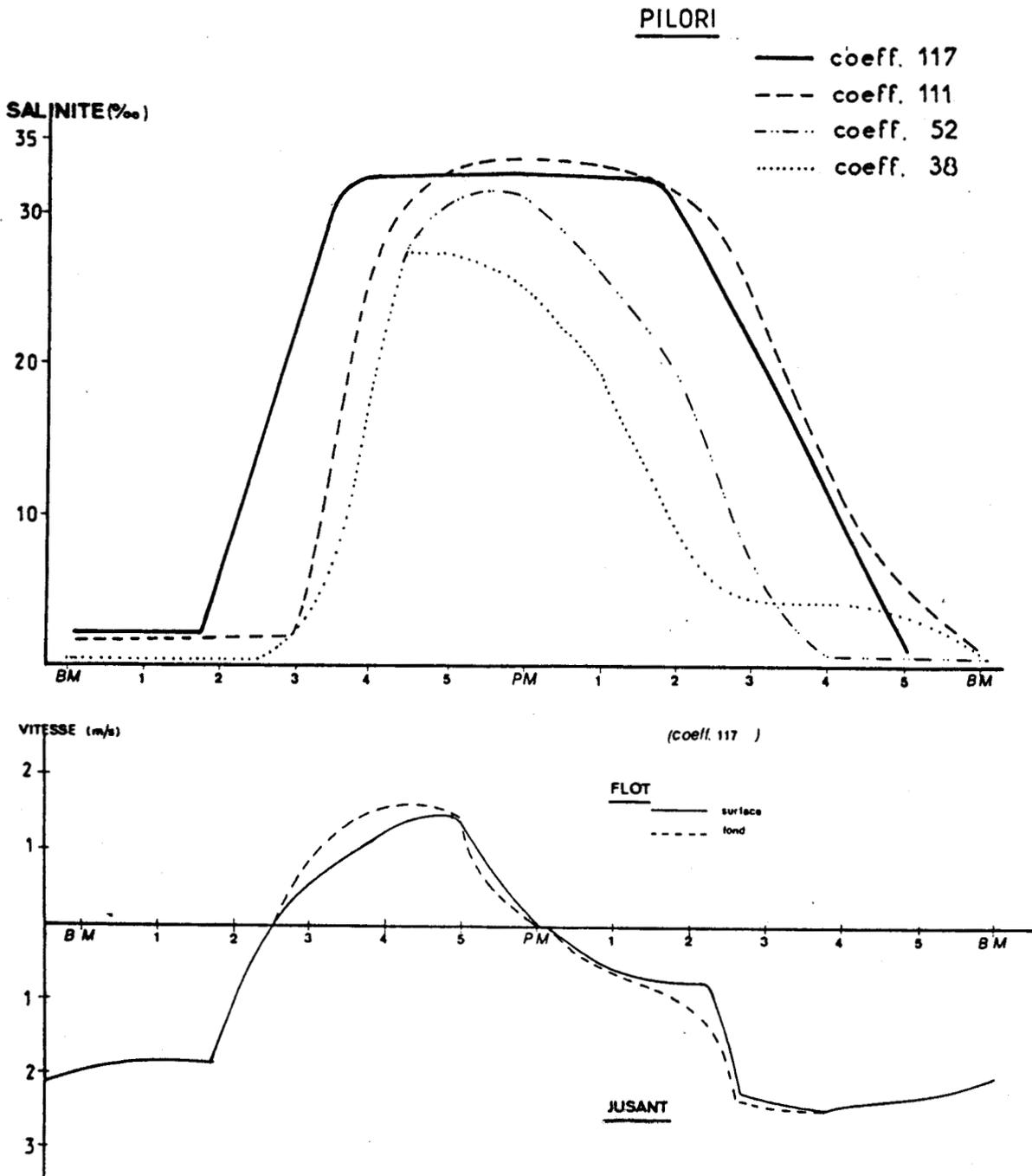


Figure 51: EVOLUTION DE LA SALINITE ET DES VITESSES DE COURANT

- En marée de vive eau

Pilori - Hippodrome

Les variations de salinité sont importantes et rapides au cours de la marée. Les salinités passent de 1 ‰ à 33 ‰. A pleine mer, les eaux sont fortement salées et non stratifiées sur une même verticale. Les eaux salées se déplacent en masse et non en couches. A P. M. + 2, la salinité décroît très rapidement pour ensuite osciller autour de 1 ‰ à basse mer.

Etaples

Les variations de salinité sont aussi importantes qu'aux stations aval. Il existe un léger décalage entre le "coup de flot" et l'arrivée des premières eaux salées. Une stratification des eaux existe en début de perdue jusqu'à P. M. + 2.

- En marée de morte eau

Pilori

Les variations de la salinité sont importantes au cours de la marée. Les eaux ne sont toujours pas stratifiées.

Hippodrome

Les variations de la salinité sont nettement atténuées en cette station. Avec des coefficients de 38, l'intrusion saline arrive à sa limite amont.

Conclusion :

Les mesures à points fixes permettent de dégager les résultats suivants :

. une rapide variation de la salinité liée aux faibles débits et l'importance du marnage ;

. une importante variation de la salinité qui passe de 1 ‰ à basse mer à 33 ‰ à pleine mer ;

. pas de stratification dans la tranche d'eau, si ce n'est à la station d'Etaples en début de jusant, et autour de la pleine mer (coefficient 111).

III.1.1.2 - Comparaison entre salinité et vitesse de courant au cours d'un cycle de marée de vive-eau (figures 51, 52, 53)

Le déplacement du front de salinité durant un cycle de marée est lié aux courants de flot et de jusant. Le début du montant est caractérisé par un accroissement subit des salinités. Elles passent très rapidement de ≈ 0 à 34 ‰ au Pilori, à hauteur de l'Hippodrome et d'Etaples. Ces deux phénomènes ne sont cependant pas simultanés, l'augmentation des salinités à Etaples commençant 15' environ après celle des vitesses de flot. Ce décalage est particulièrement visible à cette station où les mesures ont été effectuées régulièrement, à courts intervalles, au contraire des stations de l'Hippodrome et du Pilori.

III.1.2 - Regroupement des résultats et interprétation quantitative

III.1.2.1 - Gradient longitudinal des salinités

Le gradient longitudinal matérialise l'étendue de l'intrusion saline dans l'estuaire. Il peut être appréhendé en considérant les profils longitudinaux de salinité établis au cours d'un cycle de marée. Les isohalines standards (0,5 ; 1 ; 10 ; 15 ‰, etc ...) ont été calculées à partir de salinités relevées aux différents points fixes. Les figures 54 et 55 présentent les conditions opposées (vive-eau, morte-eau) de la stratification saline dans l'estuaire au cours d'un cycle de marée. Les isohalines sont légèrement plus espacées en coefficient de vive-eau

HIPPODROME

- coeff. 117
- - - coeff. 111
- · - · coeff. 52
- coeff. 38

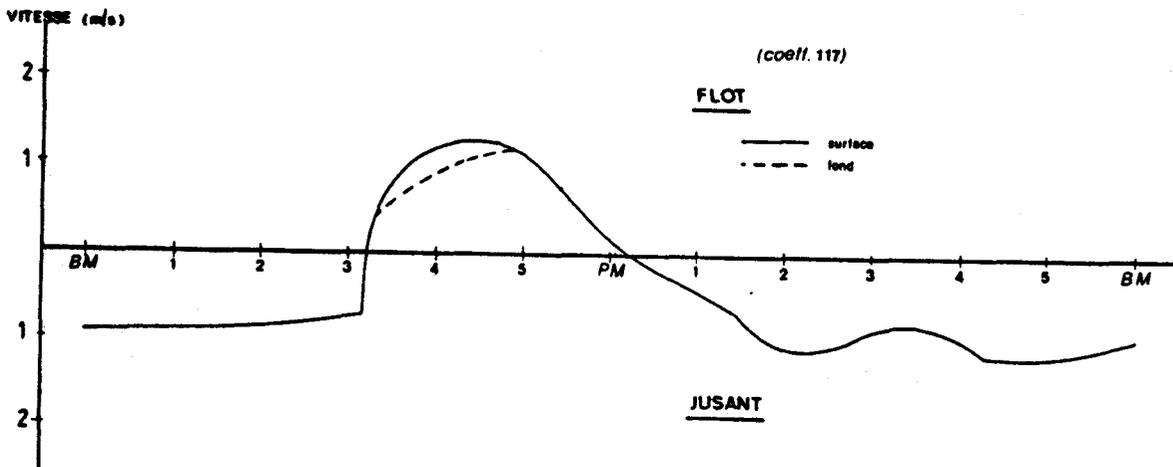
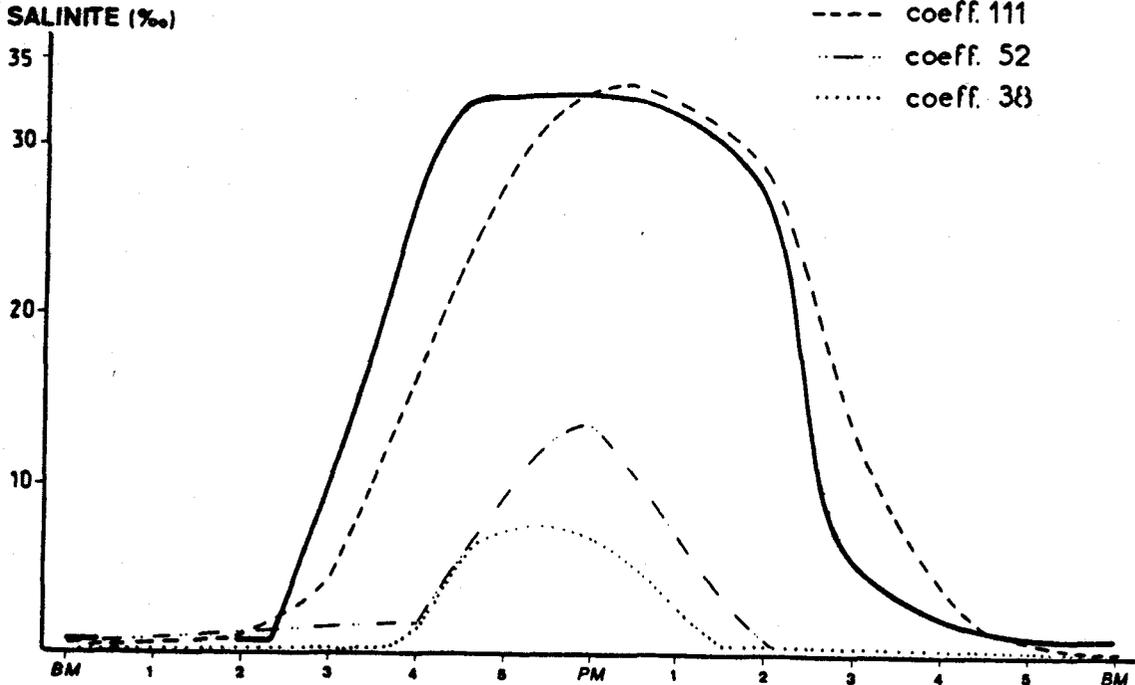


Figure 52. EVOLUTION DE LA SALINITE ET DES VITESSES DE COURANT

qu'en coefficient de morte-eau. Pour un même débit fluvial, et à coefficient différent, les isohalines se translatent en ne gardant pas le même espacement. En vive-eau, nous constatons un resserrement des isohalines avec le courant de flot, au contraire du baissant, plutôt favorable à une dilatation de ces dernières. Il n'y a pas ou très peu de stratification saline, l'épaisseur d'eau se déplaçant en masse. La limite du front de salinité est également liée aux coefficients de marée.

III.1.2.2 - Evolution de la salinité depuis une vingtaine d'années

Une étude sur la détermination de la zone de passage eaux salées - eaux douces a été réalisée en 1958 par la Direction Générale des Eaux et Forêts (LAURENT, 1958). Les dosages de chlorure ont été effectués suivant la méthode de MOHR et exprimés en gramme de $Cl_2/1$. Pour avoir une appréciation succincte de la pénétration saline (tableau 10), les salinités ont été calculées à partir des chlorinités, par l'intermédiaire des chlorosités à l'aide de la formule de THOMPSON et VAN CLEVE.

$$\text{Chlorinité : } Cl \text{ ‰} = 0,008 + 0,9998 Cl_v - 0,001228 Cl_v^2$$

La salinité (S ‰), correspondant à une chlorinité donnée (Cl ‰) est la grandeur définie par la formule :

$$S = 0,03 + 1,805 Cl$$

Tableau 11 .- Résultats de la mission du 14 octobre 1958. Coefficient 116 ; forte crue de la Canche ; P. M. : 12h53 ; B. M. : 20 h ; vent de secteur ouest à sud-ouest.

	<u>13 h 30</u>	<u>20 h</u>
<u>ETAPLES</u> Pont de chemin de fer	<u>surf.</u> T° = 13°2 13,13 g $Cl_2/1$ = 23 ‰ <u>fond</u> T° = 14°8 17,75 g $Cl_2/1$ = 32 ‰	<u>surf.</u> T° = 12°8 0,342 g $Cl_2/1$ = 0,65 ‰ <u>fond</u> T° = 12°8 0,342 g $Cl_2/1$ = 0,24 ‰
<u>ENOCQ</u>	<u>surf.</u> T° = 12°5 1,41 g $Cl_2/1$ ≈ 2,6 ‰ <u>fond</u> T° = 10°8 2,49 g $Cl_2/1$ ≈ 4,5 ‰	<u>surf.</u> T° = 12°8 0,01 g $Cl_2/1$ ≈ 0,06 ‰ <u>fond</u> T° = 12°5 0,018 g $Cl_2/1$ ≈ 0,06 ‰

A coefficient 85, le front de salinité de remonte pas à Enocq 20 juin 1958 ; vent de secteur ouest.

	<u>Surface</u>	<u>Fond</u>
<u>ETAPLES</u> Pont de la route nationale	24,7 ‰	24,9 ‰
<u>3,4 km en amont</u> <u>d'ETAPLES</u>	0,435 ‰	1,03 ‰
<u>ENOCQ</u> Pont	0,057 ‰	0,057 ‰

ETAPLES

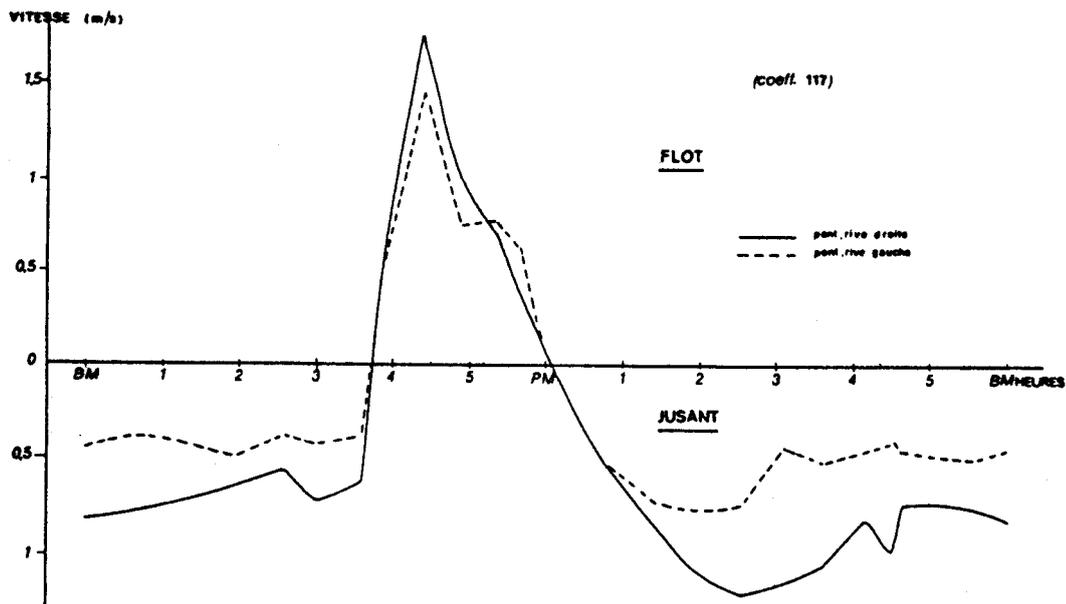
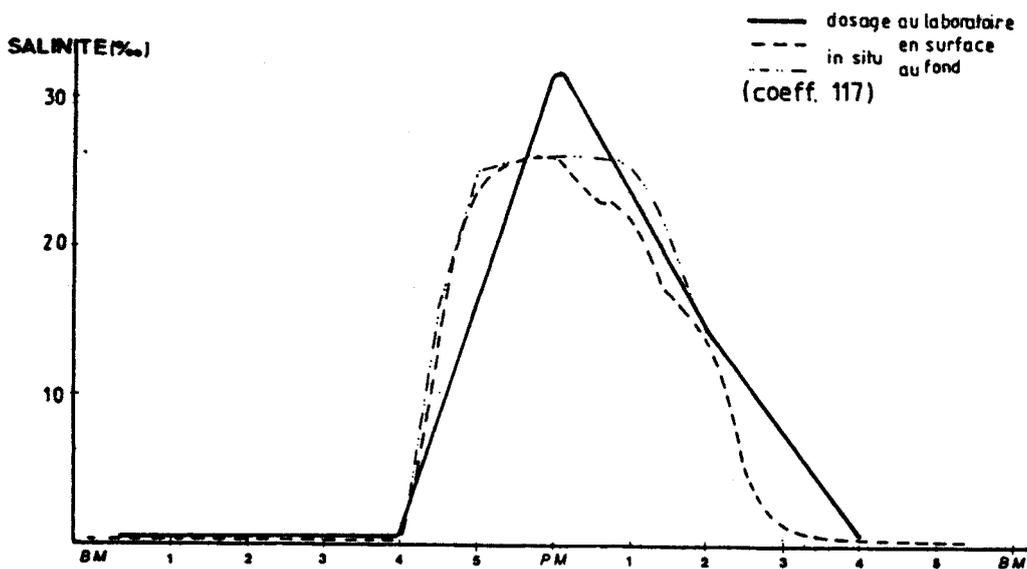
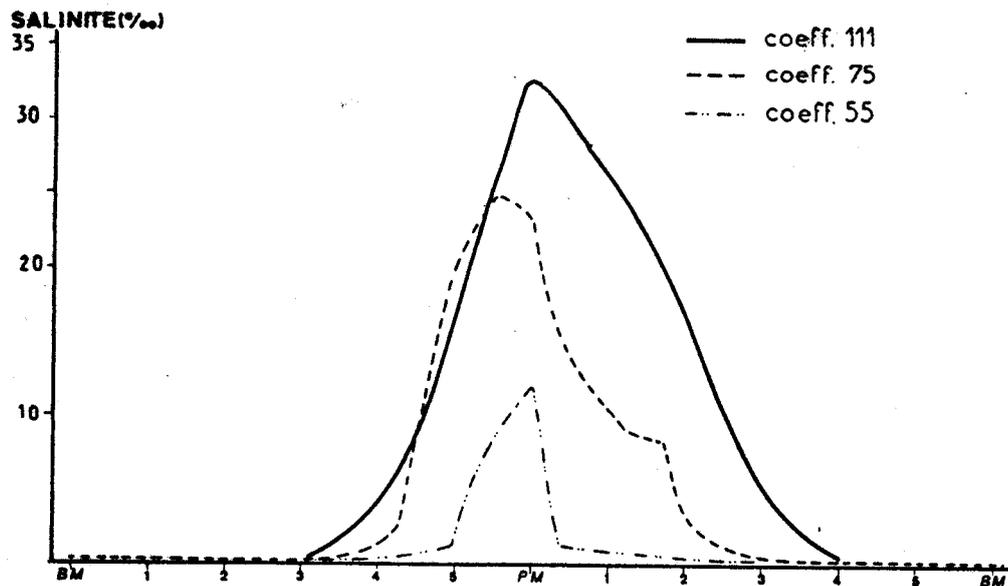


Figure 53: EVOLUTION DE LA SALINITE ET DES VITESSES DE COURANT

A Enocq, une légère stratification saline (tableau 11) apparaît et présente des valeurs voisines de 2,6 ‰ en surface et 4,5 ‰ au fond. Les dernières valeurs sont légèrement plus élevées qu'à l'heure actuelle à la station d'Haudique (3,7 ‰), située à environ 2 km en aval. La stratification des eaux résulterait à la fois de l'influence plus prononcée de la marée à l'intérieur des terres et au débit exceptionnel non chiffré mais mentionné à cette période. La stratification saline plus marquée se retrouve également à Etaples au pont de chemin de fer. Ces caractéristiques se retrouvent actuellement dans les autres estuaires (Gironde, Loire, Seine, ...).

Au coefficient de marée 85, la salinité ne remonte plus à Enocq, mais seulement aux environs de la station d'Haudique (1 ‰).

Depuis 26 ans, l'intrusion saline présente, à fort coefficient, une diminution de sa pénétration d'environ 3 km.

III.1.2.3 - Salinités minimale et maximale dans l'estuaire

L'ensemble des mesures effectuées aux points fixes permet de montrer l'évolution des salinités minimale et maximale d'aval en amont de l'estuaire. Entre la station du Pilori et celle d'Enocq, la salinité varie de 33,4 ‰ à 0,3 ‰ (figure 56). Les variations de salinité sont très importantes au Pilori au cours de la marée, allant de 33,5 ‰ à moins de 0,5 ‰.

Les salinités sont à peu près constantes jusqu'à Etaples. En amont de ce point, les salinités diminuent très rapidement. Nous pouvons remarquer que la stratification saline est quasi inexistante entre la surface et le fond. Il existe quel que soit le coefficient de marée, un brassage très important des eaux.

III.1.2.4 - Limite amont-aval du front de salinité

Ce front de salinité correspond, par convention, à l'isohaline 0,5 ‰. Sa position dépend classiquement du débit fluvial et du coefficient de marée. Toutefois, comme la Canche présente un débit assez régulier tout au long de l'année, la position du front de salinité varie principalement selon les coefficients de marée.

Lors de marées de morte eau (coefficient 40), le front de salinité à pleine mer se situe à la limite de la station Hippodrome.

Lors de coefficients de 65, ce front se déplace jusqu'à environ 3 km en amont du Pont d'Etaples.

Avec des marées de vive eau, le front de salinité remonte légèrement en aval de la station d'Enocq.

Au total, entre morte-eau et vive-eau, le front de salinité se déplace sur une distance d'environ 10 km.

En résumé, on constate une diminution de l'intrusion saline de 3 km environ depuis 1958. Cette migration vers l'aval est liée à l'ensablement de l'estuaire de la Canche, qui a pour conséquence de réduire le volume d'eau introduit par la marée. Les différents aménagements du chenal autour du port d'Etaples, dans le but de désensabler le chenal lors de la vidange de l'estuaire, ont conduit à développer l'aptitude du fleuve à contrarier la pénétration de l'intrusion saline.

Les différentes mesures effectuées permettent de constater les faits suivants :

- les variations de salinité sont toujours aussi importantes à l'aval, et s'atténuent très nettement à la station Hippodrome à faibles coefficients de marée ;

Figure 54: EVOLUTION LONGITUDINALE DE LA SALINITE AU COURS D'UN CYCLE DE MAREE DE VIVE-EAU

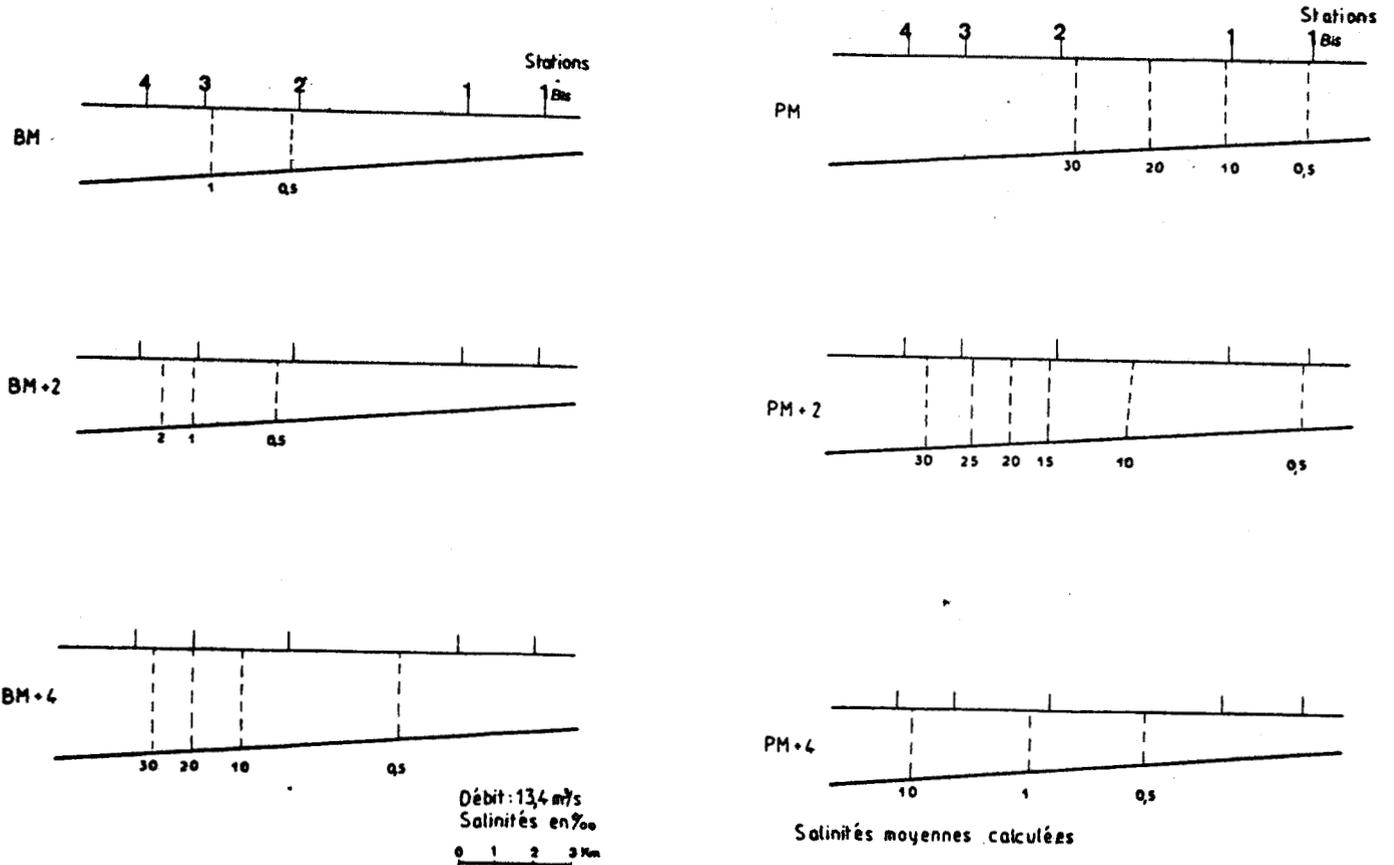
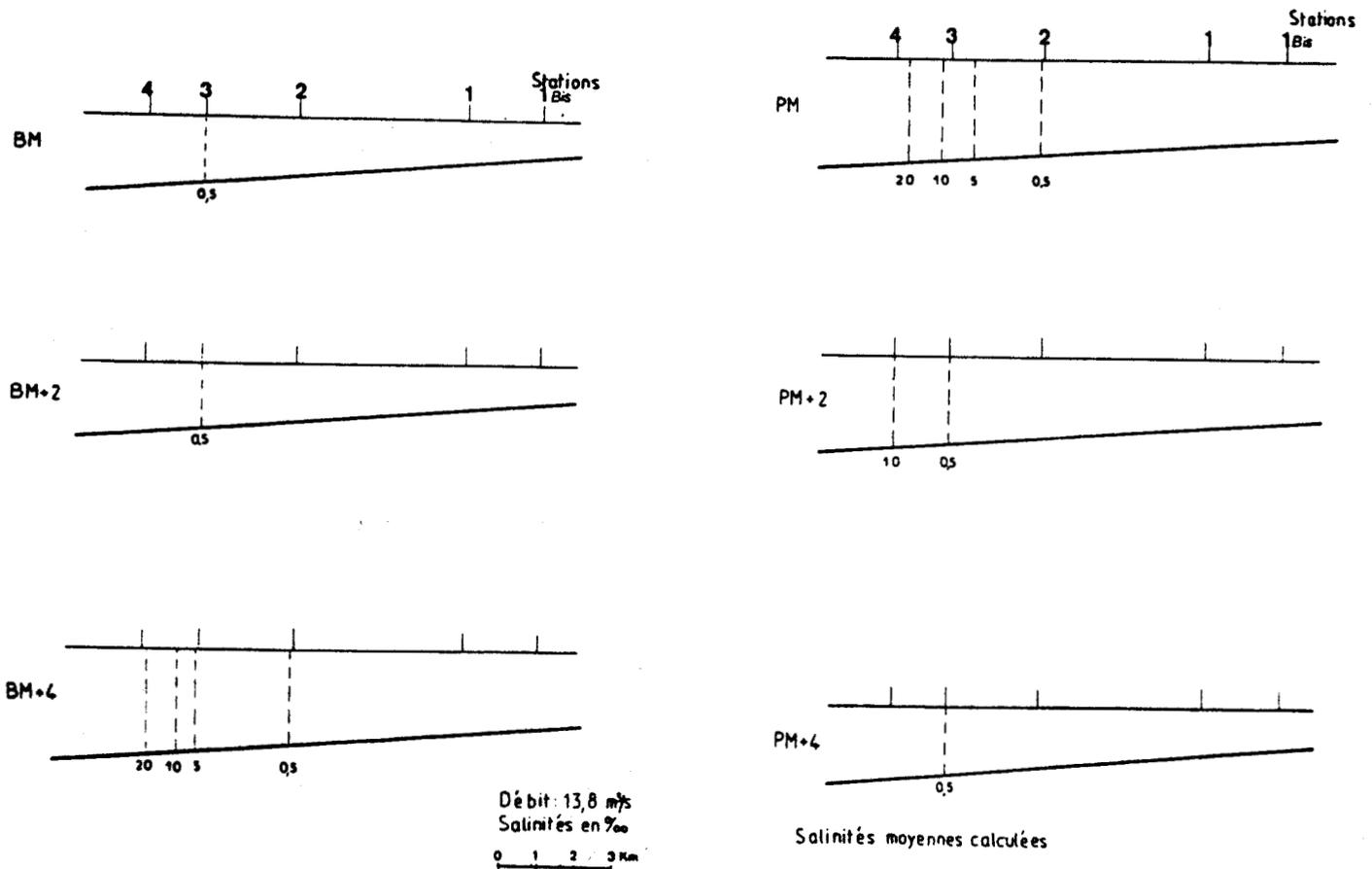


Figure 55: EVOLUTION LONGITUDINALE DE LA SALINITE AU COURS D'UN CYCLE DE MAREE DE MORTE-EAU



- . la pénétration saline se fait en masse, brusquement sur toute la tranche d'eau. Ce phénomène se retrouve dans les petits estuaires tel celui de la Sienne (GIRESSE, 1970) ;

- . en vive-eau, le maximum de salinité à Enocq est de 0,32 ‰, pour une salinité de 34 ‰ au Pilon ;

- . les isohalines sont pratiquement toujours verticales à fort et faible coefficient, à pleine mer ;

- . les isohalines sont plus espacées en vive-eau qu'en morte-eau ;

- . la position géographique de l'intrusion saline varie selon le coefficient de marée, le débit fluvial étant à peu près constant. Plus le coefficient de marée est important, plus l'intrusion saline pénètre à l'intérieur des terres.

On retrouve ce phénomène dans les estuaires de l'Orne (DUBRULLE, 1982) et de la Seine (AVOINE, 1981). Par contre, dans l'estuaire de la Loire (LE DOUAREC, 1978), l'intrusion saline dépend surtout du débit fluvial.

III.2 - TEMPERATURES

Les mesures de température des eaux effectuées durant les années 1982 et 1983 permettent de caractériser les régimes d'été par rapport à ceux d'hiver, et d'aborder la question de la stratification thermique.

III.2.1 - Opposition des régimes été-hiver

En mars, les eaux de l'estuaire sont plus chaudes que celles de la zone côtière (7°5 contre 5°9). Au cours du cycle de marée suivi au cours du mois de mars 1984 (figure 57), nous assistons à une baisse de la température, lors de la venue du flot, puis à une élévation avec le jusant.

En septembre, le schéma est inversé et les eaux fluviales sont plus froides que celles du littoral (figure 58) (12°5 contre 17°5).

Les relevés effectués au large des estuaires (BENTLEY et ORANGE, 1983 ; ORANGE, 1983) :

- . font ressortir, de manière logique, un maximum en juillet-août et un minimum en février ;

- . montrent que les variations thermiques des fleuves suivent les variations des eaux côtières (ORANGE, 1983) et celles de la Manche au large (figure 59) ;

- . indiquent qu'il existe un gradient amont-aval. A l'amont, les températures sont plus élevées en hiver et plus basses en été.

L'inversion des températures s'observe au printemps et en automne. Les cycles de marée montrent, en septembre 1983, un gradient amont-aval à pleine mer de 4° C sur 8,5 km. Au mois de mars, ce gradient est inversé et n'est plus que de 1°5 C sur 10,5 km (figure 60). ORANGE (1983) constate la même chose entre les mois de mai et de juillet 1982.

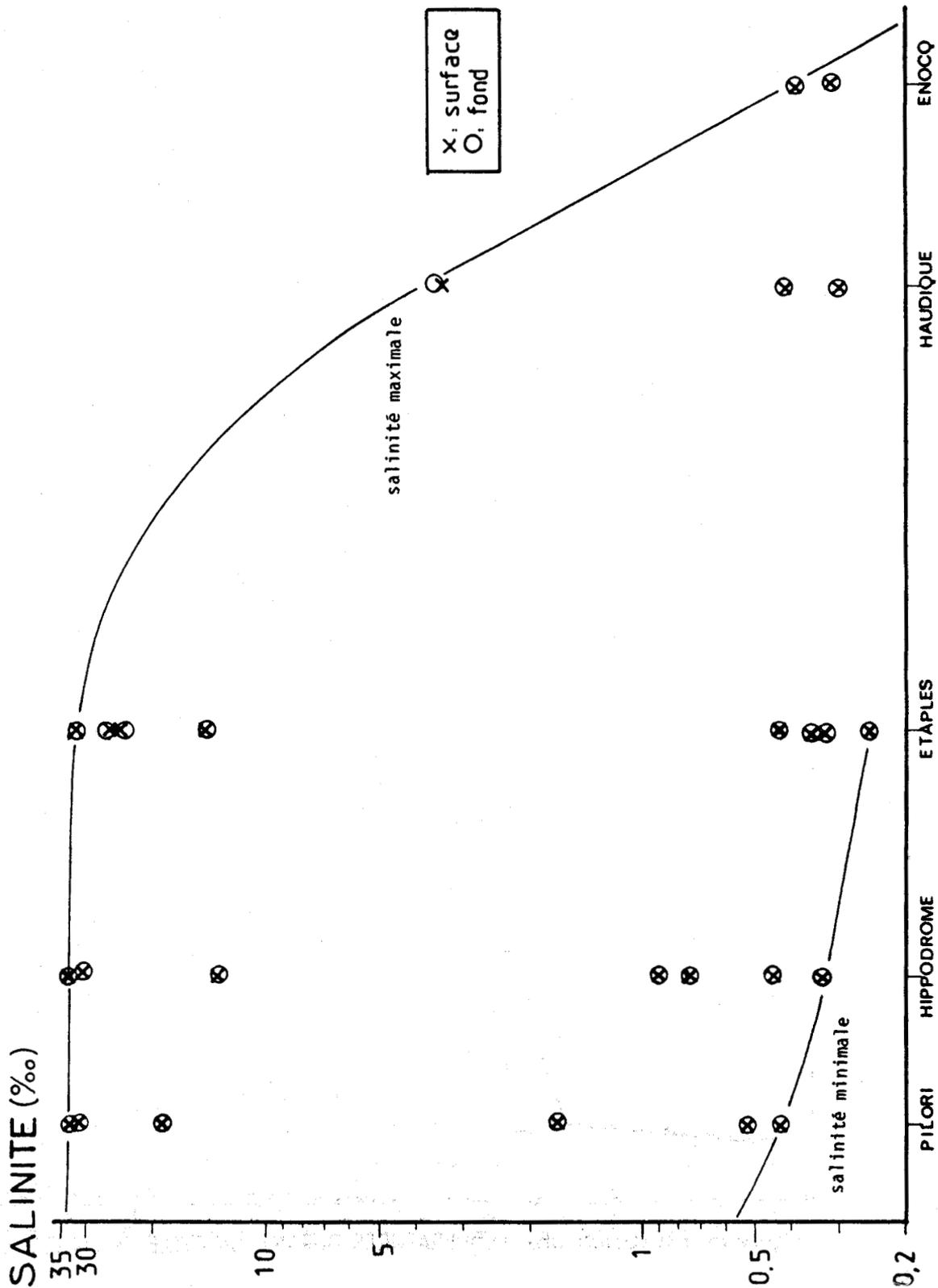
Pour BENTLEY (1984), ce phénomène résulte des importants échanges énergétiques entre les eaux côtières et les grandes surfaces intertidales, ainsi que d'un apport permanent d'eau douce froide.

III.2.2 - Stratification thermique

La stratification thermique verticale est inexistante. Elle détermine un estuaire bien mélangé durant les marées de vive eau. La faible épaisseur de la tranche d'eau et le marnage important induisent une bonne homogénéisation des eaux de l'estuaire.

Figure 56 SALINITES MINIMALES ET MAXIMALES OBSERVEES EN SURFACE ET

FOND AUX POINTS FIXES



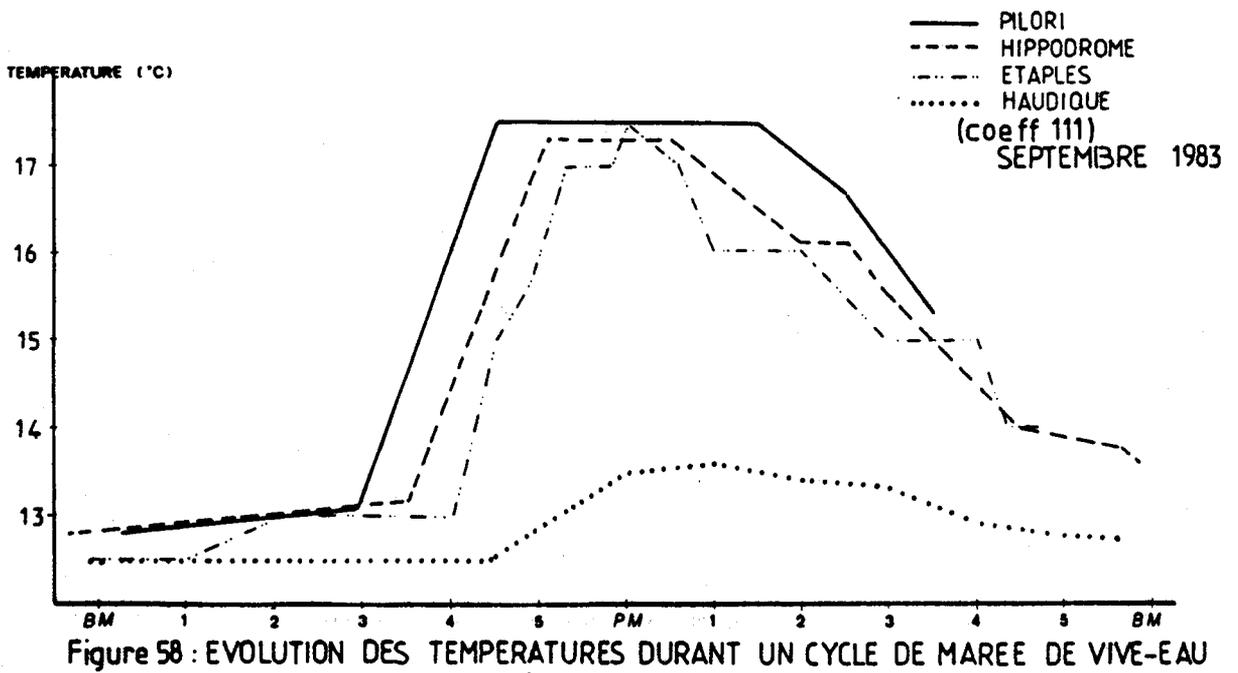
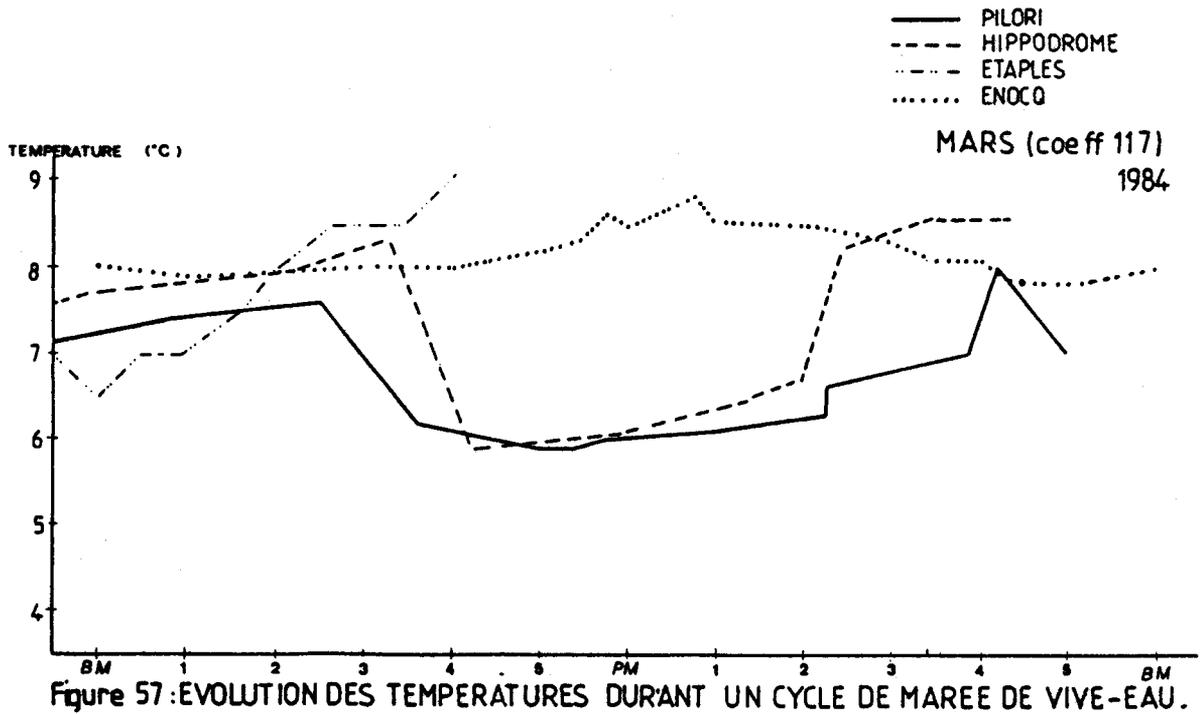


Figure 59: REPARTITION LONGITUDINALE DE LA TEMPERATURE

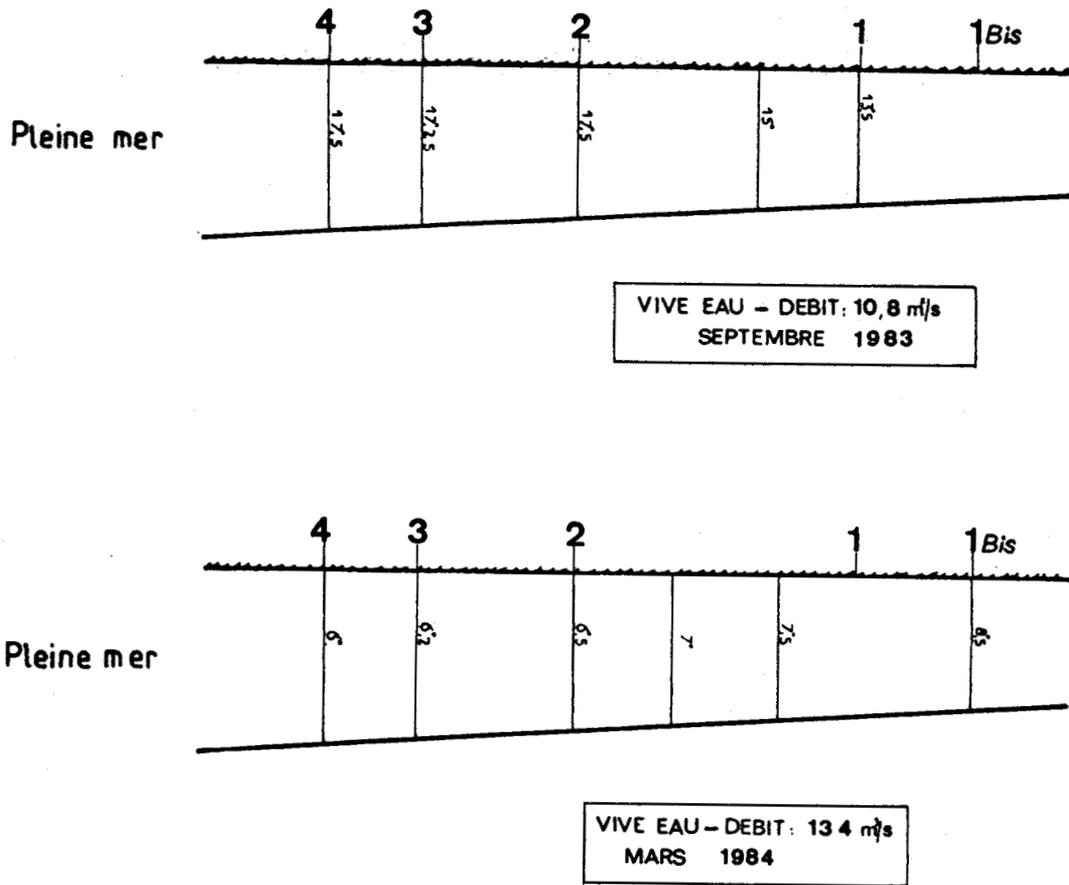
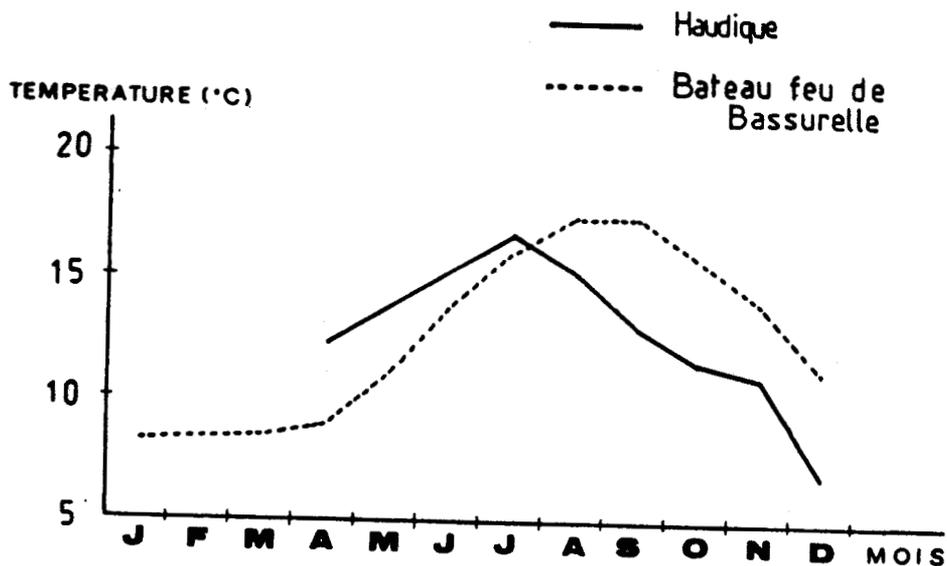


Figure 60: EVOLUTION DES TEMPERATURES AU COURS D'UNE ANNEE (1982)





- CHAPITRE III -

LA MAREE ET LES COURANTS DE MAREE

I - CARACTERISTIQUES DE LA MAREE

Les heures de marée de Basse Mer et de Pleine Mer prises en compte se réfèrent arbitrairement à celles du port de Boulogne.

I.1 - PROPAGATION DE L'ONDE DE MAREE

I.1.1 - En Manche orientale

L'onde principale de la marée progresse de l'Atlantique vers la Manche et est déviée vers la droite en raison de la force de Coriolis (GUILCHER, 1979). Cette onde progressive, en parvenant en Manche orientale, se superpose ¹⁾ à une onde réfléchie par la côte française, entre la Somme et le Cap Griz-Nez et ²⁾ à une onde progressive se propageant vers l'Ouest et provenant de la Mer du Nord.

L'onde qui se déplace vers l'Est est d'amplitude plus grande que celle provenant de la Mer du Nord. Il en résulte la superposition d'une onde stationnaire et d'une onde progressive se dirigeant vers l'Est.

Ces interactions induisent un régime de marée de type semi-diurne (environ 12 h 25 mn). La longueur d'onde de la marée est très grande par rapport à la profondeur d'eau rencontrée. La vitesse de propagation de l'onde ne dépend que de cette profondeur d'eau et ces ondes sont appelées "ondes de gravité". Leur célérité croît avec la racine carrée de la profondeur.

$$C_M = \sqrt{gH}$$

C_M = célérité de l'onde de marée (m/s)

g = accélération de la pesanteur (m/s^2)

H = profondeur (m)

La pleine mer ne se produit pas de façon simultanée en Manche, mais de façon d'autant plus tardive que l'on se dirige vers l'Est. Ainsi, la pleine mer au Touquet est en avance de 15 mn sur celle de Boulogne.

I.1.2 - Devant l'estuaire

Selon les données du Laboratoire National d'Hydraulique (1970), les courants se dirigent vers le Nord, de 3 h avant P. M. à 3 h après P. M. Il en résulte un mouvement tourbillonnaire centré sur la pointe du Touquet. Le remplissage de l'estuaire se termine à pleine mer, et les courants à l'embouchure deviennent alors parallèles à la côte. A partir de la mi-perdant, les courants s'inversent et s'orientent de ce fait vers le Sud.

I.2 - DEFORMATION DE L'ONDE DE MAREE

Au cours de sa propagation dans l'estuaire, l'onde de marée se déforme et perd de sa vitesse, de même que de son amplitude. Cette déformation montre une dissymé-

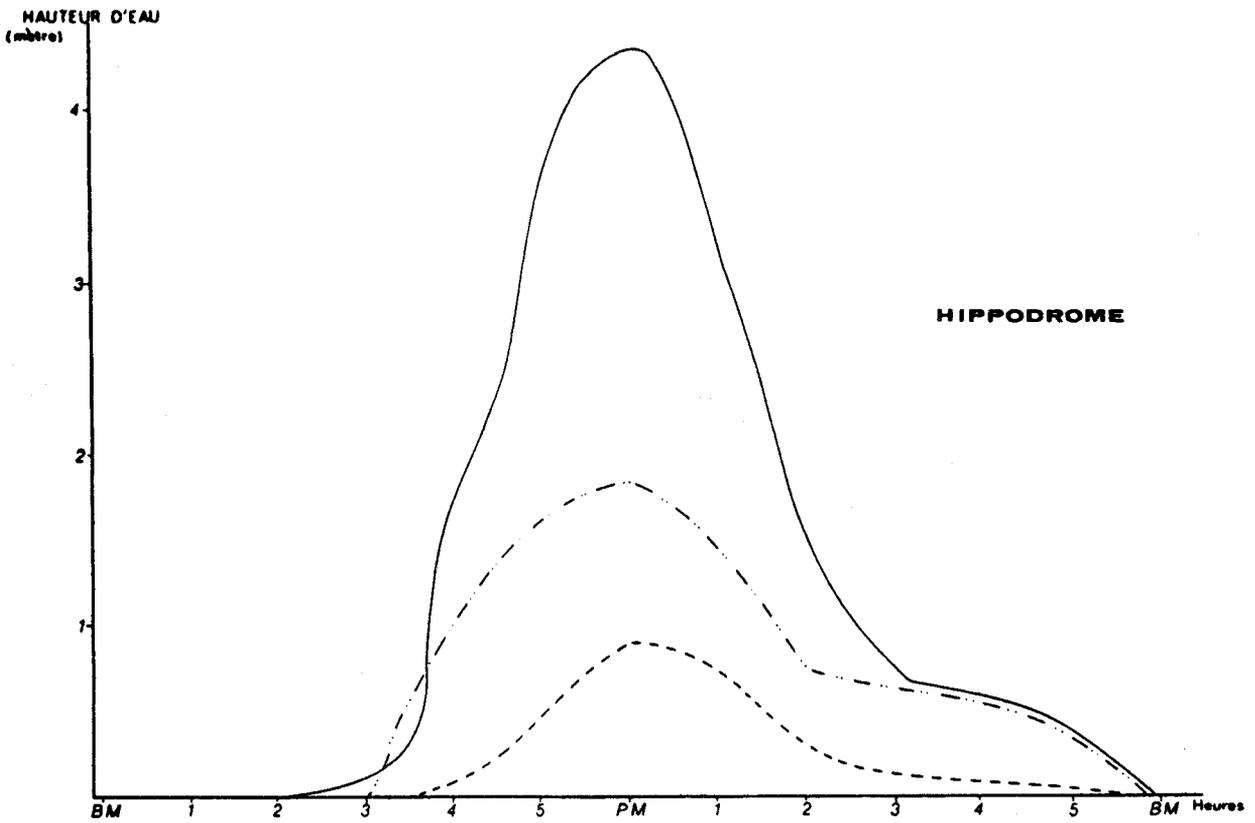
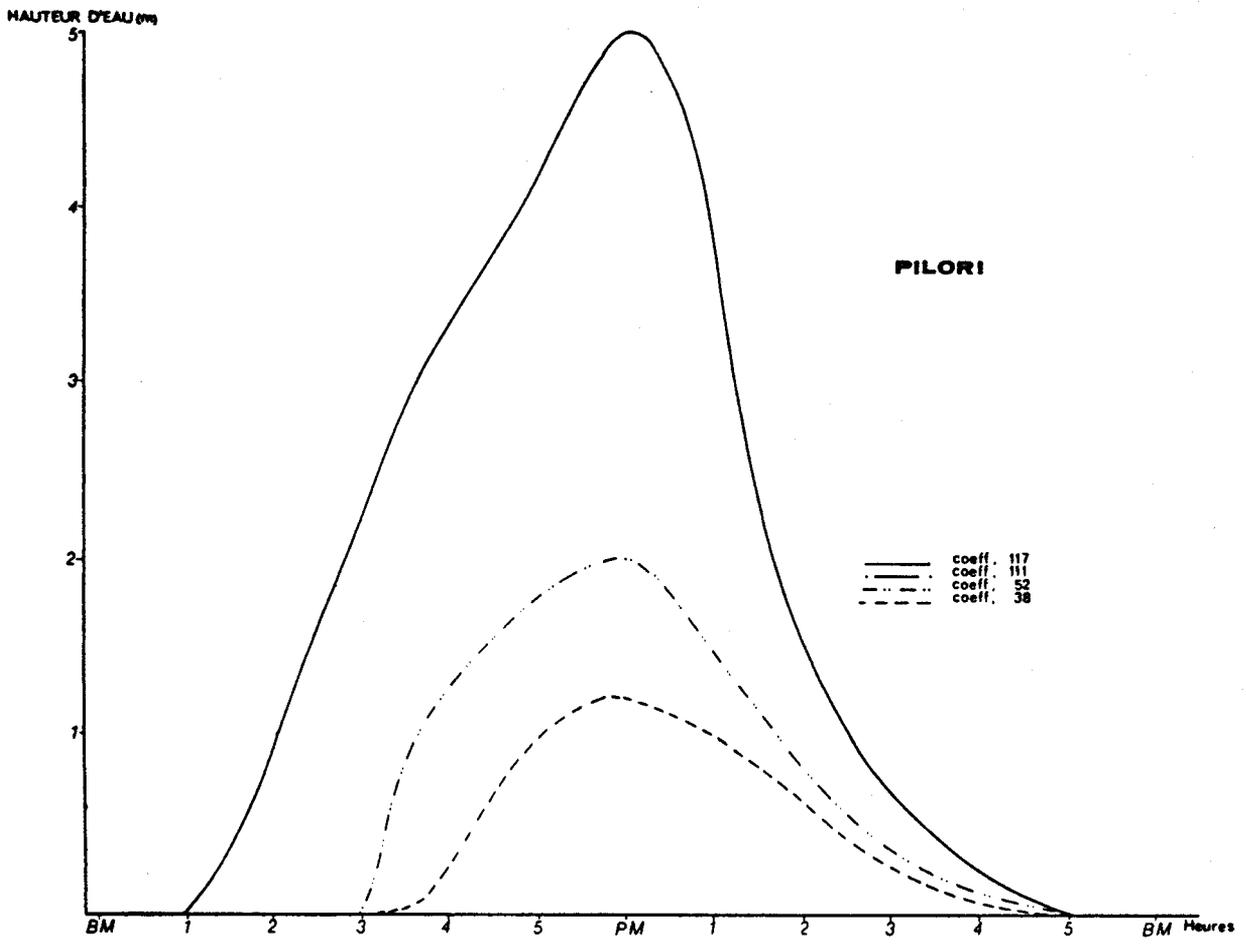


Figure 61 : COURBES MAREGRAPHIQUES

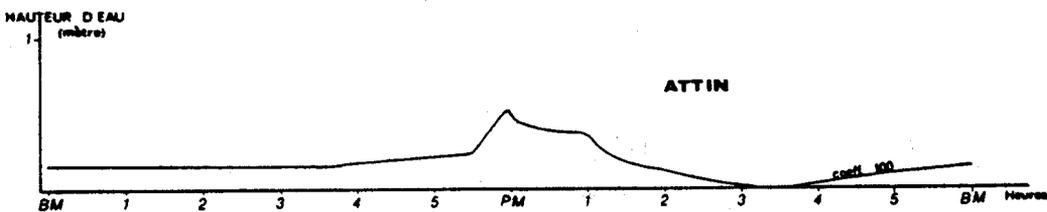
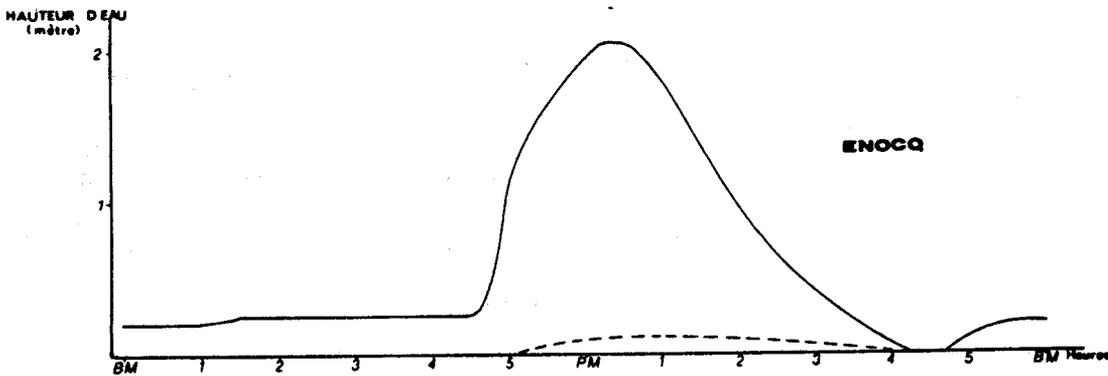
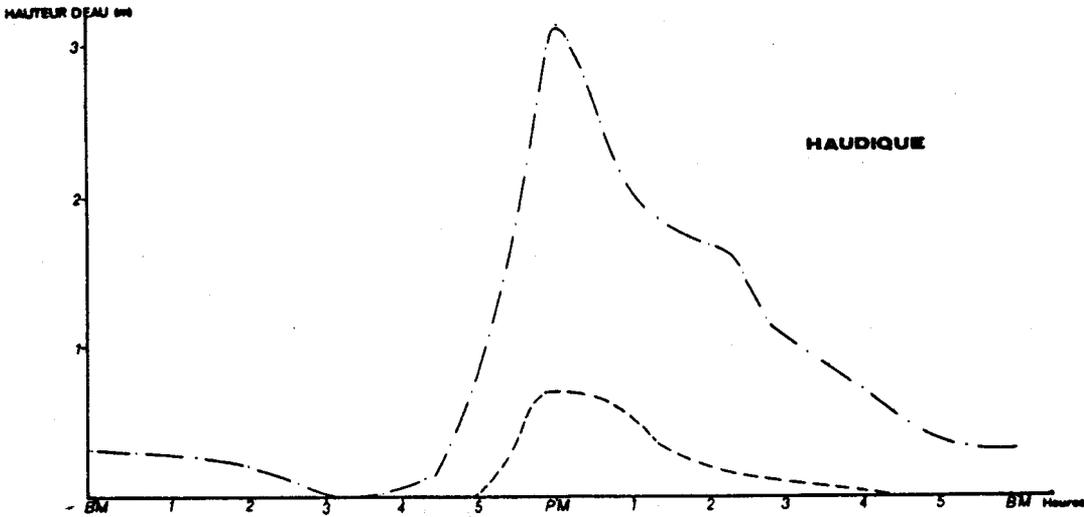
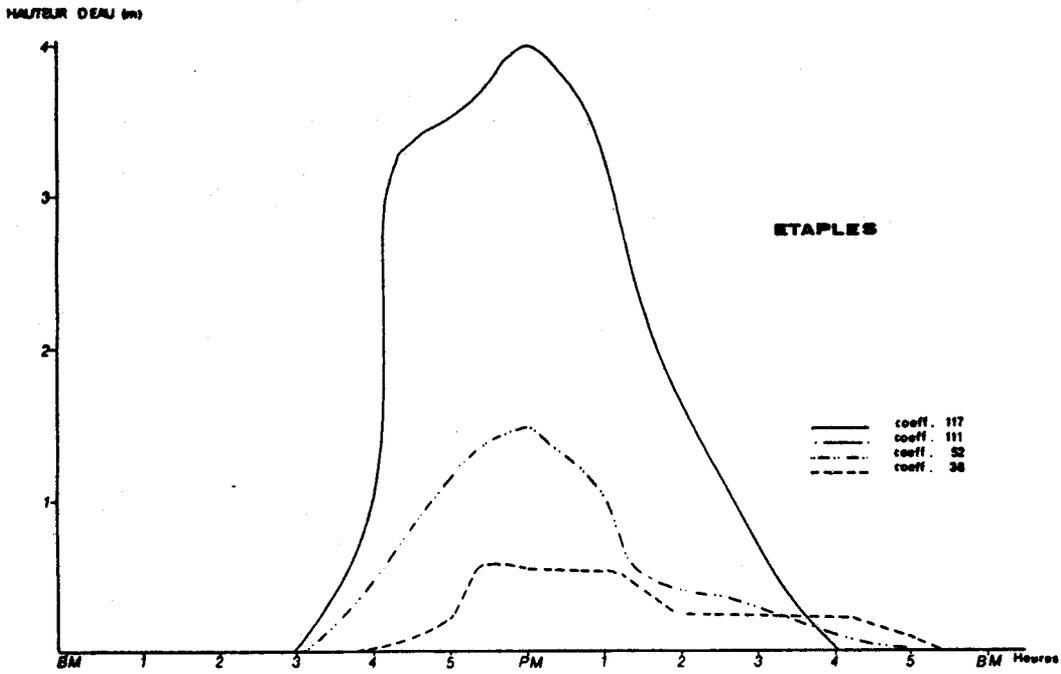


Figure 62: COURBES MAREGRAPHIQUES

trie plus accusée vers l'amont, ainsi qu'un retard dans l'installation du flot. Ceci est dû à l'intervention de plusieurs facteurs : morphologie de l'estuaire, réflexions de l'onde de marée sur les berges, frottements, ... En progressant vers l'amont, nous observons une diminution de la durée du montant par rapport à celle du perdant, comme dans tous les estuaires.

