

178575

B222-2-FRO-C

**igba**

**INSTITUT DE  
GEOLOGIE  
DU BASSIN  
D'AQUITAINE**

**CONTRAT CNEXO - IGBA n° 78/5613**

**RAPPORT DEFINITIF**

**IFREMER Bibliothèque de BREST**



**OEL11305**

Université de Bordeaux I  
351, Cours de la Libération - 33405 Talence  
Téléphone : (56)/80.60.50 - 80.61.09

Castaing

CONTRAT CNEXO - IGBA n° 78/5613

RAPPORT DEFINITIF

Sous la direction scientifique de Monsieur le Professeur J. MOYES.

Ce contrat a été effectué à la demande du Centre National pour l'Exploitation des Océans dans le cadre des programmes de recherche sur les processus estuariens. L'Institut de Géologie du Bassin d'Aquitaine était tenu de réaliser les travaux suivants :

1°- Dépouillement des résultats du traçage effectué en 1977 en Gironde. Ces travaux devaient être menés en collaboration avec la Section d'Application des Radio-éléments du Commissariat à l'Energie Atomique.

2°- Evaluation du bilan quantitatif des flux des oligo-éléments métalliques en solution et associés aux sédiments en suspension apportés et évacués de la Gironde.

3°- Dépouillement des cartes bathymétriques de la Gironde afin d'estimer le volume des apports sédimentaires dans l'estuaire.

Le présent document fait état des points 2 et 3. Le dépouillement des résultats du traçage fera l'objet d'un rapport séparé, rédigé conjointement par le C.E.A. et l'I.G.B.A.

# SOMMAIRE

---

## ANALYSE DE L'EVOLUTION MORPHOLOGIQUE ET ESTIMATION DU VOLUME DES APPORTS SEDIMENTAIRES DANS L'ESTUAIRE DE LA GIRONDE DE 1825 à 1973.

### INTRODUCTION.

#### A - METHODE D'ETUDE.

- I - Emplacement des coupes transversales.
- II- Cartes utilisées.
- III- Enregistrement des données.
- IV- Tracé et comparaison des profils.
- V - Erreur estimée.

#### B - RESULTATS DES COMPARAISONS CARTOGRAPHIQUES.

- I - Déplacement des zones de sédimentation et d'érosion de 1825 à 1973.
- II- Quelques exemples de modifications naturelles et anthropiques.
- III- Nature des sédiments déplacés.
- IV- Estimation des volumes de sédiments érodés et sédimentés.
  - 1) Visualisation des zones de dépôts et d'érosion.
  - 2) Estimation des volumes à partir de la comparaison des profils.
  - 3) Estimation des volumes à partir de la cubature sous étiage.

#### C - CONCLUSION.

- I - Conclusions méthodologiques.
- II- Conclusions sédimentologiques.

.../...

ESSAIS D'ETABLISSEMENT DE BILANS MASSIQUES DU ZINC, CUIVRE et PLOMB  
DANS L'ESTUAIRE DE LA GIRONDE

INTRODUCTION.

A - METHODE D'ETUDE.

- I - Etablissement des bilans quantitatifs.
- II- Estimation des différents termes du bilan.
  - 1) Apports fluviaux dans l'estuaire.
  - 2) Le stock estuarien.
  - 3) Dépôt.
  - 4) Expulsions.

B - LES BILANS QUANTITATIFS ANNUELS DU ZINC, CUIVRE ET PLOMB.

- I - Année 1976.
- II- Année 1977.
- III- Année 1978.
- IV- Propositions des bilans quantitatifs en Gironde en année moyenne.
  - 1) Le Zinc en année moyenne.
  - 2) Le Cuivre en année moyenne.
  - 3) Le Plomb en année moyenne.

C - CONCLUSIONS.

---

ANALYSE DE L'EVOLUTION MORPHOLOGIQUE ET  
ESTIMATION DU VOLUME DES APPORTS SEDIMENTAIRES DANS L'ESTUAIRE  
DE LA GIRONDE DE 1825 à 1973

J.M. FROIDEFOND - P. CASTAING

## INTRODUCTION

-----

L'estuaire de la Gironde situé à la limite de la plaine des Landes et des falaises calcaires de Saintonge résulte de la jonction au bec d'Ambès (à 70 km de l'océan) de deux réseaux hydrographiques, celui de la Dordogne et celui de la Garonne.

De par sa surface et le volume des eaux qu'il draine, l'estuaire joue un rôle important comme voie de communication vers les principaux centres urbains et industriels implantés sur ses rives ou sur celles de ses affluents. Il apporte également l'eau et l'énergie nécessaire au développement économique et offre certaines ressources particulières.

Sur un autre plan, il constitue au niveau des mécanismes naturels une zone intermédiaire où les eaux de la Garonne et de la Dordogne transitent avant d'aboutir dans les eaux océaniques qui elles-mêmes pénètrent profondément dans l'estuaire en profitant de la marée. Cette zone de transition peut évoluer de façon différente selon qu'elle fonctionne comme : "bassin de décantation" vis à vis des particules sédimentaires et des oligoéléments métalliques entre autres apportés par les eaux fluviales et océaniques ce qui conduit à un engraissement de l'estuaire, ou comme "bassin de vidange", ce qui provoquera une érosion des berges ou du lit de l'estuaire ou des deux à la fois.

Cette évolution sédimentologique constitue l'objet même de ce rapport dont les buts sont les suivants :

"Dépouiller les cartes bathymétriques de l'estuaire existant depuis plusieurs années et disponibles au Port Autonome de Bordeaux, afin d'estimer le volume des apports sédimentaires dans l'estuaire. La comparaison de ces documents cartographiques avec des sondages géologiques existant permettra d'évaluer la nature et la masse de sédiments s'y accumulant. En outre, la comparaison des phénomènes sédimentaires s'effectuant avant et après certains aménagements (digue de Valeyrac) permettra de cerner l'impact de ces aménagements sur la sédimentologie de l'estuaire"

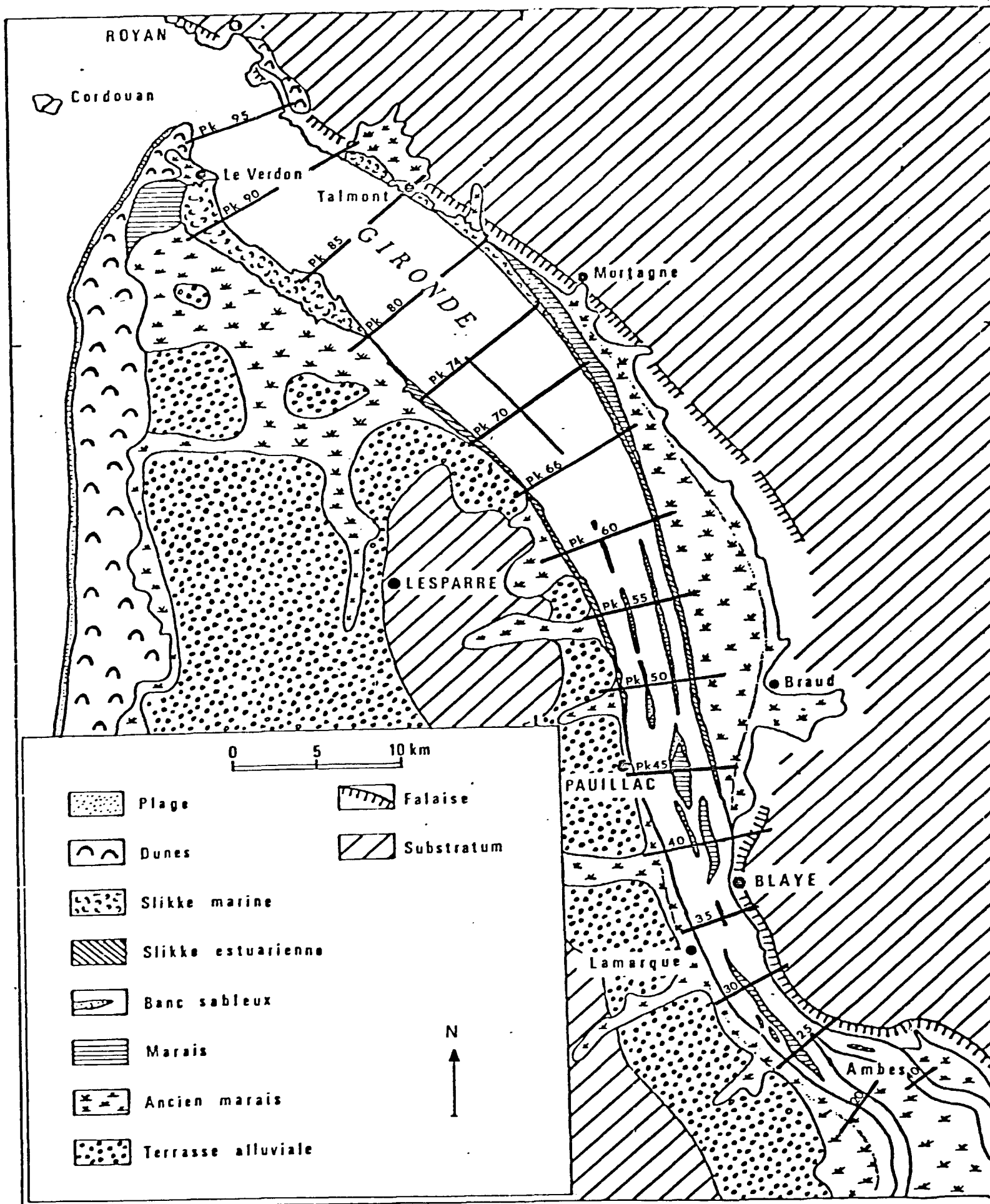


Fig. -1 : Cadre géomorphologique de l'estuaire de la Gironde.  
et emplacement des coupes verticales



Dans cette perspective, nous avons choisi de comparer des coupes transversales à la Gironde, relevées à des époques différentes sur des cartes s'échelonnant de 1825 à 1973. La comparaison de ces coupes permet d'évaluer l'érosion ou la sédimentation à l'intérieur de l'estuaire (voir rapport préliminaire).

Le déroulement des opérations s'est effectué de la façon suivante : les coordonnées géographiques et les profondeurs de chaque profil ont été enregistrées sur bande magnétique. Puis les profils, tracés sur machine à dessiner, ont été comparés deux à deux afin d'en déduire les zones d'érosion et de sédimentation. Les sondages géologiques effectués par divers organismes ont été positionnés sur les profils de 1968 avec une description sommaire afin de déterminer la nature des sédiments déposés.

L'influence de la digue de Valeyrac sur la sédimentation est donnée à titre d'exemple concernant l'influence d'un aménagement.

Enfin, nous avons calculé le volume sous étiage de la Gironde en 1973. La comparaison de ce volume avec ceux des années précédentes apporte des précisions supplémentaires concernant l'évolution de la capacité sous étiage de l'estuaire.

## A - METHODE D'ETUDE.

La solution retenue consiste dans la comparaison de coupes topographiques mesurées aux mêmes endroits mais à des époques différentes. Dix sept emplacements ont été choisis le long de la Gironde et de la Dordogne et reportés de la même façon sur les différentes cartes. Les profils topographiques correspondant à ces emplacements ont ensuite été enregistrés pour être comparés deux à deux.

### I - Emplacement des coupes transversales (fig. 1).

Les dix sept coupes choisies coïncident avec des points kilométriques notés sur les cartes du Port Autonome de Bordeaux. Ce sont les suivants :

- sur la Garonne : le PK 20
- sur la Dordogne : le PK 40
- sur la Gironde : (le PK 0 de la Gironde et de la Garonne est situé au niveau du Pont de Pierre à Bordeaux) :  
les PK 25 - 30 - 35 - 40 - 45 - 50 - 55 - 60 - 66 - 70 - 74 - 80 - 85 - 90 - 95.

Ces emplacements sont espacés de 5 km les uns des autres, exceptés pour les PK 66 et 74, qui ont été choisis au lieu du PK 65 et du PK 75 pour avoir deux profils supplémentaires au niveau de la digue de Valeyrac.

## II - Cartes utilisées.

Nous avons reporté l'emplacement de ces coupes sur des cartes bathymétriques à l'échelle du 1/40 000 établies au cours des années suivantes : 1974.1973 - 1969.1968 - 1953 - 1925 - 1900 - 1874 - 1825.

L'emplacement des points kilométriques n'étant pas figuré sur les cartes antérieures à 1900, nous avons reporté ces localisations à partir de la carte de 1953 en nous référant à des repères (agglomération, tracé général de la côte, etc...).

De 1825 à 1874, il n'existe pas de carte générale de l'estuaire : la partie aval a été cartographiée sans la partie amont ou inversement.

La carte de 1874 est la première après le début des travaux de calibrage du chenal.

## III - Enregistrement des données.

Les profils sont définis par les points d'intersection des isobathes avec les lignes de PK (PK 25, PK 30...) ou par les points cotés, situés le long de ces lignes (fig. 2).

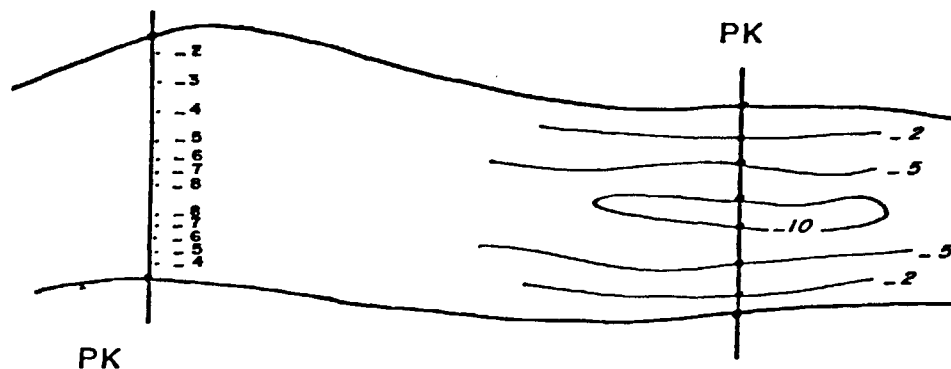


Fig. 2 - POINTS ENREGISTRES

Chaque point est défini quant à lui par ses coordonnées X, Y dans le plan de la carte, repérées à partir d'un zéro arbitraire et par sa profondeur relevée sur la courbe de niveau ou à partir du point coté.

PK 95

PK 90

PK 85

PK 80

PK 74

PK 70

PK 66

PK 60

PK 55

PK 50

PK 45

PK 40

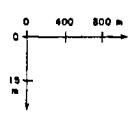
PK 35

PK 30

PK 25

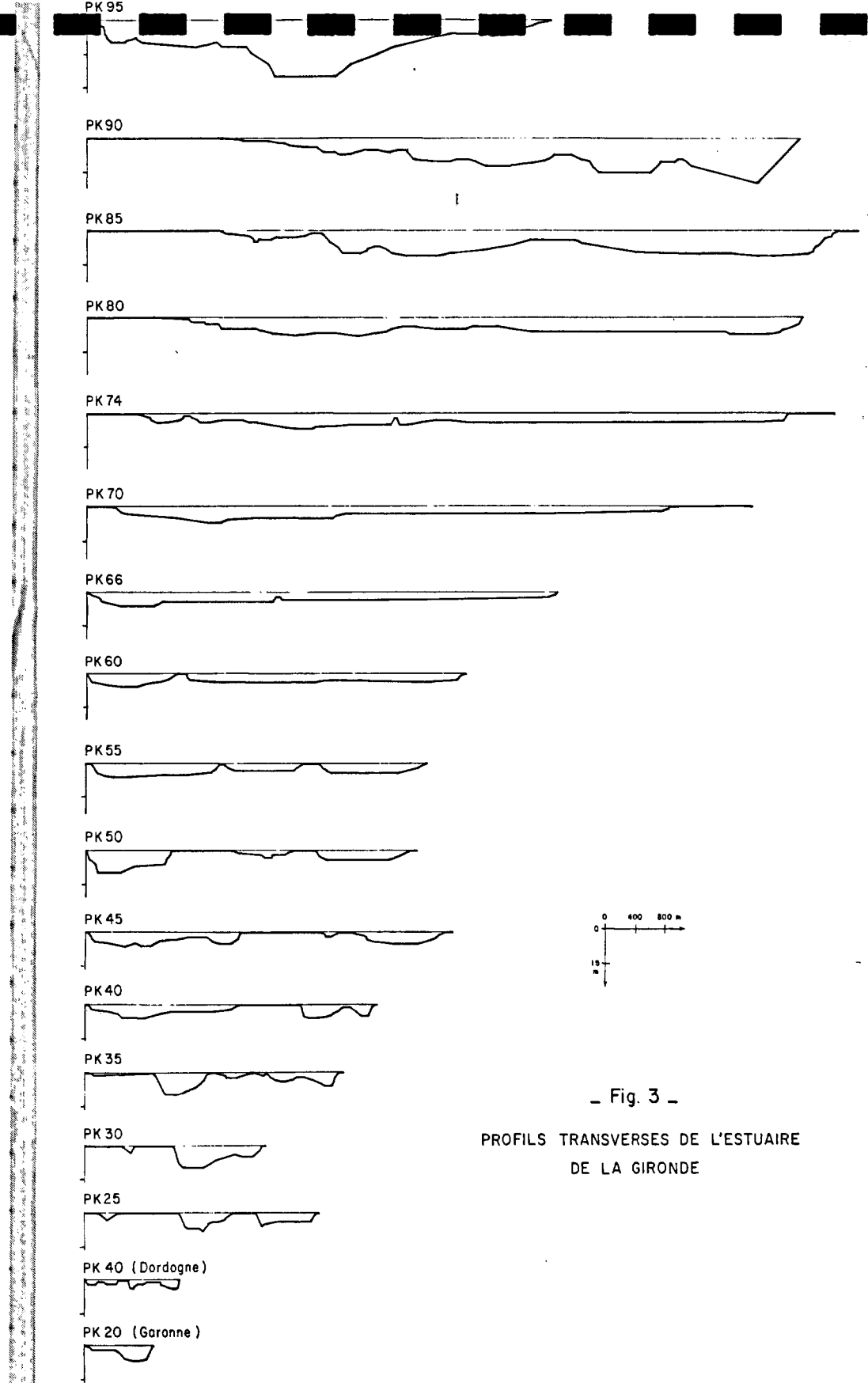
PK 40 (Dordogne)

PK 20 (Garonne)



- Fig. 3 -

PROFILS TRANSVERSES DE L'ESTUAIRE DE LA GIRONDE



- 3 -

Pour que le relevé de ces données ne soit pas trop fastidieux, et pour qu'elles soient archivées et facilement réutilisables, nous avons utilisé un coordinatoscope associé à un mini-ordinateur avec enregistrement des données sur bande magnétique (cassette).

