

DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT ET DES RECHERCHES OCEANIQUES

IMPACT DU BARRAGE D'ARZAL SUR LA QUALITE DES EAUX DE L'ESTUAIRE ET DE LA BAIE DE LA VILAINE

Michel MERCERON

Dépt. Environnement Littoral



IFREMER - Centre de BREST (SDP)
BP. 337 - 29273 BREST CEDEX
Tél. 98.45.80.55 - Télex 940627 F

DERO - 85 . 06 - EL

IFREMER
 Centre de BREST
 S.D.P.
 B.P. 337
 29273 BREST CEDEX
 Tél. : 98.45.80.55
 Téléx 940 627

DIRECTION ENVIRONNEMENT
 ET RECHERCHES OCEANIQUES

DEPARTEMENT ENVIRONNEMENT LITTORAL

AUTEUR(S) : M. MERCERON		CODE : N° <u>DERO-85.06-EL</u>
TITRE IMPACT DU BARRAGE D'ARZAL SUR LA QUALITE DES EAUX DE L'ESTUAIRE ET DE LA BAIE DE LA VILAINE		Date : Novembre 85 Tirage nb : 80 Nb pages : 31 Nb figures : 9 Nb photos : 1
CONTRAT (intitulé) N° _____		DIFFUSION Libre X Restreinte Confidentielle
<p><u>RESUME</u> La présence du barrage d'Arzal sur l'estuaire de la Vilaine a pour conséquence l'aggravation d'une situation récurrente d'hypoxie estivale des eaux de fond dans la baie de la Vilaine.</p> <p>ABSTRACT The Arzal dam upon the Vilaine estuary provokes an aggravation of a recurrent summer hypoxia of the bottom waters in the bay of Vilaine.</p>		
Mots-clés : Anoxie, barrage, estuaire, zone côtière, salinité, matières en suspension		
Key words : Oxygen depletion, dam estuary, coastal zone, salinity, suspended sediments		



Ifremer Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer

IMPACT DU BARRAGE D'ARZAL
SUR LA QUALITE DES EAUX DE
L'ESTUAIRE ET DE LA BAIE
DE LA VILAINE

IFREMER - DERO/EL

M. MERCERON

1985

SOMMAIRE

	Page
AVANT-PROPOS	1
RESUME	2
I - INTRODUCTION	3
II - SITE ET METHODES	6
1 - Site	6
2 - Echantillonnage	8
3 - Dosages	11
III - RESULTATS ET DISCUSSIONS	11
1 - <u>Salinité</u>	11
. Résultats	11
. Stratification haline	13
. Temps de résidence moyen de l'eau douce en estuaire	15
. Conséquences	17
2 - <u>Matières en suspension</u>	18
. Nos résultats	20
. Résultats de MAILLOCHEAU	20
. Résultats du L.C.H.F.	22
. Conséquences	23
3 - <u>Courants</u>	24
IV - CONCLUSION	26
BIBLIOGRAPHIE	30

AVANT - PROPOS

Suite à des mortalités massives de poissons survenues dans la baie de Vilaine durant l'été 1982, il a été lancé en 1983 une série de travaux scientifiques destinés à comprendre les mécanismes et les causes du phénomène et, dans la mesure du possible, à proposer des mesures visant à en prévenir le retour. Depuis lors, l'apparition plus ou moins régulière dans cette zone de l'espèce phytoplanctonique Dinophysis acuminata, responsable d'intoxications diarrhéiques par l'intermédiaire des moules, a conduit à élargir le champ des investigations.

Les travaux ont été financés initialement par le Secrétariat d'Etat à la Mer, auquel d'autres partenaires se sont joints depuis lors (Secrétariat d'Etat à l'Environnement, Agence Financière de Bassin Loire-Bretagne, Etablissements Publics Régionaux de Bretagne et des Pays de Loire, Conseils Généraux du Morbihan et de Loire Atlantique). La coordination des travaux a été confiée à l'Association Halieutique du Mor Bras qui a été créée à cette occasion.

De par sa mission, l'IFREMER était directement concerné par les événements précités, et il a été amené à autofinancer la plus grande partie des travaux qu'il a effectués. C'est le cas du présent travail qui représente une part de sa contribution au problème de la qualité des eaux de la baie de Vilaine.

RESUME

Dans l'estuaire de la Vilaine, un barrage a été érigé en 1970 à Arzal, pour empêcher la remontée des eaux marines vers l'amont. Durant l'été 1982, une mortalité massive de poissons est advenue dans la zone côtière située en aval, la baie de Vilaine. Cette mortalité a été provoquée par une anoxie des eaux de fond. L'IFREMER a effectué en 1984 des mesures de salinité et de matières en suspension dans l'estuaire et dans la baie de Vilaine. Ces données sont comparées à celles acquises par le Laboratoire Central d'Hydraulique de France, antérieurement à la construction du barrage.