Devant l'embouchure, le montant est plus court d'une heure sur le perdant et dure environ 5 h 30 ; dans l'estuaire et en remontant vers l'amont, la durée du montant diminue au Pileri et recouvre une période de 3 h 30 environ ; au port d'Etaples, sa durée oscille autour de 2 h 15 pour n'être plus que de 1 h 20 environ à Enocq (coeff. 117).

Les figures 61 et 62 montrent l'évolution des courbes de marées depuis le Banc du Pileri jusqu'à Attin. A partir d'Etaples et en remontant le fleuve, elles présentent un palier avant et après la pleine mer, d'une durée variant de 1 h à 2 h. Ce palier est certainement dû à un effet de retard dans l'inversion et l'installation des courants. Le montant s'annonce par un renflement de la rivière qui coule toujours vers l'aval. Environ 10 mn après ce phénomène, le courant de flot s'installe. En progressant vers l'amont, la renverse de marée est plus rapide et le montant plus brutal. Un décalage d'environ 25 mn apparaît dans l'établissement de la Pleine Mer entre le Pileri et Enocq. A cette même station et durant les marées de morte eau (coeff. 38), le courant est toujours orienté vers l'aval.

I.3 - LE MARNAGE

I.3.1 - Caractéristiques générales

- En Manche orientale

L'amplitude de la marée présente un minimum relatif à Cherbourg. Elle s'accroît jusqu'à Cayeux en baie de Somme, sans atteindre toutefois celle du Mont St Michel, et diminue vers la Mer du Nord (figure 63) (VERGER, 1968).

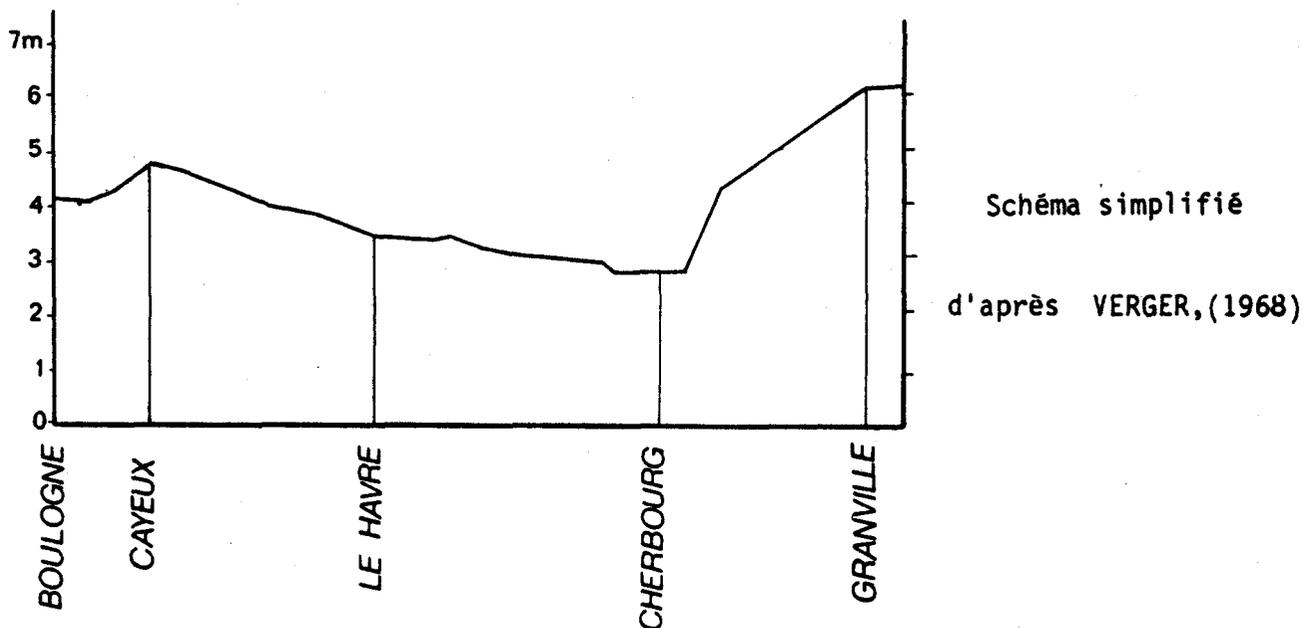


Figure 63 : VARIATIONS DES AMPLITUDES DE MAREE LE LONG DE LA COTE

- Au large de l'embouchure

Pour les marées de coefficient 114, la cote de la pleine mer est de + 10 m (BONNEFILLE et ALLEN, 1970) et présentent un marnage de l'ordre de 9 m. Pour les marées de morte-eau (coeff. 45), le marnage est équivalent à 4,80 m.

- A l'embouchure

La marée à la station St Gabriel, en baie de Canche, est 1,05 fois plus forte qu'à Boulogne. Les données sont présentées dans le tableau 12 (B. R. G. M., 1971) :

DATE	: Ste GABRIELLE :	BOULOGNE
8/ 1/1966	: 9,12	: 9,00
21/ 1/1966	: 8,75	: 8,40
31/ 1/1966	: 7,75	: 7,20
8/ 3/1966	: 9,85	: 9,40
26/ 3/1966	: 9,05	: 8,50
31/ 3/1966	: 7,15	: 7,00
29/ 4/1966	: 7,15	: 7,05
30/ 4/1966	: 7,50	: 7,35
9/ 5/1966	: 8,65	: 8,40
10/ 5/1966	: 8,20	: 8,00
18/ 5/1966	: 8,55	: 8,35
20/ 5/1966	: 8,90	: 8,60
28/ 3/1967	: 10,05	: 9,45
24/10/1968	: 9,65	: 9,20
21/11/1968	: 9,60	: 9,20
20/12/1968	: 9,54	: 9,00
20/ 1/1969	: 9,65	: 9,10
18/ 2/1969	: 9,70	: 9,20

Tableau 12 .- Hauteurs maxima de quelques marées relevées à Boulogne et Ste Gabrielle (figure 44) (in B. R. G. M., 1971).

- Dans l'estuaire

Dans l'estuaire, les Ponts et Chaussées Maritimes d'Etaples ont procédé à des relevés marégraphiques. Nous apportons par ailleurs un certain nombre de données complémentaires (tableau 13).

Quel que soit le coefficient de marée, le marnage décroît assez rapidement, de l'aval à l'amont. Selon les données des Ponts et Chaussées Maritimes d'Etaples, le marnage ne dépasse jamais 6 m au point St Gabriel.

En résumé, par ses amplitudes de marée, la Canche constitue un estuaire de type hyposynchrone (figure 42). Avec de forts coefficients, le marnage passe de 5 m au Pilori à 2 m à Enocq, soit sur une distance de 10 km (figure 64).

II - COURANTS DE MAREE

II.1 - COURANTS DE MAREE EN MANCHE (Sud du Cap d'Alprech, figure 7)

Au large, les courants de marée tournent dans le sens trigonométrique. Vers la côte, ils deviennent sensiblement alternatifs. Les renverses au Touquet, se font presque par annulation du courant aux environs de 3 h avant et 2 h 30 après la

DATE	COEFF.	DEBIT : m ³ /s	DIRECTION : VENT	St GABRIEL	PILORI	HIPPODROME : Balise 6	ETAPLES
8/ 1/66:	94	18,7	E.S.E.	5,25		3,75	3
21/ 1/66:	71	16,3	E.S.E.	4,75		3,25	2,25
31/ 1/66:	44	17	E.S.E.	3,75		2,25	1,50
26/ 3/66:	82	17,2	S.S.E.	5		3,5	2,75
28/ 3/67:	116	18,4	S.W.	5,5		-	4
8/ 3/66:	114	18,4	N.N.	5,75		4,50	3,75
31/ 3/66:	38	17	W.	3,25		1,75	1
18/ 5/66:	76	15,2	W.N.N.	4		3,25	2,5
30/ 4/66:	51	16,1	E.	3		2	1,25
20/ 7/83:	52		E.N.E.		2	1,8	1,5
8/ 9/83:	111		E.S.E.		4,9	4,3	3,9
12/ 3/84:	38				1,20	0,9	0,6
19/ 3/84:	117				5	4,4	4

Tableau 13 .- Amplitude de la marée dans l'estuaire pour divers coefficients.

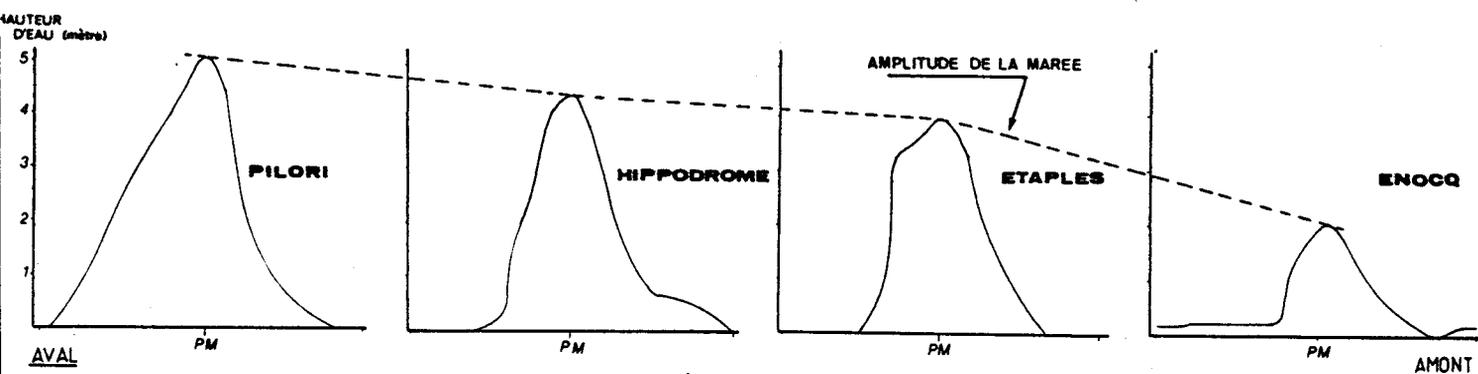


Figure 64 : VARIATION LONGITUDINALE DANS L'ESTUAIRE DE L'AMPLITUDE DE MAREE

pleine mer de Boulogne (MAUPAS, 1977). Par fond de - 10 m, devant l'embouchure de la Canche, les vitesses atteignent en moyenne, en vive eau, 1,8 noeuds (0,93 m/s) dans chaque sens (S. H. O. M., 1968). Les courants proches du rivage présentent des vitesses plus élevées. On constate que le courant de flot maximum se situe vers 1 h 20 avant P. M. avec des vitesses oscillant entre 2,2 noeuds (1,13 m/s) (coeff. 95) et 1,1 noeud (0,57 m/s) (coeff. 45). Les courants de jusant les plus importants se rencontrent à basse mer et présentent des vitesses fluctuant de 1,9 noeuds (0,98 m/s) (coeff. 95) à 1,1 noeud (0,57 m/s) (coeff. 45) (MAUPAS, 1977). En règle générale, le courant de flot est supérieur au courant de jusant.

II.2 - COURANTS DE MAREE DANS L'ESTUAIRE

II.2.1 - Répartition des vitesses de courants au large de l'estuaire

Les mesures ont été réalisées par le Laboratoire National d'Hydraulique (1970). Les courants sont presque alternatifs et portent vers le Nord, depuis 3 h avant la

pleine mer jusqu'à 3 h après la pleine mer. En marée de vive-eau, les vitesses maximales sont d'environ 1,20 m/s à P. M. et de 0,8 m/s à B. M., tandis qu'en marée de morte-eau, elles sont d'environ 0,20 m/s à P. M. -1 et de 0,15 m/s à B. M. (figure 65).

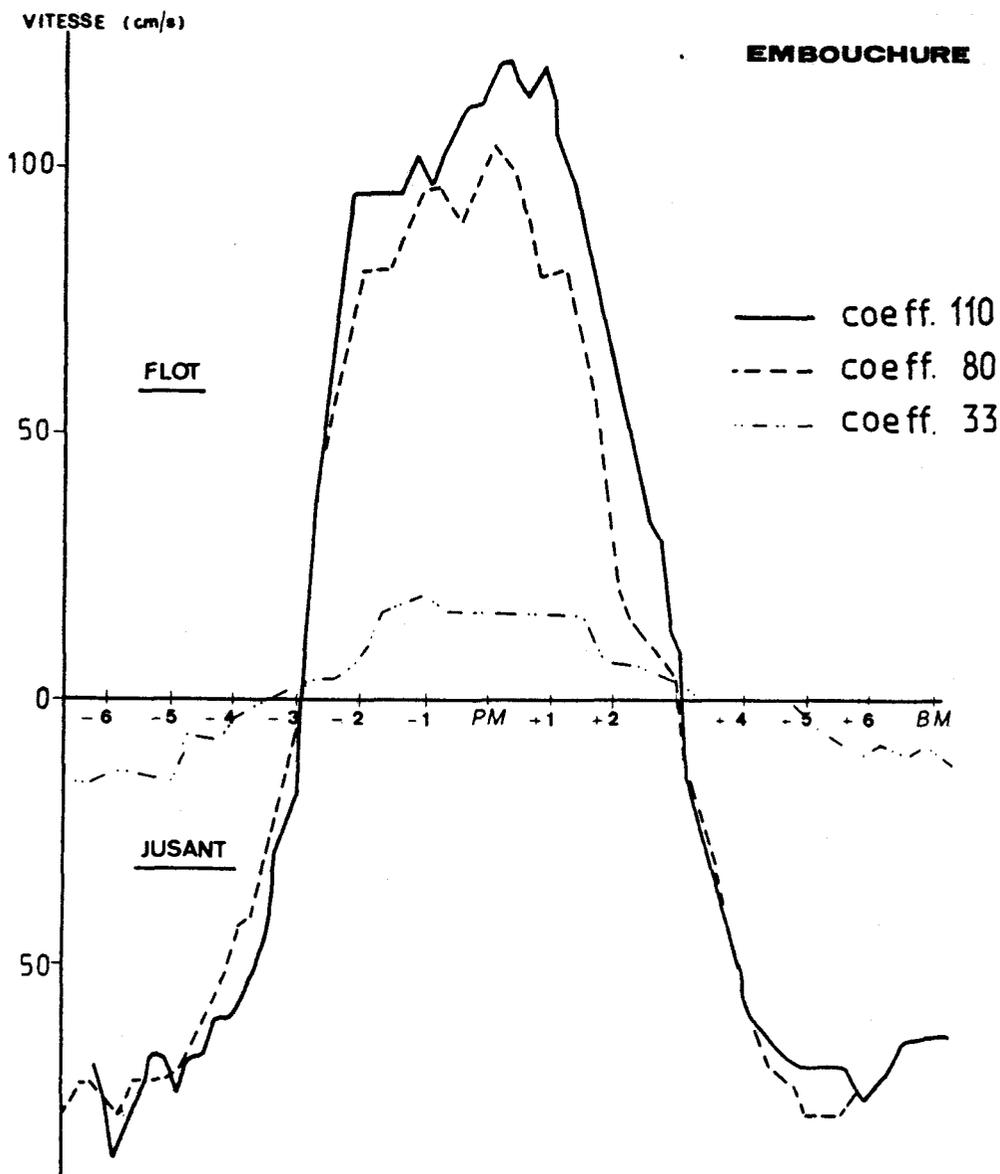


Figure 65 : VITESSES DES COURANTS A L'EMBOUCHURE

(dans BONNEFILLE et ALLEN, 1970)

II.2.2 - Répartition des vitesses de courants dans l'estuaire

Les mesures ont été faites durant les études de marée dans le chenal à 0,50 m de la surface et lorsque c'était possible à 1 m du fond. Elles ont été effectuées toutes les demi-heures à la station d'Étaples et le plus souvent possible aux stations de l'hippodrome et du Pilori. Comme au long de l'année, l'estuaire de la Canche ne présente pas de crue ou d'étiage très marqué, une relative généralisation de son comportement peut être établie en fonction des résultats acquis lors des marées de vive-eau et de morte-eau.

II.2.2.1 - Courants de marée de vive-eau (coeff. 117)

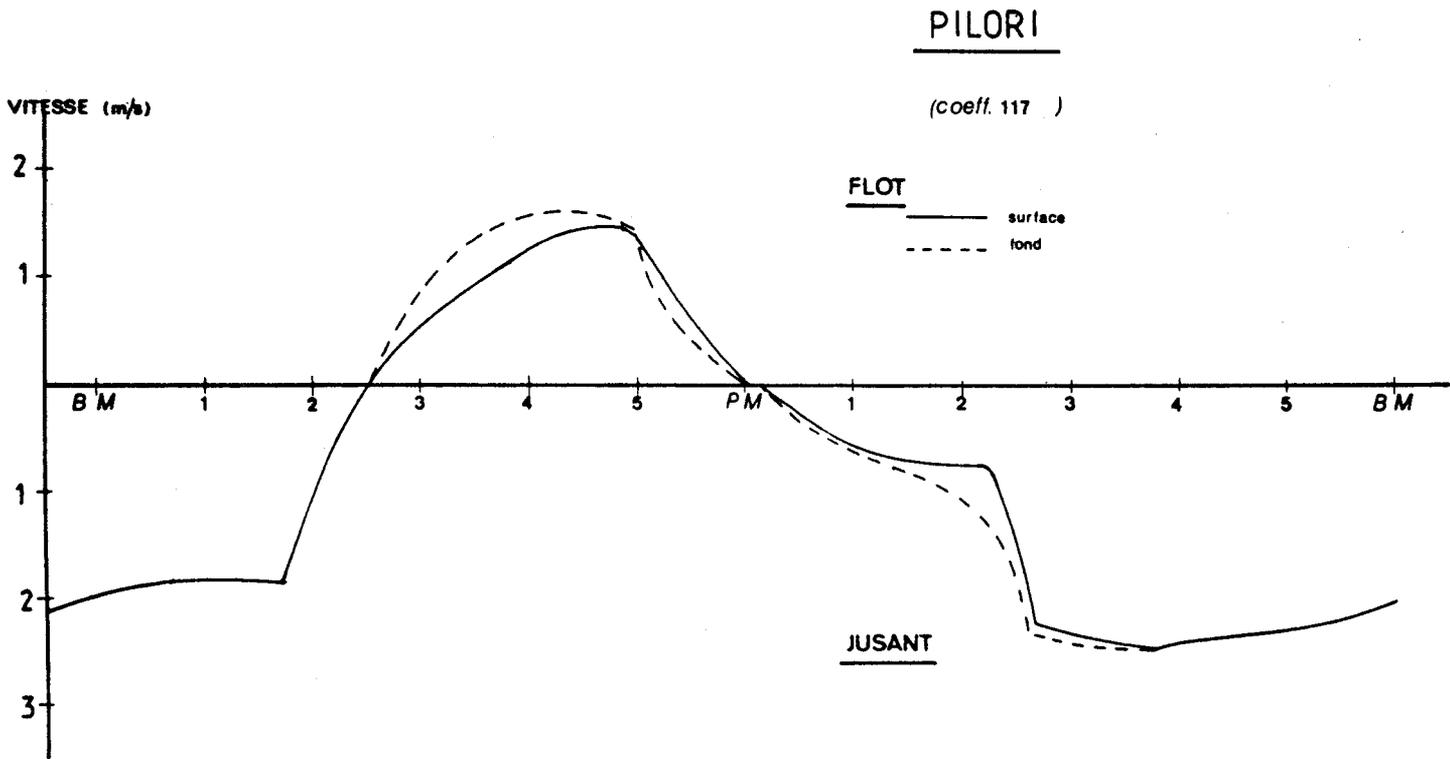


Figure 66 : VITESSES DES COURANTS DANS L'ESTUAIRE AVAL

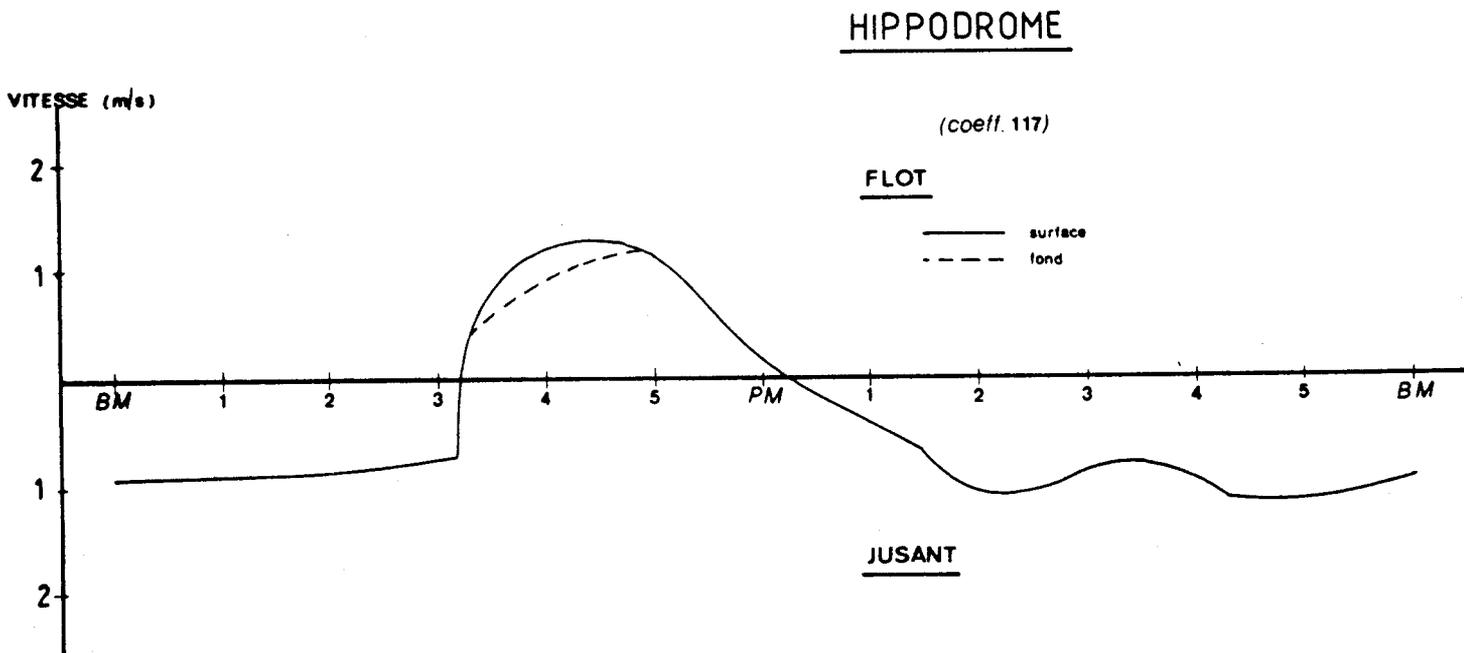


Figure 67 : VITESSES DES COURANTS DANS L'ESTUAIRE AVAL

- Au Pileri (figure 66), les courants sont alternatifs. Au cours du perdant, la faible profondeur induit une homogénéité maximale sur toute la tranche d'eau. Ces courants atteignent 1,25 m/s en surface, 1,5 m/s au fond durant le flot et dépassent 2,40 m/s (\approx P. M. + 4) au jusant. Les vitesses les plus grandes se produisent vers 3 h marée après la pleine mer. La dissymétrie flot-jusant s'accroît fortement par rapport à l'embouchure. Le jusant dure 8 h 30 avec de fortes vitesses durant 3 h (supérieures à 1,90 m/s), tandis que le flot ne dure que 3 h 30 avec des vitesses supérieures à 1 m/s sur l'ensemble de la période. Le courant de flot s'installe 2 h 30 après la basse mer.

- Plus en amont, le retard de la renverse s'accroît. La dissymétrie flot-jusant est toujours aussi bien marquée.

. Au droit de l'hippodrome (figure 67), le flot dure environ 3 h et la renverse de basse mer se produit environ 50 mn après celle du Pileri. Le flot est plus court et présente des vitesses similaires à celles du jusant. Par contre, les vitesses du perdant sont plus faibles qu'au Pileri et oscillent autour de 1 m/s.

. A Etaples (figure 68), la dissymétrie flot-jusant est encore plus nette. Le flot est bref, et les vitesses atteignent 1,70 m/s en surface. Le flot s'établit brusquement vers B. M. + 3,5 pour atteindre son maximum très rapidement et décroître progressivement par la suite. Les vitesses maximales de flot (1,70 m/s) sont supérieures aux vitesses maximales de jusant (1,20 m/s).

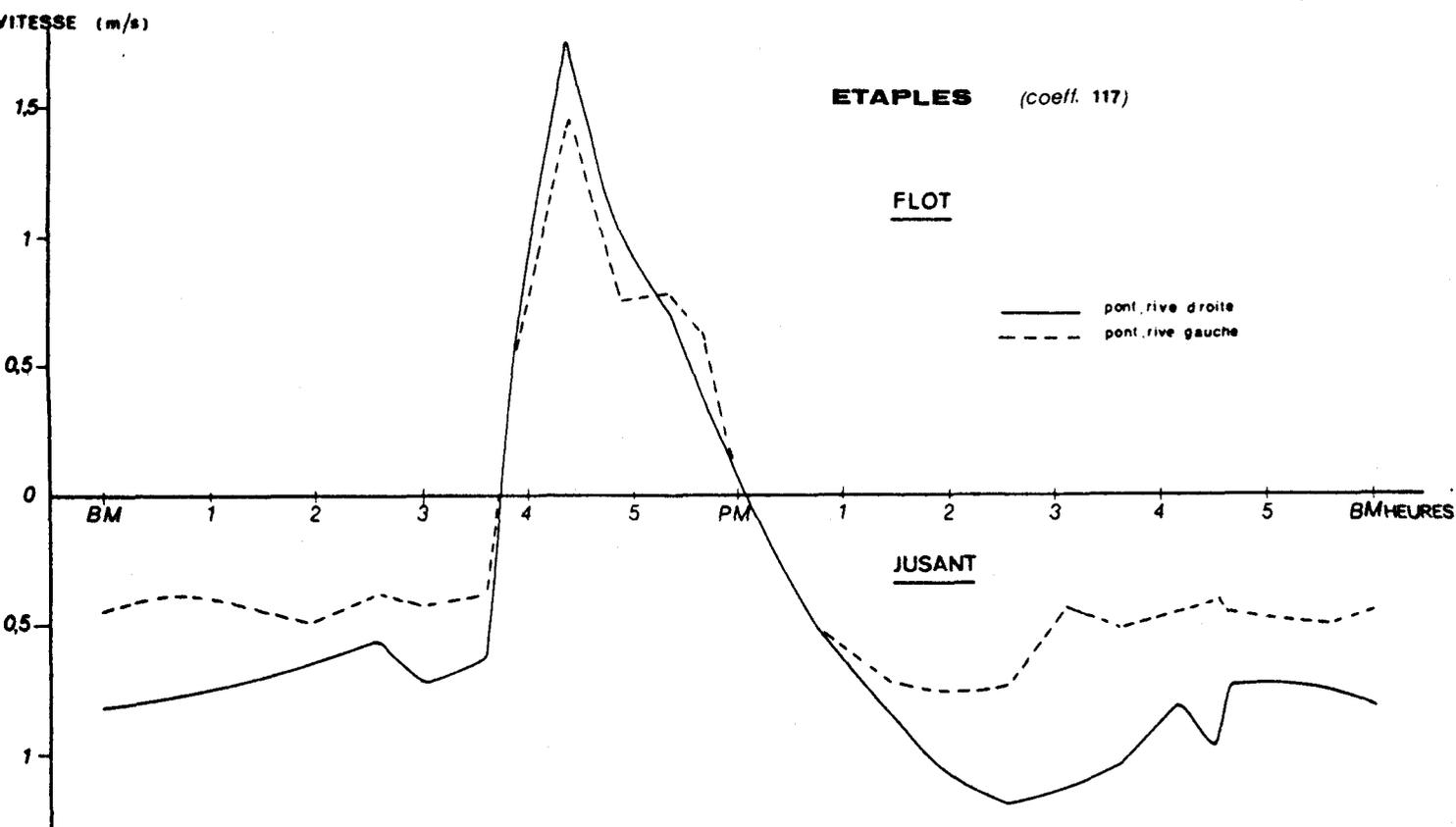


Figure 68 : VITESSES DES COURANTS DANS L'ESTUAIRE MEDIAN

Les vitesses en surface ont été mesurées au niveau d'Etaples sur toute la largeur de l'estuaire et nous constatons des vitesses plus rapides en rive droite, du fait de l'implantation d'épis sur la rive opposée. Rappelons qu'avant ces installations, le chenal passait en bordure de la rive gauche. La renverse du flot a lieu environ 20 mn après celle observée au droit de l'hippodrome. La durée du montant dure environ 2 h 15.

Au coefficient 85, les vitesses maximales de flot atteignent très rapidement celles du jusant, présentant des variations moins tranchées que celles du flot, et leur maximum fluctue autour de 1 m/s (figure 69). La courbe de la variation des hauteurs d'eau présente une brusque élévation accompagnée par l'arrivée rapide et brutale des courants de flot. Ces deux courbes montrent bien la durée plus courte du montant par rapport à celle du perdant.

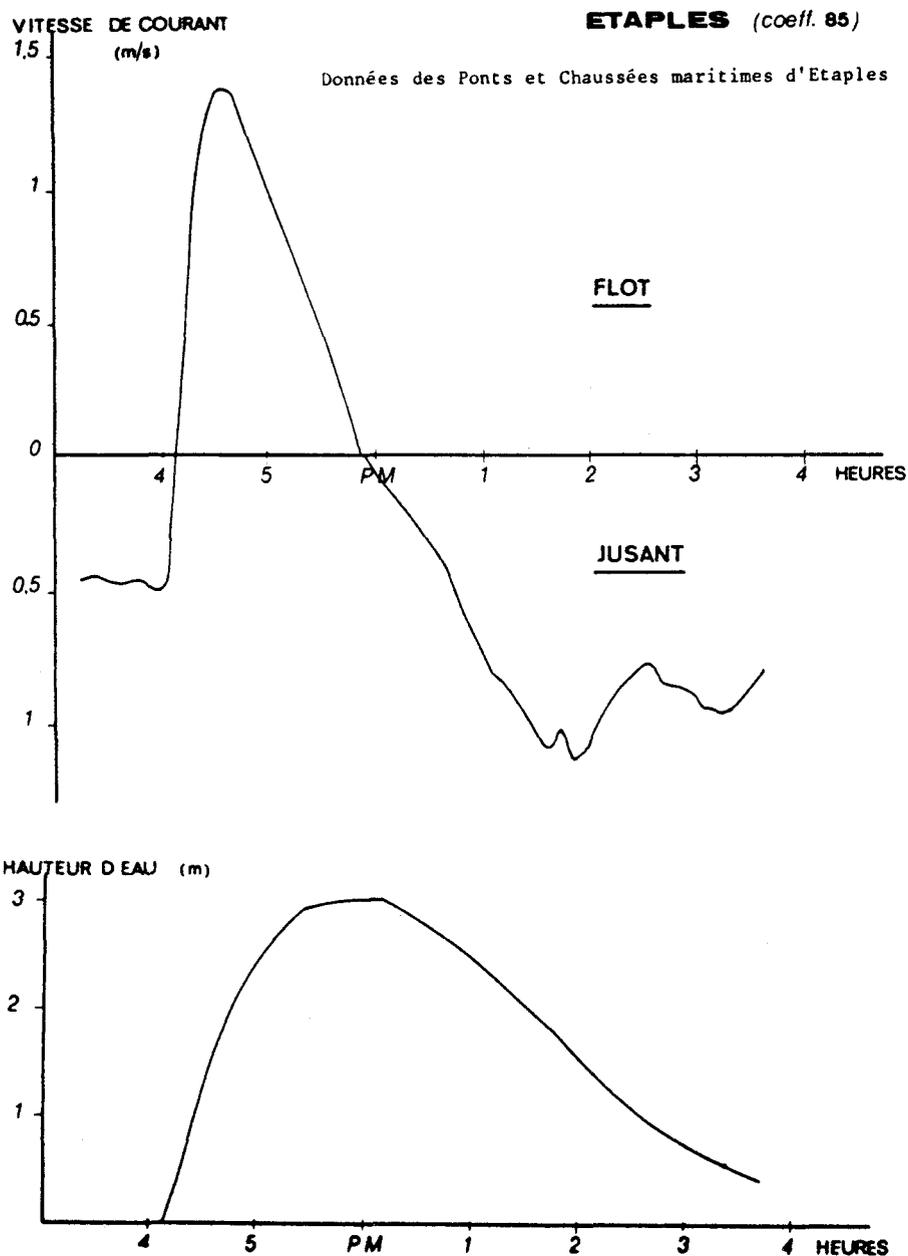


Figure 69 : VARIATIONS DES VITESSES DE COURANT ET DE HAUTEUR D'EAU

II.2.2.2 - Courants de marée de morte eau (coeff. 38)

En morte eau, le courant coule toujours d'amont en aval et sa vitesse diminue jusqu'à l'heure de pleine mer. Les vitesses maximales de surface oscillent autour de 0,90 m/s (figure 70).

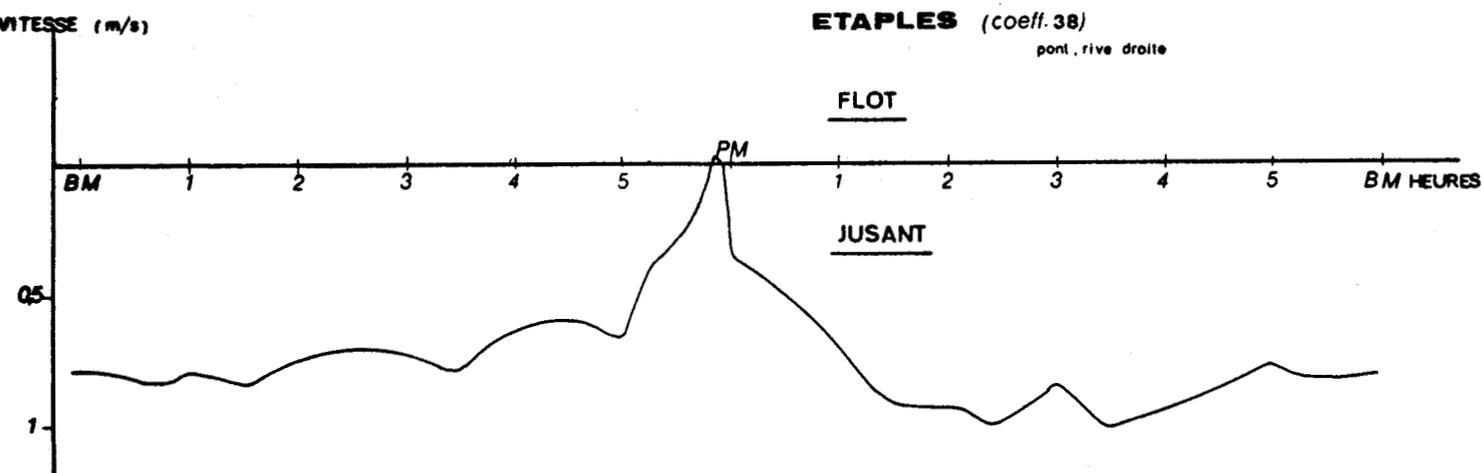


Figure 70 : VARIATION DES VITESSES DE COURANT EN MORTE-EAU

II.2.3 - Circulation résiduelle dans l'estuaire en marée de vive eau

II.2.3.1 - Définition et mode de calcul

Les mesures de courants relevées au cours d'un cycle de marée, en divers points de l'estuaire et à différentes profondeurs nous permettent d'aborder la notion de circulation résiduelle. Celle-ci correspond aux valeurs obtenues par la soustraction des effets de la marée aux valeurs des courants mesurés

Dans le cas d'une circulation stratifiée, due à la superposition d'eaux de salinité et de densité différentes, la circulation résiduelle est caractérisée par un écoulement vers l'amont au fond et vers l'aval en surface. Au niveau du point nodal, la circulation influence le déplacement et les accumulations des sédiments en suspension dans l'estuaire.

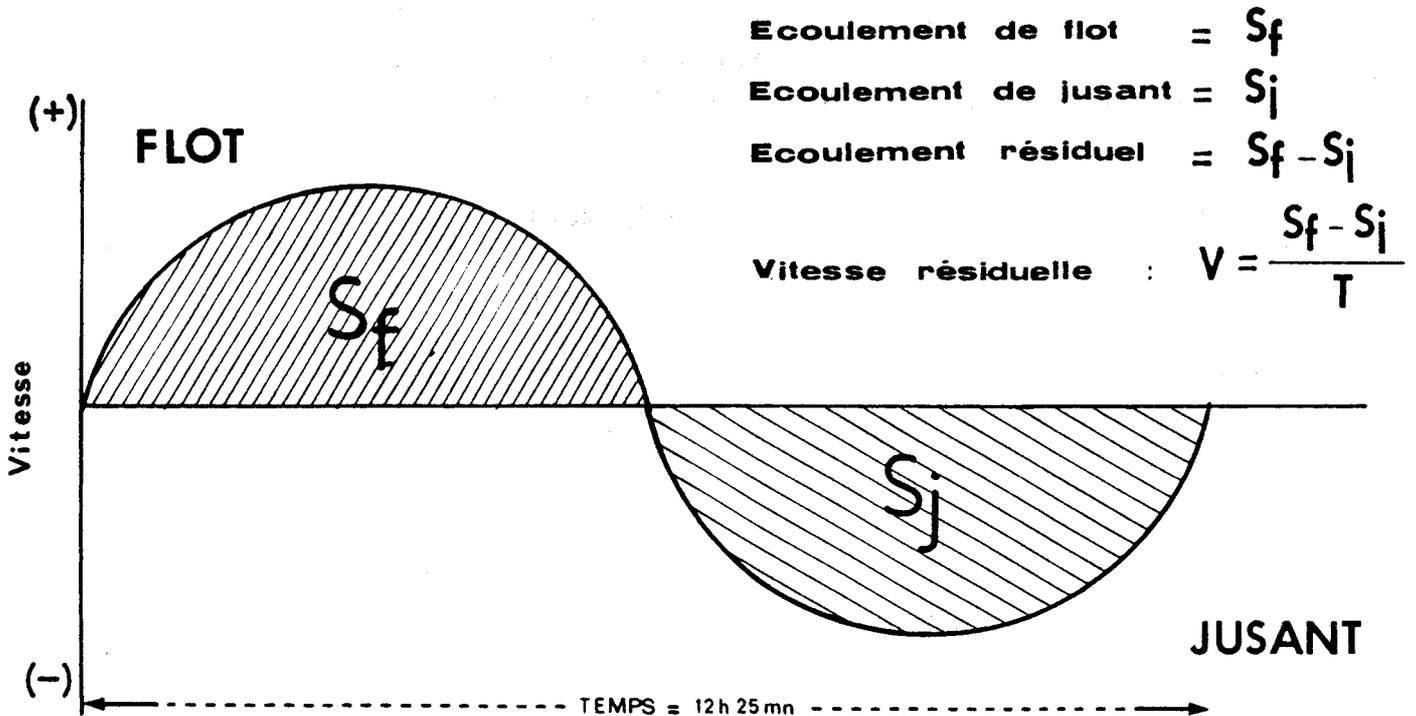
En connaissant la vitesse résiduelle (V_r) en surface et en profondeur (après un cycle de marée), il est possible de connaître les écoulements vers l'amont ou vers l'aval en traçant les courbes enveloppes de ces vitesses.

SIMONS (1955) a préconisé une méthode de calcul qu'ALLEN (1972) a utilisé en Gironde, et dont nous réexposons ici le principe (figure 71)

Sur une courbe de vitesse de courant, les écoulements sont représentés par les surfaces de flot et de jusant. La vitesse résiduelle est évaluée en divisant l'écoulement résiduel ($|\text{écoulement de flot}| - |\text{écoulement de jusant}|$) par la durée du cycle de marée ($12 \text{ h } 25 = 44\,700 \text{ s}$).

II.2.3.2 - Résultats

La circulation résiduelle calculée lors des coefficients de vive eau (19/3/84), est dirigée vers l'aval. A Etaples, les vitesses résiduelles sont plus importantes en rive droite (5,3 cm/s) qu'en rive gauche (2,7 cm/s). L'implantation d'épis freine les courants en rive gauche et les accélère en rive droite.



**Figure 71 - CALCUL DES VITESSES RESIDUELLES
(D'après ALLEN, 1972)**

Au droit de l'hippodrome, à la station 3, les vitesses résiduelles en surface (5,2 cm/s) sont légèrement inférieures à celles du fond (5,8 cm/s). Par contre, au Pilori, à la station 4, les vitesses résiduelles sont identiques (9,6 cm/s) sur toute la hauteur d'eau. Les vitesses résiduelles augmentent en direction de l'aval.

III - CONCLUSIONS

En Manche orientale, les courants tournent dans le sens inverse des aiguilles d'une montre et deviennent sensiblement alternatifs en se rapprochant de la côte. La vitesse des courants fluctue parallèlement aux coefficients de marée, avec un courant de flot supérieur au courant de jusant.

En remontant l'estuaire, l'onde de marée se déforme et perd de son amplitude. Cette déformation de l'onde vers l'amont se traduit par une diminution de la durée du montant sur celle du perdant, ainsi que par un retard dans l'installation du flot. Ce phénomène caractérise un estuaire de type hyposynchrone.

Les vitesses les plus importantes s'observent à la station 4 (2,50 m/s) au moment du jusant (\approx P.M. + 4). Aux stations aval (3 et 4), les vitesses de jusant sont supérieures aux vitesses de flot. A la station 2 (Etaples), les vitesses maximales de flot (1,70 m/s) sont supérieures à celles du jusant (1,20 m/s). Ces vitesses de courant sont plus importantes que celles mesurées à la station 3 située au droit de l'hippodrome.

La circulation résiduelle est indépendante de l'intrusion saline et est orientée vers l'aval sur toute la tranche d'eau. On retrouve le même phénomène dans la Seine (AVOINE, 1981).

Avec les courants de marée, et leur distribution dans l'estuaire, nous sommes en présence d'un estuaire hyposynchrone à l'aval, devenant hypersynchrone à l'amont

(Etaples). LE DOUAREC (1978) observe la même chose dans l'estuaire de la Loire, à hauteur de la ville de Nantes. Dans l'estuaire de la Canche, ce phénomène résulterait :

- de l'existence de digues canalisant le chenal entre les stations 2 et 3 ;
- de la présence d'épis en rive gauche ;
- de la déformation de l'onde de marée vers l'amont.

CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE

A partir des données recueillies, plusieurs points importants se dégagent de l'étude hydrologique.

Dans l'estuaire, en progressant vers l'amont, l'onde de marée se déforme en même temps que son amplitude décroît. Lors de coefficients de vive eau, nous sommes en présence d'un estuaire de type hyposynchrone. Le marnage passe, sur une distance de 10 km, de 5 m au Pilori à 2 m à Enocq.

Avec cette dissymétrie de l'onde de marée, nous remarquons que les vitesses les plus importantes se situent à l'aval (station 4) aux environs de P. M. + 4. Les stations aval (3 et 4) sont caractérisées par des vitesses de jusant supérieures à celles de flot. Par contre, à Etaples, à la station 2, les vitesses de flot (1,70 m/s) sont plus importantes que celles de jusant (1,20 m/s). Ces vitesses de courant sont plus fortes que celles de la station 3. Ce phénomène résulterait de la déformation de l'onde de marée vers l'amont, de la présence de digues canalisant le chenal entre les stations 2 et 3, et de l'implantation d'épîs en rive gauche, à hauteur du port.

A l'aval, ce retard est développé par l'étranglement formé par le poulcier. Il freine au début du montant le remplissage de l'estuaire. Le courant à l'embouchure sera d'autant plus violent que le volume d'eau introduit sera plus important et que les courants de jusant seront bien installés dans tout l'estuaire.

A marée basse, dans l'estuaire aval, des dunes hydrauliques, caractérisées par une longueur d'onde moyenne de 3 m et une amplitude de 0,70 m (figure 72) témoignent de la violence des courants de jusant.

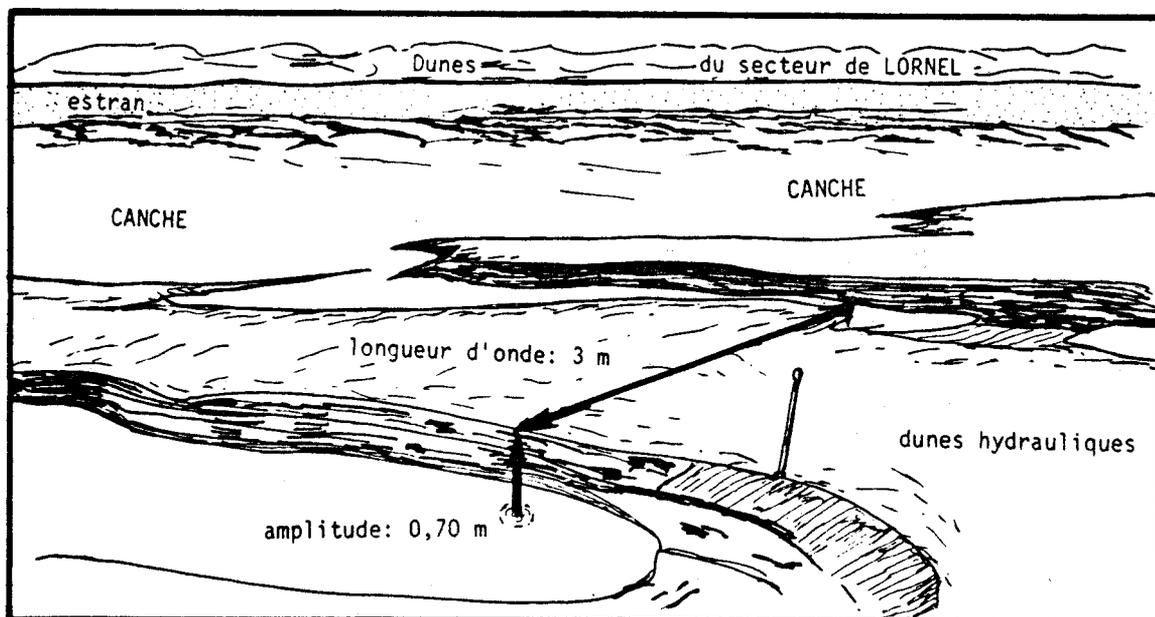


Figure 72 : DUNES HYDRAULIQUES A L'EMBOUCHURE (mai 1982)

L'installation de digues submersibles à marée haute, entre les stations 2 et 3, canalise la Canche, lui empêchant ainsi des divagations intempestives dans l'estuaire. Cet aménagement contribue à la concentration simultanée des courants de jusant et du fleuve, qui établit une circulation résiduelle dirigée vers l'aval.

Les températures sont plus élevées en amont l'hiver et en aval l'été. Ce gradient longitudinal amont-aval saisonnier est lié aux apports permanents d'eau douce froide à l'amont et aux grandes surfaces intertidales à l'aval qui échangent beaucoup d'énergie avec les eaux du montant.

L'intrusion saline pénètre assez loin dans l'estuaire lors des forts coefficients de marée (13 km). Entre les mortes eaux et les vives eaux, sa pénétration dans l'estuaire varie de 5 km à environ 13 km; elle est surtout liée au coefficient de marée comme dans l'estuaire de l'Orne en régime d'étiage (DUBRULLE, 1982).

La stratification saline est pratiquement inexistante, le brassage de l'eau étant important au moment de l'intrusion de la marée dans l'estuaire.

L'estuaire de la Canche diffère de nombreux autres estuaires, principalement du fait de son débit relativement constant tout au long de l'année. Elle est située dans une région de fort marnage et son estuaire ne présente pas de stratification saline comme les autres estuaires en période de crue (Gironde, Seine, Loire, Orne, Aulne). Toutefois, le balancement du front de salinité est soumis aux marées comme les estuaires de la Seine (AVOINE, 1981) et de l'Orne (DUBRULLE, 1982) en régime d'étiage.

Les courants de marée jouent un rôle essentiel dans les processus hydrosédimentaires. Il est donc important de les considérer dans la dynamique sédimentaire de l'estuaire, abordée dans la troisième partie.

TROISIEME PARTIE

Dynamique sédimentaire de l'estuaire



- CHAPITRE I -

GENERALITES

I - MODE DE TRANSPORT

Le transport des sédiments s'effectue en suspension ou par charriage. Ces deux types de transport sont fonction de la nature des contraintes affectant les particules et de la dimension de celles-ci. Le transport se fait en suspension lorsque l'énergie transmise par la turbulence du fluide permet de maintenir la particule à une certaine distance du fond. Il s'effectue par charriage lorsque l'énergie est transmise par la collision des grains entre eux ; ces derniers ne s'éloignent pas du fond et se déplacent par roulement ou par saltation.

PASSEGA (1957) essaye d'établir une liaison entre la granulométrie du sédiment et son mode de transport. Son travail permet une approche théorique des mouvements sédimentaires. Sur un graphique à coordonnées logarithmiques exprimées en unités (figure 73), il porte :

- 1) sur l'axe des abscisses la valeur de la taille du grain médian, c'est-à-dire la dimension des particules qui correspond à 50 % du poids du sédiment (annexe I).
- 2) sur l'axe des ordonnées, la valeur du premier percentile, c'est-à-dire la dimension à laquelle 99 % du sédiment est inférieur.

On note que le premier percentile traduit souvent une augmentation de l'hétérométrie des sédiments récoltés, par la présence d'éléments démesurément gros au sein de l'échantillon. ALLEN *et al.* (1970) adoptent de ce fait le cinquième percentile. Nous l'utiliserons à la suite de nombreux auteurs et notamment ALLEN (1971), JOUANNEAU (1974), AVOINE (1981), et DUBRULLE (1982).

Trois modes de transport peuvent être définis en fonction de la valeur du 5ème percentile (ALLEN, 1971).

- $P5 < 1,05\psi$ ($> 500 \mu\text{m}$) transport par charriage ;
- $3\psi > P5 > 1,05\psi$ ($125 \mu\text{m} < P < 500 \mu\text{m}$) transport en suspension graduée ;
- $P5 > 3\psi$ ($< 125 \mu\text{m}$) transport en suspension uniforme.

Le diagramme réalisé à partir d'une cinquantaine d'échantillons récoltés dans l'estuaire de la Canche et au large (figure 73), montre que l'essentiel des transports s'effectue en suspension à l'exception de certaines zones intertidales et de l'embouchure.

Une cartographie générale des modes de transport (figure 74), établie pour l'ensemble de l'estuaire, confirme la distribution des différents domaines décrits précédemment (chapitre II, Partie II). Dans la zone du goulet et au sud de l'embouchure externe, les transports s'effectuent principalement par charriage. Partout ailleurs, les sédiments se déplacent en suspension et plus particulièrement en suspension uniforme, selon la terminologie de PASSEGA, sur le domaine du schorre. Dans le chenal et à l'embouchure interne, les sédiments sont transportés en suspension graduée.

II - AGENTS DE TRANSPORT

Les courants de marée et les houles sont les principaux agents de transport à l'embouchure. Leur rôle dans la dynamique sédimentaire a été étudié par MIGNIOT (1977). La répartition granulométrique des sédiments est en relation avec l'importance de ces agents.

A l'embouchure, la houle agit principalement sur la remise en suspension des sédiments. En effet, au moment des marées hautes, de grandes étendues intertidales sont recouvertes par une faible tranche d'eau. Le marnage au point Saint Gabriel (figure 44), varie de 6 à 3 m, en fonction des marées de vive-eau et de morte-eau. Comme nous l'avons vu au chapitre III de la partie II, les courants atteignent leur vitesse maximale à pleine mer, et leur capacité de transport est renforcée par l'impact de la houle sur le fond.

Dans l'estuaire, les courants de marée sont les agents de transport les plus importants. Au Pilori (station 4), les vitesses maximales à fort coefficient et au cours du jusant, atteignent approximativement 2,50 m/s. En surface les vitesses maximales des courants de flot dans le même secteur sont plus faibles, et présentent des valeurs d'environ 1,60 m/s. A Etaples, les vitesses des courants de flot sont supérieures à celles du jusant ($\approx 1,75$ contre 1,20 m/s). Pour des profondeurs comprises entre 2 m et 7 m, le diamètre théorique maximum des particules susceptibles d'être érodées par les courants varie entre 1 cm et 3 cm au Pilori, et de 1 cm à 2 cm à Etaples, si l'on se réfère à l'abaque établi par BONNEFILLE (1963). Cet abaque montre l'influence des vitesses de courant et de la profondeur sur l'érosion d'une particule sableuse de diamètre défini (figure 75).

Au Pilori, par fort coefficient et au cours du jusant, les sédiments en suspension, les plus grossiers, représentent une classe granulométrique supérieure à 400 μm ; les éléments qui la constituent sont composés en grande partie de débris calcaires coquilliers, et ne représentent qu'une faible partie des particules supérieures à 63 μm ($\approx 3\%$). Au regard de la répartition granulométrique des sédiments de surface, nous constatons que le transport dans l'estuaire s'effectue essentiellement en suspension, en régime de marée de vive-eau.