Remarque :

- Les cotes supérieures à l'altitude zéro ne sont pas enregistrées.
- X - Les points de départ et d'arrivée des coupes sont situés sur chaque rive marquée en trait épais sur les cartes (zéro N.G.F.)
- Les zéro arbitraires correspondent aux coordonnées Lambert II, 1800-4000 sur la portion Bordeaux - Saint Estèphe et 62000-32000 sur la portion Saint Estèphe - Le Verdon.
- Les profils issus de chaque carte sont enregistrés sous forme de fichier qui porte un nom de type GI 1725-FCH.
- Chaque fichier est enregistré sur deux cassettes par mesure de prudence.

IV - Tracé et comparaison des profils.

Les profils de chacun des points kilométriques enregistrés sont tracés par l'intermédiaire de l'ordinateur (programme en Basic) et d'un traceur Benson. Ce programme permet d'obtenir les dix sept profils avec la même échelle des longueurs et des hauteurs (fig. 3 hors texte, profils de l'année 1968).

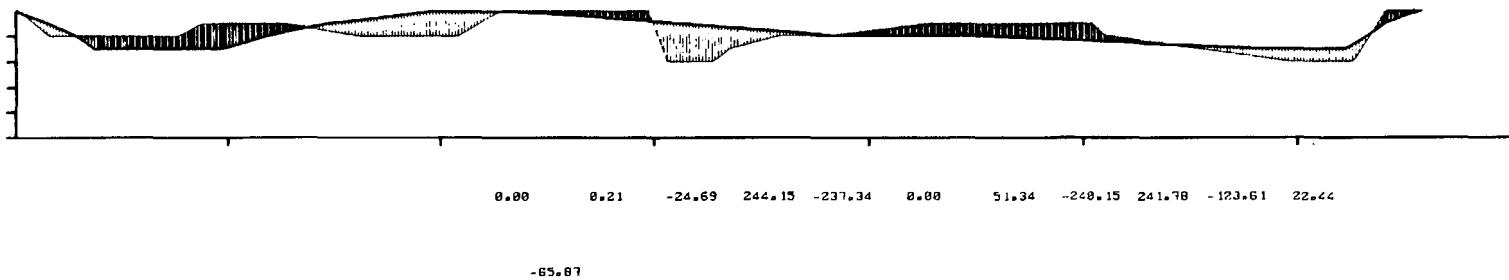
Comme le montre la figure 3, les sections de l'estuaire varient de 1 à 10 km, et les profondeurs de 0 m à 30 m, ce qui nous a conduit à utiliser des échelles différentes pour que les comparaisons de deux profils soient lisibles. Les coupes correspondant à un même emplacement sont à la même échelle, mais les échelles varient d'un emplacement à un autre.

Afin de tenir compte de ces variations, l'axe des abscisses situé sous les deux profils superposés (figure 4) est divisé en intervalles valant 200 m chacun, quelque soit la coupe, et l'axe des ordonnées est divisé en intervalles de 2 m par rapport au zéro situé à l'extrémité supérieure.

Les deux profils superposés correspondant à un même emplacement mais tirés de deux cartes différentes (1968 et 1825 sur la figure 4) sont tracés avec des traits d'épaisseur variable : en trait épais pour le profil le plus ancien (date également en traits épais), et en traits fins pour le profil le plus récent (date en traits fins). Les surfaces érodées entre ces deux dates sont hachurées en traits fins et les surfaces sédimentées sont hachurées en traits épais.

P.K. 40 1938 1825

- Fig. 4 -

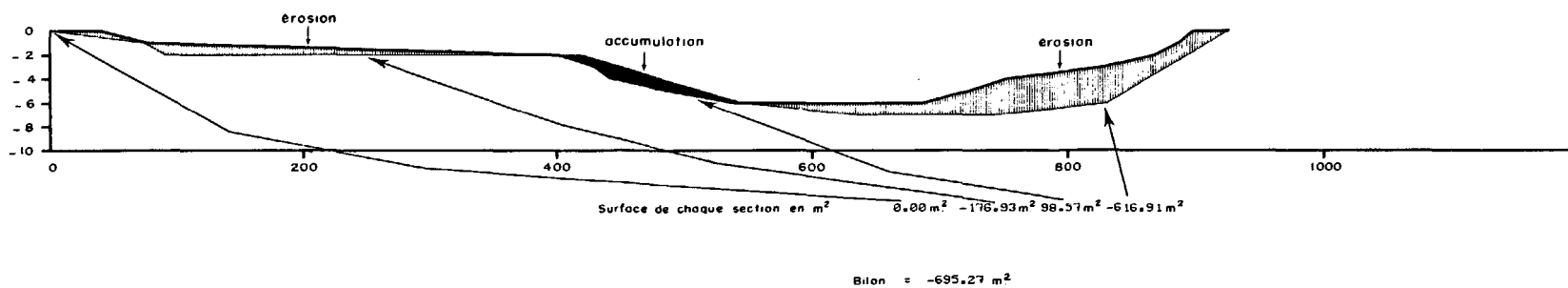


LEGENDE GENERALE POUR TOUS LES PROFILS

un intervalle en abscisse est égal à 200 m.  
un intervalle en ordonnée est égal à 2 m.

Le profil en trait fin correspond à celui de l'année la plus récente

P.K. 20 1968 — 1825



Les surfaces de ces différents secteurs sont exprimées en mètres carrés et inscrites au dessous du graphe. La valeur située à droite correspond au secteur situé également sur la droite et ainsi de suite en allant de la droite vers la gauche. Les valeurs précédées d'un signe moins (-) correspondent aux surfaces érodées. La dernière valeur située à gauche et au dessous des nombres précédents exprime la somme de ces différentes surfaces (Bilan).

Les comparaisons suivantes sont présentées en annexe I, du PK 20 au PK 95 :

PK 20	1825-1875, 1875-1900, 1900-1925, 1925-1953, 1953-1968
PK 95	1968-1973, 1825-1968.

Ces graphes ont été obtenus sur machine à dessiner par l'intermédiaire du programme COMPA 3. BAS (J.M. FROIDEFOND).

#### V - Erreur estimée.

L'erreur que nous pouvons estimer et qui est de loin la plus importante porte sur l'emplacement des coupes transversales. En effet, la comparaison de deux profils n'est valable que si ils sont situés rigoureusement au même endroit. Dans le cas contraire les surface en érosion ou en accumulation peuvent être modifiées.

Comme une erreur d'un millimètre sur la carte correspond à une erreur de 40 m sur le terrain, nous pouvons avoir une érosion de 400 m<sup>2</sup> si on passe de 0 à 10 m comme le montre la figure suivante (fig. 5).

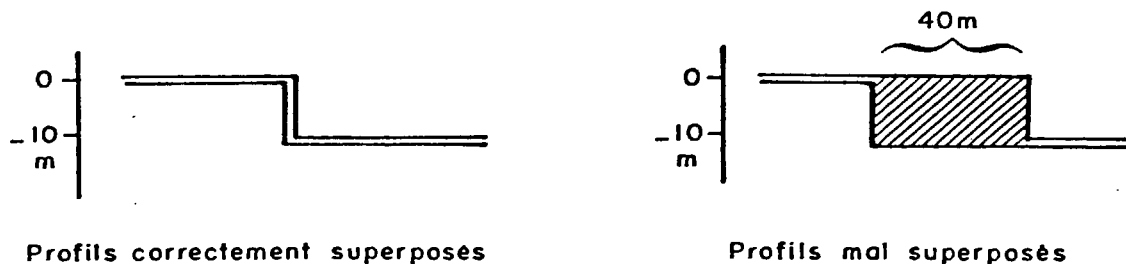


Fig. 5 - INFLUENCE DE L'ERREUR DE SUPERPOSITION SUR LE CALCUL DES SURFACES

Fig. 5 : Influence de l'erreur de superposition sur le calcul des surfaces.

Afin de réduire cette erreur, nous avons recalé tous les profils les uns par rapport aux autres en tenant compte de l'érosion du rivage et en se référant à la planimétrie et aux axes des principaux reliefs (rivages, îles, chenal de navigation). Par conséquent, nous estimons que l'erreur, compte tenu des différences de projection et de cartographie usités entre 1825 et 1973, peut être comprise entre 1 mm et 5 mm (40 et 200 m sur le terrain).

Pour estimer l'influence de cette erreur sur les calculs de surface nous avons provoqué deux types de décalage en faisant coulisser de 1 mm et de 5 mm les profils comparés sur les trois exemples suivants :

	<u>Sédiments accumulés dans le chenal</u>	<u>Bilans</u>
valeurs originales	321 m <sup>2</sup>	- 1116 m <sup>2</sup>
<u>PK 45</u> décalage de 1 mm	452 m <sup>2</sup>	- 1115 m <sup>2</sup>
décalage de 5 mm	1081 m <sup>2</sup>	- 1118 m <sup>2</sup>

	<u>Surface des sédiments érodés dans la partie nord</u>	<u>Bilans</u>
valeurs originales	-3015 m <sup>2</sup>	2851 m <sup>2</sup>
<u>PK 60</u> décalage de 1 mm	-3124 m <sup>2</sup>	2850 m <sup>2</sup>
décalage de 5 mm	-3525 m <sup>2</sup>	2862 m <sup>2</sup>

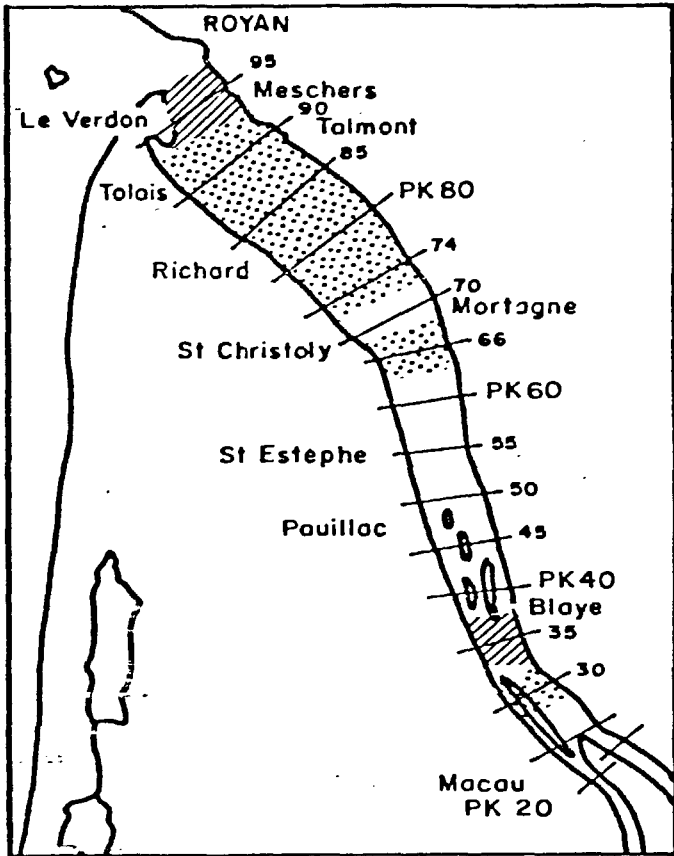
	<u>Surface des sédiments accumulés dans le chenal de Saintonge</u>	<u>Bilans</u>
valeurs originales	2014 m <sup>2</sup>	2679 m <sup>2</sup>
<u>PK 85</u> décalage de 1 mm	2367 m <sup>2</sup>	2646 m <sup>2</sup>
décalage de 5 mm	3973 m <sup>2</sup>	2630 m <sup>2</sup>

Ces résultats conjointement avec d'autres comparaisons nous permettent de dire que :

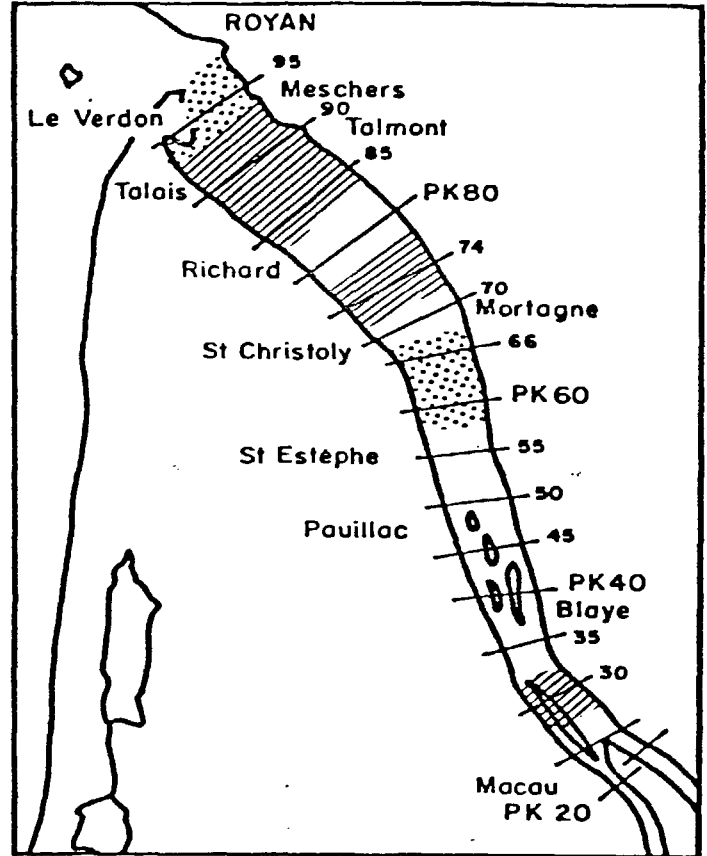
- les surfaces de chaque secteur (érosion ou accumulation) augmentent rapidement avec le décalage. L'erreur estimée peut varier de 10 % à 50 % ou plus pour les cartes anciennes.

- les valeurs des bilans (somme des surfaces érodées et accumulées) varient très peu avec le décalage. L'erreur estimée varie de 1‰ à 1 % pour les cartes anciennes.