Il apparait que l'existence du barrage d'Arzal a pour conséquence en baie de Vilaine, l'aggravation chronique d'une situation d'hypoxie estivale des eaux de fond, qui était probablement préexistante. Par rapport à la situation antérieure, la présence du barrage induit dans l'estuaire résiduel :

- un abattement de la vitesse des courants de marée,
- une forte diminution du temps de résidence de l'eau douce,
- une très forte diminution du bouchon vaseux.

Ces processus contribuent à déplacer la consommation d'oxygène de l'estuaire vers les eaux de fond de la baie ; ils contribuent en outre à y diminuer les possibilités de réapprovisionnement en oxygène à partir des eaux superficielles. Bien que la construction du barrage d'Arzal ne soit pas la seule cause de la mortalité de poissons observée en 1982, elle y a contribué.



Le barrage d'Arzal peu après sa construction, vu de l'aval.
De gauche à droite, l'écluse, les cinq pertuis de vidange
et le terre-plein.

I - INTRODUCTION

L'implantation d'un barrage dans un estuaire est susceptible de répondre à des buts différents : production d'électricité (Rance, baie de Fundy) ou création d'une réserve d'eau douce nécessaire à l'approvisionnement de la population, comme le projet de barrage de la Nakdong (Corée du Sud) destiné à alimenter Busan (VAN SLUIS et LIJKLEMA, 1984) ; mais plus souvent il s'agit de défendre des terres basses contre les inondations. En Hollande, le barrage du Zuiderzee, et la série de plans d'eau créés par le compartimentage du complexe deltaïque de l'Escaut, de la Meuse et du Rhin (Plan Delta) en sont des exemples d'une dimension exceptionnelle. Le barrage d'Arzal sur l'estuaire de la Vilaine (Figure 1) appartient à ce type, mais sa taille beaucoup moins importante est plus proche des projets qui ont pu être envisagés ailleurs en Bretagne.

Si les conséquences de l'érection du barrage d'Arzal ont été positives à son amont et conformes aux prévisions, il est apparu une douzaine d'années après son achèvement plusieurs problèmes d'ordre écologique et halieutique dans la zone côtière adjacente la baie de Vilaine (mortalité estivale de poissons benthiques, apparition récurrente d'une espèce phytoplanctonique toxique, Dinophysis acuminata). Pour expliquer ces phénomènes, le public a souvent mis en cause l'influence du barrage, et il était nécessaire d'examiner cette question d'un point de vue scientifique. D'autre part, des projets de barrage estuarien ont parfois été envisagés dans d'autres sites français. Il était donc particulièrement intéressant de connaître objectivement l'impact de ce type d'ouvrage sur l'estuaire concerné et sur la zone côtière proche.