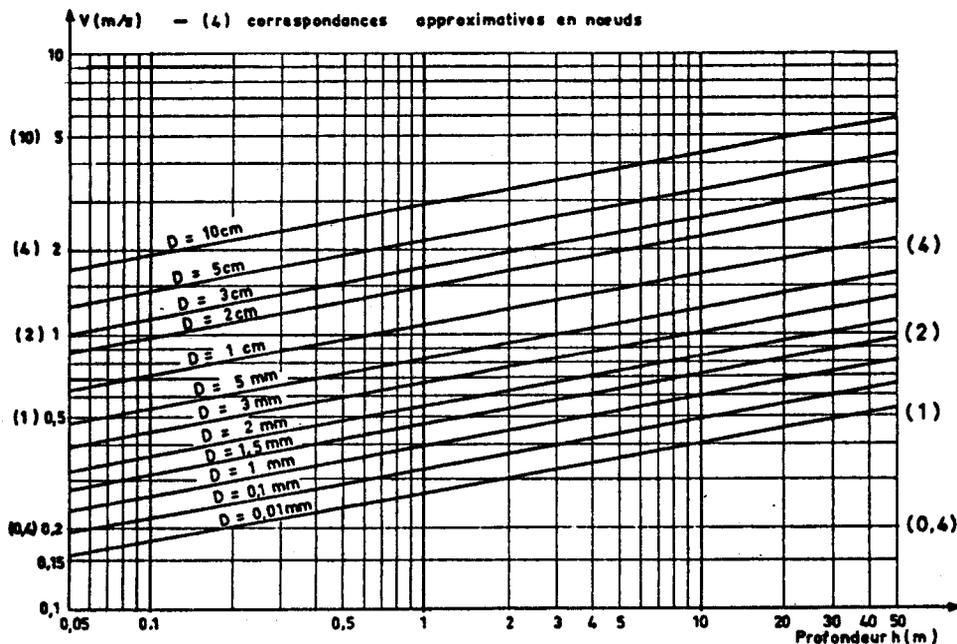
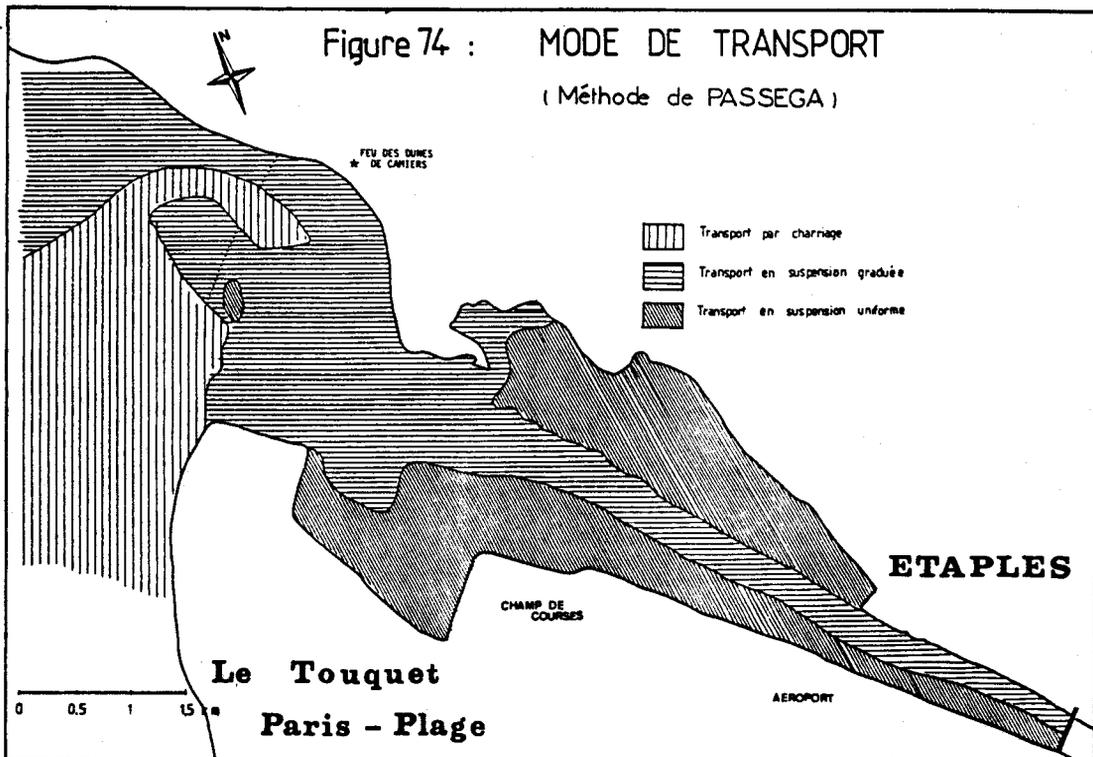
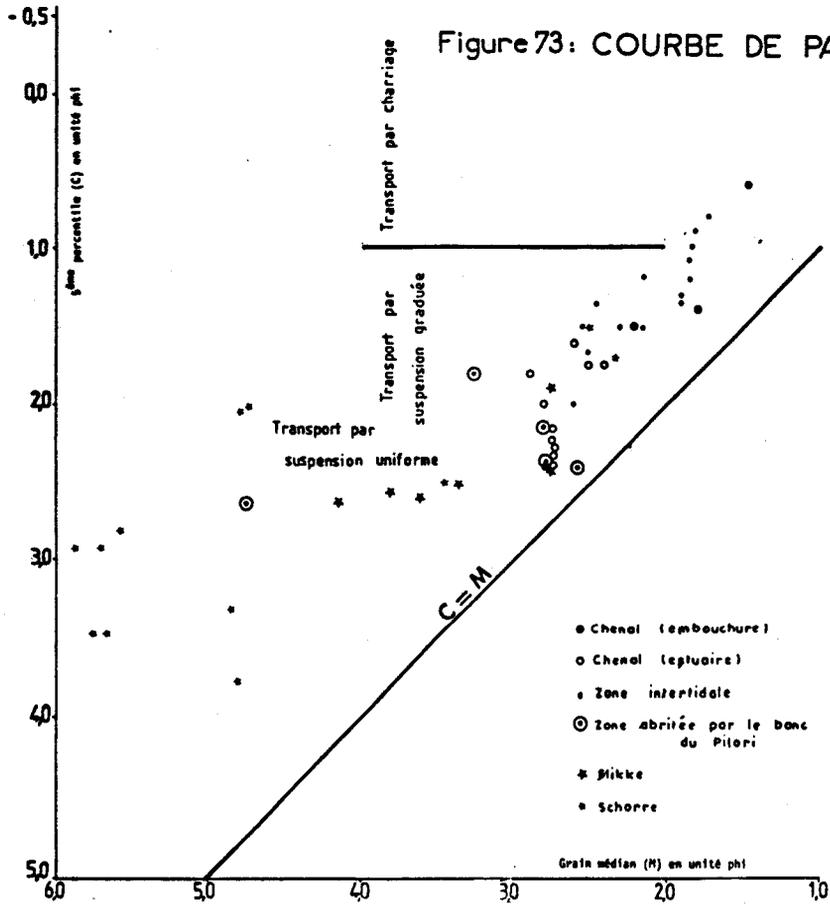


Figure 75 : Vitesse V de début d'entraînement du sable de diamètre D (d'après BONNEFILLE, 1963 ; in LARSONNEUR, 1977)





- CHAPITRE II -

DYNAMIQUE DES SEDIMENTS EN SUSPENSION

I - DEFINITIONS DE LA TURBIDITE ET DES MATIERES EN SUSPENSION

La turbidité représente la quantité de matières en suspension dans l'eau. Pour WEZERNAK et POLCYN (1975, *in* AMINOT et CHAUSSEPIED, 1983), "elle traduit la propriété optique responsable de la dispersion et de l'absorption de la lumière, plutôt que de sa transmission en ligne droite à travers l'échantillon". Elle dépend de la concentration, de la taille, de la forme et des coefficients de réflexion ou de réfraction des particules présentes.

La turbidité a été mesurée par un appareil conçu par l'Institut Pasteur de Lille. Il suffit de plonger à la profondeur désirée un cylindre ouvert à ses deux extrémités. Il renferme une source lumineuse en vis à vis avec une cellule. L'eau plus ou moins turbide absorbe en passant une partie du faisceau lumineux et la cellule indique l'intensité lumineuse reçue. Par convention, la transparence est donnée en pourcentage de lumière transmise en ligne droite par rapport à la lumière incidente : 0 % correspond à une eau claire et la valeur 100 % à une eau trouble.

Les matières en suspension (M. E. S.) représentent la masse de résidu déposé après filtration de 0,5 l d'eau sur des membranes de type diapor retenant les particules supérieures à 0,45 μm (Annexe I). Elles sont exprimées en mg/l.

D'une manière générale, on considère que dans un estuaire les concentrations en matières en suspension, supérieures à 100 mg/l attestent de la présence d'un bouchon vaseux à certains moments de la marée.

II - CAUSES POSSIBLES DE LA TURBIDITE DES EAUX

II.1- VITESSE DES COURANTS

Au-delà d'un certain seuil de vitesse (V_{ce} = valeur critique d'érosion), la remise en suspension ne cesse d'augmenter. La turbidité serait fonction de la force tractrice développée sur le fond (MIGNIOT, 1980).

Lorsque les vitesses diminuent, les eaux ne peuvent plus véhiculer une quantité appréciable de suspensions et leur compétence décroît. On observe de ce fait une décantation des éléments en suspension. Ainsi, au cours d'une marée, les fluctuations des vitesses sont déterminantes sur la nature des processus sédimentaires, comme l'ont montré de nombreux auteurs (BERTHOIS, 1964 ; POSTMA, 1967 ; ALLEN, 1972 ; BASSOULET, 1979 ; CASTAING, 1981 et AVOINE, 1982).

L'arrivée brutale du flot provoque une remise en suspension et pousse les eaux turbides vers l'amont. Lors des forts coefficients de marée, les vitesses de courants sont supérieures à celles propres aux faibles coefficients. Ainsi, ALLEN (1972) montre à propos de la Gironde, que le cycle érosion-sédimentation est lié au cycle morte-eau/vive-eau.

II.2 - PROCESSUS PHYSICO-CHIMIQUES

II.2.1 - Rôle de la température

Le rôle de la température est minime. BERTHOIS (1955) montre toutefois que, comme l'augmentation de température de l'eau diminue sa viscosité, ce phénomène augmente la vitesse de chute des particules et facilite la sédimentation au cours des étales.

II.2.2 - Rôle de la salinité

La salinité agit sur la floculation et induit une circulation résiduelle de densité. La floculation est caractérisée par la formation d'agrégats organo-minéraux en suspension lors du contact de l'eau de mer. Selon MIGNIOT (1968), la formation des agrégats apparaît pour une faible salinité : 0,5 ‰ à 3 ‰ ; pour KRONE (1978), la turbulence joue un rôle important dans ce phénomène, en favorisant la collision des particules. CHAMLEY (1974) indique que l'agglomération, par effet électrostatique des particules en suspension, n'est pas aussi généralisée qu'on pourrait le penser dans les milieux salés ; de plus, pour cet auteur, la floculation ne signifie pas nécessairement sédimentation, car rien n'indique que de petits agrégats d'argile de 10 à 20 µm aient une masse suffisante pour se déposer. L'importance de la floculation semble réduite dans les estuaires soumis aux mouvements de la marée. FRANCIS-BOEUF (1942) explique la sédimentation lors des étales de courants par la décantation, et au cours du jusant par un phénomène d'accrétion, les particules venant se coller aux sédiments qui se découvrent peu à peu.

Ainsi la floculation n'est pas la principale cause d'accumulation et cette idée est également confirmée par FEUILLET et FLEISCHER (*in* CASTAING, 1981).

III - EVOLUTION DES MATIERES EN SUSPENSION AU COURS D'UNE MAREE

III.1 - VARIATIONS DE LA TENEUR DES MATIERES EN SUSPENSION EN FONCTION DES VITESSES DE COURANT

Les courbes (figures 76A, B, C) montrent l'évolution comparée de la charge en matières en suspension et des vitesses de courant. Aux stations 4 et 3 (Pilori et hippodrome), les quantités de matières en suspension croissent parallèlement avec les vitesses de courant en début de montant.

Au Pilori (station 4) (figure 76A), le changement brutal du courant et son accélération provoquent une augmentation des teneurs en matières en suspension. Malgré une croissance continue des vitesses, les concentrations diminuent jusqu'à la pleine mer. Cette décroissance dans les teneurs en matières en suspension serait due ¹⁾ à un manque de prélèvements entre B. M. + 4 et P. M. ne permettant pas d'observer de plus fortes concentrations ; ²⁾ et peut être à un manque de sédiments facilement transportables par les courants. L'augmentation des teneurs en suspension serait due à une remobilisation des sédiments sur la frange littorale au moment du courant de flot, et l'ensemble de la masse turbide serait transportée dans l'estuaire. L'étale de pleine mer est caractérisée par une décantation des particules dans l'eau, attesté par une diminution des concentrations en matières en suspension. Après l'étale de pleine mer, et avec l'installation progressive du courant de jusant, les concentrations des matières en suspension décroissent jusqu'à environ P.M. + 2. A ce moment là, les courants atteignent des vitesses importantes qui remettent en suspension les sédiments. L'augmentation des concentrations observée résulterait d'une masse turbide venant de l'amont, ainsi que d'une remise en suspension.

Au droit de l'hippodrome, à la station 3 (figure 76B), nous remarquons avec le courant de flot, un phénomène semblable mais plus atténué. Par contre, à pleine mer, les concentrations diminuent pour augmenter assez rapidement avec l'installation du courant de jusant. La courbe des teneurs en matières en suspension présente un maximum à proximité de P. M. + 3.

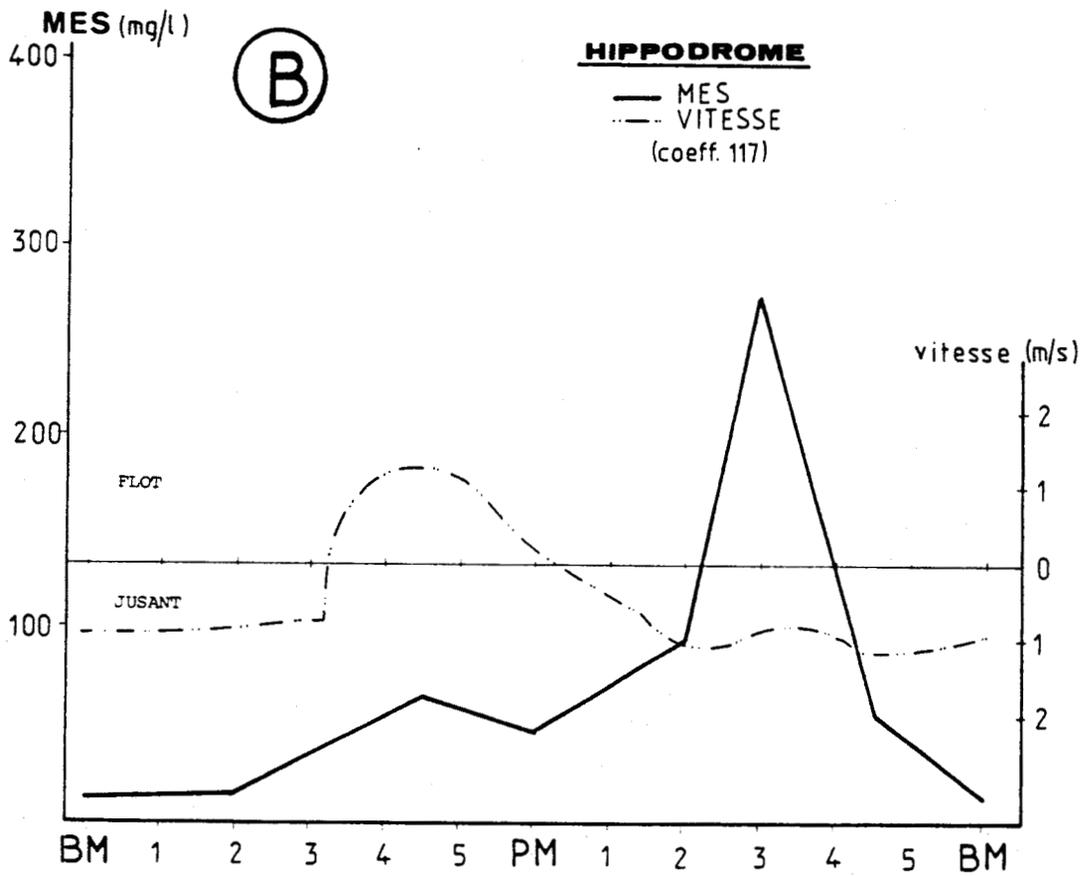
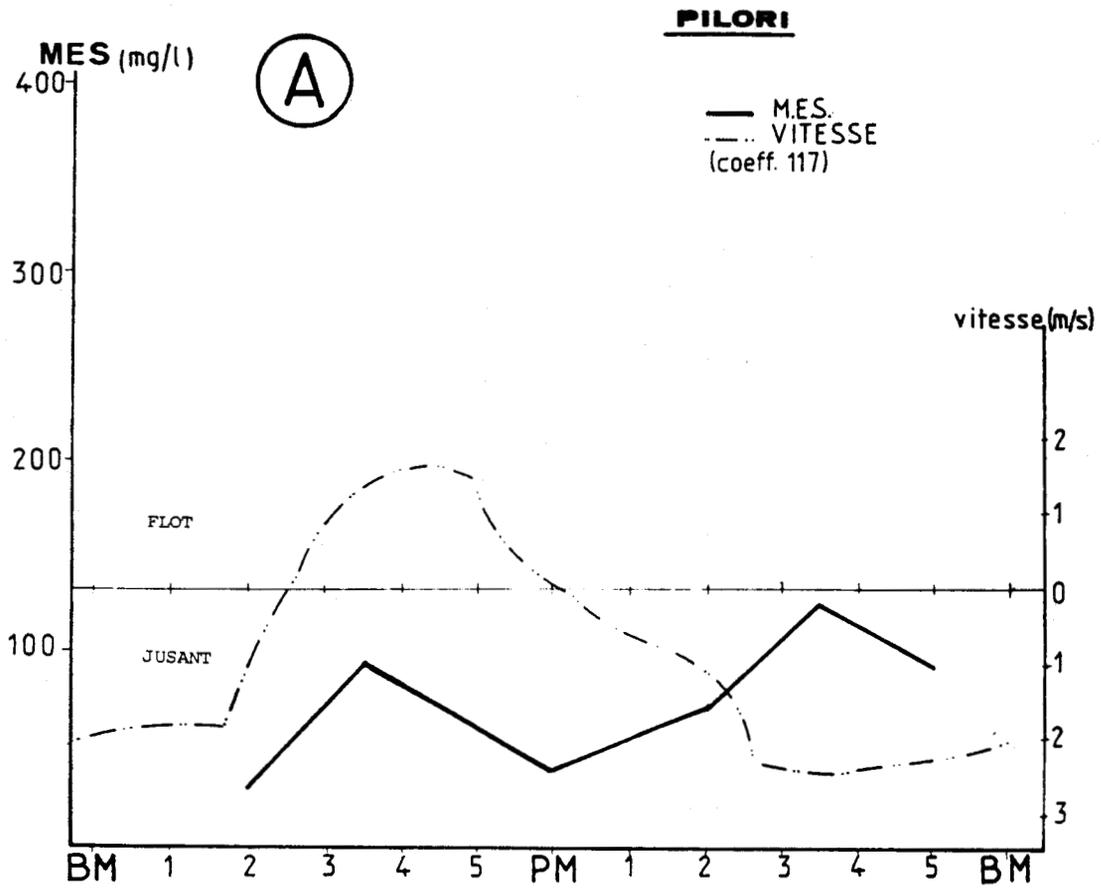


Figure 76 : VARIATION DES M.E.S. EN FONCTION DES VITESSES DE COURANT

A la station d'Etaples (figure 76C), les concentrations en M. E. S. suivent l'augmentation des vitesses du courant de flot. Les teneurs maximales correspondent à l'arrivée brutale et rapide du courant de flot. Par la suite, elles décroissent, malgré une accélération continue des vitesses. En jusant, les teneurs maximales se rencontrent autour de P. M. + 4, après les fortes vitesses de courant de jusant.

Ces courbes montrent qu'il existe une relation entre la variation des vitesses et des concentrations en matières en suspension. Pendant le flot nous remarquons : qu'au Pilori (station 4), les concentrations en M. E. S. atteignent leur valeur maximale avec l'arrivée des fortes vitesses de courant ; qu'au droit de l'hippodrome (station 3), les concentrations maximales correspondent aux vitesses de courant les plus importantes ; qu'au pont d'Etaples (station 2), les teneurs maximales en M. E. S. accompagnent le "coup de flot", c'est-à-dire la venue rapide et brutale du courant de flot. Par la suite, les vitesses s'accroissent, tandis que les teneurs en matières en suspension décroissent jusqu'à pleine mer. L'augmentation des concentrations traduit une remise en suspension de même qu'un transport, depuis l'aval, de la masse turbide ainsi créée. La diminution correspond à un non échantillonnage de l'eau ; si ce dernier avait été effectué plus souvent, nous aurions pu observer une augmentation continue des concentrations ; mais cette diminution peut signifier également qu'il n'existe plus de sédiments facilement remobilisables dans l'estuaire malgré des vitesses de courant plus importantes. La diminution des teneurs en matières en suspension, à pleine mer, se retrouve comme aux stations précédentes, et indique une décantation des particules au sein des eaux.

Au cours du jusant nous observons également le passage de fortes concentrations. A la station 4 (Pilori), les concentrations en M. E. S. sont les plus basses avec des valeurs voisines de 130 mg/l. Ces dernières apparaissent autour de P. M. + 3. A la station 3, la courbe des matières en suspension présente un pic plus marqué, avec des valeurs plus fortes (≈ 280 mg/l).

L'établissement du courant de flot serait responsable d'une forte remise en suspension. Les diverses particules décantent à pleine mer aux différentes stations et seraient reprises par le courant de jusant. Nous constatons un retard logique entre les stations hippodrome et Pilori, laissant à la masse turbide le temps de s'écouler. A l'aval, les fortes concentrations s'observent à P.M. + 4, approximativement une heure après celles de la station 3. Le manque de prélèvements d'eau dans le temps ne nous permet pas d'expliquer clairement le devenir de cette masse turbide.

III.2 - VARIATIONS DE LA TENEUR EN MATIERES EN SUSPENSION ET DE LA TURBIDITE EN POINT FIXE

III.2.1 - En vive-eau

Pilori : La figure 77A relative à la journée du 8 septembre 1983, présente deux pics importants dans les fluctuations des matières en suspension. Le premier maximum, au cours du flot (\approx B. M. + 5) est plus faible que le second accompagnant le courant de jusant (\approx P. M. + 4).

Les concentrations sont moins importantes en flot et en jusant pendant la journée du 19 mars 1984 (figure 77B). Les deux marées, du 8 septembre et du 19 mars diffèrent quant aux résultats ; pourtant ces derniers correspondent à des prélèvements effectués en période de revif, c'est-à-dire de coefficients de marée croissants. On devrait de ce fait trouver des résultats semblables pour ce qui est de l'évolution du phénomène. Sur les courbes, les premiers pics traduisent de fortes teneurs en matières en suspension au cours du flot qui sont dues à une remise en suspension ; et les deuxièmes pics correspondent à une reprise par les courants de jusant. Nous constatons que ces concentrations ne se rencontrent pas au même moment de la marée,

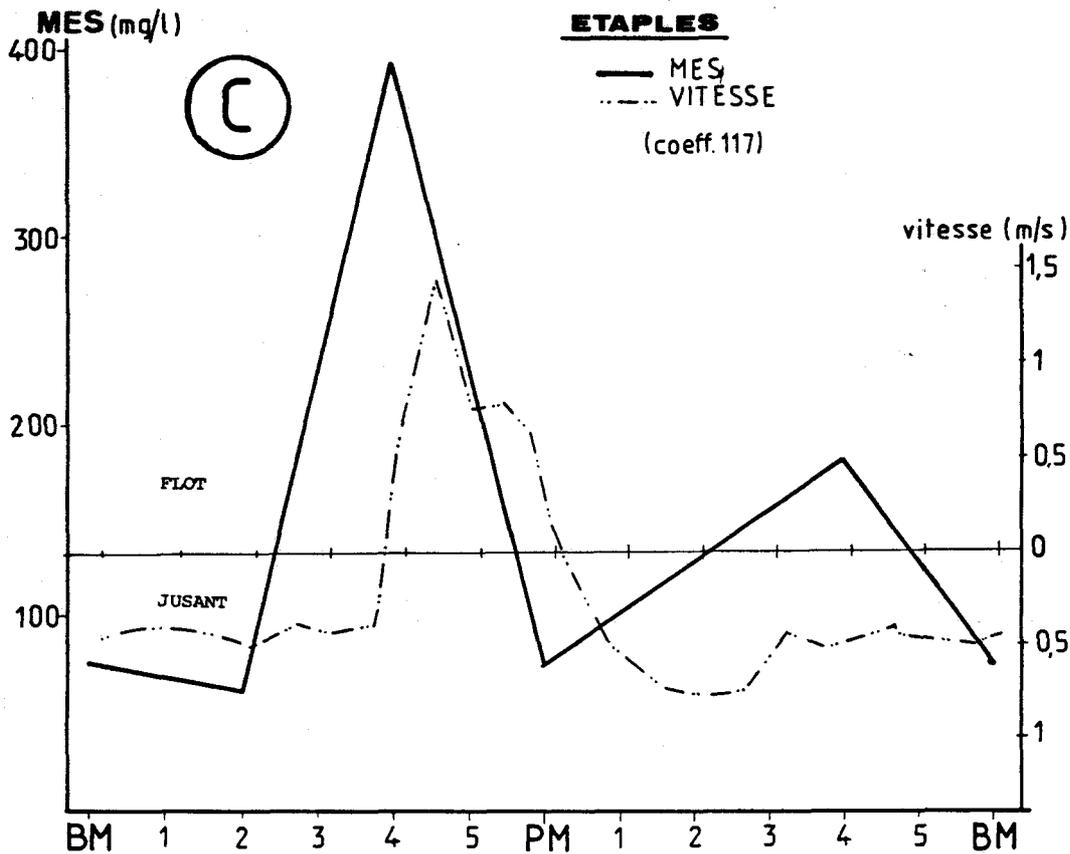


Figure 76 : VARIATION DES M.E.S. EN FONCTION DES VITESSES DE COURANT

ce fait résultant d'un problème d'échantillonnage. Ces deux courbes se complètent et montrent des concentrations légèrement plus fortes en jusant qu'en flot. Les fortes vitesses de jusant balayent les particules fines et favorisent le dépôt des sédiments sableux.

Les turbidités (figure 78A) suivent avec un certain retard l'évolution des matières en suspension. Au début du montant, les turbidités de fond et de surface sont semblables, attestant d'un brassage important de toute la colonne d'eau. De légères différences apparaissent vers la pleine mer, et au cours du perdant (P. M. + 1, P. M. + 3). De façon générale, les turbidités de fond sont légèrement plus importantes que celles de surface.

L'approche différente pour mesurer la turbidité et les matières en suspension peut expliquer le décalage observé dans leur évolution.

La turbidité résulte de l'absorption de la lumière à travers une eau trouble. Les particules minérales et organiques en suspension dans l'eau ne présentent pas les mêmes propriétés optiques en ce qui concerne les coefficients de réfraction et de réflexion.

Les matières en suspension représentent un poids, et une eau dite non turbide peut être caractérisée par une certaine masse de la charge transportée. Les particules minérales sont souvent plus lourdes que les particules organiques qui peuvent présenter elles-mêmes un fort pouvoir de réfraction et de réflexion.

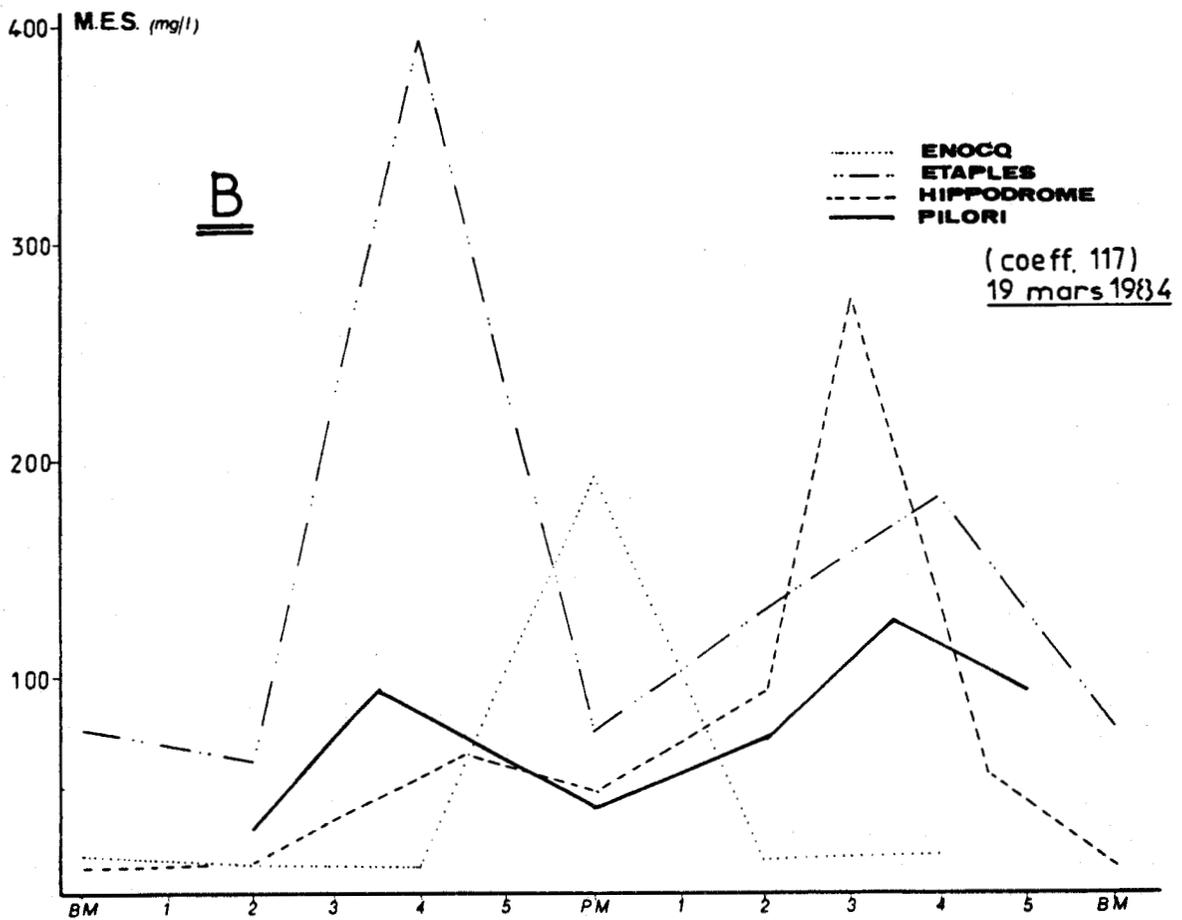
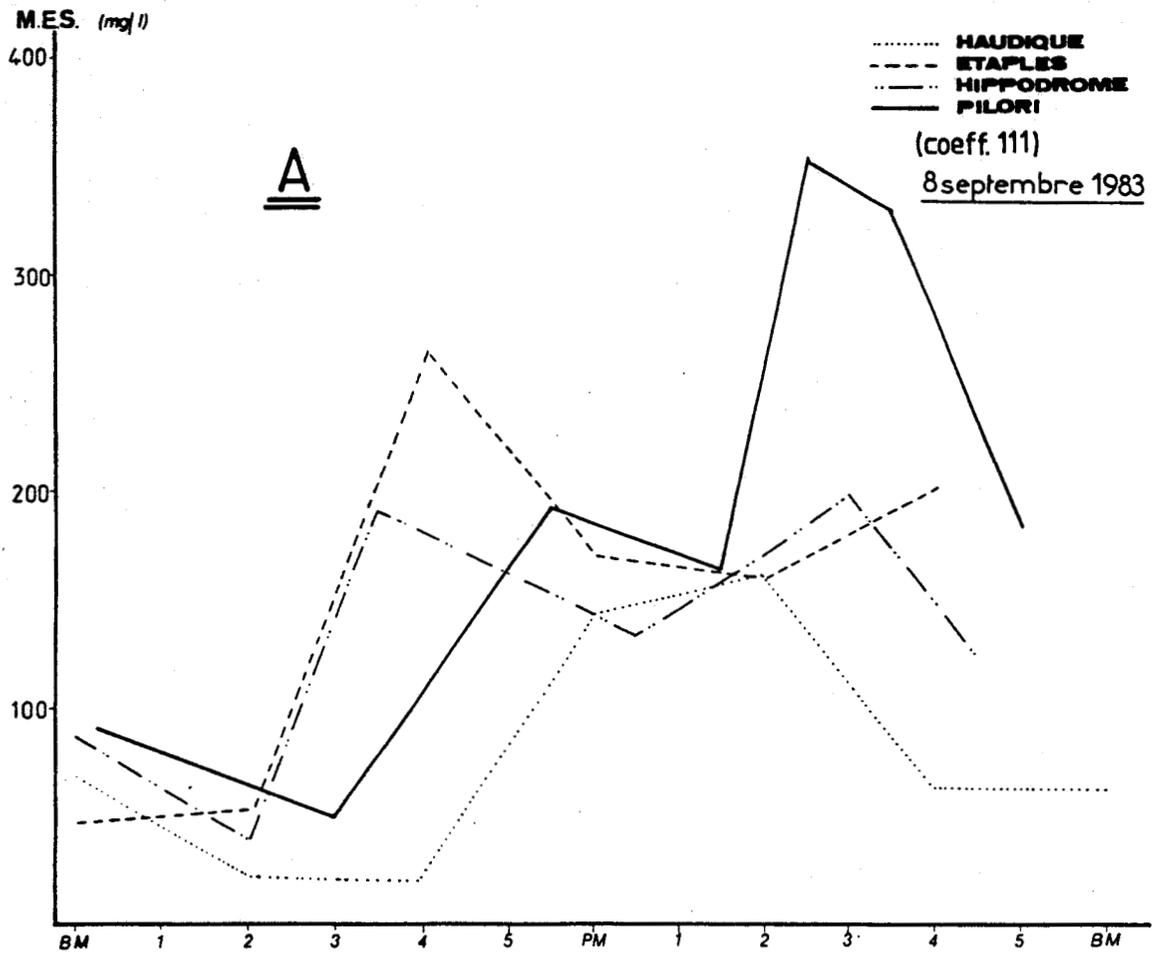


Figure 77: VARIATION DES MES EN POINTS FIXES

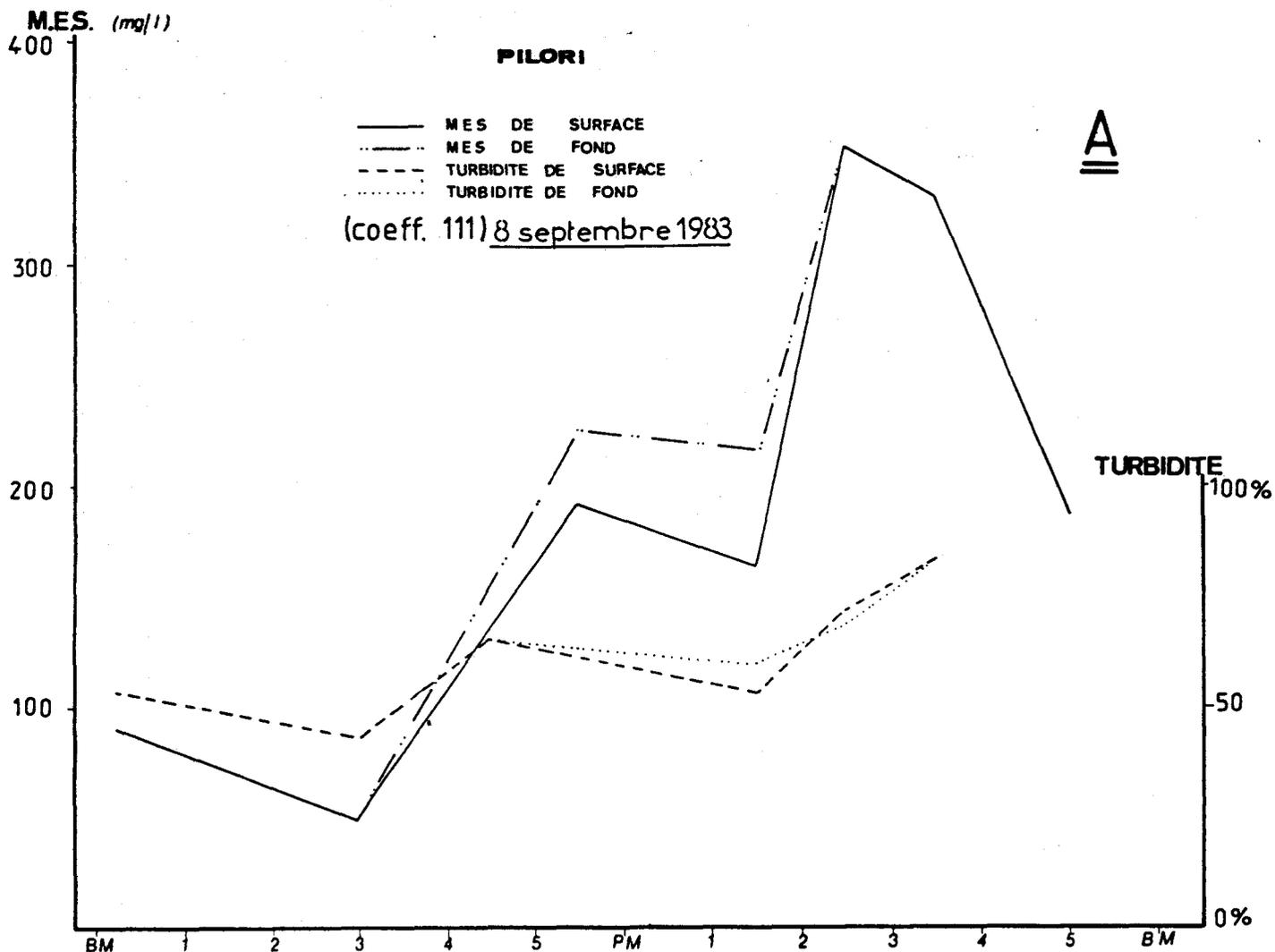


Figure 78: RELATION ENTRE M.E.S ET TURBIDITE AU COURS D'UNE MAREE DE VIVE-EAU

Hippodrome : La figure 77A présente également deux maxima dans les concentrations en M. E. S. Ces teneurs maximales sont équivalentes. La première correspond à une remise en suspension depuis la frange littorale jusqu'à cette station. Le deuxième pic aux environs de P. M. + 3 représente une masse turbide reprise par les courants de jusant.

La courbe de la figure 77B présente deux pics : le premier entre P. M. + 4 et P. M. + 5 très faiblement marqué et le second plus important à P. M. + 3.

A la station au droit de l'hippodrome, nous nous trouvons devant le même cas que celui mentionné précédemment à la station du Pilori. Le manque de prélèvements d'eau effectués à des moments différents ne nous permet pas de comparer très facilement les concentration des M.E.S. au cours du montant et du baissant. Les fortes teneurs rencontrées le 8 septembre 1983 ont été identifiées vers P.M. + 4, et celles observées le 19 mars 1984 ont été recueillies vers P.M. + 5. Pour cette dernière journée l'échantillonnage a été effectué après le passage de la masse turbide. Par contre en jusant, les moments de prélèvements sont semblables, avec toutefois un léger retard pour la journée du 8 septembre. Les deux courbes des figures 77A et 77B permettent d'estimer le passage des fortes concentrations entre B.M. + 3 au cours du baissant.

Les turbidités (figure 78B) présentent un parallélisme avec les variations des concentrations en matières en suspension, au contraire de la station 4 (Pilori). Les fluctuations des turbidités sont toutefois moins importantes.

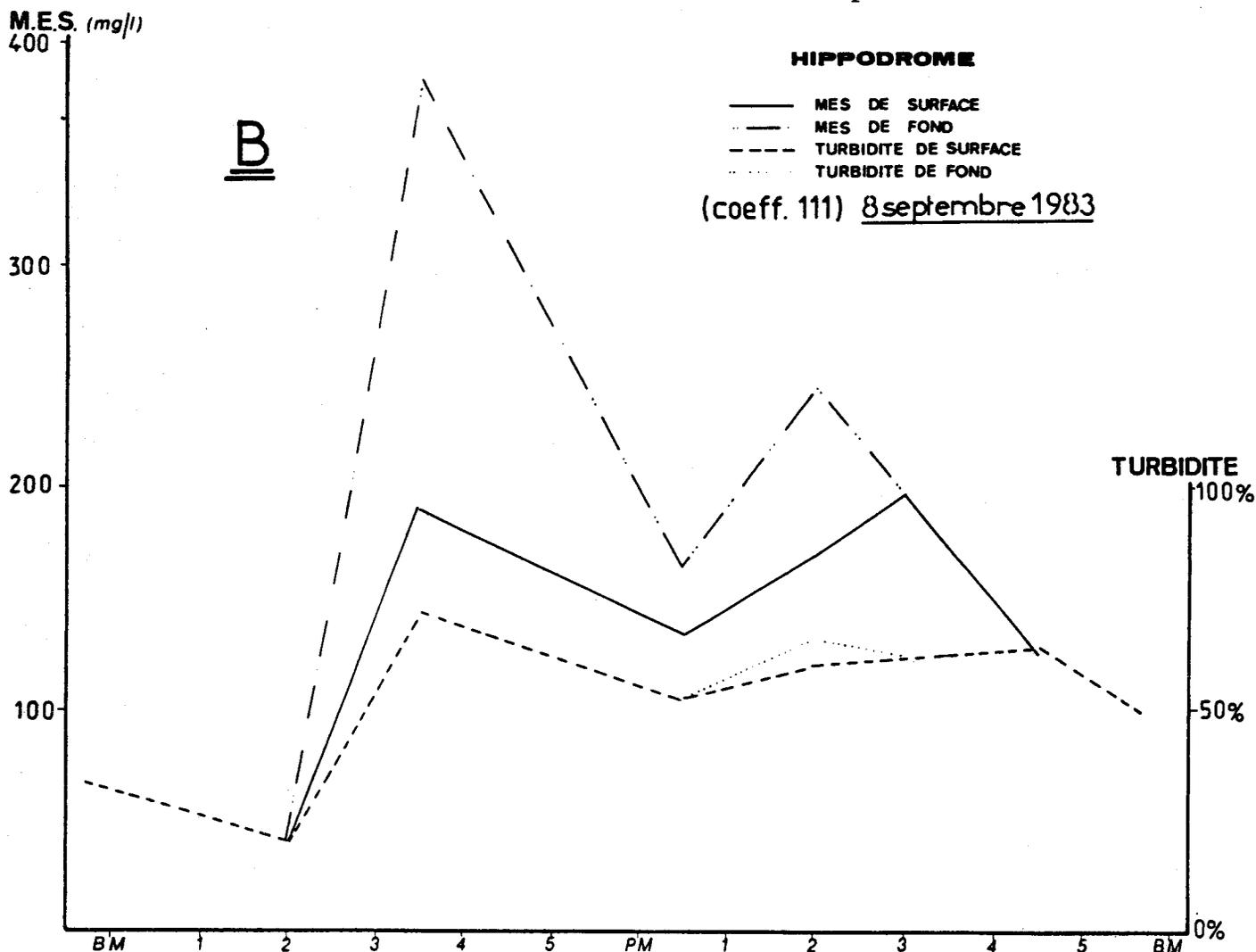


Figure 78: RELATION ENTRE M.E.S. ET TURBIDITE AU COURS D'UNE MAREE DE VIVE-EAU

Etaples : Les courbes des figures 77A et 77B à cette station présentent, comme les deux précédentes, deux maxima. Les concentrations maximales en matières en suspension sont plus élevées avec le montant. Cette différence est plus marquée pendant la journée du 19 mars 1984 (figure 77B).

La première forte teneur accompagne la venue du flot et résulte d'une remise en suspension qui s'est effectuée depuis la frange littorale jusqu'à cette station. Les concentrations au cours du baissant correspondent à une reprise des particules en suspension par le courant de jusant. Pendant l'étale de pleine mer, les faibles concentrations indiquent un début de décantation.

Le relevé des turbidités (figure 78C) a été réalisé avec plus de régularité que pour les autres stations, et les courbes offrent un parallélisme entre les mesures de surface et de fond. Elles sont plus fortes au fond qu'en surface à l'exception de la période du "coup de flot". Elles nous permettent de mieux suivre le comportement de la masse turbide à cette station. Les turbidités augmentent très rapidement au moment du "coup de flot" et diminuent vers la pleine mer. Le maximum rencontré se situe entre B. M. + 4 - B. M. + 5. Au moment de la reprise du courant de

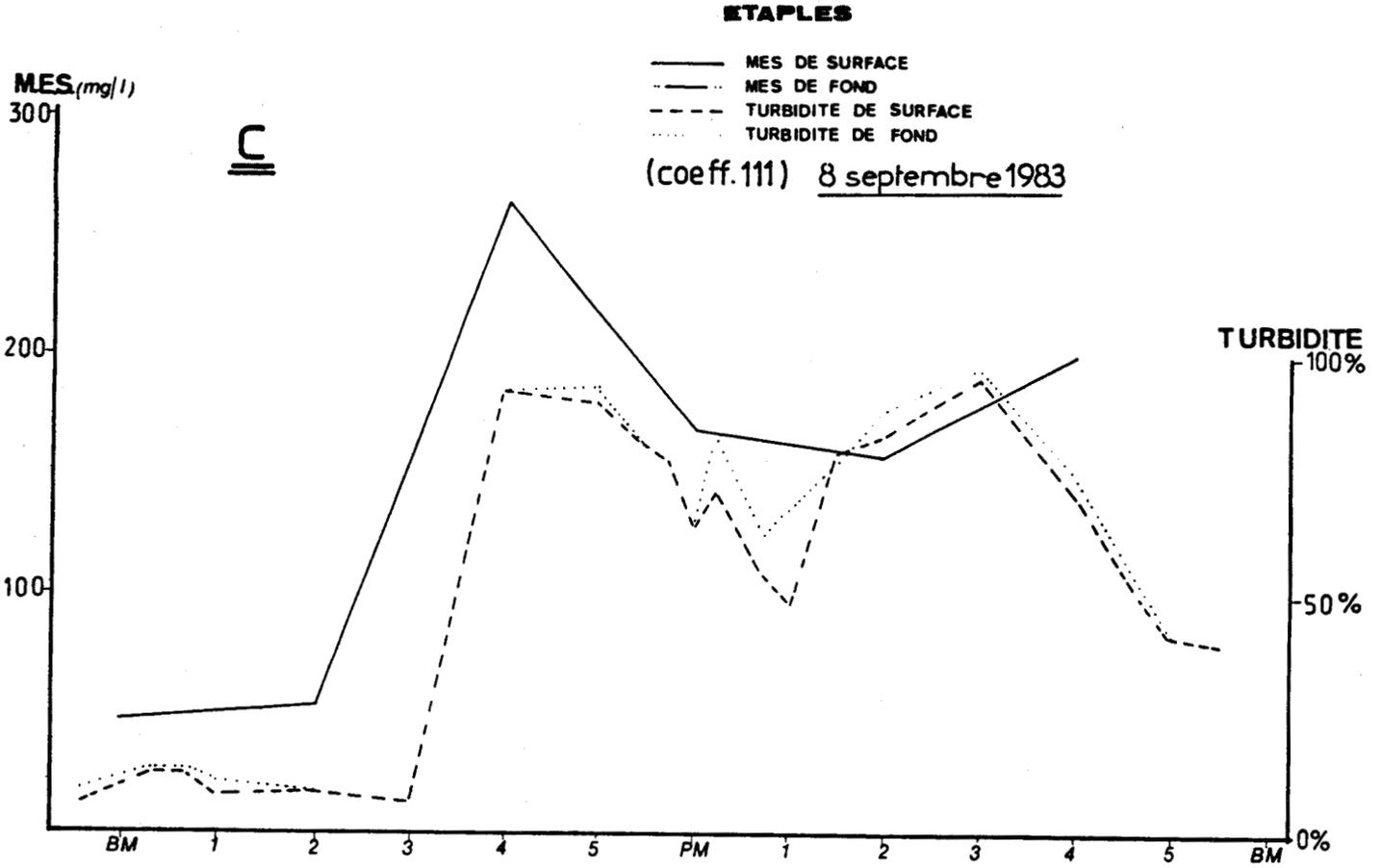


Figure 78: RELATION ENTRE M.E.S. ET TURBIDITE AU COURS D'UNE MAREE DE VIVE-EAU

jusant, elles augmentent pour décroître vers P. M. + 1. Par la suite elles augmentent jusqu'à P. M. + 3. Ce premier pic entre P. M. et P. M. + 1, serait dû à une masse turbide s'étalant dans l'estuaire et reprise par le courant progressif de jusant. La turbidité observée résulte d'un bouchon turbide plus amont qui s'écoule vers l'aval et d'une légère remise en suspension des particules nouvellement déposées.

Les prélèvements d'eau n'ont été effectués que toutes les deux heures au contraire des turbidités qui ont été mesurées tous les quarts d'heure ou toutes les demi-heures. Les plus fortes turbidités et les plus fortes concentrations en matières en suspension sont synchrones au cours du montant et en léger décalage pendant le baissant.

Haudique : La courbe de la figure 77A montre une augmentation des concentrations en M.E.S. aux environs de la pleine mer. Ces particules en suspension proviennent de l'aval et sont entraînées par le courant de flot maintenant installé dans tout l'estuaire. Les concentrations augmentent jusqu'aux environs de P.M. + 2 et décroissent ensuite par un pallier jusqu'à B.M. + 2.

Enocq : La courbe de la figure 77B montre également une augmentation des concentrations, légèrement après la pleine mer. Elles diminuent très rapidement par la suite.

Le courant de flot sur son passage remet en suspension une grande quantité de sédiments du fond. Il repousse la masse turbide ainsi formée jusqu'à Enocq, lieu qui correspond à la limite amont de l'influence du flot au cours des coefficients de vive-eau. A l'amont (Haudique, Enocq), les concentrations en matières en suspension les plus élevées se rencontrent autour de la pleine mer ; elles atteignent des valeurs fluctuant entre 150 et 200 mg/l.

En résumé, les courbes des M. E. S. montrent deux maxima, le premier avec le flot et le deuxième avec le jusant. Les fortes teneurs ne se retrouvent pas d'une marée à l'autre. Cette dissemblance, quant à l'évolution des concentrations en matières en suspension, est certainement due au nombre restreint de prélèvements d'eau qui ne permettent pas de cerner les moments cruciaux des marées. En effet, les maxima des concentrations rencontrés sur les deux jours (8 septembre et 19 mars) sont décalés en flot aux stations 4 et 3, et en jusant à la station 4. A cause des problèmes rencontrés (faible profondeur d'eau, fort courant) pour se rendre de la station 3 à la station 4 et vice-versa, les prélèvements n'ont pas été effectués au même moment durant ces deux journées. De ce fait, si les phénomènes observés se reproduisent de la même façon d'une marée à l'autre, les deux missions paraissent plutôt complémentaires.

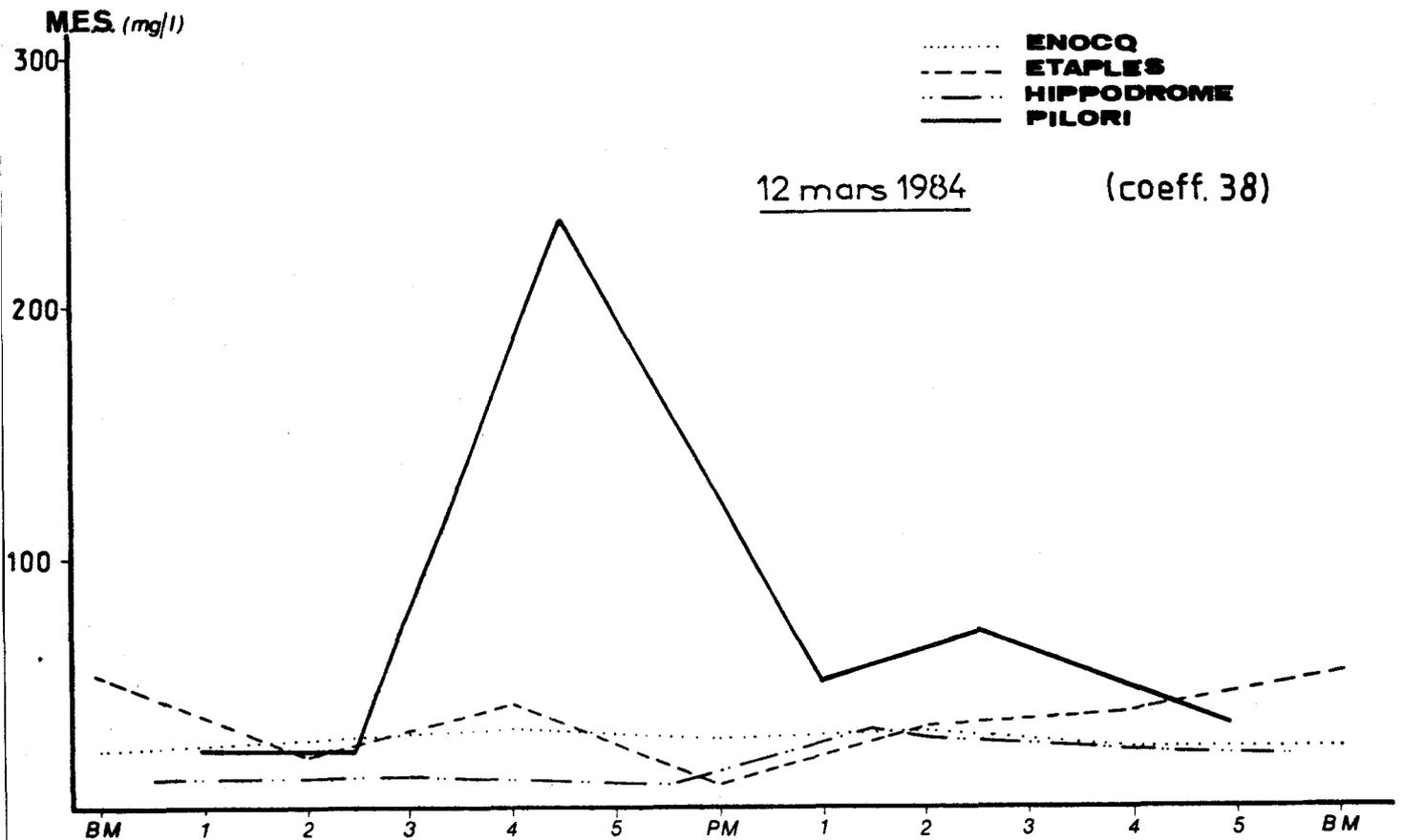


Figure 79: VARIATIONS DES MES EN POINTS FIXES AU COURS D'UNE MAREE DE MORTE-EAU

III.2.2 - En morte-eau

Pilori : Les courbes (figure 79) montrent un maximum très important vers B. M. + 4. Les augmentations de concentration en matières en suspension et de turbidité fluctuent parallèlement et suivent l'arrivée du flot. Autour de la pleine mer, les turbidités sont supérieures au fond et paraissent refléter un début de décantation (figure 80A).

Hippodrome : Les concentrations sont bien plus faibles et moins variables à la station hippodrome qu'à la station Pilori (figure 79). La courbe des turbidités (figure 80B) présente des fluctuations plus nombreuses que la courbe des matières en suspension. Ceci est simplement dû au nombre plus important de mesures de turbidité que de prélèvements d'eau. Nous constatons une augmentation progressive des turbidités (figure 80B) de B. M. + 4 à P. M. + 2. La concentration en matières en suspension est peu variable, et n'augmente que vers P. M. + 1, P. M. + 2.

Etaples : La courbe des matières en suspension (figure 79) montre des concentrations voisines de celles de la station de l'hippodrome. Elles fluctuent cependant beaucoup plus. Les turbidités (figure 80C) varient peu jusqu'à la pleine mer, où elles décroissent soudainement avant de réaugmenter. Le même phénomène existe également sur la courbe des matières en suspension. Ceci fait penser à un phénomène de décantation à ce moment de la marée, les résultats figurés ne concernant que la surface.

En vive-eau et sur toutes les stations, les concentrations en matières en suspension augmentent très fortement avec le "coup de flot" indiquant une nette remise en suspension des sédiments. Le courant de jusant reprend la masse turbide étalée dans tout l'estuaire et remet en suspension une grande partie des particules fraîchement déposées. D'après les résultats obtenus, en régime de morte-eau, les concentrations sont dans l'ensemble plus importantes en flot qu'en jusant (Pilori, Etaples).

En effet, les suspensions peuvent être bloquées au moins temporairement sur les slikkes. Les mécanismes physico-chimiques sur la sédimentation des rives des baies et des fleuves ont été bien décrits par GOULEAU (1975). Les eaux turbides sont repoussées par le courant de flot sur les rives. Le courant de jusant agit sur la remise en suspension des sédiments en cours de dépôt et leur retour dans le chenal. Malgré une remise en suspension par l'onde de jusant, il reste toujours une fine pellicule de sédiment frais qui est soumise à marée basse aux effets de l'émersion.

Dans la Canche, les slikkes sont bien développées en rive droite en amont du pont d'Etaples, sur les deux rives entre ce pont et le centre nautique du Touquet, et en rive gauche à l'aval, au droit de ce même club. Ces zones sont assez bien développées dans ce petit estuaire et contribuent activement au piégeage des sédiments.

Le décalage observé entre les turbidités et les matières en suspension correspond aux méthodes différentes pour évaluer une eau chargée, les particules en suspension n'ayant pas la même masse ni le même coefficient de réfraction et de réflexion.

III.3 - EVOLUTION LONGITUDINALE DES CONCENTRATIONS EN MATIERES EN SUSPENSION AU FOND ET EN SURFACE AU COURS D'UN CYCLE DE MAREE

III.3.1 - En période de vive-eau (figures 81A, B)

A B. M., les concentrations en matières en suspension sont comprises entre 30 et 100 mg/l dans tout l'estuaire.

A B. M. + 2, la vidange de l'estuaire se poursuit en entraînant les eaux plus turbides vers l'aval.