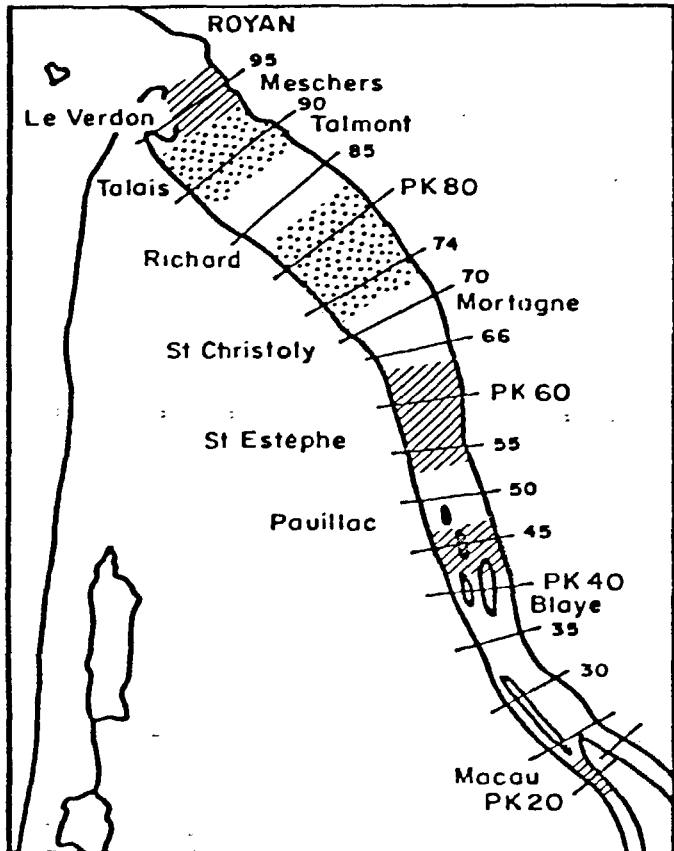
1825 - 1874



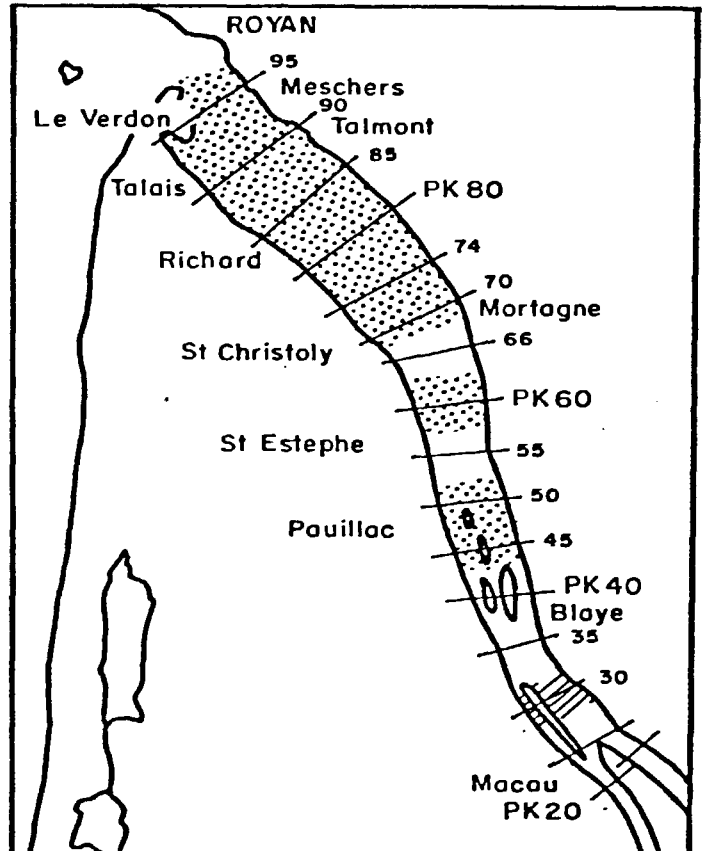
1874 - 1900



1900 - 1925



1925 - 1953

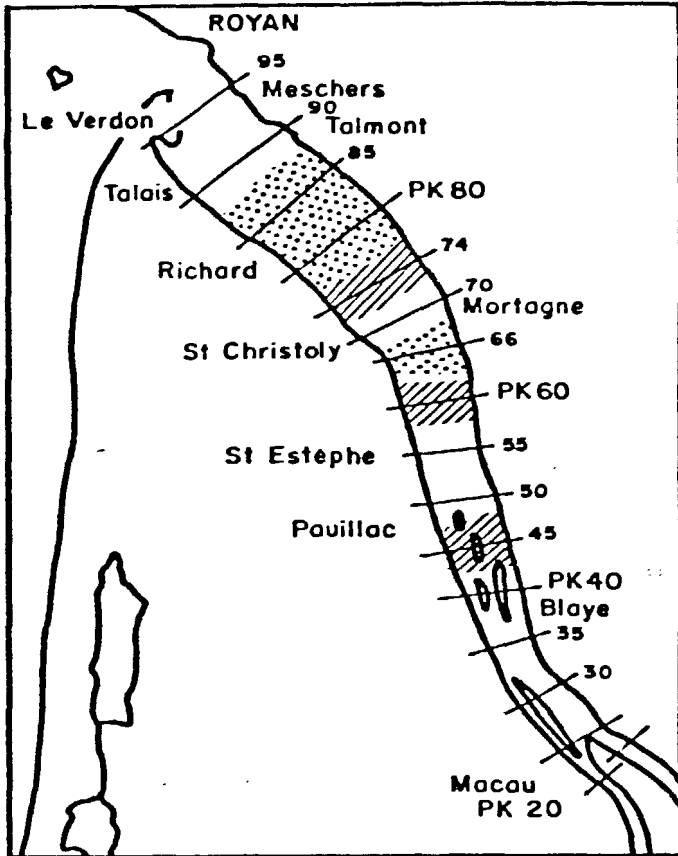


Forte érosion   
 Forte sédimentation 

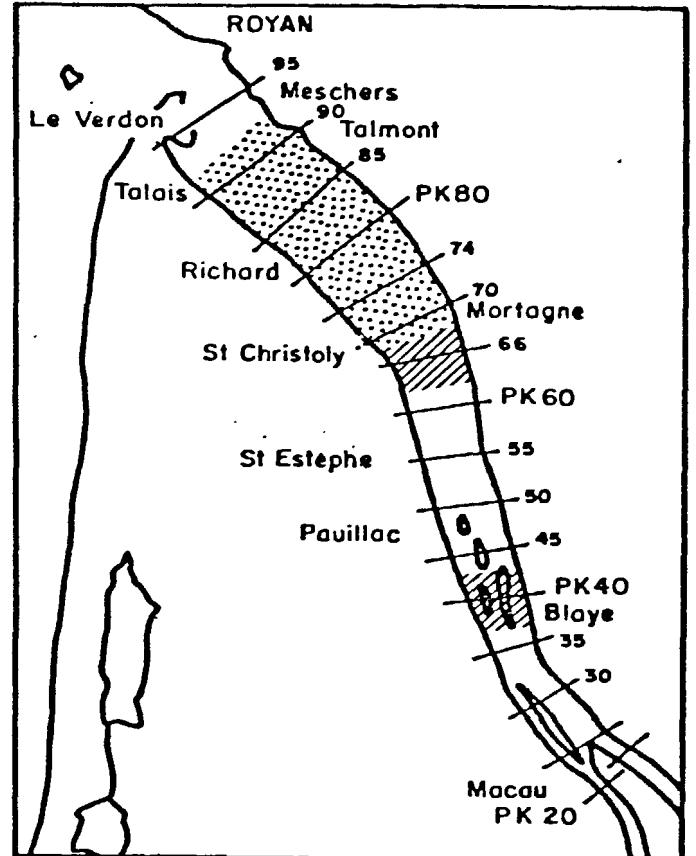
- Fig. 6 -



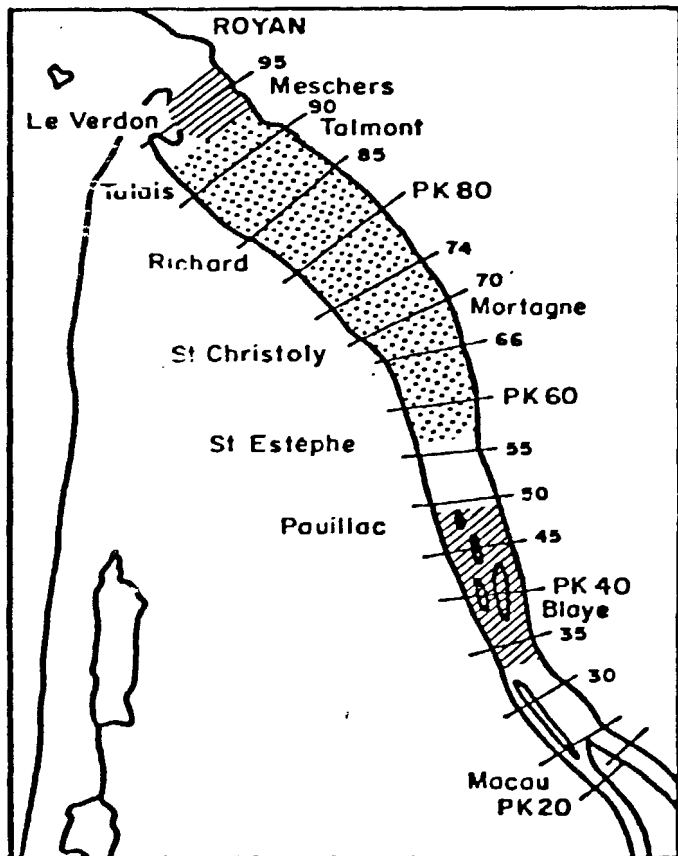
1953 - 1968



1968 - 1973



1825 - 1968



BILAN GENERAL

- Fig. 7 -

Forte érosion



Forte sédimentation



En conclusion, ce sont les valeurs des bilans qui sont à prendre en compte contrairement aux valeurs des surfaces de chaque secteur qui ne peuvent fournir qu'une estimation très approximative pour les cartes antérieures à 1900.

## B - RESULTATS DES COMPARAISONS CARTOGRAPHIQUES.

### I - Déplacement des zones de sédimentation et d'érosion.

Nous avons vu que le bilan (érosion + sédimentation) de chaque comparaison était peu modifié par des erreurs de calage. L'erreur estimée est de l'ordre de 1 % dans les cas les plus défavorables. Aussi, avons-nous basé notre argumentation sur ces valeurs présentées dans le tableau 1

Afin de mieux visualiser l'évolution de l'estuaire, nous avons reporté ces résultats sur les figures 6 et 7 ( en pointillés : accumulations supérieures à 1000 m<sup>2</sup> ; en hachures : érosions supérieures à 1000 m<sup>2</sup>).

En ce qui concerne l'évolution générale (1825-1968, figure 7), l'estuaire apparaît subdivisé en trois parties distinctes, séparées par des segments intermédiaires relativement stables (en blanc) :

- une partie amont entre le PK 35 et le PK 50, caractérisée par une forte érosion.

- une partie aval entre le PK 66 et le PK 90, caractérisée par une forte accumulation de sédiments.

- la zone du PK 95 qui présente une forte érosion mais dont on ne connaît pas la limite ouest.

Dans le détail, c'est-à-dire en observant les différents intervalles de temps (fig. 6 et 7), les évènements se succèdent de la façon suivante :

1825-1874 : Schéma très proche du bilan général (1825-1968). PK 95 en érosion.

1874-1900 : Forte érosion sur la quasi totalité de l'estuaire coïncidant avec les travaux de calibrage. Le PK 95 est en sédimentation.

1900-1925 : La partie aval (PK 70 - PK 90) s'est engraisée contrairement à la partie amont. PK 95 en érosion.

numéro de profils PK	dates de comparaison		1825	1874	1900	1925	1953	1968	1825
	1874	1900	1874	1900	1925	1953	1968	1973	1968
20 Garonne	+ 459	+ 40			-1071	+ 468	- 592	- 155	- 695
40 Dordogne					+ 87	+ 141	- 304	+ 277	- 66
25	+ 345	- 192			- 177	- 272	- 249	+ 486	- 546
30 1225 → 78 85 91 -160 -444 +148	+ 2720	-2236			+ 245	- 1391	+ 471	+ 404	- 192
35	- 1689	+ 793			- 602	- 656	+ 278	+ 611	- 1873
40	+ 202	+ 15			- 850	- 718	- 137	- 1184	- 1489
45	+ 460	- 716			- 1351	+ 1138	-1116	+ 32	- 1605
50	- 866	+ 125			- 970	+ 1392	+ 27	- 300	- 289
55	+ 566	+ 265			- 1527	+ 385	+ 382	+ 113	+ 78
60	- 94	+ 3628			- 1916	+ 3156	-2851	+ 699	+ 1930
66	+ 3050	+ 1954			- 665	- 904	+3135	- 1125	+ 6570
70	+ 569	- 985			- 825	+ 3157	- 37	+ 1324	+ 1889
74	+ 2826	- 1210			+ 1788	+ 2888	- 1826	+ 2966	+ 4454
80	+ 1351	- 415			+ 1147	+ 2402	+ 2097	+ 1684	+ 6588
85	+ 6006	- 4626			+ 14	+ 3669	+ 2679	+ 2626	+ 7713
90	+ 7919	- 5473			+ 2729	+ 4003	- 450	+ 2905	+ 8706
95	- 6024	+ 5422			- 7966	+ 4566	- 282	+ 738	- 4288

PK 40 Dordogne manquant pour l'année 1874.

Valeurs positives : accumulation en m2

Valeurs négatives : érosion en m2

TABLEAU I

25  
58.310 m<sup>2</sup>

+14040

70 m

60 à 95 + 71 m<sup>2</sup>  
-031  
2500 m<sup>2</sup> = (400.2)

Tableau . Evolution spatio-temporelle des surfaces d'accumulation-  
 erosion dans l'estuaire amont de la Gironde depuis 1825 (periode 1825-  
 1973, d'apres Froidefond et Castaing). += accumulation et -= erosion. (m<sup>2</sup>)

PK	25-74	74-00	00-25	25-53	53-68	68-73	73-78	78-88	88-91
25	+345	-192	-177	-272	-249	+486	-455	-534	+190
30	+2720	-2236	+245	-1391	+471	+404	+145	+80	+210
35	-1689	+793	-602	-656	+278	+611	-660	0	-200
40	+202	+15	-850	-718	-137	-137	+672	-545	+1246
45	+460	-716	-1351	+1138	-1116	-1116	-515	-375	+1125
50	-866	+125	-970	+1392	+27	+27	-360	+60	-450
55	+566	+265	-1527	+385	+382	+382	-40	+640	-750
60	-94	+3628	-1916	+3156	-285	-2851	-70	-180	-
66	+3050	+1954	-665	-904	+3135	+3135	-900	+1080	-
PK	1825-1973	1973-1991	1825-1991						
25	-59	-799	-858						
30	+213	+430	+645						
35	-1265	-858	-2123						
40	-2672	+1373	-1299						
45	-1553	+235	-1318						
50	-592	-750	-1342						
55	+184	-150	+34						

- 1925-1953 : L'estuaire a subi une forte sédimentation du PK 40 au PK 95 ; seul le PK 30 est en érosion.
- 1953-1968 : Les zones en sédimentation alternent avec les zones en érosion.
- 1968-1973 : Schéma très proche de celui du bilan général (1825-1968).

Ces observations méritent d'être complétées en se référant aux comparaisons de profils (voir ANNEXE - Comparaison 1825-1968). On remarque alors que les fortes sédimentations des PK 85 et 90 sont dues en grande partie au comblement du chenal de Saintonge. Par contre, entre le PK 66 et le PK 74, il s'est produit un colmatage général de l'estuaire (à l'exception du chenal de navigation entretenu par les dragages). Cette zone semblerait la plus propice pour la formation de bancs sableux et la multiplication de chenaux de marée.

En ce qui concerne les fortes érosions comprises entre le PK 35 et le PK 45, on remarque surtout deux régions : sur la rive gauche, l'érosion du chenal de navigation entretenue par les travaux d'aménagement ; sur la rive droite, l'érosion du chenal de Saintonge d'origine naturelle.

Remarque : Deux zones d'évolution cyclique méritent également d'être soulignées :  
- le PK 95 change tous les 25 ans de sens d'évolution. S'il est en érosion, il passe en accumulation 25 ans plus tard ou inversement.

- le PK 60 présente également ce caractère.

## II - Quelques exemples de modifications naturelles et anthropiques.

### 1°- Evolution naturelle.

Il est très difficile de faire la part des modifications morphologiques naturelles et des modifications dues à l'action de l'homme. Cependant, l'étude de l'évolution avant 1850, c'est-à-dire avant le début des grands travaux de calibrage permet de schématiser les tendances morphologiques naturelles. Ces dernières peuvent, avant 1850, être résumées de la façon suivante :

- Les sections moyennes de la Gironde se modifient peu entre le XVIIe et le début du XIXe siècle. Comme aujourd'hui, elles varient de façon logarithmique en fonction de leur distance à l'embouchure.

- Les profondeurs diminuent légèrement dans le chenal de Saintonge, alors que le chenal méridional s'approfondit.

- Il y a un grand nombre de bancs dans l'axe de l'estuaire. Certains peuvent se déplacer de plusieurs centaines de mètres par an, d'autres apparaissent (banc de Talais, de Taillefer) ou disparaissent entièrement.

- En aval du confluent Garonne-Dordogne, les îles s'étendent beaucoup et la surface des terres émergées double entre 1750 et 1850.

- Certaines îles, situées en amont du confluent, sont rattachées aux rives (îles des Vaches, de Macau, de Pachent). Ceci provoque une réduction locale de la section mouillée et donc une augmentation de la compétence. Les sédiments érodés sont déplacés vers l'aval ce qui amène vraisemblablement une augmentation des apports sédimentaires dans la région des îles.

- Enfin, les hauts fonds dans le chenal principal de la Garonne provoquent la divagation de son cours d'une rive à l'autre.

2°- Evolution pendant la période d'aménagement :  
Le cas de la digue de Valeyrac.

Le fait majeur depuis le début des aménagements (1850) est l'augmentation de la capacité sous étiage en amont du bec d'Ambès et sa réduction en aval du PK 69. Tous les travaux ont été faits dans le but de fixer la passe de navigation sur la rive gauche et de l'approfondir en y concentrant l'écoulement du jusant. Les ingénieurs du Port Autonome y sont remarquablement parvenus grâce à un ensemble de travaux dont l'historique a été fait par C. MIGNIOT (1971).

*à la  
pour  
dragages*

Les travaux les plus importants concernent l'aménagement des passes du bec d'Ambès et de Saint Christoly.

a) L'aménagement de la passe du bec d'Ambès avait pour but de rejeter dans le chenal principal la plus grande partie des eaux qui passaient par le bras de Macau. Ceci a été réalisé en plusieurs étapes :

- 1858 : Fermeture entre les îles Cazeau et l'île du Nord, puis le détroit entre l'île du Nord et l'île Verte.

- 1860-1862 : Fermeture partielle du bras de Macau par une digue longitudinale puis une digue transversale à la cote -3 m, surélevée à -2 m en 1869.

- 1860-1862 : Réalisation de l'éperon du bec d'Ambès.

- 1885 : Importants dragages (800 000 m3).

- 1887-1891 : Rescindement de l'île du Nord et de Cazeau.
- 1893 : Renforcement et prolongement du bec d'Ambès.
- 1911 : Réalisation d'épis le long du bec d'Ambès sur la rive droite.
- 1950 : La cote du barrage transversal est portée de -2 m à +1,35 m.
- 1960 : La cote du barrage est portée à +2,50 m.

De plus, de 1945 à 1970, 12,5 millions de m<sup>3</sup> ont été dragués à Ambès.

Aujourd'hui, les fonds sont à peu près stables grâce à une bonne concentration des courants dans le chenal d'Ambès où la capacité sous étiage a augmenté de 10 millions de m<sup>3</sup>, tandis que le bras de Macau se comblait de plus de 4 millions de m<sup>3</sup>.

b) La digue de Valeyrac a été construite de 1925 à 1928, en vue d'améliorer la navigation dans la passe de Saint Christoly. Cette digue n'a, qu'en partie, joué son rôle et il semble bien que les améliorations constatées entre 1920 et 1935 soient plutôt dues à l'extention rapide du banc de Saint Christoly qui a canalisé les courants de jusant sur la rive gauche de l'estuaire. Il est cependant intéressant d'étudier, de façon détaillée, l'évolution des sections aux PK 60, 66, 70, 74, afin de déterminer l'impact de cette construction sur la morphologie estuarienne.

La digue de Valeyrac s'étend parallèlement au chenal de navigation du PK 65 au PK 74. Le profil au PK 60 se situe donc à 5 km en amont, à peu près au niveau de la brèche de Saint Estèphe. Deux profils se trouvent aux extrémités (PK 66 en amont, PK 74 en aval) ; le dernier profil (PK 70, Port de By) recoupe la digue dans sa partie centrale.

Nous allons tout d'abord donner une idée de l'évolution générale de la zone de Valeyrac en comparant les cartes de 1825 et 1968. Nous entrerons ensuite davantage dans le détail en considérant des intervalles de temps plus courts :

Comparaison :	1825-1874	
	1874-1900	
	1900-1925	<u>Voir ANNEXE I</u>
	1925-1953	
	1953-1968	
	1968-1973	

DE 1825 à 1968.

Le fait important est l'engraissement généralisé de toute la partie droite de l'estuaire entre le banc de Saint Estèphe prolongé par la digue de Valeyrac et la rive droite. Cet engraissement en moyenne de 1 m atteint des valeurs beaucoup plus élevées en certains sites, notamment au PK 60 (banc de Saint Estèphe) et à tous les PK près de la rive droite (près de 6 m au PK 74).

L'engraissement au PK 60 est dû à l'avancée vers l'aval du banc de Saint Estèphe. Il s'est développé en une trentaine d'années entre 1925 et 1955 pour atteindre une longueur de 17 km. Il forme ainsi une digue sous-marine en bordure du chenal où les profondeurs augmentent au cours de l'extension du banc.

La vitesse de progression de ce banc, à cette époque est estimée à 400 m par an. A partir de 1950, ce rythme va se ralentir pour s'annuler vers 1960, tandis qu'une brèche se forme dans le banc au droit du PK 56. En 1966, la brèche de 500 m de largeur et profonde de 4 m sous étiage, met en communication le chenal de navigation avec la fosse centrale de l'estuaire située entre les bancs de Saint Estèphe et de Saint Louis.

L'engraissement visible au PK 74 est dû au raccordement à la rive en 1925 du banc de Saint Seurin formé en 1825. Ce banc a progressé d'aval en amont en présentant un talus accore vers l'amont caractéristique de l'action prédominante du flot sur le transit sédimentaire. Au fur et à mesure que le banc progressait vers l'amont, le chenal, situé sur sa rive droite, se rétrécissait progressivement et se colmatait totalement à partir de 1930. En 100 ans, ce banc s'est déplacé de 18 km vers l'amont avec une vitesse moyenne de 150 à 200 m par an.

Sur la rive gauche, la tendance à l'engraissement est moins marquée surtout dans le chenal de navigation où on note même une certaine érosion due en grande partie aux dragages. Aux PK 70 et 74, il y a eu une forte érosion axée sur la digue de Valeyrac, provoquée par l'amaigrissement des bancs des Mets et de Goulée et leur déplacement vers l'aval.

Toujours sur la rive gauche, on observe au PK 66 un fort engraissement d'une part entre la digue de Valeyrac et le chenal (2 m), d'autre part au PK 74 où s'est édifié le Platin de Richard formé de sables fins vaseux.



DE 1825 à 1874.

Les chenaux sont partout en engraissement. Cet engraissement peut dépasser 2 m dans le chenal de navigation au PK 70 où le banc de Goulée est très fortement érodé au contraire du PK 74 où il est à peu près stable. A ce PK, on note l'apparition du banc de Saint Seurin sur la rive droite et l'engraissement du platin de Richard sur l'autre rive.