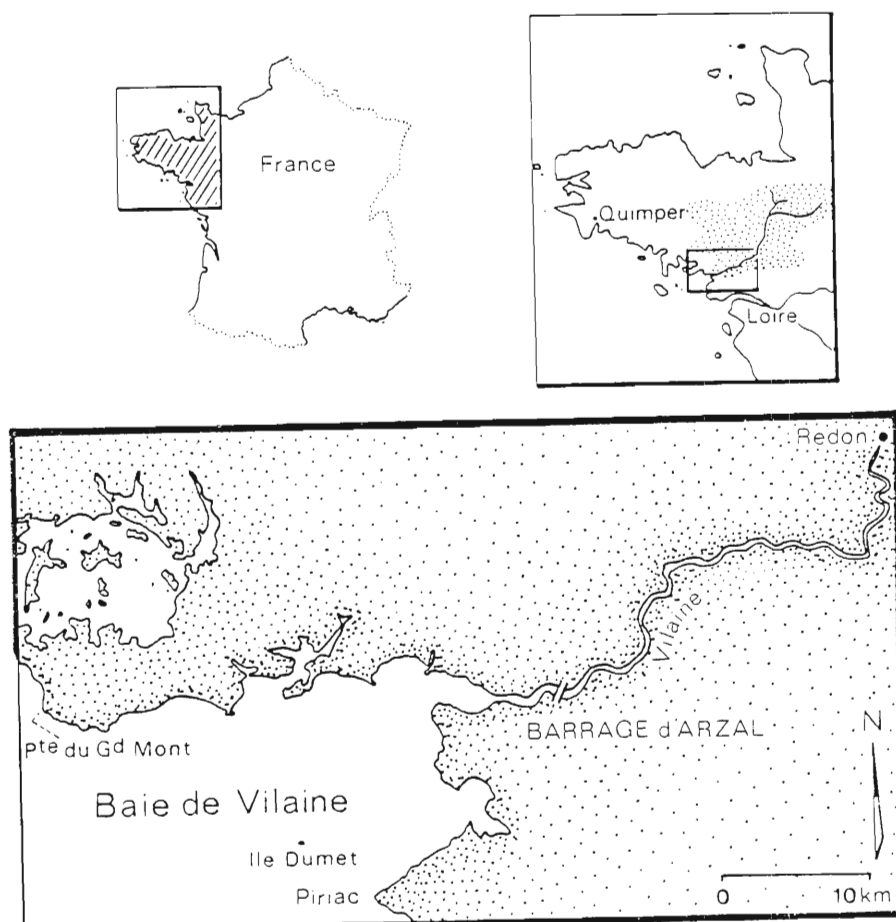


Figure n° 1 : Situation de la Vilaine, de son estuaire et de la baie de Vilaine

L'édification du barrage d'Arzal a été terminée en 1970. Le but initial et primordial était de soustraire certains quartiers de la ville de Redon à 50 km de l'embouchure et d'importants marais voisins, à des inondations répétées, provoquées par la conjonction de crues de la Vilaine avec des niveaux marins élevés (pleines mers de vive-eau). En empêchant les eaux marines de remonter dans l'estuaire, le barrage a effectivement permis d'éviter le retour de ces inondations. Par ailleurs, il a permis la construction d'une réserve d'eau douce importante permettant d'approvisionner en eau potable l'afflux estival de population touristique dans la région. Le plan d'eau a facilité la navigation de cabotage déjà existante, et elle a permis la création d'un port de plaisance important.

Les études préliminaires à la construction ont concerné presque exclusivement ses conséquences à l'amont. C'est simplement dans les études techniques du barrage que l'on trouve des données d'environnement concernant l'estuaire (L.C.H.F.*, 1960, 1963, 1964a, 1964b ; ORGERON, 1968). Ainsi les études sédimentologiques destinées à prévoir l'évolution de la bathymétrie de l'estuaire indiquaient un déplacement de la zone des dépôts et leur accroissement au niveau des bouchots mytilicoles. Cet accroissement a été très important et a conduit rapidement la mytiliculture implantée dans l'estuaire à abandonner ces terrains. Ces études techniques contiennent des données hydrologiques concernant la courantologie, les salinités et les matières en suspension de l'estuaire. A notre connaissance, ce sont les seules mesures effectuées avant la présence du barrage.

Après la construction, MAILLOCHEAU (1980) a effectué des mesures de ces mêmes paramètres dans l'estuaire et a tenté de décrire l'impact du barrage, principalement du point de vue sédimentaire. Il a observé l'envasement important de l'estuaire et l'a mis en relation avec la diminution du volume oscillant à la marée, et avec le ralentissement des vitesses de courant.

A l'heure actuelle, le phénomène d'envasement se poursuit et des dragages devraient être effectués en 1985 ou en 1986 pour maintenir les cotes à des niveaux permettant la navigation.

Durant l'été 1982, une mortalité subite de poissons a eu lieu en baie de Vilaine à proximité de l'estuaire. Elle a été causée par une anoxie des eaux de fond. ROSSIGNOL-STRICK (1985) attribue celle-ci à des lâchers massifs d'eau douce par le barrage ayant induit une stratification haline dans la baie. Selon cet auteur, cette stratification constitue un obstacle au réapprovisionnement

* L.C.H.F. : Laboratoire Central d'Hydraulique de France.

en oxygène de la couche d'eau de fond, alors que cet oxygène est consommé par l'oxydation de la matière organique. Elle peut donc générer une anoxie. Ce processus, quoique moins accentué, a été mis en évidence par nos observations en continu de la masse d'eau durant les étés 1983 et 1984 (non publié), et le phénomène semble récurrent.

Par ailleurs, durant les étés 1983 et 1984, est apparue en baie de Vilaine d'abord, puis sur les côtes bretonnes et normandes, une espèce de phytoplancton toxique Dinophysis acuminata. Cette espèce, par l'intermédiaire de son ingestion par les moules, occasionne à l'homme une intoxication de type diarrhéique. La commercialisation des moules a dû être interdite pendant la période dangereuse, qui correspondait à une époque de forte demande.

Parmi ces problèmes, nous nous sommes attachés aux phénomènes d'anoxie et hypoxie, laissant de côté les questions de sédimentation et de toxicité phytoplanctonique. Partant du fait que la capacité de rétention du barrage est négligeable, et qu'en période de crue la présence du barrage n'a a priori qu'une influence limitée sur les débits, il nous a semblé intéressant d'examiner quel était l'impact de la présence du barrage sur les structures estuariennes de la salinité (stratification), et des matières en suspension (accumulation turbide), et par voie de conséquence sur les eaux côtières proches.