PILORI

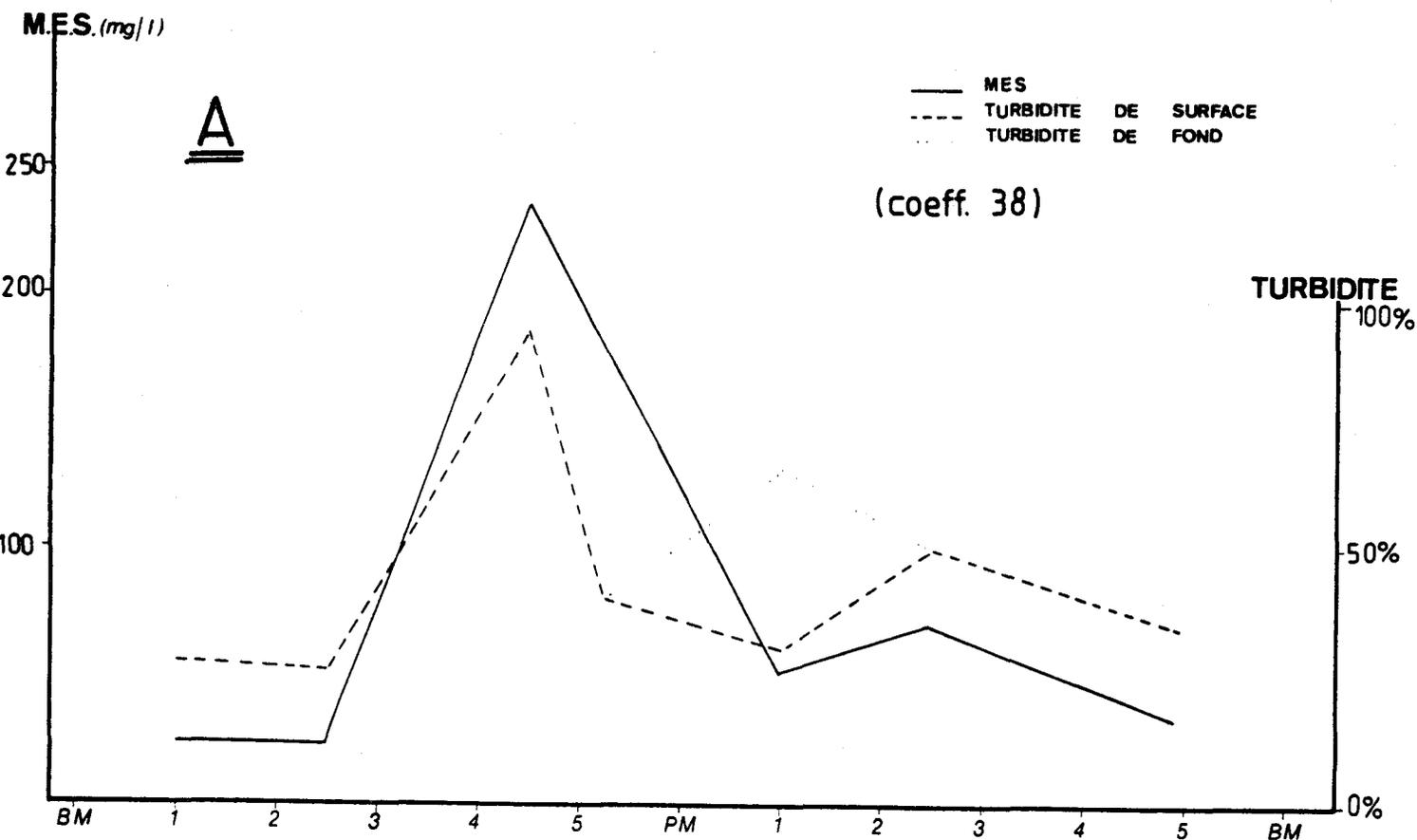


Figure 80. RELATION ENTRE MES ET TURBIDITE AU COURS D'UNE MAREE DE MORTE-EAU

A B. M. + 4, le flot s'est installé dans l'estuaire et nous retrouvons une masse plus turbide à hauteur de la station d'Etaples.

A P. M. , les concentrations en matières en suspension s'homogénéisent dans tout l'estuaire. A Haudique, le fond présente une charge turbide plus faible qu'en surface. Aux stations du Pilori et d'Haudique, la décantation des particules en suspension commence à s'opérer, les eaux du fond étant plus chargées en particules que celles de la surface.

A P. M. + 2, le courant de jusant s'est installé et, à la station du Pilori, remet en suspension la masse turbide du fond dans toute la colonne d'eau.

A P. M. + 4, la masse turbide s'étale sur toute la colonne d'eau à l'aval (station 4). Les vitesses de courant atteignent leur vitesse maximale et repoussent les eaux turbides vers l'embouchure.

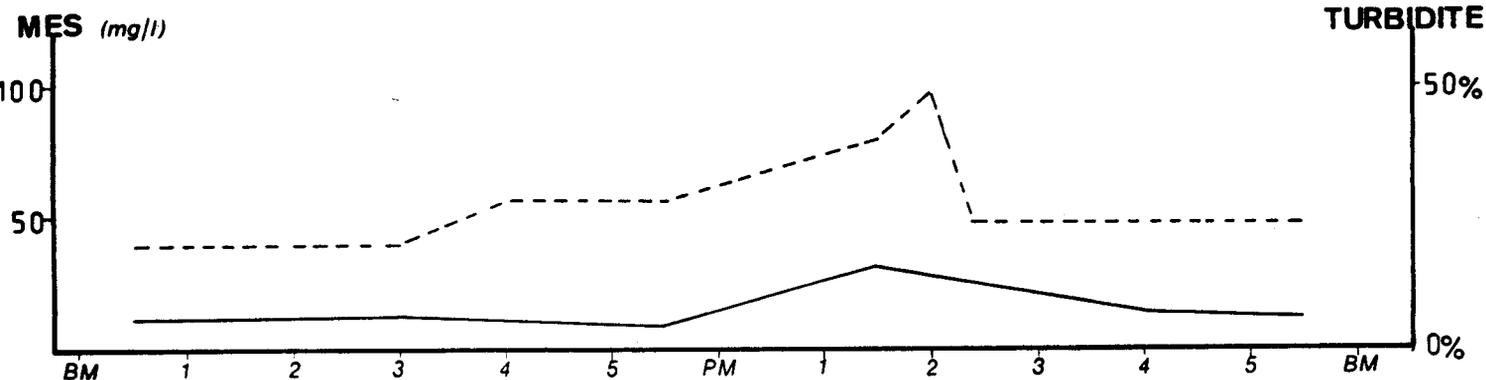
En résumé : Un noyau vaseux dense (figure 81A) se localise vers B. M. + 4, à la station d'Etaples, puis à pleine mer aux stations du Pilori et de l'hippodrome. Un bouchon vaseux s'étale dans tout l'estuaire et est repoussé par les courants de jusant vers l'aval. A B. M. + 4, les concentrations maximales jouxtent l'isohaline 10 ‰.

HIPPODROME

— MES.
 - - - - - TURBIDITE DE SURFACE

B

(coeff. 38)



ETAPLES

— MES
 - - - - - TURBIDITE DE SURFACE
 - - - - - TURBIDITE DE FOND

C

(coeff. 38)

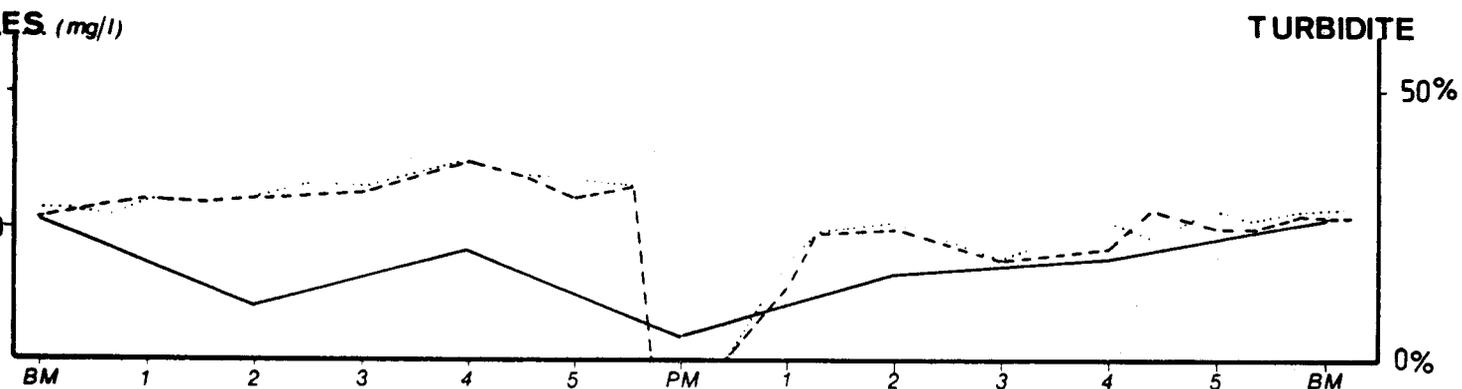


Figure 80. RELATION ENTRE MES ET TURBIDITE AU COURS D'UNE MAREE DE MORTE-EAU

III.3.2 - En période de morte-eau (figures 82A et B)

Malgré un débit plus important, les concentrations sont moins élevées le 12 mars 1984 (figure 82A) que le 8 septembre 1983 (figure 81A). Nous constatons la présence d'un "noyau" plus turbide en vive-eau (figure 81B) que nous ne retrouvons pas au cours des marées de morte-eau (figure 82B). La station d'Etaples semble caractérisée par une forte sédimentation le 8 septembre, au contraire de la journée du 12 mars 1984. Cette station est dans l'ensemble plus turbide que les autres durant les marées de vive-eau.

A B. M. , l'eau est un peu plus chargée (de 30 à 100 mg/l) à hauteur de la station 2.

A B. M. + 2, la turbidité est faible dans tout l'estuaire.

Figure 81: EVOLUTION LONGITUDINALE DES SUSPENSIONS AU COURS D'UN CYCLE DE MARÉE DE VIVE-EAU (coeff. 111)

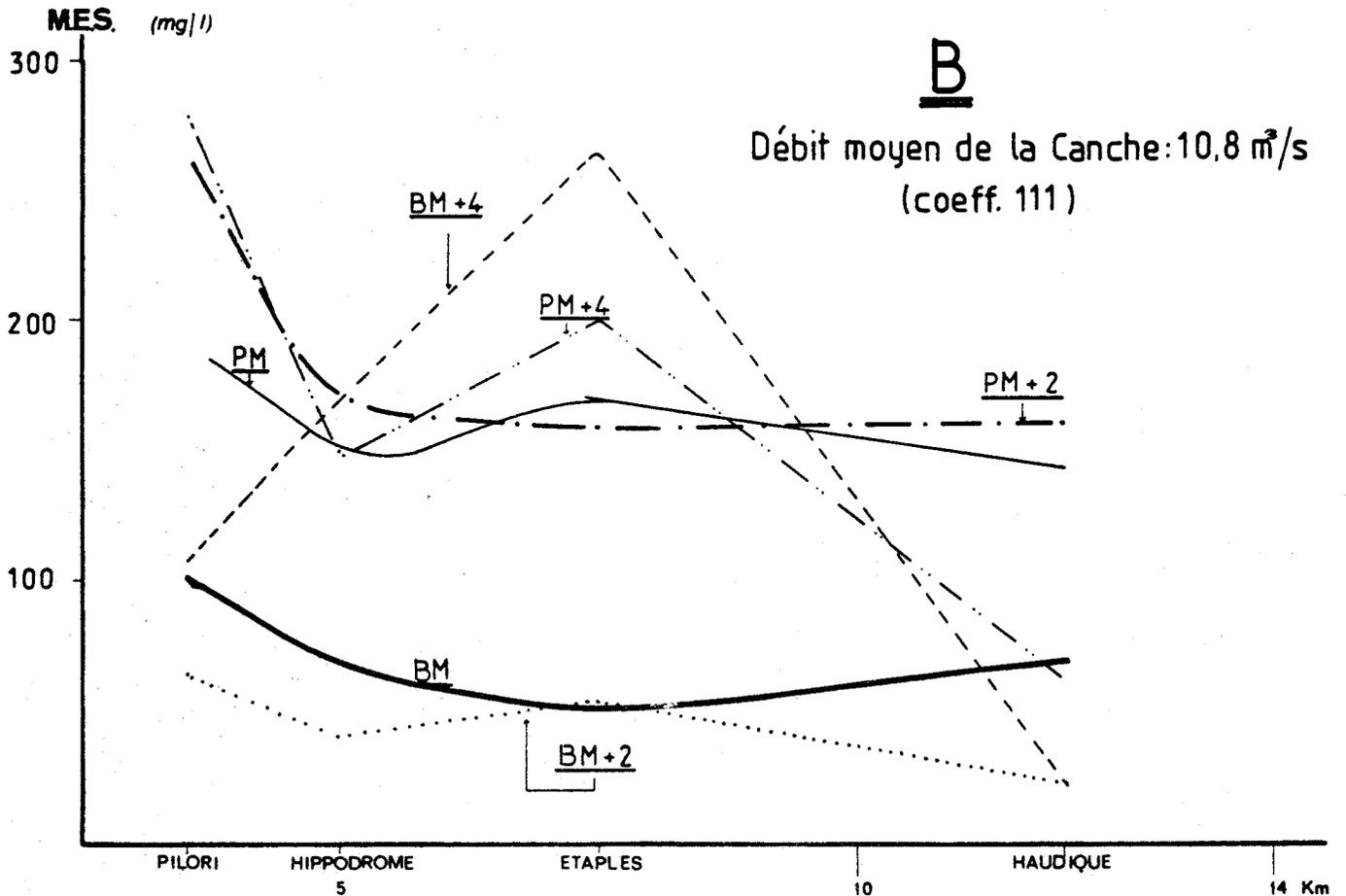
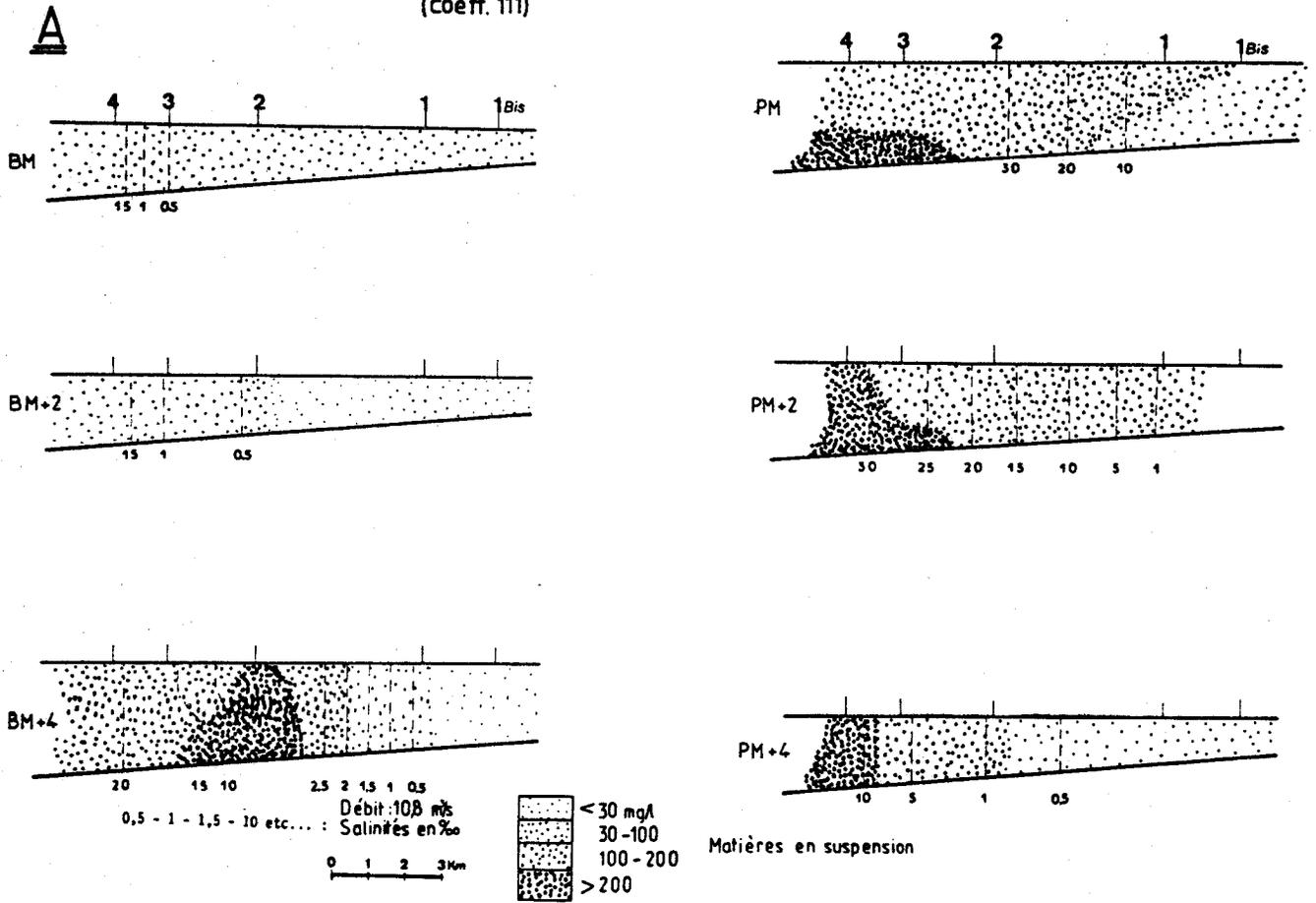
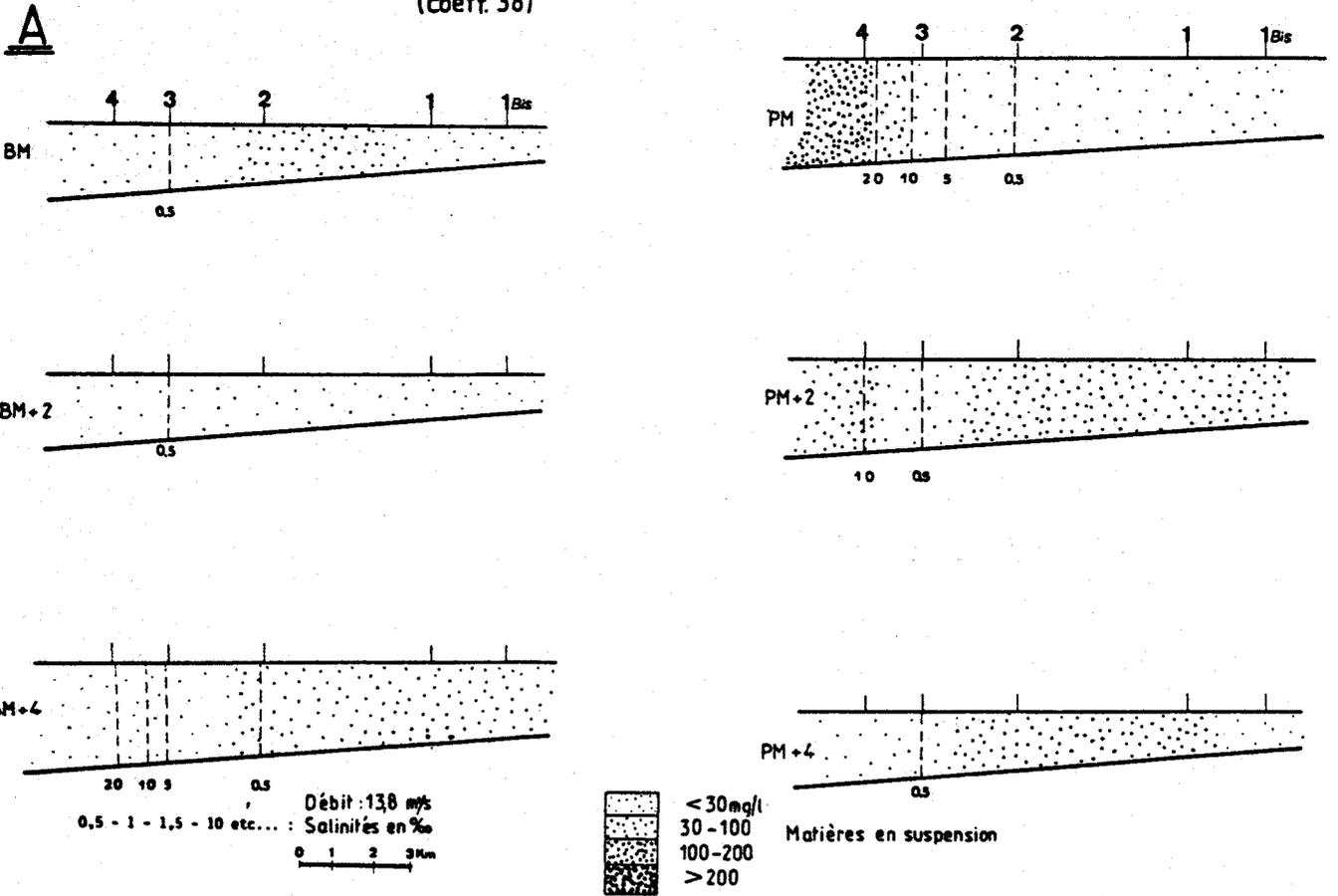
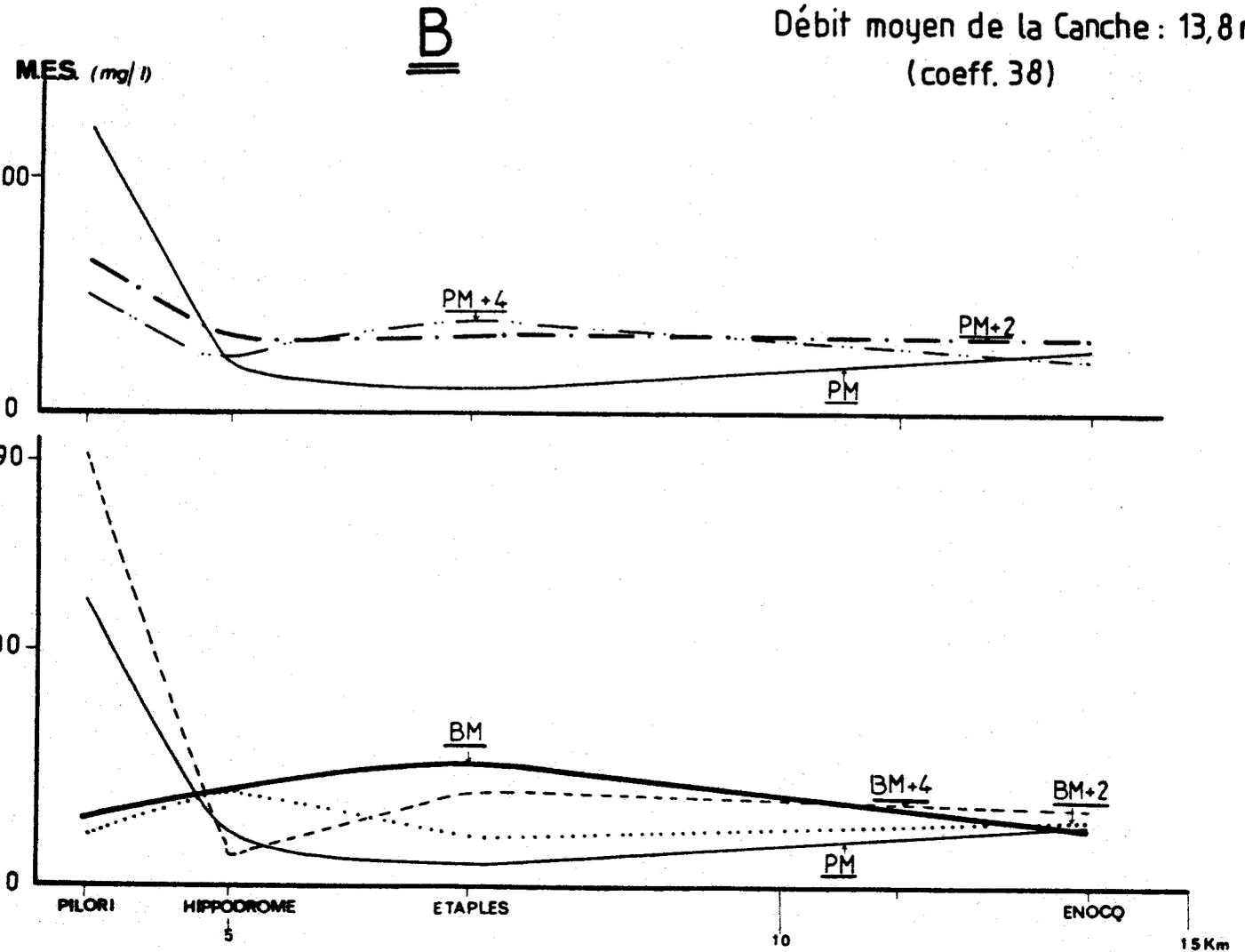


Figure 82: EVOLUTION LONGITUDINALE DES SUSPENSIONS AU COURS D UN CYCLE DE MAREE DE MORTE-EAU (coeff. 38)



Débit moyen de la Canche : 13,8 m³/s
(coeff. 38)



A B. M. + 4, au moment de l'arrivée du courant de flot, les eaux sont plus chargées à l'amont, alors que le courant y est toujours de jusant.

A P. M. , la masse turbide s'arrête dès l'aval de l'estuaire, à hauteur de la station 4.

A P. M. + 2, cette charge turbide a disparu et on ne trouve plus que des concentrations en matières en suspension modérées, variant entre 30 et 100 mg/l.

A P. M. + 4, il existe une eau un peu plus chargée, au même endroit qu'à B. M.

Le centre de gravité de la lentille turbide, lorsqu'elle existe, se retrouve à B. M. + 4, à hauteur du pont d'Etaples et à P. M. - P. M. + 2 à la station 4 (Pilori). Cette masse turbide a deux origines différentes: d'une part elle peut résulter d'une remise en suspension lors du "coup de flot", d'autre part on peut assister éventuellement ¹⁾ à une pénétration d'eau plus turbide provenant du littoral, ²⁾ à un retour d'une partie des suspensions libérées par la Canche. En effet, lors d'une mission à l'embouchure (avril 1984), nous avons pu suivre une masse plus turbide se dirigeant vers le Nord en début de jusant, puis en direction du Sud vers mi-perdant. Les courants alternatifs de ce secteur pourraient engendrer des cellules de circulation.

Les concentrations maximales en matières en suspension ont été rencontrées après les périodes pluvieuses ; ces concentrations lors des prélèvements, dépassaient facilement les 600 mg/l, à P. M. + 2 à la station 3. Les concentrations minimales ont été relevées au moment des coefficients de morte-eau.

CONCLUSIONS

Dans l'estuaire de la Canche, le bouchon vaseux représente une masse temporaire, d'extension irrégulière et reliée de manière souvent lâche aux oscillations de la marée. Le courant de flot est accompagné par une forte turbidité résultant d'une remise en suspension des sédiments? Les fortes concentrations en matières en suspension proviennent de la marge littorale et également d'un retour des suspensions libérées par la Canche. Ce dernier point signifierait l'existence de cellules de circulation le long de la côte. A Etaples, l'augmentation des vitesses de flot se poursuit sans être suivie par une augmentation des concentrations en matières en suspension. Ceci nous fait penser à un volume limité de sédiments pouvant être remobilisés.

Le retour progressif du courant de jusant reprend les particules en suspension étalées dans tout l'estuaire et remet en suspension une grande partie du sédiment fraîchement déposé.

Un noyau dense (> à 200 mg/l) s'étale au fond du chenal aux stations du Pilori et de l'hippodrome. Il a été observé à B.M. + 4 à la station d'Etaples, précédant l'isohaline 10 ‰. A Etaples cette charge en suspension a également été constatée par ORANGE (1982) et BENTLEY (1984).

A l'étale de pleine mer existe une décantation du bouchon vaseux, attestée par des eaux plus chargées au fond, aux stations du Pilori et de l'hippodrome.

Le décalage observé entre les turbidités et les concentrations en matières en suspension est dû aux différences existant dans les méthodes. En effet, la turbidité dépend de la taille et des coefficients de réfraction et de réflexion des particules, alors que les matières en suspension ne dépendent que de leur poids.

C'est en vive-eau que le bouchon vaseux est le mieux développé. Cette masse turbide semble être directement liée aux courants de marée qui remettent en suspension les sédiments du fond lorsque leur vitesse est suffisante; c'est un phénomène caractéristique des estuaires à fort marnage (ALLEN et al., 1977, 1980; BASSOULET, 1979; CASTAING et ALLEN, 1981; AVOINE, 1982; DUBRULLE et LARSONNEUR, 1984).

- CHAPITRE III -

ETUDE DES MINERAUX EN SUSPENSION

L'étude des minéraux en suspension peut conduire à différencier les influences fluviatiles et les influences marines dans la sédimentation estuarienne. Nous avons prélevé des suspensions aux mêmes stations et au même moment que pour les prélèvements sédimentaires, et les études minéralogiques ont été menées parallèlement aux études géochimiques. Les particules en suspension (seston) ont été isolées par filtration, selon une procédure décrite en Annexe I. L'approche utilisée est voisine de celle déjà développée au large du Rhône (BLANC *et al.*, 1969 ; CHAMLEY, 1971). Nous considérerons successivement l'assemblage minéral total des suspensions, puis les minéraux argileux.

I - ASSEMBLAGE MINERALOGIQUE TOTAL

Les principaux minéraux identifiés sont les suivants : calcite, quartz, feldspath, dolomite et minéraux argileux.

L'abondance des minéraux a été appréciée par simple lecture de la hauteur des pics d'intensité 1.0.0. sur les diagrammes de diffraction X, au-dessus du fond continu stabilisé (figure 83). Les hauteurs de réflexions suivantes ont été prises en compte : 3,34 Å (quartz), 3,035 Å (calcite), 2,88 Å (dolomite), 3,20 Å (feldspath), 4,44 Å (minéraux argileux).

Les minéraux argileux et la dolomite sont présents en faible proportion, et ne présentent pas de variations caractéristiques au long des marées ; ils n'ont pas été étudiés de façon systématique. En revanche une étude détaillée a pu être réalisée sur le quartz, les feldspaths et la calcite.

I.1 - FELDSPATHS

I.1.1 - En vive-eau

Les feldspaths sont toujours présents en faible quantité (84A et B), et paraissent se comporter de façon presque indépendante des autres minéraux. A l'amont les feldspaths présentent de faibles variations quantitatives selon le moment du prélèvement, ce qui paraît résulter de fluctuations dans les apports fluviatiles et le régime hydraulique. A l'aval, leur proportion est particulièrement faible, ce qui indique que ces minéraux ont sédimenté dans l'estuaire. A l'aval, les stations 4 et 3 présentent de plus grandes variations. Malgré le manque de résultats, les prélèvements étant effectués toutes les deux heures environ, nous ne pouvons suivre de façon continue à l'aval les fluctuations observées à la station 3.

A P. M. + 2 (figure 84A), ces minéraux sont quasi inexistantes dans les suspensions aux stations 2 et 3.

A P. M. + 4, leur quantité diminue dans tout l'estuaire et augmente de nouveau à B. M.

Nous retrouvons à B. M. + 2 (figure 84B) des quantités équivalentes.

A B. M. + 4, les proportions de feldspaths diminuent à nouveau et présentent à P. M. les mêmes variations, mais de façon plus marquée.

Il est difficile d'évaluer les proportions exactes de feldspaths. Pour une même abondance réelle, le pic à 3,20 est généralement plus faible que les pics majeurs du quartz et de la calcite. Les proportions relatives ne nous permettent pas de voir aisément les variations quantitatives des feldspaths. En effet, il suffit que dans l'assemblage minéralogique l'un des éléments augmente en proportion, pour qu'aussitôt les proportions des autres minéraux diminuent. A basse mer, l'augmentation des proportions de feldspaths serait due à une diminution de celles des autres minéraux. De plus, le maillage trop lâche des prélèvements dans le temps ne nous aide pas dans l'interprétation des résultats.

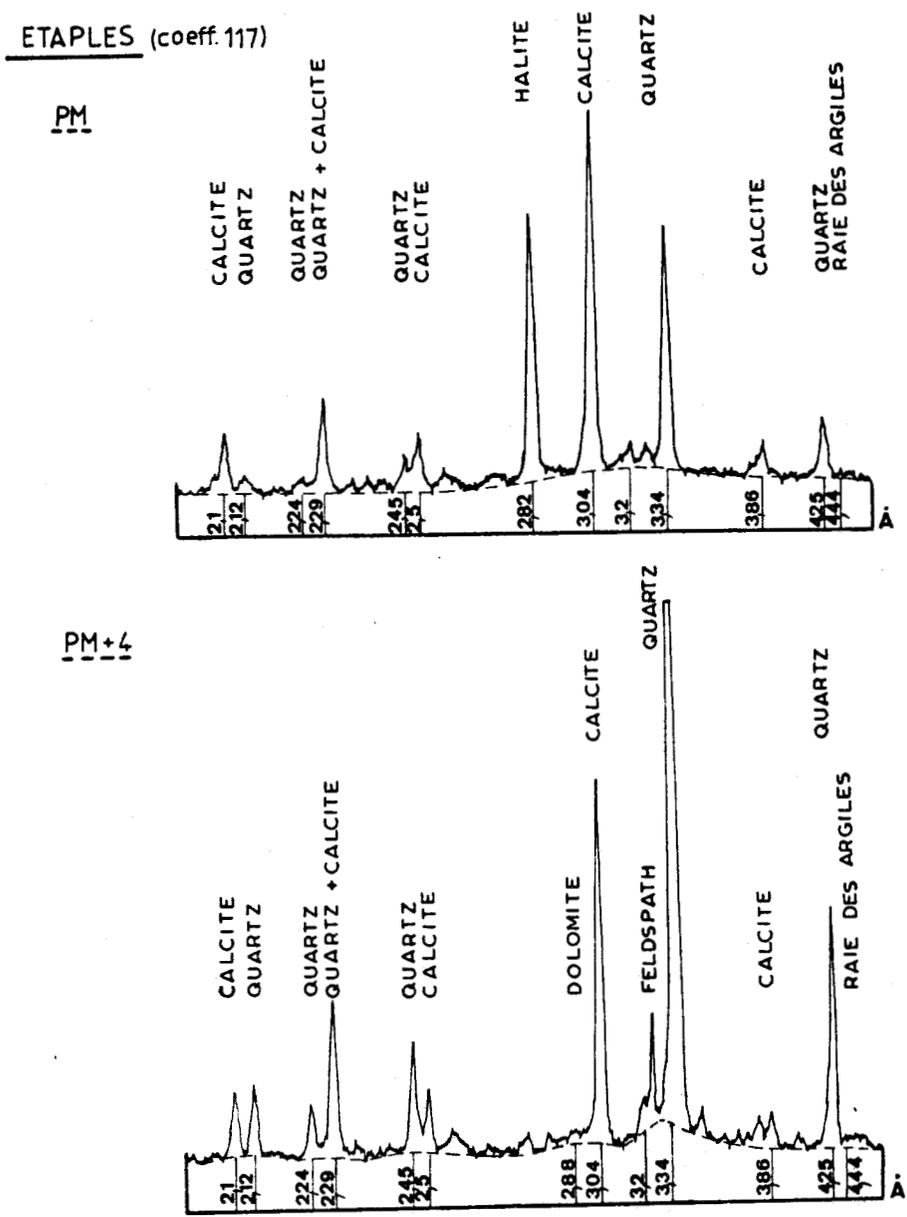


Figure 83: DETERMINATION DES MINERAUX DES SUSPENSIONS BRUTES PAR DIFFRACTION X

I.1.2 - En morte-eau (figures 85A et B)

La quantité totale des feldspaths semble un peu plus importante qu'en vive-eau. Les apports fluviatiles pourraient être plus importants, mais l'influence du fleuve en morte-eau se fait ressentir jusqu'à Etaples, au contraire des coefficients de vive-eau, où nous remarquons son influence plus en amont, à Enocq.

A l'aval, aux stations du Pilori et de l'hippodrome, les fluctuations des feldspaths sont passablement marquées.

Figure 84 EVOLUTION LONGITUDINALE DE QUELQUES MINERAUX AU COURS D'UN CYCLE DE MAREE DE VIVE-EAU (coeff. 117)

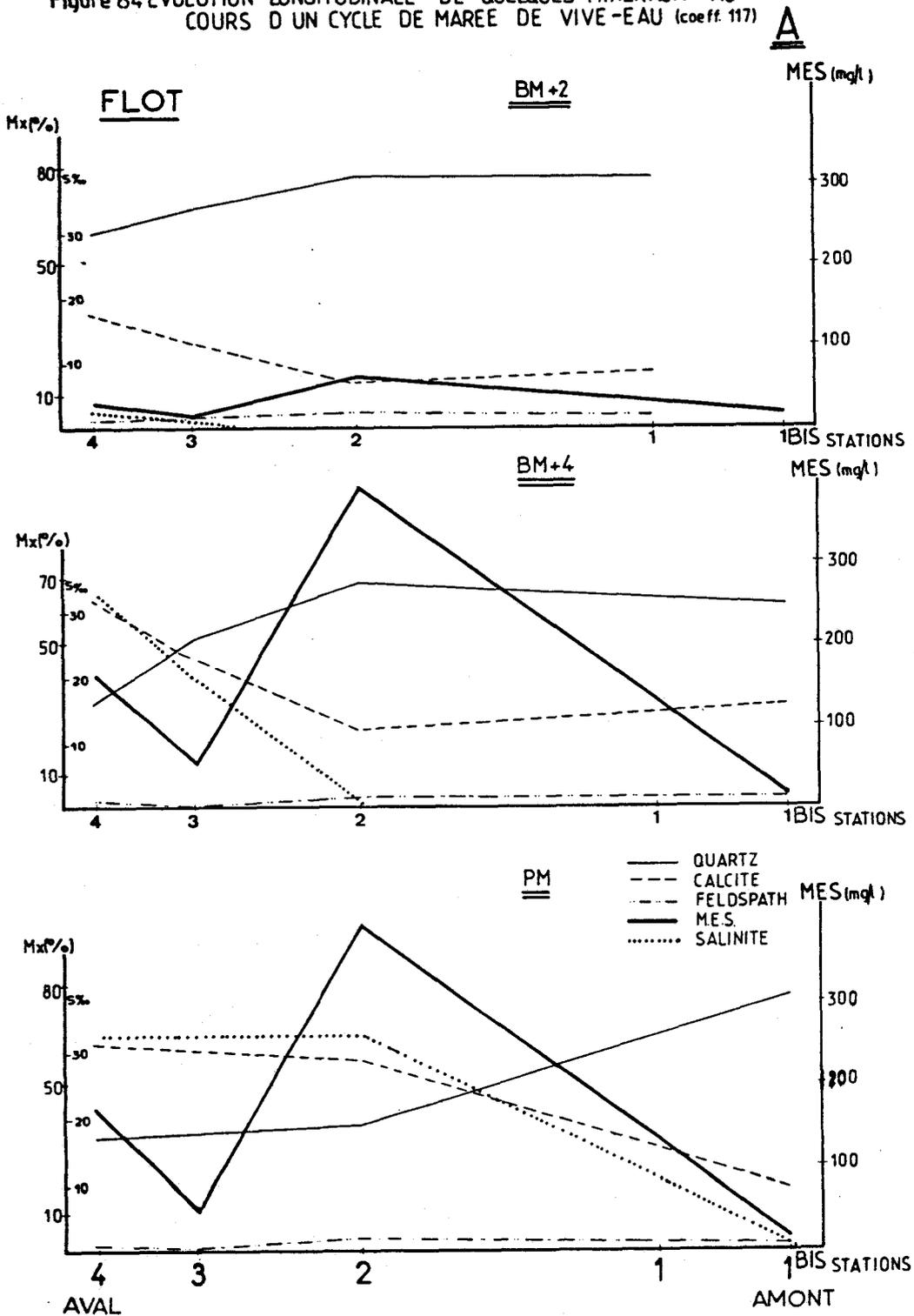
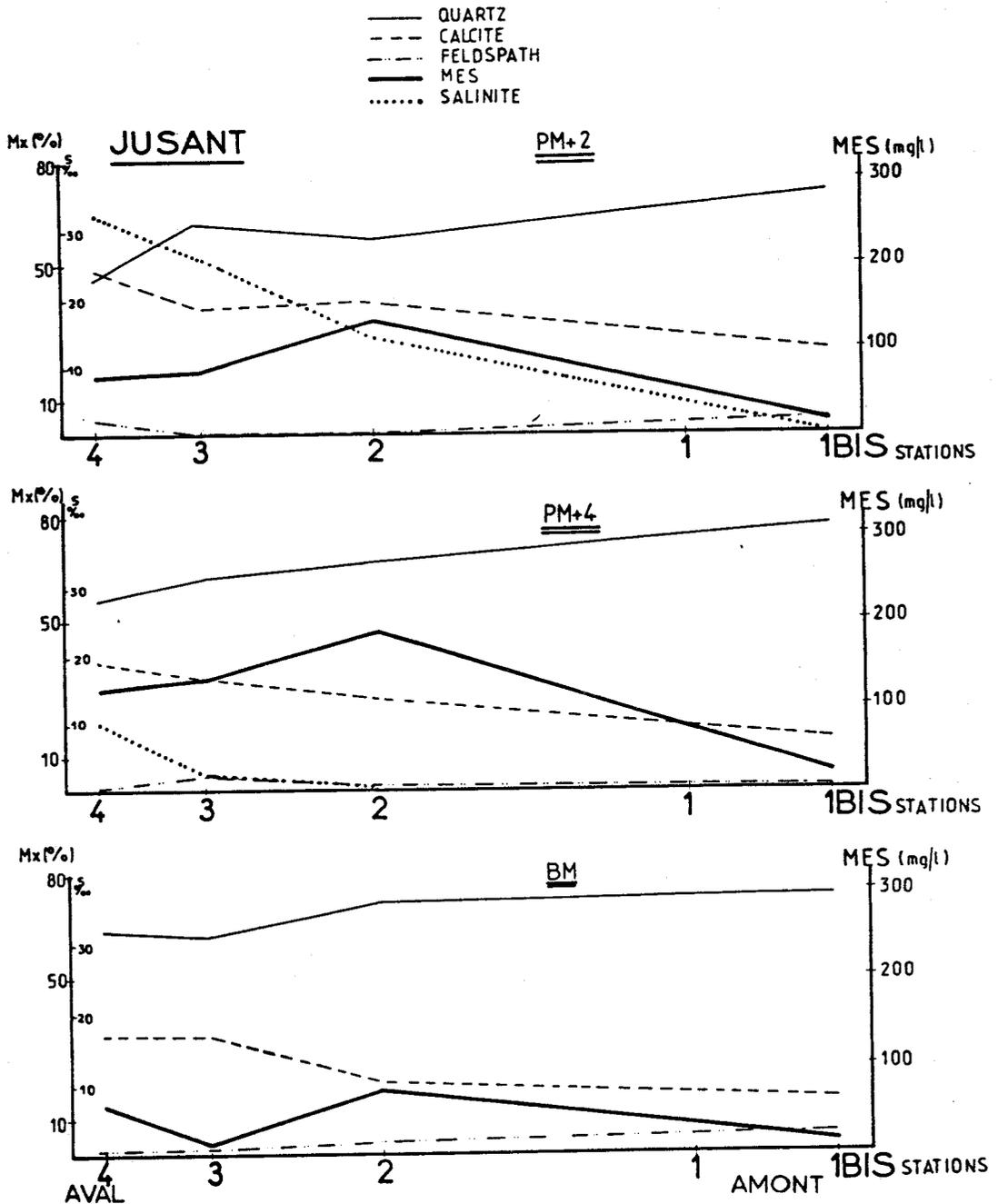


Figure 84 EVOLUTION LONGITUDINALE DE QUELQUES MINERAUX AU COURS D'UN CYCLE DE MAREE DE VIVE-EAU (coeff 117) **B**



I.2 - QUARTZ ET CALCITE

Ces deux minéraux ont une distribution antagoniste tout au long de l'estuaire.

I.2.1 - En vive-eau

B. M. + 2 (figure 84A) : le courant de jusant subsiste encore dans l'estuaire, cependant qu'à l'aval le flot commence à pénétrer. La proportion de quartz domine celle de la calcite. Les courbes des deux minéraux se rapprochent vers l'aval à la station 4.

Figure 85 EVOLUTION LONGITUDINALE DE QUELQUES MINERAUX AU COURS D'UN CYCLE DE MAREE DE MORTE-EAU

A

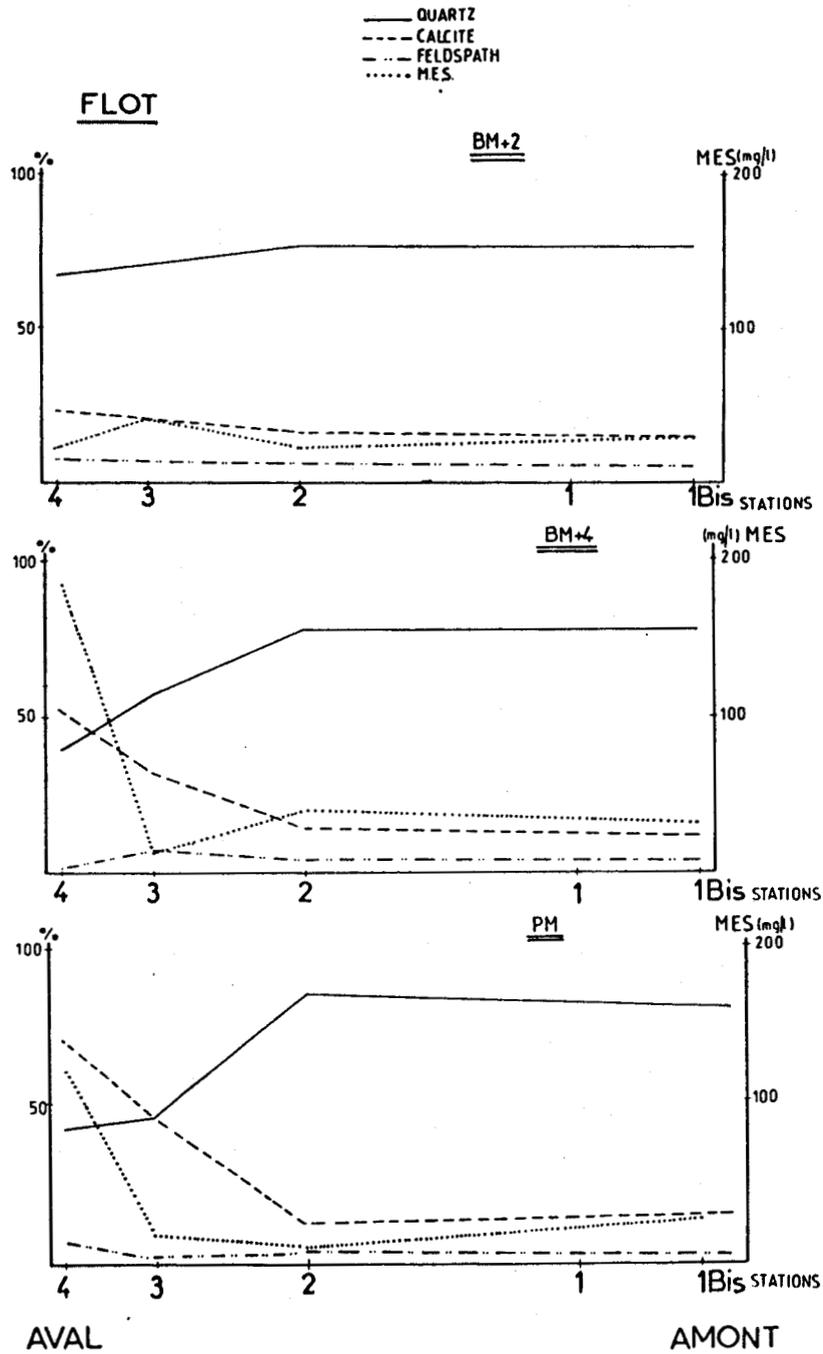
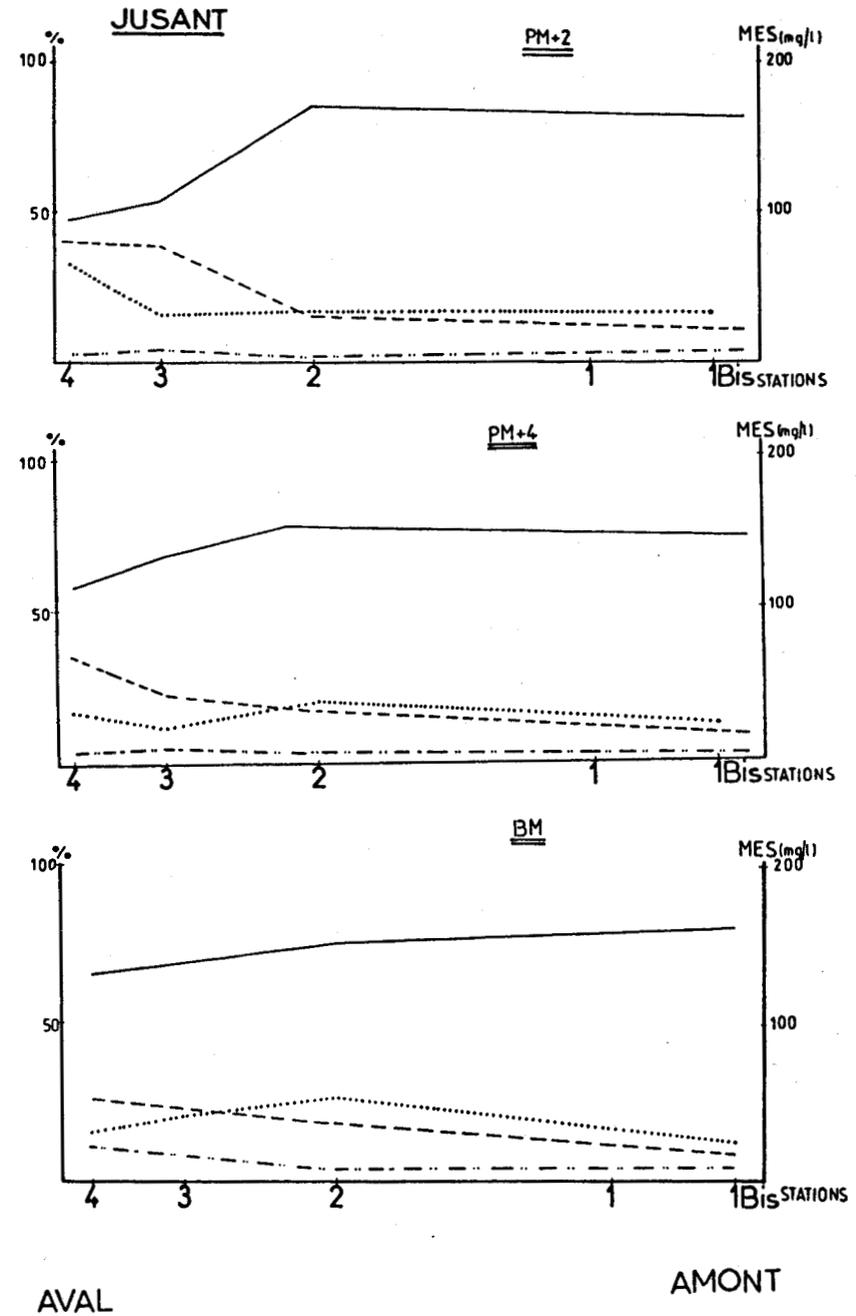


Figure 85 EVOLUTION LONGITUDINALE DE QUELQUES MINERAUX AU COURS D'UN CYCLE DE MAREE DE MORTE-EAU

B



B. M. + 4 : le flot s'est installé et agit jusqu'au niveau d'Etaples (cf courbe de salinité). Les courbes du quartz et de la calcite se recoupent à la station 3, cependant que plus à l'aval la calcite tend à devenir l'élément prédominant (station 4).

P. M. : des salinités élevées, de type marin, s'observent dans tout l'estuaire. Le point de convergence des deux courbes est repoussé à l'amont entre les stations 1 et 2.

P. M. + 2 (figure 84B) : le courant de jusant s'installe et provoque le déplacement du point de convergence vers l'aval, à hauteur de l'aéroport du Touquet.

P. M. + 4 : le point de convergence des deux courbes continue à se déplacer en direction de l'embouchure au fur et à mesure du retrait de la marée ; il se situe maintenant à hauteur de l'hippodrome.

B. M. : le point de convergence est en aval de la station 4. Le courant de jusant s'est installé dans tout l'estuaire et le quartz devient partout prédominant dans le cortège minéralogique.

Ainsi, le quartz s'oppose systématiquement à la calcite durant une marée de vive-eau. Le quartz est d'importance relativement faible lorsque l'intrusion saline augmente et reflète donc les influences fluviales. En revanche, la calcite présente des variations parallèles à celles de la salinité, et traduit clairement les influences marines.

I.2.2 - En morte-eau (figures 85A et B)

Le point de convergence des deux courbes se localise à P. M., au droit de l'hippodrome, c'est-à-dire plus en aval qu'en vive-eau, ce qui reflète la pénétration bien moindre de l'intrusion marine saline. Dans l'estuaire amont, le quartz est l'élément prédominant. Lorsque le jusant s'installe, le point de convergence se déplace vers l'aval, la calcite laissant la prépondérance au quartz.

En résumé, les feldspaths semblent provenir pour une large part de l'amont du bassin versant de la Canche. La calcite s'oppose au quartz, et reflète la venue des eaux marines. Elle ne semble pas suivre les fluctuations de la quantité des matières en suspension, excepté en aval, à la station 4. Lors du montant, le "coup de flot" remet en suspension une bonne quantité de matières et les proportions de la calcite augmentent à ce moment là. Dans tous les cas, la calcite est clairement liée à la pénétration marine.

I.3 - VARIATIONS DES POURCENTAGES DE QUARTZ ET DE CALCITE DEVANT L'EMBOUCHURE DE LA CANCHE

À partir de prélèvements en mer, effectués avec la vedette océanographique SEPIA II, nous avons cherché à préciser la provenance de la calcite. Ces sorties ont été programmées durant les journées du 26 et 27 avril 1984, avec des coefficients de marée de morte-eau (coeff. 55). Six points furent choisis, au Sud, au droit et au Nord de l'embouchure de la Canche (figure 86). Les positions de ces stations sont :

- Station A	D : 15,81	J : 31,77
- Station B	D : 16,76	J : 31,00
- Station C	D : 17,23	J : 30,20
- Station D	D : 16,43	J : 30,61
- Station E	D : 17,49	I : 47,70
- Station F	D : 16,89	I : 47,69

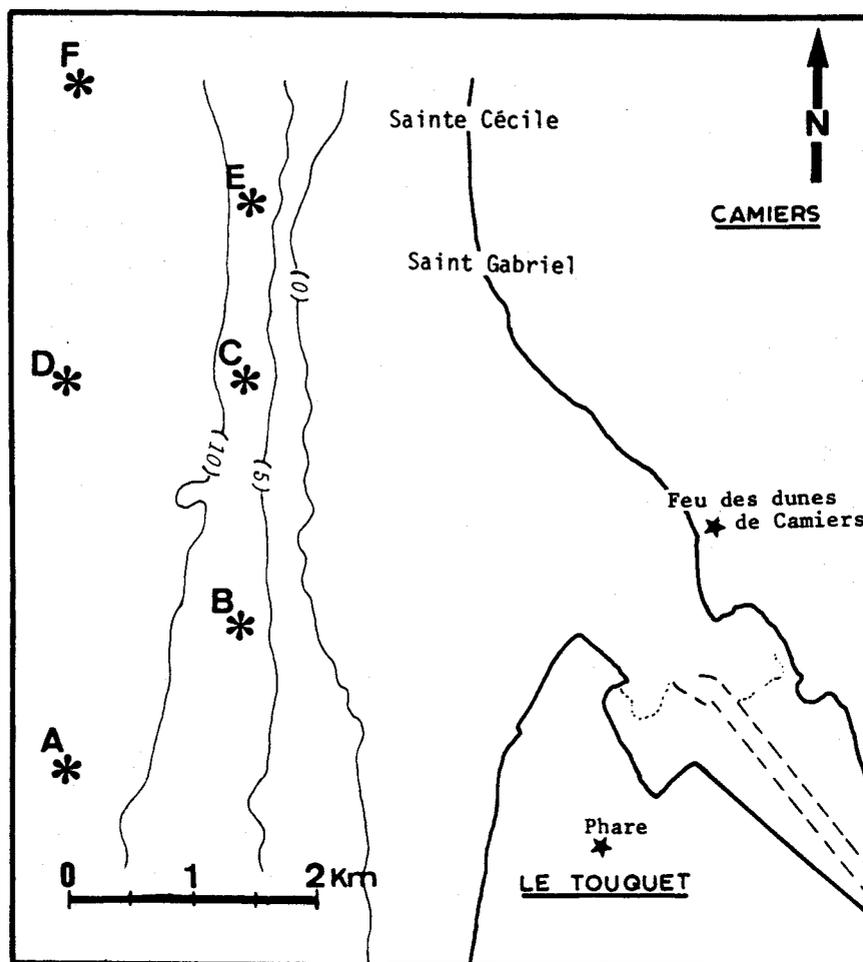


Figure 86 : LOCALISATION DES STATIONS EN MER

Les lettres D, I et J du réseau DECCA correspondent aux ondes émises de deux endroits différents. En s'éloignant de leur émetteur, leur longueur d'onde varie et le point d'intersection de ces deux ondes indique le lieu où l'on se trouve.

Au cours de la marée, les profondeurs enregistrées varient de 14 à 24 m. Les minéraux rencontrés sont les mêmes que ceux trouvés dans l'estuaire : quartz, calcite, feldspaths, dolomite et minéraux argileux. Les espèces essentielles, quartz, calcite sont retenues au contraire des espèces accessoires, feldspaths, dolomite et minéraux argileux, également présentes, mais en faible proportion. Leurs variations ne paraissent pas significatives.

Les résultats sont réunis sur la figure 87. Les différentes courbes obtenues montrent les fluctuations importantes du quartz et de la calcite dans les prélèvements effectués à 1 m de la surface et à 1 m du fond durant une marée. Nous n'avons malheureusement que peu de données aux stations D et E, c'est pourquoi ces stations n'ont pas été considérées.

B. M. + 4 : au moment du flot, les stations de surface présentent des proportions relatives en calcite plus importantes que celles du quartz. Au fond, les variations apparaissent plus aléatoires ; la calcite est prédominante à la station B, au contraire des autres points en mer.

P. M. : les courbes fluctuent fortement selon le lieu. La station C, située au droit de l'embouchure présente une augmentation très nette du quartz. Cette station correspond aux plus faibles profondeurs, par suite d'une élévation des

fonds, produite par le dépôt des matériaux entraînés par les courants de sortie de l'estuaire (BRIQUET, 1930).

