

LABORATOIRE DE GÉOLOGIE MARINE

UNIVERSITÉ DE CAEN

\*\*\*\*



## CONTRAT 83/7163

ENTRE

LE CENTRE NATIONAL POUR L'EXPLOITATION DES OCÉANS  
(IFREMER BREST)

ET

L'UNIVERSITÉ DE CAEN

-----

ÉTUDES HYDROSÉDIMENTAIRES EN BAIE DE SEINE

\*\*\*\*\*

RAPPORT FINAL

C. LARSONNEUR  
Responsable Scientifique

J.-P. AUFFRET  
Maître-Assistant,

J. AVOINE  
Assistant

\*\*\*\*

F2

UNIVERSITÉ DE CAEN

Caen, le 12 juillet 1985

U.E.R. DES SCIENCES DE LA TERRE  
ET DE L'AMÉNAGEMENT RÉGIONAL

Département de Géologie

Esplanade de la Paix  
14032 CAEN CEDEX

Tél. (31) 94.81.40

Poste 3440

Poste 3578

Monsieur Jean-Louis MAUVAIS

ELGMM - IFREMER Brest

REÇU

17 JUIL. 1985

LE ROY

Objet : Contrat 83/7163  
Etudes hydrosédimentaires  
en baie de Seine

Cher Monsieur,

*17 - juillet*  
( Par courrier séparé, je vous adresse en 5 exemplaires notre rapport concernant le contrat 83/7163. Comme promis nous achevons donc le travail pour le début juillet, une bonne affaire de réglée nous permettant de partir plus sereinement en vacances.

Je vous en souhaite bonne réception et vous prie d'agréer l'expression de mes sentiments les meilleurs.



C. LARSONNEUR  
Professeur

LABORATOIRE DE GÉOLOGIE MARINE

UNIVERSITÉ DE CAEN

\*\*\*\*

## CONTRAT 83/7163

ENTRE

LE CENTRE NATIONAL POUR L'EXPLOITATION DES OCÉANS  
(IFREMER BREST)

ET

L'UNIVERSITÉ DE CAEN

-----

ÉTUDES HYDROSÉDIMENTAIRES EN BAIE DE SEINE

\*\*\*\*\*

RAPPORT FINAL

-----

*C. LARSONNEUR*  
*Responsable Scientifique*

*J.-P. AUFFRET*  
*Maître-Assistant,*

*J. AVOINE*  
*Assistant*

\*\*\*\*

Depuis 1981, le laboratoire de Géologie marine de l'Université de Caen participe à la mise en oeuvre d'un programme de recherches pluridisciplinaires sur la baie de Seine. Menés en collaboration avec les équipes d'océanographie, de géochimie, de sédimentologie et de biologie, les travaux accomplis par le laboratoire de Géologie marine concernent les études hydrosédimentaires.

La présente convention s'applique aux campagnes réalisées en 1983-1984 avec le concours du Pluteus II, de la Thalia et d'embarcations locales. Elles portent sur les thèmes suivants :

- étude hydrosédimentaire de la baie des Veys, (1)
- évaluation des apports fluviaux dans l'estuaire de la Seine,
- état d'envasement des fonds de la baie de Seine en 1983,
- apports de l'imagerie fournie par le sonar à balayage latéral à la connaissance de la dynamique sédimentaire en baie de Seine,
- contribution des traceurs radioactifs à l'étude des mouvements sédimentaires en baie de Seine,
- la dynamique sédimentaire dans les estuaires de la baie de Seine et les conséquences sur l'environnement.

L'ensemble de ces travaux et des résultats rapportés antérieurement (contrats 81/6559 et 82/6843) permettent d'aboutir à des conclusions synthétiques sur la dynamique sédimentaire en baie de Seine. -

---

(1) Cette étude a fait l'objet d'un programme particulier de recherches portant sur un an et financé par le Comité Régional des Pêches de Basse-Normandie. Les résultats qui intéressent la conchyliculture locale s'intègrent à l'ensemble des travaux accomplis sur la baie de Seine.

I - ETUDE HYDROSEDIMENTAIRE DE LA BAIE DES VEYS

La baie des Vey's se loge dans l'angle formé par les départements de la Manche et du Calvados à l'Ouest de la baie de Seine. Elle représente une large échancrure du littoral recueillant les eaux de 2 couples de rivières : Vire et Aure à l'Est, Douve et Taute à l'Ouest. Le tracé de ces cours d'eau a été rectifié peu après 1800, à proximité de leur embouchure.

L'un des traits fondamentaux de la baie réside dans le fait que les eaux sont drainées à chaque marée dans 2 chenaux distincts :

- le chenal de Carentan à l'Ouest
- le chenal d'Isigny à l'Est

Au-delà des fosses canalisées, les rivières divaguent entre les bancs jusqu'au niveau des plus basses mers. Cette disposition morphologique bien visible sur photographie aérienne à marée basse (fig.1) oblige à subdiviser la baie en 2 parties : occidentale et orientale.

1- CARACTERISTIQUES GENERALES.

Le marnage atteint environ 6 m en vive eau à Grandcamp. L'étale de pleine mer est plus longue que l'étale de basse-mer. Au large de la baie, les courants de marée sont alternatifs et parallèles au trait de côte. Ils s'orientent vers l'ESE au flot, vers l'WNW au jusant. Leur vitesse décroît du large vers la côte, provoquant ainsi un affinement des dépôts depuis le Nord vers le Sud dans cette partie occidentale de la baie de Seine (Le Gall et Larsonneur, 1972). Au sein de la baie des Vey's, les courants de marée se trouvent chenalisés et prennent une orientation sensiblement Nord-Sud. Parallèlement, leurs vitesses s'accroissent de l'aval vers l'amont, sous l'effet de la chenalisation avant de faiblir de nouveau.

Vers l'intérieur des terres, le cours des rivières est barré par des portes à flot : à Isigny sur l'Aure, au pont du Vey sur la Vire, à la barquette sur la Douve et à Carentan sur la Taute. Ces portes à flot se ferment automatiquement lorsque l'onde de flot les atteint. Parfois, un léger décalage intervient dans la fermeture, permettant ainsi à des eaux saumâtres de remonter vers l'amont. Les portes se maintiennent fermées pendant tout le flot et à pleine mer ; elles ne s'ouvrent que lorsque le jusant est bien

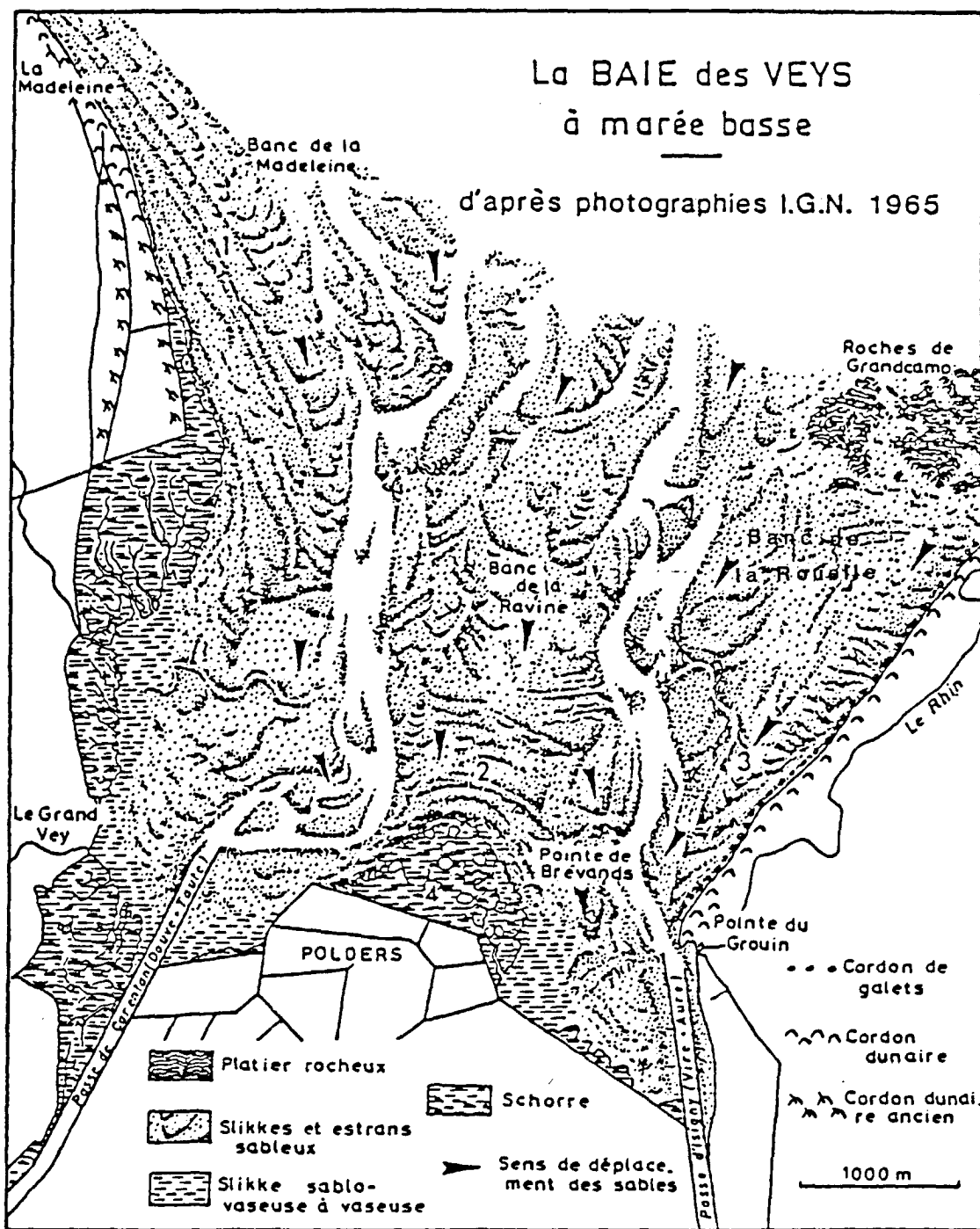


Fig. 1— Morphologie de la baie des Vey.

1 : flèches sableuses parallèles au rivage; 2 : cordons sableux concentriques enveloppant la pointe de Brevands; 3 : crêtes sableuses disposées obliquement par rapport au trait de côte indiquant une progression des sédiments vers l'intérieur de la baie; 4 : schorre de la pointe de Brevands ponctué par les mares des gabions.

(in LE GALL et LARSONNEUR, 1972)

établi et que les niveaux d'eau de part et d'autre sont équivalents. La présence des portes à flot ne permet donc pas d'observer l'amortissement naturel de l'onde de flot dans les rivières ; ainsi jouent-elles un rôle important dans l'hydrodynamisme des cours d'eau en bloquant certains de leurs mouvements.

Compte-tenu du cadre morphologique, seuls les vents de secteur nord à nord-est ont une action prépondérante sur les transports sédimentaires dans la baie, qu'il s'agisse de sables littoraux (transports par les houles et par le vent) ou de matières en suspension (remises en suspension par les houles).

Les dépôts sédimentaires de la baie sont assez monotones. De grandes étendues sableuses s'étendent sur la majeure partie des fonds et s'organisent en bancs (fig.1) :

- banc de la Madeleine, à l'Ouest, entre Utah beach et le chenal de Carentan (quelques bouchots à moules sont installés dans cette zone),
- banc de la Ravine entre les chenaux de Carentan et d'Isigny, au Nord de la pointe de Brévands.
- banc de la Rouelle à l'Est, entre le chenal d'Isigny et le littoral. Ce banc est relayé vers le Nord par les roches de Grandcamp. C'est sur ces 2 dernières unités que sont installés les parcs conchylicoles les plus étendus.

En bordure du littoral et vers l'intérieur de la baie, les sables laissent la place à des sédiments plus fins, vaseux, qui se décantent sur les slikkes, recouvertes à chaque marée, ou plus haut sur les schorres recouverts uniquement lors des fortes marées. Le schorre (ou herbu) le plus vaste est celui situé au Nord de la pointe de Brévands ; ensuite viennent ceux, moins étendus, du Grand Vey et d'Houesville.

La configuration actuelle de la baie est le résultat d'importants travaux de poldérisation accomplis depuis 1800. Ainsi de vastes surfaces de terres agricoles ont-elles été conquises sur les terrains inondables ; dans l'axe de la baie, l'avancée des terres gagnées sur la mer est d'environ 3000 m. Les dernières conquêtes ont été réalisées ces dernières années : polders de Brévands-Est et de Houesville, après 1970.

## 2- LA COUVERTURE SEDIMENTAIRE DE LA BAIE ET SON EVOLUTION SAISONNIERE.

La baie des Veys s'intègre dans la partie occidentale de la baie de Seine où les dépôts s'ordonnent en une série complète de zones sédimentaires disposées radialement par rapport à la région de St Vaast-la-Hougue.

La disposition des sédiments dans la baie obéit, du Nord vers le Sud à la diminution des facteurs hydrodynamiques : l'énergie disponible décroît en effet depuis l'isobathe Om au large des chenaux jusqu'au fond de la baie : Houesville, le Grand Vey, la pointe de Brévands et la pointe du Grouin. En conséquence, les dépôts s'affinent du Nord au Sud et passent, à partir des sablons mis en place par dérive littorale, aux sables vaseux, vases sableuses et vases des schorres.

La fraction calcaire des sédiments est surtout organogène : débris coquilliers de mollusques essentiellement ; elle représente 20 à 30 % des sables, jusqu'à 40 % des dépôts plus fins. Elle est sensiblement accrue au niveau des parcs conchylicoles.

La fraction pélitique rend compte des particules dont le diamètre est inférieur à 0,05 mm (50  $\mu$ m) ; elle comprend des silts (sablons extrêmement fins) et des argiles.

La répartition des sédiments dans la baie est relativement simple. La figure 2 montre les différents faciès que l'on peut y rencontrer en saison estivale : la majeure partie de la baie est constituée de sablons (grain moyen compris entre 0,1 et 0,2 mm). Ils s'étendent d'Utah Beach à Maisy (à l'exception des hauts de plage de granulométrie supérieure), tapissent le fond des chenaux et forment les grandes unités que sont le banc de la Madeleine à l'Ouest, le banc de la Ravine au centre et le banc de la Rouelle à l'Est où sont installés, en partie, les parcs conchylicoles de Geffosses-Maisy.

Plus à l'intérieur de la baie, vers le Sud-Ouest, et faisant suite aux sablons, nous trouvons des sables vaseux (entre 0,05 et 0,1 mm). Ceux-ci passent ensuite à des vases sableuses (contenant de 25 à 75 % d'éléments fins) : à l'Est de la pointe de Brévands et le long du littoral Ouest.

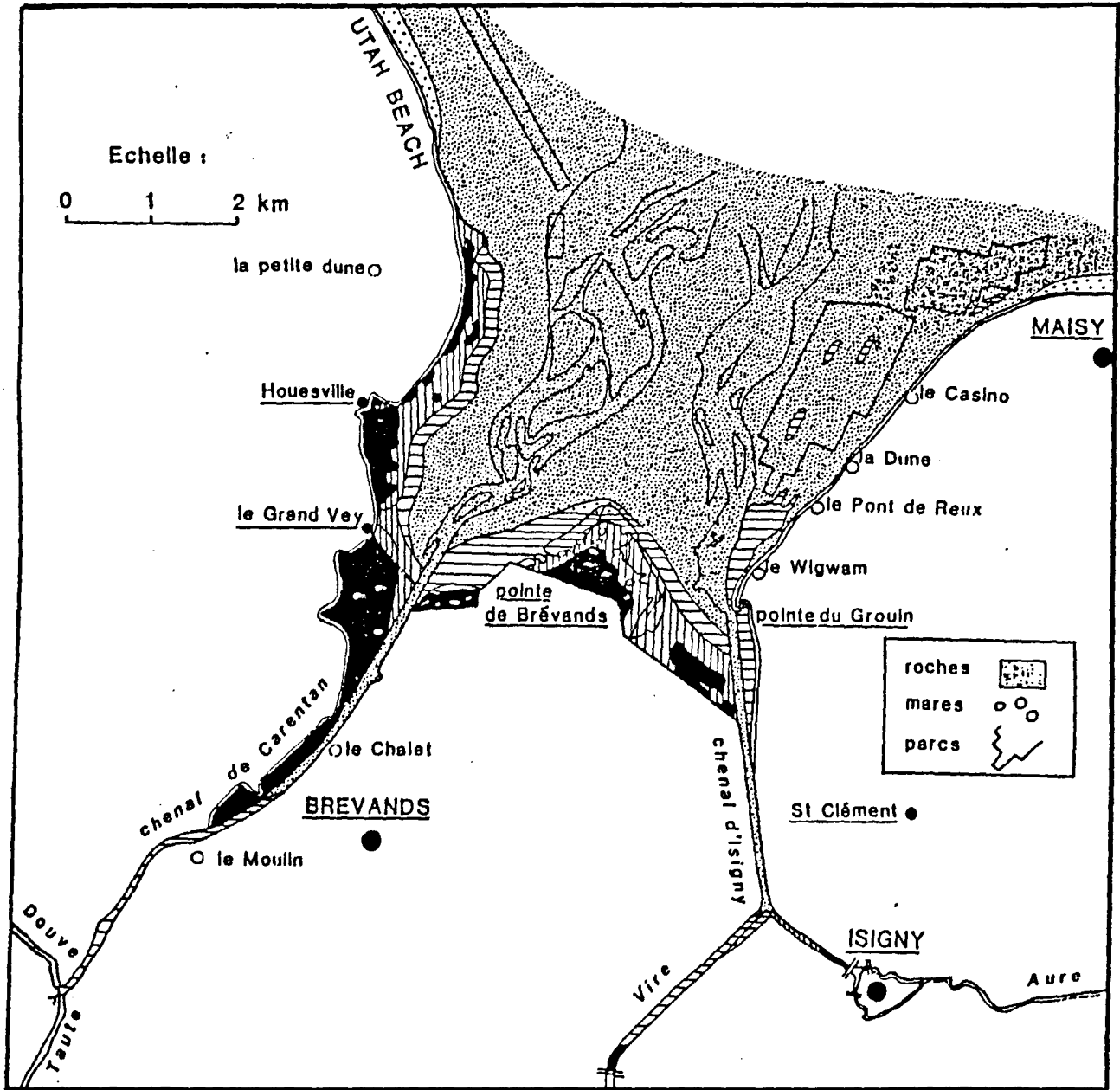


**BAIE des VEYS**

**COUVERTURE SEDIMENTAIRE**

ETIAGE - SEPTEMBRE 1982 -

**NATURE DES SEDIMENTS**








-  sable fin
-  vase sableuse
-  sablon
-  vase
-  sable vaseux

Fig. 2

L. Dubrulle  
Labo. géologie marine Caen.

Enfin dans les zones très abritées, où les agents hydrodynamiques n'ont que peu d'action, existent des vases pures (plus de 75 % d'éléments de taille inférieure à 0,05 mm). Elles constituent précisément les schorres de Houesville et du Grand Vey, ainsi que le noyau du schorre de Brévands et les petits schorres latéraux de la pointe de Brévands, accolés aux digues des polders.

Dans la partie orientale de la baie, on n'observe pas de vases, ni de vases sableuses ; des sables vaseux existent cependant de part et d'autre de la pointe du Grouin, entre le haut de plage et le chenal d'Isigny. Quelques placages de sables vaseux sont décelables également sur les parcs conchylicoles sous certaines tables : ces dépôts sont très peu épais, mobiles au rythme des marées et difficilement cartographiables. La représentation que nous en donnons sur la carte en est schématique.

Signalons également l'existence en haut de plage d'un cordon de galets calcaires entre Maisy et la Pointe du Grouin, mis en place sous l'action de la dérive littorale orientée NE-SW.

En période hivernale, les crues engendrent un envasement général du littoral ouest, du fond de la baie et des chenaux. La zone des parcs, à l'Est, ne subit que des influences modérées, s'agissant d'un domaine de moyenne à haute énergie où les dépôts fins ne peuvent que difficilement se maintenir.

D'après les résultats acquis en crue et en étiage, l'évolution de la couverture sédimentaire s'effectue de la manière suivante : durant la période estivale (apports faibles) des remises en suspension se produisent, remobilisant des particules fines et les redistribuant vraisemblablement vers les zones internes, comme cela a été mis en évidence dans l'estuaire de l'Orne. Des désenvasements se produisent dans les zones les plus exposées entraînant le retour à la situation d'étiage relevée en septembre 1982. Nous pensons que cette situation d'étiage est la situation d'équilibre dans les conditions hydrodynamiques en présence. La crue des rivières modifie brusquement cet état par transit de dépôts fins vers l'aval, l'état d'équilibre est ensuite progressivement rétabli.

### 3- LE REGIME HYDROSEDIMENTAIRE DE LA BAIE.

Le régime hydrosédimentaire de la baie des Veys a été étudié de la manière suivante :

- campagne de prélèvements en coupes synoptiques, dans les différentes rivières, en période d'étiage et de vive eau, à basse mer et à pleine mer,
- campagnes de prélèvements en stations fixes, pendant la totalité d'un cycle de marée, dans les 2 couples de rivières, en vive eau et en morte eau, d'une part en étiage, d'autre part en crue (fig.3).

Des mesures de courants, de température, de salinité et de teneurs en matières en suspension ont été effectuées. En ce qui concerne les débits fluviaux ils ont été calculés pour la Vire, à chaque campagne, au pont du Vey. Ils se situaient entre 40 et 50 m<sup>3</sup>/s en période de crue et entre 4 et 5 m<sup>3</sup>/s en période d'étiage. C'est en vive eau et en crue que les résultats sont les plus tranchés. Les figures 4 et 5 donnent respectivement, dans le chenal d'Isigny, la répartition des salinités et la distribution des charges en matières en suspension.

L'ensemble des campagnes de mesures et de prélèvements permet d'aboutir aux conclusions suivantes :

A marée montante, le coup de flot se traduit par un mascaret qui peut atteindre une hauteur de 80 cm pour une vitesse voisine de 2,4 m/s dans l'axe des chenaux. Les courants de jusant sont supérieurs aux courants de flot sachant qu'un débit élevé des cours d'eau renforce cette différence. Les vitesses résiduelles sont généralement dirigées vers l'aval et augmentent lorsque le débit s'accroît. Des inversions vers l'amont de la circulation résiduelle apparaissent pour les stations les plus au large, près du fond, en période de crue et de morte eau.

La salinité des eaux dans les chenaux dépend étroitement des conditions hydrodynamiques régnant dans la baie. En période de crue, l'intrusion saline est repoussée vers l'aval à basse mer, des eaux dessalées s'écoulent au jusant sur la partie méridionale des parcs conchylicoles et baignent, au moins temporairement, les coquillages. En période d'étiage, la dessalure des eaux est moindre, le front de salinité demeure en amont