II - SITE ET METHODES

1) Site (Figure 1)

- a) Le bassin versant de la Vilaine d'une superficie de 10.800 km² couvre environ le tiers de la Bretagne et fait de cette rivière le plus important cours d'eau de la région. Son débit moyen annuel est de 68 m³ s⁻¹ (SRAE, 1984). Le débit de crue est supérieur à 400 m³ s⁻¹, celui d'étiage est

inférieur à $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. D'après CLEMENT (non publié), en 1983 la teneur moyenne en N-NO_3 a été de $262 \mu\text{atg l}^{-1}$ et le flux de 11.040 tonnes. Ces valeurs correspondent à une multiplication par un facteur 2 environ depuis une dizaine d'années. La teneur moyenne en P-PO_4 de la même année a été de $3,6 \mu\text{atg l}^{-1}$ et le flux de 320 tonnes.

- b) L'estuaire présentait avant barrage un développement de 50 km entre la ville de Redon en limite amont, et la ligne joignant la pointe de Penlan à la pointe de Halguen en limite aval. Son cours présentait une série de fosses plus ou moins profondes qui ont subi un comblement certain depuis la construction du barrage.
- c) Le barrage d'Arzal a restreint cet estuaire à une longueur de 10 km et a isolé une retenue d'eau douce qui s'étend jusqu'à Redon. Celle-ci constitue un volume de 40 millions de m^3 dont 28 millions de m^3 peuvent être vidangés (SRAE). Le schéma de gestion du barrage est le suivant : fermeture à pleine mer, début du lâcher dès que le dénivelé entre les niveaux à l'amont et à l'aval du barrage atteint 30 cm, débit maximum autour de la basse mer, réduction du lâcher en fin de flot, et arrêt avant la pleine mer suivante. Les lâchers ont lieu lors des deux marées de chaque jour. En période de mortes eaux et débit soutenu, les lâchers peuvent être ininterrompus.

D'après le SRAE, le temps moyen de résidence dans la retenue est de 5 jours (11 jours en étiage, et moins de deux jours en crue printanière). Elle est le siège d'une eutrophisation modérée analogue à celle existant à l'amont du réservoir.

- c) La baie de Vilaine (Figure 1) est une indentation de la côte, ouverte à l'Ouest et au Sud, limitée en mer par la ligne joignant la pointe du Grand Mont à Piriac. La superficie est de 220 km^2 . La profondeur moyenne est de 7,1 m sous le 0 des

cartes marines, pour un volume de 1500 millions de m³. Le volume oscillant maximal à la marée est à peu près équivalent.

Le marnage est de 4,75 m en vive eau moyenne, et de six mètres au maximum.

Les courants locaux sont faibles à très faibles (0,50 m s⁻¹ maximum en surface et 0,45 m s⁻¹ maximum au fond). Ils sont généralement giratoires avec un axe préférentiel N-E - S-W. Le sens de giration du courant de surface est fréquemment inverse de celui du courant de fond. Le vent a une influence très importante sur la direction et la vitesse des courants.

Le caractère relativement abrité de la baie et les apports d'eau douce tendent à y maintenir une structure hydrologique stratifiée en salinité, en température, et en oxygène. Cette stratification générée lors d'un débit soutenu de la Vilaine, tend à se maintenir tant qu'aucun événement hydroclimatique ne vient la détruire. Les phénomènes d'eaux colorées provoquées par les blooms phytoplanctoniques, de diatomées notamment, y sont assez fréquents.

Dans sa partie nord, la baie de Vilaine reçoit également l'eau de la rivière de Penerf qui débite en moyenne 0,63 m³ s⁻¹. Plus importante, la Loire délivre un débit moyen et des flux de sels nutritifs environ 9 fois plus élevés que ceux de la Vilaine, et ne débouche qu'à 25 km au Sud de celle-ci ; ses eaux pénètrent vraisemblablement en baie de Vilaine lors de certaines conditions météorologiques (vents de secteur sud).

2) Echantillonnage

Les stations de prélèvement ont été réparties dans l'estuaire et dans la baie (Figure 2).

Les prélèvements ont été effectués à quatre reprises durant le printemps 1984 : en vive-eau et en morte-eau, à pleine mer et à basse mer.