L'étendue de cette protubérance du fond est liée à la puissance érosive des courants dans l'estuaire. Les courants les plus importants ont été trouvés à l'aval, à la station du Pilori (2,50 m/s). Ils érodent le flanc des dunes de Lornel, reprennent les sédiments apportés par le flot et les étalent dans cette partie de l'embouchure externe. Toutefois l'importance de ce promontoire est liée à la puissance des courants, elle-même liée au volume d'eau introduit (BONNEFILLE et ALLEN, 1970). Les sédiments de ce secteur sont formés de matériaux marins, et les faibles proportions de calcite relevées lors de la remise en suspension indiquent un vannage très important des sédiments par les courants.

P. M. + 2 : le courant de jusant s'installe. En surface, la proportion relative de la calcite dépasse partout celle du quartz, à l'exception de la station C. En revanche, les suspensions proches du fond sont caractérisées par des charges plus importantes en éléments quartzeux.

P. M. + 4 : les courants de jusant sont bien établis en Manche et la proportion relative du quartz dépasse celle de la calcite en surface et en profondeur. Ces teneurs importantes pourraient correspondre à une remise en suspension de débris coquilliers issus des petits fonds en aval de la Canche.

DEZONNAY (1973) localise des dépôts coquilliers importants à proximité des terres et au large. Ces deux secteurs sont séparés par une "gouttière" où les teneurs en carbonates sont plus faibles et correspondent à un vannage plus important des fonds par les courants. Au Sud de la Canche et au droit du Touquet entre - 5 m et - 10 m, les dépôts carbonatés sont importants et permettent de justifier les fortes proportions en carbonates, liées aux courants, aux points A et B.

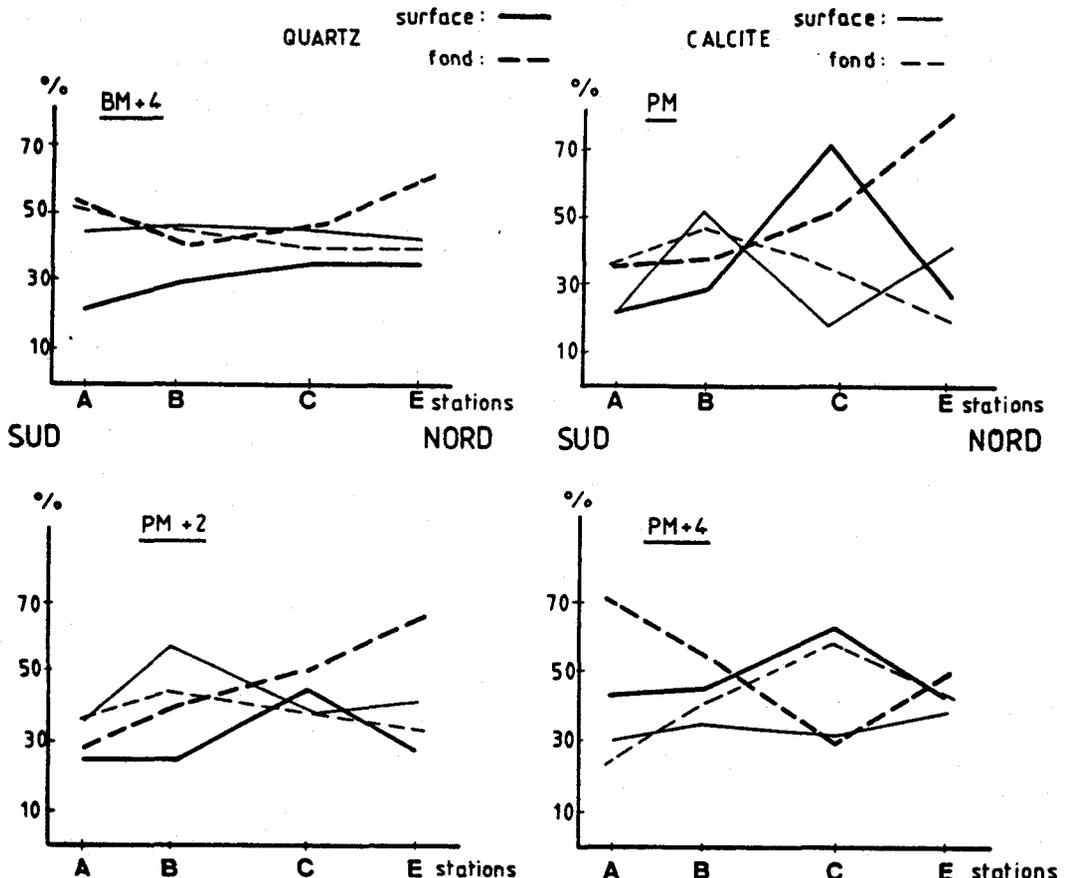


Figure 87 VARIATIONS DU QUARTZ ET DE LA CALCITE AU LARGE DURANT UNE MAREE

II - MINÉRAUX ARGILEUX

L'étude des minéraux argileux en suspension a été entreprise sur plusieurs marées, dans le but de rechercher des modifications éventuelles des cortèges au cours du temps. Cette observation devrait nous aider à mieux comprendre les variations constatées dans les teneurs en oligo-éléments (Cu, Zn, Pb, ...). En effet, on sait que les particules métalliques en transit dans les estuaires se comportent de manière variable selon la nature des cortèges argileux.

II.1 - MINÉRAUX ARGILEUX PRESENTS DANS LES SUSPENSIONS

Le cortège moyen (figure 88) est représenté par un échantillon de la station 3 (hippodrome).

L'association est dominée par l'illite (35 %), par des interstratifiés irréguliers 10-14 Å (15 %), 14-14 Å (15 %) et par la smectite (15 %). La chlorite et la kaolinite sont présentes en faible quantité ($\approx 10\%$ chacune). La vermiculite est rare et on la rencontre parfois en traces.

Durant une marée, les fluctuations semi-quantitatives sont faibles le long de l'estuaire. Ceci est le résultat de l'action prépondérante des courants de marée. Les variations d'abondance relative sont généralement de 5 % à 10 % (figure 89) et semblent davantage marquées lors des coefficients de vive-eau (tableau 14).

- La chlorite est légèrement plus abondante à l'amont, au contraire de l'illite.

- Le degré d'ouverture du pic à 10 Å de l'illite calculé par sa largeur à mi-hauteur en degré 2θ sur le diffractogramme d'essai glycolé reflète l'état cris-

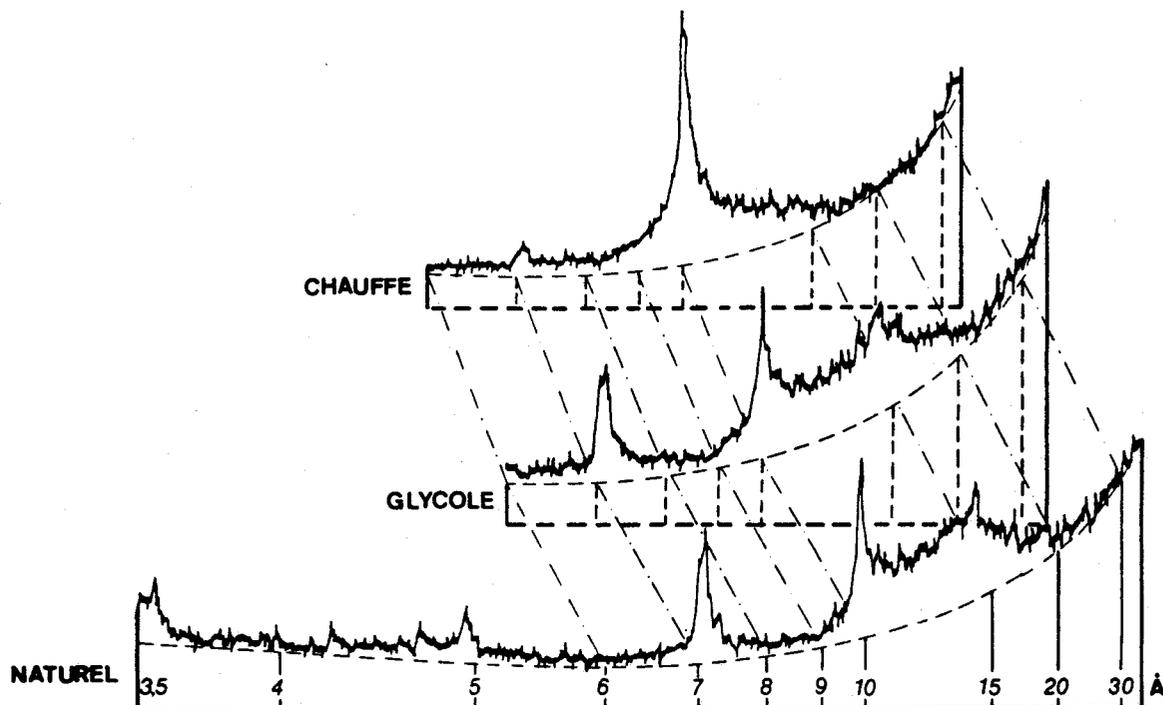


Figure 88: DIFFRACTOGRAMME TYPE DE LA FRACTION ARGILEUSE EN SUSPENSION (STATION 3-PM+4)

tallin du minéral. Les valeurs sont dans l'ensemble peu variables, mais les fluctuations suivantes sont néanmoins constatées; au cours du mois de juillet, l'indice présente une valeur moyenne de $0,18^{\circ} 2 \theta$; en septembre, la cristallinité est équivalente à $0,20^{\circ} 2 \theta$; en mars, les deux marées montrent un degré d'ouverture moyen plus élevé : $0,25^{\circ} 2 \theta$ pour le 12 mars et $0,28^{\circ} 2 \theta$ pour le 19 mars.

Des pluies plus abondantes ont précédé les journées de juillet et de septembre ; malgré cela, l'indice calculé au cours de ces journées est plus faible. Les pluies, sur le bassin versant, semblent remanier davantage de sols à illite mieux cristallisée.

- Notons que la kaolinite paraît assez résistante au chauffage, lors des traitements effectués en vue des déterminations.

	Station	C	I	(10-14)	(14-14)	V	Sm	K	
amont	1	15	40	10	10		15	10	<u>Cycle de marée du</u> <u>8 septembre 1983</u>
	2	10	40	10	10	5	15	10	
	3	10	40	10	15		15	10	
aval	4	10	45	10	10		15	10	
amont	1	10	35	20	20		10	5	<u>Cycle de marée du</u> <u>12 mars 1984</u>
	2	10	35	15	15	0	15	10	
	3	10	35	20	15		10	10	
aval	4	10	35	15	15		15	10	
amont	1	10	35	20	15		10	10	<u>Cycle de marée du</u> <u>19 mars 1984</u>
	2	10	35	15	15	0	15	10	
	3	5	40	15	15		15	10	
aval	4	5	40	15	15		15	10	

Tableau 14 .- Données minéralogiques moyennes à différentes marées dans les suspensions de la Canche.

II.2 - EVOLUTION LONGITUDINALE DU CORTEGE ARGILEUX DURANT UNE MAREE DE VIVE-EAU (figure 90)

Suivant l'allure des courbes, on constate que :

- vers l'aval, les proportions de l'illite augmentent à la station 3 (30 à 50 %) pour diminuer à la station du Pilori (30 à 40 %). Les proportions de la smectite augmentent à la station 4 (20 %) et s'opposent à celles de la chlorite (10 %) ;
- dans l'estuaire, la kaolinite est pratiquement constante ;
- les interstratifiés montrent des proportions très peu variables d'amont en aval. Toutefois, il existe une diminution pour l'ensemble lors de la venue du flot (B. M. + 4, P. M.).

La forme des courbes aux divers moments de la marée nous montre une sédimentation différentielle des minéraux argileux telle qu'elle a été définie par GIBBS (1977). Elle permet de différencier les apports et d'en déduire que la kaolinite et la chlorite sont plutôt fluviatiles. En effet, les teneurs de ces deux minéraux décroissent d'amont en aval : tout au long de la marée pour la chlorite et à B.M. + 4 pour la kaolinite ; ceci attestant d'un dépôt rapide. Les proportions de l'illite augmentent souvent à l'aval. Dans ce secteur, les vitesses s'accroissent vers P.M. + 4, mais sont toujours plus faibles à la station 3 (hippodrome) qu'à la station 4 (Pilori). Ainsi l'illite, par ses fortes proportions parallèles à l'intrusion saline, aurait une origine mixte : fluviale et marine.

La smectite est souvent antagoniste de l'illite. Ceci est dû à la différence de taille et de portance. Les fortes vitesses de courant, remettant en suspension les sédiments, favorisent de ce fait une homogénéisation des cortèges argileux et

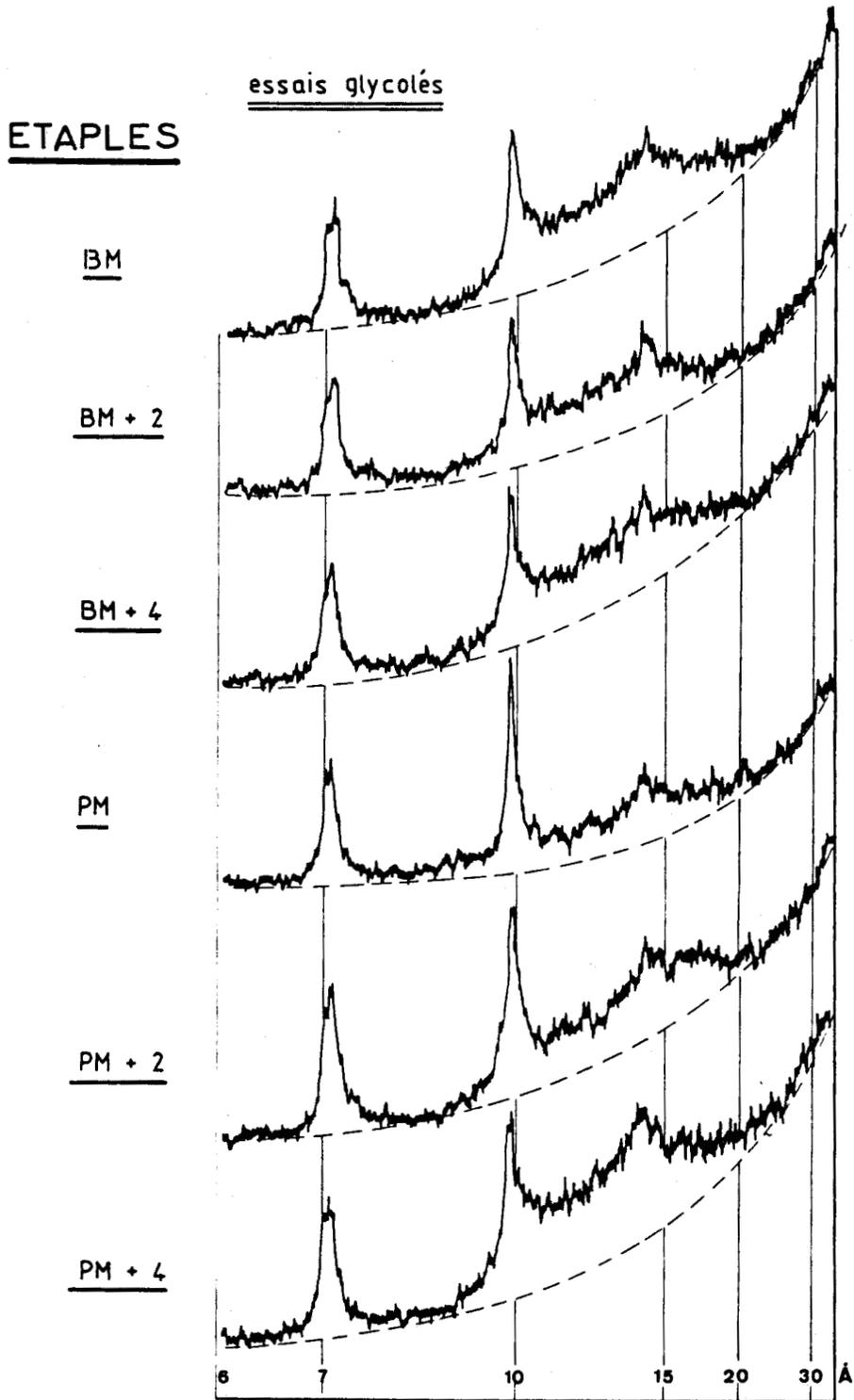


Figure 89: DIFFRACTOGRAMME DE LA FRACTION ARGILEUSE EN SUSPENSION A DIFFERENTS MOMENTS DE LA MAREE

automatiquement une "dilution" de la smectite. Les minéraux argileux sont transportés différemment par les courants violents. La sédimentation différentielle est très nette lorsque le régime est plus calme : l'illite et la kaolinite peuvent se déposer, tandis que la smectite, par son pouvoir de flottation plus important, augmente dans les suspensions. GALLENNE (1974) et BARBAROUX (1980) ont également observé dans la Loire une homogénéisation des cortèges argileux, lors de la venue du flot, ainsi qu'une sédimentation différentielle des divers minéraux dans la crème de vase.

Les proportions des interstratifiés sont très peu variables d'amont en aval, et nous pouvons constater une diminution de l'ensemble des interstratifiés au moment du flot reflétant de ce fait une origine essentiellement amont.

II.3 - ABONDANCE RELATIVE DES DIVERS MINERAUX (figure 91)

On a considéré les variations relatives d'un minéral par rapport à l'autre à partir des mesures de pics suivants :

	$Q/I = 3,33 \text{ \AA}/10 \text{ \AA}$	$F/I = 3,2 \text{ \AA}/10 \text{ \AA}$
Essai naturel	$Q/C = 4,26 \text{ \AA}/4,7 \text{ \AA}$	$C/I = 4,7 \text{ \AA}/5 \text{ \AA}$
	$K/C = 3,57 \text{ \AA}/3,53 \text{ \AA}$	

Essai glycolé $Sm/I = 17 \text{ \AA}/10 \text{ \AA}$

A l'aval, le quartz est prépondérant par rapport à la chlorite tout au long de la marée, et par rapport à l'illite seulement à partir de B. M. + 4, lorsque l'onde de flot occupe une grande partie de l'estuaire. A P. M. + 4, le rapport Q/I augmente à l'aval du fait de la remise en suspension des particules sableuses lors des forts courants de jusant (2,50 m/s).

La courbe du rapport K/C présente un pic positif à la station 3, depuis B. M., jusqu'à P. M. Cette particularité pourrait indiquer un dépôt plus rapide pour la chlorite, par suite de mécanismes de sédimentation différentielle.

Le rapport F/I montre de grandes fluctuations. A la station 2 (Etaples), ce rapport décroît très rapidement à P.M. Les feldspaths pourraient se déposer plus rapidement que l'illite, etcela entraînerait de ce fait une diminution du rapport.

La courbe du rapport C/I suit de façon globale les fluctuations des rapports Q/I et F/I, démontrant la même source d'apport pour ces trois éléments (chlorite, quartz et feldspaths).

Le rapport Sm/I est relativement élevé à l'amont, traduisant un hydrodynamisme plus faible par rapport aux stations aval. En effet, la smectite, par son pouvoir de flottation supérieur aux autres minéraux argileux, reste plus facilement en suspension au moment des faibles courants. Malgré un hydrodynamisme assez intense à la station 4, le rapport est assez élevé à B. M., B. M. + 2, B. M. + 4. Ce résultat s'oppose à tout ce que l'on connaît dans la littérature. En effet, les forts courants favorisent une remise en suspension, et provoquent de ce fait une diminution des proportions de la smectite dans les cortèges argileux. Il faut toutefois prendre en considération les sédiments superficiels du chenal. Ils sont sableux et les courants provoquent une remise en suspension des particules "grossières", et ne sollicitent donc peu les sédiments très fins.

CONCLUSIONS

Il ressort de tout ceci, une différenciation entre les apports amont et aval. Les premiers montrent de plus fortes proportions en chlorite, kaolinite, quartz et feldspath. Les seconds sont représentés par un apport important en calcite. Les

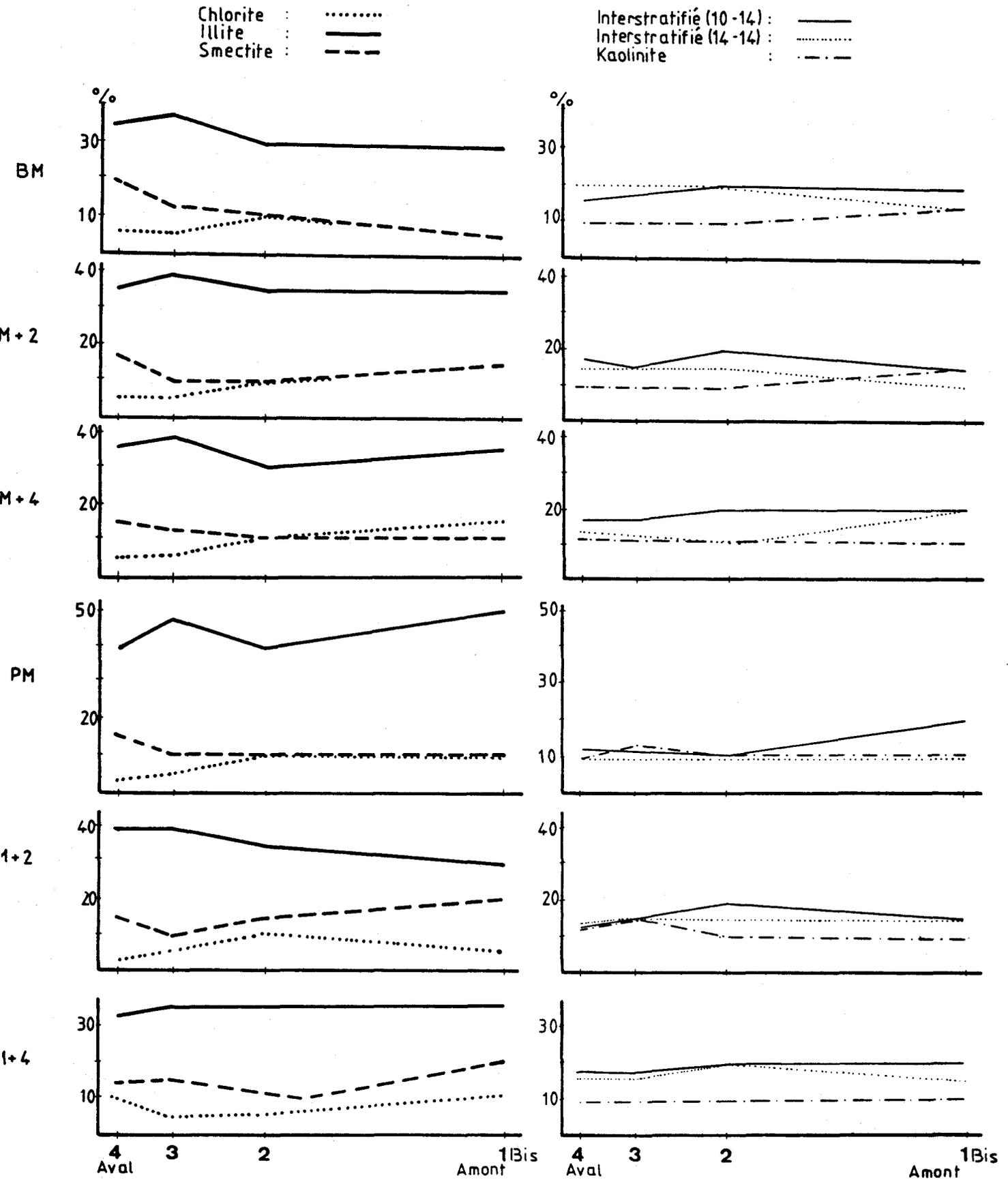


Figure 90: EVOLUTION LONGITUDINAL DES MINERAUX ARGILEUX DANS LES SUSPENSIONS, AU COURS D'UNE MAREE DE VIVE-EAU (coeff. 117)

variations relatives des deux groupes de minéraux permettent de suivre, au sein des suspensions, le jeu antagoniste des apports fluviaux et marins.

L'illite et le quartz paraissent avoir une origine partiellement marine, cependant que les interstratifiés irréguliers proviennent surtout de l'amont continental. Les phénomènes de sédimentation différentielle sont modérément marqués dans l'estuaire de la Canche : ils paraissent se manifester surtout par une augmentation relative des smectites lorsque les autres minéraux, plus denses, de plus grande taille ou de portance moins élevée, se déposent malgré l'importance des courants fluviatiles et de marée. Les remises en suspension provoquées par le courant ne favorisent pas toujours une très nette dilution de la smectite au sein des cortèges, les sédiments du chenal étant pour une très large part sableux.

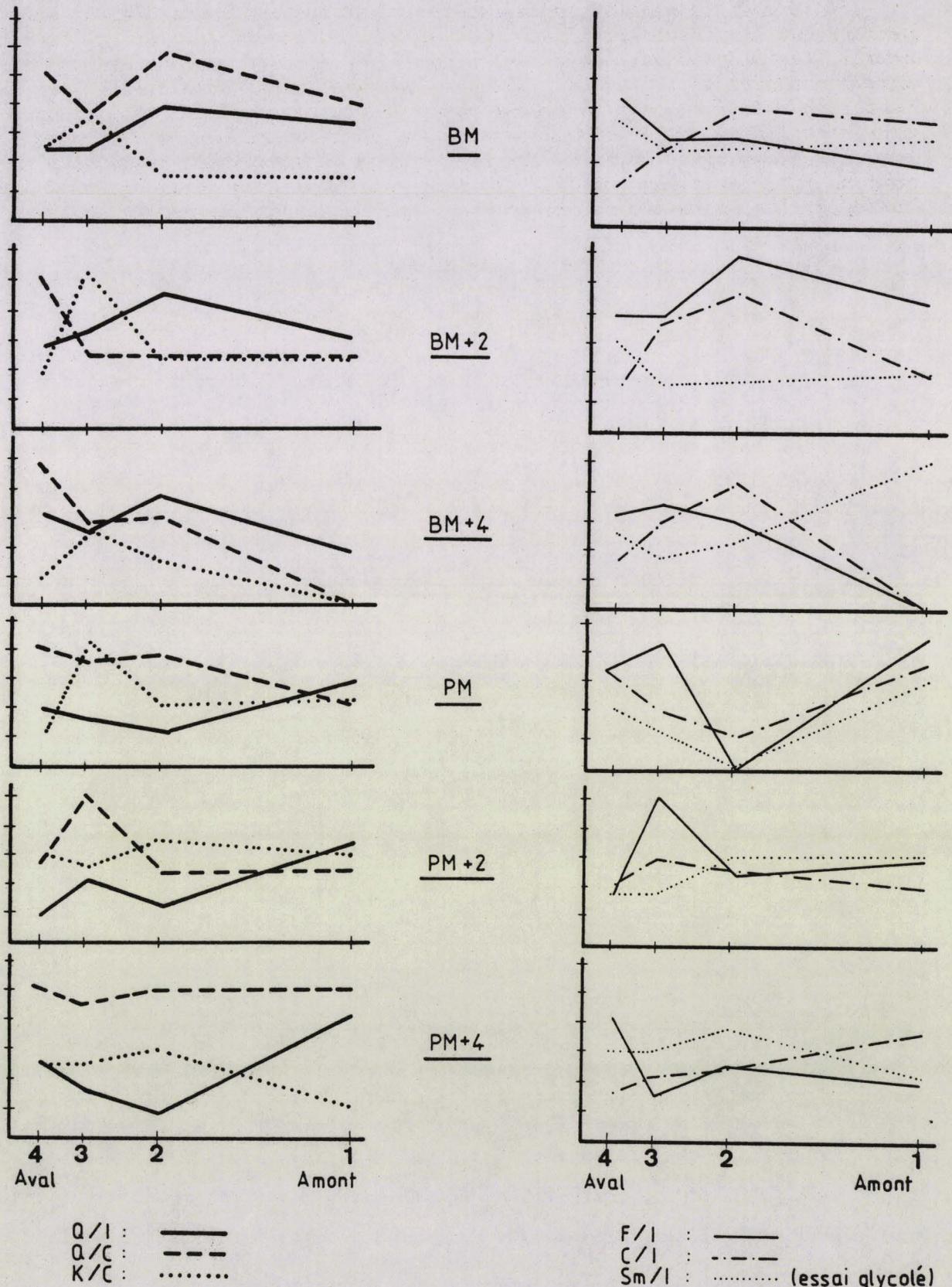


Figure 91: EVOLUTION DES DIFFERENTS RAPPORTS AU COURS D'UNE MAREE DE VIVE-EAU

- CHAPITRE IV -

GEOCHIMIE

I - GENERALITES

I.1 - NOTIONS PRELIMINAIRES

Les fleuves apportent divers éléments chimiques, utiles ou toxiques à la mer (tableau 15) et les estuaires constituent une zone de transit pour ces éléments.

Eléments majeurs* indispensables	: Oligo-éléments** indispensables	: Oligo-éléments** secondaires	: Oligo-éléments** toxiques
Ca	Co Al	Cs	Sb Pb
Mg	Cu Mo	Cr	As Hg
K	Fe Si	Ni	Ba Se
Na	Mn V	Rb	Be Ag
	Zn	Sr	Bi Th
		Sn	Cd

* : éléments responsables de la minéralisation de l'eau, donc de sa dureté (Donati, 1977).

** : ou éléments traces : éléments ayant peu d'influence sur la dureté et la minéralisation de l'eau et s'y trouvant à des concentrations généralement faibles (< 1 mg/l) (Pinta, 1980).

Tableau 15 .- Eléments métalliques ayant une importance biologique (Wolf et Rice, 1972 *in* ROBBE, 1984).

Les teneurs sont dépendantes des caractéristiques régionales naturelles (lithologie, climat, ...) et anthropiques (industries, agriculture). La présente étude est relative à la distribution des métaux suivants : Fe, Mn, Zn, Cd, Pb, Cu, Hg. Elle a pour but de comprendre l'influence de l'estuaire de la Canche sur leur comportement géochimique, ainsi que leur impact sur les écosystèmes. A la suite de Martin *et al.* (1976), nous parlerons d'oligo-éléments métalliques plutôt que de métaux lourds et/ou toxiques (tableau 16).

	: Contenu du corps	: Doses journalières
	:	: nécessaires
Si	: 18 000	: 3
Fe	: 4 200	: 10
Zn	: 2 300	: 3
Cu	: 75	: 2
Mn	: 15	: 2,5
Ni	: 10	: 0,02
Ca	: 10	: 800
Mg	: 19 000	: 350

Tableau 16 .- Contenu du corps humain et doses journalières nécessaires en éléments traces pour un adulte (en mg) simplifié (d'après MASIRONI, 1977, *in* ROBBE, 1984).

I.2 - FORME SPECIFIQUE DES ELEMENTS

Les divers oligo-éléments sont véhiculés dans l'estuaire sous forme dissoute et particulaire.

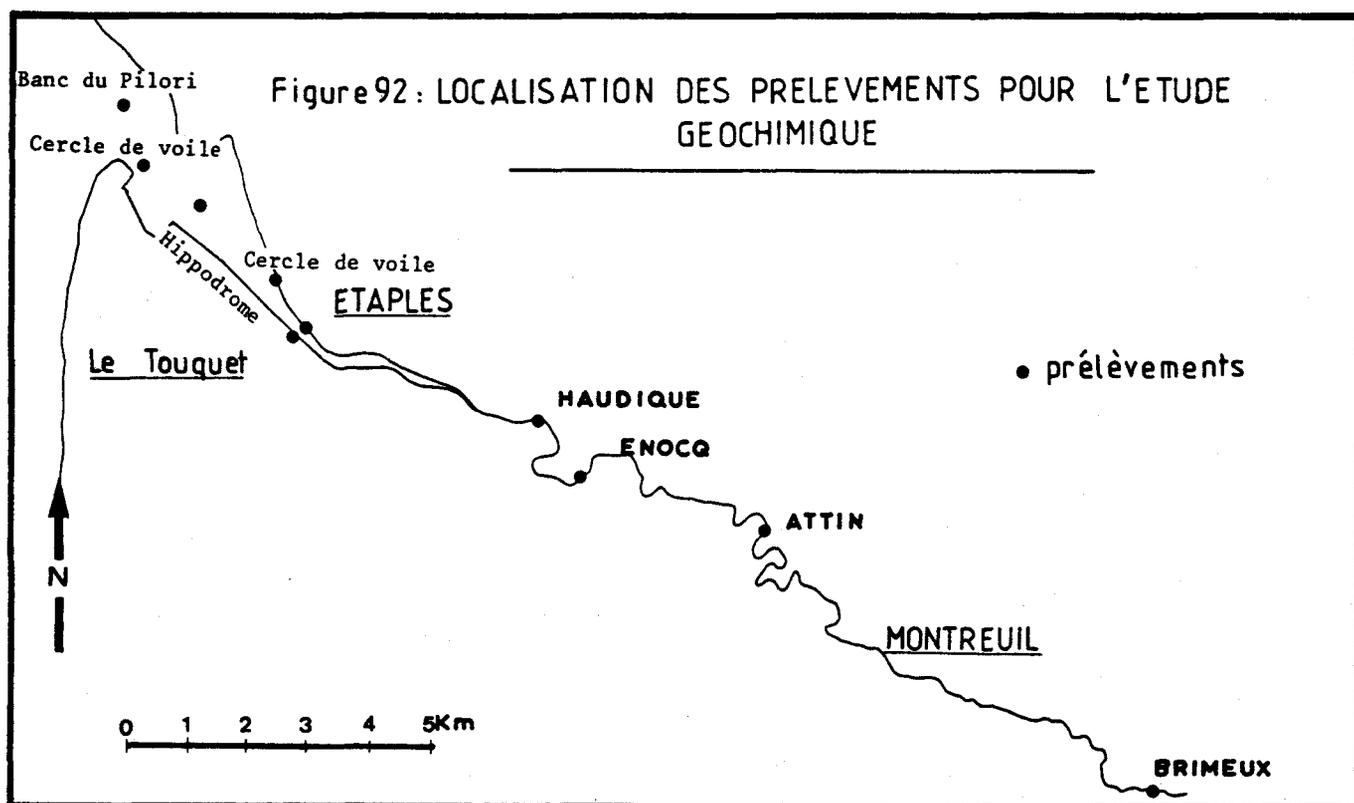
La phase particulaire est assimilée au filtrat déposé sur une membrane de porosité de $0,45 \mu\text{m}$ (Annexe I). En réalité, la limite existant entre ces deux phases n'est pas aussi tranchée, la phase particulaire pouvant être présente sous forme d'hydroxyde ou de colloïde de taille avoisinant $0,1 \mu\text{m}$ (MARTIN *et al.*, 1976). On retrouve ces divers éléments métalliques dans l'eau, dans les matières en suspension, dans les sédiments de fond et dans les organismes aquatiques.

I.3 - METHODOLOGIE

L'étude géochimique, menée avec l'Institut Pasteur de Lille regroupe deux types d'approche. La première a porté sur des prélèvements d'eau durant les diverses marées, les mêmes qui ont fait l'objet de l'étude minéralogique. Les prélèvements d'eau ont été effectués à partir de points fixes définis dans la partie II. Deux prélèvements complémentaires ont servi de référence :

- le premier à l'amont effectué le 13 mars 1984 à Brimeux (figure 92) ;
- le deuxième au large de Dunkerque (point du Réseau National d'Observation, R. N. O.).

La deuxième approche concerne l'étude des sédiments superficiels de la basse Canche, ainsi que des sédiments de quelques sondages à la tarière. L'échantillonnage lâche des sédiments (figure 92) de la basse Canche a été réalisé dans le but de comparer les concentrations métalliques longitudinales des sédiments superficiels et celles des sédiments de quelques sondages à la tarière, dont la profondeur varie de 1,70 à 4,20 m. Leur étude est destinée à connaître l'évolution de la pollution au cours des dernières décennies.



II - REPARTITION DES ELEMENTS METALLIQUES DANS LES MATIERES EN SUSPENSION

II.1 - ABONDANCE MOYENNE DES METAUX D'AMONT EN AVAL

Dans le but de discerner une quelconque évolution longitudinale dans l'estuaire, il s'est avéré indispensable de moyenner par station et par marée les résultats obtenus.

Les moyennes n'ont été calculées qu'à partir de résultats des prélèvements d'eau de surface, certains prélèvements de fond n'ayant pas été effectués en raison de courants trop forts à la station d'Etaples.

Nous avons cherché dans ces moyennes calculées les valeurs extrêmes qui peuvent être résumées de la façon suivante (tableau 17) :

	maximum	présentant les plus grandes valeurs
		présentant les plus petites valeurs
Moyennes par marée avec un	minimum	présentant les plus grandes valeurs
		présentant les plus petites valeurs

Par la suite, nous avons considéré les marées du 8 septembre 1983, du 12 et du 19 mars 1984, et nous avons calculé les moyennes par station (tableau 18). La journée du 20 juillet 1983 n'a pas été prise en compte, en raison d'un manque de données à la station d'Etaples.

	20 juillet 1983					8 septembre 1983			
	Station 1	Station 2	Station 3	Station 4		Station 1	Station 2	Station 3	Station 4
Fe :	12 482		8 182	7 876	:	9 509,8	7 543	8 289,9	6 727,2
Mn :	1 650		688	584	:	701,6	479,4	429,7	377,7
Zn :	305		134	236	:	182	182,7	91	89,23
Cd :	1,48		0,67	0,53	:	0,58	0,70	0,55	0,6
Pb :	57,6		29,1	30,6	:	29,2	57,3	21,2	20,4
Cu :	33,1		9,63	9,35	:	24,3	19,4	8,33	9,83
Hg :	2,52		1,75	2,94	:	0,75	2,94	0,57	0,40
	12 mars 1984					19 mars 1984			
Fe :	14 509	16 925	22 070	15 364	:	18 777	9 230	13 505	24 562
Mn :	752	927	1 448	780	:	963	567	490,2	401
Zn :	319	310	738	186	:	895	165	248	173,3
Cd :	0,96	1,58	5,66	0,48	:	5,61	1,56	2,60	1,20
Pb :	81	114	113	63,25	:	110,2	49	54,2	32,3
Cu :	61,5	57	70,1	25	:	58,7	19	30,8	23,6
Hg :	1,60	5,54	4,39	1,79	:	2,75	1,95	3,08	2,53

Tableau 17 .- Teneur moyenne des métaux particuliers en µg/g, au cours des différentes marées.

	BRIMEUX	STATION 1	STATION 2	STATION 3	STATION 4
Fe	26 782	14 265	11 233	14 621	15 551
Mn	1 488	806	658	789	520
Zn	657	465	219	292	150
Cd	1,04	2,38	1,28	2,94	0,76
Pb	72,7	73,4	73,4	62,8	38,65
Cu	79,6	48,2	31,8	36,4	19,5
Hg	1,73	1,7	3,48	2,68	1,57

Tableau 18 .- Teneur moyenne des métaux particuliers en µg/g, en surface et aux différentes stations.

Fer

D'une façon générale, et en calculant la moyenne par station sur l'ensemble des marées (8 septembre, 12 et 19 mars), les concentrations en fer sont largement supérieures à celles des autres métaux dosés et sont comprises entre 15,5 mg/g et 11 mg/g (tableau 18). Les moyennes des résultats sur l'ensemble des 3 marées, montrent une très légère augmentation de l'amont vers l'aval.

Au contraire, en calculant les moyennes des résultats obtenus par station et par marée (tableau 17), nous constatons le phénomène inverse au cours des journées de juillet et de septembre.

Les plus grandes teneurs moyennes maximales (tableau 17) se rencontrent au mois de mars (\approx 23 mg/g). Les plus petites valeurs moyennes se rencontrent à l'aval, au contraire du mois de septembre.

Les plus grandes teneurs moyennes minimales sont également présentes au cours du mois de mars (14 mg/g) et les plus petites au cours du mois de septembre (6,7 mg/g).

Manganèse

Les concentrations moyennes dans l'estuaire (tableau 18) pour l'ensemble des trois marées, semblent caractérisées par une diminution vers l'aval, et passent de 800 μ g/g à 500 μ g/g.

Les valeurs moyennes maximales (tableau 17) sont atteintes au mois de mars, en morte-eau (1,5 mg/g, à la station 3).

Les plus fortes teneurs moyennes minimales ont été trouvées au mois de mars (752 μ g/g), les plus faibles durant le mois de septembre (378 μ g/g).

Zinc

Les concentrations en zinc décroissent d'amont en aval, avec des valeurs de 465 μ g/g à 150 μ g/g.

Les concentrations moyennes maximales (tableau 17) les plus fortes (895 μ g/g) se rencontrent au mois de mars à l'amont (station d'Enocq).

Les concentrations moyennes minimales les plus fortes se rencontrent au cours du mois de mars (186 μ g/g), les plus faibles durant le mois de septembre (91 μ g/g).

Cadmium

Les teneurs décroissent également d'amont (2,38 μ g/g) en aval (0,76 μ g/g) (tableau 18).

Les valeurs maximales moyennes maximales (5,6 μ g/g) se rencontrent au cours du mois de mars, tandis que les valeurs les plus importantes en septembre n'atteignent que des teneurs équivalentes à 0,7 μ g/g à la station 2.

Les valeurs moyennes minimales les plus fortes se trouvent au cours du mois de mars (1,20 μ g/g), les plus faibles durant les mois de juillet et septembre.

Plomb

Les teneurs moyennes décroissent d'amont (73,4 μ g/g) en aval (38,7 μ g/g) (tableau 18).

Les teneurs moyennes maximales (tableau 17) se rencontrent au cours du mois de mars aux stations Ibis et 2, tandis que le mois de septembre offre des valeurs maximales égales seulement à 57,3 μ g/g.

Les valeurs moyennes minimales les plus fortes se rencontrent au cours du mois de mars (63,3 µg/g), les plus faibles durant le mois de septembre.

Cuivre

Les teneurs moyennes (tableau 18) décroissent d'amont (49,9 µg/g) en aval (20 µg/g).

Le mois de mars présente toujours des concentrations maximales (70,1 µg/g) et le mois de juillet offre cette fois-ci les teneurs maximales les plus faibles.

Les teneurs moyennes minimales (tableau 17) se retrouvent au cours du mois de septembre à l'aval (8,33 µg/g).

Mercur

Les teneurs moyennes présentent des concentrations croissantes jusqu'à la station 2, puis diminuent vers l'aval : station 2 : 3,48 µg/g, station 4 : 1,57 µg/g.

Les teneurs moyennes maximales les plus fortes se retrouvent toujours au cours du mois de mars (5,54 µg/g) et les valeurs maximales sont équivalentes en juillet et septembre (2,94 µg/g).

Les teneurs moyennes minimales les plus fortes se rencontrent au cours du mois de mars (1,95 µg/g), et les plus faibles durant le mois de septembre (0,75 µg/g).

En résumé, les teneurs moyennes des différents métaux, à l'exception du fer, calculées sur plusieurs marées de morte-eau et de vive-eau, montrent une diminution d'amont en aval. Le mois de mars offre des concentrations dans l'ensemble plus élevées, au contraire du mois de septembre.

Les variations des teneurs métalliques semblent soumises aux variations saisonnières (mars, septembre), mais le peu de résultat nous oblige à une certaine modération dans l'interprétation du phénomène.

II.2 - BILAN GENERAL

En considérant la station 0 de référence (BRIMEUX) et celle la plus aval (Pilori), nous constatons une nette décroissance des deux termes métallifères vers l'aval. Seuls, le cadmium, le plomb et le mercure offrent des concentrations qui augmentent aux stations d'Enocq et d'Etaples (tableau 18).

Dans le tableau 18, sont rassemblées les teneurs métalliques moyennes dans les suspensions des eaux. A l'exception du plomb et du mercure, une forte décroissance en fer, manganèse, zinc, cadmium et cuivre apparaît entre la station amont et la station d'Etaples, dans l'estuaire médian.

Au contraire des teneurs moyennes en plomb et mercure, les concentrations métalliques moyennes augmentent entre les stations 2 et 3.

Tous les métaux, à l'exception du fer, montrent une diminution de leur concentration. Entre les stations 1 et 2, il y aurait un piégeage temporaire des concentrations métalliques et un apport entre les stations 2 et 3. Vers la station 4, les concentrations sont moindres, car elles peuvent être diluées dans les eaux marines, moins chargées en éléments métalliques.

A partir des teneurs métalliques moyennes calculées dans les matières en suspension, nous avons évalué les pourcentages de pertes enregistrées dans l'estuaire depuis l'amont jusqu'au Pilori.

Mn	806,00 µg/g à 520,00 µg/g,	soit 35 % de perte
Zn	465,00 µg/g à 150,00 µg/g,	soit 65 % de perte
Cd	2,38 µg/g à 0,76 µg/g,	soit 70 % de perte
Pb	73,40 µg/g à 38,65 µg/g,	soit 50 % de perte
Cu	48,20 µg/g à 19,50 µg/g,	soit 60 % de perte
Hg	1,70 µg/g à 1,57 µg/g,	soit 10 % de perte

En prenant les concentrations moyennes (mars, septembre) en métaux totaux (particulaires + dissous) à la station amont (stations 1 et 2) (tableau 19), nous constatons que les petits émissaires localisés en rive droite, entre les stations 2 (Etaples) et 3 (hippodrome) larguent des concentrations métalliques 10 à 100 fois plus élevées que celles véhiculées dans l'estuaire.

Le plomb, à l'émissaire n° 1, présente des concentrations plus de 100 fois supérieures aux concentrations en métal total de la Canche. Ces estuaires avec leur faible débit arrivent à jouer un rôle important dans les fluctuations des différentes teneurs dans l'estuaire médian.

Métaux	Canche amont	Emissaire		
		1 Amont	2	3 Aval
Fe	511			
Mn	37,3	1 000	110	150
Zn	17,9	130	500	230
Cd	0,12	< 1	< 1	< 1
Pb	2,49	460	260	40
Cu	2,73	90	90	180
Hg	0,06	0,5	0,5	1

Tableau 19 .- Concentrations moyennes en métaux totaux à la station amont et dans les différents émissaires en rive droite de l'estuaire médian (8 septembre 1983).

II.3 - EVOLUTION LONGITUDINALE DES METAUX AU COURS D'UNE MAREE

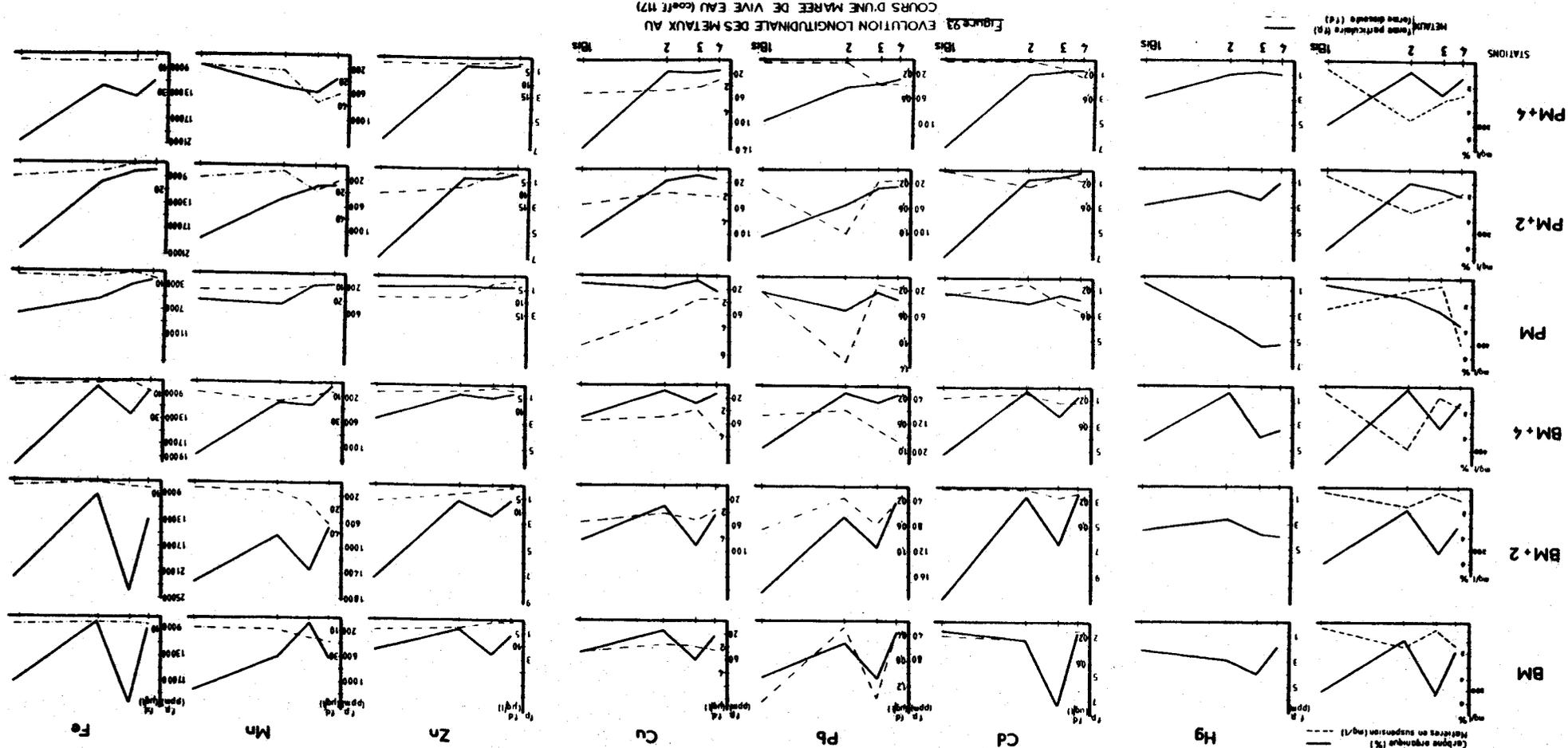
- En vive-eau (figure 93)

Au cours d'une marée, les teneurs des métaux sous forme particulaire sont dans l'ensemble plus importantes à l'amont (station Ibis) qu'à l'aval.

Nous constatons toutefois que la station 3 fait exception avec souvent des concentrations assez élevées.

Les courbes des métaux sous forme particulaire montrent des fluctuations en concordance avec l'évolution de la courbe du carbone organique total. En revanche la courbe du carbone organique varie de manière inverse à la courbe des matières en suspension.

Les concentrations métalliques élevées aux stations 2 et 3 sont liées aux effluents urbains rejetés dans cette partie de l'estuaire. Les petits exutoires présentent des teneurs totales (particulaire+dissoute) trente fois plus élevées (tableau 19) que les concentrations totales moyennes de la Canche. A pleine mer, les teneurs en oligo-éléments augmentent d'autant plus dans l'estuaire que les courants sont plus faibles et permettent une moins grande diffusion de ces éléments. La diminution du carbone organique et des divers oligo-éléments à l'aval (station 4) peut correspondre à une dilution des particules fluviales dans le milieu marin.



Les courbes du cadmium, du plomb et du cuivre sous forme dissoute suivent les courbes des formes particulières à B. M., B. M. + 2 ; par la suite, elles semblent évoluer de façon opposée. Tout se passe comme si, lors de la pénétration marine dans l'estuaire, les métaux dissous provenaient de la solubilisation des métaux appartenant aux sédiments.

Par contre, le zinc et le fer sous forme dissoute fluctuent de façon contraire aux courbes des métaux sous forme particulière à B. M., B. M. + 2, B. M. + 4, P. M.. Les relations entre formes dissoute et particulière semblent assez étroites pour ces deux éléments. La courbe du manganèse sous forme dissoute s'oppose à l'évolution de la courbe de cet élément sous forme particulière, à l'exception de P. M. + 4. Notons que le mercure ne peut être dosé sous forme dissoute, ses teneurs étant inférieures à la limite de détection des appareils.

- En morte-eau

Les métaux sous forme particulière, à l'exception du mercure (figure 94), suivent relativement bien l'évolution du carbone organique total. L'évolution de ce dernier présente une opposition comparable à celle déjà rencontrée en régime de vive-eau, de la courbe des matières en suspension. Les concentrations en mercure sont plus élevées à la station 2, pour l'ensemble de la marée.

Les courbes du cadmium, du plomb, du zinc et du cuivre sous forme dissoute, suivent, au cours d'une marée, une évolution inverse de celle des mêmes métaux sous forme particulière.

A pleine mer on remarque, comme en vive-eau, une augmentation des teneurs métalliques aux stations 2 et 3. Cette augmentation est la conséquence des rejets urbains entre ces deux stations.

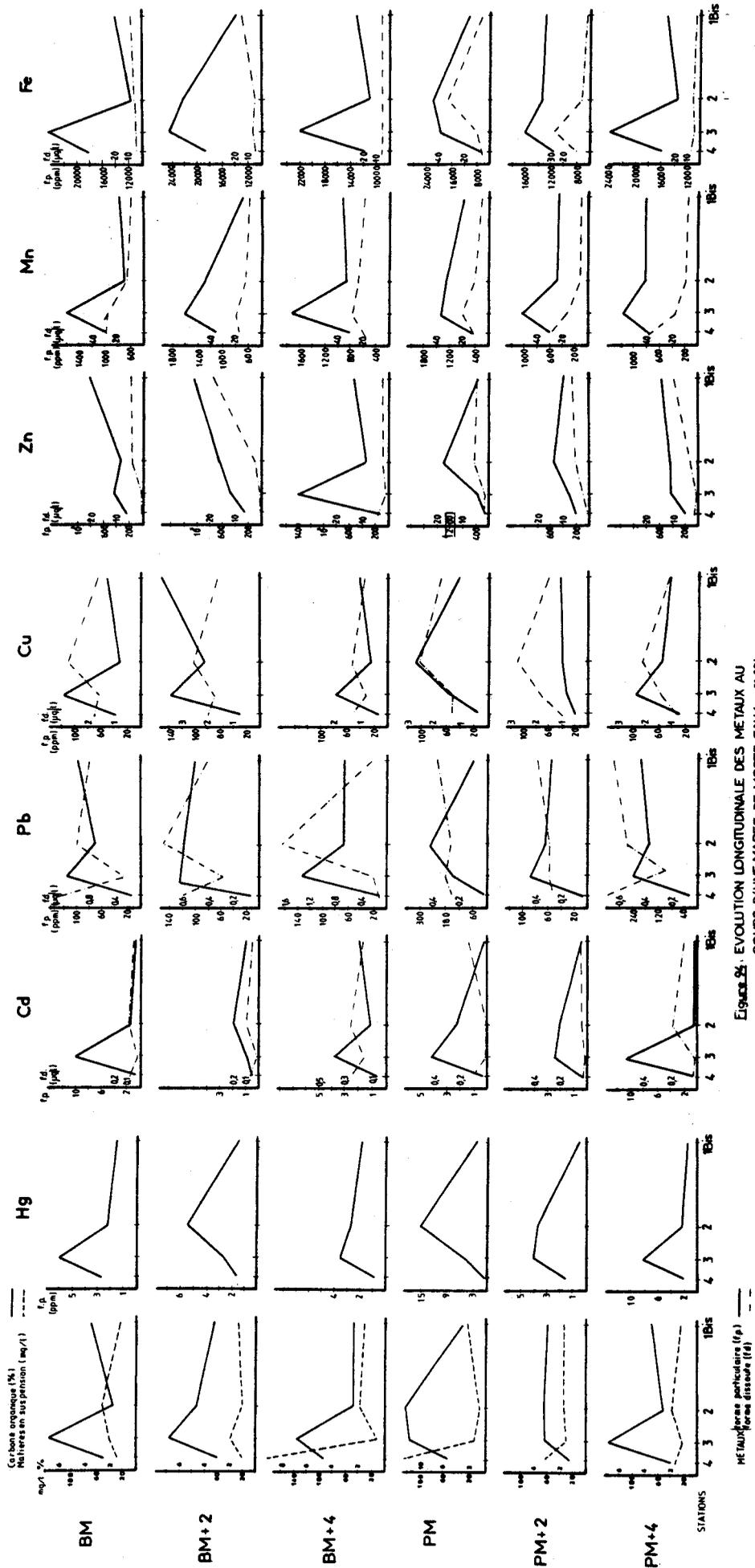
Conclusions

Les teneurs en métaux sous forme particulière suivent dans l'ensemble les fluctuations du carbone organique total sur une marée : à la fois dans l'espace, aux différentes stations, et dans le temps.

ETCHEBER (1979) et JOUANNEAU (1982) ont précédemment fait le rapprochement, dans la Gironde, entre l'évolution du carbone organique détritique et celle des métaux sous forme particulière. Dans notre cas, le carbone organique représente la matière organique totale, ce qui pourrait expliquer les légères divergences rencontrées tout au long de cette évolution.

Entre les stations 2 et 3, les effluents urbains (tableau 19), trente fois plus concentrés que les eaux de la Canche, participent à l'augmentation des concentrations métalliques de ce secteur. On le remarque à pleine mer, malgré une décantation plus efficace lors d'un calme hydrodynamique au moment de l'étale. A l'aval, les teneurs en carbone organique et en métaux subissent une dilution dans les eaux marines aux concentrations plus faibles. Nous pouvons remarquer qu'il existe souvent une complémentarité des formes particulières et des formes dissoutes au cours de la marée ; l'augmentation des premières correspondant à une diminution des secondes, et réciproquement. Dans le secteur aval, la diminution souvent observée des concentrations métalliques sous forme particulière du cadmium, du plomb, du cuivre et du manganèse peuvent traduire le passage de nombreux éléments particuliers sous forme dissoute.

Pour les métaux sous forme dissoute, nous allons essayer de regarder leur comportement en fonction de la salinité.



Équ岸. 26. EVOLUTION LONGITUDINALE DES METAUX AU COURS D'UNE MAREE DE MORTE EAU (coeff. 38)

Métaux/forme particulaire (fp) —
Métaux/forme dissoute (fd) - - -

II.4 - DISTRIBUTION DES METAUX DISSOUS EN FONCTION DE LA SALINITE

Nous avons choisi deux stations de référence : la première pour l'eau douce (station 0), à Brimeux ; et la deuxième, au large de Dunkerque (point du Réseau National d'Observation), qui est la station 5.

Les stations intermédiaires sont celles déjà plusieurs fois citées : Enocq, Etaples, hippodrome et Piloni.

En prenant pour référence les stations 0 et 5, le plomb montre une augmentation de ses teneurs dissoutes à l'approche des salinités. Au contraire, le cuivre et le zinc en présentent une diminution lorsque la salinité augmente. En comparant les figures 95 et 96, nous remarquons, en vive-eau, une augmentation des teneurs en éléments dissous à P. M. et P. M. + 2, à la station 2. Du fait d'une circulation faible ou inexistante, ainsi que d'une augmentation des concentrations métalliques particulières, la croissance des teneurs en éléments dissous se trouve favorisée.