# BAIE des VEYS

## POINTS FIXES

Localisation des points de prélèvement

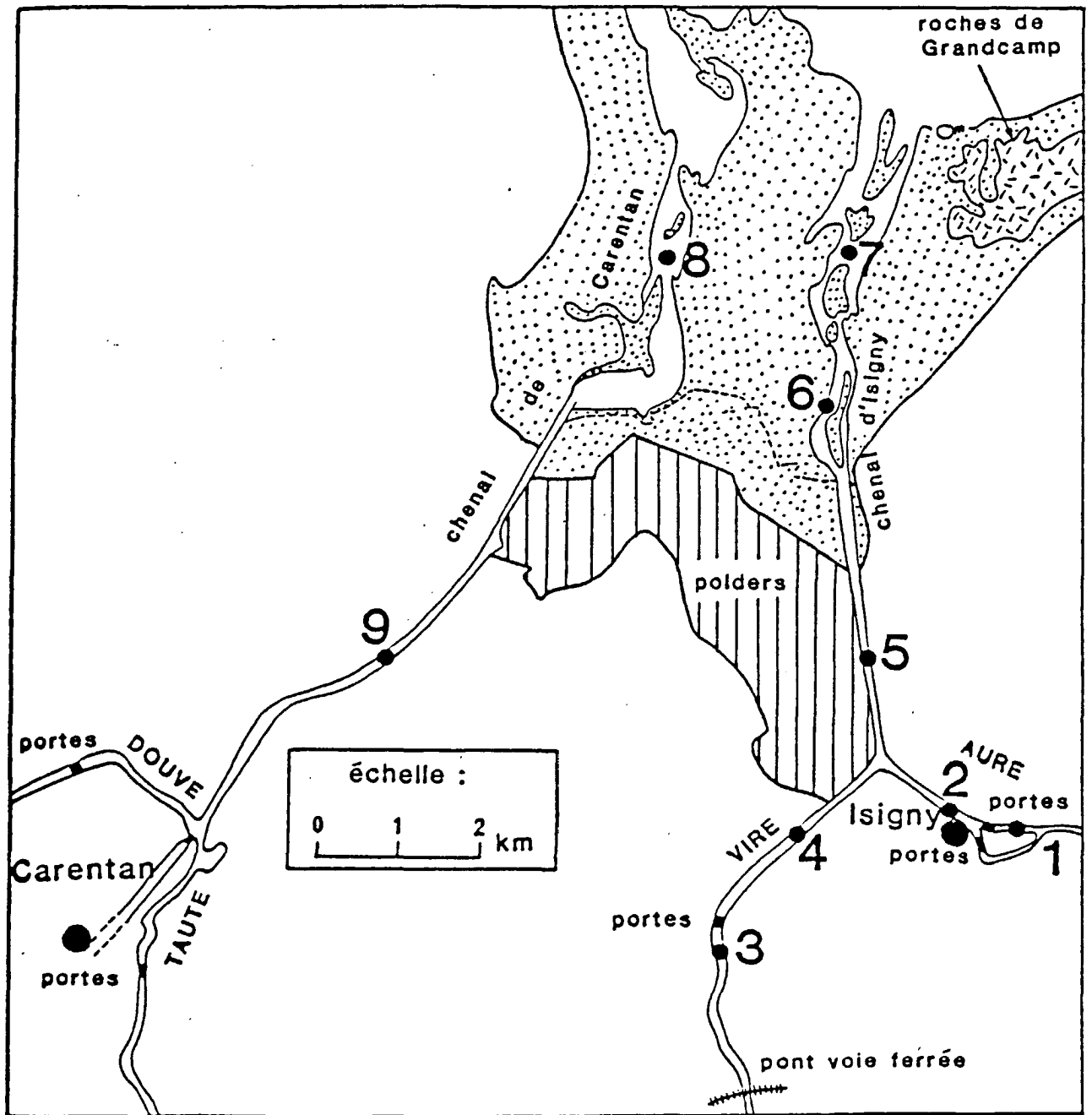


Fig. 3

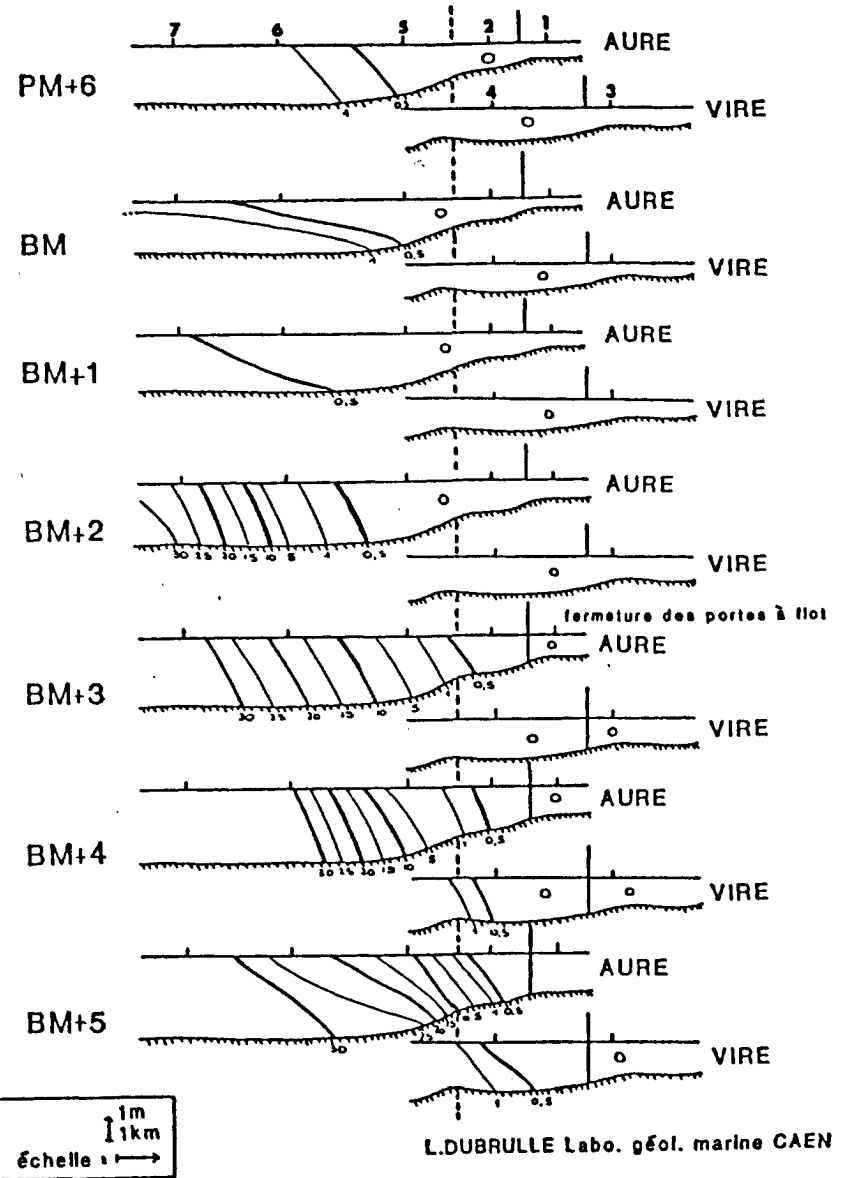
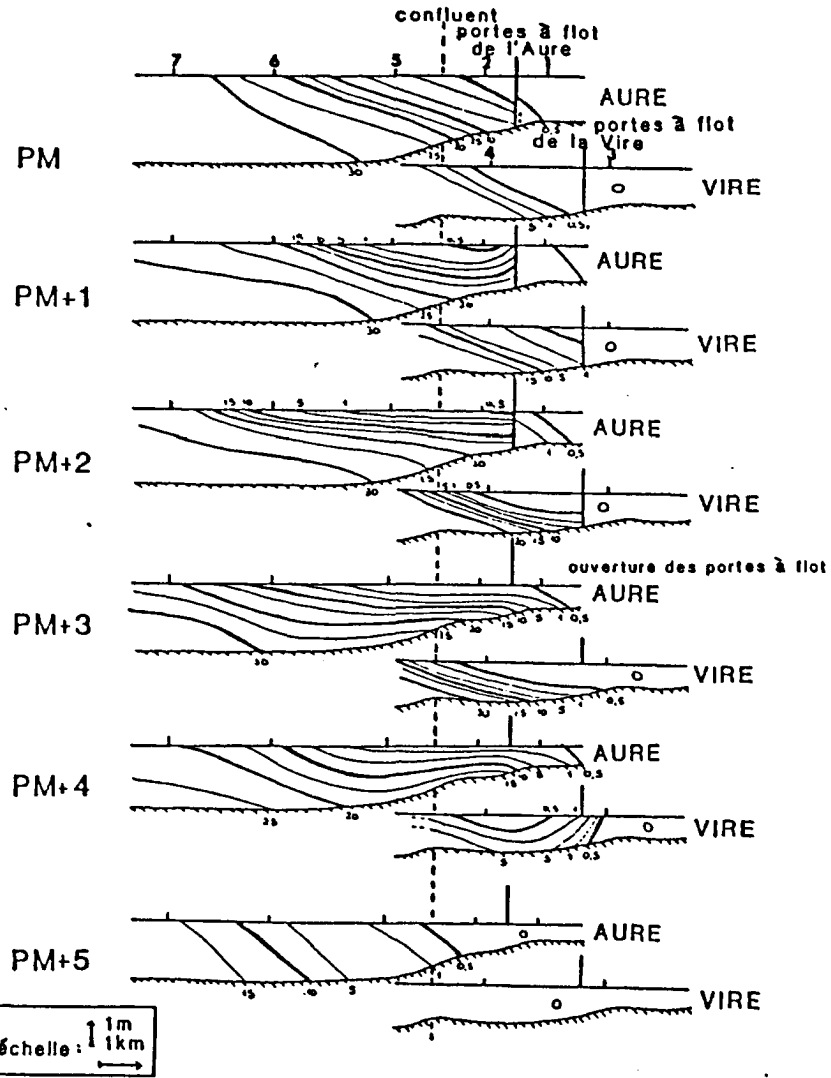
L. Dubrulle, labo. Géol. Marine CAEN.

partie orientale

Salinités (‰)

CRUE

VIVE EAU



L.DUBRULLE Labo. géol. marine CAEN

Fig. 4

BAIE des VÉYS

POINTS FIXES OCTOBRE 1982

CHENAL D'ISIGNY

M.E.S.,V.E.

partie orientale

Teneurs en matières en suspension (g/l)

VIVE EAU

CRUE

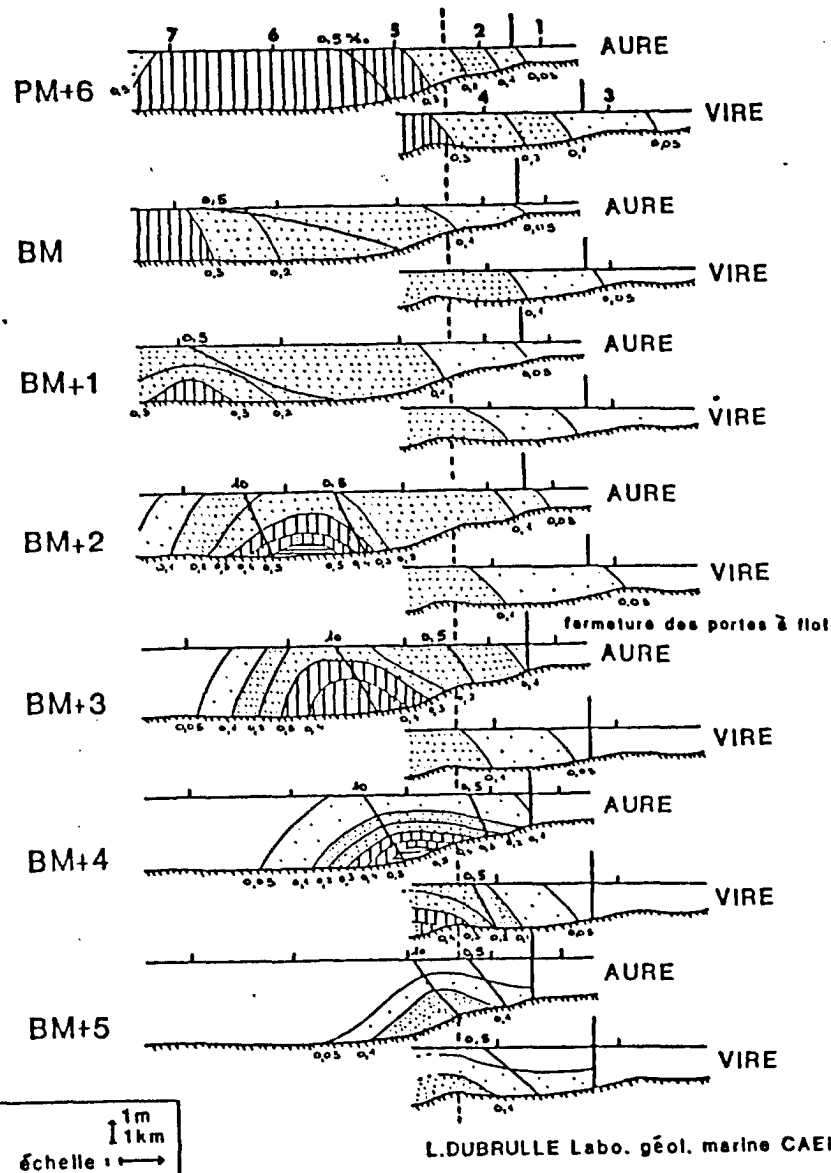
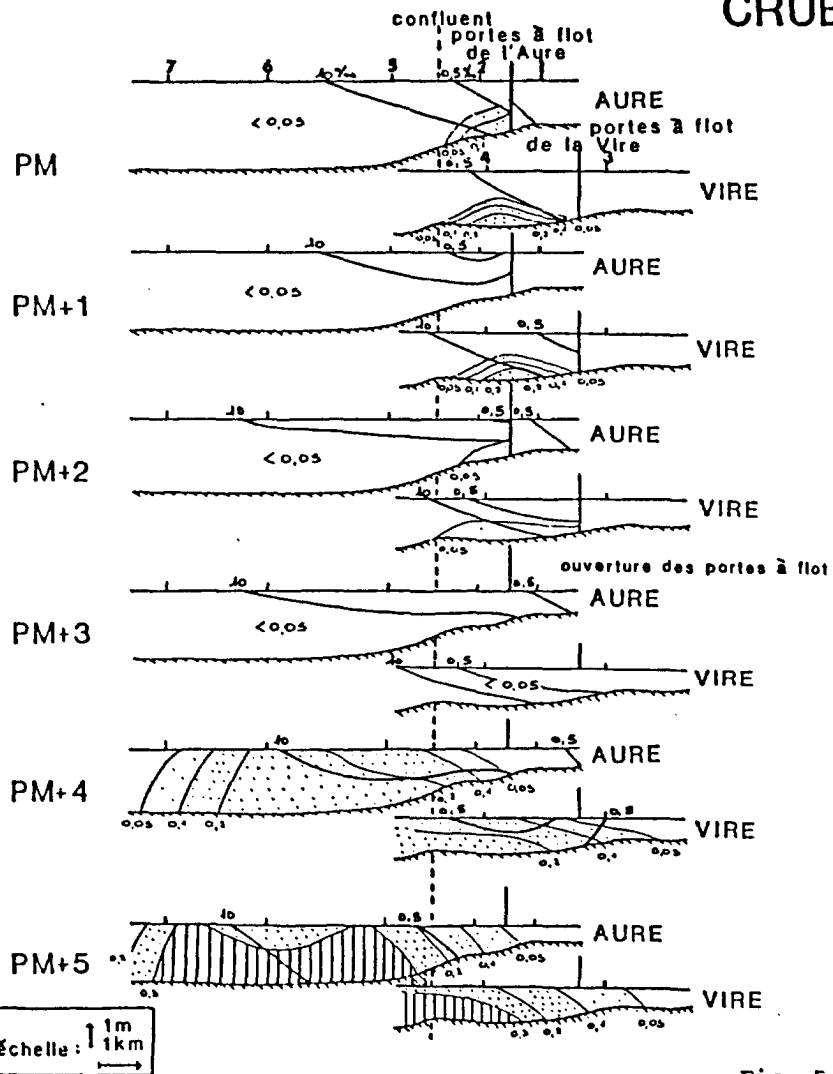


Fig. 5

L.DUBRULLE Labo. géol. marine CAEN

des portes à flot pendant presque toute la marée. Les chenaux présentent en permanence des eaux relativement salées.

Le déplacement longitudinal de l'intrusion saline au cours de la marée varie de 3 à 8 km selon le débit et le coefficient de marée ; c'est en crue et en vive eau que les valeurs sont les plus élevées.

Le temps de renouvellement des eaux douces dans les chenaux a par ailleurs été calculé. Il est très court en vive eau et en crue (d'une durée de l'ordre d'une marée descendante). Il est par contre plus long en période d'étiage, de 30 heures en morte eau à une soixantaine d'heures en vive eau. Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que celles obtenues dans l'Orne ; elles sont plus faibles que celles de la Seine compte-tenu des dimensions de l'estuaire.

Dans les chenaux, la charge turbide atteint au maximum 0,2 g/l en étiage, 0,5 g/l en crue ; elle varie selon le moment de la marée, les coefficients de marée et les débits des rivières.

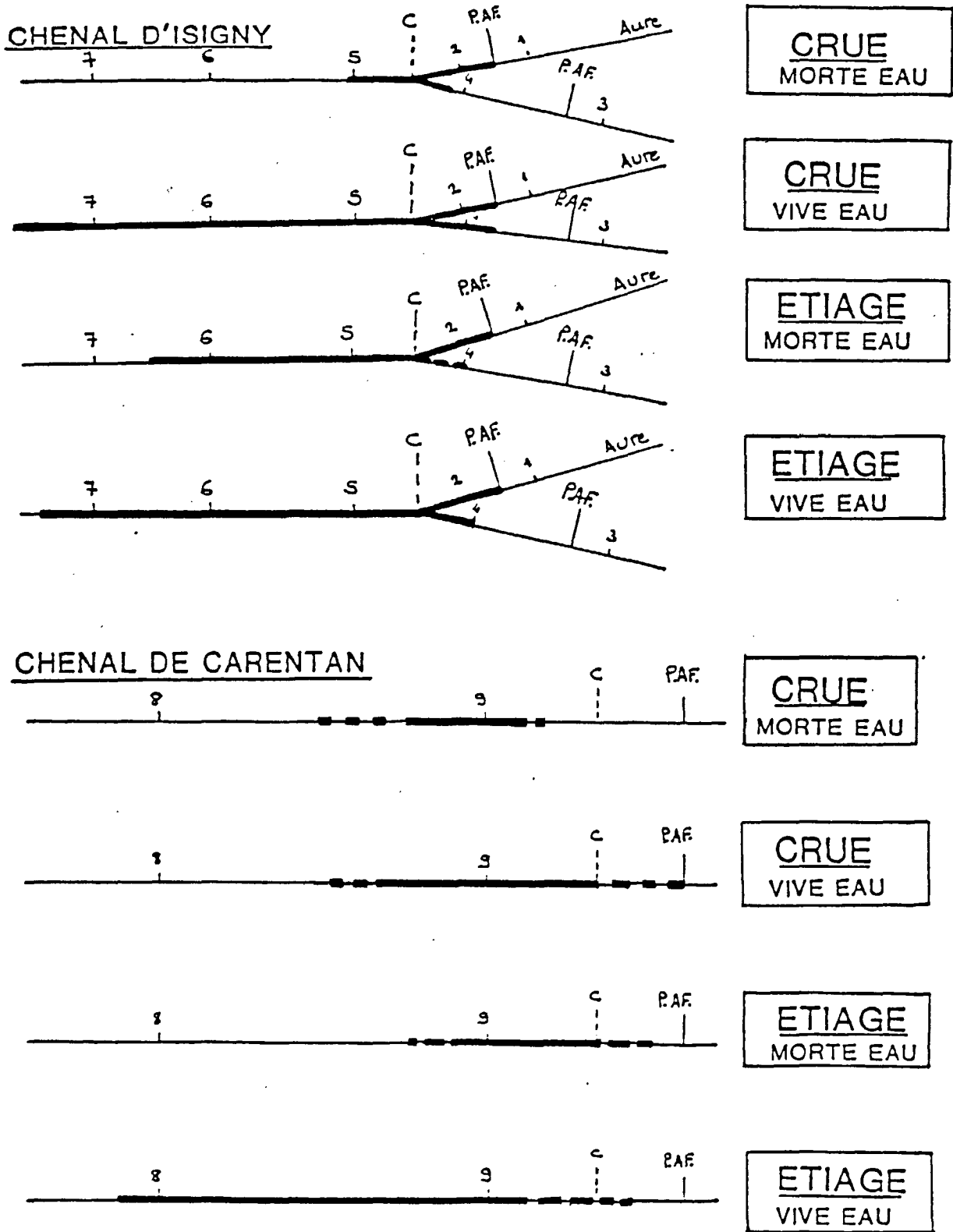
Le matériel fin en suspension s'organise en lentilles turbides ou BOUCHONS VASEUX qui oscillent dans les chenaux (en étiage, il existe 2 bouchons vaseux, l'un mobile sous l'action des courants de marée, l'autre stable au niveau des confluences des cours d'eau ; les 2 bouchons fusionnent puis se décantent à PM).

Les bouchons vaseux ont un caractère temporaire : ils apparaissent par REMISE EN SUSPENSION DES FONDS VASEUX SOUS L'ACTION DES COURANTS et se décantent totalement aux étales : L'INFLUENCE DES MAREES EST DONC PREPONDERANTE sur la dynamique des suspensions, ce qui caractérise les estuaires à fort marnage. Des résultats comparables se retrouvent également dans l'Orne et dans la Seine.

L'ampleur du déplacement longitudinal du bouchon vaseux est variable selon les conditions hydrodynamiques. Sur la figure 6 ont été soulignées d'un trait épais les portions de chenal intéressées par le noyau du bouchon vaseux ; les distances (en km) de ces déplacements sont données dans le tableau C.

Nous constatons sur la figure 6 que l'AMPLITUDE MAXIMALE DE DEPLA-

SCHEMA MONTRANT LE DEPLACEMENT LONGITUDINAL  
DU NOYAU DU BOUCHON VASEUX EN DIFFERENTES  
CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES



ECHELLE

→  
1 km

Fig. 6

L. DUBRULLE

Labo de Géologie Marine, Caen



CEMENT est atteinte dans le chenal d'Isigny en VIVE EAU DE CRUE, période durant laquelle une fraction du bouchon vaseux dépasse la bouée n°6 et s'étend au large de la baie. Pendant l'étiage, l'oscillation longitudinale du bouchon vaseux en vive eau est presque aussi vaste qu'en crue ; CE RESULTAT MET EN EVIDENCE L'INFLUENCE DETERMINANTE DES COURANTS DE MARÉE SUR LA DYNAMIQUE DES SUSPENSIONS dans les chenaux et l'action plus réduite du débit des cours d'eau qui influe toutefois sur la concentration des bouchons vaseux en augmentant les apports en crue. L'amplitude de déplacement du bouchon varie surtout entre la morte eau et la vive eau ; cependant, quelles que soient les conditions hydrodynamiques, les portes à flot d'Isigny bloquent le bouchon vaseux à l'amont du chenal.

Les bouchons vaseux se décantent aux étales et provoquent le dépôt de sédiments fins sur les fonds.

En résumé, le pôle fluvial agit dans la baie par l'intermédiaire du débit des rivières, plus ce dernier croît, plus la charge turbide augmente dans les chenaux par apports et remises en suspension des dépôts fins de leur lit. Le pôle marin se manifeste au travers des courants de marée et des houles. Les courants de marée provoquent des mélanges eaux douces - eaux salées au niveau des chenaux et de l'ensemble de la baie, notamment sur les parcs. Ils remobilisent le matériel déposé d'autant plus intensément que la vitesse augmente. Ces différents facteurs régissent le couple érosion - sédimentation et agissent sur l'alternance envasement - désenvasement à l'échelle saisonnière.

Les eaux sont plus chargées en crue qu'en étiage, en vive eau qu'en morte eau, en période turbulente que par beau temps. Des envasements se produisent dans les parties internes de la baie jusqu'aux premiers parcs, l'hiver ; des désenvasements s'effectuent en été.

Cette étude montre donc clairement que les actions de poldérisation encore menées vers 1970, se révèlent aujourd'hui très défavorables au développement de la conchyliculture et qu'il est sans doute impossible de revenir en arrière. Il est évident que toute emprise nouvelle sur les quelques vasières restantes EST A PROSCRIRE. Cet exemple de ce que l'on n'aurait pas dû faire - principalement les derniers enclos - devrait servir d'enseignement, sachant qu'aujourd'hui encore, de nombreux milieux du même type (vasières, zones humides, havres) sont l'objet de divers projets d'aménagement. Il convient surtout de ne pas hypothéquer l'avenir.

## II- EVALUATION DES APPORTS FLUVIATILES DANS L'ESTUAIRE DE LA SEINE

L'activité économique et l'urbanisation concentrées sur le bassin versant de la Seine sont à l'origine d'importants rejets s'ajoutant aux apports naturels. Un suivi régulier a permis d'estimer pour ce fleuve, principal exutoire de la baie de Seine, les apports en termes de débit liquide, de charge solide et de pollution métallique. Cette investigation s'avère indispensable, notamment pour l'établissement de bilans sédimentaires permettant d'expliquer l'origine des matériaux déposés dans l'estuaire de la Seine et pour le calcul du temps de résidence des polluants.

### 1 - DEBIT LIQUIDE ET DEBIT SOLIDE

#### 1.1. - Débit liquide

Les mesures sont effectuées au barrage de Poses, 160 km en amont de l'embouchure. L'examen des débits moyens calculés annuellement de 1960 à 1984 montre des variations notables d'une année sur l'autre (fig. 7). Durant cette période, la moyenne annuelle a été de 435 m<sup>3</sup>/s, avec des extrêmes de 240 m<sup>3</sup>/s en 1964 et de 625 m<sup>3</sup>/s en 1983. En régime tempéré humide, le débit liquide maximal s'observe en période hivernale et printanière, les crues se produisant généralement entre décembre et avril. Les débits instantanés dépassent exceptionnellement 2.000 m<sup>3</sup>/s lors des crues et sont de l'ordre de 100 m<sup>3</sup>/s en étiage (fig. 8 A).

#### 1.2. - Charge solide

Dans les rivières soumises à un climat tempéré, les apports sédimentaires se font essentiellement en suspension, le charriage restant très subordonné (Müller et Förstner, 1968). De nombreux travaux ont montré que la charge solide est généralement bien corrélée avec le débit fluvial, le transport sédimentaire étant beaucoup plus important en crue qu'en étiage (Al - Jabbari et al, 1980 ; Milliman, 1981 ; Müller et Förstner, 1968) : dans le cas de la Seine, une précédente étude basée sur des données incomplètes avait montré une corrélation identique (Avoine, 1981). Un suivi quotidien entrepris au niveau du déversoir du barrage de Poses a permis de préciser cette relation. Le choix du site a été dicté, d'une part par la