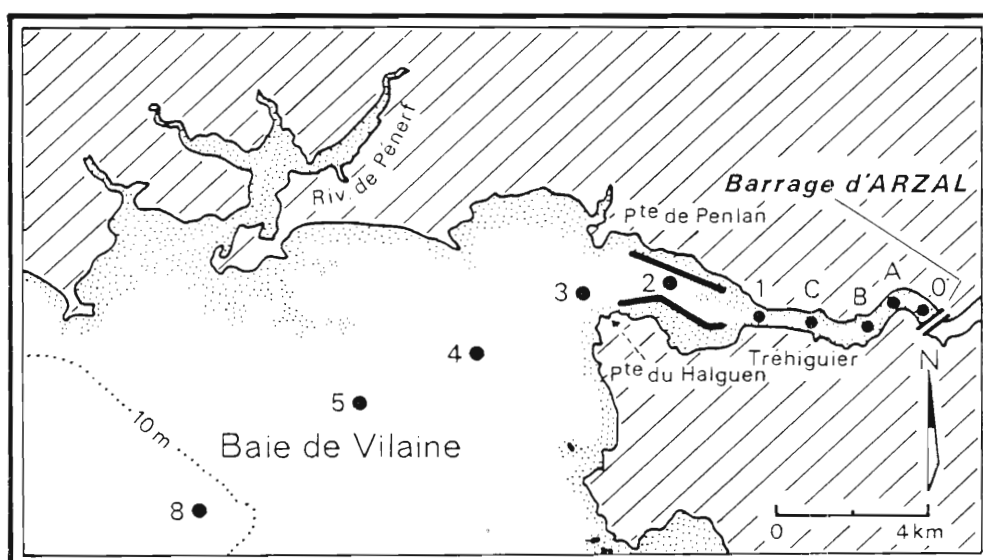


Figure n° 2 : Plan des stations échantillonnées dans l'estuaire et la baie de Vilaine (13 et 20 mars 1984). Les segments gras près de la station 2 correspondent aux zones d'élevage mytilicole de l'estuaire.

TABLEAU 1. CONDITIONS DE MILIEU LORS DES PRELEVEMENTS

(Pour tenir compte des temps de trajet, les débits de la Vilaine sont ceux du jour précédant les prélèvements en mer, et ceux de la Loire sont ceux de la semaine précédente).

		13.3.84	20.3.84
MER	Coefficients	40-45	110-105
	Heure de pleine mer (TU + 1)	13 h 27	6 h 23
	Heure de basse mer (TU + 1)	6 h 50	12 h 50
VILAINE	Débit moyen des 24 h précéd. ($m^3 s^{-1}$)	96	82
LOIRE	Débit moyen de la semaine écoulée ($m^3 s^{-1}$)	792	675

Durant ces deux jours, le vent était d'ouest, de vitesse faible à modérée.

A chaque fois, les prélèvements ont été réalisés dans un laps de temps n'excédant pas 1 h 30, et calé sur l'étale, de façon à s'affranchir au maximum du déplacement des masses d'eau. Deux embarcations ont été nécessaires pour les visiter dans le temps imparti.

De l'eau a été prélevée au fond (+ 1 m) et en surface (- 1 m) avec une bouteille à renversement, et les paramètres suivants ont été échantillonnés : température, salinité, matières en suspension, et oxygène dissous en quelques stations. D'autre part, des profils verticaux de température, salinité et oxygène dissous ont été effectués à l'aide de sondes (sonde EIL pour la température et la salinité, sonde ORBISPHERE pour l'oxygène dissous).

3) Dosages

Les flacons de salinité ont été dosés au salinomètre à induction BECKMAN. Les matières en suspension ont été filtrées dans les 4 heures suivant leur prélèvement ; elles ont été dosées selon la méthode de AMINOT (1983). L'oxygène dissous a été dosé selon la méthode de WINKLER.

III - RESULTATS ET DISCUSSIONS

1) Salinité

a) Résultats

Les observations de salinité de l'IFREMER sont présentées sur la figure 3. La coupe longitudinale s'étend du barrage jusqu'au milieu de la baie de Vilaine. La limite entre l'estuaire et la baie se situe à la station 3, sur la ligne reliant la pointe de Halguen à la pointe de Penlan.