ETCHEBER (1979) constate le même phénomène dans la Garonne, à l'aval de Bordeaux et en période d'étiage, du fait de l'existence d'un transit lent favorable à la dissolution. Pour cet auteur, ce mécanisme est favorisé par une salinité croissante, ainsi que par un temps de résidence beaucoup plus long dans le milieu estuarien, permettant de meilleurs échanges eau-matière particulaire.

Dans notre cas, les salinités peuvent jouer un rôle primordial en augmentant légèrement les concentrations de ces formes.

En période de morte-eau (figure 96), l'intrusion saline ne dépasse pas la limite du cercle de voile du Touquet ; le même phénomène, celui de l'augmentation des formes dissoutes, apparaît et se trouve plus accentué pour le plomb et le cuivre. Ceci pourrait être dû à un rejet plus important de ces deux éléments, par les exutoires latéraux au chenal. A proximité du port d'Etaples se situe une petite entreprise de construction navale qui pourrait les rejeter de façon préférentielle.

Conclusions

Les teneurs totales en métaux particuliers et dissous sont étroitement dépendantes des turbidités. La décroissance amont-aval des concentrations en métaux sous forme particulaire, nette en dehors des périodes de morte-eau, peut être attribuée à des phénomènes de mélange d'eau fluviale plus riche en métaux que les eaux marines. A pleine mer, aux stations 2 et 3, l'augmentation des formes particulières est due principalement aux effluents urbains dans cette zone.

Les salinités croissantes et les remises en suspension lors de la venue du flot pourraient affecter les teneurs en dissous. Les processus d'érosion libèrent des formes solubles et contribuent au maintien dans l'estuaire de la partie dissoute des éléments métalliques. L'alternance des cycles d'érosion et de sédimentation, ainsi que l'existence temporaire d'une masse turbide, contribue à l'expulsion des métaux au large.

La première participe à la libération d'éléments qui resteraient piégés dans les sédiments en l'absence de remise en suspension. La seconde permet de larguer vers le large une quantité d'oligo-éléments qui resteraient piégés dans l'estuaire, au sein d'une masse turbide permanente.

III - REPARTITION DES ELEMENTS METALLIQUES DANS LES SUSPENSIONS

III.1 - SEDIMENTS SUPERFICIELS DE LA BASSE CANCHE

MARTIN (1971) a constaté, à propos de la Gironde, que deux sédiments soumis au même flux polluant et ne présentant pas les mêmes caractéristiques lithologi-

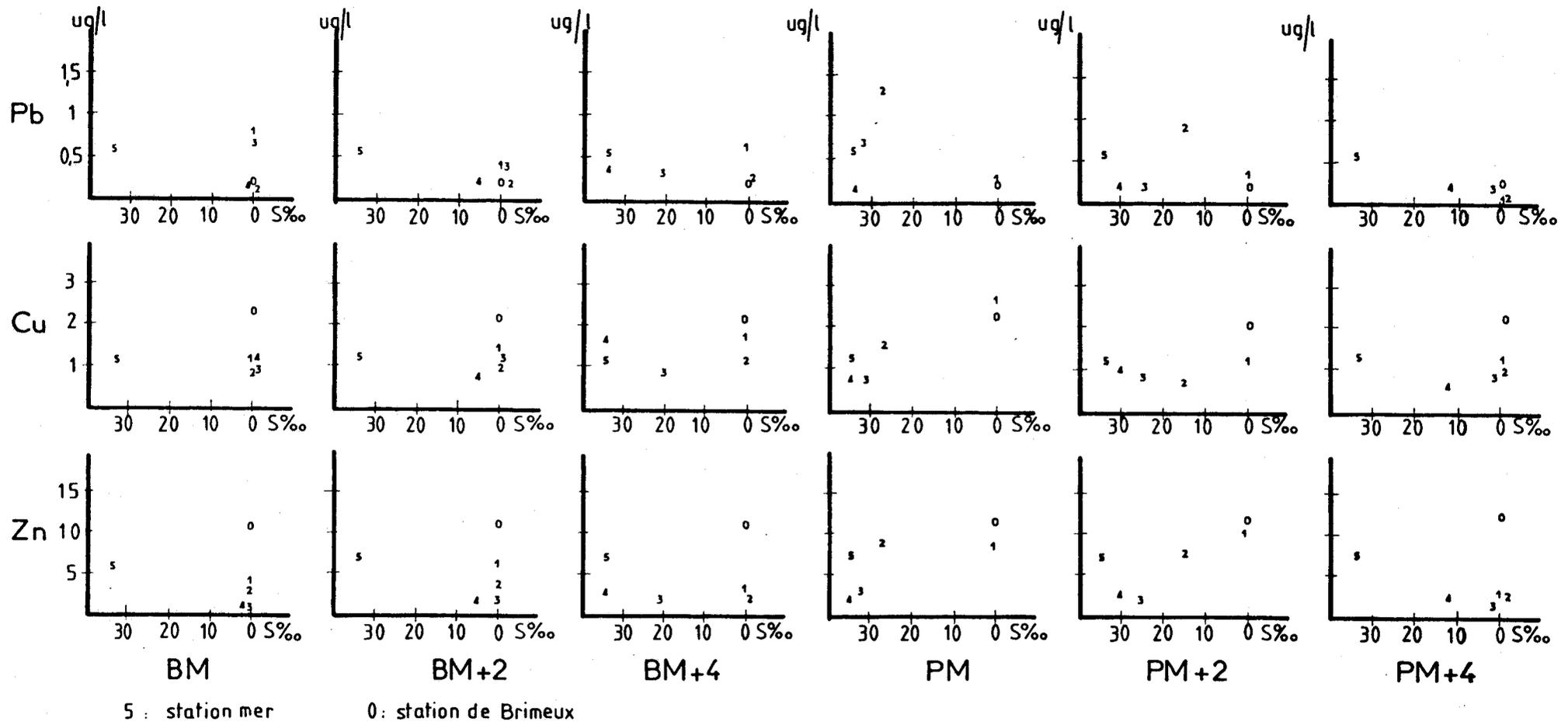
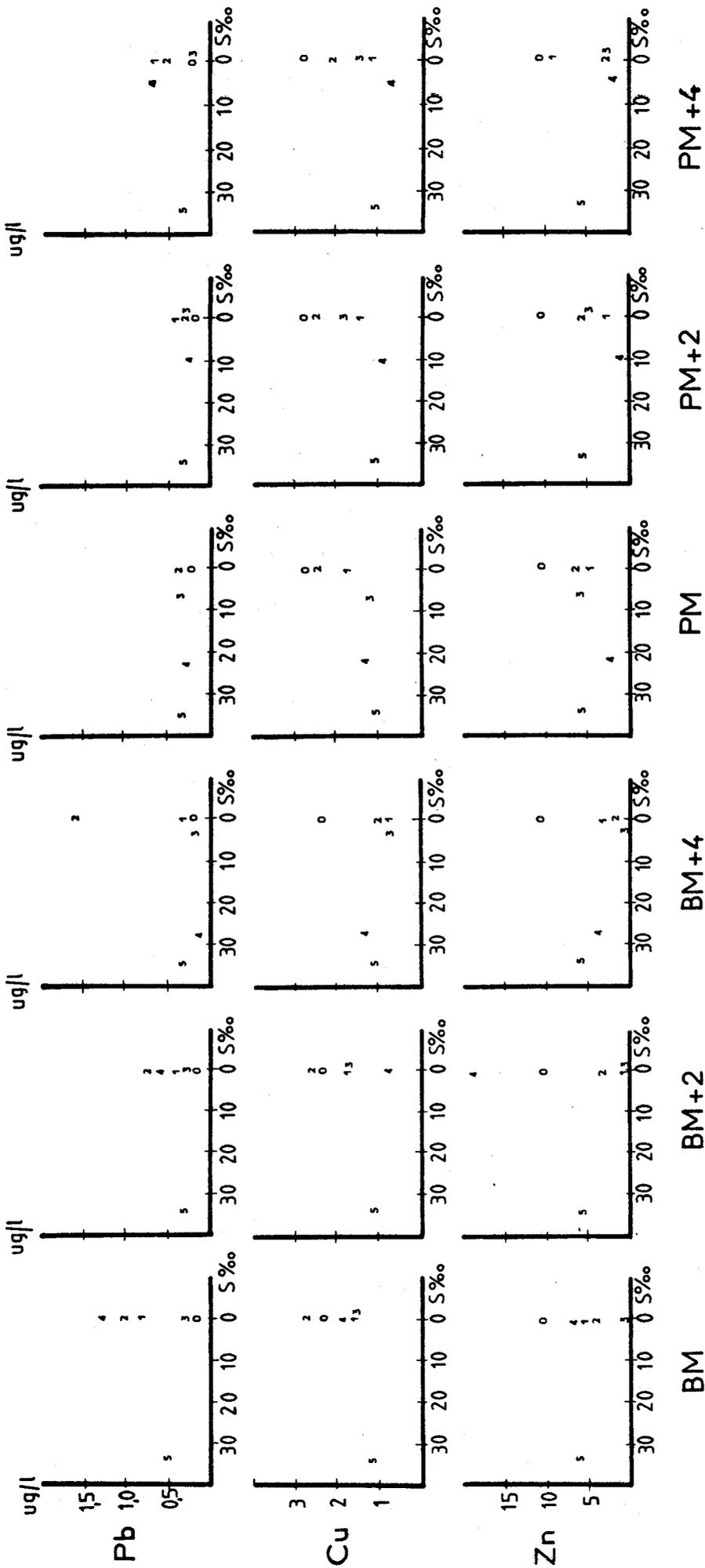


Figure 95: EVOLUTION DES CONCENTRATIONS METALLIQUES PAR STATION, EN FONCTION DES SALINITES AU COURS D'UNE MAREE DE VIVE EAU (coeff.117)



5 : station mer 0 : station de Brimeux

Figure 96 : EVOLUTION DES CONCENTRATIONS METALLIQUES PAR STATION, EN FONCTION DES SALINITES AU COURS D'UNE MAREE DE MORTE EAU (coeff.38)

ques tendent à piéger des quantités différentes de matériaux. Il a également remarqué que les concentrations en métaux augmentent inversement à la taille des particules (GROOT, 1966 ; MARTIN, 1971). Depuis, de nombreux auteurs comme ETCHEBER (1979), JOUANNEAU (1982) et ROBBE (1984) ont également constaté que l'abondance des éléments métalliques est liée à l'importance des phases argileuses et organiques. Nous avons effectué une étude géochimique des divers dépôts de la basse Canche (figure 97), afin de déterminer quelle était la situation de cet estuaire sur le plan des relations lithologiques par rapport à la pollution.

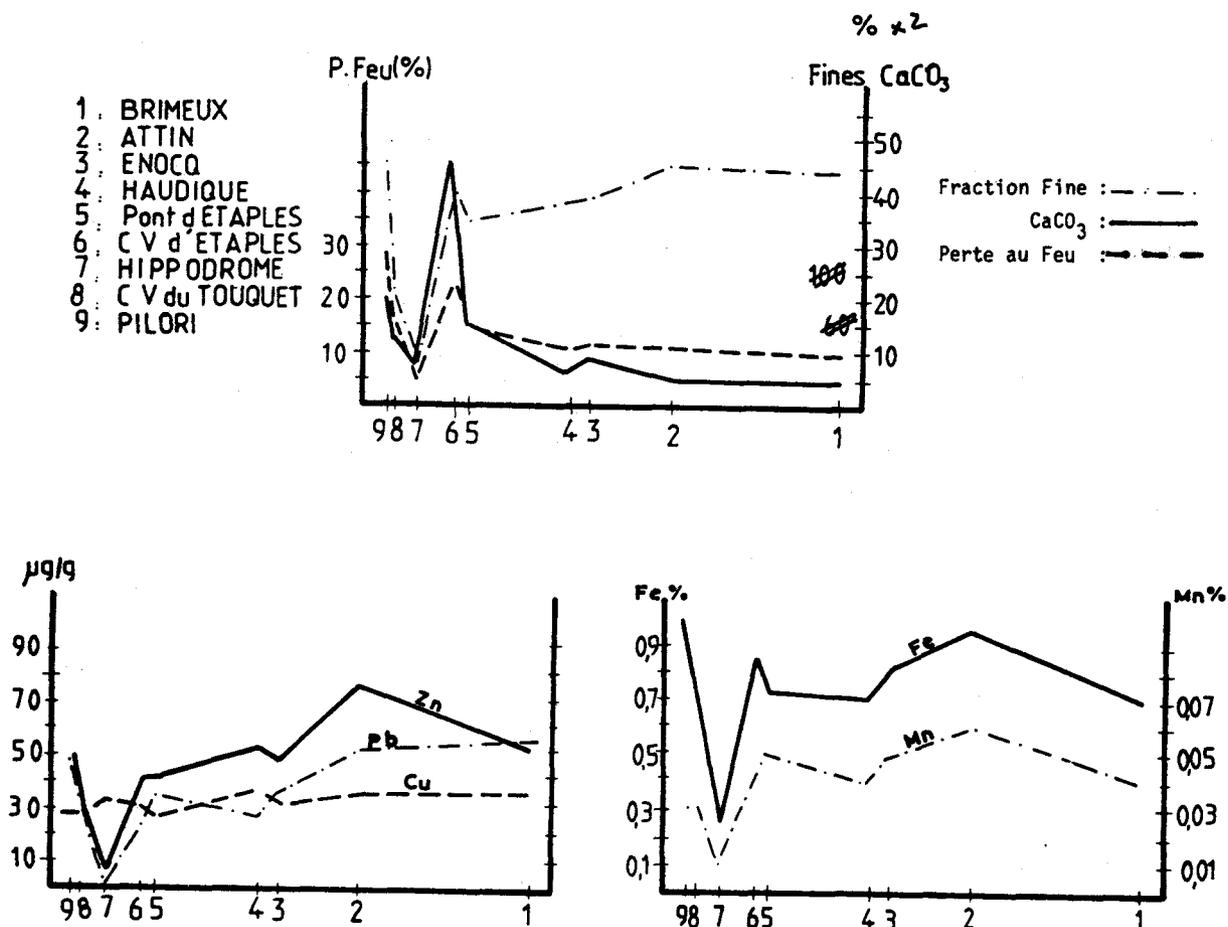


Figure 97 EVOLUTION LONGITUDINALE DES DIFFERENTS METAUX DANS LES SEDIMENTS

L'évolution amont-aval des teneurs métalliques suit les fluctuations du pourcentage des particules inférieures à 63 µm (figure 97). La matière organique suit dans l'ensemble la même évolution, de même que le carbonate de calcium. Ceci montre la dépendance étroite qui existe entre l'abondance des particules argileuses et le stockage des polluants métalliques. Au point 2 (Attin, figure 92), les concentrations augmentent en fer, manganèse et zinc. Le plomb et le cuivre suivent à peu près la même pente que la courbe des pourcentages en particules fines. Pour ces éléments, ce point semble être un endroit privilégié quant à leur piégeage.

On note, d'après l'ensemble des courbes, une légère décroissance des teneurs en métaux à partir d'Enocq (station 3, figure 92). Ce point correspond dans l'estuaire à la limite maximale de l'intrusion marine (0,5 ‰), au moment des coefficients de marée de vive-eau. En revanche, les teneurs ne varient pas de façon significative dans la basse Canche, et malgré les différences de lithologie, nous n'avons pas pu identifier de secteurs favorables au piégeage de fortes concentrations métalliques.

III.2 - COMPARAISON AVEC DES DEPOTS PLUS ANCIENS

Le but de cette étude est ¹⁾ de préciser les caractéristiques de la distribution des oligoéléments métalliques associés à des sédiments déposés depuis quelques décennies, et ²⁾ de rechercher d'éventuelles périodes de plus grande activité humaine et de pollution dans le bassin versant, périodes qui devraient être enregistrées dans les dépôts de l'estuaire (figure 98).

Il n'a pas été possible de dater les sédiments des sondages à la tarière, ni par la suite d'identifier des périodes particulières à partir des faibles fluctuations des concentrations des phtalates, indicateurs de l'activité industrielle (PETERSON et FREEMAN, 1982).

L'étude géochimique effectuée concerne cinq sondages à la tarière répartis sur l'ensemble de l'estuaire : T4, T25, T26, T27, T32 (figure 32). Eric OUDART a tenté d'appréhender, à partir des calculs de coefficients de variation (tableau 20), la dispersion des diverses concentrations métalliques par rapport à la moyenne. Il a essayé de savoir d'après ces coefficients, si les fluctuations des diverses teneurs métalliques dans les sondages sont significatives. Les coefficients de variation correspondent au rapport suivant : σ/m - écart type/moyenne et sont exprimés en pourcentages. Du fait de la marge d'erreur inhérente aux dosages des divers oligo-éléments, les résultats inférieurs à 15 % ne sont pas considérés comme significatifs.

Ainsi, dans les sondages T26 et T27 (figure 98), aucune variation significative n'apparaît. De légères fluctuations existent dans les sondages T25 et T32. Ces fluctuations verticales affectent principalement le zinc, le cadmium et le mercure, et s'observent surtout vers 1,50 m de profondeur.

C'est le cadmium qui montre les plus grandes variations aux sondages T4 et T25 et plus particulièrement vers une profondeur de 0,50 m au sondage T4, et de 1,50 m au sondage T25.

Sondages/Métaux	Cu	Zn	Pb	Cd	Hg	Fe	Mn
T 4	25	35	40	125	40	40	25
T 25	15	35	5	100	30	20	25
T 26	5	10	5	15	15	10	10
T 27	5	5	5	15	10	15	5
T 32	30	45	5	20	25	5	5

Tableau 20.- Coefficients de variation (%).

Les coefficients de variation sont également très importants au sondage T4. Les plus grandes fluctuations se remarquent vers 0,50 m de profondeur, ainsi qu'autour de 3 m de profondeur. Ce sondage offre les plus grandes fluctuations dans la répartition verticale des différentes teneurs métalliques. D'une manière générale, ces variations suivent les fluctuations de la matière organique (figure 98). Cela montre que la matière organique est pour une part importante responsable du piégeage, notamment à la faveur des complexes organo-minéraux qui regroupent argiles et matières organiques.

Les moyennes calculées sur les sondages (tableau 21), montrent que les différentes concentrations métalliques ne sont pas anormalement élevées. Elles sont en effet comprises dans l'éventail des valeurs présentes en milieu naturel et identifiées lors des contrôles du Réseau National d'Observations (R. N. O.) (tableau 22).

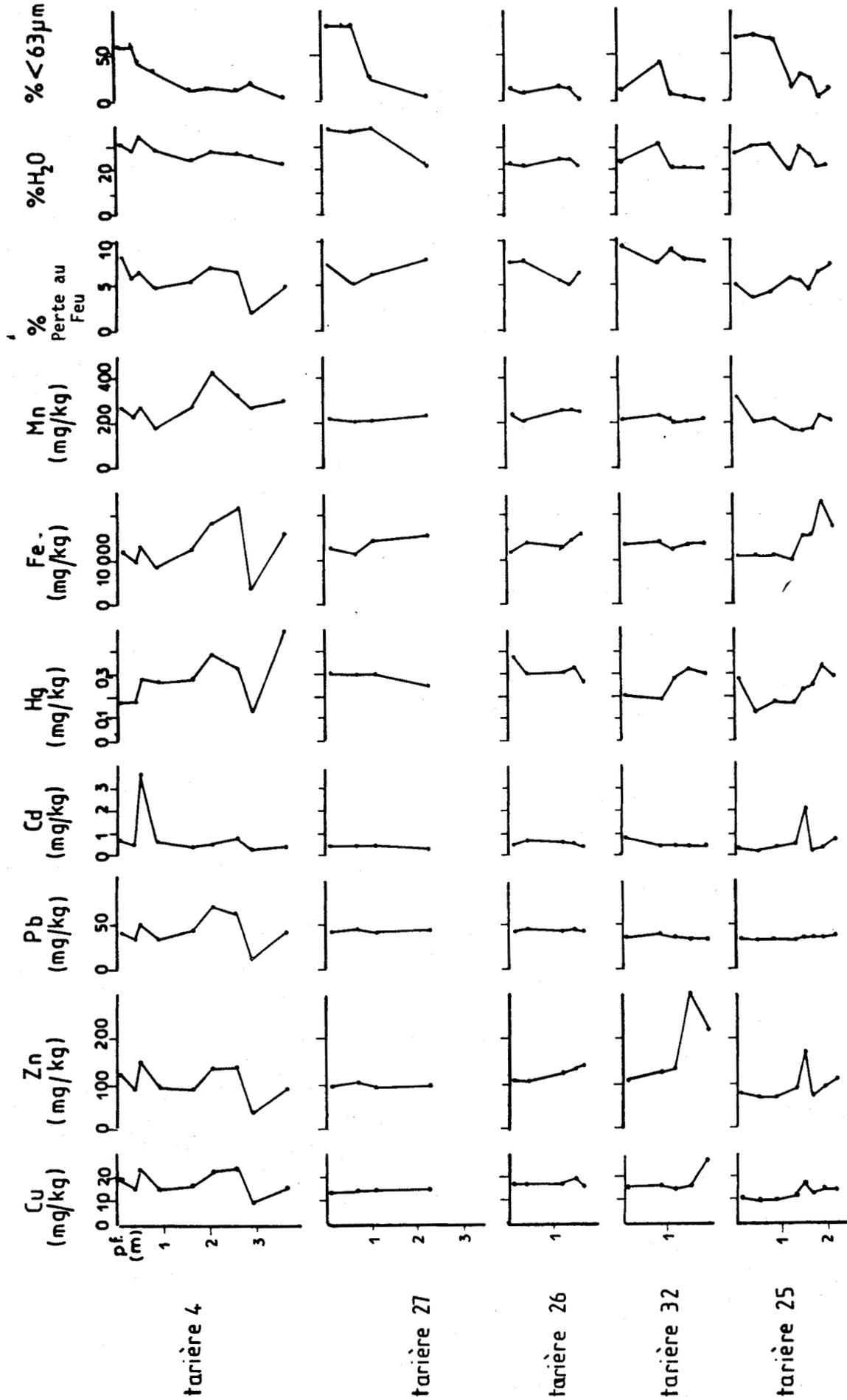


Figure 98: EVOLUTION VERTICALE DES CONCENTRATIONS METALLIQUES (d'après OUDART)

Sondages/Métaux	Cu	Zn	Pb	Cd	Hg	Fe	Mn
T 4	17	105	43	0,84	0,28	12 800	282
T 25	13	96	36	0,61	0,23	14 250	212
T 26	17	122	44	0,56	0,31	13 940	246
T 27	14	100	43	0,39	0,28	13 475	220
T 32	18	177	37	0,59	0,26	13 500	220

Tableau 21 .- Concentrations métalliques moyennes des sondages (mg/kg)

	Milieu naturel (1)	Contrôles RNO (2)	Teneurs anormales (1)
Hg (µg/kg)	20 - 350	149 - 971	> 2 500
Cd (mg/kg)	0,1 - 2	0,4 - 3,2	> 10
Pb (mg/kg)	10 - 70	30 - 144	> 500
Cu (mg/kg)	5 - 30	18 - 98	> 300
Zn (mg/kg)	20 - 150	87 - 341	> 600

Tableau 22 .- Plages de variation des métaux dans le sédiment marin côtier (fraction < 63 µm) de toute la France.

(1) Déduits de la bibliographie (RNO, 1981).

(2) Moyenne des minima et des maxima des contrôles RNO 1978-1982.

II.3 - CONCLUSION

Dans la basse Canche, en amont de Montreuil-sur-Mer, la station O, servant de point de référence, présente de plus fortes concentrations métalliques qu'à l'aval (tableau 18).

La majorité des métaux transportés dans les eaux depuis Enocq jusqu'à l'embouchure (tableau 18) ne présente pas de teneurs moyennes anormales. Les eaux sont en général plus riches en éléments dissous métalliques que les sédiments. Toutefois, le zinc et le mercure présentent des teneurs fortes et leurs concentrations sont à la limite de la normalité.

Dans les sondages à la tarière, nous retrouvons ces fortes teneurs moyennes en mercure. En confrontant les résultats de l'année 1984, en ce qui concerne les sédiments, à ceux acquis lors d'études antérieures (HYDROBIOS II, 1983 ; Institut Pasteur de Lille, 1983) et rassemblés dans les tableaux 23 et 24, on constate que la Canche demeure caractérisée par des teneurs normales en métaux lourds.

Stations	CU	Zn	Pb	Cd	Hg	Fe	Mn	% < 63 µm
103	6,4	34	7,9	0,3	0,58	4 600	168	1,05
69 D	12	74	24,5	0,5	0,17	11 700	255	2,88
69 ABC	12,5	72	17	0,5	0,18	11 700	175	3,59
68	5,3	33	9,2	0,13	0,18	3 700	112	0,11
67	6	26	6	0,2	0,18	3 900	130	0,12

Tableau 23 .- Concentrations en métaux dans la fraction fine des sédiments superficiels (sept.-oct. 81) (in Hydrobios II, mars 1983, cf figure 99). (mg/kg)

Stations :	Cu :	Zn :	Pb :	Cd :	Hg :	Fe :	Mn :	% < 63 μ m :
103	: 28,5	: 95	: 38,7	: 0,67	: 0,16	: 9 400	: 250	: 9,28
69	: 15,5	: 85	: 42,5	: 0,55	: 0,2	: 10 500	: 200	: 16,4
68	: 24	: 118,5	: 50	: 1	: 0,22	: 12 200	: 260	: 2,25
67 bis	: 14,5	: 80	: 41,2	: 0,5	: 0,18	: 10 300	: 170	: 29,4
66	: 16,2	: 38,2	: 28,7	: 0,37	:	: 4 200	: 125	: 0,1

Tableau 24 .- Concentrations en métaux dans la fraction fine des sédiments superficiels (juin 83) (*in* R. N. O., à paraître, cf figure 99). (mg/kg)

La Canche, comparée avec les autres domaines littoraux nationaux (tableau 25), présente des teneurs parmi les moins élevées pour le mercure, le plomb et le zinc. L'éventail de variation des valeurs mesurées est peu étendu (tableau 22), ce qui traduit une régularité des apports.

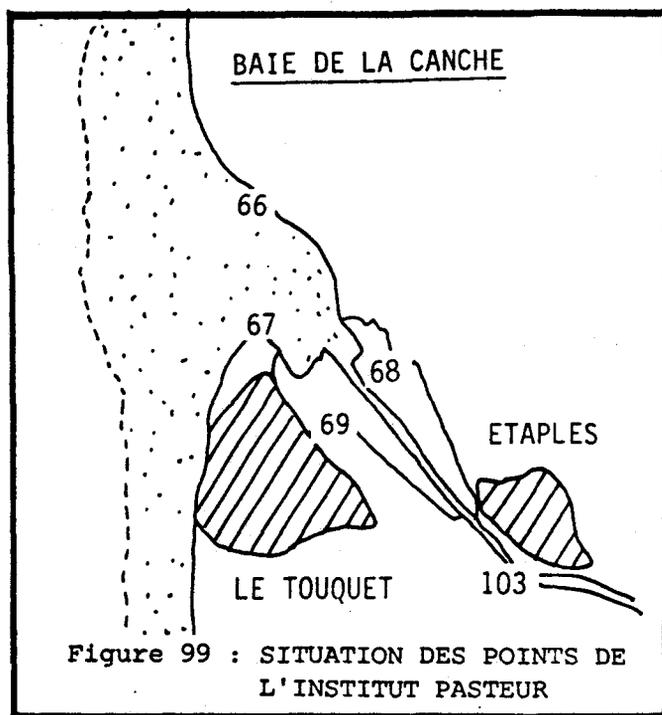


Figure 99 : SITUATION DES POINTS DE L'INSTITUT PASTEUR

CONCLUSION DE LA TROISIEME PARTIE

Le transit des sédiments en suspension à l'embouchure de la Canche s'effectue sous l'action combinée des houles et des courants de marée. Dans l'estuaire lui-même, les courants de marée sont les principaux agents de transport par rapport aux courants fluviaux. Ils sont responsables de la pénétration de particules d'origine marine, ainsi que d'une remise en suspension importante des dépôts estuariens. Les masses turbides mesurées n'ont jamais dépassé 700 mg/l.

Lors d'une même marée de vive-eau, nous avons constaté la présence de deux bouchons vaseux turbides : le premier accompagne le coup de flot et annonce la venue marine, le second apparaît au cours du montant (flot) lorsque les premières eaux salées ont pénétré dans l'estuaire. Ainsi, le bouchon vaseux n'est pas lié de manière étroite à la limite de l'intrusion saline, mais dépend surtout d'un processus purement dynamique. Il représente une masse temporaire d'extension irrégulière et soumise aux oscillations de la marée. En Gironde, CASTAING (1981) et JOUANNEAU (1982) observent une augmentation des turbidités avec les forts courants de marée liés aux coefficients de vive-eau, mais le bouchon vaseux est une masse permanente.

Le bouchon turbide (> à 100 mg/l) s'installe dans tout l'estuaire à pleine mer et en vive-eau. Une décantation des particules s'effectue au sein des eaux au cours de l'étale de pleine mer, quel que soit le coefficient de marée. La répartition et la densité du bouchon turbide dépendent surtout des coefficients de marée de vive-eau et des fortes pluviosités persistantes sur le bassin de la Canche.

Parmi les minéraux dominants présents dans les suspensions totales, les fluctuations antagonistes du quartz et de la calcite permettent de suivre avec précision la progression des diverses masses d'eau au cours d'une marée donnée. En effet, la calcite est associée à la pénétration marine dans l'estuaire, cependant que le quartz et les feldspaths sont plutôt des marqueurs de l'amont continental.

Le cortège minéralogique moyen des argiles (fraction < 2 μ m) dans les suspensions reflète les cortèges identifiés dans les sédiments superficiels (CHAMLEY et DESPEYROUX, 1983). L'association est dominée par l'illite (35 %), par les interstratifiés irréguliers indifférenciés (35 %) associés à de la smectite (15 %). La chlorite et la kaolinite sont présentes en faible quantité (\approx 10 %), et la vermiculite se rencontre parfois sous forme de traces.

D'amont en aval existent de faibles variations liées à l'hydrodynamisme important dans l'estuaire de la Canche. Malgré les fortes vitesses de courant qui remettent en suspension et favorisent une homogénéisation des cortèges argileux, les proportions de l'illite augmentent souvent à l'aval. Lorsque le régime est plus calme, une sédimentation différentielle des différents minéraux s'effectue, et la smectite, de par sa taille plus petite et sa plus grande portance, augmente en proportion dans les cortèges minéralogiques. Dans les sédiments, des proportions plus élevées de la smectite en rive gauche indiquent un hydrodynamisme plus calme qu'en rive droite (CHAMLEY et DESPEYROUX, 1983). Par contre, les sondages à la tarière ne présentent pas de variations verticales notables des différents cortèges argileux.

Les concentrations moyennes d'un certain nombre de métaux (Hg, Pb, Cu, Cd, Zn, Mn, Fe) présentent une diminution progressive d'amont en aval dans les suspensions. Les concentrations métalliques fluctuent parallèlement aux proportions des sédiments fins. Les eaux renferment des teneurs plus importantes que les sédiments superficiels, ce qui montre que le piégeage dans l'estuaire par les sédiments demeure modéré, et que la plupart des métaux en transit sont expulsés en mer.

La gamme des teneurs en métaux s'insère parfaitement dans la gamme de normalité des contrôles du Réseau National d'Observation. Les concentrations métalliques de l'estuaire de la Canche ne sont pas plus élevées que celles d'autres milieux littoraux. Cette situation paraît relativement permanente au cours du temps, comme le montrent diverses études antérieures (Institut Pasteur de Lille, 1980, 1982, 1983 ; JOANNY, 1984).

Les différents sondages effectués dans l'estuaire, et destinés à apprécier l'évolution des pollutions au cours des dernières décennies ne montrent pas dans leur ensemble de grandes variations des teneurs métalliques au cours des périodes récentes. Toutefois, les teneurs en mercure dans les sédiments et sous forme particulière dans les eaux sont élevées, à la limite de la normalité rencontrée en milieu naturel (tableau 22).

Par ailleurs, l'un des sondages (T4), situé à proximité du cercle de voile d'Etaples, présente des variations plus élevées que la moyenne, qui paraissent étroitement liées aux fluctuations de la matière organique.

Notons que le temps de transit des suspensions, plus long en période de morte-eau, favorise une augmentation des métaux dissous à la station 2 située au pont d'Etaples. Ces métaux paraissent résulter de rejets anthropiques dans le secteur urbain.

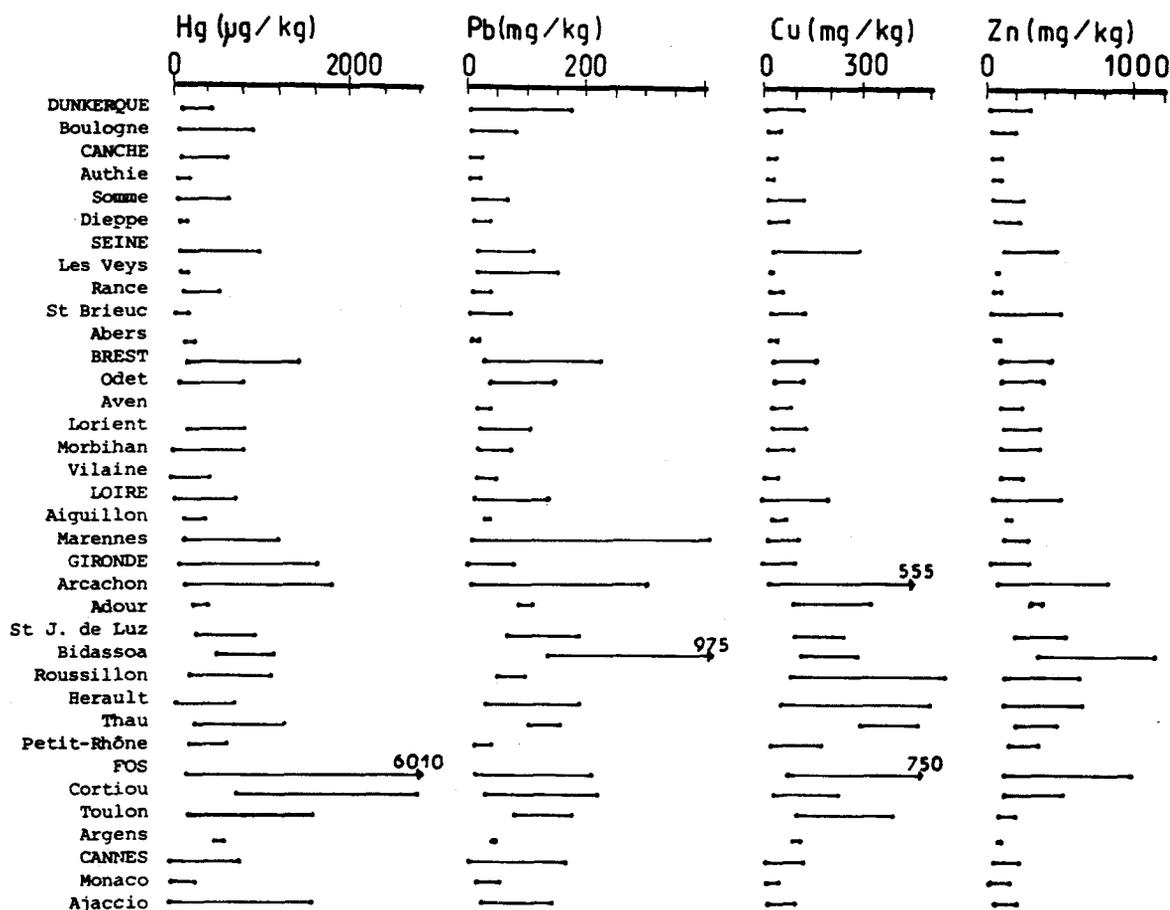
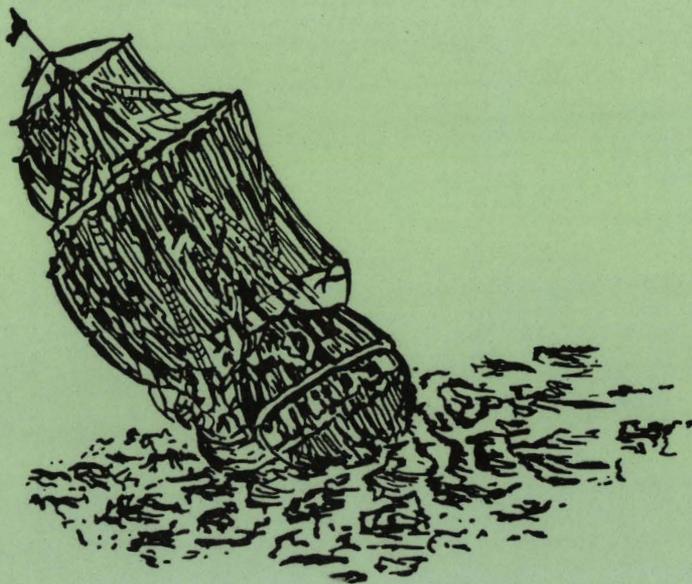


Tableau 25 : Eventail de variation des teneurs en métaux du littoral français in JOANNY (1984), R.N.O.

CONCLUSIONS

GENERALES



La Canche, après un cours long de 95 km, se résout en un estuaire d'orientation SE-NW, avant de déboucher en Manche Orientale, à hauteur de la ville du Touquet-Paris-Plage. Son estuaire échancre la partie septentrionale de la plaine maritime picarde, qui s'étend des falaises jurassiques du Boulonnais (au Nord) aux falaises crétacées du Pays de Caux (au Sud).

Le présent travail, concernant l'étude hydrosédimentaire de l'estuaire de la Canche, s'inscrit dans le cadre d'un vaste programme portant sur les problèmes de pollution en milieu littoral et estuarien. Il a été mené conjointement par le laboratoire de Sédimentologie-Géochimie de Lille I et l'Institut Pasteur de Lille.

Cette approche pluridisciplinaire repose sur ¹⁾ plus de 200 échantillons provenant des sédiments superficiels et des sondages à la tarière et ²⁾ une centaine de prélèvements d'eau effectués au cours de quatre sorties correspondant à des marées de vive-eau et de morte-eau.

Les observations à (différentes échelles) qui en découlent, ont permis une meilleure compréhension de l'histoire du colmatage et des processus hydrologiques se produisant dans l'estuaire. Les données rassemblées ont permis :

- de préciser son évolution morphologique ;
- d'établir des cartes sédimentologiques détaillées ;
- de déterminer les processus hydrologiques ;
- de comprendre la dynamique sédimentaire.

EVOLUTION MORPHOLOGIQUE DE L'ESTUAIRE

La morphologie estuarienne actuelle résulte de la confrontation d'actions anthropiques et naturelles. Les premières sont dues à l'implantation de digues, les secondes à des mouvements sédimentaires qui induisent des érosions ou des engraisements ponctuels du milieu côtier, les principaux facteurs de ces mouvements étant les courants de marée, la houle et le vent.

La période 1758 à 1981, est marquée par un recul de 2 km de la pointe de Lornel, au Nord, opposé à une progression de la rive sud (banc du Pilori). Ce double mouvement, avancée du poulier (banc du Pilori) et recul du musoir (secteur de Lornel), traduit l'action importante des houles de Sud-Ouest ainsi qu'une dérive littorale active portant vers le Nord. Il détermine également une dérive de l'axe de l'estuaire dans la même direction. Les vents de Sud-Ouest à Ouest favorisant une migration des dunes vers l'intérieur des terres, les formations éoliennes constituent une unité transgressive sur les anciens marais (mollières) et sur la falaise morte.

L'estuaire s'est largement colmaté depuis 7 000 B.P.. L'installation de digues, canalisant le chenal, interdit au fleuve toute divagation dans l'estuaire et entraîne une sédimentation rapide, riche en particules fines, sur les bordures externes. L'effet de comblement induit un rétrécissement de la section de l'estuaire et, de ce fait, une diminution des influences marines.

NATURE DES FONDS SEDIMENTAIRES

La sédimentation est liée à la morphologie de l'estuaire. La répartition des sédiments est contrôlée par l'action conjointe du vent, des courants, des houles,

des stocks sédimentaires disponibles ainsi que par la nature et la forme des particules. Cinq lithofaciès ont été différenciés : le faciès sableux, le faciès des sables et vases, la slikke, le schorre et le faciès des sables humifères et de tourbe. Leur organisation en domaines reflète en grande partie une distribution latérale, depuis le centre de l'estuaire jusque sur ses bordures, et une distribution longitudinale moins marquée.

Dans l'estuaire aval, les fonds sédimentaires présentent dans l'ensemble un domaine sableux avec au Sud, inséré entre le flanc interne du banc du Pilori et le cercle de voile du Touquet, un secteur plus envasé. Au Nord de l'embouchure, les faciès de tourbe sont mis à nu par l'action des courants de marée. Les études polliniques attestent du caractère relique de ces formations (2100 à 6000 B.P.).

Les sables de l'estuaire à mode principal 125 μ m ou 160 μ m traduisent par leurs constituants une longue histoire de remaniements successifs. Ils renferment de fortes proportions de quartz et présentent un cortège de minéraux lourds résistants : grenat, zircon, tourmaline. Des tests remaniés du Tertiaire et du Crétacé (foraminifères bryozoaires) subsistent également aux côtés de cette fraction minéralogique. Parmi les faunes actuelles, les espèces d'ostracodes euryhalines prédominent et sont accompagnées d'une faune dulçaquicole en amont d'Etaples. Les principaux paramètres granulométriques étudiés (grain moyen, mode) conduisent à identifier des zones de passage préférentiel des courants de flot et de jusant à l'aval. Le cortège minéralogique des particules inférieures à 2 μ m permet de montrer une variation latérale, attestant d'un hydrodynamisme plus élevé en rive droite.

Les sondages à la tarière effectués sur les mollières montrent une certaine homogénéité de la sédimentation au cours des dernières décennies. Ils permettent de mettre en évidence l'existence de sédiments reliques dans la zone septentrionale ainsi que l'antagonisme, à l'aval, des actions éoliennes et marines qui se traduisent par une succession rapide entre les faciès sableux et ceux plus enrichis en fraction fine. L'analyse chimique des sédiments des sondages ne montre pas dans son ensemble de grandes variations des teneurs métalliques en Fe, Mn, Cd, Zn, Pb, Cu, Hg, au cours des dernières décennies.

PROCESSUS HYDROLOGIQUES

La marée joue un rôle essentiel dans la dynamique estuarienne de la Canche. La pénétration marine très rapide induit un brassage important de toute la tranche d'eau qui interdit toute stratification saline et thermique. La limite du front de salinité pénètre assez loin dans les terres (13 km). Cette limite oscille d'une dizaine de kilomètres entre les coefficients de vive-eau et de morte-eau.

L'estuaire est caractérisé par un marnage important, d'environ 6 m à l'embouchure, qui diminue en remontant vers l'amont (type hyposynchrone). En période de vive-eau, les courants de marée atteignent des vitesses élevées à l'aval (2,50 m/s). L'onde de marée qui se propage dans l'estuaire se déforme en provoquant un redressement du front de l'onde. Au niveau d'Etaples, les vitesses de courant de flot sont supérieures aux courants de jusant.

En remontant l'estuaire, la dissymétrie de l'onde de marée se traduit par une diminution de la durée du montant sur celle du baissant ainsi que par un retard dans l'installation du flot. Ce dernier arrive brutalement, au contraire du jusant plus progressif. En période de vive-eau la circulation résiduelle est indépendante de l'intrusion saline; dans le chenal elle est orientée vers l'aval sur toute la tranche d'eau.

DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE

A l'embouchure, le transit des sédiments s'effectue sous l'action combinée des houles et des courants de marée. Dans l'estuaire ces derniers sont les principaux agents de transport et sont responsables de la pénétration des éléments marins ainsi que d'une remise en suspension importante. Les sédiments se déplacent essentiellement en suspension, et les fractions granulométriques maximales rencontrées sont équivalentes à 400 μm .

Le bouchon vaseux représente une masse temporaire d'extension irrégulière liée aux oscillations de la marée. Un noyau plus dense de ce bouchon se localise aux stations situées au droit de l'hippodrome et au pont d'Etaples. C'est en vive-eau que le bouchon vaseux est le mieux développé, et il semble directement lié aux courants de marée. Nous avons constaté la présence de deux masses d'eau turbide : la première accompagne le "coup de flot" annonçant l'intrusion marine, et la seconde apparaît au moment du montant lorsque les premières eaux salées ont pénétré dans l'estuaire.

Les variations d'abondance relative des minéraux argileux sont généralement de 5 à 10 %. Cette relative homogénéité longitudinale s'explique par la remise en suspension et le brassage intense des sédiments fins ainsi que par l'apport d'une phase argileuse homogène provenant de l'amont. Il existe toutefois une différenciation entre les apports de l'amont et de l'aval. Les premiers sont caractérisés par de plus fortes proportions minéralogiques en chlorite, kaolinite, quartz et feldspaths. Les seconds sont représentés par un apport important en éléments calciques. Les variations relatives de ces deux groupes minéralogiques permettent de suivre le jeu antagoniste des apports fluviaux et marins. L'illite et le quartz paraissent avoir une origine partiellement marine cependant que les interstratifiés irréguliers proviennent surtout de l'amont continental. Une sédimentation différentielle apparaît au moment des périodes hydrodynamiques les plus calmes, la smectite augmentant en proportion relative au détriment de l'illite. Ce comportement opposé résulte des propriétés de floculation et des tailles plus importantes des illites.

Les concentrations en métaux (Fe, Mn, Cd, Zn, Pb, Cu, Hg) diminuent de façon progressive d'amont en aval. Les eaux renferment des teneurs plus importantes que les sédiments superficiels. En fonction des coefficients de marée, on observe une élévation des concentrations métalliques au droit de l'hippodrome ou à hauteur du port d'Etaples. Ceci est lié aux effluents urbains rejetés dans l'estuaire entre ces deux stations. Les processus d'érosion libèrent des composés métalliques solubles qui sont dans leur grande majorité expulsés au large. Ces processus dynamiques favorisent une certaine auto-épuration de l'estuaire et le maintiennent dans la gamme de normalité déjà relevée par le Réseau National d'Observation.

Au total, la Canche, située comme tous les cours d'eau se déversant en Manche dans une région à fort marnage, et offrant un faible débit relativement constant ($\approx 11 \text{ m}^3/\text{s}$), est principalement soumise à l'action de la marée. Les mécanismes sédimentaires mis en jeu ne sont pas liés à la circulation résiduelle mais à des processus purement dynamiques résultant de l'asymétrie des courants.

Parmi les prolongements que l'on peut envisager à la présente étude, il serait utile de mieux connaître les mécanismes hydrologiques et sédimentologiques mis en jeu lors de faibles, moyens, et forts coefficients de marée, dans le but d'établir plus clairement les relations existant entre les matières en suspension, la matière organique et les oligo-éléments. Pour compléter les données acquises, l'étude devrait se baser sur une bathymétrie fine et sur un suivi des particules en suspension au moyen de traceurs radio-actifs. Cette approche nous permettrait de mieux appréhender le temps de résidence des diverses particules en transit et les lieux de piégeage temporaire et/ou permanent, et ainsi de mieux assurer la gestion de ce milieu instable qu'est l'estuaire de la Canche.

d'après FRANQUIN



BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- ALDUC D., 1979 .- La Manche Orientale. Etude géomorphologique du réseau de paléovallée. *Thèse 3ème cycle*, Caen, 146 p., 23 fig.
- ALLEN G.P., 1971 .- Relationship between grain size parameters distribution and current patterns in the Gironde estuary (France). *J. Sed. Petrol.*, Tulsa, n° 41, 1, p. 74-88, 16 fig.
- ALLEN G.P., 1972 .- Etude des processus sédimentaires dans l'estuaire de la Gironde. *Thèse d'Etat*, Bordeaux, n° 353, 314 p., 134 fig., 13 tabl.
- ALLEN G.P., CASTAING P., 1981 .- Excursion géologique sur l'estuaire de la Gironde. *Ass. des sédimentologues français*, 113 p.
- 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, 6 fig.
- ALLEN G.P., KLINGEBIEL A., DE RESSEGUIER A., 1970 .- Evolution et signification dynamique de quelques indices granulométriques des sédiments de l'embouchure de la Gironde. *Cahiers Océanographiques*, t. XXII, vol. 8, p. 801-813.
- ALLEN G.P., CASTAING P., SALOMON J.C., 1982 .- Effets de la marée sur les mouvements de l'eau et des sédiments dans les estuaires. *Mém. Soc. Géol. France*, N.S., n° 144, p. 5-16.
- ALLEN G.P., SALOMON J.C., BASSOULET P., DU PENHOAT Y., DE GRANPRE C., 1980 .- Effects of tides on mixing and suspended sediments transport in macrotidal estuaries. *Sedimentary geology*, Amsterdam, 26, p. 69-90, 13 fig.
- AMINOT A., CHAUSSEPIED M., 1983 .- *Manuel des analyses chimiques en milieu marin*. CNEXO. BND/DOCUMENTATION. 395 p.
- AUFFRET J.P., ALDUC D., 1977 .- Ensemble sédimentaire et formes d'érosion du quaternaire sous-marin de la Manche Orientale. *Bull. Ass. Fr. Et. Quat.*, 4, 1 fig., p. 70-75.
- AUFFRET J.P., COLBEAUX J.P., 1977 .- Etude structurale du Boulonnais et de son prolongement sous-marin en Manche Orientale. *Bull. Soc. Géol. France*, (7), 19, 5, 1047-1055, 3 fig., 1 tabl.
- AUFFRET J.P., LARSONNEUR C., 1975 .- Le Modèle Sédimentaire Manche Orientale. *IX Congrès International de Sédimentologie*, Nice, p. 33-38.
- AUFFRET J.P., HOMMERIL P., LARSONNEUR C., 1975 .- La Mer de la Manche, modèle de bassin sédimentaire épicontinental sous climat tempéré. *IX Congrès International de Sédimentologie*, Nice, 25-32 p.
- AVOINE J., 1981 .- L'estuaire de la Seine : sédiments et dynamique sédimentaire. *Thèse 3ème Cycle*, Caen, 236 p.
- AVOINE J., 1982 .- Mécanismes contrôlant la dynamique des sédiments en suspension dans l'estuaire de la Seine. *Mém. Soc. Géol. Fr.*, N.S., n° 144, p. 17-25.
- BAAK J.A., 1936 .- Regional Petrology of the Southern North Sea, *Wageningen*.
- BAQUET G., 1982 .- *Val de Canche*, Baquet, 222 p.
- BARBAROUX L., 1980 .- Evolution des propriétés physiques et chimiques des sédiments dans le passage continent-océan. L'effet estuarien (estuaire de la Loire et ses parages). *Thèse d'Etat*, Nantes, 432 p.
- BASSOULET P., 1979 .- Etude de la dynamique des sédiments en suspension dans l'estuaire de l'Aulne (Rade de Brest). *Thèse 3ème Cycle*, Brest, 136 p., 50 fig.
- BENTLEY D., 1984 .- Contribution à l'étude hydrobiologique du détroit du Pas-de-Calais : paramètres physico-chimiques. *Thèse 3ème Cycle*, Lille, 141 p., 58 fig., 36 tabl.

- BENTLEY D., ORANGE J., 1983 .- Estuaires (Aa, Canche, Authie, Somme). Rapport d'étude interdisciplinaire. *Hydrobiologie E.P.R./C.N.E.X.O.*, p. 1-47.
- BERTHOIS L., 1955 .- Sédimentation dans l'estuaire de la Loire en période hivernale. *C.R. Acad. Sc.*, Paris, t. 240, p. 1691-1693.
- BERTHOIS L., 1964 .- Etude de la dynamique estuarienne dans le fleuve : "la Loire". *4ème Congrès Inter. Portuaire*, Anvers, section III, 1ère partie, p. 32-41.
- BERTHOIS L., 1975 .- *Etude sédimentologique des roches meubles (techniques et méthodes)*, DOIN Editeur, Paris, 278 p.
- BILLY C., 1964 .- Etude minéralogique des sables côtiers de la Manche entre l'estuaire de la Dives et l'estuaire de la Somme. *Rev. Géogr. Phys. et Géol. Dyn.* 2ème Série, t. 6, p. 123-154, 11 fig.
- BILLY G., 1954 .- Etude des courbes normales de dispersion, éléments de statistique à l'usage des naturalistes. *Centre de documentation universitaire*, Paris, 204 p.
- BLANC F., CHAMLEY H., LEVEAU M., 1969 .- Les minéraux en suspension, témoins du mélange des eaux fluviales en milieu marin. Exemple du Rhône. *C.R. Acad. Sc.*, Paris, t. 269, p. 2509-2512.
- BOILLOT G., 1964 .- Géologie de la Manche Occidentale : fonds rocheux, dépôts quaternaires, sédiments actuels. *Thèse d'Etat*, Paris, Ann. Inst. Océanogr., XLII (I), p. 1-219.
- BONNEFILLE R., 1963 .- Essai de synthèse des lois de début d'entraînement des sédiments sous l'action d'un courant en régime continu. *Bull. Cent. Rech. Chatou*, 5, p. 67-72.
- BONNEFILLE R., ALLEN H., 1970 .- Aménagement de l'estuaire de la Canche. *Rapport de Synthèse du Laboratoire National d'Hydraulique - HCO42-R-423, T733DHM.*
- BOUEDINA A., 1978 .- Caractères géochimiques et paléoenvironnement de la série des calcaires de Drimas, Péloponnèse septentrional (Grèce). *D.E.A.*, Lille, texte ronéo, 51 p.
- BOURDIER F., 1974 .- Les dépôts du Quaternaire ancien : la région Picardie. *Bull. de l'A.F.E.Q.*, n° 40-41, p. 131-135.
- B.R.G.M., 1971 .- *Aménagement de la baie de la Canche*, rapport 71 SGN 208 NPA, 9 p.
- B.R.G.M., 1974 .- *Carte géologique à 1/50 000 de Montreuil.*
- BRINDLEY G.W., BROWN G., 1980 .- *Crystal structures of clay minerals and their X-Ray Identification*, Mineralogical Society, 495 p.
- BRIQUET A., 1930 .- Le littoral du nord de la France et son évolution morphologique. L'évolution morphologique suivie d'un appendice. Paris, A. Colin, 484 p.
- BRYLINSKI J.M., DUPONT J., BENTLEY D., 1984 .- Conditions hydrobiologiques au large du Cap Gris Nez (France) : premiers résultats. *Oceanologica Acta*, vol. 7, n° 3, p. 315-322.
- CAILLERE S., HENIN S., RAUTUREAU M., 1982 .- *Minéralogie des argiles*, 2ème éd. Masson Paris, t. 1 et 2, 184 et 189 p.
- CAILLEUX A., 1947 .- Concrétions quartzieuses d'origine pédologique. *Bull. Soc. Géol. France*, Paris (5), t. XVII, p. 475-482, 1 pl.
- CALATAYUD P., 1981 .- Alluvionnement argileux dans deux bassins versants du Nord de la France. *D.E.A.*, Lille, texte ronéo, 51 p.
- CALINE B., 1982 .- *Le secteur occidental de la baie du Mont St Michel (morphologie, sédimentologie et cartographie de l'estran)*, documents du B.R.G.M. n° 42, 250 p.
- CAMMON Mc., 1962 .- Moments measures and the shape of size frequency distributions. *J. Géol.*, vol. 70, p. 89-92.
- CARBONEL P., 1973 .- Les ensembles faunistiques d'ostracodes récents de l'estuaire de la Gironde. *Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine*, Bordeaux, n° 14, p. 75-81, 1 fig.
- CARBONEL P., 1980 .- Les ostracodes et leur intérêt dans la définition des écosystèmes estuariens et de plateforme continentale. Essai d'application à des domaines anciens. *Thèse d'Etat*, Bordeaux, 350 p., 113 fig.

- CASTAING P., 1981 .- Le transfert à l'océan des suspensions estuariennes : cas de la Gironde. *Thèse d'Etat*, Bordeaux, 530 p., 179 fig., 14 tabl.
- CASTAING P., ALLEN G.P., 1981 .- Mechanism controlling seaward escape of suspended sediment from the Gironde : a macrotidal estuary in France. *Mar. Geol.*, Amsterdam, 40, 1-2, p. 101-118, 12 fig.
- CHAMLEY H., 1966 .- *Guide technique du laboratoire de géologie marine*. Document interne, station marine d'Endoume et centre d'Océanographie. Luminy, Marseille, 168 p.
- CHAMLEY H., 1971 .- Recherche sur la sédimentation argileuse en Méditerranée. *Sci. Géol. Strasbourg*, Mém. 35, 225 p.
- CHAMLEY H., 1974 .- Considérations sur la sédimentologie des estuaires. *La Houille Blanche*, 1-2, p. 123-128.
- CHAMLEY H., DESPEYROUX Y., 1983 .- Estuaires (Aa, Canche). Rapport d'Etude interdisciplinaire : sédimentologie. *E.P.R./C.N.E.X.O.*, p. 49-111.
- COLBEAUX J.P., DUPUIS Ch., ROBASZINSKI F., AUFFRET J.P., HAESAERTIS P., SOMME J., 1980 .- Le détroit du Pas-de-Calais : 1 élément dans la tectonique des blocs de l'Europe occidentale. *Bull. d'information des Géologues du Bassin de Paris*, vol. 17, n° 4.
- CREMILLE L., 1972 .- Aménagement de la baie de la Canche. Exécution de sondages de reconnaissance équipés en piézomètres. Compte rendu de fin des travaux. *Rapport n° 72 MPA 039 du B.R.G.M.*
- DELIBRIAS G., ELHAI H., LARSONNEUR C., 1969 .- Le Flandrien à l'Est d'Arromanches (Calvados). *C.R.A.Sc.*, Paris, t. 268, p. 247-250.
- DELOZE J., CREMILLE L., 1971 .- Service maritime des ports de Boulogne/mer et de Calais. Aménagement de la baie de la Canche. Influence du barrage sur la nappe phréatique au Touquet Paris-Plage (Pas-de-Calais). *Rapport n° 71 SGN 208 NPA*, 13 p., 8 annexes.
- DEMANGEON A., 1905 .- *La plaine picarde : Picardie, Artois, Cambrésis, Beauvoisis*. Paris, A. Colin, 496 p.
- DEVISME P., 1978 .- Atlas photographique des minéraux d'alluvions. *Mémoire du B.R.G.M.*, 95, 203 p.
- DEZONNAY Y., 1973 .- *Rapport de l'étude sur l'écologie et la productivité de l'estuaire de la Canche*. Aménagement sur les estuaires, I.S.T.P.M., 51 p.
- DUBOIS G., 1924 .- Recherches sur les terrains quaternaires du Nord de la France. *Mémoire de la Soc. Géologique du Nord*, 6, 359 p.
- DUBRULLE L., 1982 .- Etude hydrosédimentaire de l'estuaire de l'Orne et de ses abords. *Thèse 3ème Cycle*, Caen, 213 p.
- DUBRULLE L., LARSONNEUR C., 1984 .- Dynamique sédimentaire de l'estuaire de l'Orne. *XVIIIe journées de l'Hydraulique*, l'Hydraulique et la maîtrise du Littoral.
- DUJON S.C., 1969 .- Sur la genèse des bancs de la Mer du Nord Méridionale. *Revue de géographie physique et de géologie dynamique*, vol. XI, fasc. 5, p. 503-510, 5 fig.
- DUJON S.C., 1971 .- Interprétation d'un relief du fond de la Mer du Nord comme dû à un dépôt morainique frontal ancien (Warthe) - Conséquences paléogéographiques. *C.R. Som. des séances de la Société Géologique de France*, p. 163-164.
- DUPEUPLE A., MATHIEU R., MOMENI I., POIGNANT A., ROSSET-MOULINIER M., ROUVILLOIS A., UBALDO M., 1972 .- Travaux récents sur les foraminifères actuels des côtes françaises de la Manche. *Coll. Géol. Manche*, Mém. B.R.G.M., n° 79, p. 97-100.
- DUPONT J.P., 1975 .- Présence de biolithosores à *Pygospio elegans* *Claparède* (Polychètes sédentaires) dans la baie de Somme. *C.R. Acad. Sc. Paris*, t. 280, série D, p. 1773-1777.
- DUTERTRE A.P., 1926 .- Observations géologiques et physiographiques dans la région littorale au Sud du Boulonnais. Estuaire de la Canche, environ de Camiers. *Ann. Soc. Géol. du Nord*, p. 3-13.