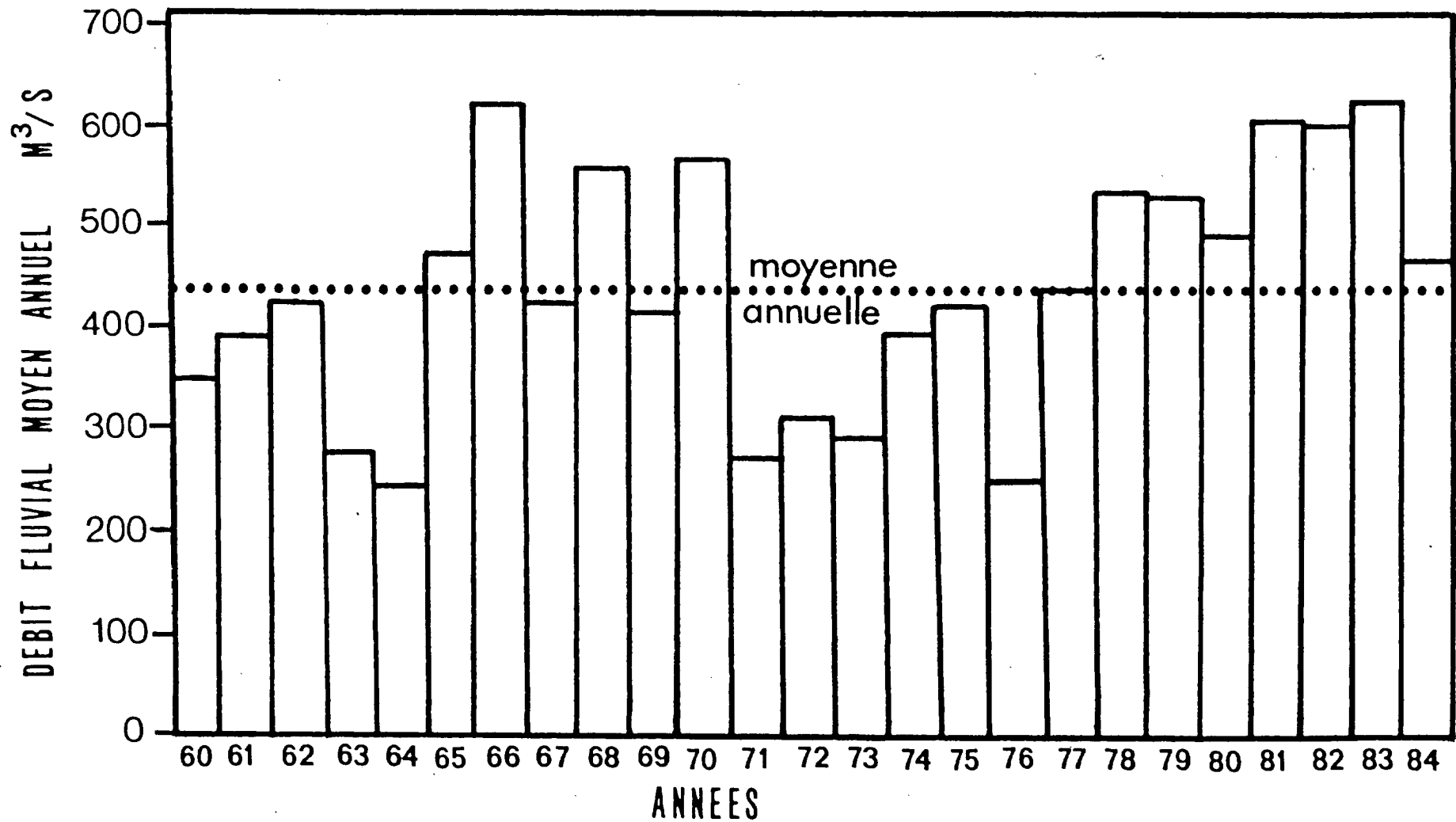


Fig.7-DEBIT LIQUIDE MOYEN MESURE A POSES DE 1960 A 1984

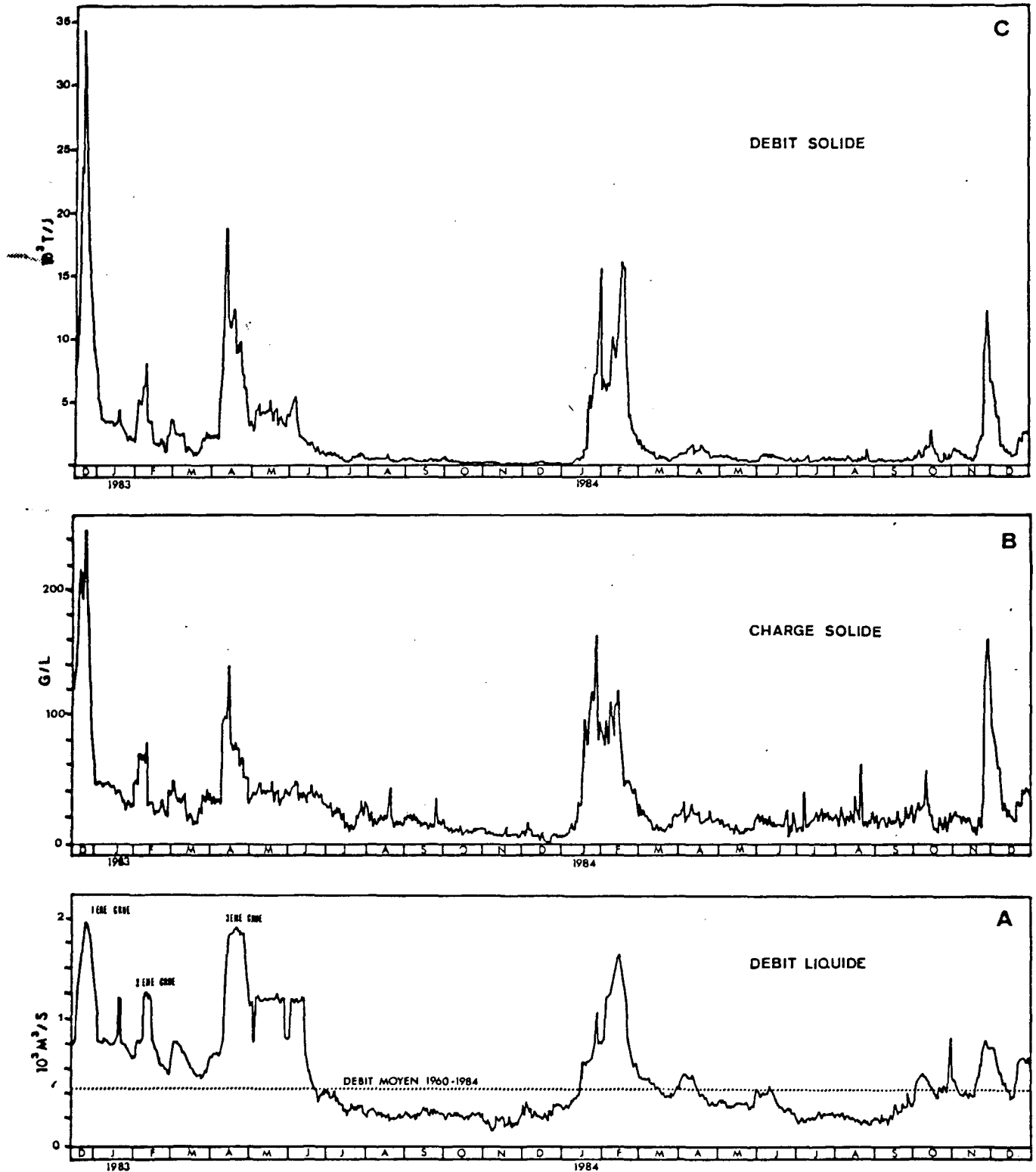


FIG.8-EVOLUTION JOURNALIERE A POSES DU DEBIT LIQUIDE (A), DE LA CONCENTRATION EN M.E.S. (B) ET DES APPORTS SOLIDES (C) DE DECEMBRE 1982 A DECEMBRE 1984

nécessité de s'affranchir des fluctuations de la charge solide, sous l'influence des courants de marée, dans la partie aval de la rivière soumise à la marée dynamique, d'autre part pour disposer parallèlement de mesures du débit fréquentes et sûres.

Au cours du suivi, de décembre 1982 à décembre 1984, les concentrations en matières en suspension (M.E.S.) ont varié de 3,3 mg/l à 267 mg/l (fig. 8 b). L'ensemble des résultats, au total 750 mesures, et les débits liquides correspondant sont reportés sur la figure 9. Malgré une certaine dispersion des valeurs, il existe une relation évidente entre les deux paramètres. Une observation plus approfondie montre que la charge solide atteint un maximum durant la phase ascendante des crues, comparativement à celle anormalement faible mesurée durant les maxima de débit et lors de la phase descendante des crues. En faisant abstraction de ces dernières valeurs, la relation entre la charge solide  $C_S$  et le débit fluvial  $Q$  est une droite dont l'expression dans une échelle logarithmique est :

$$C_S (\text{à Poses}) = 0,01 \cdot Q^{1,66} \quad (1)$$

Afin de préciser la relation entre la concentration en M.E.S. et le débit liquide durant les crues, la figure 10 donne à titre d'exemple les courbes individuelles correspondant aux crues successives de l'hiver 1982-83. Ces courbes forment dans les trois cas une boucle d'hystérésis, la charge solide maximale précédant le maximum de débit liquide, phénomène décrit dès 1935 par Hjülstrom dans plusieurs rivières, et plus récemment par Milliman (1980) et Wood (1977). Par ailleurs, les plus fortes concentrations se rencontrent lors de la première crue, après une longue période de faible débit. Lors des crues suivantes, les teneurs en M.E.S. sont beaucoup plus faibles, d'autant plus que l'intervalle séparant deux crues successives est court, respectivement 39 jours et 55 jours dans l'exemple présenté. Des observations comparables ont été faites par Al - Jabbari et al (1980) et Milliman (1980). Les mécanismes entrant en jeu sont décrits par Wood (1977). Selon cet auteur, le phénomène d'hystérésis caractérise un apport de particules correspondant à un épuisement total du stock sédimentaire disponible en quelques jours au début des crues. La reconstitution de ce stock demande du temps et, s'il y a plusieurs crues successives, le matériel épuisé ne se réaccumule pas. Ainsi la charge solide reste-t-elle faible, d'autant plus que les crues sont rapprochées. Ce schéma s'applique parfaitement à la Seine et correspond au modèle de la terminologie de Wood (1977).

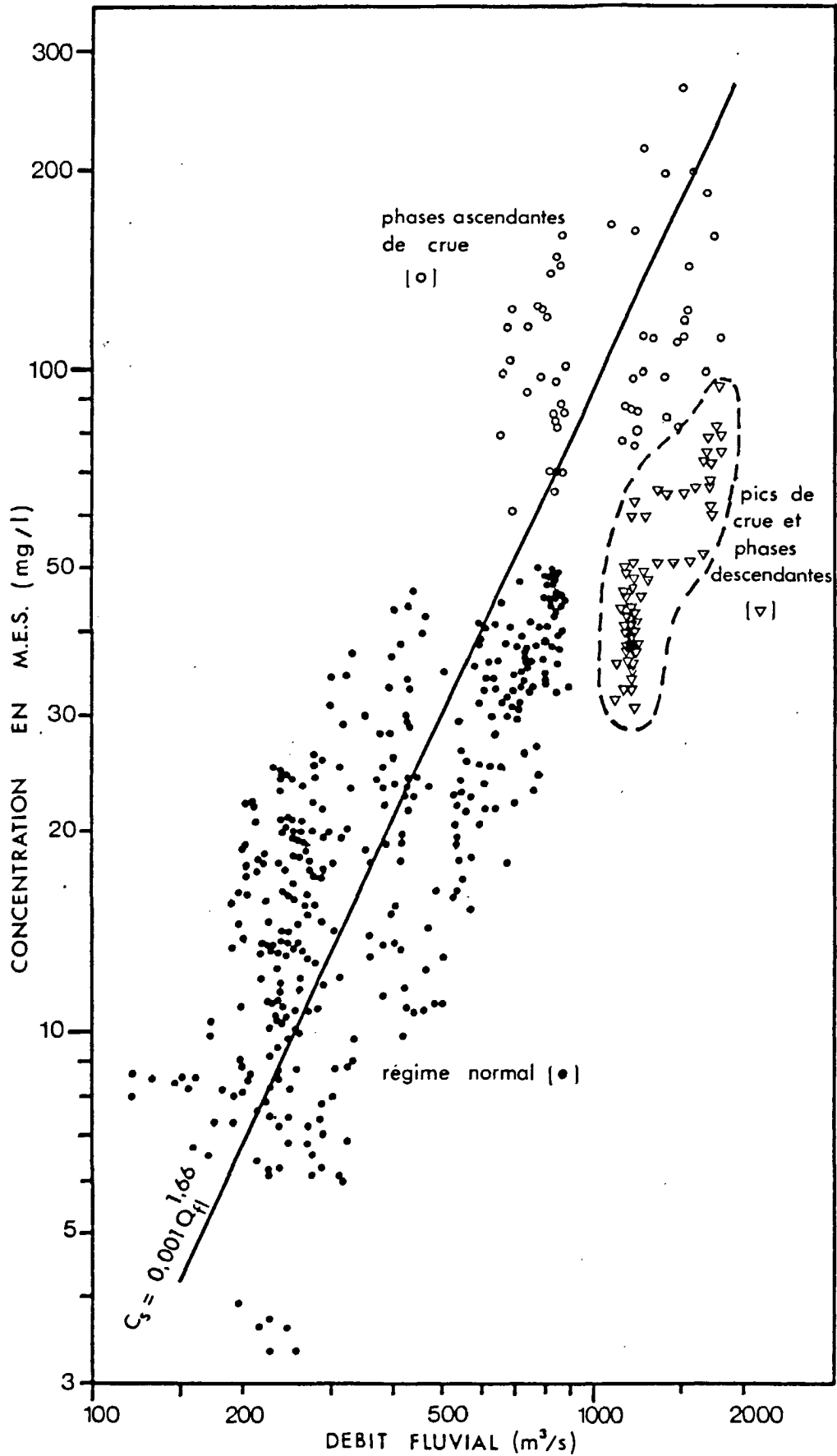


FIG.9-RELATION ENTRE LA CHARGE SOLIDE ET LE DEBIT FLUVIAL A POSES. MESURES DE DECEMBRE 1982 A DECEMBRE 1984

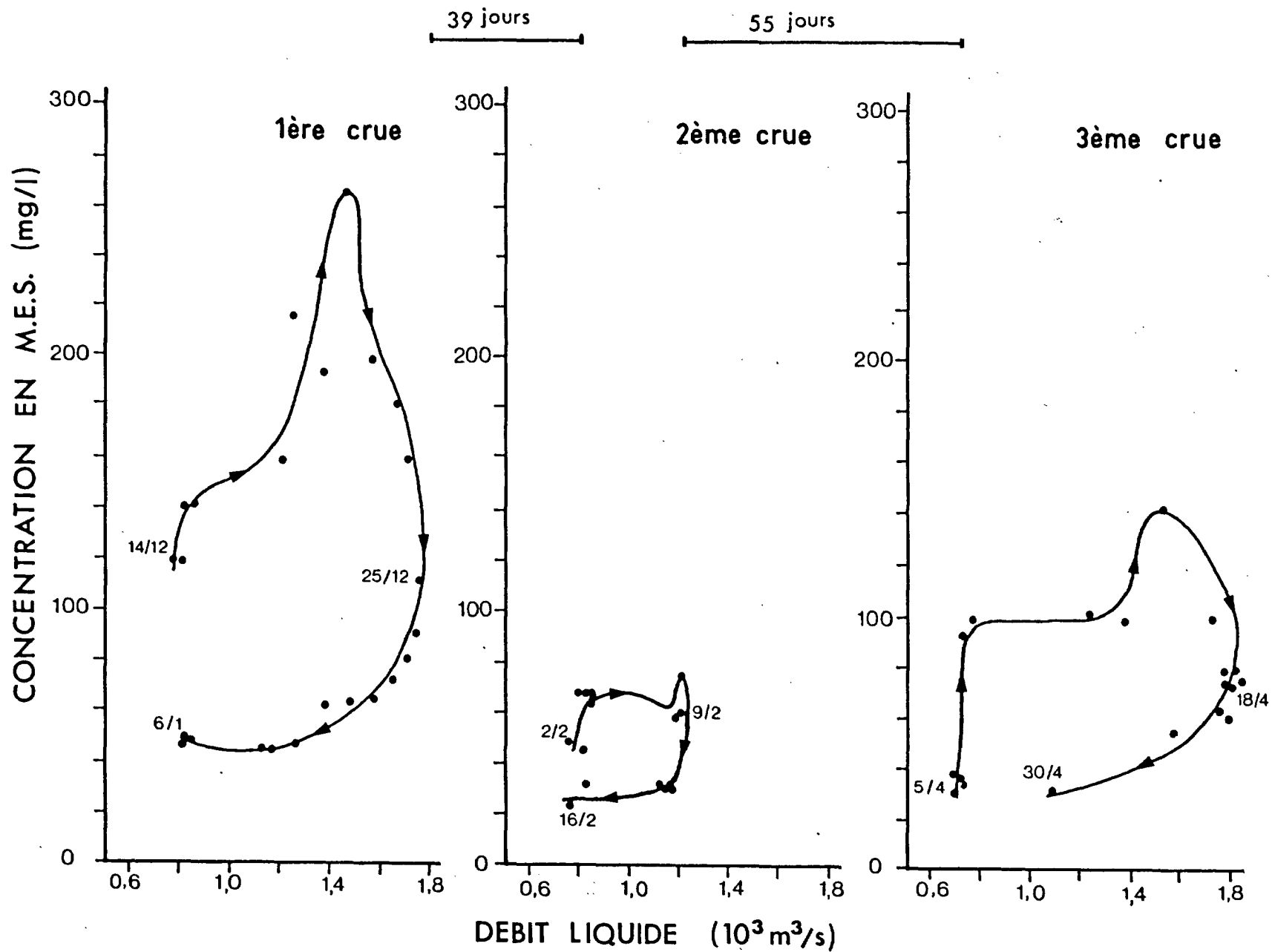


FIG.10 A -RELATION ENTRE LA CHARGE SOLIDE ET LE DEBIT FLUVIAL A POSES DURANT LES 3 CRUES DE L'HIVER 1982 - 1983.

Les données disponibles dans des rivières comparables à la Seine, telles la Gironde (Jouanneau, 1982) et la Loire (Guillaud, 1983 ; Manickam, 1982) montrent un schéma analogue sans doute généralisable à l'ensemble des rivières en climat tempéré humide.

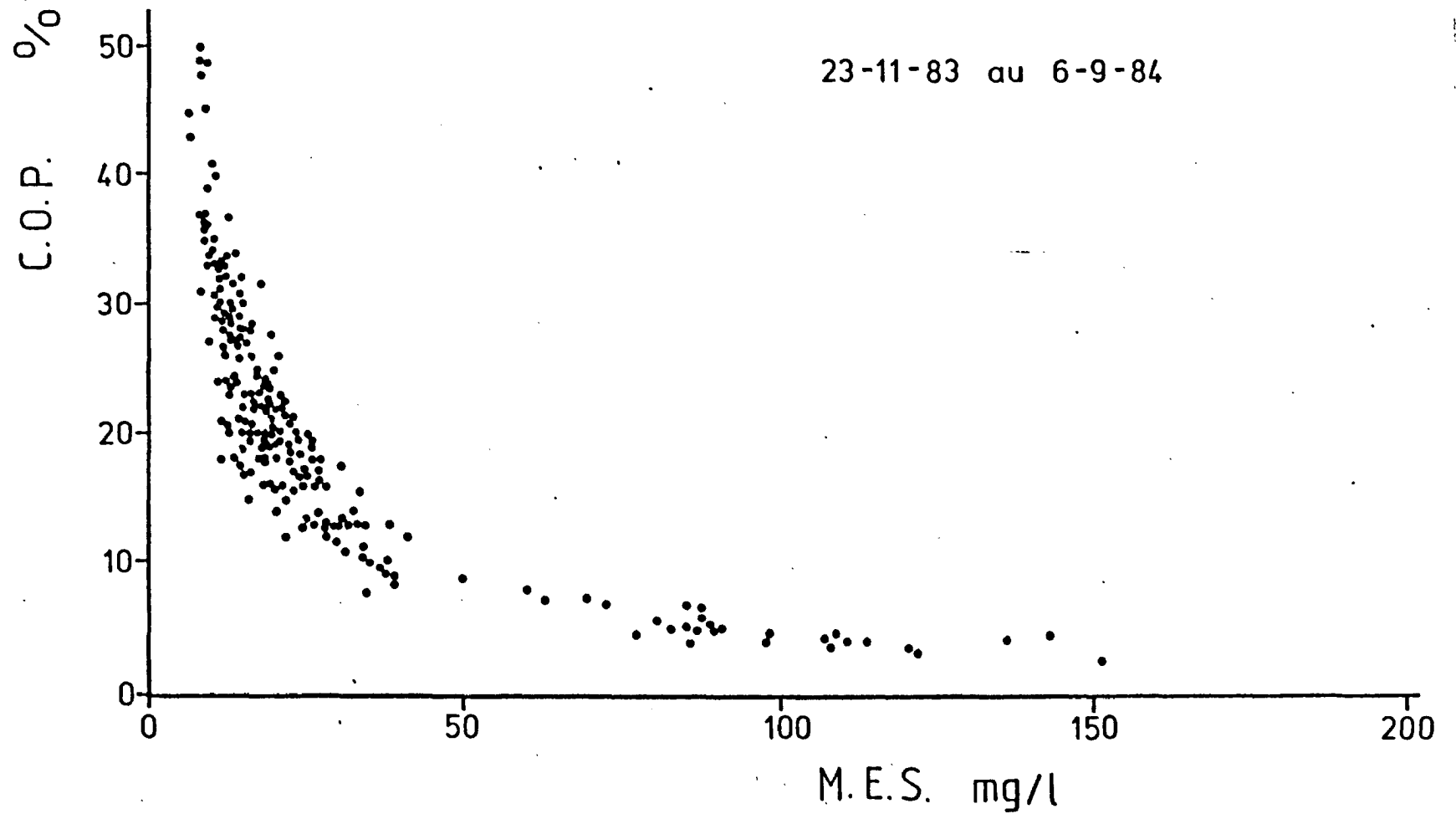
Au cours de l'année, la charge solide varie non seulement de manière quantitative, mais également d'un point de vue qualitatif. La distinction entre les fractions minérale et organique dans les suspensions a pu être abordée par le dosage du Carbone Organique Particulaire (C.O.P.) en mettant en oeuvre la méthode classique d'oxydation par le mélange sulfochromique (Le Corre, 1983). En dosant l'oxydant en excès avec le sulfate ferreux et en prenant comme étalon une solution de glucose, les résultats sont exprimés en équivalents carbone de glucose. La figure 10B synthétise à titre d'exemple les résultats obtenus entre novembre 1983 et septembre 1984, soit sur 300 échantillons. Il apparaît clairement que les concentrations en M.E.S. et les pourcentages correspondant en C.O.P. suivent une loi inversement proportionnelle de forme hyperbolique. Cette relation traduit le fait que, lors des crues, les sédiments en suspension sont essentiellement de nature minérale, correspondant bien à une érosion du bassin versant. A l'opposé, en période d'étiage, lorsque les apports solides de la Seine sont faibles, les suspensions sont essentiellement de nature organique. L'étude menée par observations au M.E.B. dans un autre cadre que ce rapport a montré parallèlement que, durant l'été, les M.E.S. sont surtout constitués par un mélange d'organismes phytoplanctoniques d'eau douce et d'agrégats organisés autour de fibres d'origine végétale, et que par contre, en période hivernale, les suspensions sont surtout formées de quartz (silts) et de minéraux argileux. En conclusion, les apports sédimentaires de la Seine sont presque exclusivement de nature minérale, ce qui aura une incidence majeure en termes de bilans sédimentaires et de processus géochimiques.

### 1.3. - Débit solide

Compte-tenu de l'existence d'hystérésis entre la charge solide et le débit fluvial lors des crues, le calcul des apports sédimentaires à partir de la relation (1) est source d'importantes erreurs. Les brusques variations ne peuvent être mises en évidence que par un suivi très serré dans le temps. La figure 8 C montre l'évolution du débit solide de la Seine calculé quotidiennement de décembre 1982 à décembre 1984. Les valeurs ex-



FIG.10B-RELATION ENTRE LA CHARGE SOLIDE ET LES TENEURS EN C.O.P.,  
DE NOVEMBRE 1983 A SEPTEMBRE 1984



trêmes sont de 33900 T/j en crue et de 63 T/j en étiage pour des concentrations en M.E.S. de 267 mg/l et 3,3 mg/l respectivement. 75 % des apports annuels de la Seine se produisent en période de crue, chiffre comparable à celui calculé dans d'autres rivières (Al - Jabbari et al, 1980 ; Schubel, 1974 ; Vale, 1981). Les apports solides durant la phase ascendante des crues représentent à eux seuls 50 % des apports annuels en 20 jours, dont une large part revient à la première crue. Le total annuel calculé à Poses est de  $1,01 \cdot 10^6$  T. de l'hiver 1982 au début de l'hiver 1983, et de  $0,53 \cdot 10^6$  T l'année suivante. Ces résultats comparés à ceux obtenus par la méthode précédente (Avoine, 1981) ne montrent pas de divergence considérable. La moyenne calculée antérieurement reste donc valable, soit  $0,5 \cdot 10^6$  T/an, avec une fourchette allant de  $0,2 \cdot 10^6$  T/an à  $1 \cdot 10^6$  T/an selon les années. Nous avons vu précédemment que l'essentiel de ces apports est de nature minérale.

A partir de ces chiffres, il est possible d'évaluer le taux d'érosion du bassin versant. Pour un débit solide annuel de  $0,5 \cdot 10^6$  T (mini  $0,2 \cdot 10^6$ , maxi  $1 \cdot 10^6$ ), le taux d'érosion est de 7,5 T/km<sup>2</sup>/an (mini 3, maxi 15), ce qui est très faible comparativement aux grands fleuves mondiaux (Milliman, 1981). D'après ces chiffres l'arasement du bassin versant de la Seine est de l'ordre de 0,4 cm par millénaire en conditions moyennes.

## 2 - APPORTS EN MÉTAUX-TRACES

Les teneurs et les apports annuels de la Seine en métaux dissous et particulaires ont été calculés à partir des analyses effectuées depuis 1976 à la Bouille, 100 km en amont de l'embouchure, par la cellule anti-pollution du Service de la Navigation de la Seine. Les métaux mesurés sont : Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, Ti, V. Le protocole d'analyses et l'interprétation de l'ensemble des résultats ont fait l'objet d'une synthèse détaillée (Avoine et al, 1984) dont les principales conclusions seront reprises ici.

L'étude statistique des concentrations en métaux dissous ne permet pas de mettre en évidence de relations systématiques entre les teneurs observées pour chaque métal et les variations du débit fluvial. Un certain équilibre existe au cours de l'année et, à l'instar de Jouanneau (1982) en Gironde, une teneur moyenne a été calculée pour estimer les apports moyens annuels correspondant à un débit fluvial de 435 m<sup>3</sup>/s (tableau 1). Par rapport aux concentrations habituellement rencontrées dans les fleuves

M É T A L	TENEUR MOYENNE (µg/l)	APPORTS ANNUELS MOYENS (T/an)
Cd	0,7	8,8
Co	1	12,6
Cr	1,9	24
Cu	4,1	52
Fe	21	265
Hg	0,05	0,6
Mn	9	113
Ni	8,7	122
Pb	1,5	19
Zn	46	580

Tableau 1 - Teneur moyenne en métaux dissous mesurés à la Bouille de 1976 à 1982. Apports annuels moyens pour un débit de 435 m<sup>3</sup>/s.

M É T A L	$\frac{P}{P + D} \times 100$
Cd	58
Co	41
Cr	81
Cu	76
Fe	98
Hg	77
Mn	85
Ni	33
Pb	84
Zn	49

Tableau 3 - Importance relative des apports annuels particuliers (P) et dissous (D) en métaux-traces à la Bouille.

(Martin et Meybeck, 1979), certains métaux présentent des teneurs plus élevées dans la Seine. C'est le cas notamment de Zn, Pb, Cr (2 fois), de Ni (4 fois) et de Cd qui apparaît très élevé. Les teneurs en métaux-traces liées aux suspensions montrent des variations notables au cours de l'année, difficilement corrélables avec les fluctuations de la charge solide et du débit fluvial. Cependant, un bilan moyen peut s'avérer utile à long terme, en considérant les concentrations moyennes pour chaque métal et les apports solides annuels estimés précédemment. Comparée aux grands fleuves réputés non pollués (Martin et Meybeck, 1979), la Seine présente des teneurs élevées pour plusieurs métaux : Cr, Cu, Zn. La contribution anthropique dans les apports de la Seine a pu être estimée en évaluant le fond géochimique régional dans des sédiments de la période pré-industrielle de la région de Rouen (Avoine et al, 1984). Cette contribution est considérable pour la plupart des métaux, de l'ordre de 95 % pour Hg, Cu, Cd, Zn, de 85 % pour Ni, Pb, Cr, de 70 % pour Mn, Co, V (tableau 2 ). Le fer et le titane semblent au contraire d'origine principalement naturelle. Ces chiffres sont à considérer avec prudence mais ils illustrent parfaitement le fort degré de pollution engendré par l'activité humaine dans une région où les teneurs naturelles restent faibles par rapport aux moyennes mondiales, du fait de la nature géologique essentiellement sédimentaire du bassin versant. La comparaison des pourcentages obtenus dans la Seine pour les métaux qui semblent principalement d'origine anthropique, avec ceux calculés récemment en Gironde par Donard et al. (1983), montre que dans ce dernier cas la part des apports naturels est plus grande, compte-tenu de la présence d'un substratum partiellement cristallin qui enrichit le milieu en métaux.

L'importance de la phase particulaire par rapport à la phase dissoute est représentée sur le tableau 3 . Il apparaît que la plupart des métaux sont amenés par la Seine sous forme particulaire, c'est-à-dire associés au matériel en suspension qui est un vecteur de pollution métallique. Cependant, des exceptions importantes sont à noter, en particulier pour Pb et Hg dont la nocivité est bien connue. Ces métaux sont véhiculés par la Seine principalement sous forme dissoute et pourront être assimilés plus rapidement que les autres métaux par les organismes vivants de l'estuaire et du domaine marin.