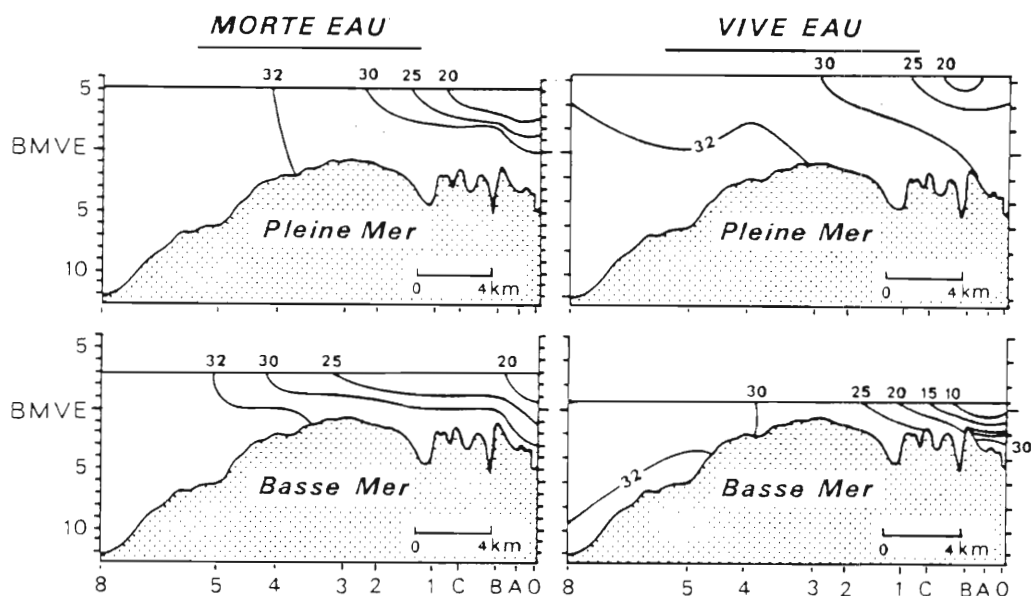


Figure n° 3 : Profils longitudinaux de répartition des salinités (g l^{-1}) dans l'estuaire et la baie de Vilaine, après la construction du barrage d'Arzal (débit en ME = $96 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, débit en VE = $82 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$).

Les salinités observées se répartissent entre $5,4 \text{ ‰}$ et $33,1 \text{ ‰}$, avec un gradient croissant du barrage vers la baie. A l'embouchure (station 3), la gamme des salinités est comprise entre $24,8$ et $31,7 \text{ ‰}$, et les valeurs inférieures à 15 ‰ ne se rencontrent qu'en amont de Tréhiguier.

Un gradient croissant de salinité de la surface vers le fond est observable partout, mais il est beaucoup plus important dans l'estuaire que dans la baie où, en dépit d'une certaine dessalure, le mélange vertical semble relativement important.

Les eaux les plus fortement dessalées sont observés à basse mer de vive eau à proximité immédiate du barrage, en surface. Elles surmontent une poche d'eau salée (31 ‰) qui est

piégée dans une fosse. L'absence de valeurs figurées au niveau des fosses signifie une absence d'échantillonnage à leur emplacement exact. En dehors de la situation de basse mer de vive eau, les salinités les plus basses sont comprises entre 15 et 20 ‰.

b) Stratification haline

SIMMONS (1955) a classé les estuaires selon leur degré de stratification haline, c'est-à-dire de leur non-mélange sur la verticale des eaux douces et salées. Il a utilisé le rapport entre le volume liquide oscillant à la marée et le volume d'eau fluviale débité en six heures. Dans l'estuaire actuel de la Vilaine, nous avons estimé le volume oscillant à partir de profils bathymétriques récents (1983) à $46 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en vive eau, et à $20 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en morte eau. En établissant ce rapport pour différents débits (Figure 4), on observe que par débit moyen, il est de 20 environ et correspond à la limite entre un estuaire moyennement stratifié, et un estuaire fortement stratifié. A titre de comparaison, l'estuaire de la Loire (GUILLAUD, 1984) paraît légèrement plus stratifié que la Vilaine, tandis que ceux de l'Aulne (BASSOULLET, 1979) et de la Gironde (ALLEN, 1972) le sont moins.

A partir des données du L.C.H.F., donc avant barrage, nous avons recalculé le rapport volume oscillant / volume d'eau fluviale débité en six heures, en période de vive eau. A débit égal, l'estuaire était alors un peu moins stratifié qu'à l'heure actuelle. En effet, un volume oscillant notable ($35 \cdot 10^6 \text{ m}^3$) a été emprisonné par le barrage, sans que le débit ait été modifié (l'influence de la modulation biquotidienne du débit par le barrage a été négligée ici).