DE 1874 à 1900.

Au PK 60, l'engraissement devient très important sur la partie droite de l'estuaire, alors que la partie gauche est assez stable. L'engraissement se poursuit partout au PK 66 et s'amorce sur la rive droite au PK 70, alors que la partie gauche y est en érosion. Au PK 74, le Platin de Richard est relativement stable, le banc de Goulée s'érode légèrement, le banc de Saint Seurin se déplace latéralement vers la rive droite par engraissement de son flanc droit et érosion de son flanc gauche.

DE 1900 à 1925.

Au PK 60, les chenaux qui, jusqu'alors s'engraissaient, sont en érosion assez prononcée surtout pour le chenal de navigation (2 m environ). Les bancs sableux de Saint Estèphe et de Saint Louis migrent de l'amont et apparaissent en relief sur la figure.

Le PK 66 est en légère érosion surtout dans la moitié gauche de l'estuaire.

Au PK 70, apparaît, pour la première fois, la digue de Valeyrac, dont la construction débute en 1925. Le profil est semblable à celui de 1874-1900.

Au PK 74, le banc de Goulée est toujours en érosion. Il se produit un très fort engraissement de la zone du chenal de navigation et le chenal situé entre la rive droite et le banc de Saint Seurin est entièrement comblé.

DE 1925 à 1953.

La digue de Valeyrac est édiflée depuis 1928 et son action doit donc être décelable ici.

D'une façon générale, on observe un très fort engraissement dans la partie droite de l'estuaire sauf au PK 66 relativement stable. Par contre, au PK 70 l'engraissement n'a jamais été aussi important.

La digue de Valeyrac a peut-être joué là un rôle identique à celui joué par les bancs de Saint Estèphe et de Saint Louis au PK 60. On remarque d'ailleurs que le banc de Saint Estèphe s'érode du côté du chenal de navigation, de même que le banc de Saint Louis s'érode du côté du chenal de la rive droite.

Au PK 74, la moitié droite de l'estuaire s'engraisse ainsi que le platin de Richard, alors que la zone du chenal s'érode à nouveau et que le banc de Goulée se réduit de plus en plus.

#### DE 1953 à 1968.

Cette période de temps est beaucoup plus courte et les mouvements sédimentaires sont évidemment plus réduits.

Au PK 60, la partie située entre le banc de Saint Estèphe et la rive droite est en érosion. Le banc de Saint Estèphe se déplace latéralement vers la rive gauche provoquant ainsi l'érosion des slikkes de la rive médocaine.

Au PK 66, l'engraissement est général surtout du côté droit de la digue de Valeyrac et entre cette digue et la rive gauche.

Le PK 70 est remarquablement stable mis à part une légère érosion dans le chenal de navigation vraisemblablement provoquée par les dragages.

Le PK 74, au contraire, montre partout une certaine tendance à l'érosion et plus particulièrement sur la platin de Richard, dans le chenal de navigation et autour de la digue de Valeyrac.

#### DE 1968 à 1973.

Au PK 60, la rive gauche du chenal de navigation est toujours en érosion. Le banc de Saint Estèphe s'engraisse sur ses deux côtés et des dépôts vaseux peu épais s'effectuent à nouveau entre ce banc et la rive droite.

Le PK 66 est assez stable sauf dans le chenal de navigation et sur le côté droit de la digue de Valeyrac où on note une légère érosion.

Aux PK 70 et 74, la tendance est inversée par rapport à la précédente période 1953-1968. L'engraissement est à peu près général sauf dans certaines zones du platin de Richard et sur la rive droite.

### 3°- En conclusion.

L'influence de la digue de Valeyrac sur les phénomènes sédimentaires n'apparaît pas clairement. Il semble bien qu'elle n'ait eu qu'une influence minime sur l'engraissement vaseux général de cette partie de l'estuaire mis en évidence par la comparaison des cartes de 1825 et 1968. Elle a peut-être eu pour principal effet d'accélérer le colmatage du chenal de la rive droite au PK 70 (Période 1925 à 1953), mais son action est sans commune mesure avec les processus dynamiques naturels qui tendent, comme nous le verrons plus loin, à provoquer un ennoyage du bas estuaire par des matériaux vaseux.

### III - Nature des sédiments déplacés.

Les descriptions sédimentologiques des carottages pratiqués au voisinage des profils (PK 20, PK 25 . . . PK 95) permettent de cerner la nature des sédiments déposés dans l'estuaire. Après avoir consulté les différents sondages et décrit schématiquement les sédiments carottés, nous les avons comparé à l'évolution de la bathymétrie (ANNEXE).

#### 1°- Description schématique des sédiments carottés. (fig. 8)

Les descriptions utilisées proviennent de plusieurs missions de sondages :

- Sondages "ARMOR" en 1969
- Sondages "E.D.F." en 1974 et 1975
- Sondages du "P.A.B." en 1973
- Vibrocarottages "I.G.B.A." en 1973.

En raison de la complexité des différents faciès sédimentaires qui apparaissent sur les descriptions, il nous a paru nécessaire de schématiser et nous proposons les définitions suivantes :

Les sédiments transportés par charriage ont été regroupés sous le terme de "sable" (S) et les sédiments transportés en suspension sous le terme de "vase" (V).

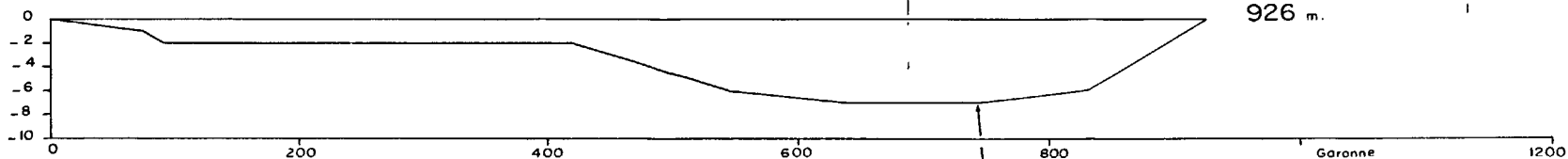
Dans le texte et dans les figures, le terme -sable- comprendra les différentes granulométries sableuses et les composants détritiques fins, marneux, gréseux ou calcaires ; les sables grossiers, graviers et galets sont regroupés sous le terme de "sables grossiers" (S.G.).

P.K. 20

Le Marquis

Chenal de navigation

Longueur du profil  
926 m.



Le pourcentage total des sédiments susceptibles d'être transportés par suspension ("Vase" 63 µm) dans tout l'estuaire est de 60,2 % (Valeur calculée d'après les planches qui suivent.)

276 numéro

v 100 %

4,75 longueur de la carotte

Moyenne =  $\frac{100\%}{1(\text{nombre de carotte})} = 100\%$

LEGENDE :

- v : sédiments susceptibles d'être transportés par suspension ("Vase")
- s : sédiments susceptibles d'être transportés par charriage (sables et silt)
- sg : sables grossiers, graviers, galets
- a : alternances (s et v)

- Fig. 8 -

Le terme -vase- comprend la vase (  $< 63\mu$ ) et les composants argileux et tourbeux.

Les alternances de sables et de vases formant des couches sédimentaires fines sont désignées par la lettre (A) sur les figures et sont appelées "alternances" dans le texte.

On trouvera en ANNEXE II des fiches réalisées pour chaque profil. Sur chacune est figurée la coupe topographique de 1968 avec le numéro du PK à gauche, la longueur du profil en mètres à droite et en dessous la description schématique des carottages avec certaines indications (numéro de la carotte, longueur, date de prélèvement pour les sondages autres que "ARMOR").

Les flèches de localisation des carottages renvoient aux niveaux bathymétriques de l'année où ils furent effectués.

2°- Résultats des comparaisons entre descriptions lithologiques (ANNEXE II) et variations morphologiques des profils (ANNEXE I).

- PK 20 : Vase "ancienne" dans le chenal de navigation qui a subi une forte érosion en son axe et sur la rive droite depuis 1825.
- PK 25 : Vase "ancienne" dans le chenal de navigation (en érosion depuis 1825). Dépôt de sable sur le versant du bec d'Ambès côté Garonne et de vase côté Dordogne.
- PK 30 : Vase avec passées sableuses ("sédiments anciens") dans le chenal de navigation en érosion depuis 1825.
- PK 35 : Même remarque que pour le PK 30.
- PK 40 : Sable avec passées de vase ("sédiments anciens") dans le fond du chenal de navigation. Dépôt de sable et de vase sur le flanc nord du chenal de 1953 à 1968, et sur le flanc sud du banc de Plassac durant la même période.
- PK 45 : Vase "ancienne" dans le chenal de navigation et dans un chenal entre le banc de Vasard et l'Ile de Patiras, ces zones ayant subi une forte érosion depuis 1825. De 1953 à 1968, dépôt alterné de vase et de sable sur la rive méridionale du Vasard.
- PK 50 : Vase "ancienne" dans le chenal de navigation. De 1925 à 1953, sur le versant nord du chenal se déposent des vases et des sables.

- PK 55 : Vase et sable grossier dans le chenal de navigation (déposées entre 1874 et 1900 pour les vases et antérieurs à 1825 pour les sables grossiers). Entre le banc de Patiras et de Saint Estèphe se sont déposées des vases de 1953 à 1968. Ces dépôts se sont effectués sur des sables et des sables grossiers alternés avec des vases déposées antérieurement à 1825.
- PK 60 : Vase, sable et sable grossier dans l'axe du chenal de navigation (sédiments anciens). Sur le flanc nord du chenal, dépôt de sable de 1953 à 1968. Entre le banc de Saint Estèphe et la rive droite, dépôt de vase de 1925 à 1953 sur des vases sédimentées avant 1825.
- PK 66 : Alternance de vases et de sables grossiers dans le chenal de navigation (sédiments déposés avant 1825). Sur le reste du profil, dépôts de 2 à 4 m de vases qui se sont produits durant les périodes 1825 - 1874 et 1953 - 1968. Ces accumulations reposent sur des vases anciennes.
- PK 70 : Alternance de vases, sables et sables grossiers dans le chenal de navigation (sédiments déposés avant 1825). Entre la digue de Valeyrac et la rive droite : dépôts de vases durant la période 1925-1953 reposant sur des vases avec passées de sables grossiers.
- PK 74 : Sur le versant sud du chenal de navigation, formation du Platin de Richard durant les périodes 1825 - 1874 et 1925 - 1953. Dépôt de sables grossiers entre 1925 et 1968. Sédiments composites dans le chenal (vase, sable, sable grossier) ayant subi de nombreux remaniements. Entre la digue de Valeyrac et la rive droite, dépôt de 1 à 2 m de vase entre 1925 et 1953.
- PK 80 : Dans le chenal de navigation, accumulations de sables et de vases puis de sables grossiers entre 1953 et 1968. Sur le versant sud du chenal : dépôt de sable entre 1874 et 1900 (versant nord en érosion). Dans le chenal de Saintonge, accumulations de vases et de sables en alternance durant la période 1925 - 1953.
- PK 85 : Tous les carottages sont situés au sud du banc de Talais, près de la rive gauche, dans une zone qui a connu de nombreux remaniements.
- PK 90 : Carottages sur le flanc sud du chenal de navigation. Sédiments sableux (zone relativement stable).
- PK 95 : Sur le flanc sud du chenal de navigation, accumulation de sable durant la période 1874 - 1900 et dans l'axe du chenal, accumulation de sable entre 1925 et 1953.

### 3°- Conclusions.

Malgré les résultats partiels de ces travaux en raison d'une part de l'éloignement des profils, et d'autre part de la rareté des carottages dans certaines zones (PK 20 - 25 - 30 - 35 - 45 - 85 - 90 - 95) ; il est possible de dégager plusieurs tendances :

a) A cause des travaux de dragage, le chenal de navigation a subi une forte érosion depuis 1825 et la plupart des sédiments carottés dans l'axe du chenal sont anciens, exceptés pour les PK 80 et 95 où s'est produite une accumulation de sables ou de sables grossiers probablement d'origine marine entre 1925 et 1968.

b) Les bords du chenal de navigation sont le plus souvent caractérisés par des dépôts de sables alternant avec des dépôts de vases. Ces bords sont relativement stables exceptés pour la partie amont entre le PK 20 et le PK 45.

c) Des dépôts de vases caractérisent la partie médiane de l'estuaire entre le PK 60 et le PK 74. Dans cette région, seul le chenal qui est dragué, n'est pas affecté par ces accumulations. Cette zone qui présente une forte tendance au comblement est par ailleurs caractérisée par l'absence de reliefs prononcés. Cette forte accumulation est vraisemblablement liée à la présence du bouchon vaseux pendant une longue période de l'année (pendant les forts débits fluviaux).

d) Il a paru intéressant de déterminer les proportions relatives entre sédiments grossiers (sables et graviers) et sédiments fins (silts, argiles), car les premiers sont transportés par charriage et les seconds en suspension.

Si on étudie les pourcentages volumétriques relatifs entre sables et vases dans les carottes, on s'aperçoit que les vases représentent les  $\frac{2}{3}$  des sédiments (61 %). On peut donc en conclure que le volume de sédiment déposé dans l'estuaire depuis plusieurs siècles l'a été pour les  $\frac{2}{3}$  en suspension et pour le  $\frac{1}{3}$  restant par charriage. Les sédiments fins en suspension ont une origine fluviale, alors que les sédiments grossiers transportés par charriage ont une origine mixte (fluviale et marine). Il est remarquable de constater que dans la Loire 25 % seulement des sédiments sont transportés par charriage (BERTHOIS, 1960). Mais cet auteur plaçant la limite inférieure du charriage à 0,5 mm, alors que dans la Gironde, nous la situons vers 0,2 mm, on peut penser que la légère différence observée résulte de ce fait et donc qu'en réalité les proportions relatives entre charriage et suspension sont très semblables dans les deux fleuves.

#### IV - Estimation des volumes de sédiments érodés et sédimentés.

Un bloc diagramme (figure 9) a été construit sur machine à dessiner afin de visualiser les variations de sédimentation et d'érosion au cours du temps. Nous donnerons ensuite les estimations concernant le volume des sédiments déposés dans l'estuaire.

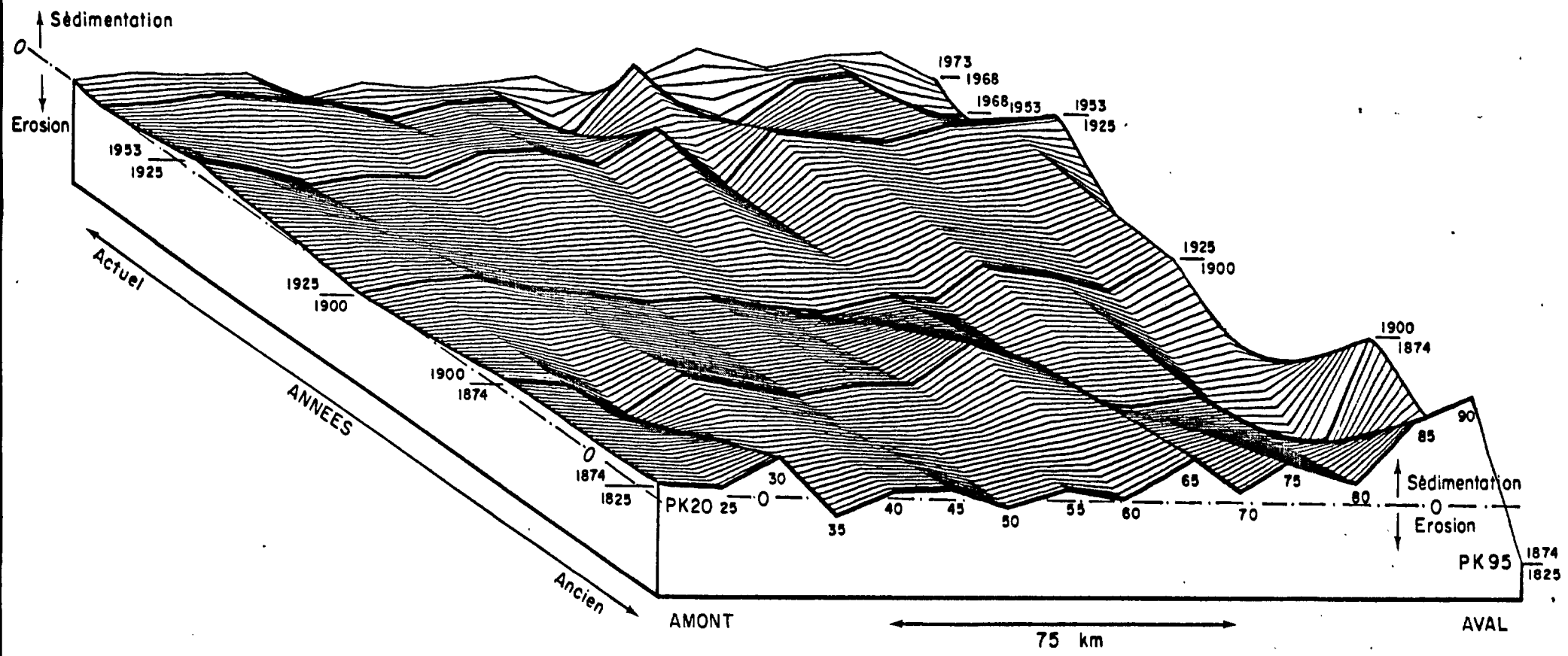


Fig 9 Bloc-diagramme de l'évolution des zones de dépôts sédimentaires dans la Gironde



1° - Visualisation des zones de dépôt et d'érosion.

Le bloc-diagramme de la figure 9 a pour coordonnées : en abscisse les points kilométriques de l'estuaire utilisés pour la comparaison des cartes bathymétriques ; en ordonnées les "bilans" en m<sup>2</sup> obtenus à partir des comparaisons (valeurs du tableau 1) et sur l'axe oblique le temps écoulé de 1874 à 1973. Les profils en traits épais relient les valeurs des "bilans" alors que les traits fins ont été obtenus par interpolation linéaire comme si l'évolution était continue (chaque courbe représente une année).

Ainsi, une élévation sur ce bloc-diagramme figure une forte accumulation de sédiments et une dépression exprime une érosion qui est d'autant plus importante que la dépression est profonde.

Dans la partie aval, c'est-à-dire à droite sur le bloc, apparaît une succession d'ondulations correspondant à des zones de sédimentation. La partie amont (à gauche) est beaucoup plus uniforme. On remarque également les fortes sédimentations apparues de 1925 à 1953 qui suivent une période d'érosion comprise entre 1900 et 1925. De 1968 à 1973, les profils sont fortement décalés les uns par rapports aux autres dans la partie aval, mettant en relief une période de sédimentation.

2°- Estimation des volumes à partir de la comparaison des profils.