Bien que l'influence des rejets effectués directement dans l'estuaire peut être localement mise en évidence, les apports provenant de la Seine demeurent prépondérants pour la plupart des métaux. Seuls Ti, Mn,

	Teneurs en métaux particulaires <sup>(a)</sup>		Apports moyens de la Seine			
	Suspensions fluviatiles (µg/g) (b)	Sédiments fluviatiles non pollués (µg/g) (c)	TOTAUX (T/an) (d)	NATURELS (T/an) (d)	ANTHROPIQUES (T/an) (d)	CONTRIBUTION ANTHROPIQUE (%)
Cd	24	0,34 ± 0,04	12	0,17	11,8	98
Co	17,5	5,2 ± 1	9	2,6	6,4	70
Cr	208	29 ± 1	100	14,5	86	86
Cu	330	5 ± 1	165	2,5	162	99
Fe	28 540	15500 ± 600	14 000	7 600	6 400	46
Hg	3,5	0,034 ± 0,01	2	0,02	2	99
Mn	1 280	340 ± 30	650	170	174	73
Ni	124	16 ± 2	60	8	52	87
Pb	195	27 ± 1	100	13,5	86,5	86
Ti	1 985	1400 ± 20	1 000	700	300	29
V	220	69 ± 5	110	35	34	69
Zn	1 100	34 ± 2	550	17	530	97

Tableau 2 : Apports naturels et anthropiques de la Seine en métaux particulaires ;  
a : calculés pour 3,6 % d'Al (teneur moyenne des apports fluviatiles) ;  
b : teneurs moyennes mesurées à la Bouille de 1976 à 1982 ;  
c : sédiments pré-industriels de Tourville-la-Rivière ; d : calculés pour une charge annuelle de  $0,5 \cdot 10^6$  T.

et à moindre degré Fe, sont rejetés en fortes quantités dans l'estuaire, surtout sous forme dissoute, et sont la cause de pollutions locales.

Cette étude met en évidence l'extrême variabilité des apports fluviaux au cours de l'année, d'un point de vue quantitatif. Ces apports s'effectuent principalement durant la phase ascendante des crues, et surtout lors des premières pluies hivernales, résultats à prendre en considération dans tout calcul du temps de résidence dans l'estuaire, non seulement de l'eau et des suspensions mais surtout des métaux-traces apportés par le fleuve. Par ailleurs, la Seine apparaît à l'heure actuelle comme une rivière sénile à faible capacité d'érosion, du fait principalement de la topographie adoucie de son bassin versant, du couvert végétal important et des travaux de régularisation de son cours.

III- ETAT D'ENVAISEMENT DES FONDS DE  
LA BAIE DE SEINE EN 1983

L'envasement des fonds de la partie orientale de la baie de Seine et ses fluctuations saisonnières ont été décrits lors des contrats précédents (81/6559 et 82/6843). Cette étude a été étendue à l'ensemble de la baie de Seine dans le cadre du présent contrat. Lors d'une campagne de prélèvements effectuée en septembre et octobre 1983, 365 échantillons ont été recueillis, auxquels s'ajoute l'étude détaillée de la baie des Veys décrite dans la première partie. Les caractéristiques sédimentologiques et géochimiques de ces prélèvements sont actuellement en cours d'étude. Il est possible dès à présent de dresser une carte détaillée de la répartition de la fraction pélitique des sédiments à l'échelle de l'ensemble de la baie de Seine (fig. 11). Plusieurs points importants se dégagent de cette cartographie :

- dans la partie orientale de la baie, les envasements décrits lors des travaux antérieurs se retrouvent dans trois secteurs principaux : le long de la côte du Calvados au large de la Dives, devant l'embouchure de la Seine et dans l'estuaire, au Nord du dépôt de dragages d'Octeville.
- dans la partie centrale et occidentale de la baie, à l'Ouest de Ouistreham, des envasements localisés ont été mis en évidence par des fonds allant de -8 à -25m. Ces zones envasées, où les teneurs en pélites dépassent généralement 10 %, se situent principalement entre la baie des Veys et la partie ouest des Rochers du Calvados. Des secteurs envasés apparaissent également le long de la côte est du Cotentin, au Sud de Saint-Vaast-la-Hougue.

Cet état de l'envasement de la baie de Seine en 1983 peut être comparé à celui établi à l'issue des campagnes réalisées par Larsonneur en 1965-67 (fig. 12). Il apparaît un accroissement très net de la sédimentation fine dans l'ensemble de la baie entre les deux périodes considérées, confirmé d'ailleurs par les observations des pêcheurs locaux au cours de ces dernières années. Bien que les méthodes de prélèvement diffèrent lors des deux études, ce qui peut expliquer en partie l'évolution constatée, il semble donc que l'envasement récent de la baie de Seine soit un phénomène bien réel. Son origine est un problème de première

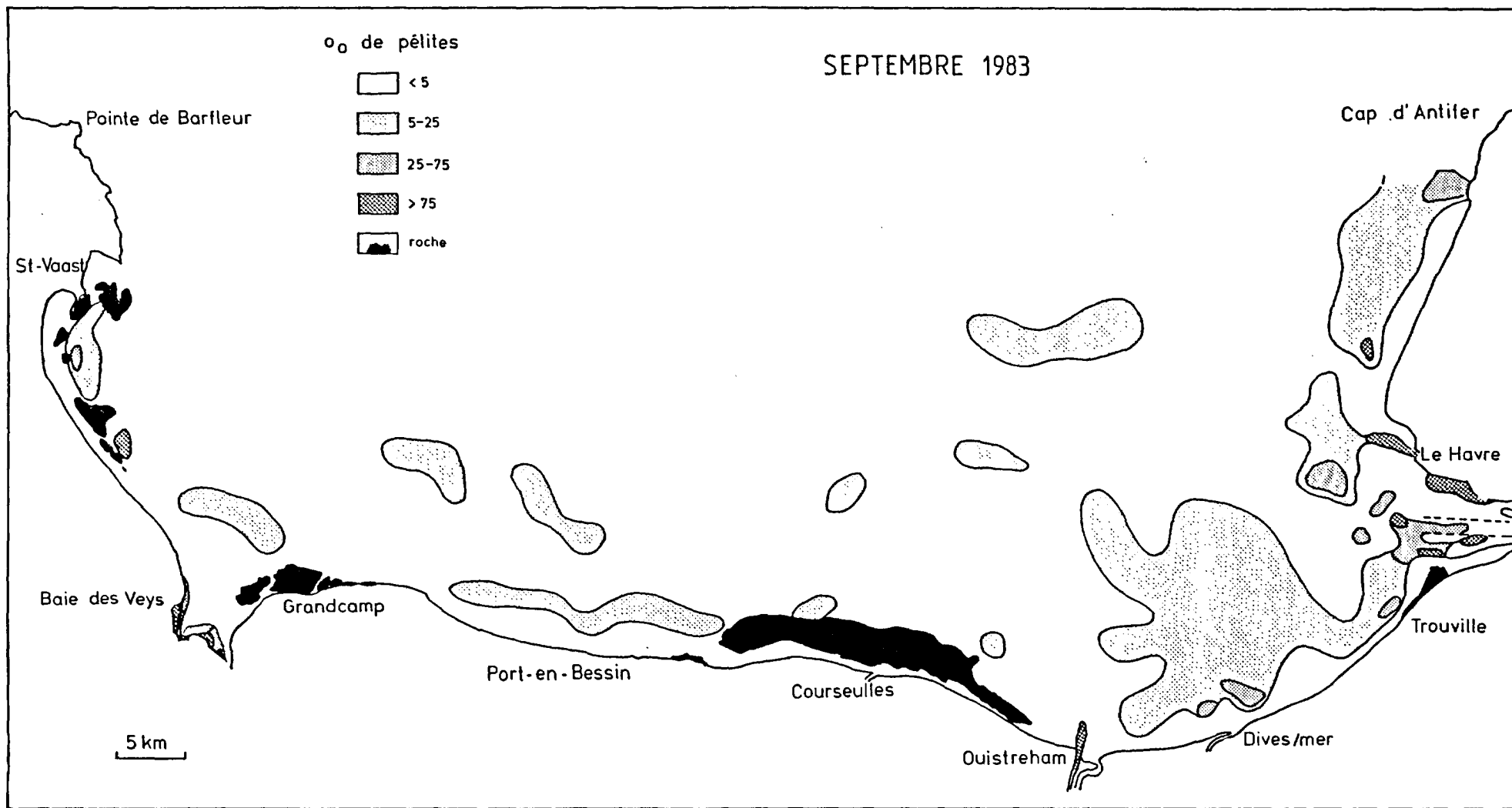


FIG.11-REPARTITION DE LA FRACTION PELITIQUE DANS LES SEDIMENTS DE LA BAIE DE SEINE EN SEPTEMBRE 1983



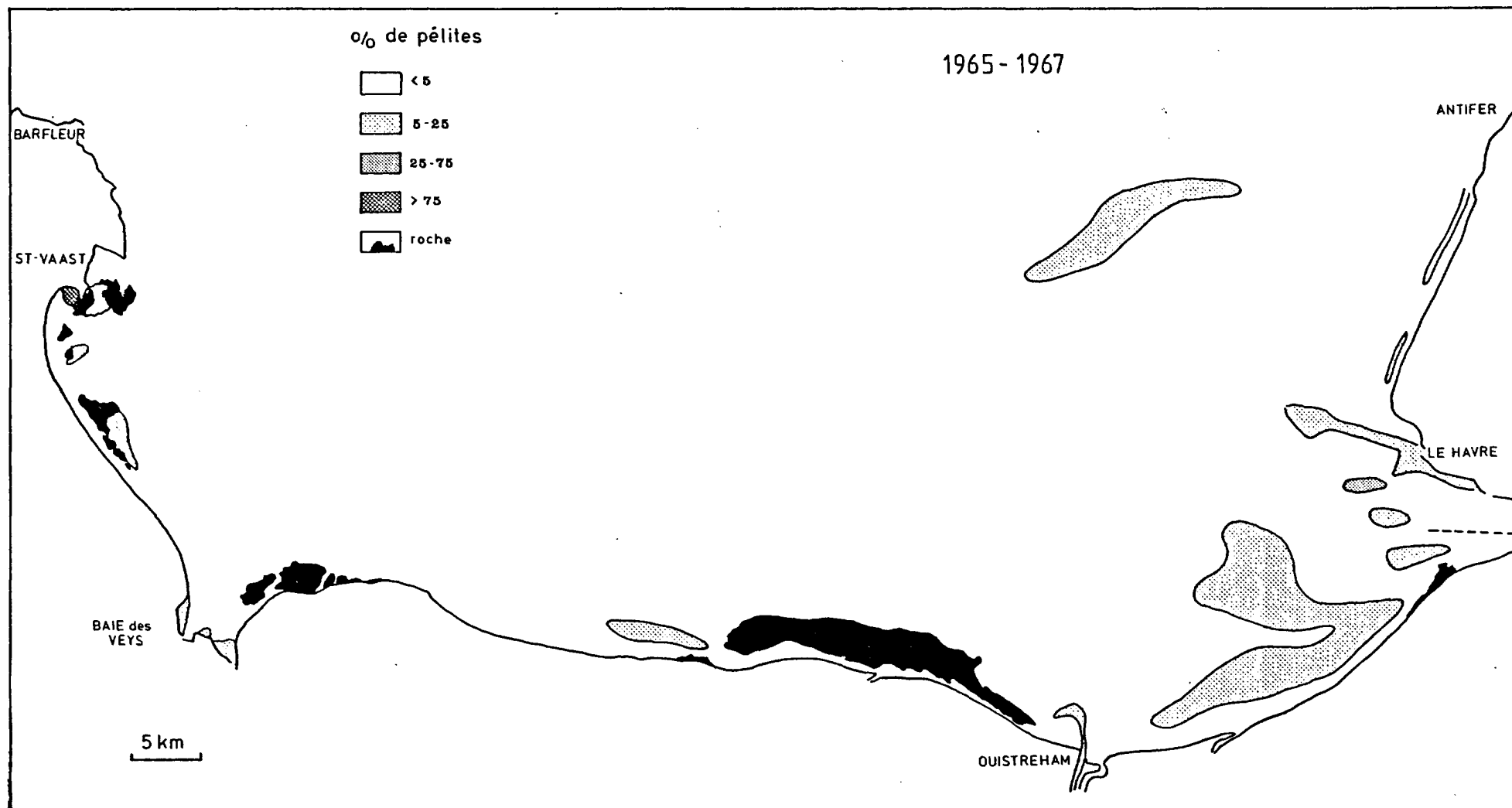


FIG.12-REPARTITION DE LA FRACTION PELITIQUE DANS LES SEDIMENTS  
DE LA BAIE DE SEINE EN 1965-67

importance qu'il faut considérer de manière différente à l'Ouest et à l'Est de la baie dans l'état actuel des connaissances :

- dans la partie orientale, l'accroissement de la sédimentation fine a été étudié dans le détail lors de travaux antérieurs (Avoine, 1981 ; Avoine et al, 1981). Cet envasement récent a été attribué d'une part à l'impact des aménagements de l'estuaire de la Seine et à la migration vers l'aval du bouchon vaseux, d'autre part à l'érosion de sédiments pélicitiques d'âge boréal au large de la Dives, à l'affleurement dans ce secteur.
  
- dans la partie occidentale, la plupart des zones envasées décrites en 1983 n'avaient pas été mises en évidence en 1965-67, hormis dans le secteur de Saint-Vaast-la-Hougue. L'origine de cet envasement qui semble un phénomène récent est difficile à préciser à l'heure actuelle. L'étude géochimique des métaux-traces stables et radioactifs, actuellement en cours, permettra d'apporter des éléments de réponse.

IV- APPORTS DE L'IMAGERIE FOURNIE PAR LE SONAR A BALAYAGE LATERAL  
A LA CONNAISSANCE DE LA DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE EN BAIE DE SEINE.

Les enregistrements continus du sonar à balayage latéral permettent d'observer les contrastes de la répartition des sédiments sur le fond. Leur degré d'hétérogénéité et leur évolution avec le temps est ainsi aisément perceptible ainsi que la nature des contacts entre les différentes formations sédimentaires reconnues lors des cartographies établies par prélèvements. Nous avons utilisé le sonar à balayage latéral EG.G. sms 960 de l'IFREMER (Berné et al., 1985), cet équipement permet de recueillir une imagerie corrigée en temps réel des facteurs d'anamorphose (obliquité transversale et compression longitudinale). Une couverture à grandes mailles de la baie de Seine a été réalisée en deux campagnes du 9 au 14 mai 1982 et du 11 au 17 juillet 1983.

En baie de Seine, les larges surfaces occupées par des sédiments sablo-graveleux ou graveleux dans la partie centrale ou occidentale ont montré la présence de structures sédimentaires nombreuses témoignant de transits sableux tractés sur le fond. Elles indiquent une direction générale de transport vers le Sud-Est, présentant quelques inversions locales fonction de la morphologie sous-marine ou littorale. A l'Est de la baie, les sables fins montrent peu de structures de transit mais par contre des signes d'envasement. La dynamique sédimentaire des vases est caractérisée par un cycle annuel où alternent des phases de dépôt en masse lors des crues, à proximité immédiate des estuaires ; et des phases de reprise de ces vases sous l'action des houles, cette dilacération est responsable du développement de structures sédimentaires originales. Plus au large, des images sporadiques de "rubans de vase " ont pu être interprétées comme issues de la remise en suspension de vases par la houle suivie d'un entraînement de ces suspensions par le courant de marée. En baie de Seine orientale, des structures attribuables au transport de sable tracté sur le fond ne sont observables que localement, à l'approche du banc de Seine et du banc du Ratier, et près du port d'Antifer. Ces informations complètent la connaissance de la distribution des sédiments et de leur dynamique acquise antérieurement par prélèvements et photographie sous-marine (Larsonneur, 1971) et suivi de traceurs (Service d'application des radio-éléments, Saclay).

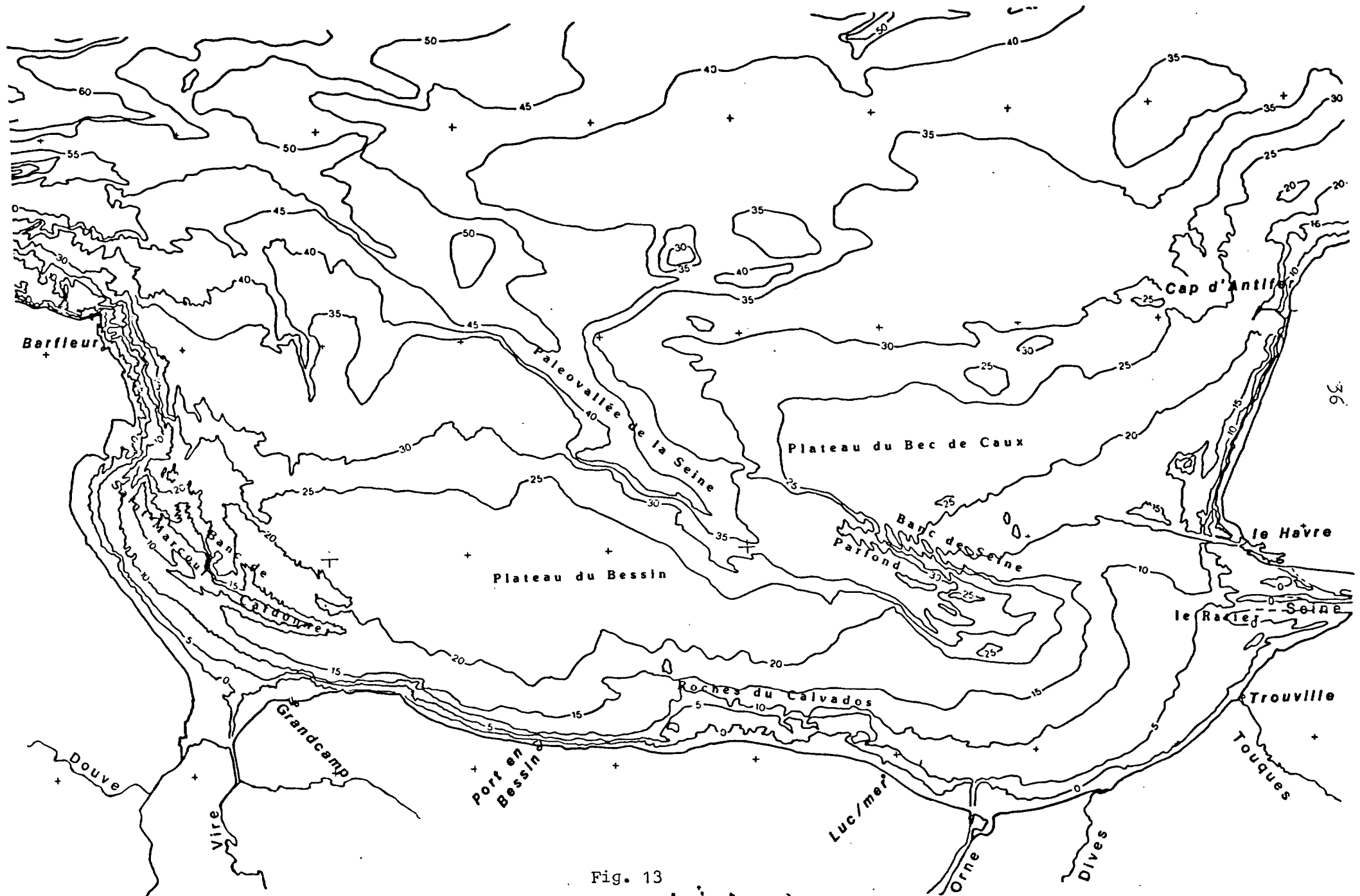


Fig. 13

1) REPARTITION DES SEDIMENTS.

L'utilisation de l'image fournie par le sonar à balayage latéral comme l'élément de reconnaissance de la nature du sédiment repose sur l'évaluation de la rétrodiffusion traduite sur l'enregistrement par une gamme de gris de 16 niveaux, après avoir fait la part des contrastes dus au relief sous-marin. Cette observation ne peut donc être utilisée que confrontée avec la connaissance des sédiments acquise par prélèvements et photographie sous-marine ; elle permet par contre d'observer la nature des contacts entre les différents faciès sédimentaires et révèle ainsi la coexistence de phases résiduelles et mobiles que les prélèvements même ponctuels ont tendance à mélanger. Les principaux apports nouveaux à la synthèse des connaissances de la répartition des sédiments en baie de Seine (Vaslet et al., 1978), sont l'existence d'anomalies sableuses linéaires de direction NW-SE en baie de Seine occidentale et centrale. Ces rubans correspondent à une différenciation sédimentaire sableuse en longs couloirs étroits ornés de mégarides sur un environnement de graviers sableux. L'asymétrie des mégarides indique une direction de transit vers le SE. Ces rubans sont de deux types différents par le taux d'enrichissement en sable qu'ils possèdent par rapport à leur environnement graveleux. Au large, suivant exactement le versant sud de la paléovallée de la Seine, ce sont des rubans sableux étroits correspondant à un enrichissement en sable de 25 à 50 % ; plus internes, sur la plateforme entre Barfleur et les rochers du Calvados, ce sont des rubans sablo-graveleux plus larges correspondant à un enrichissement relatif en sable de 15 à 30 %. Par ailleurs, les évolutions mises en évidence : répartition des fonds graveleux, sableux, et sablo-vaseux, apportent des précisions à la cartographie par prélèvement. Le sable, constituant une phase mobile sur une surface résiduelle graveleuse de large extension, a tendance à se rassembler en traînées étroites qui convergent vers l'Est. Au Nord du Bessin, l'anomalie topographique que constitue vers l'Est le plateau rocheux du Calvados provoque l'accumulation d'une surface sableuse à mégarides et ridins (sand sheet) allongée parallèlement à la côte entre la pointe du Hoc et le Nord d'Arromanches. On notera que cette accumulation sableuse ne s'effectue pas ici contre le littoral, mais de 3 à 5 km au large par une profondeur de 15 à 20 m.

En baie de Seine orientale le faible contraste de rétrodiffusion entre le sédiment fin et le sable est défavorable à l'utilisation des enregistrements à des fins de cartographie sédimentaire. De plus, les sédiments fins ont tendance à se mélanger en proportion variable au sable, ces évolutions progressives sont difficilement perceptibles au sonar. Par contre, des renseignements précieux concernant des aspects nouveaux de la dynamique de ces sédiments ont été obtenus.





2) DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE.

Les chercheurs anglo-saxons sous l'impulsion de Belderson, Kenyon et Stride, utilisent depuis plus de 20 ans le sonar à balayage latéral pour décrire les principales formes sous-marines qui expriment le déplacement des sédiments. Nous avons recherché, dans l'imposante documentation qu'ils ont publiée la démarche à appliquer pour dépasser le simple constat descriptif de l'existence des formes sédimentaires sous-marines, des directions de transit qu'elles expriment et accéder à la compréhension des phénomènes sédimentaires en cours de déroulement sous nos yeux : érosion, transport et dépôt. En baie de Seine occidentale et centrale, les structures sédimentaires indiquant le déplacement de sédiments tractés sur le fond sont nombreuses. Nous avons retrouvé la plupart des structures classiquement décrites (Auffret et al., 1984). \*\* Les structures longitudinales sont parallèles au courant générateur et de faible élévation par rapport à la surface de sédiments graveleux qui les porte. Les bancs sableux linéaires, dont l'épaisseur en baie de Seine peut dépasser 20 m (Auffret et al., 1983), constituent donc à ce titre une exception. Le banc de Seine et le banc de Saint-Marcouf, Cardonnet représentent la forme d'accumulation offshore des sables marins, phase sédimentaire mobile sous l'action des courants. \*\* Les structures transversales sont des rides sédimentaires dont la taille varie depuis les "ripples", plus petits que le pouvoir séparateur du sonar mais vus en photographie sous-marine (Larsonneur, 1971) jusqu'aux grandes vagues de sable ou ridins (longueur d'onde supérieure à 20 m); formes de second ordre qui portent elles-mêmes des mégarides. Nous avons pu observer des formes transverses de longueur d'onde comprise entre 0,6 m (limite inférieure du pouvoir séparateur de l'équipement utilisé en condition de mer très favorable) et 200 m pour quelques ridins du banc de Saint-Marcouf, du banc de Seine et d'Antifer. La plupart sont dissymétriques et traduisent ainsi le sens du transit sédimentaire résiduel ; mais il existe également des formes symétriques, en particulier les formes de courtes longueur d'onde que sont des rides de houle. Celles-ci sont rares en baie de Seine, à moins que leur faible longueur d'onde ne les rende imperceptibles dans les conditions moyennes d'enregistrement.






Par ailleurs, à côté de ces formes sédimentaires maintes fois décrites, nous avons pu observer en baie de Seine orientale des structures permanentes ou temporaires que nous avons interprétées comme issues de la reprise sous l'action de la houle et des courants des sédiments fins cohésifs présents dans cette zone.