- DUVAL J., 1973 .- Productivité primaire en baie de Canche. *Thèse 3ème Cycle*, Lille, 90 p.
- DYER K.R., 1973 .- *Estuaries : a physical introduction*. John Wiley and sons, Chichester, 140 p.
- ELHAI H., LARSONNEUR C., 1969 .- Dépôts tardiglaciaires et post-glaciaires sur la côte du Calvados. *Bull. Ass. Fr. Et. Quat.*, n° 19, p. 93-104.
- ETCHEBER H., 1979 .- Répartition et comportement du Zn, Pb, Cu et Ni dans l'estuaire de la Gironde. *Bull. Inst. Géol. d'Aquitaine*, Bordeaux, n° 25, p. 121-147, 19 fig., 9 tabl.
- FEUILLET J.P., FLEISHER P., 1980 .- Estuarine circulation : controlling factor of clay mineral distribution in James River Estuary, Virginia. *J. Sedim. Petrol.*, Tulsa-Okl., vol. 50, n° 1, p. 267- 279.
- FRANCIS BOEUF Cl., 1942 .- Les phénomènes de sédimentation dans les estuaires. *Bull. A.G.F.*, n° 146-147, p. 64-78.
- GALENNE B., 1974 .- Les accumulations turbides de l'estuaire de la Loire - Etude de la crème de vase. *Thèse 3ème Cycle*, Nantes, 323 p., 122 fig.
- GERIN B., 1966 .- Contribution à l'étude hydrogéologique du bassin de la Canche. *Thèse 3ème Cycle*, Paris, 183 p.
- GHESTEM A., 1966 .- Etude des prés salés de la baie de Canche en relation avec les caractères physico-chimiques, biochimiques et microbiologiques des sédiments. *Thèse d'Etat*, Lille, 150 p.
- GIBBS R.J., 1977 .- Clay mineral segregation in the marine environment. *Journal of sedimentary Petrology*, vol. 47, n° 1, p. 237-243.
- GIRESSÉ P., 1970 .- Etude hydrologique de l'estuaire de la Seine et applications au dépôt de la tange. *Cahiers Océanographiques*, XXII, 4, p. 367-393.
- GOSSELET J.E., 1902 .- Galets glaciaires d'Etaples. *Ann. Soc. Géol. Nord*, t. 31, p. 297-307.
- GOULEAU D., 1975 .- Les premiers stades de la sédimentation sur les vasières littorales atlantiques. Rôle de l'émersion. *Thèse d'Etat*, Nantes, n° 8, 2 t., 241 p.
- GROOT A.J. (de), 1966 .- Mobility of trace elements in deltas. *Int. Soc. Soil Scienc. Comm.* II and IV, Aberdeen.
- GUILCHER A., 1951 .- La formation de la Mer du Nord du Pas-de-Calais et des plaines maritimes environnantes. *Rev. Geogr. Lyon*, XXVI, p. 311-329.
- GUILCHER A., 1979 .- *Précis d'hydrologie marine et continentale*, Masson, 2ème éd., 344 p.
- HAGEMAN Ir.B.P., 1969 .- Development of the western part of the netherlands during the Holocene. *Géologie en MIJNBOW*, vol. 48 (4), p. 373-388.
- HOLTZAPFFEL T., 1981 .- Minéralogie des argiles dans les roches anté Crétacé Supérieur d'Othrys (Grèce Continentale). *D.E.A.*, Lille, texte ronéo, 52 p.
- HUAULT M.F., AUFFRET J.P., 1975 .- Etude des dépôts quaternaires sous-marins en Manche Orientale. *Bull. Ass. Fr. Et. Quat.*, p. 43-49.
- HYDROBIOS I, 1980 .- *Microbiologie des eaux. Micropolluants des sédiments. Cartes et commentaires*. Institut Pasteur Lille.
- HYDROBIOS II, 1983 .- *Micropolluants des sédiments*. Institut Pasteur Lille (Mars 1983).
- INSTITUT PASTEUR LILLE, 1982 .- *Pollution chimique des moules et coques du littoral Nord de la France*. Cartes et Commentaires, 30 p., Annexes.
- INSTITUT PASTEUR LILLE, 1983 .- *Etude bactériologique I.P. de Gravelines. Micropolluants chimiques I.P. de Lille*. Contrat estuaires E.P.R./C.N.E.X.O.
- JELGERSMA S., 1961 .- Holocene sea level changes in the netherlands. *Meded. Geol. Sticht*, C, VI, 7, 100 p.
- JOANNY M., 1984 .- Pollution du sédiment en zone littorale : les travaux du Réseau National d'Observation et problèmes méthodologiques associés. *L'Hydraulique et la maîtrise du littoral. XVIII journées de l'Hydraulique*, Marseille, question n° 1, rapport n° 9.
- JOUANNEAU J.M., 1974 .- Etude sédimentologique d'un système côtier évolutif : la pointe de la Coubre (embouchure de la Gironde, France). *Thèse 3ème Cycle*, Bordeaux, 161 p., 85 fig.

- JOUANNEAU J.M., 1979 .- Diminution de carbone organique particulaire en zone fluvio-estuarienne. Le cas de la Gironde. *C.R. Acad. Sc.*, Paris, t. 288, série D, p. 360-378.
- JOUANNEAU J.M., 1982 .- Matières en suspension et oligo-éléments métalliques dans le système estuarien girondin : comportement et flux. *Thèse d'Etat*, Bordeaux, 150 p.
- KALINOWSKY E., 1983 .- Les substances humiques dans les sédiments de l'estuaire de la Canche. *D.E.A.*, Lille, texte ronéo, 47 p.
- KRONE R.B., 1978 .- Aggregation of suspended particles in estuaries. In "*Estuarine transport processes*", B. Kjerfve Ed., Univ. South Carolina Press, Columbia, p. 177-190.
- LAPAQUELLERIE Y., 1975 .- Application de la spectrométrie de fluorescence X en géologie marine. *Thèse Université*, Bordeaux, n° 96, 98 p., 51 fig., 24 tabl.
- LARSONNEUR C., 1971 .- Manche centrale et baie de Seine. Géologie du substratum et des dépôts meubles. *Thèse d'Etat*, Caen, 394 p., 26 pl., 1 carte hors texte.
- LARSONNEUR C., BOUYASSE P., AUFFRET J.P., 1982 .- The superficial sediments of the English Channel and its western approaches. *Sedimentology*, 29, p. 851-864.
- LAURENT P., 1958 .- *Rapport sur la détermination d'un point de cessation de salure des eaux dans l'estuaire de la Canche*, 11 p.
- LE DOUAREC P., 1978 .- L'intrusion saline dans l'estuaire interne de la Loire. Etude du front de salinité et de ses variations saisonnières. *Thèse 3ème Cycle*, Nantes, 197 p., 102 fig.
- LEFEVRE P., 1972 .- Sur quelques particularités granulométriques et chimiques des sédiments postflandrien et actuel de la plaine maritime picarde. *Etude sur le quaternaire dans le Monde*, 8ème congrès I.N.Q.U.A., Paris, p. 715-721.
- LE FLOCH J., 1961 .- Propagation de la marée dans l'estuaire de la Seine et en Seine maritime. *Thèse d'Etat*, Paris, 507 p.
- LE FOURNIER J., 1974 .- La sédimentation Holocène en bordure du littoral picard et sa signification dynamique. *Bull. Centre Rech. Pau S.N.P.A.*, 8, 1, p. 327-349, 7 fig.
- LE FOURNIER J., 1980 .- Modern analogue of transgressive sand bodies off eastern English Channel. *Bull. Cent. Rech. Explor. Prod. Elf Auitaine*, 4, 1, p. 99-118, 10 fig.
- LEROY J., 1979 .- *Quand Montreuil était sur mer : Quentovic*. Coll. Lephay, 320 p.
- LEROY Ph., 1981 .- Contribution à l'étude de la sédimentation argileuse sur les marges de l'océan atlantique nord depuis le jurassique supérieur. *Thèse 3ème Cycle*, Lille, 134 p.
- LUCAS J., 1962 .- La transformation des minéraux argileux dans la sédimentation. Etude sur le Trias. *Mém. Serv. Carte géol. Als.-Lorr.*, 23, 202 p.
- MANIA J., 1980 .- Simulation des débits superficiels et des niveaux piézométriques dans le bassin crayeux de la Canche (Pas-de-Calais). *Cahiers de géographie physique*, n° 4, travaux de l'institut de géographie, Lille, p. 11-22.
- MARCE A., PUTALLAZ J., 1968 .- *Baie de la Canche - Surveillance géologique des sondages*. Rapport 68 SGL 94 BGA du B.R.G.M.
- MARIETTE H., 1971 .- Archéologie des dépôts flandriens du Boulonnais. *Quaternaria*, XIV, p. 137-150, 8 fig.
- MARTIN J.M., 1971 .- Contribution à l'étude des apports terrigènes d'oligo-éléments stables et radioactifs à l'océan. *Thèse d'Etat*, Paris, 155 p.
- MARTIN J.M., MEYBECK M., SALVADORI F., THOMAS A., 1976 .- Pollution chimique des estuaires : état actuel des connaissances. *Rapport scient. et techn. C.N.E.X.O.*, Brest, 22, p. 51-120.
- MASIRONI R., 1978 .- The health importance of trace element in water. *La Tribune du Cebedeau*, n° 419, p. 363-367.
- MAUPAS A., 1977 .- *Courants de marée (13 cartes heure par heure)*. Editions cartographiques maritimes.
- MIGNIOT C., 1968 .- Etudes des propriétés physiques de différents sédiments très fins et de leur comportement sous des actions hydrodynamiques. *La Houille Blanche*, n° 7, p. 591-620.

- MIGNIOT C., 1977 .- Action des courants, de la houle et du vent sur les sédiments. *La Houille Blanche*, 1, p. 9-47.
- MIGNIOT C., 1980 .- Dynamique sédimentaire estuarienne : matériaux cohésifs et non cohésifs. *Oceanis*, vol. 6, fasc. 4 (1980-81), p. 359-432.
- MONTAIGNE M., 1973 .- La plaine maritime picarde et sa bordure dans la région de la Canche. *Cah. Géogr. Phys.*, Lille, n° 1, p. 65-74, 4 fig.
- MORZADEC-KERFOURN M.T., DELIBRIAS G., 1972 .- Analyses polliniques et datations radiocarbone des sédiments quaternaires prélevés en Manche centrale et orientale. *Mem. Bur. Rech. Géol. Min.*, 79, p. 160-165.
- MOULINIER M., 1967 .- Répartition des foraminifères benthiques dans les sédiments de la baie de Seine entre le Cotentin et le méridien de Ouistreham. *Cahiers Océanographiques*, XIX, p. 477-494.
- MUNAUT A.V., GILOT E., 1977 .- Recherches palynologiques et datations ^{14}C dans les régions côtières du nord de la France : Phases transgressives et stabilisations dunaires flandriennes dans l'estuaire de la Canche (Pas de Calais). *Bull. Ass. Fr. Et. Quat.*, n° 52, p. 17-25.
- ORANGE J., 1983 .- Hydrobiologie et répartition de la faune dans l'estuaire de la Canche. *D.E.A. Biologie et Physiologie animale*, Lille, texte ronéo, 42 p.
- PARFENOFF A., POMEROL C., TOURENQ J., 1970 .- *Les minéraux en grains. Méthodes d'étude et détermination*, Masson et Cie, 578 p.
- PASSEGA R., 1957 .- Texture are characteristic of clastic deposition. *Am. Assoc. Petroleum Geol. Bull.*, Tulsa Okla, vol. 41, p. 1952-1984.
- PAVAGEAU C., 1983 .- *Rapport littoral (DDE-DEC)*, Revue de l'E.N.R. (Espace Naturel Régional).
- PETERSON J.C., FREEMAN D.H., 1982 .- Phtalate Ester Concentration Variations in Dated Sediment cores from the Chesapeake Bay. *Environ. Sci. Technol.*, vol. 16, n° 8, p. 464-469.
- POMEROL C., 1977 .- Dynamique comparée de trois bassins épicontinentaux : Mer du Nord, Manche et Bassin de Paris. *Bull. Centre Rech. Pau S.N.P.A.*, vol 1, n° 1, p. 233-256, 10 fig.
- POSTMA H., 1967 .- Sediment transport and sedimentation in the estuarine environment. *in Estuaries*, G.H. Lauff edit., Washington, Am. Assoc. Advanc. Sc., publ. 83, p. 158-179, 21 fig.
- PRITCHARD D.W., 1955 .- Estuarine circulation patterns. *Proc. Am. Soc. Civil Eng.*, New York, vol. 81, p. 717/1-717/11, 4 fig.
- PRITCHARD D.W., 1967 .- What is an estuary : physical viewpoint. *Estuaries*, G.H. Lauff Ed., Am. Assoc. Advanc. Sc., Washington, publ. 83, p.3-5.
- PUGH D.C., 1953 .- Etude minéralogique des plages picardes et flamandes. *Bull. du C.O.E.C.*, p. 245.
- RICOUR J., 1974 .- Compte-rendu de la reconnaissance géologique et de la surveillance hydrogéologique des bas-champs (rive gauche). *Rapport n° 74 SGN. 258 NPA (B.R.G.M.)*.
- RIVIERE A., 1977 .- *Méthodes granulométriques. Techniques et interprétations*. Masson, Paris, 164 p., 12 fig., 17 tabl.
- ROBBE D., 1984 .- *Interprétation des teneurs en éléments métalliques associés aux sédiments*, Rapport des laboratoires, série : environnement et génie urbain EG-1, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- ROBERT J.P., 1969 .- Géologie du plateau continental français. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, p. 383- 440.
- ROBINE P., 1962 .- Evolution morphologique d'une région située entre la Bresle et le nord du bassin de la Canche. (Etude photogéologique). *Thèse d'Etat*, Paris, 132 p.
- ROSE A.J., 1970 .- *Tables et abaques. Radiocristallographie*. C.N.R.S., 142 p.
- SALOMON J.C., ALLEN G.P., 1983 .- Rôle de la marée dans les estuaires à fort marnage. *Notes et mémoire n° 18, TOTAL*, Paris, p. 35-44.
- S.H.O.M. (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine), 1968 .- *Courants de marée dans la Manche et sur les côtes françaises de l'Atlantique*, S.H. n° 550, Imprimerie Nationale, Paris, 287 p.

- SHEPARD F.P., 1964 .- Criteria in modern sediments useful in recognizing ancient sediment environment. *L.M.J.U. Van Straaten (edit.)*, *Deltaic and shallow marine deposits*. Elsevier, publisher, Amsterdam, p. 1-23.
- SIMMONS H.B., 1955 .- Some effects of upland discharge on estuarine hydraulics. *Proc. Am. Soc. Civ. Engin.*, 81, p. 1-20.
- SOMME J., 1977 .- Les plaines du Nord de la France et leur bordure : étude géomorphologique. *Thèse d'Etat*, tome 1 et 2, 810 p.
- TERS M., 1973 .- Les variations du niveau marin depuis 10 000 ans le long du littoral atlantique français. *IXème Congrès I.N.Q.U.A.*, Paris, Le Quaternaire, p. 114-135.
- TERS M., 1976 .- Les lignes de rivage Holocène, le long de la côte atlantique française. *La Préhistoire Française*, IXème Congrès de l'U.I.S.P.P., Nice, édit. C.N.R.S., tome 2, p. 27-30, 1 fig.
- THOREZ J., 1975 .- *Phyllosilicates and clays minerals*. Editions G. Lelotte, 579 p.
- TRICART J., 1951 .- L'évolution morphologique du littoral des bas champs picards. *Rev. de Géomorphologie dynamique*, t. 2, p. 49-65.
- VATAN A., 1967 .- *Manuel de sédimentologie*, Edit. Technip., Paris, 397 p.
- VERDEVOYE P., PELLETIER J.L., 1980 .- *Etude qualitative des eaux : la Canche*. Ministère de l'Agriculture. Service Régional de l'Aménagement des Eaux. Comité d'aménagement rural de la Canche et de l'Authie.
- VERGER F., 1968 .- *Marais et wadden du littoral français*, Bordeaux, Biscaye Frères, 541 p.
- WAGNER C.W., 1957 .- Sur les ostracodes du quaternaire récent des Pays-Bas et leur utilisation dans l'étude géologique des dépôts holocènes. *Mouton et Co.*, S. Gravenhage.
- WEZERNAK C.T., POLCYN F.C., 1975 .- Remote optical sensing techniques, *K.H. Mancy (Ed)*, Instrumental analysis for water pollution control, 4ème édition, *Ann. Arbor. Science Publisher, Inc.*, p. 165-224.
- WOLFE D.A., RICE T.R., 1972 .- Cycling of elements on estuaries. *Tishery Bulletin*, vol. 70, n° 3, p. 959-972.
- YASSINI I., 1969 .- Ecologie des associations d'ostracodes du bassin d'Arcachon et du littoral atlantique, application à l'interprétation de quelques populations du Tertiaire Aquitain. *Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquit.*, Bordeaux, n° 7, 288 p., 39 pl.

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES

	page
Figure 1 : Situation géographique.....	3
Figure 2 : Cadre géographique de la basse Canche.....	4
Figure 3 : Cadre géologique de la basse Canche.....	5
Figure 4 : Répartition des diverses générations de dunes.....	6
Figure 5 : Embouchure de la Canche vue du large.....	7
Figure 6 : Variations probables du niveau marin pendant l'Holocène	9
Figure 7 : Schéma morphologique du littoral Pas de Calais.....	10
Figure 8 : Paléolignes de rivages au cours de l'Holocène	11
Figure 9 : Phases transgressives et régressives à l'Holocène	13
Figure 10 : Influence relative de la formation et de la dislocation d'un cordon littoral sur les séquences sédimentaires en Picardie.	15
Figure 11 : Evolution des séquences sédimentaires dans la basse vallée de la Canche au cours de l'holocène.....	17
Figure 12 : Ligne de rivage au Flandrien inférieur.....	19
Figure 13 : Carte du XVII ^e siècle.....	20
Figure 14 : Carte du XVIII ^e siècle.....	20
Figure 15 : Variation du trait de côte (1758-1878).....	21
Figure 16 : Variation du trait de côte (1878-1935).....	22
Figure 17 : Variation du trait de côte (1935-1981).....	23
Figure 18 : Localisation des sondages à la tarière.....	27
Figure 19 : Localisation des stations de l'étude sédimentologique.....	29
Figure 20 : Distribution des différents lithofaciès.....	31
Figure 21 : Exemple de courbes granulométriques.....	32
Figure 22 : Distribution des particules supérieures à 63 µm	33
Figure 23 : Minéraux lourds.....	37
Figure 24 : Répartition des articles de <i>Cellaria</i> dans les sédiments de la Manche occidentale.....	41
Figure 25 : Distribution des particules inférieures à 63 µm	44
Figure 26 : Distribution des minéraux argileux.....	45
Figure 27 : Rapport Smectite/Illite.....	46
Figure 28 : Distribution des modes.....	47
Figure 29 : Distribution du grain moyen.....	49
Figure 30 : Distribution des carbonates.....	51
Figure 31 : Répartition du carbone organique.....	53
Figure 32 : Profils lithologiques d'après les sondages à la tarière.....	54
Figure 33 : Légende des figures sur les sondages.....	55

Figure 34	: Diffractogramme type de la fraction argileuse correspondant aux sédiments des sondages à la tarière	55
Figure 35	: Sondage 4	57
Figure 36	: Sondage 8	57
Figure 37	: Sondage 13	59
Figure 38	: Sondage 12	59
Figure 39	: Sondage 30	61
Figure 40	: Sondage 28	61
Figure 41	: Modification de l'onde de marée dans les zones côtières	67
Figure 42	: Modification de l'amplitude de la marée selon la valeur du rapport entre les effets de la convergence et du frottement.	67
Figure 43	: Schéma de la circulation estuarienne	69
Figure 44	: Stations des cycles de marées	70
Figure 45	: Fréquence des directions des vents au Touquet (1981-1982-1983)	75
Figure 46	: Amplitude des houles au bateau-feu de Bassurelle	76
Figure 47	: Provenance de la houle observée au bateau-feu de Bassurelle (1982-1983)	77
Figure 48	: Provenance de la houle observée au Touquet	78
Figure 49	: Bassin de la Canche	79
Figure 50	: Débits observés à Brimeux	80
Figure 51	: Evolution de la salinité et des vitesses de courant (Pilori)	81
Figure 52	: Evolution de la salinité et des vitesses de courant (Hippodrome)	83
Figure 53	: Evolution de la salinité et des vitesses de courant (Etaples)	85
Figure 54	: Evolution longitudinale de la salinité au cours d'un cycle de marée de vive-eau	87
Figure 55	: Evolution longitudinale de la salinité au cours d'un cycle de marée de morte-eau	87
Figure 56	: Salinités minimales et maximales observées en surface et fond aux points fixes	89
Figure 57	: Evolution des températures devant un cycle de marée de vive-eau (mars 1984)	90
Figure 58	: Evolution des températures devant un cycle de marée de vive-eau (septembre 1983)	90
Figure 59	: Répartition longitudinale de la température	91
Figure 60	: Evolution des températures au cours d'une année (1982)	91
Figure 61	: Courbes marégraphiques (Pilori, Hippodrome)	94
Figure 62	: Courbes marégraphiques (Etaples, Haudique, Enocq, Attin) ...	95
Figure 63	: Variation des amplitudes de marée le long de la côte (d'après VERGER, 1968)	96

Figure 64	: Variation longitudinale dans l'estuaire de l'amplitude de marée	98
Figure 65	: Vitesses de courants à l'embouchure (dans BONNEFILLE ET ALLEN, 1970)	99
Figure 66	: Vitesses de courants dans l'estuaire aval (Pilori)	100
Figure 67	: Vitesses de courants dans l'estuaire aval (Hippodrome)	100
Figure 68	: Vitesses de courants dans l'estuaire médian (Etaples)	101
Figure 69	: Variations des vitesses de courants et de hauteur d'eau (Etaples)	102
Figure 70	: Variations des vitesses de courants en morte-eau (Etaples) .	103
Figure 71	: Calcul des vitesses résiduelles (d'après ALLEN, 1972)	104
Figure 72	: Dunes hydrauliques à l'embouchure (mai 1982)	106
Figure 73	: Courbe de PASSEGA	111
Figure 74	: Mode de transport	111
Figure 75	: Vitesse V de début d'entraînement du sable de diamètre D (d'après BONNEFILLE, 1963)	110
Figure 76A	: Variation des M.E.S. en fonction des vitesses de courant (Pilori)	115
Figure 76B	: Variation des M.E.S. en fonction des vitesses de courant (Hippodrome)	115
Figure 76C	: Variation des M.E.S. en fonction des vitesses de courant (Etaples)	117
Figure 77A	: Variation des M.E.S. en points fixes (8 Septembre 1983)	118
Figure 77B	: Variation des M.E.S. en points fixes (19 Mars 1984)	118
Figure 78A	: Relation entre M.E.S. et turbidité au cours d'une marée de vive-eau (Pilori)	119
Figure 78B	: Relation entre M.E.S. et turbidité au cours d'une marée de vive-eau (Hippodrome)	120
Figure 78C	: Relation entre M.E.S. et turbidité au cours d'une marée de vive-eau (Etaples)	121
Figure 79	: Variations des M.E.S. en points fixes au cours d'une marée de morte-eau	122
Figure 80A	: Relation entre M.E.S. et turbidité au cours d'une marée de morte-eau (Pilori)	124
Figure 80B	: Relation entre M.E.S. et turbidité au cours d'une marée de morte-eau (Hippodrome)	125
Figure 80C	: Relation entre M.E.S. et turbidité au cours d'une marée de morte-eau (Etaples)	125
Figure 81AB	: Evolution longitudinale des suspensions au cours d'un cycle de marée de vive-eau	126
Figure 82A,B	: Evolution longitudinale des suspensions au cours d'un cycle de marée de morte-eau	127

Figure 83	: Détermination des minéraux en suspensions brutes par diffraction X	130
Figure 84A	: Evolution longitudinale de quelques minéraux au cours d'un cycle de marée de vive-eau (flot)	131
Figure 84B	: Evolution longitudinale de quelques minéraux au cours d'un cycle de marée de vive-eau (jusant)	132
Figure 85A	: Evolution longitudinale de quelques minéraux au cours d'un cycle de marée de morte-eau (flot)	133
Figure 85B	: Evolution longitudinale de quelques minéraux au cours d'un cycle de marée de morte-eau (jusant)	133
Figure 86	: Localisation des stations en mer	135
Figure 87	: Variations du quartz et de la calcite au large durant une marée	136
Figure 88	: Diffractogramme type de la fraction argileuse en suspension (station3-PM+4)	137
Figure 89	: Diffractogramme de la fraction argileuse en suspension à différents moments de la marée	139
Figure 90	: Evolution longitudinale des minéraux argileux dans les suspensions, au cours d'une marée de vive-eau	141
Figure 91	: Evolution des différents rapports au cours d'une marée de vive-eau	143
Figure 92	: Localisation des prélèvements pour l'étude géochimique	146
Figure 93	: Evolution longitudinale des métaux au cours d'une marée de vive-eau	151
Figure 94	: Evolution longitudinale des métaux au cours d'une marée de morte-eau	153
Figure 95	: Evolution des concentrations métalliques par station, en fonction des salinités au cours d'une marée de vive-eau ...	155
Figure 96	: Evolution des concentrations métalliques par station, en fonction des salinités au cours d'une marée de morte-eau ..	156
Figure 97	: Evolution longitudinale des différents métaux dans les sédiments	157
Figure 98	: Evolution verticale des concentrations métalliques (d'après OUDART)	159
Figure 99	: Situation des points de l'Institut Pasteur de Lille	161
Figure I	: Exemple de courbe de fréquences cumulées	Annexe I
Figure II	: Direction des vents au bateau-feu de Bassurelle (1982-1983)	Annexe V
Figure III	: Direction des vents au Touquet Paris-Plage (1981-1982-1983)	Annexe V
Figure IV	: Provenance de la houle au bateau-feu de Bassurelle (1982-1983)	Annexe V

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	: Corrélations entre les différentes divisions stratigraphiques ..	8
Tableau 2	: Répartition des constituants de la fraction sableuse	35
Tableau 3	: Distribution morphoscopique des quartz appartenant à la fraction granulométrique 250-600 μm	36
Tableau 4	: Composition de la macrofaune à Attin	39
Tableau 5	: Diagramme de fréquence relative des espèces d'ostracodes	43
Tableau 6	: Dates et caractéristiques hydrodynamiques	71
Tableau 7	: Températures et salinités relatives au Cap Gris Nez	73
Tableau 8	: Répartition des vents en Manche	74
Tableau 9	: Répartition des vents au Touquet	75
Tableau 10	: Caractéristiques des affluents de la Canche (d'après BAQUET) ...	78
Tableau 11	: Données des missions de 1958	84
Tableau 12	: Hauteurs maxima de quelques marées relevées à Boulogne et St Gabriel (dans B.R.G.M., 1971)	97
Tableau 13	: Amplitude de la marée dans l'estuaire pour divers coefficients .	98
Tableau 14	: Données minéralogiques moyennes à différentes marées dans les suspensions de la Canche	138
Tableau 15	: Eléments métalliques ayant une importance biologique (WOLF et RICE, 1972)	145
Tableau 16	: Contenu du corps humain et doses journalières nécessaires en éléments traces pour un adulte (en mg) simplifié (d'après MASIRONI, 1977)	145
Tableau 17	: Teneur moyenne des métaux particuliers en $\mu\text{g/g}$, au cours des différentes marées	147
Tableau 18	: Teneur moyenne des métaux particuliers en $\mu\text{g/g}$, en surface et aux différentes stations	147
Tableau 19	: Concentrations moyennes en métaux totaux à la station amont et dans les différents émissaires en rive droite de l'estuaire médian	150
Tableau 20	: Coefficients de variation (%)	158
Tableau 21	: Concentrations métalliques moyennes des sondages (mg/kg)	160
Tableau 22	: Plages de variation des métaux dans le sédiment marin côtier ...	160
Tableau 23	: Concentrations en métaux dans la fraction fine des sédiments superficiels (Septembre-Octobre 1981)	160
Tableau 24	: Concentrations en métaux dans la fraction fine des sédiments superficiels (Juin 1983) (dans R.N.O., à paraître)	161
Tableau 25	: Eventail de variation des teneurs en métaux du littoral français dans JOANNY (1984)	163

Tableau I	Appareils utilisés	Annexe I
Tableau II	Correspondance d'unités granulométriques	Annexe I
Tableau III	Paramètres utilisés en diffraction X	Annexe I
Tableau IV	Paramètres utilisés en diffraction X pour une poudre désorientée	Annexe I
Tableau V	Dosage des différents métaux sous forme dissoute et particulaire	Annexe I
Tableau VI	Données sédimentologiques des prélèvements superficiels	Annexe IV
Tableau VII	Données sédimentologiques des prélèvements des sondages à la tarière	Annexe IV
Tableau VIII	Données géochimiques des prélèvements des sondages à la tarière	Annexe IV
Tableau IX	Données géochimiques des prélèvements d'au effectués au cours de différents marées	Annexe IV

TABLE DES MATIERES

AVANT PROPOS.

INTRODUCTION 1

PARTIE I : EVOLUTION MORPHOLOGIQUE ET SEDIMENTS

CHAPITRE I : GEOLOGIE ET EVOLUTION MORPHOLOGIQUE 3

I CADRE GENERAL 3

I.1. CADRE GEOGRAPHIQUE 3

I.2. CADRE GEOLOGIQUE 4

I.2.1. Formations géologiques 4

I.2.2. Cadre structural 6

I.3. MORPHOLOGIE

I.3.1. Organisation du réseau hydrographique 6

I.3.2. Morphologie actuelle de l'estuaire 6

II HISTOIRE HOLOCENE DE LA REGION 7

II.1. GENERALITES 7

II.1.1. Variation du niveau marin 7

II.1.2. Fluctuations climatiques 11

II.1.3. Approche sédimentologique 13

a/ Evolution du littoral d'après la dynamique sédimentaire .. 13

b/ Evolution paléogéographique de la basse vallée de la Canche 16

II.2. EVOLUTION MORPHOLOGIQUE DE L ESTUAIRE 18

II.2.1. Rivages anciens 18

II.2.2. Rivages actuels 19

II.2.3. Conclusion 24

III CONCLUSION

CHAPITRE II : NATURE ET REPARTITION DES SEDIMENTS 27

I NATURE ET REPARTITION DES SEDIMENTS SUPERFICIELS 28

I.1. DISTRIBUTION DES FACIES 28

I.1.1. Faciès sableux 28

I.1.2. Faciès des sables et vases 28

I.1.3. Faciès de slikke 30

I.1.4. Faciès de schorre	30
I.1.5. Faciès de sables humifères et de tourbes	30
I.1.6. Conclusion	32
I.2. FRACTION SABLEUSE	32
I.2.1. Distribution d'ensemble	32
I.2.2. Nature de la fraction sableuse	34
I.2.3. Morphoscopie des quartz	34
I.2.4. Etude des minéraux lourds	36
I.2.5. Etude de la faune	38
I.2.5.1. Macrofaunes	38
I.2.5.2. Foraminifères	38
I.2.5.3. Bryozoaires	40
I.2.5.4. Ostracodes	40
I.3. FRACTION FINE	42
I.3.1. Répartition	42
I.3.2. Distribution des minéraux argileux	42
I.4. CARACTERISTIQUES DES SEDIMENTS	46
I.4.1. Mode	46
I.4.2. Grain moyen	48
I.4.3. Carbonates de calcium	48
I.4.4. Carbonate organique	50
II EVOLUTION RECENTE DE LA SEDIMENTATION	52
II.1. CARACTERISTIQUES DES SEDIMENTS	52
II.2. VARIATIONS DANS L ESTUAIRE	56
III CONCLUSION	
CONCLUSION DE LA PARTIE I	63
PARTIE II : PROCESSUS HYDROLOGIQUES	
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES PROCESSUS HYDROLOGIQUES	65
I ACTION DE LA MAREE	65
I.1. MODIFICATION DE L ONDE DE MAREE	65
I.2. EFFET SUR L HYDROLOGIE ESTUARIEENNE	66
I.2.1. Effet sur les courants	66
I.2.2. Effet sur le mélange des eaux douces et salées	66
II METHODES D ETUDES	
CHAPITRE II : PARAMETRES HYDROLOGIQUES	73
I CARACTERISTIQUES DES EAUX DE LA MANCHE	73

I.1. SALINITE ET TEMPERATURE	73
I.1.1. Eté	73
I.2.2. Hiver	73
I.2. LES VENTS	74
Régime des vents en Manche	74
Régime des vents au Touquet	74
I.3. LA HOULE	77
I.3.1. Au bateau feu de Bassurelle	77
I.3.2. Au Touquet	77
II PARAMETRES HYDROLOGIQUES DE LA CANCHE	78
II.1. CARACTERISTIQUES DU BASSIN VERSANT	78
II.2. DEBIT DU FLEUVE	79
III CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES DE L ESTUAIRE	80
III.1. INTRUSION SALINE	80
III.1.1. Evolution longitudinale de la salinité	81
III.1.1.1. Mesures effectuées à points fixes	81
III.1.1.2. Comparaison entre salinité et vitesse de courant au cours d'un cycle de marée de vive-eau	82
III.1.2. Regroupement des résultats et interprétation quantitative.	82
III.1.2.1. Gradient longitudinal des salinités	82
III.1.2.2. Evolution de la salinité depuis une vingtaine d'années	84
III.1.2.3. Salinités minimale et maximale dans l'estuaire	86
III.1.2.4. Limite amont-aval du front de salinité	86
III.2. TEMPERATURES	88
III.2.1. Opposition des régimes été-hiver	88
III.2.2. Stratification thermique	88
CHAPITRE III : LA MAREE ET LES COURANTS DE MAREE	93
I CARACTERISTIQUE DE LA MAREE	93
I.1. PROPAGATION DE L ONDE DE MAREE	93
I.1.1. En Manche Orientale	93
I.1.2. Devant l'estuaire	93
I.2. DEFORMATION DE L ONDE DE MAREE	93
I.3. LE MARNAGE	96
I.3.1. Caractéristiques générales	96
- En Manche Orientale	96
- Au large de l'embouchure	97
- A l'embouchure	97
- Dans l'estuaire	97

II COURANTS DE MAREE	97
II.1. COURANTS DE MAREE EN MANCHE	97
II.2. COURANTS DE MAREE DANS L ESTUAIRE	98
II.2.1. Répartition des vitesses de courants au large de l'estuaire	98
II.2.2. Répartition des vitesses de courants dans l'estuaire	99
II.2.2.1. Courants de marée de vive-eau	99
II.2.2.2. Courants de marée de morte-eau	103
II.2.3. Circulation résiduelle dans l'estuaire en marée de vive-eau	103
II.2.3.1. Définition et mode de calcul	103
II.2.3.2. Résultats	103
III CONCLUSIONS.....	104
CONCLUSION DE LA PARTIE II	106

PARTIE III : DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE DANS L'ESTUAIRE
--

CHAPITRE I : GENERALITES	109
I MODE DE TRANSPORT	109
II AGENTS DE TRANSPORT	110
CHAPITRE II : DYNAMIQUE DES SEDIMENTS EN SUSPENSION	113
I DEFINITIONS DE LA TURBIDITE ET DES MATIERES EN SUSPENSION	113
II CAUSES POSSIBLES DE LA TURBIDITE DES EAUX	113
II.1. VITESSE DES COURANTS	113
II.2. PROCESSUS PHYSICO-CHIMIQUES	113
II.2.1. Rôle de la température	114
II.2.2. Rôle de la salinité	114
III EVOLUTION DES MATIERES EN SUSPENSION AU COURS D'UNE MAREE ...	114
III.1. Variations de la teneur des matières en suspension en fonction des vitesses de courant	114
III.2. Variations de la teneur en matières en suspension et de la turbidité en point fixe	116
III.2.1. En vive-eau	116
III.2.2. En morte-eau	123
III.3. Evolution longitudinale des concentrations en matières en suspension au fond et en surface au cours d'un cycle de marée ..	123
III.3.1. En période de vive-eau	123
III.3.2. En période de morte-eau	125

III.4. Conclusions	128
CHAPITRE III : ETUDE DES MINERAUX EN SUSPENSION	129
I ASSEMBLAGE MINERALOGIQUE TOTAL	129
I.1. Feldspaths	129
I.1.1. En vive-eau	129
I.1.2. En morte-eau	131
I.2. Quartz et calcite	132
I.2.1. En vive-eau	132
I.2.2. En morte-eau	134
I.3. Variations des pourcentages de quartz et de calcite devant l'embouchure de la Canche	134
II MINERAUX ARGILEUX	137
II.1. Minéraux argileux présents dans les suspensions	137
II.2. Evolution longitudinale du cortège argileux durant une marée de vive-eau	138
II.3. Abondance relative des divers minéraux	140
II.4. Conclusions	140
CHAPITRE IV : GEOCHIMIE	145
I GENERALITES	145
I.1. Notions préliminaires	145
I.2. Forme spécifique des éléments	146
I.3. Méthodologie	146
II REPARTITION DES ELEMENTS METALLIQUES DANS LES MATIERES EN SUSPENSION	147
II.1. Abondance moyenne des métaux d'amont en aval	147
II.2. Bilan général	149
II.3. Evolution longitudinale des métaux au cours d'une marée	150
Conclusions	152
II.4. Distribution des métaux dissous en fonction de la salinité	154
III REPARTITION DES ELEMENTS METALLIQUES DANS LES SUSPENSIONS ...	154
III.1. Sédiments superficiels de la Basse Canche	154

III.2. Comparaison avec des dépôts plus anciens	158
III.3. Conclusion	160
CONCLUSION DE LA PARTIE III	162
CONCLUSIONS GENERALES	165
BIBLIOGRAPHIE	169
LISTE DES FIGURES	177
LISTE DES TABLEAUX	181
TABLE DES MATIERES	183
ANNEXES	

ANNEXES

- ANNEXE I -

METHODOLOGIE

I - SUR LE TERRAIN

I.1 - PRELEVEMENTS

L'échantillonnage des sédiments superficiels immergés a été effectué sur une épaisseur de moins de 10 cm à l'aide d'une benne légère de type Ekman ; en domaine intertidal il a été pratiqué à la main.

L'étude verticale des mollières repose sur des sondages à la tarière. Le matériel Eijelkamp regroupe un jeu de tarières dont les différents accessoires ont été utilisés en fonction des caractéristiques du sol (argileux, sableux ou graveleux). Sous la nappe phréatique, nous avons utilisé une tarière aspirante, une tarière gouge, et une sonde en acier inoxydable permettant de se procurer de courtes carottes.

Les prélèvements d'eau pour les analyses hydrologiques ont été faits avec des bouteilles de 5 litres de type NISKIN et VAN DORN.

I.2 - MESURES

Elles ont été mises en oeuvre, *in situ*, à l'aide d'un certain nombre d'appareils, dont les principaux sont rassemblés dans le tableau ci-dessous :

MESURE	:	TYPE	:	OBSERVATIONS
Courantométrie	:	moulinet OTT type V marque A KENIEN	:	donne une valeur instantanée de la vitesse
Température	:	thermomètre au 1/10ème de degré	:	
	:	S. C. T. mètre YSI	:	
Salinité	:	S. C. T. mètre YSI	:	
Conductivité	:	conductimètre SCHOOT CG 857	:	
	:	résistivimètre de terrain	:	conception Institut Pasteur
Turbidimétrie	:	turbidimètre de terrain	:	de Lille
	:		:	

Tableau I : Appareils utilisés.

II - AU LABORATOIRE

II.1 - ANALYSES REALISEES SUR LES SEDIMENTS

Les analyses granulométriques sont développées dans VATAN (1967), BERTHOIS (1975).

Les échantillons ramenés au laboratoire ont été séchés dans une étuve à 40° C,

puis soumis à une analyse granulométrique sur sédiment naturel non décarbonaté.

II.1.1 - Granulométrie

+ Techniques granulométriques

Les échantillons ont été lavés sous l'eau sur un tamis de 63 μm , dans le but de séparer la fraction fine de la fraction sableuse. Puis chaque fraction a été séchée.

. Granulométrie des fractions sableuses : les analyses de la fraction sableuse ont été effectuées par tamisage des particules à 63 μm sur une colonne vibrante munie de tamis de type AFNOR. Les mailles de la série de tamis sont comprises entre 1 250 μm et 63 μm .

. Etude des sédiments < à 63 μm : elle est réalisée par l'emploi d'un Sédigraph 5 000 D. Il s'agit d'un analyseur automatique de dimensions des particules pour des tailles de 100 à 0,1 μm , par mesure du taux de sédimentation des grains en suspension. Cet appareil mesure en continu, par l'intermédiaire d'un mince faisceau de rayons X, la concentration des particules en suspension à un certain niveau au cours de la sédimentation. Les résultats sont automatiquement convertis en données granulométriques et présentés sous forme de courbes cumulatives semi-logarithmiques (CALATAYUD, 1981 ; CALINE, 1982).

+ Exploitation des données

Les résultats granulométriques sont représentés par des courbes cumulatives établies en coordonnées semi-logarithmiques. L'ordonnée correspond à la somme des quantités de sable refusées par le tamis ainsi que par celle des autres tamis qui le précèdent (BILLY, 1954). Chaque refus est traduit en pourcentage du poids total de l'échantillon. Les principaux paramètres statistiques étudiés (BERTHOIS, 1975 ; RIVIERE, 1977) sont relatifs à la totalité du sédiment et comprennent : le grain moyen, le mode, l'indice de classement et l'indice d'asymétrie.

. Grain moyen : prenant en compte la presque totalité du sédiment, il se trouve moins affecté par les erreurs d'échantillonnage que la médiane. Il est assimilé à la moyenne arithmétique de plusieurs données et correspond au quotient de leur somme par le nombre de ces données. Pour le calculer, on utilise les unités de représentation phi. Dans cette série chaque terme a comme dimension la moitié du terme précédent et le double du terme suivant. Les unités phi, les plus utilisées internationalement, furent choisies afin de faciliter les comparaisons avec des milieux identiques. Elles varient en sens inverse de l'échelle millimétrique.

Dimension des mailles en mm (norme AFNOR) échelle alpha	Unité phi correspondante (norme ASTM) échelle de Wentworth
4	- 2
2	- 1
1	0
0,5	+ 1
0,25	+ 2
0,125	+ 3
0,0625	+ 4
0,03125	+ 5
0,0156	+ 6
0,0078	+ 7

Tableau II : Correspondance d'unités granulométriques.

Pour éviter la trop grande influence des grains de gros diamètre ou de faible dimension, on ne prend en compte que la partie du sédiment comprise entre les déciles Q_{10} et Q_{90} . Le grain moyen calculé est donné par la relation :

$$M\psi = \frac{\psi_{10} + \psi_{30} + \psi_{50} + \psi_{70} + \psi_{90}}{5} \quad (\text{Mc CAMMON, 1962})$$

ψ_{10} , ψ_{30} , ψ_{50} , ψ_{70} , ψ_{90} sont les dimensions en unité phi et sont assimilés aux fréquences 10%, 30%, 50%, 70%, 90%. Elles sont lues sur l'abscisse à partir de la courbe granulométrique cumulative.

. Mode : il correspond au diamètre le plus fréquent des grains du sédiment. Celui-ci peut présenter plusieurs modes qui sont alors classés par leur importance décroissante.

. Indice de classement : il permet d'apprécier la dispersion de la distribution granulométrique. L'indice de Trask ou Sorting Index (S_o) se calcule par l'intermédiaire de deux limites fixes, symétriques par rapport à la médiane, et peut être pressenti selon l'étalement plus ou moins grand de la courbe de fréquence. Il correspond à la formule suivante :

$$S_o = \sqrt{\frac{Q_{25} \text{ mm}}{Q_{75} \text{ mm}}}$$

La valeur d'un fractile est donnée par la projection sur l'échelle des abscisses de l'intersection de la courbe cumulative avec l'horizontale représentant un pourcentage cumulatif déterminé en poids du sédiment considéré (BILLY, 1954 ; RIVIERE, 1977).

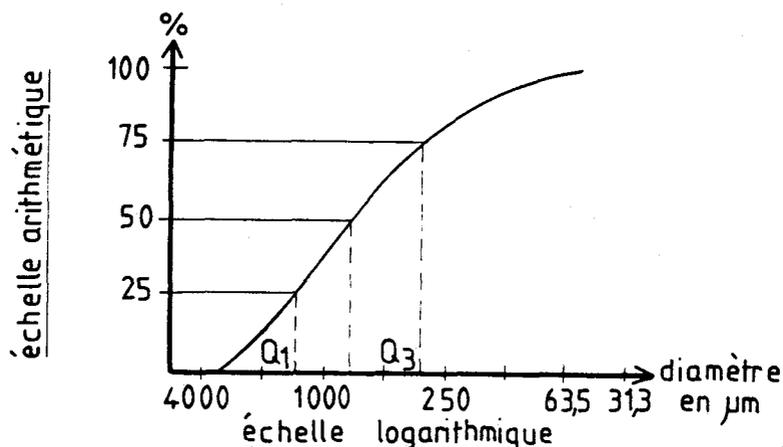


Figure 1 : Exemple de courbe de fréquences cumulées

Le premier quartile Q_{25} est le fractile dont la dimension des particules correspond à 25 % du poids du sédiment.

Le troisième quartile Q_{75} est le fractile dont la dimension des particules correspond à 75 % du poids du sédiment.

Pour un sable bien trié, la dispersion sera faible : les deux quartiles seront proches l'un de l'autre et la racine carrée de leur rapport tendra elle-même vers l'unité. Les valeurs du classement adoptées sont les suivantes (*in* CALINE, 1982) :

1	-----	1,17 très bien classé
1,17	-----	1,20 bien classé
1,20	-----	1,35 moyennement bien classé
1,35	-----	1,87 moyennement classé
1,87	-----	2,75 mal classé
		> 2,75 très mal classé

. Indice d'asymétrie (Skewness) : il permet de juger la normalité d'une distribution.

$$Sk = \frac{Q_{25} \cdot Q_{75}}{(Q_{50})^2}$$

Il est égal au quotient du produit des deux quartiles extrêmes par le carré du quartile médian. Il indique par son signe la déviation de la courbe étudiée par rapport à une courbe théorique de Gauss. Trois cas peuvent être observés :

Sk = 1 : le mode coïncide avec la médiane et la moyenne ; la distribution est dite normale.

Sk > 1 : le classement est maximal pour la fraction fine du sédiment, qui présente une fraction grossière relativement plus abondante.

Sk < 1 : la fraction fine est plus abondante que la fraction grossière, par rapport à la moyenne.

II.1.2 - Calcimétrie

Nous avons utilisé un calcimètre de Bernard. Le principe consiste à mesurer le volume de CO₂ dégagé au cours de l'attaque du calcaire par l'acide chlorhydrique dilué à 2 N. Le carbonate de calcium pur tient lieu de référence. Une fraction de sédiment est broyée en une poudre dont on en prend 0,250 g. Les valeurs obtenues sont corrigées en fonction de la température et de la pression régnant au moment du dosage.

II.1.3 - Préparation des minéraux lourds

Cette étude porte sur 4 échantillons scindés eux-mêmes en 2 fractions granulométriques de 63 µm à 160 µm et de 160 µm à 500 µm.

La fraction arénitique est pesée puis les minéraux lourds de cette fraction sont séparés par densité dans une liqueur de bromoforme. Les fractions légères et lourdes sont récupérées séparément selon une technique exposée par BERTHOIS (1975) le montage des minéraux lourds entre lame et lamelle a été effectué suivant la méthode énoncée par CHAMLEY (1966). Leur examen en frottis a été fait à l'aide du manuel de PARFENOFF *et al.* (1970).

II.1.4 - Dosage du carbone organique

Le dosage par pyrolyse est réalisé à l'aide d'un doseur de type Babrock et Wilcox. Cette technique a été décrite en détail par BOUEDINA (1978). L'échantillon est calciné sous courant d'oxygène pur dans un tube à induction. Les gaz de combustion débarrassés de la vapeur d'eau et du dioxyde de soufre, barbotent dans une solution non aqueuse (solution d'absorption) contenant une amine qui retient

le CO₂. L'acidité engendrée par ce dernier est neutralisée par une solution titrée d'hydroxyde de tetra-n buthylammonium, en solution benzénique, en présence de thymophtaléine comme indicateur de fin de titrage.

II.1.5 - Minéralogie des argiles par diffraction des rayons X

L'étude de la fraction argileuse < à 2 µm, a été réalisée sur pâtes orientées dont la technique de préparation a été exposée en détail par HOLTZAPFFEL (1981), ainsi que sur agrégats orientés (CHAMLEY, 1966) lorsque la quantité de matière est insuffisante.

Les analyses ont été réalisées par le passage d'échantillons au diffractomètre du laboratoire de sédimentologie de Lille I. Cet appareil utilise un générateur de haute tension stabilisé Philips PW 1 730 qui alimente un tube à rayons X à anticathode de cuivre. Les caractéristiques de travail sont données ci-après :

anticathode : cuivre	tension sur la source : 40 KV
intensité : 25 mA	tension sur le détecteur à scintillation : 2 x 892 V
gain : 16	vitesse d'enregistrement : 1 cm/mn
vitesse du goniomètre : 1°2 θ/mn	sensibilité : 1 000 cps/s ou 400 cps/s
fentes : F ₁ =F ₃ =1° ; F ₂ =0,1°	inertie : 2 secondes

Tableau III : Paramètres utilisés en diffraction X.

L'enregistrement des diffractogrammes s'effectue directement sur un papier gradué en angström ce qui permet un dépouillement rapide.

Une première lame est passée sans traitement préalable au diffractomètre (2,49 à 28,51° 2θ, CuKα), puis repassée après saturation à l'éthylène glycol sous vide primaire (2,49 à 14,51° 2θ, CuKα). La seconde lame est chauffée à 490° pendant deux heures puis passée au diffractomètre (2,49 à 14,51° 2θ, CuKα).

Les trois diagrammes obtenus permettent, en fonction des diverses positions des pics de diffraction selon les essais, une détermination qualitative et semi-quantitative. Le dépouillement des diagrammes est effectué selon la méthode du laboratoire de sédimentologie de Lille I (HOLTZAPFFEL, 1981 et LEROY, 1981) et la détermination des minéraux argileux se réfère aux ouvrages de THOREZ (1975) et BRINDLEY et BROWN (1980). Nous avons regroupé les édifices interstratifiés irréguliers (LUCAS, 1962) de la manière suivante :

- (10-14) = illite-smectite et/ou illite-vermiculite ;
- (14-14) = chlorite-smectite et/ou chlorite-vermiculite.

II.1.6 - Géochimie

La géochimie des sédiments superficiels a été réalisée à l'Institut de Géologie du Bassin d'Aquitaine. A partir d'échantillons bruts séchés et broyés, les éléments sont dosés en spectrométrie de fluorescence X selon la méthode de fusion solide pour les éléments majeurs (JOUANNEAU, 1982) (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO, MgO, CaO, TiO₂, K₂O, P₂O₅, Na₂O) ; les traces (As, Pb, Cu, Ba, Zn, Ni, Zr, Br, Rb, Sr, S, Cs, V, Th, P, Co, Cl, Ga) sont dosées par la même méthode, selon une technique mise au point par LAPAQUELLERIE (1975).

II.2 - ANALYSES REALISEES SUR LES PRELEVEMENTS D'EAU

II.2.1 - Au laboratoire de sédimentologie de Lille

Le passage au diffractogramme X, du résidu du filtrat, a permis la détermination des minéraux argileux et des principaux minéraux associés. Pour cela, il a été effectué auparavant deux types de filtration : l'un sur préfiltre millipore AP 20 de porosité $1 \mu\text{m}$ en ce qui concerne les minéraux principaux (quartz, calcite, dolomite et feldspath), et l'autre, pour ce qui est des minéraux argileux, sur filtre millipore de porosité $0,45 \mu\text{m}$.

- La surface colmatée du préfiltre, considérée comme une poudre désorientée, est présentée sous le faisceau de rayons X ; les caractéristiques de travail pour le passage des filtres au diffractomètre sont données ci-dessous :

anticathode de cuivre	
vitesse goniométrique: $2^\circ 2\theta/\text{mn}$	intensité : 25 mA
vitesse enregistrement: 2 cm/mn	tension sur la source : 40 KV
tension sur le détecteur à scintillation: 2.899 V	secteur angulaire : $6,99$ à $60,01^\circ 2\theta$
gain: 16	fentes : $F_1 = F_3 = 4^\circ$
inertie: 2 secondes	$F_2 = 0,3^\circ$
sensibilité: 2 000 cps/s	

Tableau IV : Paramètres utilisés en diffraction X pour une poudre désorientée.

Le dépouillement des diffractogrammes a été fait à l'aide de la table de ROSE (1970).

- Après filtration d'un minimum de 3 litres d'eau (en fonction de la turbidité), le résidu du filtrat est remis en suspension dans 50 cc d'eau distillée. Puis le traitement de l'échantillon correspond à la préparation des agrégats orientés (CHAMLEY, 1966). Les caractéristiques de travail sont celles décrites au paragraphe précédent (I.1.5).

II.2.2 - A l'Institut Pasteur de Lille

Cet organisme s'occupa des analyses suivantes : études des matières en suspension (M. E. S.), de la salinité, du carbone organique et des métaux lourds.

- En ce qui concerne les M. E. S., l'eau prélevée est filtrée sur une membrane filtrante de type diapor retenant les particules supérieures à $0,45 \mu\text{m}$ (appareil AMICON Modèle 402). La membrane est séchée à 60°C et pesée avant et après filtration. La différence de poids permet de connaître la masse sèche totale de matière en suspension.

- La mesure de la salinité se fait à l'aide d'un salinomètre à induction BECKMANN.

- Le dosage du carbone organique porte sur la fraction totale (particulaire et dissoute) après broyage de l'échantillon à l'ultra turax et passage à l'analyseur de carbone Carbo-Erba TCM 400/P.

- La concentration naturelle des métaux sous forme particulaire est déterminée suivant la technique de fractionnement ci-après :

- . filtration sur membrane de porosité 0,45 μm ;
- . minéralisation sous pH acide durant 2 h dans un bain marie de 65° C ;
- . dissolution à l'eau distillée ;
- . dosage par spectrophotométrie d'absorption atomique et polarographie.

Les méthodes spectrophotométriques d'absorption atomique s'utilisent pour le dosage du Fe, Mn et Hg. L'analyse directe des eaux suivant ce procédé s'effectue :

- . en four graphite avec l'appareillage VARIAN AA 6, muni d'un four CRA 90 et d'une lampe correctrice à hydrogène ;
- . en flamme avec l'appareillage VARIAN AA 1 475, muni d'une lampe correctrice de fond au deutérium.

Les méthodes polarographiques impulsionnelles à redissolution anodique s'utilisent pour le dosage du Zn, Cd, Pb, Cu à l'aide d'un appareillage de type PAR 174A* couplé avec un S. M. D. E. 303* et un P. C. 315*.

- Le dosage des métaux sous forme dissoute s'effectue de la façon suivante :

- . filtration sur membrane de 0,45 μm ;
- . acidification de 500 ml de filtrat par HCl (1 ml/l) ;
- . dosage par procédé spectroscopique ou polarographique.

Pour les dosages par les méthodes polarographiques, on réalise une minéralisation sous l'action d'U. V. Sinon, le dosage des différents métaux s'effectue avec les mêmes procédés et appareillages, à l'exception du fer dont les concentrations sont déterminées par les méthodes colorimétriques automatisées.