Afin d'estimer les volumes de sédiments se déplaçant dans l'estuaire, il est nécessaire d'effectuer une extrapolation puisque les valeurs calculées jusqu'à présent proviennent de comparaison de coupes verticales et sont exprimées en mètres carrés. Par hypothèse, nous avons admis qu'une érosion ou une accumulation de 1000 m<sup>2</sup> de sédiments sur une période donnée et au niveau d'une section de l'estuaire fournit un volume de 5 000 000 de m<sup>3</sup> pour une distance de 5 000 m (intervalle entre deux profils). Autrement dit nous avons considéré que les variations étaient uniformes et continues entre deux profils successifs. Les valeurs ainsi obtenues pour la totalité de l'estuaire, y compris le PK 20 sur la Garonne et le PK 40 sur la Dordogne, sont présentées dans le tableau II :

$$1000 \text{ m}^2 \xrightarrow{5000 \text{ m}} 5.000.000 \text{ m}^3$$

Valeurs en millions de m<sup>3</sup>.

Dates	Volume de sédiments déposés	Volume de sédiments érodés	Total	Total cumulé
1825-1874	+ 132,4	- 43,3	+ 89,1	89,1
1874-1900	+ 61,2	- 79,2	- 18	71,1
1900-1925	+ 30	- 89,6	- 59,6	11,5
1925-1953	+ 136,8	- 19,7	+117,1	128,6
1953-1968	+ 45,3	- 39,2	+ 6,1	134,7
1968-1973	+ 74,3	- 13,8	+ 60,5	195,2
1825-1968	+ 189,6	- 55,2	+134,4	

TABLEAU II

En plaçant ces valeurs en ordonnée et les dates correspondantes en abscisse, un graphe peut être dessiné afin de visualiser l'évolution générale de l'estuaire. (fig. 10).

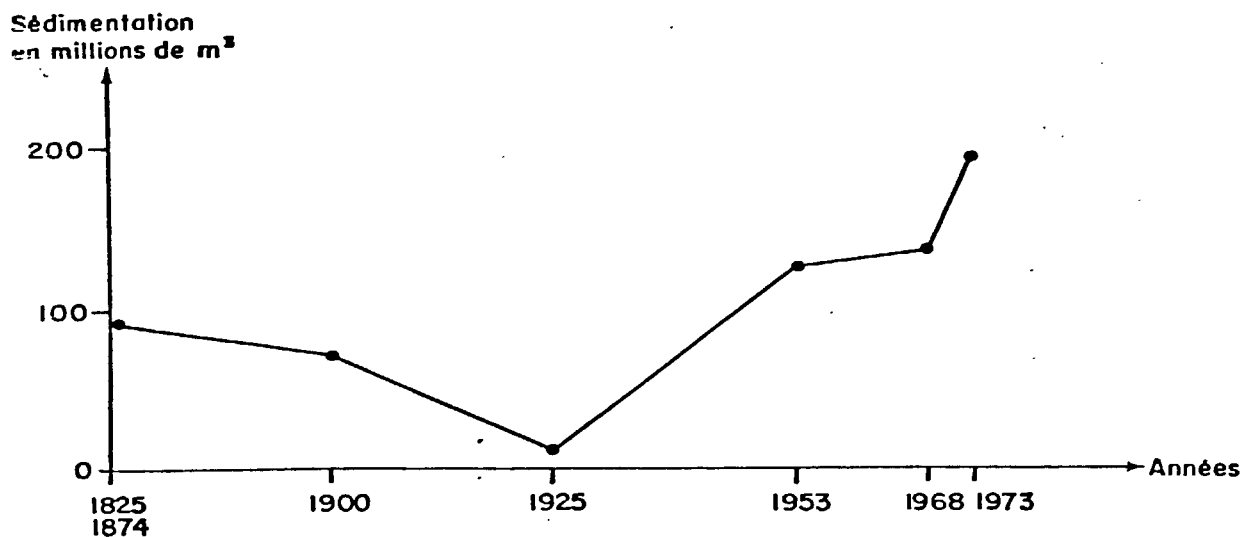


Fig. 10 - SEDIMENTATION DE 1825 à 1973 D'APRES LES VALEURS " TOTAL CUMULE " TABLEAU 2

Ce graphique montre qu'à une période de dépôts (1825 - 1874) succède une période d'érosion qui s'est poursuivie au moins jusqu'en 1925 et qui précède une nouvelle période de sédimentation entrecoupée par un palier de 1953 à 1968.

3°- Estimation des volumes à partir de la cubature sous étiage.

La précision des cartes au 1/20 000e du Port Autonome de Bordeaux permet de calculer ce volume avec une excellente approximation. Pour ce faire, il était possible de procéder par planimétrie, mais on a préféré utiliser la formule de SIMPSON afin d'obtenir des résultats pouvant être comparés à ceux calculés par le Port Autonome qui a utilisé la même formule. En effet, les ingénieurs du Port ont déjà calculé ce volume pour les années 1900, 1930, 1946, 1952, 1955, 1962. Pour notre part, nous avons effectué les calculs pour l'année 1973.

La formule de SIMPSON est la suivante :

$$S = \frac{H}{3n} (y_0 + y_n) + 4 (y_1 + y_3 + y_5 + \dots + y_{n-1}) + 2 (y_2 + y_4 + y_6 + \dots + y_{n-2})$$

- S = Surface de la section mouillée sous étiage
- n = nombre pair d'intervalles entre les cotes bathymétriques
- n + 1 = nombre de cotes bathymétriques
- y<sub>1</sub>, y<sub>3</sub> = cotes bathymétriques impaires
- y<sub>2</sub>, y<sub>4</sub> = cotes bathymétriques paires.

Cette formule permet donc d'obtenir la valeur de la section mouillée choisie sous le zéro de l'étiage, en fait peu différent du zéro marin dans l'estuaire de la Gironde.

Ces sections ont été calculées tous les 500 m environ dans l'estuaire du bec d'Ambès (PK 21,5), à l'embouchure (PK 96). En multipliant les surfaces de deux sections mouillées sous étiage successives par la distance qui les sépare, on obtient le volume d'eau sous étiage.

En supposant que ce volume est resté stable entre Bordeaux et le bec d'Ambès de 1962 à 1973, ce qui est vraisemblablement le cas si on se reporte aux résultats du Port pour les années antérieures, on obtient pour 1973 un volume total sous étiage de 2,167 x 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>.

La figure 11 exprime les variations du volume total sous étiage de l'estuaire depuis le début du siècle.

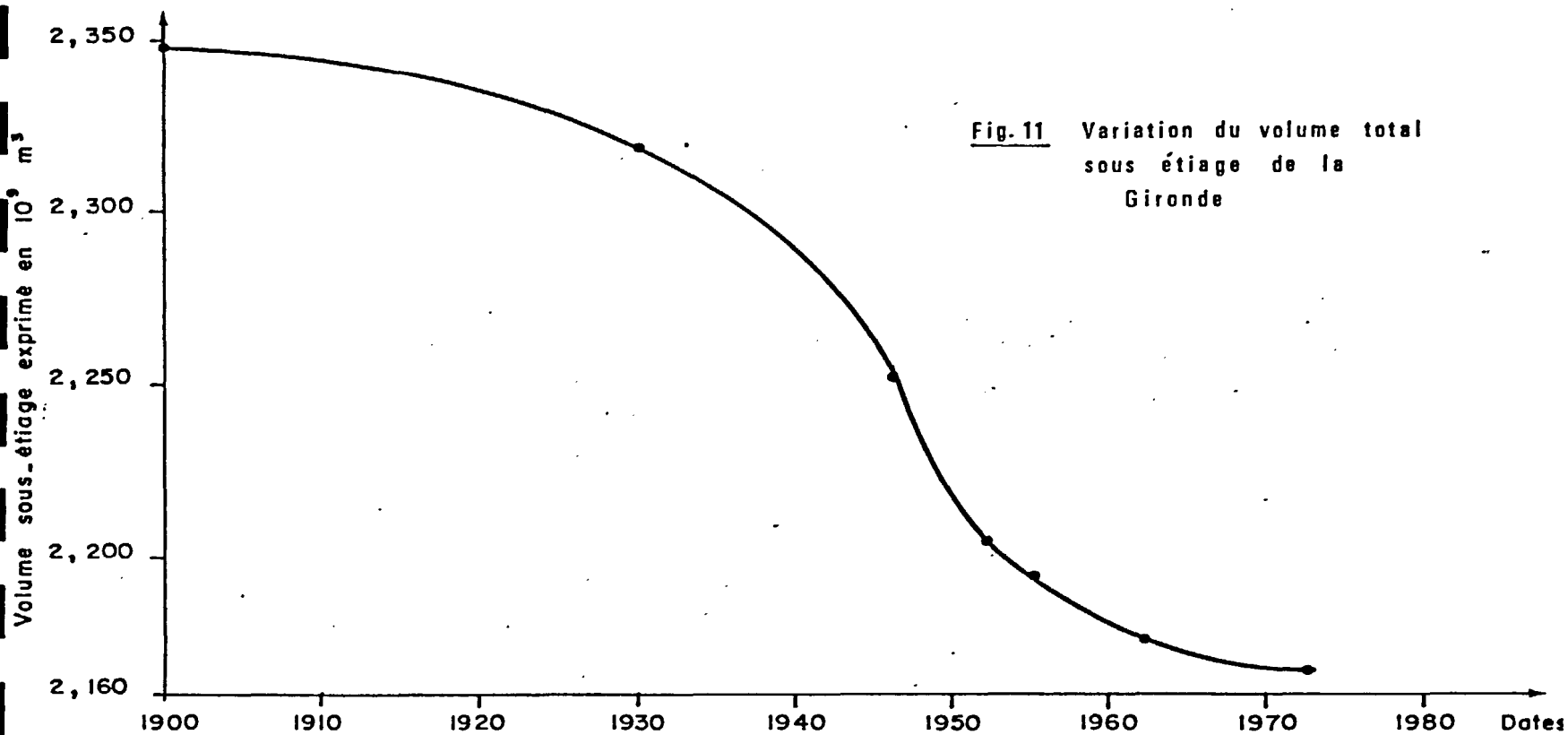


Fig. 11 Variation du volume total sous étiage de la Gironde

Une remarque s'impose : ce volume est en continuelle diminution depuis 1900 au moins. Le taux de diminution est variable. Peu accentué de 1900 à 1930, le remplissage sédimentaire de l'estuaire s'accroît beaucoup de 1930 à 1962 et plus particulièrement de 1930 à 1952. Ceci est vraisemblablement provoqué par l'arrêt presque total des dragages de 1940 à 1948. A partir de 1962, le taux de sédimentation diminue et semble tendre vers des valeurs comparables à celles de la période 1900-1930. La conclusion fondamentale de tout ceci est que, contrairement à ce que C. MIGNIOT (1971) pensait, l'estuaire de la Gironde est toujours en voie de comblement. Les volumes déposés varient beaucoup dans le temps : de 7,5 M de m<sup>3</sup>/an pour la période 1946-1952 à 0,73 M de m<sup>3</sup>/an pour la période 1962-1973, la moyenne s'établissant à 2,45 M de m<sup>3</sup>/an pour la période 1900-1973.

Les mesures de cubature sous étiage donnent une diminution de volume de 179 M de m<sup>3</sup> entre 1900 et 1973. Le volume de sédiments déposés évalué par la méthode des profils peut être estimé à 124 M de m<sup>3</sup> pour la même période. Cet écart entre les deux estimations provient sûrement de l'interpolation effectuée pour le

$$\frac{179}{124} = 1.44$$

calcul des volumes (multiplication d'une surface érodée ou sédimentée par 5000 m, écart entre deux profils). En effet, cet intervalle est beaucoup plus élevé que l'intervalle de 500 m environ utilisé pour les cubatures sous étiage. On peut donc penser que la valeur de 124 M est assez imprécise, celle de 179 M de m<sup>3</sup> étant beaucoup plus proche de la réalité.

## C - CONCLUSIONS.

### I - Conclusions méthodologiques.

L'étude de l'évolution morphologique des estuaires à partir de la comparaison des cartes bathymétriques peut être entreprise de différente manière. En fonction du temps disponible, et pour estimer les volumes des sédiments déposés à différentes époques, nous avons utilisé les deux méthodes suivantes :

- une méthode de comparaison des profils relevés sur des cartes bathymétriques à l'échelle du 1/40 000e, datant de 1825 à 1973.

- une méthode de calcul des cubatures sous étiage à partir des profils relevés sur des cartes à l'échelle du 1/10 000e et du 1/20 000e, datant de 1900 à 1973.

#### 1° - Méthode de comparaison des profils à l'échelle du 1/40 000e.

Cette méthode décrite dans le chapitre A fait largement appel à l'utilisation de l'informatique en raison des nombreuses données bathymétriques qui, archivées sur bandes magnétiques, peuvent être retraitées ultérieurement sans procéder à un nouvel échantillonnage. Pour la restitution des résultats, le dessin automatique facilite l'interprétation et permet une vérification immédiate des valeurs numériques. Cependant, la comparaison de deux profils suppose une juxtaposition très exacte de ceux-ci (voir chapitre A-V ), difficile à réaliser pour des documents cartographiques anciens. Mais cette erreur de calage influe peu sur la valeur du bilan des surfaces sédimentées et érodées.

Ces avantages sont tempérés par l'obligation d'extrapoler la valeur du bilan entre deux profils (intervalle de 5000 m) pour calculer le volume des sédiments déposés. Cette extrapolation entraîne obligatoirement une erreur que l'on peut minimiser en prenant des profils plus rapprochés les uns des autres. Mais, dans ce cas, l'importance des travaux augmente rapidement (par exemple, pour des profils espacés de 500 m, il serait nécessaire de procéder à 1190 comparaisons).

Pour pallier cet inconvénient, nous avons appliqué la méthode de calcul des cubatures sous étiage pour les documents postérieurs à 1900.

2°- Méthode de calcul des cubatures sous étiage à partir des cartes à l'échelle du 1/10 000e et du 1/20 000e.

Ce procédé consiste à calculer le volume de la Gironde à partir des coupes verticales disposées à 500 m les unes des autres (voir chapitre B-IV). Cette solution présente l'avantage d'une extrapolation dix fois moindre que dans le cas précédent. En revanche, le nombre de mesures est multiplié par dix, les documents doivent être précis et à grande échelle et il n'est pas possible de localiser sur une même coupe les zones de dépôt et d'érosion.

Comme nous disposions des mesures effectuées par le Port Autonome de Bordeaux pour les cartes datant de 1900 à 1962, il était intéressant de connaître le volume sous étiage de la Gironde en 1973. Au cours de ces travaux, nous avons constaté que la méthode de SIMPSON, utilisée pour le calcul des surfaces mouillées peut avantageusement être remplacée par la méthode de la moyenne : 
$$\frac{\text{somme des cotes}}{\text{nombre des cotes}}$$
 multipliée par la longueur du profil.

En définitive, les deux méthodes utilisées pour connaître l'évolution de la Gironde apparaissent comme complémentaires : la comparaison des profils deux à deux apporte des renseignements sur la localisation des zones de dépôt et d'érosion, alors que les calculs des cubatures précisent les variations du volume total de l'estuaire. Les résultats obtenus par ces méthodes sont présentés dans le paragraphe suivant.

Il est possible d'adjoindre à ce type de recherche des méthodes plus qualitatives afin de cerner l'évolution d'un domaine particulier. Nous pensons par exemple à la photointerprétation des différentes missions de photographies aériennes qui offrirait un supplément d'information sur l'évolution des berges de la Gironde.

En conclusion, l'analyse de l'évolution morpho-sédimentaire d'un estuaire peut être envisagée de plusieurs manières, en fonction de la qualité des documents utilisés, de la précision demandée, du temps disponible.

## II - Conclusions sédimentologiques.

Trois différents types de conclusions peuvent être mis en lumière à l'issue de l'étude morphologique et volumétrique de l'estuaire de la Gironde.

### 1°- Action anthropique et phénomènes sédimentaires.

L'influence de l'action anthropique est indéniable. Les dragages et la construction d'ouvrages de calibrage ont permis de fixer le chenal principal près de la rive gauche et de l'approfondir. Ceci a été obtenu en faisant tout pour concentrer l'écoulement du jusant dans le chenal de navigation.

Cependant, tous les travaux n'ont pas connu une égale réussite. Il suffit pour s'en rendre compte d'examiner le cas du bras de Macau et celui de la digue de Valeyrac.

Dans le premier exemple, le but recherché était de rejeter dans le chenal principal la plus grande partie des eaux qui passaient par le bras de Macau et ce en fermant le chenal par une digue de barrage immergée. Celle-ci a parfaitement remplie son office en provoquant un ennoyage du bras de Macau où la capacité sous étiage est passée de 13,4 M de m<sup>3</sup> en 1947 à 3,3 M de m<sup>3</sup> en 1973. La sédimentation s'est accélérée à partir de 1960 lorsque la cote du barrage a été portée de + 1,35 à + 2,50 m et de 1962 à 1968, le bras de Macau a perdu 50 % de son volume sous étiage. Depuis 1962, il semble que l'on soit parvenu à un état d'équilibre car la capacité est restée inchangée.

Dans cet ensemble qui constitue une nécessité du point de vue hydraulique, la réponse à l'action anthropique a été longue. En effet, la fermeture à la cote -2 m a été réalisée en 1869 et ce n'est qu'à partir de 1947 que le bras de Macau a commencé à s'ennoyer.

La digue de Valeyrac représente par contre un demi échec. Destinée à canaliser le jusant dans la passe de Saint Christoly, elle n'a jamais rempli ce rôle de façon satisfaisante et il semble que son action soit moins efficace que celle du banc de Saint Estèphe qui a une origine naturelle. La digue de Valeyrac n'a pas provoqué un auto-dragage suffisant de la Passe de Saint Christoly vraisemblablement parce que le noyau du bouchon vaseux étant centré sur cette zone une grande partie de l'année, le volume de vase à évacuer dépasse les possibilités érosives de l'écoulement.

L'efficacité des dragages témoigne elle-aussi de l'importance de l'action humaine sur les phénomènes sédimentaires. Pendant la dernière guerre mondiale les dragages étant complètement stoppés, les volumes sédimentés ont été de

7,5 M de m<sup>3</sup>/an pour cette période alors qu'ils s'établissent à 2,45 M de m<sup>3</sup>/an en période normale lorsque le chenal de navigation est dragué.

L'étude de l'impact de l'action anthropique sur le milieu estuarien constitue une question importante qui mériterait d'être approfondie tant du point de vue des mécanismes que du temps de réponse à une modification morphologique artificielle.

## 2° - Les changements morphologiques.

La stabilité morphologique n'existe pratiquement pas dans l'estuaire et de nombreuses zones sont le siège d'évolutions morphologiques importantes. La stabilité géographique dépend en partie de la nature et de l'architecture du substratum rocheux et la répartition de cette armature, constituée d'affleurements rocheux ou de dépôts de graviers, n'est pas du tout en liaison avec les conditions actuelles.