STRUCTURES SEDIMENTAIRES






TRANSVERSES

-  RIDIN ASYMÉTRIQUE  
SENS DE L'ASYMÉTRIE
-  RIDIN SYMÉTRIQUE
-  MÉGARIDES ASYMÉTRIQUES
-  MÉGARIDES SYMÉTRIQUES

LONGITUDINALES

-  COMÈTE ET  
WRECK - MARK
-  RUBAN SABLO-GRAVELEUX
-  RUBAN SABLEUX
-  TRAINÉE SABLEUSE
-  SOMMET DE BANC  
SABLEUX LINÉAIRE

FACIES SEDIMENTAIRES

-  SÉDIMENT GRAVELEUX
-  COUVERTURE SABLEUSE  
DISCONTINUE A MÉGARIDES
-  COUVERTURE  
SABLEUSE DISCONTINUE
-  COUVERTURE SABLEUSE  
CONTINUE
-  FIGURES D'ÉROSION SUR  
SÉDIMENTS FINS

 ROCHE

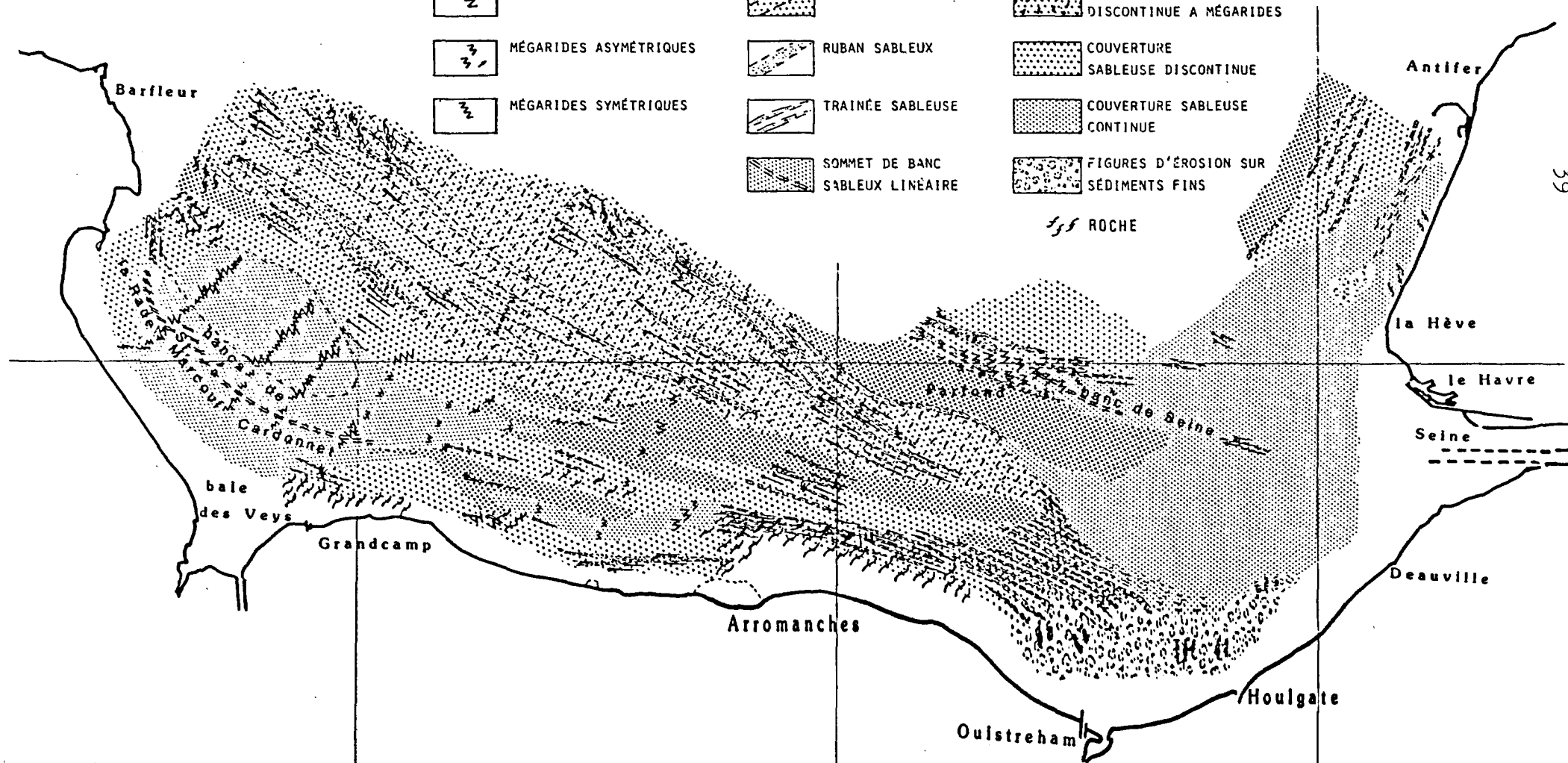


Fig. 14

Ces structures sont d'une part des formes d'érosion en sillons ou en taches, et d'autres part des rubans temporaires de vase en suspension dont nous avons noté la coïncidence avec un type de condition météorologique et qui correspond probablement à un phénomène temporaire de couche néphéloïde ou de crème de vase à forte dilution sur le fond (d'Ozouville et Auffret, 1985).

### 3) PHENOMENES SEDIMENTAIRES OBSERVES.

#### 3.1 - Direction et sens des transits en traction (fig.14)

3.1.1. En baie de Seine occidentale on note une tendance générale de transit vers le SE exprimée par de nombreuses structures sédimentaires. Le domaine interne à une ligne joignant Barfleur et Grandcamp échappe à cette règle. Les transits sédimentaires s'effectuent en sens inverse sur les deux flancs des bancs de St Marcouf-Cardonnet, vers le NW sur le flanc interne du banc et vers le SE sur son flanc externe. Entre les îles Saint-Marcouf et la zone des rubans sablograveleux du large, s'étend une surface ovale de couverture sableuse continue peu épaisse, ornée de mégarides et de ridins dépourvus de dissymétrie apparente. Nous avons pu observer, lors d'un profil enregistré au flot puis au jusant, une inversion de sens des indices secondaires de polarité (inversion de crêtes) dans cette zone à mégarides et ridins sub-symétriques.

Ces directions de transit sédimentaire sont en accord avec les données de la courantologie (Salomon, 1985-Le Hir, 1984- Le Provost et Fornerino, 1984) et le sens de transport vers le SE correspond à la dissymétrie générale de la courbe de marée en baie de Seine où le flot est en général dominant sur le jusant à l'exception de contre courants littoraux générés, dans la baie des Veys, par le promontoire du Cotentin. Les surfaces d'accumulation sédimentaire coïncident également avec les zones d'amortissement des courants instantanés aux deux extrémités de la baie.

3.1.2. En baie de Seine centrale des particularités locales liées à la géomorphologie sous-marine méritent d'être signalées, ainsi les rubans sableux les plus éloignés du littoral sur la fig. 14 sont étroitement associés au versant méridional de la paléovallée de la Seine, qui correspond ici à une marche d'une quinzaine de mètres (Auffret et Larsonneur, 1977). Les causes de cette localisation du ruban de sable sont à rechercher dans le mode de genèse de ces structures sédimentaires à la convergence de vortex longitudinaux (Mc Lean, 1981); ces vortex étant créés par la perturbation de l'écoulement des courants de marée par le versant de la paléovallée selon le schéma de Nikuradse (in Allen, 1984). Sur le méridien de Ver. sur. mer, un décrochement vers le nord du versant provoque une montée des rubans sur le plateau du Calvados où ils rencontrent probablement



des conditions hydrodynamiques défavorables car ils disparaissent en 8 km environ. longueur à rapprocher des 65 km du ruban principal représenté sur la fig.14 entre Barfleur et le méridien d'Arromanches. Au pied du versant septentrional de la paralléovallée de la Seine, on observe également la genèse de rubans de sable portant à l'approche du banc de Seine de grandes mégarides en croissant ( $\lambda = 10$  à  $20$  m,  $h=1$  à  $2$  m). Ces mégarides se rassemblent en ridins pour former l'unité superficielle du banc de Seine. Ce banc, malgré son étalement et son profil bas est donc une unité sédimentaire active dont la localisation est liée au versant du Parfond (Auffret et d'Ozouville, 1985).

On peut également constater le rôle joué par le plateau des rochers du Calvados dont les reliefs sont débordés vers le Nord par des traînées sableuses étroites à polarité vers l'Est. Elles se prolongent vers l'Est dans un vaste champ de rubans sableux situé, au Nord de Luc-sur-Mer, à la transition entre le plateau de roches sub-affleurantes du Bessin et la couverture sableuse continue de la baie de Seine orientale vers laquelle progressent les sables. Il n'y a pas d'anomalie morphologique à l'origine de ce champ de rubans, celle-ci doit donc être recherchée dans les facteurs hydrodynamiques. L'étude de Salomon (1985, fig. 1 et 3) montre que le facteur hydrodynamique discriminant de cette zone est l'élongation des roses de courant et donc des trajectoires de l'excursion de marée. Ce fait est cohérent avec la géométrie linéaire des rubans de sable dont la direction est conforme à l'élongation des roses de courant.

3.1.3. En baie de Seine orientale la majeure partie des fonds sont dépourvus des structures sédimentaires observables par le sonar latéral. Ceci est probablement dû à des causes sédimentologiques et hydrodynamiques. On notera en effet que nous sommes ici dans la zone estuarienne de la baie caractérisée par l'épaisseur notable de sa couverture sédimentaire de sable fin (Auffret et d'Ozouville, 1985), mais également par un envasement saisonnier (Avoine et al., 1985) qui accroît la cohésion des dépôts. L'hydrodynamique est également différente par les vitesses plus faibles de courants et le caractère alternatif à l'ouest (Salomon, 1985, fig. 3). Il faut noter que les figures sédimentaires observées au sonar latéral étant en majorité linéaires leur genèse s'accomode mal de courants rotatifs. Cependant, des structures intéressantes ont pu être mises en évidence ici, ce sont d'une part des remises en suspension des vases et d'autre part des structures pré littorales d'érosion (fig.14). \*\* En 1982, les conditions météorologiques ayant été variables au cours de la campagne, nous avons pu observer des formes évolutives apparaissant après les périodes de houle et interprétées comme issues de la remise en suspension par les vagues de sédiments fins, provoquant sur le fond l'existence d'une couche turbide de suspensions ou de "crème de vase" étirée en rubans parallèles par les courants de marée (d'Ozouville et Auffret 1985).

Cette reprise des vases a également été observée par utilisation de traceurs radioactifs (S.A.R. 1984) et par les cartographies saisonnières établies par prélèvement (Avoine et al., 1984). \*\* Nous avons de plus observé, sur le pré-littoral entre l'Orne et la Touques des réseaux de sillons ramifiés de profondeur métrique, sub-perpendiculaires au littoral et dont le fond, à forte rétrodiffusion, porte des mégarides de houle sub-symétriques de longueur d'onde de 0,7 à 1 m. Ils sont associés à des formes plus irrégulières, lichenoïdes, localisées sur les deltas de jusant des estuaires. Des analogies existent avec des sillons pré-littoraux à mégarides de houle mis en évidence en baie de Morlaix (Augris et al., 1985) et sur les littoraux des Etats-Unis (Morang et Mc Master, 1980), où des formes en thalles existent également (Shipp, 1984). Ces formes lichenoïdes résultent probablement de l'érosion par la houle des prodeltas de jusant de l'Orne et de la Dives dont les sédiments sont envasés lors des crues par l'expulsion et le dépôt en masse de la crème de vase accumulée dans les estuaires en étiage (Auffret et al., 1985). Les formes en sillons, en raison de leur profondeur, affectent plutôt les sédiments compactés de l'unité fluvio-marine présente à la base du prisme sédimentaire holocène à l'affleurement ici (Auffret et d'Ozouville 1985). La concentration de sédiments graveleux au fond des sillons et les mégarides de houle qui les ornent, indiquent que ces sédiments coquilliers oscillent sous l'action des houles à l'image des galets sur une plage. Cette oscillation exerce probablement lors des tempêtes une action d'abrasion sur les dépôts sablo-argileux compactés qui les portent, creusant ainsi les sillons selon le mécanisme décrit pour les courants par Flood (1981). La méconnaissance de ces phénomènes d'érosion pré-littorale est une source probable du déficit des apports constatés dans les tentatives d'estimation du bilan de la sédimentation dans l'estuaire de la Seine (Avoine et al. 1984).

4) En conclusion, malgré le caractère incomplet de la couverture régionale que nous avons réalisée au sonar latéral, ces résultats ont pour premier intérêt de venir combler une lacune de connaissances des formes sédimentaires de transit sur la plate-forme française par cet équipement trop longtemps attendu. Il apporte une moisson d'informations à la connaissance de la dynamique sédimentaire de la baie de Seine, par l'échelle moyenne d'observation en continu des objets sédimentaires qu'il permet, il est complémentaire des techniques antérieurement utilisées : cartographie régionale par prélèvements ou observations ponctuelles locales par photographie ou traceur. Les informations recueillies sur la dynamique actuelle de l'unité sédimentaire superficielle sont également utiles à la connaissance du bilan des dépôts holocènes établi par l'étude sismique (Auffret et d'Ozouville, 1985). A l'exception des zones estuariennes orientales et occidentales, la baie de Seine a une couverture meuble de graviers d'épaisseur réduite servant de support à des transits sableux vers

le SE exprimés par les structures sédimentaires de surface. Le rôle de ces transits dans l'alimentation des zones d'accumulation reste à quantifier. Des phénomènes d'érosion sous-marine, dont il serait également souhaitable de quantifier l'efficacité ont été découverts en baie de Seine orientale. Cette capacité à observer en continu les objets et les phénomènes fait de la reconnaissance par sonar à balayage latéral un préalable efficace à la définition des stratégies d'étude et un complément indispensable aux techniques ponctuelles d'étude du fond de la mer, de sa dynamique et de ses faunes si l'on a l'ambition d'étendre leurs conclusions à un espace régional.'

V- CONTRIBUTION DES TRACEURS RADIOACTIFS A L'ETUDE  
DES MOUVEMENTS SEDIMENTAIRES EN BAIE DE SEINE.

L'utilisation de formules de transport pour la quantification des mouvements sédimentaires sur le littoral et en domaine subtidal est source d'imprécisions importantes. En effet, la plupart des équations proposées ne prennent pas en compte les effets combinés des courants de marée et des houles. Aussi, le recours à des observations directes s'avère-t-il souvent nécessaire, notamment par la mise en oeuvre de traceurs radioactifs. La comparaison avec les transports théoriques déterminés à partir de mesures de courants et d'enregistrements de houles permet en outre de vérifier la validité des équations proposées (Heathershaw, 1981).

En baie de Seine, les dépôts sablo-vaseux présentent des fluctuations importantes au cours du temps (Crevel, 1983 ; Avoine et al, 1984). Ces mouvements sédimentaires en régime hydrodynamique de forte énergie occasionnent des atterrissements d'origine marine dans l'estuaire de la Seine, contribuant ainsi à son comblement (Avoine, 1981). Pour préciser ces phénomènes, des campagnes de mesures ont été réalisées dans la partie sud-orientale de la baie, à l'aide de traceurs radioactifs, entre 1979 et 1984. Plusieurs sites expérimentaux ont été choisis, de Ouistreham à Honfleur, afin de quantifier les transits sédimentaires et de fixer la limite d'action des courants de marée et des houles en fonction de la nature des dépôts et de leur profondeur. Ainsi, les traceurs utilisés ont-ils permis d'étudier, d'une part le charriage des sables entre - 2 et - 15 m, d'autre part la remise en suspension de sédiments vaseux plus ou moins concentrés. Nous rapportons ici les principaux résultats obtenus et nous discutons ensuite du rôle de ces mouvements sédimentaires dans le comblement de l'estuaire.

1- TECHNIQUE DES TRACEURS RADIOACTIFS.

La technique des traceurs radioactifs consiste à introduire dans le milieu des matériaux aisément détectables ayant même comportement hydrodynamique que le sédiment naturel. Elle permet de déterminer des paramètres d'ordre qualitatif (remises en suspension, direction et modalités des transports) et d'ordre quantitatif (vitesses de déplacement, débit solide, taux de dilution).

Pour le transport en charriage, l'objectif est de mesurer le débit volumique par unité de section et de temps.

Le débit solide  $Q$  à travers une section orthogonale au champ de vitesses est donné par la formule suivante :

$$Q = P.L.V.E.$$

avec  $Q$  : volume transporté par unité de temps

$P$  : masse volumique du sédiment

$L$  : largeur du transport

$V$  : vitesse moyenne du transport par charriage

$E$  : épaisseur moyenne du transport par charriage.

Pour déterminer  $V$  et  $E$  on dépose sur le fond des sédiments marqués par un radionucléide émetteur de rayonnement  $\gamma$ , donc détectable dans l'eau même si le traceur est recouvert de sédiments naturels (Caillot, 1970 et 1983 ; Courtois et Monaco, 1969). Les caractéristiques du matériau traceur (granulométrie, masse, activité, période) sont choisies en fonction des conditions expérimentales de l'étude. Les quantités immergées sont faibles, de l'ordre de 0,25 à 0,5 kg de verre broyé simulant les sables. Les activités sur les zones d'expérience sont de l'ordre de 1 Curie d'Ir 192 (période 74 jours) ou de Nd 147 (période 11 jours) ; soit le dixième de la radioactivité maximale autorisée (Courtois et Hours, 1964 ; Long et al, 1978). Ces faibles quantités facilitent non seulement la préparation, le transport et la manipulation des produits à bord d'embarcations de petite taille mais aussi le mélange des traceurs avec les sédiments présents sur le fond.

Le détecteur de rayonnement de type océanographique est remorqué à faible vitesse (2 à 4 noeuds) tandis que la position de l'embarcation est relevée chaque minute et reportée immédiatement sur carte. Des prospections périodiques permettent d'observer l'évolution dans l'espace et dans le temps du nuage déterminé par les particules marquées. L'épaisseur du transport sédimentaire  $E$  est calculée par la méthode du bilan de taux de comptage (Sauzay, 1968 ; Courtois et Sauzay, 1966) :

$$E = (1 - e^{-\alpha E}) \frac{\beta f_0 A}{\alpha N}$$

avec  $A$  : activité totale immergée

$N$  : activité totale mesurée au cours d'une prospection

$a$  et  $f_0$  : coefficients d'étalonnage du détecteur

$\beta$  : coefficient relatif à la distribution verticale du traceur dans la couche sédimentaire en mouvement.

La vitesse moyenne de propagation  $V$  dans une direction donnée est déterminée par le déplacement du centre de gravité du nuage formé par le traceur entre 2 détections successives.

Ainsi obtient-on la (ou les) directions du mouvement sédimentaire, les vitesses maximales et moyennes des déplacements horizontaux, la quantité de sédiments transportés par charriage, le recouvrement éventuel des sédiments marqués et les remises en suspension occasionnelles. Les résultats obtenus représentent le somme de toutes les forces ayant eu une action sur le sédiment marqué pendant toute la durée de l'étude. Ils prennent en compte des effets inconnus ou négligés dans les modèles physiques et lors des calculs à l'aide de formules de transport.

L'étude des phénomènes de remise en suspension a été entreprise parallèlement. Il s'agit d'examiner le comportement de dépôts vaseux qui forment un stock sédimentaire important en baie de Seine orientale. La remise en suspension de ces matériaux cohésifs ne dépend pas de la taille des particules élémentaires qui les composent, mais de leur concentration, elle-même fonction de la rigidité initiale (Migniot, 1977). 5 à 15 litres de vases marquées à l'Hafnium 181 (période de 45 jours) ont ainsi été utilisées, à des concentrations comprises entre 250 et 500 g/l. Les mesures régulières de radioactivité ont permis de suivre l'élimination progressive du traceur par érosion et remise en suspension puis de relier ce départ aux conditions hydrodynamiques locales. Le comportement de sables fins non cohésifs susceptibles de se déplacer également en suspension a été suivi parallèlement.

## 2- LES MOUVEMENTS SEDIMENTAIRES EN BAIE DE SEINE.

### 2.1. - Partie sud-orientale de la baie

La figure 15 et le tableau 3 résument les conditions expérimentales et les principaux résultats obtenus au cours d'étude, d'une durée généralement supérieure à 6 mois. Ainsi ont été pris en compte de nombreux cycles de marée et plusieurs tempêtes.

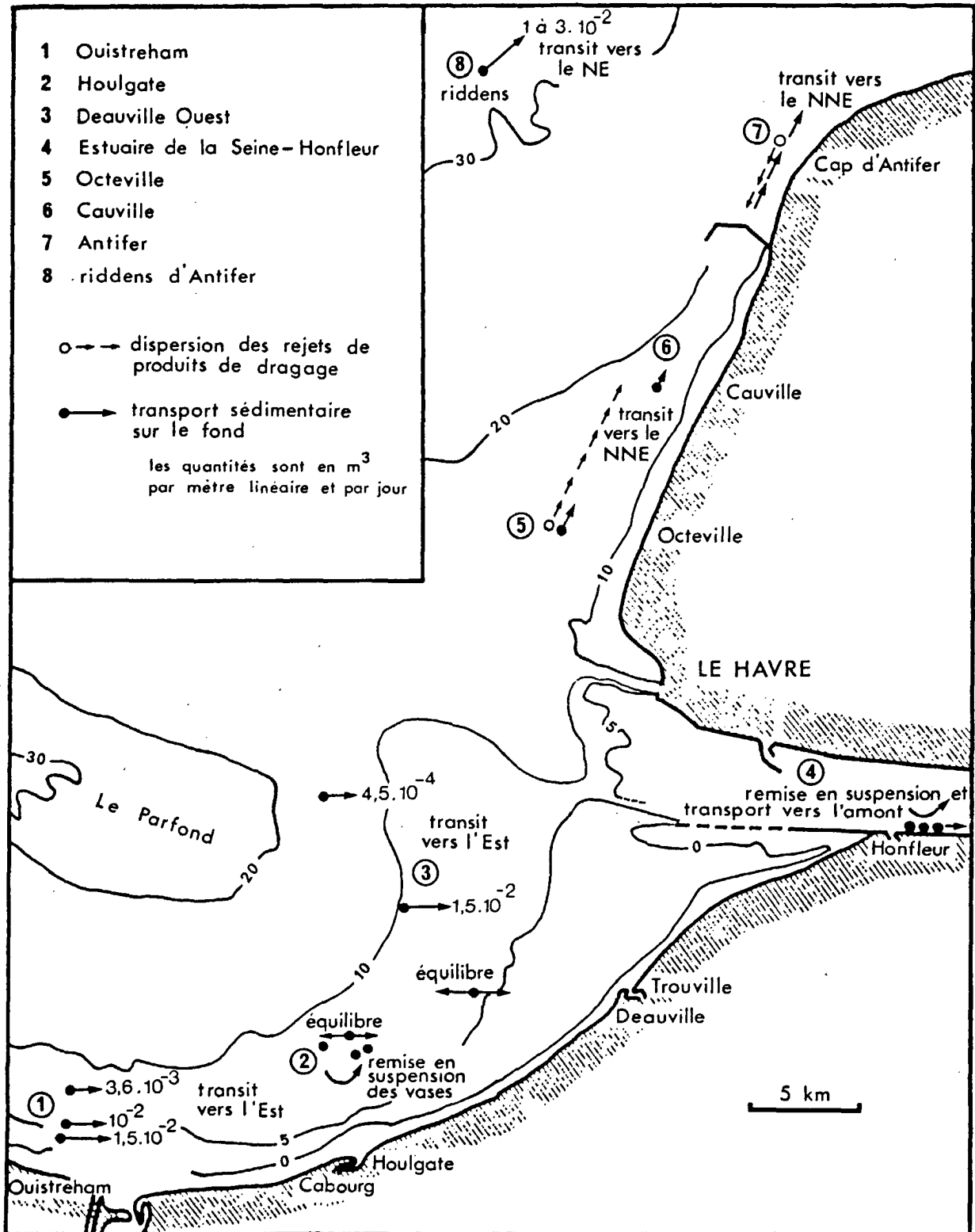


FIG.15-LOCALISATION ET PRINCIPAUX RESULTATS ACQUIS  
 LORS DES EXPERIENCES PAR TRACEURS RADIOACTIFS  
 EN BAI DE SEINE ORIENTALE

Sites et Dates	Profondeur ( m )	Granulométrie ( mm )				Traceur	Durée de l'étude ( jours )	Transport solide ( m <sup>3</sup> /m et par jour )
		Sédiment naturel		Traceur				
		Etalement	d <sub>50</sub>	Etalement	d <sub>50</sub>			
OUISTREHAM ( 1979 )	-2,5	0,04 à 0,62	0,21	0,16 à 0,20	0,185	Verre à l'Iridium 192 Période 74 j.	200	1,5.10 <sup>-2</sup> vers l'Est
	-5,5	0,04 à 0,42	0,18	0,16 à 0,20	0,185			10 <sup>-2</sup> vers l'Est
	-7,5	0,04 à 0,50	0,21	0,20 à 0,31	0,25			3,6.10 <sup>-3</sup> vers l'Est
HOULGATE ( 1983 )	-8,0	0,04 à 0,31	0,16	< 0,04	(a) 250g/l	Vase marquée à l'Hafnium 181 Période 45 j.	30	remise en suspension avec  U <sub>*</sub> = 0,7 cm/s
	-8,0	0,04 à 0,31	0,16	< 0,04	350g/l			
	-8,0	0,04 à 0,31	0,16	< 0,04	500g/l	Verre à l'Iridium 192	200	
	-8,0	0,04 à 0,31	0,16	0,10 à 0,25	0,16			
BENERVILLE ( 1982 )	-5,0	0,04 à 0,40	0,18	0,12 à 0,25	0,18	Verre à l'Iridium 192	208	équilibre
	-10,0	0,04 à 0,40	0,18	0,16 à 0,31	0,22			1,5.10 <sup>-2</sup> vers l'Est
	-15,0	0,04 à 0,40	0,18	0,16 à 0,31	0,22			4,5.10 <sup>-4</sup> vers l'Est
HONFLEUR chenal ( 1980 ) Débit fluvial: 300 m <sup>3</sup> /s	-12,1	0,04 à 0,08	0,05	0,16 à 0,20	0,17	Verre au Néodyme 147 Période 11 j.	9	En vives-eaux: 14 tonnes par marée vers l'amont.
	-11,3	0,08 à 0,20	0,16	0,16 à 0,20	0,17			En mortes-eaux: 0,25 tonne par marée vers l'amont.
	-11,5	0,08 à 0,20	0,16	0,23 à 0,26	0,26			

Tableau 3 : Conditions expérimentales des études réalisées par traceurs radioactifs entre 1979 et 1983. Principaux résultats obtenus. (a) concentration des vases marquées.

coefficient de marée	42	52	60	68	86	106	112
U <sub>*</sub> en flot (cm/s)	0,64	0,70	0,86	0,94	1,20	1,70	1,73
U <sub>*</sub> en jusant (cm/s)	0,62	0,65	0,71	0,78	0,95	1,22	1,33

Tableau 4 : Valeurs de U<sub>\*</sub> en fonction du coefficient de marée



Le mouvement général des sables marqués, sous l'effet des courants de marée alternatifs, est bien mis en évidence par le réseau de courbes isochocs correspondant à l'étalement du traceur sur les fonds de part et d'autre du point d'immersion. Il apparaît clairement une prédominance du flot sur le jusant entraînant un mouvement parallèle à la côte d'Ouest en Est (fig.16).

Parallèlement, devant Ouistreham, par des fonds de - 3,5 m et de - 5 m, l'action de la houle, dominante de secteur W à NW, se traduit par un mouvement du traceur en direction de la côte. Une action comparable est également visible à l'Ouest de Deauville par des fonds de - 5 m et devant Houlgate à - 8 m. L'influence d'un courant de retour pendant les périodes de mauvais temps est constatée devant Ouistreham.

Au total, le transit observé, principalement lié à la prédominance des courants de flot, entraîne, par charriage, de faibles quantités de sables en direction de l'estuaire. Le débit volumique mesuré est au maximum de  $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{m}$  et par jour.

Devant Houlgate, par des fonds de - 8 m, l'étude des phénomènes de remise en suspension a été entreprise parallèlement. Il s'agissait d'examiner le comportement de dépôts vaseux qui forment un stock sédimentaire important en baie de Seine orientale. La remise en suspension de ces matériaux cohésifs dépend principalement de leur rigidité initiale, elle-même fonction de leur concentration (Migniot, 1977). L'expérience à l'aide de vases marquées a montré que les courants de marée, même les plus faibles, sont capables de remettre en suspension 85 % de sédiments cohésifs plus ou moins concentrés, mais non consolidés, la rigidité initiale des dépôts étant inférieure à 2 N/m<sup>2</sup>. Lors de cette expérience, la mesure en continu des vitesses de courants près du fond a permis de déterminer la vitesse critique d'érosion  $U_*$  en fonction du coefficient de marée (tableau 4, d'après Hoslin et al, 1984).