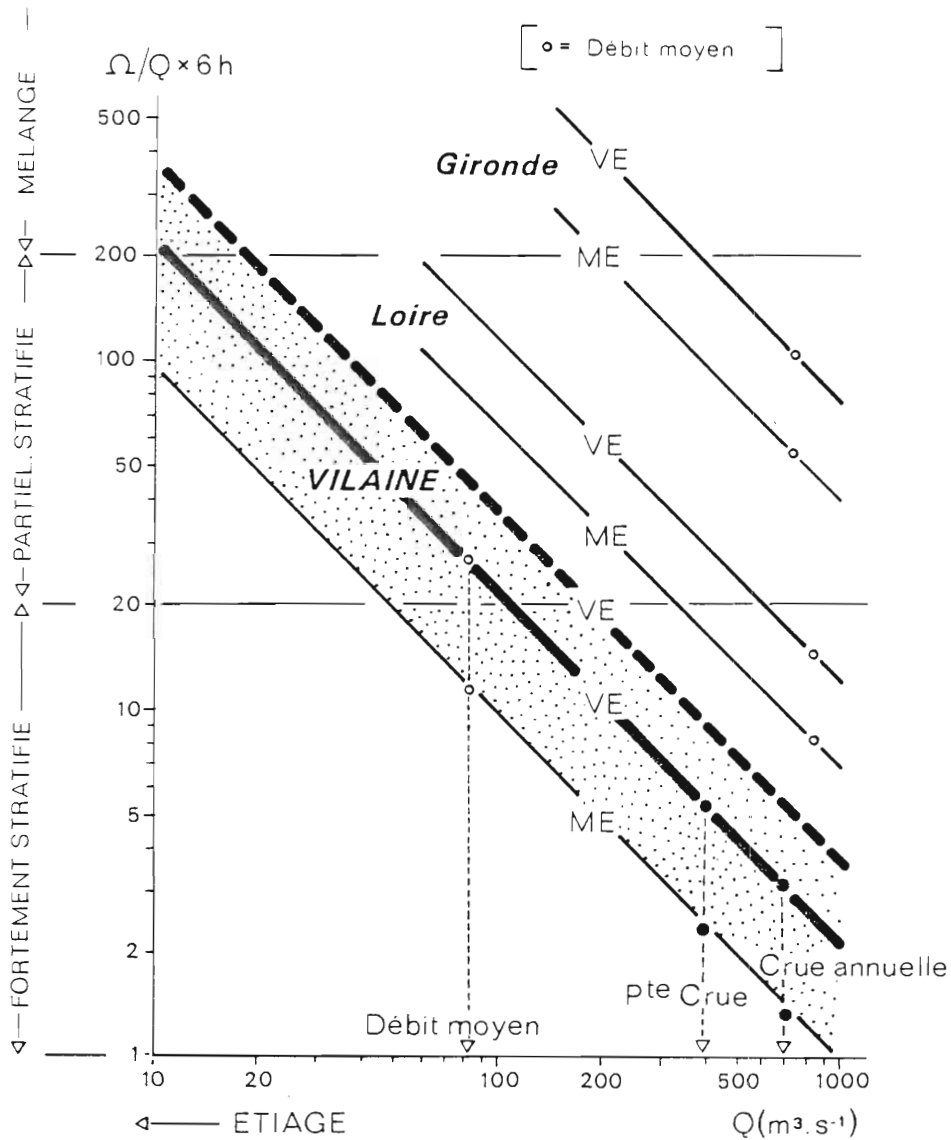


Figure n° 4 - Variation du rapport entre volume oscillant à la marée et le volume fluvial débité en six heures en fonction du débit fluvial dans les estuaires de Loire, Gironde et Vilaine, en VE et ME (d'après la classification de mélange de SIMMONS, 1955). Pour l'estuaire de la Vilaine, comparaison de l'état de stratification avant barrage (---) et après barrage (—).

c) Temps de résidence moyen de l'eau douce dans l'estuaire

Le temps de résidence moyen de l'eau douce dans l'estuaire a été estimé à partir de nos verticales de salinité et des profils bathymétriques récents. Les volumes d'eau douce contenus dans l'estuaire ont été calculés en morte eau et en vive eau, en établissant à chaque fois la moyenne entre la valeur de basse mer et celle de pleine mer. Ces volumes ont été divisés par le débit moyen observé durant les 24 heures précédentes (cf. tableau ci-dessous).

TABLEAU 2 - CALCUL DU TEMPS MOYEN DE RESIDENCE DE L'EAU DE LA VILAINE DANS L'ESTUAIRE ACTUEL

	13.3.84	20.3.84
Coefficient	40-45	110-105
Volume d'eau douce dans l'estuaire (10^6 m ³)	4,7	4,9
Débit moyen des 24 h précédentes (m ³ s ⁻¹)	96	82
Temps de résidence moyen de l'eau douce en estuaire (h)	13,6	16,7

Les temps de séjour sont remarquablement brefs (ils sont exprimés en heures), alors que les débits sont légèrement supérieurs à la moyenne annuelle. Il est certain qu'en régime de crue, ces durées sont encore raccourcies.

Une confirmation de ces résultats est apportée par des suivis de flotteurs réalisés par la Direction Départementale de l'Équipement du Morbihan, dont les résultats (non publiés) nous ont été aimablement communiqués (Figure 5). On observe que des flotteurs superficiels lâchés à mi-jusant descendent l'estuaire en trois heures et demie environ. Le débit, inconnu dans un cas, était dans l'autre cas très soutenu ($300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Ces flotteurs étaient drogués au niveau du premier mètre superficiel, et traçaient donc la fraction d'eau douce expulsée le plus rapidement. La concordance avec notre estimation est donc très bonne.