L'évolution de la Gironde depuis 1825 et même depuis le XVII<sup>e</sup> siècle met en évidence deux faits majeurs :

- Une progression d'amont en aval, des phénomènes d'alluvionnement, mis en lumière par l'apparition successive des fles vers l'aval à partir du bec d'Ambès.
- L'approfondissement du chenal de navigation et le remblaiement concomitant du chenal de Saintonge, phénomène naturel accéléré par les dragages et les travaux de calibrage.

Dans le détail et sur des intervalles de temps de l'ordre de 25 ans, on observe une grande variabilité de la position des zones de sédimentation et d'érosion, cependant certains caractères semblent représenter des constantes dans l'évolution de l'estuaire :

- En amont du bec d'Ambès, les fonds présentent toujours une certaine tendance à l'érosion depuis 1850, date du début des travaux de calibrage.
- Dans l'estuaire amont, le chenal de navigation s'approfondit (PK 35 à 45) par suite des dragages et le chenal de la rive droite semble se creuser naturellement. On observe aussi un exhaussement des bancs et une tendance des fles à se raccorder les unes aux autres. L'avancée du banc de Saint Estèphe vers l'aval est temporairement arrêtée, mais on assiste à une progression spectaculaire du banc de Saint Louis enraciné au droit de Braud et Saint Louis.



- Dans l'estuaire aval, entre les PK 66 et 74, l'estuaire se colmate sur toute sa largeur sauf dans le chenal de navigation. Plus en aval (PK 85 à 90) seul le chenal de Saintonge est en voie de comblement. Il faut signaler ici aussi l'exhaussement des bancs sableux et une tendance au raccordement du banc de Talais à la rive favorisant ainsi le colmatage de l'anse du Verdon.

- Dans certaines zones se produisent alternativement des érosions et des sédimentations qui semblent présenter une périodicité de 25 ans (PK 60 et 95).

A ce sujet, il serait intéressant de rechercher une relation entre ces différents cycles et les fluctuations du débit annuel de la Garonne et de la Dordogne afin de déterminer l'origine de ces variations cycliques.

### 3° - L'évolution de la capacité sous étiage.

La question de savoir si le volume mouillé de l'estuaire est actuellement stable est extrêmement importante, car la nature essentielle du rôle sédimentologique de l'estuaire est fonction de la réponse apportée.

Si le volume est stable, l'estuaire n'est qu'un lieu de transit et de stockage temporaire pour tous les sédiments fluviaux qui y sont introduits. Dans le cas contraire, il se produit un piégeage définitif de la plus grande partie des apports. De toute façon, il est couramment admis que les estuaires sont des sites à forte sédimentation, d'origine fluviale et (ou) marine et constituent des formes transitoires qui doivent inexorablement se combler et devenir des formations deltaïques.

Les calculs volumétriques prouvent que la capacité sous étiage de l'estuaire est en continuelle diminution depuis 1900. Cette diminution a d'ailleurs vraisemblablement débuté depuis fort longtemps.

Pour la totalité de l'estuaire, de Bordeaux à la Pointe de Grave, cette diminution de 1900 à 1973 est d'environ 179 M de m<sup>3</sup> soit un pourcentage de 7,5% en moins par rapport à la capacité de 1900. La totalité des dépôts s'est effectuée en aval du bec d'Ambès, puisqu'en amont de ce lieu, les dragages ont permis d'accroître la capacité de 9 M de m<sup>3</sup> de 1900 à 1973. Les taux d'alluvionnement maximum sont rencontrés entre les PK 66 et 74 sur toute la largeur de l'estuaire (le chenal mis à part) et dans le chenal de Saintonge plus en aval.

Du PK 66 au PK 96, le taux annuel moyen de sédimentation pour la période 1900-1973, peut être estimé à 3,2 M de m<sup>3</sup>, la moitié environ de ces sédiments étant constituée par des sables d'origine marine qui se déposent sur les bancs au-dessus du niveau de l'étiage.

Si on ne considère que les dépôts sous étiage, ils sont en moyenne de 2,45 M de m<sup>3</sup>/an pour la période 1900-1973. Ce sont essentiellement des vases d'origine fluviale transportées en suspension. } Faus

Les taux de sédimentation fluctuent dans le temps. Particulièrement élevés pendant et après la dernière guerre (7,5 M de m<sup>3</sup>/an) par suite de l'arrêt des dragages, ils sont beaucoup plus faibles de 1900 à 1925 (1 M de m<sup>3</sup>/an) et depuis 1962 (0,73 M de m<sup>3</sup>/an). Il faut donc voir là l'influence de l'action anthropique, mais aussi vraisemblablement celle des variations annuelles des débits de la Garonne et de la Dordogne.

Si la diminution du volume sous étiage se maintient au taux des 73 dernières années (7,5 %), on peut estimer que l'estuaire sera entièrement comblé dans 950 à 1000 ans. Pour cela, il faudrait évidemment qu'aucun événement d'origine naturelle ou humaine ne vienne modifier les conditions actuelles.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

-----

ALLEN G.P., 1973

Etude des processus sédimentaires dans l'estuaire de la Gironde.

Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine n° 5, 314 p., 134 fig.

ALLEN G.P., CASTAING P., FERAL A., KLINGEBIEL A., VIGNEAUX M., 1970

Contribution à l'étude des faciès de comblement et interprétation paléogéographique de l'évolution des milieux sédimentaires récents et actuels de l'estuaire de la Gironde.

Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine n° 8, p. 99-154, 20 fig.

BERTHOIS L., MORIZE J., 1960

Première évaluation du débit solide total de la Loire.

C.R.A.S. Paris, t. 251, p. 1543-1545.

BONNEFILLE R., 1971

Remarques sur les écoulements moyens à l'aval de la Gironde.

Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine, fasc. 2, p. 361-364, 1 fig.

CREMER M., 1975

Etude dynamique de l'évolution des bancs de sable dans l'estuaire de la Gironde.

Thèse de 3e cycle, Univer. Bordeaux, 70 fig., 109 p.

FERAL A., 1970

Interprétation sédimentologique et paléogéographique des formations alluviales flamandaises de l'estuaire de la Gironde et de ses dépendances marines.

Thèse de 3e cycle, Univer. Bordeaux, 158 p., 62 fig., 2 tabl., 8 pl. photo.

GLANGEAUD L., 1939

Le mouvement des sédiments et la formation des bancs, seuils et mouilles dans la Garonne et la Gironde.

Extr. Congrès Inter. Union Géodésique et Géophysique, 14 p., 9 fig.

LATOUCHE Cl., 1971

Contribution à la connaissance de la dynamique des vases dans le système  
Garonne - Dordogne - Gironde : étude des minéraux argileux.

Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine n° 11, fasc. 2, p. 317-332, 11 fig.

MIGNOT Cl., 1971

L'évolution de la Gironde au cours des temps.

Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine n° 11, fasc. 2, p. 221-279, 36 fig.

ESSAIS D'ETABLISSEMENT DE BILANS MASSIQUES  
DU ZINC, CUIVRE ET PLOMB DANS L'ESTUAIRE DE LA GIRONDE

J.M. JOUANNEAU

## INTRODUCTION

-----

Depuis trois ans l'Institut de Géologie du Bassin d'Aquitaine a développé partiellement en collaboration avec le CNEXO un programme d'étude du comportement des oligo-éléments métalliques dans le complexe fluvio-estuarien de la Gironde. C'est ainsi que la connaissance de l'évolution de ces métaux a pu être précisée à travers un certain nombre de travaux récents tels que, depuis 1976 :

- Contrat "Surveillance Ecologique du Site du Blayais" (IGBA/CNEXO, 1977) ;
- Etude de la prévention de la pollution de l'estuaire et de l'embouchure de la Gironde (Contrat IGBA/PAB, 1977) ;
- Réseau National d'Observation (Contrats IGBA/CNEXO, 1977, 1978) ;
- Thèse de 3e cycle de Monsieur ETCHEBER (1978) et travaux antérieurs du Laboratoire (ETCHEBER et al., 1977) ;
- Opération de Double Marquage de Vase (Contrat IGBA, DEA/CNEXO, 1978).

Ces recherches s'appuyant en outre sur des études antérieures qui ont permis de préciser les mécanismes hydrosédimentaires en Gironde (ALJEN, 1972 ; SAUZAY et al., 1975 ; ALLEN et al., 1977 ; JOUANNEAU, 1977). Il apparaît maintenant possible d'établir les bilans quantitatifs d'un certain nombre d'éléments métalliques tant sous leur forme dissoute que particulaire.

En ce qui concerne le comportement général des métaux dans l'estuaire, une décroissance amont-aval importante de divers oligo-éléments métalliques liés à la phase particulaire a été observée.

Cette décroissance est le fait de deux mécanismes complémentaires :

- des processus de mélange entre les particules fluviales, d'origine continentale, riches en métaux et les particules d'un important stock sédimentaire estuarien appauvri en métaux.

- une mise en solution des métaux liés à la phase particulière des zones amont de l'estuaire, mise en solution démontrée à la faveur de deux séries d'observations :

. augmentation des teneurs en métaux dissous dans le centre de l'estuaire, ETCHEBER (1978) ;

. opération de Double Marquage de Vase (DMV, Octobre 1977).

## A = METHODE D'ETUDE.

### I - Etablissement des bilans quantitatifs.

L'établissement de bilan quantitatif dans un système estuarien revient à calculer sur une année la quantité des apports et la quantité des dépôts et des expulsions.

L'équation massique peut se résumer ainsi :

$$\text{Entrées} - \text{Dépôts} = \text{Expulsions}$$

Dans la Gironde, les entrées recouvrent un certain nombre d'apports plus ou moins facilement déterminables :

#### - Les apports fluviaux :

Ce sont les apports de la Garonne et de la Dordogne tant sous forme particulière que sous forme dissoute estimés à la limite amont du système estuarien (limite de pénétration de la marée dynamique).

#### - Les apports dans l'estuaire proprement dit :

Ils correspondent aux apports parvenant dans l'estuaire en aval de la limite de pénétration de la marée. Ils sont donc assimilables au drainage du bassin versant de la Gironde proprement dit et intègrent en particulier la pollution induite par l'agglomération bordelaise qui représente plus de 500 000 habitants.

#### - La contribution inhérente à l'estuaire lui-même :

Les apports qui doivent être également pris en compte correspondent à la contribution du stock estuarien. Ce stock représente en effet plus d'une année moyenne d'apports de matières en suspension d'origine continentale ; une partie de cette masse est renouvelée chaque année. La mise en solution des métaux qui

lui sont associés est particulièrement importante dans cette zone et c'est surtout sous forme dissoute que cette contribution intervient.

Au total, le bilan des métaux dans la Gironde peut donc être schématisé ainsi :

Apports fluviaux + Apports dans l'estuaire + Contribution de l'estuaire - Dépôts = Expulsions

Dans le cas du système girondin et dans l'état actuel de nos connaissances, seuls les apports fluviaux peuvent être estimés et dans un premier temps le bilan massique sera calculé à partir de l'équation :

Apports fluviaux - Dépôts = Expulsions

Les expulsions ainsi calculées sont donc théoriques et donc en toute rigueur approchées. Aussi, afin de préciser les expulsions, nous nous sommes par ailleurs appuyés sur des mesures de concentration en métaux dissous et particuliers à l'embouchure et pouvant donc être considérées comme représentatives des expulsions réelles. Les différences entre les expulsions observées et les expulsions théoriques permettent d'apprécier plus ou moins grossièrement les entrées supplémentaires (apports dans l'estuaire et contribution de l'estuaire) qui n'ont pas pu être pris en compte directement.

## II - Estimation des différents termes du bilan en Gironde.

### II-1. Apports fluviaux dans l'estuaire.

La mesure des apports de la Garonne et de la Dordogne a été réalisée à la limite amont de l'estuaire, c'est-à-dire à la limite amont de l'action dynamique de la marée : La Réole sur la Garonne ; Pessac sur la Dordogne. Elle a été réalisée sur des prélèvements mensuels qui se prolongent sur une période de plus de deux ans.

#### II-1.1. Apports particuliers.

- Apports en matières en suspension - (MES)

Les apports en suspension de la Garonne et de la Dordogne ont été estimés à partir des mesures de concentration en MES des eaux et du débit liquide du fleuve considéré, le produit de ces deux valeurs permettant d'obtenir le débit solide en suspension :

$$Q_s = Q_{fl} \times \text{Turbidité}$$



Le débit solide étant calculé mensuellement. D'autre part, nous avons tenu compte, dans les extrapolations à une année moyenne, des données antérieures :

- sur les concentrations moyennes en MES à la Réole et à Pessac sur Dordogne (ALLEN, 1972) ;

- sur les apports moyens en matières en suspension dans la Gironde (MIGNIOT, 1971), établis à partir de mesures quasiment quotidiennes entre 1959 et 1964, effectuées par le Port Autonome de Bordeaux (PAB).

Enfin, depuis Octobre 1977, reprenant ce type de méthodologie, les apports de la Garonne ont été estimés à partir de mesures de concentration en MES pratiquement quotidiennes sur des prélèvements réalisés avec le concours du PAB.

Le PAB effectue par ailleurs, depuis plusieurs dizaines d'années, les mesures quotidiennes du débit liquide de la Garonne et de la Dordogne.

- Apports en métaux liés à la phase particulaire -

S'appuyant sur les valeurs mensuelles du débit solide en suspension, les apports en métaux ont été calculés en faisant le produit de ce débit solide par la teneur en métal des suspensions. L'apport annuel d'un fleuve représentant la somme de ces apports mensuels.

#### II-1. 2. Apports liquides.

- Apports d'eau douce d'origine continentale -

Ces apports ont été calculés à partir des mesures de débits liquides réalisées quotidiennement à La Réole et à Pessac sur Dordogne par le Port Autonome de Bordeaux.

Les apports liquides en Gironde correspondent à la somme des apports de la Garonne et de la Dordogne.

En ce qui concerne l'estimation "année moyenne", elle a été établie à partir des débits moyens de la Garonne et de la Dordogne sur la période 1961-1970 (ALLEN, 1972).

- Apports de métaux dissous -

Ces apports ont été établis à partir de mesures mensuelles en métaux dissous à La Réole et à Pessac sur Dordogne et du débit liquide présenté ci-dessus.

II-2. Le stock estuarien.

II-2.1. Le stock particulaire.

+ Matières en suspension dans l'estuaire.

En fonction des conditions hydrologiques, les matières en suspension dans l'estuaire se répartissent en deux grandes entités : le bouchon vaseux et la crème de vase (ALLEN, 1972).

Le stock estuarien particulaire a été estimé à environ  $5.10^6$  T de suspensions réparties soit dans le bouchon vaseux, soit dans la crème de vase. Ceci correspond à une estimation moyenne établie à partir des travaux d'ALLEN, 1972 ; MIGNIOT, 1971 ; ALLEN et al., 1974 ; SAUZAY et al., 1975 ; JOUANNEAU à paraître (1979).

Au sein de ce stock, le bouchon vaseux a été estimé à  $2.10^6$  tonnes de MES.

+ Les métaux dans le stock particulaire.

Le stock de métaux dans le bouchon vaseux a été estimé en faisant le produit de la masse de ce bouchon vaseux par le teneur moyenne des différents métaux considérés. Ces teneurs moyennes ayant été établies à partir de prélèvements réalisés mensuellement entre Novembre 1975 et Décembre 1976 (ETCHEBER, 1978), en 4 stations au minimum (8 au maximum) du moyen estuaire.

Le stock de métaux dans la crème de vase a été calculé à partir de valeurs moyennes établies sur plusieurs dizaines d'échantillons de crèmes de vase formées à différentes périodes de 1976 à 1978 et sur une estimation massique des sédiments constituant ces formations de crème de vase : JOUANNEAU (1979 à paraître).

II-2.2. Le stock dissous.

Le stock en métaux dissous a été estimé à partir du volume de l'estuaire à pleine mer en vive eau soit :  $3860.10^6$  m<sup>3</sup> entre le Bec d'Ambès et le Verdon et des teneurs moyennes en métaux dissous dans l'estuaire. Ces teneurs en

métaux dissous étant établies, comme en ce qui concerne les teneurs en métaux particuliers, à partir d'analyses de prélèvements réalisés mensuellement en 4 stations minimum du moyen estuaire entre Novembre 1975 et Décembre 1976 (ETCHEBER, 1978).

### II-3. Dépôt.

#### II-3.1. Dépôt des MES.

L'estuaire de la Gironde est un estuaire en voie de colmatage, il existe donc une certaine partie du stock sédimentaire qui y reste déposée.

L'estimation de ces dépôts et l'influence de ces dépôts sur le bilan des éléments métalliques n'est pas aisée. Nous avons procédé à partir des estimations suivantes :

- les cubatures d'érosion et de dépôts dans l'estuaire réalisées par le PAB à partir de documents cartographiques échelonnés entre 1900 et 1962 ont montré qu'il y avait un exhaussement moyen de  $2,7 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/an.

Si l'on considère que ces  $2,7 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup> sont constitués de vases (riches en oligo-éléments métalliques) et de sables (pauvres en oligo-éléments métalliques), il nous faut faire la part de ces deux constituants ; nous avons estimé que les vases représentaient  $2 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup> et les sables seulement  $0,7 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>.

Si l'on considère que ces vases ont une densité de 1,3 (vases à 80 % d'eau telles qu'on les rencontre couramment en carottages); ce dépôt représenterait alors  $1,5 \cdot 10^6$  T/an.

#### II-3.2. Stock métallique déposé.

Les stocks métalliques associés à des dépôts de MES ont été établis à partir de l'estimation présentée ci-dessus de la masse de sédiments fins déposée en moyenne chaque année dans l'estuaire et des teneurs métalliques moyennes de la crème de vase. Nous avons, en effet, considéré que les dépôts récents de vase avaient des teneurs comparables à celles des crèmes de vase, dont pour la plupart ils sont issus.

## II-4. Expulsions.

### II-4.1. Expulsions solides.

#### - Expulsions des matières en suspension -

La mesure directe de la quantité de MES expulsée annuellement hors de l'estuaire nécessiterait une connaissance en toutes conditions hydrologiques des débits solides résiduels au niveau du lieu géographique des points de non retour des particules dans l'estuaire. Cette approche est dans l'état actuel irréalisable aussi ne peut-on s'appuyer que sur des méthodes indirectes.

Si l'on considère l'équation d'équilibre du bilan des sédiments en suspension dans l'estuaire en année moyenne, on peut avoir une approche de la quantité de MES d'origine fluviale et estuarienne expulsée annuellement :

$$\text{Apports} - \text{Dépôts} = \text{Expulsions}$$

ce qui amènerait à :

$$2,5 \cdot 10^6 \text{ T} - 1,5 \cdot 10^6 \text{ T} = 1 \cdot 10^6 \text{ T}$$

C'est donc cette valeur de  $1 \cdot 10^6 \text{ T}$  que nous avons retenu comme estimation des expulsions de MES en année moyenne.