Ces mesures montrent que les vases non consolidées sont remises en suspension pour des valeurs de  $U_*$  très faibles (0,7 cm/s). Une grande mobilité des sédiments vaseux est ainsi mise en évidence ; elle permet de rendre compte des fluctuations saisonnières observées dans la partie orientale de la baie. Les dépôts vaseux résultant d'apports de crue ou de la remobilisation de sédiments fins reliques, sont très instables, particulièrement en période agitée durant laquelle la turbidité des eaux augmente for-

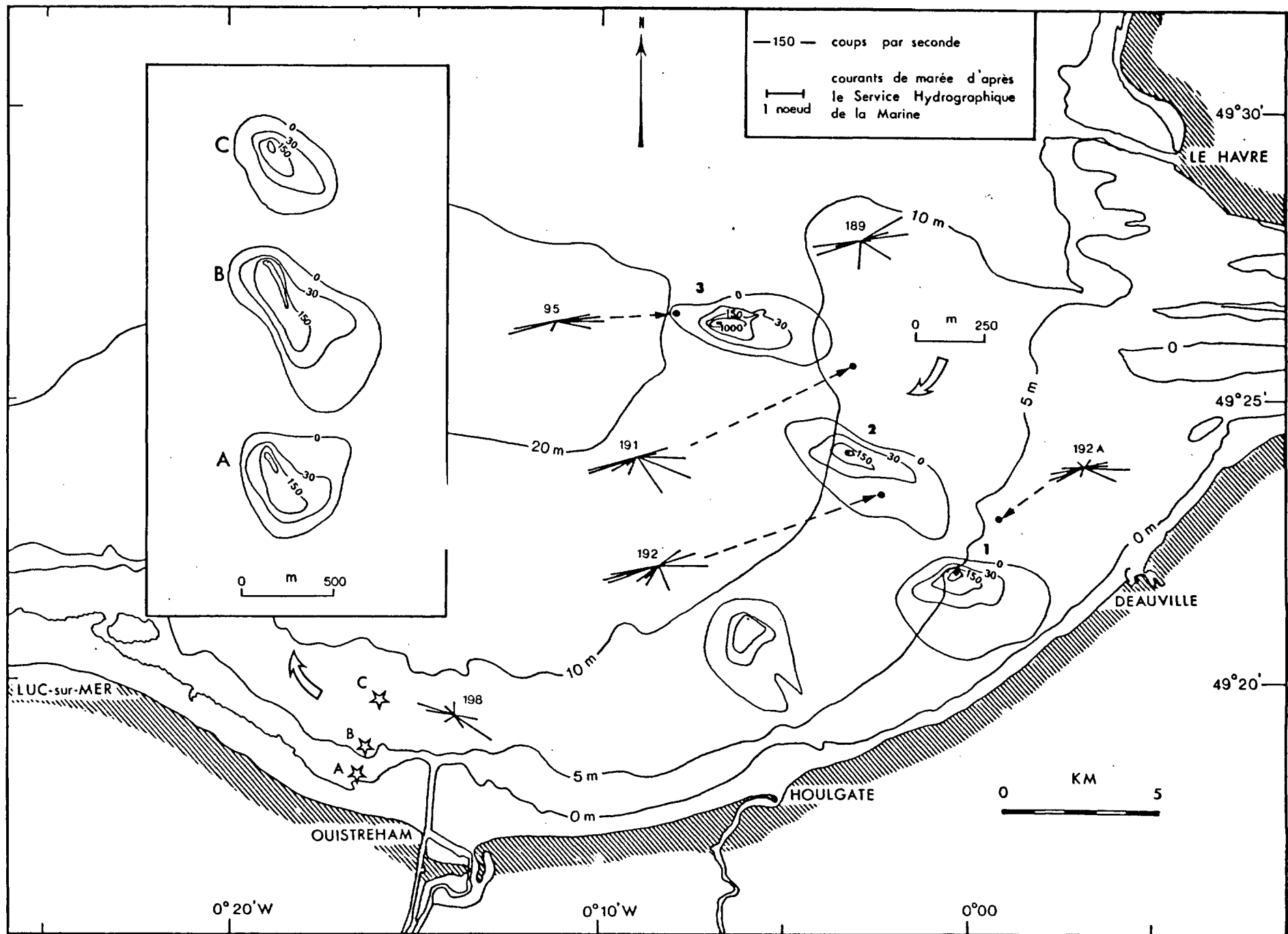


FIG.16-EXPERIENCES DE OUISTREHAM,DEAUVILLE OUEST ET HOULGATE COURBES ISOCHOCS 4 MOIS APRES L'IMMERSION DES TRACEURS

tement (Avoine et al, 1984).

Dans l'estuaire de la Seine et plus précisément devant Honfleur, une expérience par traceurs radioactifs a été réalisée en période d'étiage. Elle a permis de déterminer le début d'entraînement, le transport avec début de remise en suspension et le transport en suspension généralisé de particules identiques aux sédiments en place (Caillot, 1982). Il ressort que la vitesse critique d'érosion  $U_*$  doit être trois fois supérieure à celle du début d'entraînement pour obtenir une remise en suspension de 30 à 40 %, soit 3,5 cm/s pour des particules de 0,175 mm, et 4,8 cm/s pour celles de 0,26 mm. Ces valeurs de  $U_*$  correspondent respectivement à des vitesses instantanées à 1 m du fond de 0,7 m/s et de 0,95 m/s. Le transport est généralisé (90 % de remise en suspension) lorsque  $U_*$  dépasse 4,8 cm/s pour les particules de 0,175 mm et 6 cm/s pour celles de 0,26 mm; ce qui équivaut à des vitesses de 0,9 m/s et de 1,1 m/s. Ces résultats se rapprochent des calculs théoriques selon la formule de transport d'Einstein (Caillot, 1982). La pénétration vers l'amont des sédiments marins, observée avec les traceurs radioactifs, est due à l'asymétrie de l'onde de marée qui entraîne dans l'estuaire, sous l'action dominante des courants de flot, un transport résultant supérieur à celui occasionné par les courants de jusant.

## 1.2. - Partie nord-orientale de la baie

Pour mieux connaître les mouvements des produits de dragage du port du Havre, rejetés au large d'Octeville par des fonds de - 14 m, plusieurs expériences par traceurs radioactifs ont été réalisées le long du littoral du Pays de Caux (Laboratoire Central d'Hydraulique de France, 1973 ; Tola, 1984). Elles permettent de tirer de précieux enseignements sur les directions de transits sédimentaires dans cette partie de la baie (fig. 15). La première étude consistait à immerger près de la surface, à la hauteur du dépôt de dragage, 70 tonnes de sédiments sablo-vaseux marqués à l'or 198, pendant le flot d'une marée de vives eaux. Cette expérience montre que les vases ont parcouru 7 km vers le NNE en 4 heures, en formant un nuage turbide qui se sédimente progressivement. Les sables rejetés parallèlement se répartissent plus rapidement sur les fonds sur une distance de 1500 m. Une deuxième étude a été entreprise pour suivre l'évolution dans le temps des produits déposés sur le fond. Deux immersions de verre à l'irridium 192, de granulométrie identique à celle des matériaux dragués, ont été effectuées de part et d'autre du dépôt de dragages. Une troisième im-

mersion de sables marqués, de granulométrie proche de celle des sédiments naturels du fond, a été faite au large de Cauville, par des fonds de - 14 m (fig. 15). Il apparaît que les sédiments naturels en place ne subissent qu'un très faible mouvement vers le NNE, comparativement aux matériaux dragués, très mobiles sous les mêmes actions hydrodynamiques. Ainsi, les houles de secteur dominant W à NW font remonter la fraction sableuse la plus fine des produits de dragage en direction de la côte, tandis que la fraction la plus grossière se déplace rapidement vers le NNE dans la direction du flot.

Entre le Havre et Antifer, les expériences par traceurs radioactifs permettent de conclure à un mouvement général des sédiments vers le NE par des fonds inférieurs à - 15 m, ce qui occasionne notamment l'envasement progressif du terminal pétrolier d'Antifer (Crevel, 1983). D'autres expériences, réalisées à la limite du domaine étudié, d'une part au N du terminal pétrolier, d'autre part sur les riddens situés au NE de la baie de Seine (fig. 15), confirment l'existence d'un transit sédimentaire depuis la partie nord-orientale de la baie vers la Manche orientale.

### 3- DISCUSSION.

Les différentes expériences par traceurs radioactifs dans la partie Sud-orientale de la baie de Seine montrent que la résultante des transits sédimentaires par charriage est dirigée vers l'Est, c'est-à-dire vers l'estuaire de la Seine. Ce transit est dû à l'action des courants de flot dominants. Près du rivage, au-dessus de l'isobathe - 6 m, les fortes houles de secteur ouest à nord-ouest provoquent en outre un déplacement des sables vers la côte, d'autant plus important que la tranche d'eau diminue.

En extrapolant à toute la largeur de l'embouchure (12 km) les débits solides calculés dans les marquages de sables réalisés au NW de Deauville, le volume annuel introduit en charriage dans l'estuaire serait de 65 000 m<sup>3</sup>. Nos résultats montrent également que les sédiments fins de la baie sont aisément remis en suspension par les courants de marée, même les plus faibles. D'après le modèle numérique établi par Salomon et Le Hir (1981) le déplacement résiduel de ces charges turbides s'effectue vers le secteur oriental.

L'ensemble des mouvements sédimentaires mis en évidence contribue donc au comblement de l'estuaire de la Seine mais certains problèmes se posent.

Les atterrissements annuels évalués par comparaison de relevés bathymétriques (Vigarié, 1964 et 1965 ; Avoine, 1981) sont de l'ordre de 4,5 millions de m<sup>3</sup> (moyenne établie sur la période 1934-1978). Le débit solide de la Seine est au maximum de 0,7 million de m<sup>3</sup>. La majeure partie des dépôts provient donc de la mer. De plus, 0,7 million de m<sup>3</sup> de vase sont dragués annuellement dans l'avant-port du Havre. Ce matériel se rattache directement à celui de l'estuaire de la Seine d'après ses caractéristiques minéralogiques et géochimiques (Avoine, 1981 ; Boust, 1981) ; il s'ajoute donc au bilan positif relevé. Ainsi, c'est environ 4,5 millions de m<sup>3</sup> de sédiments qui proviennent annuellement de l'horizon marin.

Dans ces apports, les données de Volmat (1929) et les travaux synthétiques du Laboratoire Central d'Hydraulique de France (1973 et 1980) montrent que l'érosion côtière ne contribue que pour 200 000 à 300 000 m<sup>3</sup>/an qui se répartissent comme suit :

- 60 000 à 100 000 m<sup>3</sup> de sable provenant des falaises du Pays de Caux entre Le Havre et le cap d'Antifer;
- 200 000 m<sup>3</sup> environ de matériaux (suspensions surtout) issus de l'érosion du littoral du Calvados entre Ouistreham et Honfleur.

L'essentiel des transits sédimentaires s'effectue donc en domaine subtidal. Compte-tenu des volumes impliqués et rapportés ci-dessus, le transport en charriage établi à l'aide des traceurs radioactifs (65 000 m<sup>3</sup>/an) apparaît sous-estimé. Cependant, il est probable que dans l'estuaire la majeure partie du matériel est introduite en suspension.

L'origine de ces sédiments peut maintenant être posée. Dès 1929, Volmat suggérait une érosion des fonds de la baie de Seine orientale à l'Est du méridien d'Houlgate. Il se basait sur la comparaison de relevés bathymétriques successifs et concluait à un abaissement moyen des fonds de 0,68 m pour la période 1834-1913. C'est un chiffre voisin de 1 cm/an. Sachant que la surface considérée (limitée au Nord par le parallèle du Havre) est d'environ 170 millions de m<sup>2</sup>, on obtient ainsi un démaigrissement annuel de l'ordre de 1,7 millions de m<sup>3</sup>. En élargissant le périmètre intéres-

sé à une ligne joignant Le Havre - Le Parfond - Luc-sur-Mer (extrémité orientale des rochers du Calvados) l'érosion annuelle s'élève à 3 millions de m<sup>3</sup>. Ces chiffres sont évidemment à prendre avec les plus grandes réserves sachant que les conclusions de Volmat demandent à être vérifiées et que s'il y a érosion, elle doit être très inégalement répartie. Néanmoins, ils aboutissent à des volumes dont l'ordre de grandeur est proche de celui que nécessitent les atterrissement dans l'estuaire de la Seine. Une érosion de la partie sud-orientale de la baie de Seine est donc très probable, le prisme sédimentaire holocène y est d'ailleurs mince (Auffret et d'Ozouville, 1985), les formations argilo-tourbeuses post-glaciaires affleurent largement (Avoine, 1981). Cette hypothèse n'exclut pas des apports en suspension d'origine plus lointaine venant sédimenter dans un fond de baie de moyenne à faible énergie. De tels apports sont prouvés par la présence de radionucléides issus des rejets de La Hague dans les sédiments fins de la zone considérée (Guéguéniat et al, 1979 ; Jeandel et al, 1980). Par contre, une alimentation par charriage de la baie de Seine sud-orientale doit être probablement très faible. La contribution des apports du large par rapport aux sources proximales est inconnue de même que la production biologique qui représente 20 à 25 % du matériel sédimenté.

Il faut encore noter que la possibilité d'une alimentation par des sédiments de la partie nord-orientale de la baie semble à exclure, compte tenu des résultats obtenus par les traceurs radioactifs montrant dans ce secteur un transit sédimentaire général vers le NNE, par des fonds inférieurs à - 15 m. D'autres travaux permettent de confirmer cette tendance, en particulier le calcul de l'intégrale de sollicitation au transport d'après un modèle numérique de courants (Salomon et Le Hir, 1981), ainsi que la mesure des flux résiduels de sédiments en suspension en différents points du littoral entre Le Havre et Antifer (Crevel, 1983). Ces travaux montrent cependant que les mouvements sédimentaires, pour l'essentiel du Sud vers le Nord au-dessus de - 15 m, s'inversent au-delà ; l'ampleur de ce transit du N vers le S doit toutefois être modérée.

En considérant l'ensemble de la baie de Seine orientale, entre le cap d'Antifer et l'embouchure de l'Orne, c'est-à-dire en prenant en compte les atterrissements dans les petits estuaires du Calvados (Orne, Dives, Touques), le volume des apports marins annuels est d'environ 5 millions de m<sup>3</sup>. A ce rythme, le prisme sédimentaire accumulé dans la partie orientale de la baie de Seine s'est considérablement appauvri au cours des derniers siècles tandis que se colmataient les estuaires, celui de la Seine principalement.

VI- LA DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE DANS LES ESTUAIRES DE LA BAIE  
DE SEINE - CONSEQUENCES SUR L'ENVIRONNEMENT

La connaissance de la dynamique sédimentaire permet d'appréhender les processus d'envasement et de colmatage dont ces milieux sont le siège, elle contribue aussi à la compréhension des caractères physico-chimiques et biologiques de ces environnements complexes qui représentent des zones de transits, de transferts et de stockage. La marée constitue à côté du débit fluvial un paramètre fondamental du fonctionnement estuarien et les nombreux travaux accomplis ces dernières années dans le monde conduisent à distinguer les estuaires macrotidaux et microtidaux. Dans ces derniers, bien représentés sur la côte est des Etats-Unis, l'influence de la marée est faible, la stratification des eaux est très marquée et les écoulements de densité contrôlent la circulation résiduelle orientée vers l'aval en surface et vers l'amont au fond. Dans les estuaires macrotidaux la marée joue un rôle essentiel, d'une part en créant de forts remaniements des fonds, d'autre part en provoquant des concentrations de charges turbides indépendantes de la circulation de densité.

Avec un marnage qui varie de 3m à 7,50m la baie de Seine est un milieu macrotidal où débouchent plusieurs estuaires, les principaux étant celui de la Seine, celui de l'Orne et le système double de la baie des Veys. Les nombreux travaux dont ils ont été l'objet récemment (Avoine, 1981, 1982 ; Avoine et al, 1981 ; Boust, 1981 ; Dubrulle et Larsonneur, 1984 notamment) conduisent à présenter ici une synthèse du fonctionnement estuarien en baie de Seine. Après avoir dégagé les traits essentiels de la dynamique sédimentaire, nous examinerons quelques problèmes liés à l'aménagement et à la sauvegarde de l'environnement.

1- LA DYNAMIQUE DES EAUX

L'onde sinusoïdale de marée qui se propage en baie de Seine se déforme sur les petits fonds par frottement de telle sorte que la courbe devient asymétrique ; la durée du montant est alors plus courte que celle du perdant. En outre une stabilisation du niveau marin se produit pendant 2h à 2h30 autour de la pleine mer. C'est en vives eaux que ces caractéristiques apparaissent le mieux. Au cours de la propagation de l'onde de marée

dans les estuaires, la déformation acquise dans la baie s'accroît fortement vers l'amont (fig. 17). L'élévation rapide du niveau de l'eau dans les chenaux est responsable du mascaret encore bien visible dans la baie des Veys mais très atténué dans les autres estuaires du fait des aménagements. Parallèlement, le rétrécissement des sections vers l'amont, la réflexion de l'onde sur les berges et le frottement sur le fond modifient conjointement l'amplitude de la marée. Celle-ci augmente légèrement dans la partie aval des estuaires avant de décroître progressivement vers

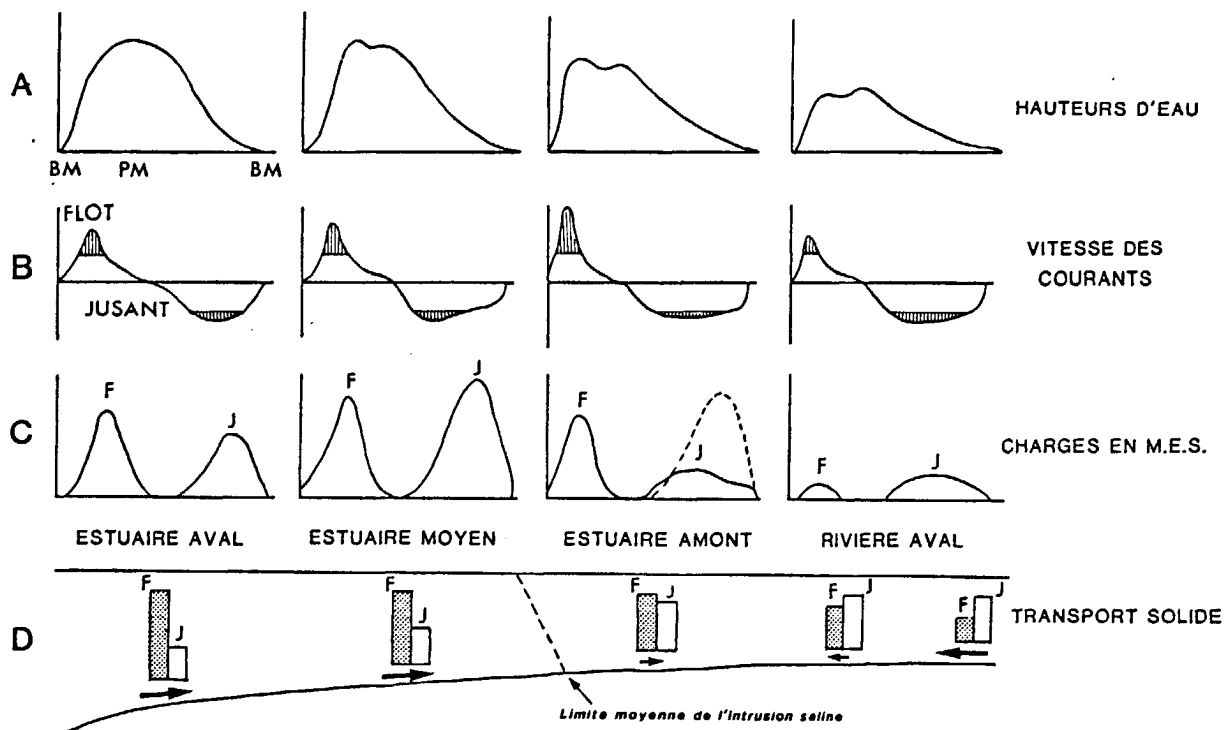


Fig.17. - Evolution schématique des principaux paramètres physiques dans les estuaires macrotidaux de la baie de Seine - Conditions de vive eau et d'étéage.

l'intérieur (fig. 17 A). Selon la terminologie de Le Floch (1961) il s'agit donc d'estuaires hypersynchrones. Il faut encore noter que sur l'Orne et les rivières de la baie des Veys, des aménagements transversaux ont fait disparaître la dynamique naturelle de l'estuaire amont.

L'asymétrie de la courbe de marée s'accompagne d'une asymétrie des courbes de vitesse de courant (fig. 17 B). La réduction importante de la



durée du montant induit une augmentation rapide des courants de flot après la basse mer. Par contre, le jusant s'établit progressivement après la longue étale de pleine mer. D'aval en amont on relève d'abord une amplification des courants de flot puis leur diminution graduelle (fig. 17 B). Par ailleurs, la figure 17 montre que les courants de flot atteignent leur maximum pour des hauteurs d'eau plus élevées que celles correspondant aux maxima de courants de jusant. Ces derniers se manifestent donc essentiellement dans les chenaux principaux alors qu'au flot de rapides courants s'exercent dans les chenaux secondaires, sur leurs berges et les bancs adjacents. Ces caractéristiques également observées dans la mer des Wadden (Postma, 1961) sont particulièrement nettes dans l'estuaire de la Seine où l'effet de chasse du jusant a été amplifié artificiellement par des digues (Avoine et al, 1981). Il faut ajouter que les cycles lunaires, vives eaux-mortes eaux et les variations du débit fluvial, altèrent le schéma général de fonctionnement décrit ci-dessus et applicable à une situation d'étiage et de vives eaux. Lorsque l'amplitude décroît, l'asymétrie de l'onde de marée s'estompe et les vitesses de courants de flot et de jusant deviennent comparables pour des valeurs plus faibles. Par ailleurs, l'augmentation du courant des rivières lors des crues, accroît l'effet du jusant et réduit celui du flot.

La salinité des eaux estuariennes varie longitudinalement et verticalement en fonction de la marée et du débit fluvial. Comme l'ont montré Allen et al. (1980-1982) pour différents estuaires macrotidaux, la marée, par la turbulence qu'elle induit, exerce un rôle essentiel sur le mélange eaux douces-eaux salées. Aussi, ce mélange s'atténue-t-il en mortes eaux par faibles courants ; il en résulte alors une stratification beaucoup plus marquée qu'en vives eaux. De plus, les gradients de salinité se réduisent en période d'étiage, lorsque les eaux marines pénètrent en masse dans les estuaires, tandis qu'en crue se forme un coin salé, particulièrement bien développé en mortes eaux. Durant les périodes de fort débit, en raison du va-et-vient de l'intrusion saline au cours de la marée, il faut également souligner que les estuaires se trouvent entièrement en eau douce à basse mer.

Le calcul de la circulation résiduelle déduite des mesures eulériennes de courants dans les chenaux et d'un modèle numérique pour la Seine (Salomon, 1981) fait apparaître d'une manière générale un mouvement résultant vers l'aval, à toutes profondeurs, dans les trois estuaires. Par contre, une circulation étagée avec des courants résiduels vers l'amont, près du fond, et vers l'aval, en surface, prend place dans les embouchures.

Le point nodal de circulation des eaux se situe donc la plupart du temps à ce niveau voire même plus au large, c'est-à-dire très en aval de la limite de l'intrusion saline. Ce schéma ne se rencontre pas dans les estuaires microtidaux où la circulation résiduelle étagée induite par les courants de densité, s'observe dans toute l'étendue de l'intrusion saline (Officer, 1975). Cette différence fondamentale est liée au régime macrotidal et au fait que les courants de jusant sont concentrés dans le chenal principal. Au flot, nous avons vu que le maximum de courant s'établit à un niveau d'eau plus élevé de telle sorte que la circulation résiduelle s'oriente vers l'amont, au-dessus des berges, comme cela a été montré dans l'estuaire de l'Orne. Ce schéma simple se complique dans l'embouchure de la Seine qui comporte plusieurs chenaux. Là, le chenal central de navigation prolongeant le cours du fleuve constitue un chenal de jusant avec circulation résiduelle orientée vers l'aval, tandis que les chenaux adjacents, au Nord et au Sud, forment des chenaux de flot à résultante amont. Cette ambivalence prononcée a été largement amplifiée par les travaux d'endiguage (Avoine, et al, 1981). La circulation résiduelle dans les estuaires macrotidaux comme ceux de la baie de Seine présente donc des caractères plus complexes que ceux décrits en régime macrotidal, d'autant plus que le stockage et le relargage d'eau au cours des cycles lunaires successifs de vives eaux et de mortes eaux pourrait, selon Allen et al (1980-1982), être à l'origine de mouvements résiduels importants.

## 2- LA DYNAMIQUE DES SEDIMENTS EN SUSPENSION

Les études réalisées dans les 3 estuaires considérés mettent clairement en évidence le rôle fondamental de la marée sur la dynamique sédimentaire, notamment sur la remise en suspension des dépôts et sur le piégeage des matières en suspension (M.E.S.). Plusieurs échelles de temps sont à considérer : les cycles semi-diurnes, les cycles lunaires vives eaux-mortes eaux et les cycles saisonniers liés aux variations du débit fluvial.

### 2.1. - Dynamique sédimentaire au cours d'un cycle de marée

Une étroite corrélation peut être mise en évidence entre les variations de la vitesse des courants de marée et la charge en M.E.S. près du fond (fig.17 B et 17 C). Schématiquement, le maximum de M.E.S. se rencontre lors des pointes de courant de flot et de jusant, lorsque les vitesses mesurées à 1m du fond ( $U_{100}$ ) dépassent la vitesse critique d'érosion des sédiments ( $U_c$ ). La turbidité augmente progressivement tant que

$U_{100} > U_c$  et décroît lorsque  $U_{100} < U_c$ .  $U_c$  varie avec la nature granulométrique des fonds. Dans le cas de la Seine qui a fait l'objet d'études détaillées, la fraction silto-argileuse est remise en suspension lorsque  $U_{100}$  dépasse 60 cm/s. L'érosion maximum se produit lorsque  $U_{100}$  atteint 100 cm/s ce qui correspond à la remise en suspension des sables fins largement dominants dans cet estuaire (Avoine, 1981).