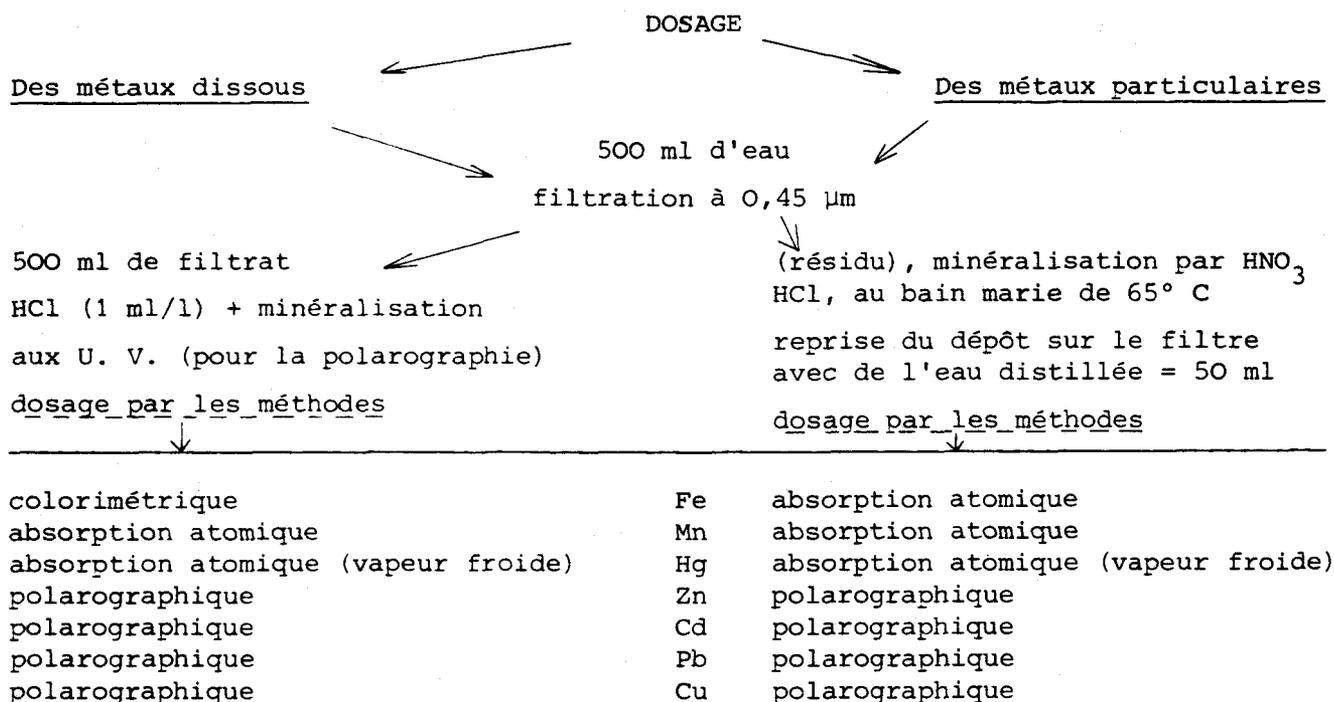


Tableau V : Dosage des différents métaux sous forme dissoute et particulaire

* P. A. R. 174 A : Princeton Applied Research.
 S. M. D. E. 303: Stationary Mercury Dropt Electrode.
 P. C. 315 : Potentiostat Controller.

- ANNEXE II -

Les foraminifères furent examinés et déterminés par M. ROSSET MOULINIER.

Pont du chemin de fer

CRETACE SUPERIEUR

Globotruncana

ACTUEL

Espèces de l'estran et du schorre

Elphidium articulatum C

Elphidium günteri R

Protelphidium germanicum (ex. : *paralium*) C

Espèces infralittorales-supertidales

Ammonia beccarii C (de petite taille)

Cribrononion gerthi C

Elphidium excavatum C

Noniondepressulum R

Espèces infra-littorales

Asterigerinata manvillia

Bolivina pseudo-plicata

Bolivina variabilis

Bulimina elegans

Cibicides lobatulus C

Cribrononion sp.

Elphidiononion magellanium

Fissurina arnectens

Glabratella baccata

Globulina inaequatis

Lenticulina orbicularis

Miliolinella subrotrunda

Neoconorbina williamsoni

Oolina lineata

Oolina melo

Oolina williamsoni

Quinqueloculina dimidiata

Quinqueloculina dunkerquiana

Quinqueloculina lata

Quinqueloculina longirostra

Quinqueloculina trigonula

Spiroloculina depressa

Trifarina sp.

Station 1

CRETACE SUPERIEUR

Globotruncana

EOCENE SUPERIEUR

1 *Florilus*

Nummulites variolarius

1 *Pararotalia*

1 *Rosalina parisiensis*

ACTUEL

Ammonia beccarii C
Asterigerinata mamilla
Cibicides lobatulus
Cribononion gerthi
Elphidiononion cuviellieri
Elphidium articulatum
Elphidium excavatum C
Elphidium gr. crispum
Fissurina lucida
Globulina inaequalis
Neoconorbina williamsoni
Quinqueloculina dunkerquiana C
Quinqueloculina lata
Quinqueloculina longirostra
Quinqueloculina mediterraneensis
Quinqueloculina trigonula
Triloculina plicata

Station 75

EOCENE SUPERIEUR

1 *Asterigerina*
1 *Elphidium laeve*
Nummulites variolarius

ACTUEL

Ammonia beccarii
Elphidium articulatum
Elphidium gr. crispum
Quinqueloculina dunkerquiana
Quinqueloculina dimidiata

Station 95

EOCENE SUPERIEUR

1 *Elphidium laeve*
1 *Nummulites variolarius*
1 *Reussella*

ACTUEL

Ammonia beccarii
Cibicides lobatulus
Fissurina lucida

Station 124

EOCENE SUPERIEUR

Nummulites variolarius
Discorbis (très usé)

Station 134

EOCENE SUPERIEUR

Discorbis (très usé)
1 *Heterolepa*
Nummulites variolarius

ACTUEL

Ammonia beccarii
Elphidium gr. *crispum*
Quinqueloculina chimidiata
Quinqueloculina dunkerquiana

Station 140

EOCENE SUPERIEUR

Nummulites variolarius
Rotalia guerini

ACTUEL

2 *Ammonia beccarii*
Quinqueloculina dunkerquiana

Station 142

EOCENE SUPERIEUR

Halkyardia minima
Nummulites variolarius
Peneroplis

ACTUEL

Ammonia beccarii C
Asterigerinata mamilla
Bulimina elegans
Cibicides lobatulus C
Cribrononion gerthi
Elphidium articulatum
Elphidium gr. *crispum*
Elphidium excavatum C
Miliolinella subrotunda
Neoconorbina williamsoni
Patellina conugata
Planispirinellina terguensi
Planorbulina mediterraneensis
Protelphidium germanicum
Quinqueloculina angulata undulata
Quinqueloculina dunkerquiana C
Quinqueloculina lata
Quinqueloculina trigonula
Triloculina plicata

Station 146

EOCENE SUPERIEUR

1 *Discorbis* (très usé)
Elphidium subnodosum
Nummulites variolarius
Rosalina obvoluta

ACTUEL

en faible
quantité

Ammonia beccarii
Cibicides lobatulus
Cribrononion gerthi
Cribrononion sp.
Elphidium excavatum C

Station 150

EOCENE SUPERIEUR

- 1 *Discorbis*
- 1 *Gyroldina*
- Nummulites variolarius*

ACTUEL

- Ammonia beccarii*
- Lenticulina orbicularis*
- Quinqueloculina dunkerquiana*
- Quinqueloculina lata*

- ANNEXE III -

Les ostracodes furent examinés et déterminés par T. HOIBIAN.

(Nomenclature établie d'après WAGNER, 1957)

Cypria ophthalmica (JURINE)
Cylocypris laevis (OF MULLER)
Eucypris virens (JURINE)
Ilyocypris gibba (RAMDOHR)
Erpetocypris chevreuxi (SARS)
Candona compressa (KOCH)
Candona neglecta (SARS)
Limnocythere inopinata (BAIRD)
Cytheroïs fischeri ? (SARS)
Paradoxostoma variabile (BAIRD)
Paradoxostoma normani (BRADY)
Loxoconcha rhomboïdea (FISCHER)
Cyprideistorosa (JONES)
Hirschmannia tamarindus (JONES)
Hemicythere villosa (SARS)
Urocythereis oblonga (BRADY)
Cytheromorpha fuscata (BRADY)
Leptocythere castanea (SARS)
Semicytherura striata (SARS)
Leptocythere pellucida (BAIRD)
Aurila convexa (BAIRD)
Hemicytherideiselongata (BRADY)
Heterocythereis albomaculata (BAIRD)
Xestoleberis depressa (SARS)
Neonesidea sp.
Cythere lutea (OF MULLER)
Semicytherura sella (SARS)
Semicytherura angulata (BRADY)
Semicytherura acuticostata (SARS)
Eucythere declivis (NORMAN)
Cytheropteron nodosum (BRADY)
Propontocypris pirifera (OF MULLER)
Hemicytherura cellulosa ? (NORMAN)
Cytherura gibba ? (OF MULLER)
Potamocypris sp.
Pseudocytherura calcarata (SEGENZA)
Microcytherura fulva (BRADY & ROBERTSON)
Semicytherura sp.
Hirschmannia viridis (OF MULLER)
Finnarchinella angulata (SARS)
Pontocypris mytiloides (NORMAN)
Leptocythere crispata (BRADY)
Cypridopsis aculeata (LILLJEBORG)
Semicytherura nigrescens (BAIRD)
Bythocythere bradyi ? (SARS)
Leptocythere sp. div.
Cluthia cluthae
Hemicytherura elathrata

- ANNEXE IV -

TABLEAUX

Tableau VI : Données sédimentologiques des prélèvements superficiels

Tableau VII : Données sédimentologiques des prélèvements des sondages à la tarière

Tableau VIII : Données géochimiques des prélèvements des sondages à la tarière

Tableau IX : Données géochimiques des prélèvements d'eau effectués au cours de différentes marées (20 juillet 1983 - 8 septembre 1983 - 12 mars 1984 - 19 mars 1984)

ANNEXE IV

N°	>63 μm %	Mode fines: principal: μm	Grain moyen : μm	Classement So	Asymétrie SK	CO ₃ Ca %	C org %	Minéraux argileux en %								
								C	I	(10-14)	(14-14)	V	Sm	K		
100	0	125	180	1,21	1,08	11	0,36									
36	64	8	27	3,20	0,48	33	0,81	5	30	15	10			25	15	
99	1	125	145	1,07	1	11	0,15									
100	0	125	160	1,14	1,10	9	0,3									
31	69	8	20	4,15	0,89	37	1,4									
53	47	8	34	3,37	0,33	32	1,1	tr	30	15	10			25	20	
100	0	125	155	1,12	1,09	9	0,5									
24	76	8	13	3,40	1,22	41	1,72									
49	51	8	29	3,71	0,28	28	0,51									
100	0	125	150	1,11	0,99	11	0,43									
31	69	8	20	3,45	0,55	37	3,47	tr	25	15	10			30	20	
100	0	125	155	1,12	1,02	8	0,12									
100	0	125	155	1,15	1,01	8	0,2									
44	56	30	32	2,63	0,47	32	1,86									
100	0	125	155	1,12	1,02	9	0,44									
41	59	63	29	2,65	0,52	34	1,65									
25	75	8	13	4,78	1,24	39	1,98	tr	30	10	10			30	20	
6	94	8	7	3,23	1,03	44	1,3	5	30	15	10			25	15	
97	3	125	145	1,10	0,98	18	1,38									
100	0	125	155	1,13	1,07	11	0,2									
65	35	125	47	2,24	0,48	32	1,9	5	25	20	10			25	15	
10	90	8	8	3,03	1,14	41	3,96									
9	91	8	9	3,69	0,98	44	1,23	tr	25	10	10		tr	35	20	
14	86	8	11	3,26	0,70	44	1,28									
99	1	125	145	1,09	1,03	12	0,25	5	40	10	10			20	15	
100	0	125	150	1,11	0,99	9	0,04									
46	54	125	25	5	0,28	33	0,24	tr	25	15	15			30	15	
11	89	8	8	3,23	1,10	44	2,02									
10	90	8	8	2,62	0,97	44	4,22	5	30	15	10		tr	25	15	
23	77	8	11	4,47	1,20	43	1,16									
6	94	8	7	3,20	1,27	47	1,19	tr	25	10	10		tr	35	20	
63	37	125	40	2,71	0,32	32	0,63	5	25	10	10		5	30	15	
59	41	125	40	3,81	0,10	29	0,99									
100	0	125	150	1,11	1,02	12	0,12									
100	0	125	140	1,14	1,05	11	0,10									
52	48	125	42	2,60	0,55	28	0,95	5	25	10	15		tr	30	15	
6	94	8	8	2,92	0,88	43	1,54	tr	30	20	10		tr	25	15	
9	91	8	9	2,85	0,92	38	1,80	5	25	15	10			30	15	
100	0	160	225	1,20	1,09	5	1,3									
3	97	8	5	2,26	1,06	48	1,72	tr	30	15	10		tr	30	15	
3	97	8	5	2,71	1,26	49	1,39	5	25	15	10			30	15	
38	62	8	20	3,97	0,47	35	1,34	tr	25	15	10		tr	30	20	
100	0	125	150	1,11	0,99	9	0,04									
62	38	125	45	2,01	0,58	32	0,78									
63	37	125	38	2,77	0,31	29	0,53									
36	64	125	20	4,42	0,53	36	1,56									
56	44	125	37	2,99	0,36	27	0,98	5	30	15	10		tr	25	15	
20	80	8	10	3,44	0,89	38	2,52									
12	88	8	8	3,24	1,13	40	2,1									
3	97	8	6	2,76	0,93	47	2,58	tr	25	15	10		tr	30	20	
38	62	125	44	3,51	0,55	38	2,34	tr	25	15	10			25	20	
100	0	125	150	1,15	1,03	8	0,07									
100	0	125	160	1,16	1,05	8	1,50									
87	13	125	94	1,11	0,99	20	1,54	5	30	15	10		tr	25	15	
76	24	125	90	1,47	0,59	23	0,66	5	30	15	10			25	15	
16	84	8	11	3,65	0,83	43	1,62									
12	88	8	8	2,87	0,95	43	1,7									
10	90	8	7	3,16	0,9	45	2,81	tr	25	20	10		tr	30	15	
56	44	125	34	3,04	0,3	30	1,68									
72	28	125	68	1,7	0,73	25	2,00									
99	1	125	150	1,12	1,02	8	0,45									
79	21	125	94	1,32	0,83	20,1	0,88									
23	77	8	13	4,16	1,08	44	2,52									
8	92	8	7	2,45	0,86	47	2,03	tr	25	20	10			30	15	

leau VI : Données sédimentologiques des prélèvements superficiels.

Ech.:	>63 μm:	fines:	Mode	Grain	Classement:	Asymétrie	CO ₃ Ca:	C org:	Minéraux argileux en %									
			principal:	moyen					So	SK	C	I	(10-14):	(14-14):	V	Sm		
:	:	:	μm	μm	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
65	20	80	8	8	3,49	1,24	46	2,4										
66	8	92	8	7	2,77	0,90	44	2,12	5	30	20	10					20	1
67	44	56	125	29	3,57	0,62	38	0,88	5	25	20	10					25	1
68	100	0	125	150	1,14	1,02	8	0,08										
69	65	35	125	49	2,64	0,23	29	0,66	5	25	20	10					25	1
70	15	85	8	9	3,21	0,84	45	1,5										
71	5	95	8	6	2,41	0,94	44	2,42	tr	25	20	15					25	1
72	8	92	8	11	3,25	0,85	50	2,20	5	25	15	10	tr				30	1
73	22	78	8	15	3,77	0,91	44	1,4	5	30	15	10					25	1
74	43	57	125	40	3,4	0,6	36	0,9										
75	100	0	125	180	1,12	0,99	7	0,4										
76	41	59	125	25	3,34	0,76	30	0,88	5	30	10	10	tr				30	1
77	5	95	8	7	2,84	0,87	43	1,99	10	25	15	10					25	1
78	100	0	160	200	1,19	1,07	9	1,56										
79	84	16	160	120	1,26	1,03	17	1,41	5	25	15	10					30	1
80	69	31	125	66	2,27	0,33	25	0,54										
81	81	19	160	98	1,25	0,90	24	0,77										
82	9	91	8	8	3,50	1,1	46	3,04	5	25	15	10					30	1
83	100	0	160	200	1,21	1,10	9	0,19										
84	99	1	125	175	1,18	0,98	9	0,18										
85	100	0	125	150	1,13	0,98	8	0,12										
86	100	0	160	190	1,20	1,08	6	0,06										
87	100	0	160	105	1,19	0,97	6	0,09										
88	100	0	200	205	1,21	0,96	4	0,11										
89	100	0	160	215	1,17	0,95	6	0,96										
90	100	0	160	185	1,26	0,96	3	1,26										
91	90	10	160	160	1,32	1,06	16	0,44	10	30	15	15					20	1
92	97	3	160	250			34	1,89										
93	66	34	125	59	3,16	0,18	29	1,06	10	30	15	10					20	1
94	98	2	125	145	1,09	1,03	16	0,3										
95	100	0	125	155	1,15	1,03	8	0,15										
96	100	0	160	195	1,19	1,07	6	0,18										
97	100	0	160	200	1,20	1,10	4	0,3										
98	100	0	160	180	1,15	1,04	3	0,12										
99	100	0	160	220	1,26	1,01	3	0,06										
100	100	0	0,20:	200	1,16	1,08	4	0,07										
101	100	0	160	170	1,14	1,01	8	0,04										
102	100	0	250	135	1,20	1	7	0,42										
103	79	21	125	72	1,35	0,67	24	1,16	5	25	15	10					30	1
104	100	0	125	160	1,15	1,01	12	0,32										
105	100	0	125	150	1,15	1,01	9	0,2										
106	100	0	160	165	1,13	0,99	9	1,16										
107	100	0	200	420	1,37	1,26	36	0,10										
108	91	9	125	150	1,16	1,08	19	1,32										
109	93	7	125	140	1,11	1,06	17	1,38										
110	53	47	125	41	2,90	0,45	36	2,48	5	25	20	10					25	
111	100	0	125	208	1,22	1,08	8	0,4										
112	100	0	250	250	1,31	0,99	8	0,04										
113	100	0	250	235	1,29	0,94	6	0,32										
114	100	0	160	230	1,25	1,04	4	0,17										
115	100	0	250	200	1,19	0,97	5	0,09										
116	91	9	160	220	1,36	1,10	16	1,44	tr	30	20	15					20	
117	100	0	160	225	1,29	1,13	14	0,42										
118	46	54	125	32	4,26	0,50	29	2,49										
119	94	6	160	240	1,34	1,10	12	0,9	tr	25	20	10					30	
120	69	31	125	66	2,34	0,31	23	0,17										
121	100	0	160	460	1,5	1,03	26	1,61										
122	100	0	400	880	1,70	1,56	68	0,2										
123	100	0	200	235	1,33	0,94	8	0,17										
124	100	0	250	280	1,24	0,95	5	0,42										
125	100	0	160	200	1,21	1,10	5,	0,04										
126	100	0	160	250	1,34	1,06	16	0,1										
127	100	0	160	260	1,39	1,09	14	0,43										
128	100	0	250	320	1,43	0,91	24	0,66										

Tableau VI (suite)

N°	%	>63 μm	fines	Mode	Grain	Classement	Asymétrie	% CO ₃ Ca	% C org	Minéraux argileux en %							
				principal	moyen					So	SK	C	I	(10-14)	(14-14)	V	Sm
				μm	μm												
1	100	0	125	195	1,18	0,97	14	0,47									
2	100	0	160	190	1,10	1,02	7	0,05									
3	100	0	125	215	1,21	1,01	4	0,03									
4	100	0	200	240	1,25	0,99	4	0,12									
5	100	0	160	150	1,13	1,02	6	0,04									
6	100	0	250	270	1,21	1,02	7	0,16									
7	100	0	160	170	1,15	0,98	7	0,06									
8	100	0	160	220	1,19	1,04	4	0,19									
9	100	0	160	245	1,32	1,10	11	0,07									
10	100	0	125	250	1,35	1,08	17	0,42									
11	100	0	160	230	1,29	1,10	0	0,32									
12	100	0	315	290	1,39	0,86	18	0,46									
13	100	0	125	175	1,12	1,02	11	0,2									
14	100	0	160	175	1,14	1,08	11	0,08									
15	100	0	160	240	1,30	0,91	9	0,1									
16	100	0	250	260	1,35	0,97	13	0,08									
17	100	0	160	260	1,36	1,02	12	0,13									
18	100	0	160	255	1,35	0,95	8	0,12									
19	100	0	315	325	1,32	1	14	0,43									
20	100	0	250	250	1,29	0,99	9	0,19									
21	100	0	160	245	1,34	0,97	15	0,15									
22	100	0	160	260	1,39	1,05	14	0,25									
23	100	0	250	240	1,22	0,98	4	0,23									
24	100	0	160	200	1,34	1,25	15										
25	100	0	160	230	1,29	1,25	12	0,14									
26	100	0	160	195	1,17	0,95	14	0,21									
27	100	0	125	160	1,11	1,04	11	1,8									
28	100	0	125	170	1,13	1,05	11	0,06									
29	100	0	125	200	1,31	1,18	10	0,18									
30	100	0	125	220	1,30	1,03	9	0,07									
31	100	0	160	230	1,32	1,04	9	0,37									
32	100	0	160	200	1,18	1,05	7	0,05									
33	100	0	125	155	1,13	0,98	12	0,13									
34	100	0	160	190	1,19	1,05	9	0,05									
35	100	0	250	230	1,27	0,91	0										
36	100	0	160	230	1,25	0,95	10										
37	100	0	200	230	1,25	0,95	9										

Tableau VI (fin)

Tarière	Echant.	Prof. cm	NATURE	MODE				C	MINÉRAUX ARGILEUX				
				% > 63 µm	% fines	ppal µm	% CaCO ₃		I	(10-14)	(14-14)	Sm	K
1	1	130	Vase sableuse réduite, gris-bleu	35	65	2	30	5 ⁺	20 ⁻	15 ⁻	5	40	15
	2	195	Sable vaseux gris bleu	55	35	125	29	5 ⁺	25 ⁻	15 ⁻	10	35	10
2	1	120	Sable vaseux gris	64	36	125	27						
	2	190	Sable plus clair	84	16	125	18						
3	1	150	Vase sableuse grise	38	62	125	31						
	2	190	Sable vaseux gris	64	36	125	29						
4	1	60	Vase sableuse	49	5	125	32	5 ⁻	20 ⁺	10	5	45 ⁻	15
	2	80	Vase sableuse	49	5	125	32	5 ⁻	25 ⁻	10 ⁺	5	40 ⁺	15
	3	100	Sable vaseux gris	74	26	125	23	5	25 ⁻	10 ⁺	5	35	20
	4	370	Sable gris	88	12	125	29	5	25 ⁻	10 ⁺	5	35	20
	5	400	Sable lessivé	98	2	125	11	5	30	10	5	30	20
5	1	40	Vase grise	2	98	< 2	41						
	2	80	Vase grise avec de nombreux hydrobies	4	96	< 2	37						
	3	140	Sable vaseux gris	74	26	125	16						
	4	200	Vase sableuse grise	50	50	125	21						
	5			95	5	160	7	5	25	10	5 ⁻	40	15
6	1	55	Vase brune avec hydrobies	10	90	2	38						
	2	90	Vase brune	20	80	2	28						
	3	120	Vase sableuse brune	57	43	125	15	5	15 ⁺	10 ⁻	5 ⁺	50	15
7	1	45	Vase à passées oxydées - quelques morceaux de charbon de bois	26	74	2	33						
	2	90	Vase	53	47	125	34						
8	1	70	Vase grisâtre	13	87	2	44						
	2	140	Vase plus sombre	13	87	2	33						
	3	220	Sable vaseux gris	75	25	125	19						
9	1	90	Vase	2	98	8	42						
10	1	50	Vase sableuse brune	31	69	< 2	35						
	2	130	Sable vaseux gris	59	41	125	26						
	3	190	Sable vaseux clair	60	40	125	22	5	25 ⁺	5 ⁺	tr	45 ⁻	20
	4	240	Sable	95	5	125	13						
11	1	150	Vase sableuse brune	44	56	125	31	5	25	15	5 ⁺	35	15
	2	170	Sable coquillier	82	18	125	15	5	20	10	10 ⁻	40 ⁺	15
	3	200	Sable gris	95	5	125	14	5	25	10 ⁺	5 ⁻	35 ⁺	20
12	1	60	Vase grise compacte avec quelques hydrobies	5	95	8	35						
	2	100	Sable vaseux avec quelques débris de coquilles	60	40	125	18						
	3	190	Sable vaseux plus réduit avec débris de coquilles	75	25	125	13						
			1 galet										
13	1	45	Vase bleu vert	7	93	8	38						
	2	100	Vase homogène avec quelques oxydations différentielles	24	76	8	32						
	3	180	Vase sableuse	30	70	8	35						
	4	260	Sable vaseux avec quelques hydrobies	67	33	125	32						
14	1	100	Vase brune	2	98	< 2	41						
	2	200	Sable brun	82	18	125	17	5 ⁺	25 ⁺	10	5 ⁻	40 ⁻	15
	3	220	Sable gris réduit	87	13	125	17						
	4	270	Sable gris	95	5	125	10	5	25	10	5 ⁺	35 ⁻	20
15	1	80	Sable vaseux brun jaunâtre	67	33	160	18						
	2	200	Vase sableuse noirâtre	38	62	160	5						

Tableau VII Données sédimentologiques des prélèvements des sondages à la tarière.

Carière	Echant.	Prof. cm	NATURE	MODE				MINÉRAUX ARGILEUX							
				>63 μm	fines	ppal μm	CaCO ₃	C	I	(10-14)	(14-14)	Sm	K		
16	1	110	Sable gris, avec quelques débris de coquilles	92	8	160	11								
	2	155	Sable gris clair	96	4	160	8								
	3	164	Sable plus clair	98	2	160	6	5	25	10	5-	30		25	
17	1	75	Vase sableuse grise	40	60	125	26								
	2	120	Sable vaseux gris	57	43	125	25								
	3	140	Sable plus clair oxydé par endroits	84	16	125	18								
	4	175	Sable gris clair	89	11	125	17								
18	1	150	Sable gris	90	10	125	20								
	2	190	Sable gris	88	12	125	32								
19	1	90	Sable jaunâtre	95	5	160	9	5	20 ⁺	10	5-	45		15	
20	1	70	Sable jaunâtre	100		160	5								
	2	145	Sable gris bleu, avec quelques débris de coquilles	80	20	160	11								
	3	210	Sable plus clair	77	23	160	9								
21	1	60	Sable vaseux gris bleu avec quelques passées oxydées	56	44	125	27								
	2	130	Sable plus clair	94	6	125	15								
22	1	100	Vase sableuse oxydée	39	61	2	26								
	2	130	Sable à passées de coquilles brisées	95	5	125	7								
	3	160	Sable vaseux gris	74	26	125	23								
23	1	70	Sable jaunâtre	99	1	160	5								
	2	160	Sable	95	5	160	5								
	3	240	Sable vaseux gris	65	35	125	19								
24	1	60	Sable gris bleu	78	22	125	19								
	2	130	Sable gris bleu	79	21	125	18	5	25	10 ⁺	5	35		20 ⁻	
25	1	125	Sable vaseux gris	69	31	125	20	5	20	10 ⁺	5	40		20 ⁻	
	2	145	Sable gris	85	15	125	14	5	20 ⁺	10 ⁺	5	40		20 ⁻	
	3	170	Sable gris	84	16	125	22	5	25	10 ⁺	5	35		20	
27	1	120	Sable gris bleuté	85	15	125	7	5	25 ⁻	10 ⁺	5	35		20	
28	28	50	Vase gris noir	12	88	2	38	5	25 ⁻	15 ⁻	5	35		15 ⁺	
	2	190	Vase sableuse noirâtre	38	62	2	36								
	3	240	Sable gris clair	94	6	160	10	5	25 ⁻	10	5	40 ⁻		15 ⁺	
29	1	70	Sable jaunâtre	90	3	160	8								
	2	120	Vase	12	88	< 2	34								
	3	125	Sable oxydé	92	8	125	13								
	4	150	Sable gris	75	25	125	13								
	5	170	Sable plus clair	96	4	125	10								
	6	200	Sable gris clair	94	6	125	16								
	7	210	Sable lessivé	96	4	160	7								
30	1	40	Sable coquillier	93	7	125	21								
	2	90	Sable vaseux gris coquillier	59	41	125	30								
	3	290	Sable coquillier gris (coques)	95	5	125	19	5	20 ⁺	15 ⁺	5	35 ⁻		20 ⁻	
31	1	110	Sable coquillier	97	3	160	16								
	2	170	Sable coquillier	96	4	160	15	5 ⁺	25 ⁻	10	5	40		15	
32	1	190	Sable gris	97	3	160	10	15	35	15 ⁻	tr	20		15	

Tableau VII (Suite)

TARIERE 4

Tranche (cm)	Cu mg/kg	Zn mg/kg	Pb mg/kg	Cd mg/kg	Hg mg/kg	Fe mg/kg	Mn mg/kg	P.F %*	H ₂ O % **	63 m % ***
0-20	19	122	40	0.65	0.17	12000	270	8.0	31.5	58
30-40	15	90	33	0.50	0.18	10000	230	5.5	27.5	59
40-50	23	150	50	3.60	0.28	13400	270	6.4	35.0	43
80-90	14	95	34	0.60	0.26	8300	180	4.7	28.6	32
150-160	16	88	43	0.40	0.28	12500	280	5.3	24.3	13
200-210	22	136	71	0.50	0.39	18200	420	6.9	27.8	15
250-260	23	138	63	0.70	0.33	21300	320	6.5	27.4	14
280-290	9	34	12	0.20	0.13	3600	270	1.9	25.7	21
360-370	15	92	42	0.40	0.50	15900	300	4.8	22.0	3.5

TARIERE 25

0-15	11.5	82	35.5	0.35	0.275	11000	325	5.0	27.4	68
40-60	10.0	73	34.5	0.20	0.125	11000	200	3.5	30.5	72
80-90	10.5	73	33.5	0.45	0.165	11000	220	4.3	31.2	65
125-150	12.0	89	35.5	0.50	0.160	1000	170	5.8	20.0	15
145-160	16.5	172	36	2.10	0.225	15500	165	5.5	30.0	28
160-170	13.0	76	36	0.25	0.245	15500	175	4.5	26.4	26
185-195	14.5	95	37	0.35	0.335	23000	230	6.3	20.4	2.7
215-225	14.5	111	40	0.70	0.280	17000	210	7.2	22.0	11.4

TARIERE 26

0-15	17	106	43.5	0.50	0.37	12000	240	7.3	22.5	12
30-40	16.5	107	45.5	0.70	0.29	14000	210	7.5	20.9	4.7
110-120	17.5	126	42.0	0.60	0.30	13000	260	5.2	23.9	16
140-150	19	133	44.0	0.55	0.33	14700	260	4.9	23.8	16
160-170	16	136	43.5	0.45	0.26	16000	260	6.3	21.7	2.7

TARIERE 27

0-15	13	98.5	41	0.40	0.30	12500	220	7.0	37.3	79
60-80	13.5	105	46.5	0.45	0.30	11500	210	5.0	36.0	78
100-110	14	98.5	41.5	0.40	0.30	14200	215	6.0	37.7	25
220-230	14	98	44	0.30	0.24	15700	235	7.7	21.4	4.2

TARIERE 32

0-20	16	110	37	0.80	0.20	13500	215	9.2	23.4	12
80-90	16	125	40	0.50	0.18	13750	240	7.2	31.6	42
110-120	15	130	37	0.55	0.275	12750	215	8.6	20.2	7.3
170-180	16	298	35.5	0.56	0.32	13750	210	7.7	20.6	4.7
180-190	27.5	220	35	0.55	0.30	13750	220	7.7	20.4	1.0

* P.F. (%) : Perte au feu à 550°C en %

** H₂O (%) : Pourcentage en eau

*** Pourcentage de la fraction < 63 µm

Tableau VIII : Données géochimiques des prélèvements des sondages à la tarière

Tableau IX : Données géochimiques des prélèvements d'eau au cours de différentes marées

	BH		BH+2		BH+4		PH		PH+2		PH+4	
	Par.	Dis.	Par.	Dis.	Par.	Dis.	Par.	Dis.	Par.	Dis.	Par.	Dis.
Fe µg/l	200	3	260	3	230	4	160	7	180	6	210	7
Mn "	27	1.8	29	2.8	29	3.1	23	1.4	24	1.5	29	2.0
Zn "	4	6	5	5	6	1	4	5	7	6	4	5
Cd "	0.02	<0.05	0.02	0.05	0.05	0.05	0.02	0.05	0.02	<0.05	0.02	<0.05
Pb "	0.8	0.40	1.2	0.35	1.0	0.30	0.70	0.70	1.3	0.20	0.70	0.20
Cu "	0.3	0.95	0.2	1.1	1.6	1.95	0.6	1.2	0.4	0.55	0.30	0.95
Hg "	<0.05	<0.05	0.04	0.18	0.08	0.19	0.03	<0.05	0.05	<0.05	0.08	<0.05
COI mg/l	1.3	1.3	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
MeS mg/l	11.2	24.4	22.4	24.4	22.4	24.4	12	15.2	15.2	19.2	19.2	19.2
S %o g/l	0.29	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30

05.9.83	STATION 1												STATION 2													
	BH		BH+2		BH+4		PH(Fd)		PH		PH+4		BH		BH+2		BH+4		PH		PH+2		PH+4			
	Par.	Dis.	Par.	Dis.	Par.	Dis.	Par.	Dis.	Par.	Dis.	Par.	Dis.	Par.	Dis.	Par.	Dis.	Par.	Dis.	Par.	Dis.	Par.	Dis.	Par.	Dis.		
Fe µg/l	770	8	260	6	250	8	1500	9	620	11	490	9	540	9	490	10	510	10	2300	10	990	2	1200	6	1700	11
Mn "	48	<1	25	<1	23	<1	73	7.2	43	13	29	<1	38	1.2	36	1.6	39	2	83	21	58	2	55	8.6	80	1.7
Zn "	14	6.3	4	6.3	3	1.1	37	5	7	4.4	33	3.6	6	5.3	15	20	18	22	32	10	19	27	13	10	27	13
Cd "	0.09	0.22	0.01	0.15	0.01	0.05	0.1	0.1	0.05	0.05	0.04	0.05	0.03	0.11	0.03	0.21	0.05	0.09	0.18	0.09	0.04	0.43	0.06	0.30	0.02	0.06
Pb "	3.3	0.8	0.5	0.6	0.8	0.1	4.4	0.4	2.1	0.3	1.6	0.2	1.6	0.2	3.8	0.2	4.8	0.2	8.1	0.2	14.4	2.7	4.7	1.9	6.0	0.9
Cu "	1.4	1.3	0.4	1.7	0.7	1.0	4.1	1.2	0.6	1	4.8	0.50	1.2	2.1	3.3	1.7	1.6	2.5	1.4	2.1	3.2	1.1	2.9	2.5	1.95	
Hg "	0.07	<0.05	0.02	<0.05	0.03	<0.05	0.07	<0.05	0.04	<0.05	0.01	<0.05	0.04	<0.05	0.33	<0.05	0.22	<0.05	0.33	<0.05	0.43	<0.05	0.24	<0.05	0.28	<0.05
COI mg/l	1.7	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.9	1.4	1.9	1.4	1.4	1.4	1.9	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.9	1.4	2.2	2.0	2.0	1.8	1.8	
MeS mg/l	68	22	22	22	22	22	141	54	54	160	61	48	54	265	54	169	159	159	199	199	32.2	32.2	17.4	17.4	17.4	
S %o g/l	0.45	0.33	0.33	0.32	0.32	0.32	3.50	3.76	3.76	0.73	0.73	0.32	0.32	0.44	0.44	0.43	0.43	0.43	4.04	4.04	32.2	32.2	17.4	17.4	17.4	

12.3.84	STATION 1 Bis												STATION 2											
	PH		PH+2		PH+4		BH		BH+2		BH+4		PH		PH+2		PH+4		BH		BH+2		BH+4	
	Par.	Dis.	Par.	Dis.	Par.	Dis.	Par.	Dis.	Par.	Dis.	Par.	Dis.	Par.	Dis.	Par.	Dis.	Par.	Dis.	Par.	Dis.	Par.	Dis.	Par.	Dis.
Fe µg/l	394	7.0	435	3.0	406	3.5	375	9.0	404	14.5	469	6.5	229	33.0	462	6.0	539	5.5	652	5.5	468	4.5	483	6.0
Mn "	22	5.0	24	6.5	20	8.0	19	10	20	10	24	10	12	11.5	25	7.0	30	10	37	13.5	26	12.5	27	14.5
Zn "	5.6	5.0	6.2	2.8	7	9.3	10.4	5.7	15.7	19	9.2	2.6	6.4	6.4	8.7	5.2	8	3.6	9.2	4.6	6.6	3.05	7	2.1
Cd "	0.01	0.14	0.02	0.05	0.02	0.10	0.02	0.05	0.03	0.05	0.07	<0.05	0.02	<0.05	0.07	0.05	0.04	0.19	0.08	0.09	0.04	0.10	0.02	0.05
Pb "	2.2	0.4	1.8	0.4	2.2	0.55	2.4	0.8	2.9	0.4	2.2	0.25	2.6	0.3	2.2	0.3	2.7	0.65	3.7	1.05	2.4	0.75	2.7	1.65
Cu "	1.3	1.8	1.3	1.5	1	1.15	1.2	1.6	4.4	1.7	1.4	0.95	1	2.6	1.3	2.75	2	2.15	1.5	2.8	1.7	2.6	1	1.35
Hg "	0.07	<0.05	0.02	<0.05	0.04	<0.05	0.04	<0.05	0.04	<0.05	0.06	<0.05	0.15	<0.05	0.12	<0.05	0.10	<0.05	0.12	<0.05	0.11	<0.05	0.11	<0.05
COI mg/l	1.05	0.95	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	1.14	1.05	1.05	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
MeS mg/l	39.6	31.4	24.6	24.6	24.6	24.6	29	33	32.2	36.8	52	20.2	40.4	40.4	40.4	40.4	40.4	40.4	40.4	40.4	40.4	40.4	40.4	40.4
S %o g/l	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35

19.3.84	STATION 1 Bis												STATION 2													
	BH		BH+2		BH+4		PH(Fd)		PH		PH+4		BH		BH+2		BH+4		PH		PH+2		PH+4			
	Par.	Dis.	Par.	Dis.	Par.	Dis.	Par.	Dis.	Par.	Dis.	Par.	Dis.	Par.	Dis.	Par.	Dis.	Par.	Dis.	Par.	Dis.	Par.	Dis.	Par.	Dis.		
Fe µg/l	359	6.5	337	4	294	4	1719	4	1999	20.5	339	10.5	379	5	824	5	759	0.8	2331	2.0	504	5.0	1179	6.5	1999	6.5
Mn "	22	3	22	5	19	8.5	80	13.5	82	12.5	19	10	23	8.5	47	9.5	50	8.5	204	15	35	12	65	3.5	93	13
Zn "	8.5	4.6	21.3	6.5	7.7	2.8	33.2	8.3	24.5	3.6	24	9.7	25.2	2.6	12.2	3.3	15.6	3.5	55	2.6	13.4	5.6	17.2	7.4	24.5	2.5
Cd "	0.03	0.10	0.17	<0.05	0.08	0.09	0.15	0.14	0.16	0.10	0.12	<0.05	0.13	<0.05	0.15	0.14	0.17	<0.05	0.22	0.05	0.16	0.20	0.11	0.13	0.21	<0.05
Pb "	1.9	0.75	2.7	0.45	2.1	0.25	4.8	0.25	7	0.35	1.8	0.3	1.7	0.25	4.1	0.15	4.1	0.25	9.0	0.2	3.9	1.35	7.3	0.9	8	0.3
Cu "	0.9	1.2	1.2	1.45	0.7	1.25	2.3	1.6	3.1	1.45	1.8	1.4	1	1.35	1.6	1.45	1.8	1.1	3.4	1.4	1.5	2.7	2.3	0.9	3.3	1.2
Hg "	0.04	<0.05	0.05	<0.05	0.06	<0.05	0.09	<0.05	0.10	<0.05	0.05	<0.05	0.08	<0.05	0.15	<0.05	0.16	<0.05	0.21	<0.05	0.29	<0.05	0.22	<0.05	0.20	<0.05
COI mg/l	0.37	0.86	0.86	0.86	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18
MeS mg/l	17.8	14.4	14.4	14.4	19.2	19.2	185	185	185	17.2	17.2	19.2	19.2	76.4	61.6	391	77	132	185	185	32.1	32.1	14.1	14.1	14.1	
S %o g/l	0.32	0.34	0.34	0.34	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.33	0.33	0.32	0.32	0.45	0.45	0.42	0.42	0.55	0.55	32.1	32.1	14.1	14.1	14.1	

- ANNEXE V -

FIGURES COMPLEMENTAIRES

Figure II : Direction des vents au bateau-feu de Bassurelle
(1982 - 1983)

Figure III : Direction des vents au Touquet Paris-Plage
(1981 - 1982 - 1983)

Figure IV : Provenance de la houle au bateau-feu de Bassu-
relle (1982 - 1983)



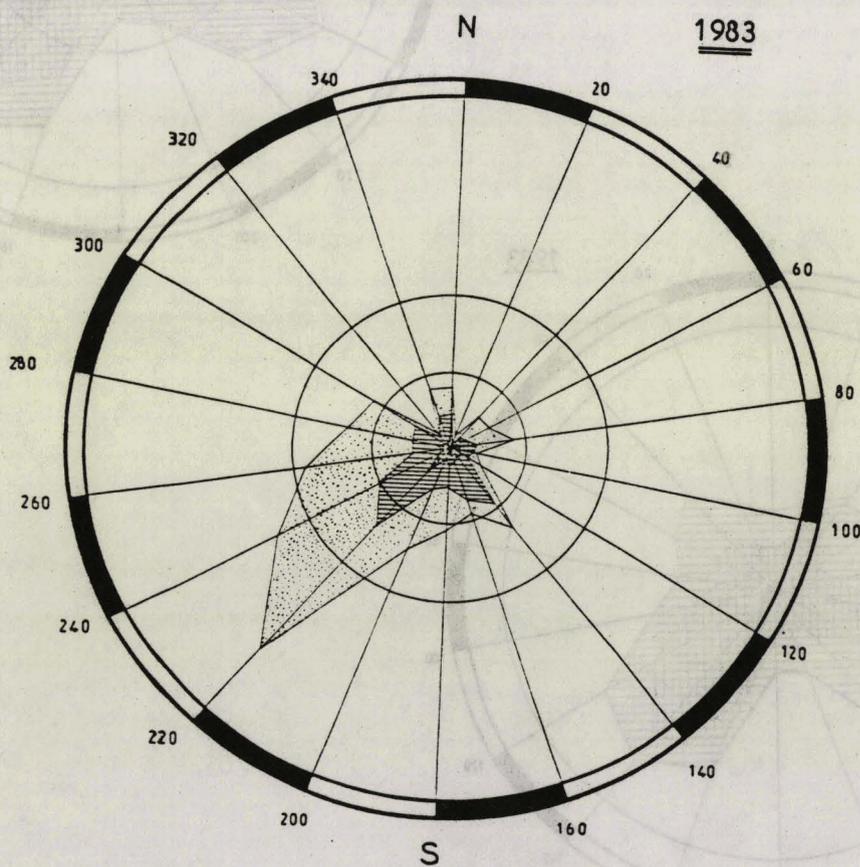
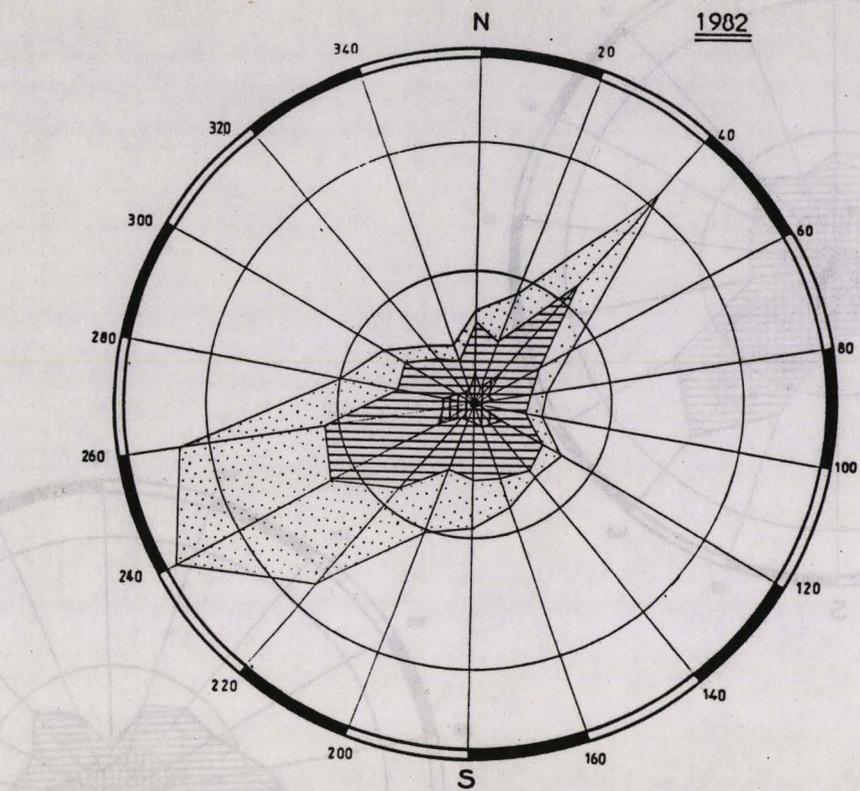
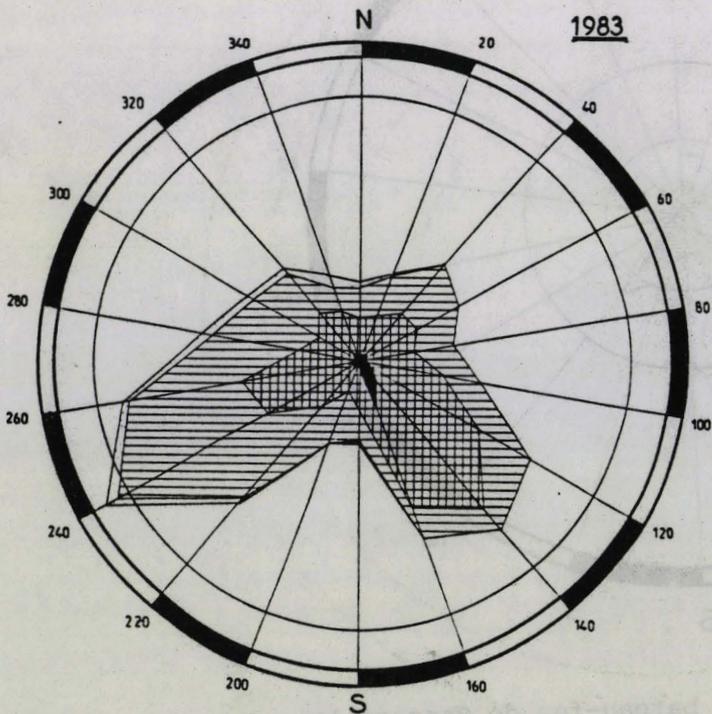
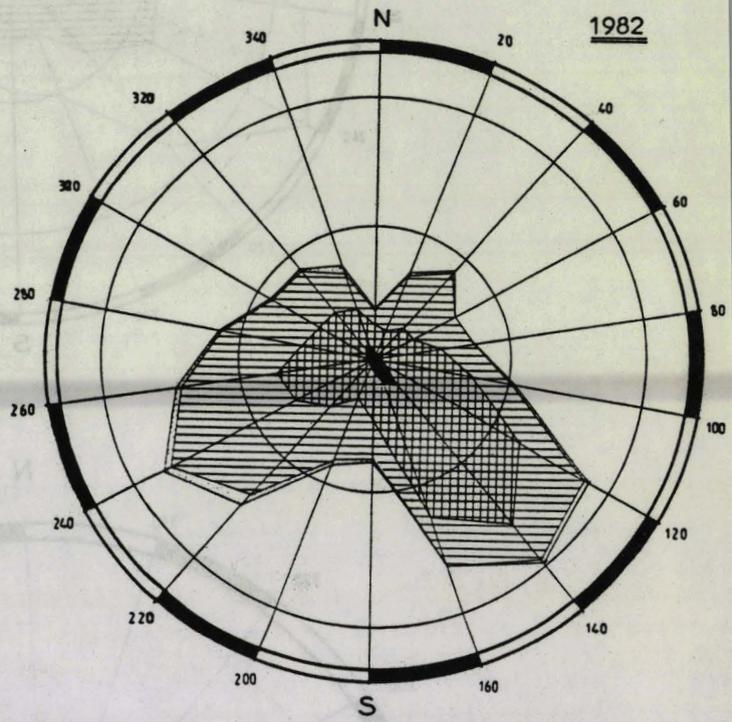
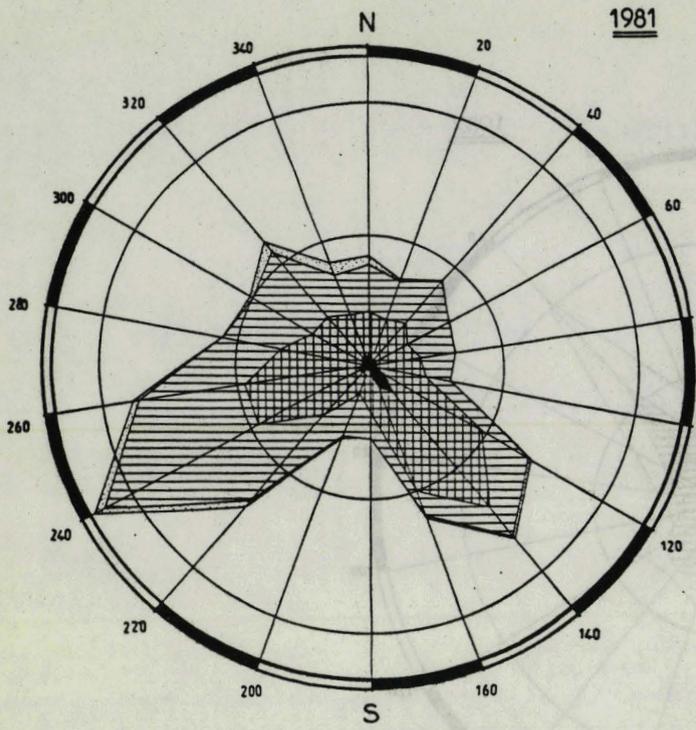


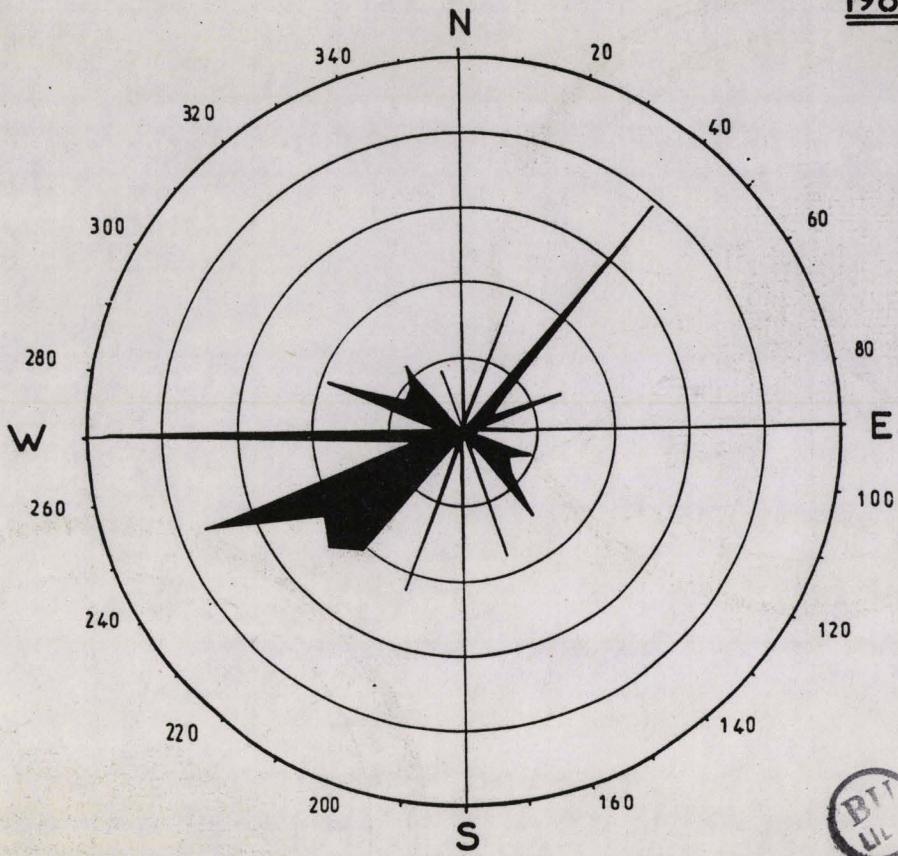
Figure II Direction des vents au bateau-feu de Bassurelle



BU
LILLE

Figure III Direction des vents au Touquet

1982



1983

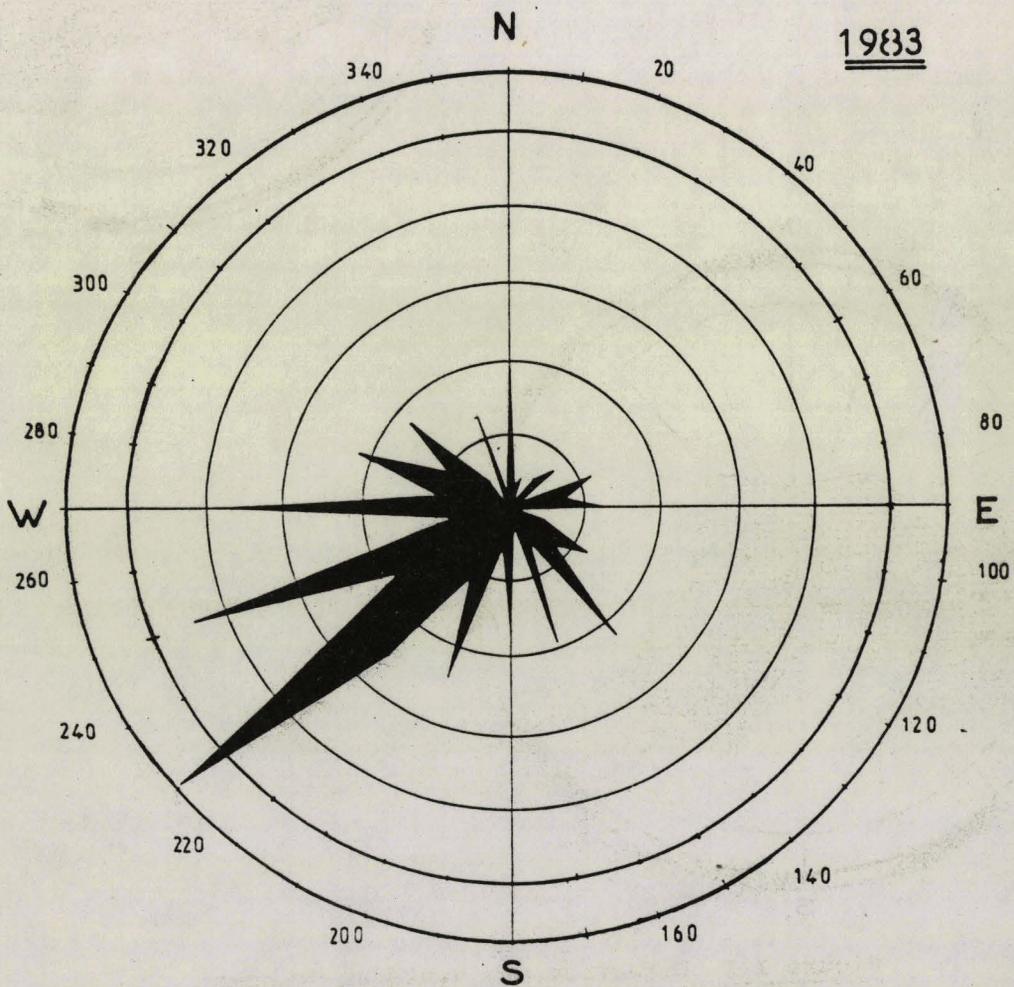


Figure IV Provenance de la houle au bateau-feu de Bassurelle

RESUME

L'étude hydrosédimentaire de l'estuaire de la Canche a été menée de manière pluridisciplinaire, de concert avec l'Institut Pasteur de Lille, grâce à des prélèvements d'eau, de suspensions et de sédiments. Les données granulométriques, minéralogiques et géochimiques permettent de préciser l'évolution morphologique de l'estuaire ainsi que les processus hydrologiques et la dynamique sédimentaire.

La morphologie estuarienne est marquée par un comblement résultant d'apports marins et d'actions anthropiques. Corrélativement l'axe de l'estuaire dérive vers le Nord. La canalisation du chenal par des digues détermine une distribution latérale des lithofaciès. Les principaux sont représentés par le faciès sableux, la slikke et le schorre. L'évolution de la sédimentation est de type "fining up" sur le schorre. Sur les bordures de ce domaine, la sédimentation est liée à la combinaison des actions éoliennes, marines et fluviales. L'analyse chimique de quelques sondages ne montre pas dans son ensemble de grandes variations des teneurs métalliques en Fe, Mn, Zn, Pb, Cu, Cd, Hg, au cours des dernières décennies.

L'estuaire présente une grande surface intertidale. La pénétration rapide de la marée entraîne un important brassage des eaux et interdit toute stratification saline et thermique. En fonction des coefficients de marée la pénétration marine varie sur une dizaine de kilomètres.

Les sédiments de l'estuaire se déplacent essentiellement en suspension. La masse turbide oscille avec la marée et résulte en grande partie d'une remise en suspension au moment du "coup du flot". Dans l'estuaire, le quartz et la calcite en suspension fluctuent en opposition cependant que les argiles fortement brassées, présentent des différenciations faibles d'amont en aval. La calcite est liée à l'intrusion des masses d'eau marines qu'elle permet de caractériser. Les concentrations métalliques décroissent d'amont en aval. Toutefois, les concentrations augmentent dans l'estuaire médian en raison de rejets d'effluents urbains dans cette zone.

MOTS-CLIS : Canche - Picardie - Estuaire - Hydrologie - Matières en suspension - Oligoéléments - Pollution - Sédimentologie.

ABSTRACT

A hydrosedimentary study of the Canche estuary (Eastern borderland of English Channel) has been carried by means of a combined study of water, suspended matter and sediments. Grain size, mineralogical and geochemical data allow to better understand the estuary morphological evolution and the hydrological and sedimentary processes.

The estuarine morphology is characterized by a sedimentation due to sea influx and man actions. Along the time, the estuarine axis moved to the North. The channel artificial channelization led to a peculiar lateral distribution of lithofaciès. The sedimentation is fining up in the schorre. Along this zone, the sedimentation depends on the wind, the sea, and the river control.

The estuary has a large intertidal surfaces. The flood tide induces strong water mixing and prevents any salt and temperature stratification. Between neap-tide (coef. 38) and spring-tide (coef. 117), the upstream limit of salinity intrusion varies on about ten kilometers.

The suspended matter follows the same upstream-downstream migration as the salinity intrusion. The amount of sediment in suspension depends on the upstream intrusion of tide. Suspended quartz and calcite percentages vary in antagonistic way, while clay assemblages show few changes only because of a strong water and sediment mixing. Calcite is related to salt intrusion and constitutes a good marker of a salinity incursion. The concentrations increase, in the middle part of the estuary, because of urban effluent casting up in this zone.

KEY-WORDS : Canche - Picardy - Estuaries - Hydrology - Suspension matter - Oligoelements - Pollution - Sedimentology.