En 1976 et en 1977, en raison, comme on le verra plus loin, de la faiblesse des apports en suspension dans l'estuaire, nous n'avons retenu que la moitié de cette valeur, soit  $= 0,5 \cdot 10^6 \text{ Tonnes}$  par an. Cette estimation est d'ailleurs de l'ordre de grandeur de celle établie à partir d'une opération de traçage avec isotopes radioactifs (SAUZAY et al., 1975, expérience TRAVAGIR).

#### - Expulsions des métaux liés à la phase particulaire -

Afin d'estimer les expulsions hors de l'estuaire des métaux liés à la phase particulaire, nous avons effectué le produit de la quantité de sédiments d'origine fluviale et estuarienne expulsée annuellement (calculée selon le principe exposé ci-dessus), par la teneur moyenne en différents métaux des suspensions du point 2 du RNO à l'embouchure de la Gironde (PK 96). Ces teneurs moyennes ont été établies à partir de l'ensemble des analyses effectuées mensuellement de 1976 à fin 1978.

### II-4.2. Expulsions liquides.

#### II-4.2.1. Eau douce.

Le volume d'eau douce sortant de la Gironde étant sur un an égal à celui qui entre dans l'estuaire, c'est le débit liquide cumulé de la Garonne et de la

Dordogne qui correspond à ce volume d'eau douce expulsé.

II-4.2.2. Métaux dissous.

L'expulsion des métaux sous forme dissoute a été établie à partir des données suivantes :

- volume d'eau douce expulsé mensuellement et annuellement ;
- teneurs en métaux dissous dans les prélèvements réalisés mensuellement en surface et près du fond depuis 1976, au point 2 du RNO ;
- correction de la teneur mesurée en fonction de la dilution par l'eau de mer dont les teneurs moyennes en métaux ont été proposées par GOLDBERG (1963-1965). La correction due à la dilution a été établie à partir des mesures de salinité.

En résumé, le bilan quantitatif des métaux en Gironde sur un an sera donc de la forme :

$$\begin{array}{l}
 Q_{fl\ G} \times C_1 \\
 Q_{fl\ D} \times C_2 \\
 Q_{S\ G} \times C'1 + \\
 Q_{S\ D} \times C'2
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \text{Apports dans l'estuaire} \\
 \text{et} \\
 \text{Contribution du stock} \\
 \text{estuarien}
 \end{array}
 - \text{Sédimentation} \times C'3 + \begin{array}{l}
 Q_{fl\ D + G} \times C_3 \\
 Q' S \times C'4
 \end{array}$$

- avec
- $Q_{fl\ G}$  débit liquide de la Garonne
  - $Q_{fl\ D}$  débit liquide de la Dordogne
  - $Q_{S\ G}$  débit solide de la Garonne
  - $Q_{S\ D}$  débit solide de la Dordogne
  - $C_1$  concentration en métal dissous en Garonne
  - $C_2$  concentration en métal dissous en Dordogne
  - $C'1$  concentration en métal particulaire en Garonne
  - $C'2$  concentration en métal particulaire en Dordogne
  - $C'3$  concentration en métal particulaire dans les sédiments de l'estuaire
  - $C_3$  concentration corrigée de l'effet de dilution en métal à l'embouchure
  - $Q'S$  débit solide expulsé
  - $C'4$  concentration en métal particulaire dans les suspensions de l'embouchure.

Données hydrologiques et sédimentologiques relatives aux années étudiées.

		1976	1977	1978	Année moyenne
Débits liquides en $10^6$ m <sup>3</sup>	Garonne	11260	16425	16512	13558
	Dordogne	8614	12837	10855	10155
	Garonne	19800	29262	27367	23713
Débits solides en $10^6$ tonnes	Garonne	0,5	0,75	2,25	1,8
	Dordogne	0,125	0,3	0,75	0,7

Estuaire

Volume de l'estuaire à pleine mer	$3860 \cdot 10^6$ m <sup>3</sup>	Stock en métal dissous		
		Zinc	Cuivre	Plomb
		285 T	28 T	54 T
Masse de sédiments constituant bouchon vaseux et crème de vase	$5 \cdot 10^6$ tonnes	Stock en métal particulaire		
		Zinc	Cuivre	Plomb
		1100 à 1300 T	170 T	240 T
Sédimentation moyenne annuelle	$1,5 \cdot 10^6$ T	Dépôt en métal particulaire		
		Zinc	Cuivre	Plomb
		330 T	30 T	70 T

B - LES BILANS QUANTITATIFS ANNUELS.

I - Année 1976.

Sur le plan climatologique, l'année 1976 a été caractérisée par une grande sécheresse jusqu'en Septembre et une très forte pluviosité les 3 derniers mois ; ceci s'est traduit directement sur les apports solides et liquides de la Garonne et de la Dordogne qui sont restés inférieurs à la moyenne des 10 dernières années.

I-1. Le Zinc en 1976.

- Apports fluviatiles -

- Zinc lié à la phase particulaire : 35 T de la Dordogne  
210 à 250 T de la Garonne
- valeurs obtenues à partir des prélèvements et des analyses réalisées tous les mois à La Réole et à Pessac sur Dordogne soit donc 245 à 285 T de Zinc.
- Zinc en solution : 26 T de la Dordogne  
190 T de la Garonne

Les apports fluviatiles en Zinc ont donc été de 461 à 501 Tonnes en 1976.

- Expulsions -

Dans la mesure où l'on considère que le stock estuarien est constant, les expulsions en Zinc auraient été de :  $501 - 330 = 171$  Tonnes de Zinc.

En fait, cette valeur ne reflète pas la réalité.

On peut considérer que l'expulsion de sédiments en suspension en 1976 n'ayant été que de  $0,5 \cdot 10^6$  T et en fonction des teneurs moyennes en Zinc particulaire à l'embouchure (200 ppm environ ( ETCHEBER, 1978)). Les expulsions sous forme particulaire ont été de 100 Tonnes environ.

Or, une grande quantité du Zinc est également expulsée sous forme dissoute.

Sur la base des données mensuelles en Zinc dissous, l'expulsion de Zinc dissous a été estimée à 1800 T à 2300 Tonnes.

Ainsi donc en 1976, le bilan du Zinc en Gironde s'établirait ainsi :

- Apports : 501 T
- Dépôts : 330 T
- Expulsions: 1900 à 2500 T

Les expulsions théoriques n'étant que de 171 Tonnes environ, le bilan se serait soldé par un déficit de :

1730 à 2330 T de Zinc

Les autres sources d'apports doivent donc être prises en considération et l'on peut penser que la principale a pu être le Zinc dissous provenant de la mise en solution du stock de Zinc particulaire présent dans le stock estuarien, mais les autres types d'apports ; Bordeaux, pollution... ne doivent pas être écartés.

Le bilan du Zinc en 1976 sur la base des mesures réalisées se schématiserait de la façon suivante :

Dordogne	35 T Znp 26 T Znd	Estuaire 285 T Znd 1100 à 1300 T Znp	Expulsion 1900 à 2500 T
Garonne	250 T Znp 190 T Znd		100 T Znp 1800 à 2400 T Znd
		Sédimentation 330 T Znp	

#### I-2. Le Cuivre en 1976.

La même méthodologie a été appliquée en ce qui concerne le Cuivre.

- Apport de l'année 1976 par la Garonne et la Dordogne : 90 à 97 T de Cuivre dont 67 T à l'état dissous.

- Expulsion - 12,5 T de Cuivre particulaire, valeur calculée sur la base d'une expulsion de  $0,5 \cdot 10^6$  T/an de suspensions présentant une teneur moyenne en Cuivre de 25 ppm. Valeur moyenne établie sur 3 ans de prélèvements mensuels au point 2 du RNO (PK 96).

- Cuivre dissous -

Les analyses des teneurs en Cuivre dissous à l'embouchure en 1976 n'ayant pas été réalisées de la même façon que les années suivantes (échantillon d'eau moyen à partir de plusieurs prélèvements de salinité différents), nous ne les avons pas retenu et nous avons utilisé la valeur moyenne en Cuivre dissous établie en 1977, ce qui amènerait à une expulsion de Cuivre dissous de l'ordre de 150 Tonnes.



Ainsi donc le bilan du Cuivre en 1976 serait de la forme :

Apports	-	Dépôt	=	Expulsions
90 à 97 T		30 T		60 à 67 T théoriques
				162,5 T mesurées

Pour le Cuivre également, il y a donc eu déficit des apports par rapports aux expulsions, ce déficit de l'ordre d'une centaine de tonnes a pu être compensé par des mobilisations du Cuivre à partir du stock estuarien. Il est probable également que, comme pour le Zinc, des apports supplémentaires interviennent entre la limite amont de l'estuaire et l'embouchure.

Le bilan quantitatif du Cuivre sur la base de nos observations se schématiserait en 1976 de la façon suivante :

Dordogne	4 à 5 T de Cup 27 T de Cud	Estuaire 28 T Cud 170 T Cup	Expulsion 12,5 T Cup 150 T Cud
Garonne	19 à 25 T de Cup 40 T de Cud		
		Sédimentation 30 T Cup	

I-3. Le Plomb en 1976.

- Apports dans l'estuaire en 1976 : 152 T dont 61 T en solution et 91 T de Plomb particulaire.

- Expulsions.

\* 21,5 T de Plomb sous forme particulaire, valeur établie sur la base d'une expulsion moyenne annuelle de  $0,5 \cdot 10^6$  T de sédiments présentant une teneur moyenne en Plomb particulaire de 43 ppm. 43 ppm moyenne des teneurs en Plomb particulaire dans les suspensions de l'embouchure (point 2 du RNO) prélevées mensuellement sur 3 ans à 2 niveaux.

Nous n'avons pas retenu les valeurs en Plomb particulaire mesurées au point 5 du RNO car en ce point plus marin, les teneurs en Plomb sont plus élevées qu'à l'embouchure proprement dite. Cette augmentation locale proviendrait (VIGNEAUX et al., 1978, rapport RNO) d'une refixation d'une partie du Plomb dissous par la matière organique marine.

\* 70,5 T de Plomb sous forme dissoute, valeur établie à partir des mesures au PK 96 (point 2. du réseau) effectuées mensuellement à deux niveaux.

Ainsi donc le bilan du Plomb en 1976 serait de la forme :

Apports	-	Dépot	=	Expulsions
152 T		70 T		82 T théoriques
				92 T mesurées

Aux erreurs d'approximation près, on peut donc penser qu'en 1976 en ce qui concerne le Plomb le bilan quantitatif est pratiquement en équilibre. Il est probable qu'il y a eu toute fois un léger déficit qui a pu être compensé aisément au niveau du stock estuarien.

Le bilan quantitatif du Plomb en 1976 se présenterait donc comme suit :

Dordogne	36,4 T Pbp	Estuaire	Expulsions
	31 T Pbd	240 T Pbp	21,5 T Pbp
		54 T Pbd	70,5 T Pbd
Garonne	54,6 T Pbp		
	30 T Pbd		
		Sédimentation	
		70 T Pbp	

II - Année 1977.

Les mêmes types de bilans quantitatifs du Zinc, du Cuivre et du Plomb, dans le système estuarien de la Gironde ont été envisagés à partir des données 1977 selon la même méthodologie. Seul le calcul des apports de la Dordogne a présenté quelques difficultés dans la mesure où nous n'avons disposé que d'un faible nombre de prélèvements pendant l'année ; aussi nous avons dû nous livrer à des extrapolations à partir des données de l'année précédente, mais en raison de la moins grande variabilité des teneurs en particulaire et en dissous, des apports de ce fleuve par rapport à la Garonne, ces extrapolations semblent satisfaisantes même si elles ne doivent être considérées que comme des ordres de grandeur.

II-1. Le Zinc en 1977.

- Les apports fluviaux ont représenté environ 634 T de Zinc dont 452 T en Zinc particulaire et 183 T en Zinc dissous.

- Les expulsions.

La résolution de l'équation théorique du bilan amènerait à une expulsion en Zinc de :

$$634 \text{ T} - 330 \text{ T} = 334 \text{ T de Zinc}$$

Là encore, les mesures faites à l'embouchure montrent que les expulsions ont été plus importantes. En effet, même si nous retenons, en raison de la faiblesse relative des débits solides et liquides, l'hypothèse que  $0,5 \cdot 10^6$  T de sédiments ont été expulsés en suspension avec une teneur moyenne de 200 ppm, cela représenterait environ 100 Tonnes de Zinc particulaire et il n'y aurait eu que 224 Tonnes de Zinc expulsées sous forme dissoute.

Or, les estimations des flux de Zinc dissous établies à partir des mesures réalisées mensuellement à l'embouchure (PK 96 - point 2 du RNO) amènent à penser que 1480 T de Zinc ont été évacuées sous forme dissoute en 1977.

Si l'on estime ce flux total dissous non plus comme la somme des flux mensuels mais comme le produit du débit liquide annuel de la Gironde par la teneur moyenne en Zinc dissous au PK 96, cette estimation est de 1230 T ce qui n'est pas significativement différent.

Ainsi donc, en 1977, il s'est encore produit un déficit des apports en Zinc par rapport aux expulsions, déficit compris entre 1000 et 1245 Tonnes environ, ce qui laisse penser que cette année là encore il y a eu consommation en Zinc du stock estuarien qui a joué un rôle de régulateur dans l'équilibre du bilan. On ne doit toutefois pas négliger le fait que les apports en Zinc ont pu être sous-estimés, et qu'il existe des apports métalliques dans l'estuaire en aval des points de référence amont ; La Réole et Pessac sur Dordogne.

Le bilan du Zinc en 1977 se schématiserait ainsi :

Dordogne	90,6 T Znp 55,2 T Znd	Estuaire 1100 à 1300 T Znp 285 T Znd	Expulsions 100 T Znp 1230 à 1480 T Znd
Garonne	361,4 T Znp 126,4 T Znd	Sédimentation 330 T Znp	

## II-2. Le Cuivre en 1977.

- Les apports fluviaux dans l'estuaire ont représenté environ 140 T dont 90 T de Cuivre dissous et 50 T de Cuivre lié à la phase particulaire.

- Les expulsions.

La résolution de l'équation d'équilibre du bilan amènerait à considérer que :  $140 \text{ T} - 30 \text{ T} = 110 \text{ T}$  de Cuivre ont été expulsées de l'estuaire.

Or, on peut estimer que les expulsions de Cuivre particulaire ont été de :  $0,5 \cdot 10^6 \text{ T} \times 25 \text{ ppm}$  (moyenne sur 3 ans de prélèvements mensuels au PK 96) = 12,5 T. Les expulsions de Cuivre sous forme dissoute seraient donc de 97,5 Tonnes.

Ceci est en désaccord très net avec les estimations de flux en Cuivre dissous réalisées à partir des mesures au PK 96, corrections faites de la dilution et de la teneur océanique moyenne ( $3 \mu\text{g/l}$ , GOLDBERG, 1963-1965) qui amènent à une valeur de 1390 Tonnes de Cuivre dissous.

Il faut, toutefois, remarquer que cette valeur très élevée est due essentiellement aux estimations des flux des mois de Mai (712 Tonnes) et de Novembre (354 Tonnes), caractérisés par des teneurs en Cu dissous particulièrement fortes ( $170$  et  $329 \mu\text{g/l}$ ). Si par contre on estime le flux de Cuivre dissous expulsé à partir des teneurs moyennes en Cuivre dissous ( $22,2 \mu\text{g/l}$ ) abstraction faite de ces deux valeurs élevées et du débit liquide total, ce flux de Cuivre dissous serait de 620 Tonnes.

Il n'en demeure pas moins que le bilan 1977 du Cuivre présente un déficit très important, dû essentiellement aux expulsions sous forme dissoute.

Ce bilan peut être schématisé de la façon suivante :

Dordogne	37,8 T Cud 14,7 T Cup	Estuaire 170 T Cup 28,2 T Cud	Expulsions 12,5 T Cup 620 à 1390 T Cud
Garonne	52 T Cud 35,6 T Cup		
		Sédimentation 30 T Cup	

### II-3. Le Plomb en 1977.

- Les apports de Plomb dans l'estuaire ont représenté environ 203 Tonnes dont 136,5 Tonnes de Plomb liées à la phase particulaire et 66,5 Tonnes de Plomb dissous.

- Les expulsions.

La résolution de l'équation du bilan amènerait à considérer que :  
 $203 \text{ T} - 70 \text{ T} = 133 \text{ Tonnes de Plomb}$  ont pu être expulsées de l'estuaire.

Les expulsions de Plomb sous forme particulaire représenteraient  $0,5 \cdot 10^6 \text{ Tonnes} \times 43 \text{ ppm}$  (cf. Paragraphe Plomb en 1976) = 21,5 Tonnes. Les expulsions de Plomb sous forme dissoute représenteraient  $133 - 21,5 = 111,5 \text{ Tonnes}$ .

Cette valeur est en accord avec celle établie à partir des calculs des flux mensuels au PK 96 qui amènent à une expulsion de 112 Tonnes sous forme dissoute.

On doit toutefois souligner que cette valeur est en grande partie due au flux de Plomb dissous du mois de Mai 1977 (86 Tonnes). Si on fait abstraction de cette valeur forte et que l'on estime le flux dissous expulsé à partir du débit liquide total et de la teneur moyenne en Plomb dissous ( $1 \mu\text{g}/\text{l}$ ), on obtient 29 Tonnes seulement.

Il semble donc qu'en 1977 à l'opposé de ce qui se passe pour le Zinc et le Cuivre, il y ait eu stockage de Plomb dans l'estuaire ou tout du moins équilibre du bilan massique.

Ce bilan est schématisé ci-dessous :

Dordogne	88,5 T Pbp 38,5 T Pbd	Estuaire 240 T Pbp 54 T Pbd	Expulsions 21,5 T Pbp 112 à 29 T Pbd
Garonne	48 T Pbp 28 T Pbd		
		Sédimentation 70 T Pbp	

### III - Année 1978.

En 1978, nous n'avons pas bénéficié d'un échantillonnage aussi complet que les années précédentes. C'est ainsi que nous n'avons pas de données sur les apports de la Dordogne et que, en ce qui concerne la Garonne, les analyses en métaux dissous manquent.

Néanmoins en utilisant les enseignements des bilans antérieurs et les valeurs moyennes obtenues en 1976 et 1977, il nous est apparu qu'il était possible de proposer un bilan quantitatif significatif du Zinc, du Cuivre et du Plomb, dans le système estuarien de la Gironde.

- Données géochimiques moyennes acquises en 1976 et 1977 et utilisées pour l'établissement des bilans 1978.