Dans le détail, le rapport entre la charge en M.E.S. et la vitesse des courants n'est pas linéaire d'amont en aval des estuaires (fig.17 C). A l'aval, la dominance des courants de flot s'accompagne de charges turbides plus importantes au montant qu'au perdant ; la relation est alors respectée. Dans la partie moyenne, l'augmentation des vitesses de flot due au raidissement de l'onde de marée provoque de fortes remises en suspension mais les charges relevées au jusant sont supérieures malgré des courants de moindre vitesse. Dans cette portion de l'estuaire, l'addition d'une seconde source de M.E.S. provenant de remaniements amont perturbe la relation turbidité-vitesse de courants. Dans la partie amont, la courte durée du flot, malgré des vitesses encore amplifiées, entraîne des turbidités moindres. Au jusant, les observations varient selon les estuaires. Avec une tranche d'eau relativement élevée et de faibles vitesses comme dans le cas de la Seine, les teneurs en M.E.S. sont réduites. Par contre, pour l'Orne et la baie des Veys, l'étroitesse de l'estuaire amont engendre, sous faible tranche d'eau, des turbidités importantes, indépendantes de la vitesse des courants. Au-delà de l'intrusion saline, dans la partie fluviale, vitesses de courants et charges en M.E.S. décroissent parallèlement.

La remise en suspension des sédiments par les courants de marée est à l'origine d'un bouchon vaseux, très turbide, d'autant mieux développé que les vitesses sont élevées. La figure 18 A représente l'évolution schématique de ce bouchon vaseux au cours d'un cycle de marée de vives eaux. Il se produit des phénomènes de gonflement et de dégonflement en relation avec la fluctuation des vitesses de courant.

De fortes remises en suspension ont lieu au cours du flot et du jusant, parfois très en amont de l'intrusion saline comme cela a également été observé dans d'autres estuaires (Allen et al, 1977 ; Vale et Sundby, 1984). Une grande partie des suspensions se décante durant l'étalement de pleine mer de telle sorte que le bouchon vaseux disparaît presque totalement ; ce phénomène montre bien qu'il est étroitement lié aux remises

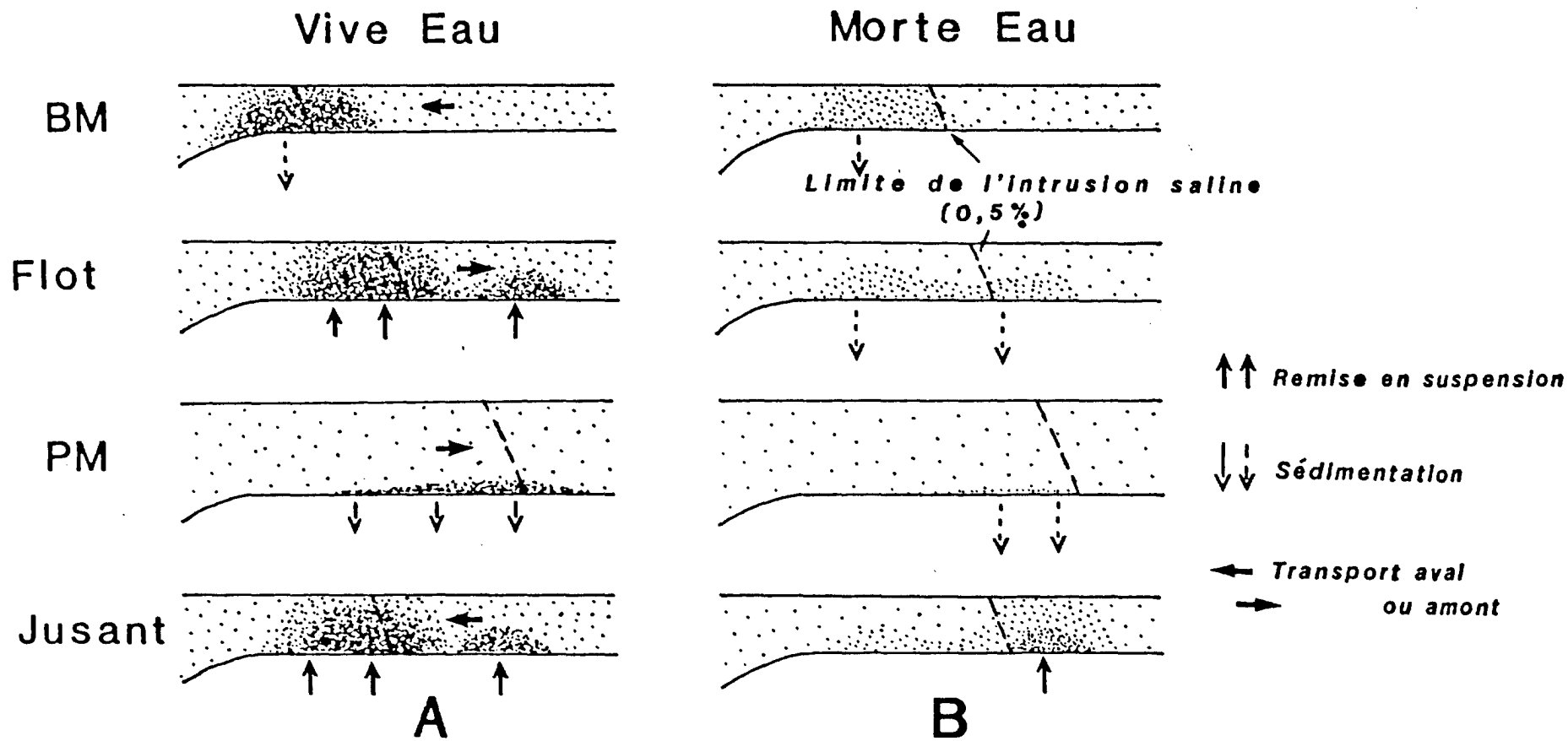


FIG.18-EVOLUTION SCHEMATIQUE DU BOUCHON VASEUX AU COURS DE LA MAREE, EN VIVE-EAU ET EN MORTE-EAU, DANS LES ESTUAIRES MACROTIDAUX DE LA BAIE DE SEINE

en suspension. Au cours du cycle semi-diurne, la masse totale de M.E.S. varie dans un rapport de 1 à 10 environ entre la pleine mer et le maximum de turbidité au cours du flot. Cette évolution cyclique, calquée sur celle des courants, s'accompagne d'un mouvement de va-et-vient au cours de la marée, de 10 à 20 km selon la dimension des estuaires.

Ce modèle d'évolution du bouchon vaseux est largement représenté dans les estuaires macrotidaux. Des schémas comparables ont en effet été décrits dans d'autres estuaires français (Allen, 1972 ; Allen et al, 1977, 1980, 1982 ; Beslier, 1982), en Grande Bretagne, dans la Severn (Kirby et Parker, 1983) et le Tay (Dobereiner et Mc Manus, 1983), au Portugal dans le Tage (Vale et Sundby, 1984)... Compte-tenu de la grande variabilité de la masse de sédiments en suspension au cours de la marée dans les estuaires macrotidaux, ces derniers diffèrent fondamentalement des environnements microtidaux où la masse du bouchon vaseux n'évolue presque pas à cette échelle de temps, sauf près du fond où se produisent des remises en suspension locales (Schubel, 1968, 1969). La turbulence restant faible, les eaux plus chargées du fond ne se mélangent pas avec la tranche d'eau supérieure. C'est tout différent en régime macrotidal où apparaissent des profils verticaux de turbidité homogènes en période de forts courants (Avoine, 1981 ; Kirby et Parker, 1983).

En étiage, lorsque l'influence des marées est maximum, l'évaluation des charges solides transportées au cours du flot et du jusant montre une nette prédominance du flot dans la partie aval et moyenne des estuaires ce qui entraîne une remontée des sédiments fins vers l'amont, au-delà de la limite d'intrusion saline (fig. 17 D). Ce résultat est une conséquence de l'asymétrie de l'onde de marée et du niveau élevé du plan d'eau lorsque s'établissent les courants maxima de flot. Un type de transport analogue, dû à l'asymétrie flot-jusant, a déjà été décrit par Postma (1961) en mer des Wadden et Groën (1967) en a donné une description théorique. Il se manifeste également en régime macrotidal, notamment dans les marais de Floride, où une asymétrie en faveur de jusant induit au contraire une résultante de transport vers l'aval (Boon, 1974-1975). D'autres facteurs combinés à la marée, telle la morphologie, interviennent également, mais d'une manière générale, dans les estuaires macrotidaux, la tendance est au transport résultant vers l'amont. Allen et al (1980, 1982) voient dans cette caractéristique une explication possible du piégeage des sédiments

fins et du maintien du bouchon vaseux dans le domaine estuarien. Ce mécanisme oppose les environnements macrotidaux aux estuaires microtidaux dans lesquels la formation du bouchon vaseux est principalement liée à la concentration des particules en suspension au niveau du point nodal de la circulation résiduelle (Nichols et Poor, 1967).

## 2.2. - Influence des cycles lunaires vives eaux-mortes eaux

Les cycles vives eaux-mortes eaux se traduisent par des variations d'amplitude de 3 à 8 m et des variations parallèles de la vitesse des courants de marée qui se reflètent sur la capacité d'érosion des sédiments. Ainsi, en mortes eaux, la charge maximale en M.E.S. peut-elle être 20 fois moins importante qu'en vives eaux (fig. 18 B). Le bouchon vaseux, alors peu développé et peu évolutif, est comparable à celui rencontré dans les estuaires mésotidaux (Vale et Sundby, 1984). Ces variations cycliques de la masse de sédiments en suspension ne se rencontrent pas en régime microtidal.

Les cycles lunaires sont à l'origine de cycles sédimentaires importants en régime macrotidal. Les études entreprises, notamment sur la Gironde (Allen, 1972 ; Allen et al, 1975 et 1977), ont conduit ces auteurs à mettre en évidence la formation de crème de vase durant les mortes eaux, période de sédimentation, et son érosion au cours des vives eaux. La formation de lentilles turbides a été décrite dans d'autres estuaires, mais dans le cas de ceux de la baie de Seine, cela n'a pas été observé. Il semble que la nature dans l'ensemble plus sableuse des sédiments en soit la cause. Ce matériel relativement grossier introduit par la mer, est largement prédominant sur les apports fluviaux fins de telle sorte qu'il se crée un bouchon silto-sableux. C'est là une différence notable entre les estuaires de la baie de Seine et les autres estuaires macrotidaux connus.

## 2.3 - Influence des variations du débit fluvial

Les variations de débit fluvial jouent un rôle important dans la dynamique sédimentaire estuarienne, en particulier sur la position, l'extension et la concentration du bouchon vaseux (fig. 19 A). En étiage, ce dernier reste cantonné dans les estuaires et la masse de sédiments en suspension est maximale. Lorsque le débit fluvial augmente, le bouchon vaseux est déplacé vers l'aval et partiellement expulsé en mer ; la quan-

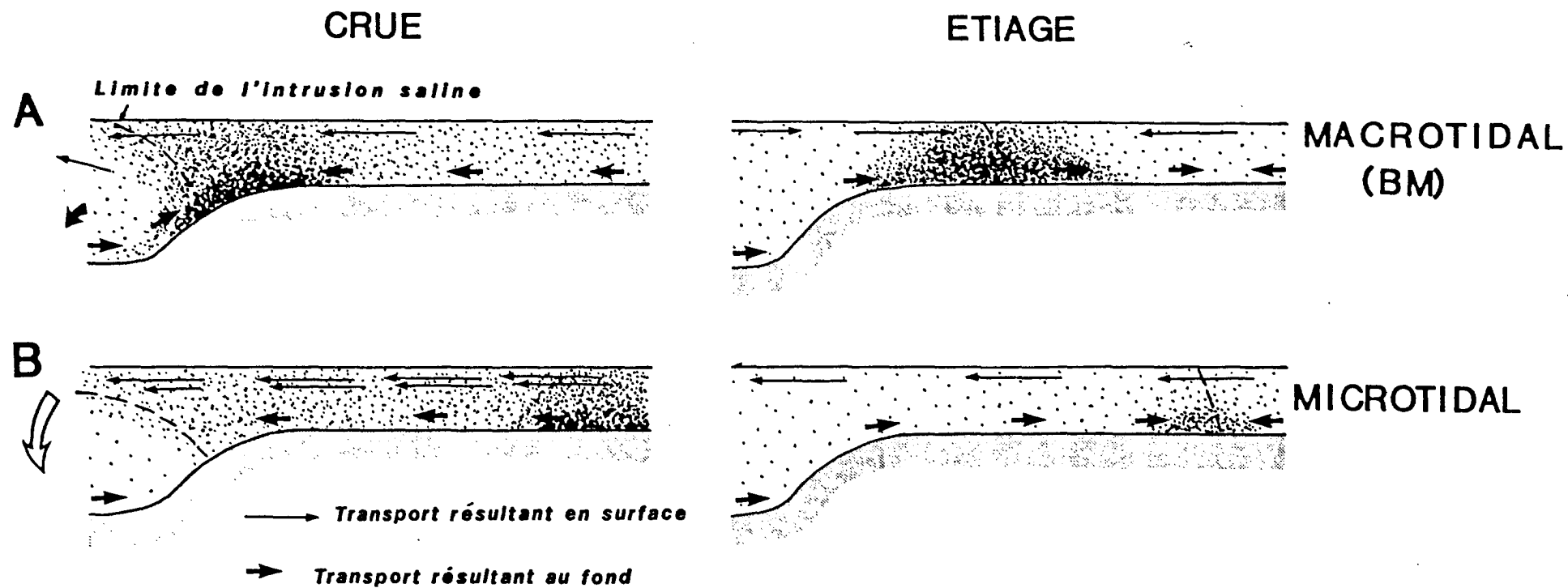


FIG.19-EXTENSION SCHEMATIQUE DU BOUCHON VASEUX, EN ETIAGE ET EN CRUE,  
 EN REGIME MACROTIDAL ET MICROTIDAL

tité de M.E.S. stockée en estuaire décroît donc fortement. En termes de charges solides, les courants de jusant sont alors prédominants sur les courants de flot et leur résultante s'oriente vers l'aval dans tout l'estuaire.

Ce schéma s'oppose à celui rencontré dans les environnements microtidaux (fig. 19 B) où le bouchon vaseux est d'autant mieux développé que le débit fluvial est élevé (Schubel, 1974 ; Nichols, 1977). En étiage, le bouchon vaseux, très peu turbide, est situé en amont, à la limite de l'intrusion saline, dans la zone du point nodal de circulation. Lors des crues, le système est fortement déséquilibré. Les apports solides et l'érosion des fonds due aux courants de jusant fortement amplifiés par le débit élevé de la rivière, sont à l'origine de la formation d'un bouchon vaseux très turbide qui se maintient dans la même zone que précédemment c'est-à-dire très en amont de l'intrusion saline rejetée alors à l'aval. Selon les études de Schubel (1974) et Nichols (1977), le milieu retrouve ensuite son équilibre en 4 à 8 semaines.

### 3 - CONSEQUENCES SUR L'ENVIRONNEMENT

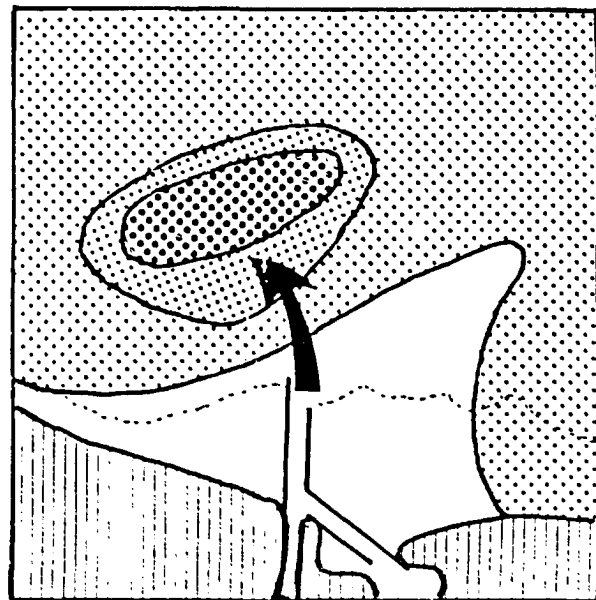
Les processus sédimentaires qui viennent d'être décrits ont de nombreuses répercussions sur l'environnement estuarien et les abords marins proches. Les principaux problèmes qui se présentent en baie de Seine concernent la maintenance des chenaux de navigation, les envasements intertidaux, subtidaux et portuaires, les problèmes de pollution.

A l'intérieur des estuaires, les mouvements sédimentaires à l'échelle d'une marée sont considérables. La remise en suspension maximale lors du flot équivaut en effet à une érosion de 1 cm sur l'ensemble du domaine fluvio-marin. C'est, nous l'avons vu, le bouchon vaseux qui contrôle la sédimentation ; tout particulièrement dans les ports et les chenaux. Dans le cas de la Seine par exemple, des envasements importants se produisent devant les écluses du canal de Tancarville en période d'étiage, lorsque le bouchon vaseux occupe la partie amont de l'estuaire, à 25 km de l'embouchure environ. L'envasement du port de Honfleur est un phénomène plus constant dû à sa position aval, dans la zone de balancement du bouchon vaseux. La difficulté de maintenir une souille en amont de Honfleur a fait renaître un vieil adage : plus on drague profond, plus il y a sédimentation.

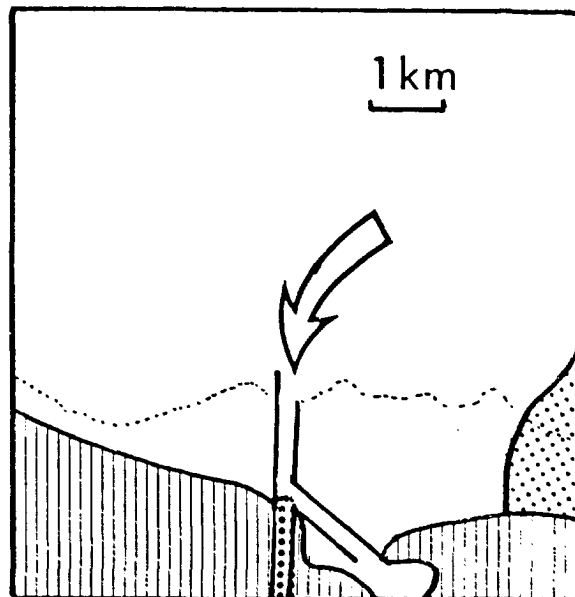


En l'occurrence, des expériences mettant en oeuvre des traceurs radioactifs ont confirmé la remise en suspension de sédiments sableux situés à l'aval de la souille et leur transfert vers l'amont induisant le comblement observé (Avoine et al, 1984). D'ailleurs, la tendance au colmatage est générale dans les estuaires de la baie de Seine fortement alimentés à l'aval par des apports marins sous l'action des houles et des courants de flot très actifs en période d'étiage. On évalue à plus de 4 millions de m<sup>3</sup> les dépôts annuels dans l'estuaire de la Seine, la contribution fluviale ne représentant qu'à peine le 1/6 de cet important volume. Dans le cadre de leur évolution postglaciaire, les estuaires considérés sont aujourd'hui séniles, la tendance est à la formation d'un chenal étroit, peu profond, cheminant entre des zones hautes, progressivement hors d'eau. Malgré une accentuation de cet évolution par endigages successifs, la Seine apparaît comme le moins évolué des systèmes estuariens étudiés en offrant encore des surfaces naturelles propices à l'accumulation d'importants volumes de sédiments. A l'opposé, le colmatage estuarien est presque total en baie des Veys.

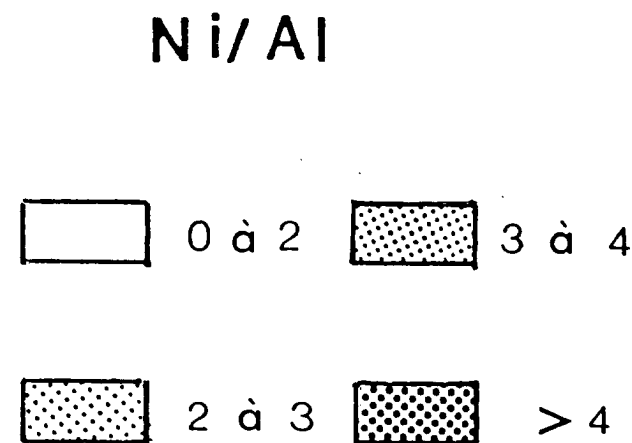
La sédimentation vaseuse qui s'accompagne de pollutions chimiques ou organiques est étroitement liée aux variations du débit fluvial. En crue, le bouchon vaseux est partiellement expulsé hors des estuaires, du matériel sédimentaire évacué en mer. Au contraire en étiage, les transports prédominants s'effectuent vers l'amont. L'utilisation d'oligoéléments métalliques comme traceurs permet de caractériser ces mouvements ; l'estuaire de l'Orne en donne un bon exemple en considérant le nickel comme marqueur des suspensions (fig. 20). Il apparaît que durant les crues les sédiments s'accumulent dans l'avant-port de Caen-Ouistreham, dans le chenal et dans le domaine marin proche. Pendant les longs étiages, le matériel déposé devant l'embouchure est progressivement remobilisé, mélangé, pour une partie dispersé en baie de Seine, une autre partie étant réintroduite dans l'estuaire accompagnée de particules marquées par des radionucléides industriels provenant du large (Auffret et al, 1985 ). Dans l'estuaire de la Seine, des envasements comparables se produisent dans le port du Havre et dans l'embouchure (Avoine et Crevel, 1985 ). Quant à ceux qui se manifestent en baie des Veys, ils ont un impact important sur la qualité sanitaire des parcs à huîtres de la région de Grandcamp (Dubrulle et Larsonneur, 1984) ; ils sont schématisés sur la figure 21. En crue, des sédiments vecteurs de polluants sont transportés en mer avec le jusant, puis partiellement réintroduits dans la baie avec le flot. Par décantation autour de la pleine mer, des dépôts s'effectuent dans les zones abritées, en



CRUE

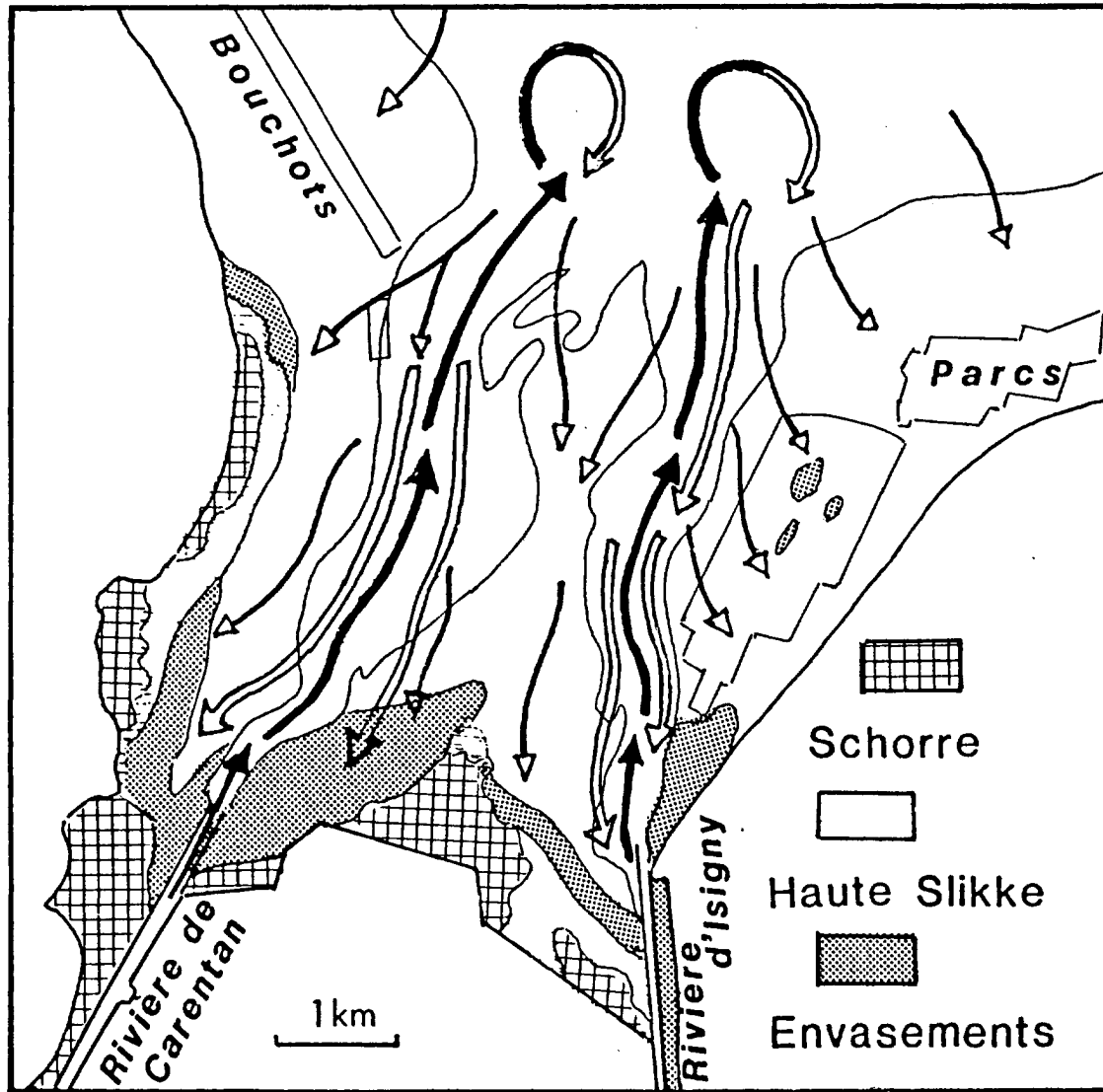


ETIAGE



99

FIG.20-REPARTITION DES TENEURS EN NICKEL NORMALISEES A L'ALUMINIUM DANS LES SEDIMENTS DE L'EMBOUCHURE DE L'ORNE, EN CRUE ET EN ETIAGE



→ Jusant } dans l'axe  
 → Flot } des  
           } chenaux  
 → Flot dans les  
           } zones découvrantes

Schorre  
 Haute Slikke  
 Envasements

FIG.21-REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU FONCTIONNEMENT HYDROSEDIMENTAIRE DE LA BAIE DES VEYS

particulier sur les parcs à huitres les plus internes. Sous l'influence des courants de marée et des houles, le désenvasement se produit en périodes de faibles débits et le matériel fin est en partie repoussé vers l'amont dans les chenaux et sur les slikkes adjacentes ; il pourra être repris par la crue suivante. Il faut souligner que dans cette baie, les importants travaux de poldérisation ont presque entièrement fait disparaître les vasières susceptibles de recevoir les charges turbides et de les stocker. Le double système estuarien est presque réduit aux chenaux aménagés des rivières de telle sorte que son influence s'est accrue sur le proche horizon marin.