Garonne : Teneur moyenne en Zn dissous : 11,3  $\mu\text{g/l}$   
Teneur moyenne en Cu dissous : 3,7  $\mu\text{g/l}$   
Teneur moyenne en Pb dissous : 1,7  $\mu\text{g/l}$

Dordogne : Teneur moyenne en Zn dissous : 4,3  $\mu\text{g/l}$   
Teneur moyenne en Cu dissous : 2,95  $\mu\text{g/l}$   
Teneur moyenne en Pb dissous : 3,6  $\mu\text{g/l}$

Teneur moyenne en Zn particulaire : 300 ppm  
Teneur moyenne en Cu particulaire : 49 ppm  
Teneur moyenne en Pb particulaire : 295 ppm

#### III-1. Le Zinc en 1978.

- Les apports en Zinc auraient représenté 1758 Tonnes dont 1525 Tonnes de Zinc liées à la phase particulaire et 233 Tonnes de Zinc dissous.

- Les expulsions.

La résolution de l'équation d'équilibre des flux amène à estimer que les expulsions se sont montées à : 1758 T - 330 T = 1428 Tonnes au total.

En raison de l'importance des apports solides en suspension dans l'estuaire due à la fréquence des crues et afin de garder un bilan massique des sédiments à peu près équilibré, nous estimons que  $1.10^6$  Tonnes de sédiments en suspension ont quitté l'estuaire en 1978, soit le double des années précédentes. Ceci nous

amène à estimer que les expulsions de Zinc sous forme particulaire ont alors représenté 200 Tonnes.

1228 Tonnes de Zinc seraient donc sorties de l'estuaire sous forme dissoute. Cette valeur est de l'ordre de grandeur de celle que l'on a pu établir à partir des analyses en Zinc dissous à l'embouchure (selon la même méthodologie que les années précédentes) et qui amène à une estimation de 1410 Tonnes de Zinc dissous ayant quitté l'estuaire.

Ainsi donc en 1978, le bilan massique du Zinc en Gironde aurait été pratiquement équilibré.

Ce bilan est schématisé ci-dessous :

Dordogne	225 T Znp 46,7 T Znd	Estuaire	1100 à 1300 T Znp 285 T Znd	Expulsions	200 T Znp 1410 T Znd
Garonne	1300 T ZnP 186,5 T Znd				
		Sédimentation	330 T Znp		

II-2. Le Cuivre en 1978.

- Les apports en Cuivre représenteraient environ 353 Tonnes
- Les expulsions.

Théoriquement, les expulsions auraient représenté 353 T - 30 T = 323 Tonnes.

En fait, il est possible d'estimer les expulsions en Cuivre particulaire à  $1.10^6$  T x 25 ppm = 25 Tonnes. Les expulsions en Cuivre dissous peuvent être estimées à partir des analyses en Cuivre dissous au PK 96, elles se monteraient à 342 Tonnes sur la base de la somme des flux calculés mensuellement, encore faut-il noter que le mois de Mai contribue pour 89 Tonnes à ce total.

Il n'en demeure pas moins que expulsions théoriques et expulsions estimées à partir des données hydrosédimentaires et géochimiques sont du même ordre de grandeur et qu'il apparaît en 1978 que le bilan du Cuivre comme celui du Zinc a été pratiquement en équilibre.

Le bilan massique est représenté ci-dessous :

Dordogne	36,7 T Cup 32 T Cud	Estuaire 170 T Cup 28 T Cud	Expulsions 25 T Cup 342 T Cud
Garonne	223,5 T Cup 61 T Cud		
		Sédimentation 30 T	

III-3. Le Plomb en 1978.

- Les apports peuvent être estimés à 673 Tonnes.

- Les expulsions.

L'équation d'équilibre montre que :

$673 \text{ T} - 70 \text{ T} = 603 \text{ Tonnes}$  de Plomb pourraient avoir quitté l'estuaire en 1978. On peut avancer effectivement que : 43 Tonnes de Plomb auraient quitté l'estuaire sous forme particulaire et 33 Tonnes sous forme dissoute ; ce qui amènerait à une expulsion totale de 76 Tonnes seulement.

La comparaison de ces deux valeurs : 603 T et 76 T laisse penser qu'en 1978 il y a eu un stockage d'environ 527 Tonnes de Plomb, ce qui est considérable.

Le bilan massique du Plomb peut être schématisé comme suit :

Dordogne	39 T Pbd 221 T Pbp	Estuaire 240 T Pbp 54 T Pbd	Expulsions 43 T Pbp 33 T Pbd
Garonne	28 T Pbd 385 T Pbp		
		Sédimentation 70 T Pbp	

IV - Propositions de bilans quantitatifs en Gironde en année moyenne.

En s'appuyant sur les prélèvements et les analyses de 1976 - 1977 - 1978, nous avons été tentés de proposer des bilans quantitatifs du Zinc, du Cuivre, du Plomb dans le système estuarien girondin en conditions hydrosédimentaires moyennes, c'est-à-dire avec des débits liquides moyens de la Garonne de 444 m<sup>3</sup>/s et de la Dordogne de 322 m<sup>3</sup>/s (moyenne calculée sur la période 1961 - 1970, ALLEN, 1972), et avec des apports solides en suspension de  $2,5 \cdot 10^6 \text{ T/an}$  (MIGNIOT, 1971), répartis en  $1,8 \cdot 10^6 \text{ T}$  pour les apports solides de la Garonne et de  $0,7 \cdot 10^6 \text{ T}$  pour ceux de la Dordogne.



- Les apports.

Les apports moyens suivants peuvent être alors avancés :

Garonne :	Zn particulaire :	1350 T	moyenne :	750 ppm
	Zn dissous :	158 T	moyenne :	11,3 µg/l
	Cu particulaire :	92 T	moyenne :	51 ppm
	Cu dissous :	52 T	moyenne :	3,7 µg/l
	Pb particulaire :	360 T	moyenne :	200 ppm
	Pb dissous :	24 T	moyenne :	1,7 µg/l
Dordogne :	Zn particulaire :	212 T	moyenne :	300 ppm
	Zn dissous :	44 T	moyenne :	4,3 µg/l
	Cu particulaire :	34 T	moyenne :	49 ppm
	Cu dissous :	30 T	moyenne :	2,95 µg/l
	Pb particulaire :	206 T	moyenne :	295 ppm
	Pb dissous :	37 T	moyenne :	3,6 µg/l

A l'examen de ces chiffres, on peut remarquer :

- d'une part que le Zinc et le Plomb arrivent dans l'estuaire essentiellement sous forme particulaire, en ce qui concerne le Cuivre, les deux formes d'apports sont mieux réparties.

- d'autre part que la Garonne apporte environ 6 fois plus de Zinc que la Dordogne, un peu plus de 2 fois plus de Cuivre et seulement 1,4 fois plus de Plomb que la Dordogne qui proportionnellement à sa charge solide est plus riche en cet élément.

IV-1. Le Zinc en année moyenne.

Les expulsions en Zinc de l'estuaire seraient en année moyenne de :

Apports	-	Dépôts	=	Expulsions
1764	-	330	=	1434 Tonnes

Ces 1434 Tonnes de Zinc expulsé se répartissent en 200 Tonnes de Zinc particulaire sur la base vraisemblable d'une expulsion de 1.10<sup>6</sup> T de sédiments en suspension par an et de 1234 T de Zinc dissous, ce qui correspondrait à une teneur moyenne en Zinc dissous à l'embouchure de 51 µg/l, valeur effectivement de l'ordre de grandeur de celles mesurées à l'embouchure (la moyenne sur 3 ans étant de 80 µg/l environ, mais il existe des fluctuations d'un mois sur l'autre très importantes).

Le schéma quantitatif suivant peut être proposé :

Dordogne	44 T Znd 212 T Znp	Estuaire	1100 à 1300 T Znp 280 T Znd	Expulsions	200 T Znp 1234 T Znd
Garonne	158 T Znd 1350 T Znp				
			330 T Znp dépôt		

Ainsi donc, en année moyenne, le bilan du Zinc serait pratiquement à l'équilibre, il sortirait effectivement de l'estuaire la quantité de Zinc entrant à l'amont moins une quantité à peu près constante de 330 T piégée par sédimentation. Le stock estuarien ne joue qu'un rôle de volant régulateur et correspond à environ 1 an d'apport en Zinc.

Il est intéressant de remarquer :

- d'une part, que sur une masse de plus de 1700 T de Zinc entrant dans l'estuaire en provenance des fleuves, seule une faible fraction 330 T reste dans l'estuaire.
- d'autre part, que si dans les apports, le rapport Znd/Znp est de l'ordre de 0,13 à la sortie, ce même rapport est de 6,15 soit donc une augmentation d'un facteur > 47.

IV-2. Le Cuivre en année moyenne.

Les expulsions en Cuivre seraient en année moyenne de :

Apports	-	Dépôts	=	Expulsions
208	-	30	=	178 Tonnes de Cuivre

Sur les 178 Tonnes de Cuivre expulsées, 25 Tonnes le seraient sous forme particulière, sur la base d'une sortie de  $1.10^6$  T de sédiments à 25 ppm de Cu.

153 Tonnes de Cuivre seraient expulsées sous forme dissoute. Cette valeur est de l'ordre de grandeur de celle calculée en 1976, mais est nettement inférieure à celle de 1977 et même de 1978 (342 T). Ceci pose un problème ; en dépit du fait que les chiffres proposés dans ces bilans ne doivent être pris que comme des ordres de grandeur des phénomènes et qu'une approximation de phénomènes naturels avec un facteur 2 ou 3 est encore satisfaisante, on peut penser qu'il existe des sources supplémentaires de Cuivre dans l'estuaire de la Gironde en dehors des apports mesurés

à l'amont. Le traitement du vignoble bordelais avec des produits à base de sulfate de Cuivre est peut-être cette source supplémentaire de Cuivre que l'on retrouve à l'embouchure \* ?

Le bilan du Cuivre en année moyenne se schématiserait ainsi :

Dordogne	30 T Cud 34 T Cup	Estuaire 170 T Cup 28 T Cud	Expulsions 25 T Cup 153 T Cud (théoriques) 300 à 400 T Cud (estimées)
Garonne	52 T Cud 92 T Cup		
		Dépôt 30 T Cup	

Ainsi donc en année moyenne, il y aurait un déficit des apports connus en Cuivre par rapport aux expulsions présumées. Ce déficit porterait essentiellement sur le stock dissous. Une partie de ce déficit pourrait être compensé par une consommation sur le stock estuarien qui correspond à environ 1 an d'apports en Cuivre mais il est plus probable que d'autres sources de Cuivre existent dans le système girondin.

#### IV-3. Le Plomb en année moyenne.

Les expulsions de Plomb en année moyenne seraient de :

Apports	-	Dépôts	=	Expulsions
627	-	70	=	557 T

Sur ces 557 Tonnes de Plomb, on peut estimer que seulement 43 Tonnes sont évacuées sous forme particulaire ( $1.10^6$  T x 43 ppm).

514 Tonnes seraient donc expulsées sous forme dissoute. Cette valeur est très supérieure à celles estimées à partir des mesures en Plomb dissous au PK 96 en 1976 - 1977 et 1978, qui sont comprises entre 33 et 112 Tonnes seulement.

---

\* Les données théoriques montrent que dans les sols le Cuivre ne devient mobilisable sous forme soluble que pour des valeurs de pH inférieures à 5. De telles valeurs n'étant qu'exceptionnellement observées dans le vignoble girondin, il semblerait que, si des apports de ce type se produisent effectivement dans l'estuaire, ils ne peuvent se produire que sous forme particulaire, le Cuivre étant alors associé à des matériaux solides détritiques, et s'en libérant ultérieurement dans l'estuaire lui-même.

Plus de 400 Tonnes de Plomb ne se retrouvent donc pas sous forme dissoute à la sortie du système. Deux hypothèses peuvent être avancées pour expliquer cette situation :

- d'une part en année moyenne il y a un stockage important du Plomb dans la masse des sédiments estuariens.

- d'autre part, une grande partie du Plomb dissous dans l'estuaire est refixée par les particules d'origine marine, nous pensons essentiellement à la matière organique vivante, plancton marin, qui n'est pas comptabilisée dans le bilan. Nous ne prenons en effet en compte comme expulsion sous forme particulière que le  $1.10^6$  T de sédiments d'origine continentale qui est effectivement expulsé et non la masse planctonique marine présente à l'embouchure.

Cette dernière hypothèse s'appuie sur deux observations importantes :

-d'une part, on sait (ETCHEBER, 1978) que les teneurs en Plomb particulaire décroissent d'amont en aval dans l'estuaire de la Gironde, ce qui étaye la possibilité d'une mise en solution.

-d'autre part, les teneurs en Plomb dissous sont plus importantes dans le centre de l'estuaire qu'à l'amont du système ; ces teneurs à l'amont étant elles-mêmes plus élevées en général que les teneurs mesurées à l'aval (PK 96).

On sait d'autre part (ETCHEBER et al., 1977) que les teneurs en Plomb particulaire augmentent très sensiblement (+ 40 ppm) au point le plus marin et donc le plus externe du RNO (point 5) par rapport à l'embouchure proprement dite. Ces observations vont donc bien dans le sens d'une refixation du Plomb dissous à l'embouchure.

Le bilan quantitatif du Plomb en année moyenne se schématiserait ainsi :

Dordogne	37 T Pbd 206 T Pbp	Estuaire 240 T Pbp 54 T Pbd	Expulsions 43 T Pbp 514 T Pbd
Garonne	24 T Pbd 360 T Pbp		
		Sédimentation 70 T Pbp	

On remarquera que le Plomb arrive essentiellement sous forme particulière dans l'estuaire, le rapport Pbd/Pbp étant de 0,11 dans les apports. Par contre, à l'embouchure (si on ne tient pas compte des refixations sur la phase particulaire d'origine marine) ce rapport passe à 12 environ.

### C - CONCLUSIONS.

La réalisation de ces différents bilans quantitatifs n'a été rendue possible en Gironde qu'en raison d'une bonne connaissance acquise antérieurement, concernant les processus hydrosédimentaires. Elle s'appuie par ailleurs sur une densité d'échantillons et d'analyses rarement atteinte dans d'autres systèmes estuariens, puisque les observations portent sur 3 ans et sont régulièrement réparties dans tout le système fluvio-estuarien girondin, c'est-à-dire sur près de 200 Km, reconnues pratiquement mensuellement.

Il n'en demeure pas moins que les valeurs proposées ne permettent d'obtenir qu'un ordre de grandeur des phénomènes et ne doivent pas être considérées sans réflexion en tant que valeurs absolues.

En dépit de ces imprécisions, ces bilans apportent des informations très importantes sur les flux de métaux dans un système estuarien de région tempérée, et permettent de ce fait de préciser les connaissances sur le comportement de ces métaux et sur l'évolution probable des systèmes estuariens soumis aux nuisances d'origine industrielle. L'intérêt supplémentaire de cette étude tient enfin au fait que la Gironde consitue l'un des tous derniers exemple d'estuaire de la zone tempérée encore peu perturbé, permettant ainsi de mieux apprécier les mécanismes présidant à la répartition des métaux dans les interfaces eau douce/eau salée. Cette étude débouche enfin sur un certain nombre de questions :

- Pourquoi Zinc, Cuivre et Plomb ne présentent pas les mêmes types de bilans en année moyenne ?

- Y a-t-il des apports latéraux au niveau de l'estuaire ?

- Quel est le rôle de Bordeaux et de son agglomération dans les apports métalliques ? En regard de ces bilans pour le Zinc et le Plomb, cet apport semble à première vue assez faible.

- Quelle est l'importance des phénomènes de passage d'une phase à une autre, et en particulier, quelle est l'importance du passage Plomb dissous-Plomb particulaire à l'embouchure ?

L'établissement de tels bilans quantitatifs dans la mesure où ils pourront être affinés, doit pouvoir permettre de préciser dans les estuaires :

- le temps de recyclage des métaux,
- les parts relatives des apports naturels et des apports artificiels et donc l'impact d'une pollution métallique.

Ils permettent enfin de préciser l'importance et la qualité des flux de métaux d'origine continentale à l'océan.

BIBLIOGRAPHIE

---

ALLEN G.P., 1972

Etude des processus sédimentaires dans l'estuaire de la Gironde.

Thèse Doct. es Sc. Univ. Bordeaux I n° 353, 314 p., 134 fig.

ALLEN G.P., BONNEFILLE R., COURTOIS G., MIGNIOT C., 1974

Processus de sédimentation des vases dans l'estuaire de la Gironde. Contribution d'un traceur radioactif pour l'étude du déplacement des vases.

La Houille Blanche n°1/2, Grenoble, p. 129-136.

ETCHEBER H., JOUANNEAU J.M., LATOUCHE C., 1977

Teneurs en Zn, Pb, Cu, Ni des suspensions de l'estuaire de la Gironde. Evolution amont-aval de Novembre 1975 à Août 1976.

Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine, Bordeaux n° 22, p. 123-137, 5 fig.

ETCHEBER H., 1978

Etude de la répartition et du comportement de quelques oligo-éléments métalliques (Zn, Pb, Cu, Ni) dans le complexe fluvio-estuarien de la Gironde.

Thèse de 3e cycle, Univ. Bordeaux I n° 1455, 2 t., 169 p., 49 fig., 46 tabl.

GOLDBERG E.D., 1963

"The oceans as a chemical system" in M.N. Hill, ed., the sea

Interscience, New York, vol. 2, chap. 1.

GOLDBERG E.D., 1965

"Minor elements in sea water" in J.P. Riley and G. Shirrows ed.

Chemical Oceanography, Academic Press, London, vol. 1, chap. 5.

JOUANNEAU J.M., 1979

Evaluation du volume et de la masse de matières en suspension dans le système bouchon vaseux-crème de vase de la Gironde.

Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine n° 25, à paraître.

JOUANNEAU J.M., LATOUCHE C., 1977

Etude de la prévention de la pollution de l'estuaire et de l'embouchure de la Gironde.

Rapport Contrat IGBA/PAB, 98 p.

MIGNIOT C., 1971

L'évolution de la Gironde au cours des temps.

Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine, Bordeaux n° 11, p. 221-281.

MOYES J., ETCHEBER H., JOUANNEAU J.M., LATOUCHE C., 1978

Etude du transfert des polluants métalliques en milieu estuarien.

Rapport Contrat IGBA/CNEXO, études du 1/3/77 au 1/3/78, 38 p.

SAUZAY G., JEANNEAU B., GOURLEZ P., 1975

Etude des transferts sédimentaires en estuaire. Utilisation de traceurs radioactifs. Gironde, Mai à Novembre 1974 (TRAVAGIR).

Rapport DCA/SAPRA C.E.N. Saclay, 89 p.

VIGNEAUX M., JOUANNEAU J.M., LAPAQUELLERIE Y., LATOUCHE C., PHILLIPS I,  
PONS J.C., 1978

R.N.O. Interprétation des données du point d'appui n° 4 portant sur l'hydrobiologie, la pollution et les traitements statistiques. (1 Novembre 1977 - 31 Octobre 1978).

Rapport Contrat IGBA/CNEXO, 75 p.

WOLLAST R., 1972

Circulation, accumulation et bilan de masse dans l'estuaire de l'Escaut.  
Programme National sur l'environnement physique et biologique. Pollution des eaux.

Rapport de Synthèse, tome II, ch. V, p. 231-264.