Un dernier problème important sur le plan pratique concerne le temps de résidence de l'eau et des suspensions dans les estuaires. Comptenu du degré de colmatage des estuaires, des endiguements et de la dynamique du bouchon vaseux en fonction des variations du débit fluvial, les temps de résidence sont très courts en période de crue, de l'ordre de quelques heures à quelques jours, alors qu'ils atteignent quelques semaines à plusieurs mois en étiage. Ces données sont à prendre en considération dans l'établissement des bilans massiques de contaminants. Il convient également d'évoquer le rôle du régime macrotidal dans certains mécanismes chimiques au niveau des estuaires. En période d'étiage, il est classique d'observer un enrichissement de la phase dissoute pour de nombreux métaux, au niveau du bouchon vaseux, résultant de la remise en suspension qui provoque un relargage d'une fraction des métaux à l'état particulaire et favorise le mélange des eaux interstitielles avec les eaux de l'estuaire (Boust, 1981 ; Avoine et al, 1984). En période de crue, l'intensité des apports fluviaux et les très courts temps de résidence expliquent la relative homogénéité observée dans l'ensemble de l'estuaire. Le caractère macrotidal des milieux considérés, par les turbulences et les brassages qu'il entraîne, conduit enfin à des taux de pollution relativement modérés malgré l'importance des apports.

LES ESTUAIRES DE LA BAIE DE SEINE SONT TYPIQUES DU CARACTERE MACROTIDAL avec :

- les fortes turbulences induites par les courants de marée,
- une circulation résiduelle orientée vers l'aval dans les chenaux principaux et vers l'amont dans les zones latérales,
- un bouchon "vaseux" de nature principalement silto-sableuse dont

la dimension et la concentration suivent étroitement le cycle de marée. Son développement est plus important en étiage, alors qu'il est partiellement évacué en crue.

- une tendance au transport sédimentaire vers l'amont sous l'action dominante du flot due à l'asymétrie de l'onde de marée. La conséquence est un colmatage progressif résultant principalement d'apports marins, à dominante sableuse.

C'EST EN ETIAGE ET EN VIVES EAUX QUE LA PLUPART DE CES CARACTERISTIQUES RESSORTENT LE PLUS NETTEMENT.

## CONCLUSIONS

---

La mise en oeuvre du programme pluridisciplinaire de recherches sur la baie de Seine a été réalisée depuis 1982 dans le cadre du GRECO MANCHE grâce à une large coopération d'équipes scientifiques. Nos travaux ont porté sur l'estuaire de la Seine, sur l'estuaire de l'Orne et la baie des Veys et sur l'ensemble de la baie de Seine. Parallèlement aux apports liquides, les apports solides de la Seine ont été évalués et caractérisés, les modalités d'érosion et de dépôt ont été déterminées afin de définir le fonctionnement hydrosédimentaire de la baie de Seine, milieu macrotidal, de géométrie simple et régulière, soumis à de fortes influences fluviales.

Les apports de la Seine ont été quantifiés. Dans nos régions, il ressort que la première crue est responsable des apports les plus importants, tant en matières en suspension qu'en métaux-traces. Pour ces derniers, les calculs indiquent des teneurs à l'état dissous relativement élevées en Zn, Pb, Cu et surtout Cd et Ni. Le chiffrage des apports à l'état particulaire révèle une contribution anthropique importante, supérieure à 85 % pour Hg, Cu, Cd, Zn, Ni, Pb et Cr. De tels résultats quantitatifs manquent pour les autres rivières de la baie de Seine. Par contre, la dynamique estuarienne a été définie pour les principaux estuaires. Leur caractère macrotidal engendre d'intenses remaniements, un bouchon vaseux tantôt volumineux et concentré, tantôt presque inexistant, des échanges sur toute la colonne d'eau, une forte dilution des polluants, une vaste dispersion du matériel. Ce régime que l'on qualifie même parfois d'hypertidal, tant l'effet des marées y est déterminant, assure le maintien d'un degré de pollution modéré en baie de Seine bien que les apports soient relativement élevés en différentes substances nocives.

Des fluctuations envasements - désenvasements ont été mises en évidence en plusieurs régions de la baie de Seine tant par suivi direct des fonds que par la reconnaissance au sonar à balayage latéral. On sait que les apports brutaux de crue produisent des envasements aux embouchures tandis que les houles engendrent d'importantes remises en suspension. Il reste cependant beaucoup à faire en ce domaine car les effets de tempêtes sont fort mal connus. Les progrès attendus ne pourront provenir que de suivis concentrés dans le temps et surtout de mesures en continu, in situ, par station autonome.

Dans l'étude du fonctionnement hydrosédimentaire de la baie de Seine, les acquis sont nombreux. Il ressort notamment qu'en période d'étiage du matériel sédimentaire est réintroduit en estuaire, très en amont parfois. Il en résulte un bilan sédimentaire positif et le comblement progressif de ces exutoires désormais fortement aménagés. Depuis un siècle, les zones naturelles de dépôt ont peu à peu disparu de telle sorte qu'à présent, les estuaires de la baie de Seine sont davantage des milieux de transit que de stockage. Ainsi, l'impact des pollutions sur le proche horizon marin se trouve-t-il renforcé. En baie des Veys par exemple, la poldérisation quasi complète des couloirs estuariens a supprimé les vasières amont et engendré le glissement des champs vaseux vers l'aval, ce qui défavorise aujourd'hui le développement des activités ostréicoles au Sud-Ouest de Grandcamp.

D'après l'ensemble des résultats acquis dans la partie orientale de la baie de Seine, le bilan sédimentaire s'établit à partir des processus suivants. Il existe des apports issus de la Seine en crue, non chiffrés, mais probablement fort modestes en comparaison des importants volumes déversés sur le dépôt de dragage d'Octeville, en moyenne 2,4 millions de m<sup>3</sup>/an. 30 % de ces apports anthropiques, hétérogènes, restent sur place. Une partie du matériel, évacué vers le Nord, se répartit, temporairement au moins, sur les fonds. La fraction piégée par la digue du port d'Antifer représente environ 15 %, tandis que, le système n'étant pas clos, du matériel fin peut être progressivement dispersé plus loin pour sortir de la baie. Nous n'avons à présent qu'une seule donnée sur les flux de matières entre la baie de Seine et la Manche orientale. Située au Nord d'Antifer, elle indique un flux résiduel vers l'E en surface et vers le SSW au fond (Avoine, communication orale). Il est certain que des travaux restent à faire pour définir plus précisément les relations entre baie de Seine et Manche orientale. A l'intérieur même de la baie des problèmes restent également posés, notamment celui des relations entre la partie occidentale, limitée par la ligne Barfleur - pointe de la Percée, et le reste de la baie de Seine. Il y a dualité de fonctionnement caractérisée par des mouvements vers l'Ouest et le Nord-Ouest dans la partie occidentale et vers le Sud-Est dans les zones centrale et orientale. Quant aux échanges ils demeurent très mal connus.

Les atterrissements dans l'estuaire de la Seine et dans le port du Havre sont chaque année de l'ordre de 5 millions de m<sup>3</sup> tandis que les apports annuels de la Seine sont au maximum de 0,7 million de m<sup>3</sup>. Il y a donc une importante alimentation en provenance de la mer. Comme l'érosion côtière ne contribue à ce bilan que pour 200 000 à 300 000 m<sup>3</sup>/an environ, l'origine subtidale est

prépondérante. Une érosion des fonds de la partie Sud-orientale de la baie de Seine a été mise en évidence qui n'exclut pas cependant des apports plus lointains. Ce régime sédimentaire s'est progressivement installé au cours de la transgression holocène. Les formations continentales ont été remaniées, des bioclastes marins ont été produits amenant l'accumulation de sédiments sableux à vaseux aux extrémités de la baie sous l'action de conditions hydrodynamiques dominées par les courants de marée (Larsonneur et al, 1982). Peu à peu ce matériel migre vers l'amont, le prisme sédimentaire adossé à la côte se prolonge dans les estuaires. Comme le montrent les enregistrements sismiques (Auffret et d'Ozouville, 1985), cette évolution conduit à l'émersion d'une barrière côtière abritant un estuaire sénile, aménagé ; c'est le cas des rivières du Calvados. L'embouchure de la Seine n'est pas encore parvenue à ce stade mais son calibre s'est fortement réduit depuis un siècle et demi.

Les différents résultats sédimentologiques obtenus en baie de Seine montrent qu'il y a sans cesse apports, échanges, érosions, dépôts, une dynamique active donc en milieu de haute énergie. Ces conclusions viennent se substituer à la vision figée que nous pouvions avoir de la baie de Seine il y a quelques années au-travers des seuls schémas de distribution des sédiments.



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AL - JABBARI M.H., Mc MANUS J. et AL - ANSARI N.A. (1980) - Sediment and solute discharge into the Tay estuary from the river system. Proc. Soc. Eding., vol. 78 B, p. 15-32.
- ALLEN J.R.L. (1984) - Sedimentary structures, their character and physical basis. Dev. in Sedimento., vol. 30, 1196 p., Elsevier ed., Amsterdam.
- ALLEN G.P. (1972) - Etude des processus sédimentaires dans l'estuaire de la Gironde. Thèse, Bordeaux, 314 p.
- ALLEN G.P., SAUZAY G., CASTAING P. et JOUANNEAU J.M. (1975) - Transport and deposition of suspended sediment in the Gironde estuary, France. In : Estuarine processes, t.2, Academic Press, New-York, p. 63-79.
- ALLEN G.P., CASTAING P. et JOUANNEAU J.M. (1977) - Mécanismes de remise en suspension et de dispersion des sédiments fins dans l'estuaire de la Gironde. Bull. Soc. Géol. Fr., (7), t. XIX, n°2, p. 167-176.
- ALLEN G.P., SALOMON J.C., BASSOULLET P., DU PENHOAT Y. et DE GRANDPRE C. (1980) Effects of tides on mixing and suspended sediment transport in macrotidal estuaries. Sediment. Geol., vol. 26, p. 69-90.
- ALLEN G.P., CASTAING P. et SALOMON J.C. (1982) - Effets de la marée sur le mouvement de l'eau et des sédiments dans les estuaires. Mém. Soc. Géol. Fr., N.S. N°144, p. 5-16.
- AUFFRET J.P., GUEGUENIAT P., LEPY M.C., PATRY J.P. et SAUR H. (1985) - Les radionucléides émetteurs gamma dans les sédiments de l'estuaire de l'Orne pendant les années 1977-1983. Colloque baie de Seine, Caen, p. 159-168.
- AUFFRET J.P. & LARSONNEUR C. (1977) - Paléovallées et bancs sableux entre l'estuaire de la Seine et le Nord du Cotentin. Journées Lennier, Bull. Soc. Géol. Normandie, LXIV, n° 14, p. 21-33.
- AUFFRET J.P. & ALDUC D., LARSONNEUR C. & SMITH A.J. (1983) - La Manche orientale, carte des paléovallées et bancs sableux. CNEEXO/BRGE éd, Orléans.
- AUFFRET J.P. et d'OZOUVILLE L. (1985) - Cartographie, par sismique réflexion à haute définition, du prisme sédimentaire holocène en baie de Seine orientale. Colloque baie de Seine, Caen, p. 53-59.

- AUFFRET J.P., WALKER P. & d'OZOUVILLE L. (1984) - Le sonar à balayage latéral et ses applications à l'étude des transports sédimentaires en Manche. XVIIIe Journées de l'hydraulique, Marseille, rap. 1/14, 8p.
- AUGRIS C. & AUFFRET J.P., CABIOCH L., KOCH P. (1985) - Etude de sillons sédimentaires courbes découverts en baie de Morlaix par sonar à balayage latéral. C.R.A.S., à paraître.
- AVOINE J. (1981) - L'estuaire de la Seine : sédiments et dynamique sédimentaire de l'estuaire de la Seine. 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.
- AVOINE J.; ALLEN G.P., NICHOLS M., SALOMON J.C. et LARSONNEUR C. (1981) - Suspended sediment transport in the Seine estuary, France : effect of man-made modifications on estuary-shelf sedimentology, In Estuary-shelf interrelations-ships, Mar. Geol., vol. 40, n° 1/2, p. 119-137.
- AVOINE J. & BOUST D., CREVEL L., DUBRULLE L., GUEGUENIAT P., 1984 - Sédiments et dynamique sédimentaire en baie de Seine. Soc. Hydro. Fr., 18e Journées de l'hydraulique, Marseille, rap. 1/3, 8 p.
- AVOINE J., BOUST D. et GUILLAUD J.F. (1984) - Flux et comportement des contaminants dissous et particulaires dans l'estuaire de la Seine (France). Proc. Symp. on contaminant fluxes through the coastal zone, Nantes, rap. 2 (à paraître).
- AVOINE J., CAILLOT A., HOSLIN R., LARSONNEUR C., MASSIAS J. et QUESNEY M; (1984) Mise en évidence des mouvements sédimentaires en baie de Seine à l'aide de traceurs radioactifs. Contribution à l'étude du comblement de l'estuaire de la Seine. XVIIIe Journées de l'Hydraulique, Marseille, p. I.2.1-I.2.8.
- AVOINE J. et CREVEL L. (1985) - Influence des apports fluviatiles en baie de Seine. Colloque baie de Seine, Caen, p. 69-76 (sous presse).
- AVOINE J., CREVEL L., DUBRULLE L., BOUST D. et GUEGUENIAT P. (1984) - Sédiments et dynamique sédimentaire en baie de Seine. XVIIIe Journées de l'Hydraulique, Marseille, p. I.3.1. - I.3.8.
- BELDERSON R.H. & KENYON N.H., STRIDE A.H., STUBBS A.R., 1972 - Sonographs of the Sea-floor, a picture atlas. Elsevier, Amsterdam, 185 p.

- BESLIER A. (1982) - Les caractères hydrosédimentaires de la rivière de Morlaix. Trav. Stat. Biol. Roscoff, N.S. n° 28, p. 1-57.
- BONNEFILLE R. (1963) - Essais de synthèse des lois de début d'entraînement des sédiments sous l'action d'un courant en régime continu. Bull. Cent. Rech. Chatou, n° 5, p. 67-72.
- BOON J.D. (1974) - Optimized of discharge and suspended-sediment transport in a salt-marsch drainage system. In : Relations sédimentaires entre estuaires et plateaux continentaux, Mém. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine, n° 7, p. 67-73.
- BOON J.D. (1975) - Tidal discharge asymetry in a salt marsh drainage system. Linnol Oceanogr., vol. 20, p. 71-80.
- BOUST D. (1981) - Les métaux-traces dans l'estuaire de la Seine et ses abords. Thèse 3ème cycle, Caen, 186 p.
- CAILLOT A. (1970) - Les méthodes de marquage des sédiments par des indicateurs radioactifs. Houille blanche, N.S. 7, 661-674.
- CAILLOT A. (1982) - Quelques emplois de traceurs radioactifs en milieu estuarien. Mém. Soc. Géol. Fr., N.S. n° 144, p. 111-115.
- CAILLOT A. (1983) - Guidebook on nuclear techniques in geology. Techn. Rep. Ser. 91, AIEA, p. 109-128.
- COURTOIS G. et HOURS R. (1964) - Propositions concernant les conditions particulières d'emploi des radioéléments artificiels pour étudier les mouvements de sédiments. Rap. Int. CEA/SAR DR/AR, 64-13, 38 p.
- COURTOIS G. et MONACO A. (1969) - Radioactive methods for the quantitative determination of coastal drift. Mar. Geol., vol. 7, p. 183-206.
- COURTOIS G. et SAUZAY G. (1966) - Les méthodes de bilan des taux de comptage de traceurs radioactifs appliquées à la mesure des débits massiques de charriage. Houille blanche, 3, 279-284.
- CREVEL L. (1983) - Contribution à l'étude de la dynamique sédimentaire dans la partie nord-orientale de la baie de Seine. Thèse 3ème cycle, Caen, 164 p.
- DOBEREINER C. et Mc MANUS J. (1983) - Turbidity maximum migration and harbor siltation in the Tay estuary. In : Dynamics of turbid coastal environment, Can. J. Fish. Aquat. Sci., n° 40 (suppl. 1), p. 117-129.

- DONARD O., LATOUCHE C., BOURG A.C.M. et VERNET J.P. (1983) - Occurrence and behaviour of mercury and cadmium in the sediments of an estuarine system : the Gironde. Int. Conf. "Heavy Metals in the Environment". Heidelberg, p. 960-963.
- DUBRULLE L. (1982) - Etude hydrosédimentaire de l'estuaire de l'Orne et du littoral adjacent. Thèse de 3ème cycle, Univ. Caen, 212 p.
- DUBRULLE L. & LARSONNEUR C. (1984) - Dynamique sédimentaire de l'estuaire de l'Orne. Soc. Hydro. Fr., 18e journées de l'Hydraulique, Marseille, rap. 1/6, 6 p.
- DUBRULLE L. et LARSONNEUR C. (1984) - La baie des Veys ; Etude hydrosédimentaire. Rap. ronéot., 115 p.
- ELHAI H. (1963) - La Normandie occidentale, entre la Seine et le golfe normand-breton, étude morphologique. Bière Ed. Bordeaux, 624 p.
- FLOOD R.D. (1981) - Distribution, morphology and origin of sedimentary furrows in cohesive sediments, Southampton water. Sedim., vol. 28, p. 511-529.
- GROEN P. (1967) - On the residual transport of suspended matter by an alternating tidal current Neth. J. Sea Res., 3 : 564-574.
- GUEGUENIAT P., AUFFRET J.P. et BARON Y. (1979) - Evolution de la radioactivité artificielle gamma dans les sédiments littoraux de la Manche pendant les années 1976-1977-1978. Océanol. Acta, vol. 2, n°2, p. 165-180.
- GUILLAUD J.F. (1983) - Evaluation des apports en matières en suspension à Montjean (Loire) pour une année hydrologique moyenne. Rap. ronéot. CNEXO, 5 p.
- HEATHERSHAW A.D. (1981) - Comparisons of measured and predicted sediment transport rates in tidal currents. In : Sedimentary dynamics of continental shelves, Mar. Geol. sp. iss., vol. 42, n° 1/4, p. 75-104.
- HOSLIN R., MASSIAS J., PUJOL J.P., REGNARD P. et ROLL T. (1984) - Etude au moyen de traceurs radioactifs des mouvements sédimentaires en baie de Seine. Rap. ronéot., CEA/ORIS/SAR/S/84-09/H 47, Saclay, 27 p.
- JEANDEL C., MARTIN J.M. et THOMAS A.J. (1980) - Origine et comportement des isotopes du plutonium et du césium 137 dans l'estuaire de la Seine. C.R. Acad. Sc. Paris, t. 291, p. 125-128.

- JOUANNEAU J.M. (1982) - Matières en suspension et oligo-éléments métalliques dans le système estuarien gironde : comportement et flux. Thèse, Bordeaux, 150 p.
- KIRBY R. et PARKER W.R. (1983) - Distribution and behaviour of fine sediment in the Severn estuary and inner Bristol Channel, U.K. In : Dynamics of turbid coastal environments, Can. J. Fish. Aquat. Sci., n° 40, (suppl. 1), p. 83-95.
- LABORATOIRE CENTRAL D'HYDRAULIQUE DE FRANCE (1973) - Etude du littoral entre le Havre et Antifer. Rap. ronéot., Maisons-Alfort.
- LABORATOIRE CENTRAL D'HYDRAULIQUE DE FRANCE (1980) - Catalogue sédimentologique des côtes de France : de l'estuaire de la Seine à la baie du Mont-Saint-Michel. Rap. ronéot., Maisons-Alfort.
- LARSONNEUR C. (1971) - Manche centrale et baie de Seine, géologie du substratum et des dépôts meubles. Thèse Caen, 394 p.
- LARSONNEUR C., BOUYASSE P. et AUFFRET J.P. (1982) - The superficial sediments of the English Channel and its Western approaches. Sedimentology, t. 29. p. 851-864.
- LE CORRE P. (1983) - Dosage du carbone organique particulaire. In : Manuel des analyses chimiques en milieu marin, A. AMINOT & M. CHAUSSEPIED, Eds., CNEOXO, Brest, p. 203-208.
- LE GALL J. (1970) - La baie des Veys : Caractères principaux de la sédimentation et faciès de dépôt. Thèse 3ème cycle, Caen, 2 vol., 149 p.
- LE GALL J. & LARSONNEUR C. (1972) - Séquences et environnements sédimentaires dans la baie des Veys (Manche). Rev. Géol. Phys. et Géol. Dyn. (2), vol. XIV, fasc. 2, p. 189-204.
- LE FLOCH J.F. (1961) - Propagation de la marée dynamique dans l'estuaire de la Seine et la Seine-Maritime. Thèse, Paris, 507 p.
- LE HIR P. & L'HYAVANC J. (1984) - Etude des circulations moyennes en baie de Seine à partir de mesures de longue durée. Soc. Hydro. Fr., 18e Journées de l'Hydraulique, Marseille, rap. 4/4, 6 p.
- L'HIGUINER M., TENDRON M., GIRY A., GENCE A., LECARPENTIER S., DUBRULLE L. (1982) - Etude de la salubrité de la baie des Veys: Avril 1981 - mars 1982 - Agence Financière de Bassin "Seine-Normandie" - Etablissement Public Régional - Rap. ronéot., 71 p. + annexes.

- LE PROVOST C. & FORNERINO M. (1984) - Les courants dans un modèle bidimensionnel de marées littorales. Soc. Hydro. Fr., 18e journées de l'hydraulique, Marseille, rap. 4/5, 9 p.
- LONG B., KULKARNI N. et JOICE G. (1978) - Radioisotopes as sediment tracers : risks involved and proposed guidelines for use. Bedford Institute of Oceanography, Rep. Ser. B 1 : R-78-3, 37 p.
- Mc LEAN S.R. (1981) - The role of non-uniform roughness in the formation of sand ribbons. Mar. Geol., vol. 42, p. 49-74.
- MANICKAM S. (1982) - Etude hydrologique et sédimentologique de la zone de transition entre la Loire fluviale et l'estuaire. Thèse 3ème cycle, Nantes, 281 p.
- MARTIN J.M. et MEYBECK M. (1979) - Elemental mass-balance of material carried by major world rivers. Mar. Chem., vol.7, p. 173-206.
- MIGNIOT C. (1977) - Action des courants, de la houle et du vent sur les sédiments. Houille blanche, n° 1, p. 9-47.
- MILLIMAN J.D. (1980) - Sedimentation in the Fraser and its estuary, southwestern British Columbia (Canada). Estuar. Coast. Mar. Sci., vol. 10, p. 609-633.
- MILLIMAN J.D. (1981) - Transfer of river-borne particulate material to the oceans. In : River inputs to ocean systems, United Nations, New-York, p. 5-12.
- MORANG A. & Mc MASTER R.L. (1980) - Nearshore bedform patterns along Rhode island from side-scan sonar surveys. J. Sed. Petrol., vol. 50, n°3, p. 831-840.
- MULLER G. et FORSTNER V. (1968) - General relationship between suspended sediment concentration and water discharge in the Alpenhein and some other rivers. Nature, vol. 217, p. 244-5.
- NICHOLS M.M. (1977) - Response and recovery of an estuary following a river flood. J. Sed. Petrol., vol. 47, n° 3, P. 1171-1186.
- NICHOLS M.M. et POOR G. (1967) - Sediment transport in a coastal plain estuary - J. Waterways and harbors, Proc. Am. Soc. Civil Engin., vol. 93, n°WW4, p. 83-95.
- OFFICER C.B. (1976) - Physical oceanography of estuaries. Wiley, New-York, 465 p.

- D'OZOUVILLE L. & AUFFRET J.P. (1985) - Répartition et évolution actuelle des sédiments superficiels en baie de Seine orientale en utilisant un sonar à balayage latéral. *Océanol. Acta*, à paraître.
- POSTMA H. (1961) - Transport and accumulation of suspended matter in the Dutch Wadden Sea. *Neth. J. Sea. Res.*, vol. 1, p. 148-190.
- ROMANA L.A. (1979) - Rôle du bouchon vaseux dans un écosystème estuarien. In "rapport des 2èmes journées de la thermoécologie". I.S.T.P.M. Ed.
- SALOMON J.C. (1981) - Modelling turbidity maximum in the Seine estuary. In : *Ecohydrodynamics, Elsevier oceanography series*, vol. 32, p. 285-317.
- SALOMON J.C. (1985) - Courantologie calculée en baie de Seine : modélisation numérique des phénomènes physiques. Rap. ronéot., Univ. Bretagne occidentale, 286 p.
- SAUZAY G. (1968) - Méthode du bilan de taux de comptage d'indicateurs radioactifs pour la détermination du débit de charriage des lits sableux. Thèse, Univ. Toulouse, Rap. CEA - R - 3431, 162 p.
- SCHEMA D'APTITUDE ET D'UTILISATION DE LA MER POUR L'ESTUAIRE DE LA SEINE (1977-1980) - Rapports inédits Cent. Nat. Exp. Océans, Mission Et. Bas. Seine et Mission Amén. Bass. Norm.
- SCHUBEL J.R. (1968) - Turbidity maximum of the northern Chesapeake bay, *Science*, vol. 161, p. 1013-1015.
- SCHUBEL J.R. (1969) - Size distributions of the suspended particles of the Chesapeake bay turbidity maximum. *Neth. J. Sea. Res.*, vol. 4, p. 283-309.
- SCHUBEL J.R. (1974) - Effects of tropical storm Agnes on the suspended solids of the northern Chesapeake bay. In : *suspended solids in water*, Plenum Press, New-York, p. 113-132.
- S.A.R. (1980) - Etude des mouvements sédimentaires à l'aide de traceurs radioactifs au voisinage de l'embouchure de l'Orne. Rap. ORIS 80/8/Q2, 50 p.
- S.A.R. (1984) - Etude au moyen de traceurs radioactifs des mouvements sédimentaires en baie de Seine. Rap. ORIS/SAR- 84-09, 27 p.
- SHIPP R.C. (1984) - Bedforms and depositional sedimentary structures of a barred nearshore system, eastern long Island, New-York. *Mar. Geol.*, vol. 60, p. 235-259.

- TOLA F. (1984) - Etude du rejet de produits de dragage à l'aide de traceurs radioactifs. Transfert et dispersion des fines particules en suspension et évolution dans le temps des sédiments déposés sur le fond. XVIIIème journées de l'hydraulique, Marseille, p. I.15. 1-I.15.8.
- VALE C. et SUNDBY B. (1984) - The relationship between the turbidity maximum and the tidal amplitude in the Tagus estuary. (sous presse).
- VASLET D. & LARSONNEUR C., AUFFRET J.P. (1978) - Carte des sédiments superficiels de la Manche au 1/500 000e et notice. B.R.G.M. Ed., Orléans.
- VIGARIE A. (1964) - Etude critique de la documentation sur l'évolution morphologique de l'estuaire de la Seine. Thèse compl., Paris, 239 p.
- VIGARIE A. (1965) - Les modalités du remblaiement alluvial dans l'estuaire de la Seine. Cah. Océanogr., vol. XIV, n° 5, p. 301-330.
- VOLMAT M. (1929) - Les érosions du littoral du Calvados et les atterrissements de l'estuaire de la Seine. 22e Cah. Rech. Hydr. sur le régime des côtes, Paris, Imp. Nat., 39 p.
- WOOD P.A. (1977) - Controls of variation in suspended sediment concentration in the River Rother, West Sussex, England. Sedimentology, vol. 24, p. 437-445.