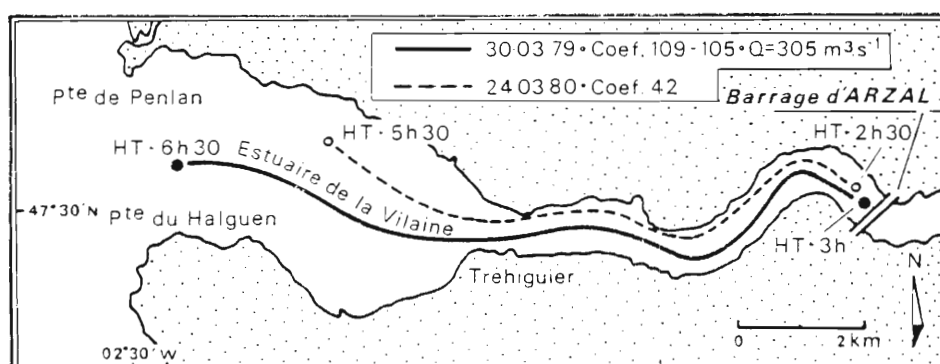


Figure n° 5 - Trajectoire de deux flotteurs de surface dans l'estuaire de la Vilaine, lâchés à mi-jusant en aval du barrage d'Arzal.

Les données du L.C.H.F., avant barrage, concernent une période de faible débit ($17 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), ce qui ne permet pas une comparaison directe avec nos données. Cependant, le calcul montre qu'à l'époque, entre le site du futur barrage et l'embouchure, le temps de résidence moyen de l'eau douce était de presque cinq jours, ce qui est très largement supérieur à la valeur actuelle. Pour la même époque, l'estimation concernant l'ancien estuaire, dans sa totalité (jusqu'à REDON), aboutit à un temps de résidence de 14 jours. Il semble donc que le barrage ait considérablement réduit le temps de résidence de l'eau

douce en milieu estuarien. Ceci s'est produit en dépit du ralentissement des courants occasionné par le barrage, ce qui en principe tend à allonger le temps de résidence.

Par comparaison, en étiage également, la Loire présente un temps de résidence de 20 jours, et l'Aulne en présente un de l'ordre d'un mois.

c) Conséquences

En résumé, les observations effectuées montrent que le barrage a renforcé le caractère déjà stratifié de l'estuaire de la Vilaine. Il a d'autre part très fortement raccourci le temps de résidence moyen de l'eau douce dans l'estuaire.

L'augmentation de la stratification en estuaire a pour conséquence une augmentation de la stratification dans la baie de Vilaine. Nous avons vu que cette stratification s'oppose à l'approvisionnement en oxygène des eaux de fond à partir des eaux de surface, et tend donc à faire diminuer la teneur en oxygène dissous au niveau du fond.

Cette stratification accrue de la baie provoque également une plus grande concentration des substances nutritives véhiculées par l'eau douce dans la couche superficielle. Cette dernière est de plus soumise à l'éclairement le plus intense. Ceci favorise l'apparition de blooms phytoplanctoniques plus superficiels et plus intenses que si, par un meilleur mélange des eaux douces et marines, un développement du phytoplancton mieux réparti sur la verticale était possible.

Donc, non seulement l'approvisionnement du fond en oxygène à partir des couches superficielles est moins important du fait de l'accroissement de la stratification, mais on peut logiquement penser qu'à production primaire égale, le barrage contribue à renforcer le caractère superficiel de sa répartition. Par là même, il restreint d'autant la production primaire et la production d'oxygène, au niveau des eaux de fond.

En outre, du point de vue de l'éclairement des niveaux inférieurs, la turbidité engendrée par les blooms superficiels induit une diminution de la profondeur de compensation et, de ce fait, contribue également à diminuer la production primaire des eaux de fond.

Les effets de la forte diminution du temps de résidence de l'eau douce dans l'estuaire seront étudiés plus loin, dans la partie consacrée aux matières en suspension.

2) Matières en suspension (M.E.S.)

Les matières en suspension présentent fréquemment dans les estuaires une répartition particulière appelée bouchon vaseux ou accumulation turbide. Il s'agit d'un ensemble de concentrations largement supérieures à celles rencontrées en amont et en aval. Ces maximums de turbidité se déplacent dans l'estuaire en fonction des débits du fleuve, du coefficient de marée, et du moment de la marée. Une limite inférieure de concentration de cette accumulation de MES de 50 mg l^{-1} est classiquement admise.

L'origine d'un bouchon vaseux peut-être double, soit densitaire, soit dynamique. Dans le premier cas, qui concerne les estuaires stratifiés, il faut considérer les

courants résiduels, c'est-à-dire en filtrant les va-et-vient dûs à la marée. Dans la partie amont d'un estuaire stratifié, l'ensemble de la tranche d'eau est affecté par un courant résiduel orienté vers l'aval. Dans la partie aval, les eaux déssalées situées en surface sont entraînées par un courant résiduel portant vers l'aval, tandis que près du fond, les eaux salées cheminent vers l'amont. C'est à la limite amont de cette intrusion saline, au point de rencontre des courants résiduels de sens opposé que se trouve le bouchon vaseux d'origine densitaire. Dans le cas d'un bouchon vaseux dynamique, qui concerne les estuaires macrotidaux, c'est l'énergie de la marée qui par plusieurs processus, tend à créer un autre type de bouchon vaseux d'origine dynamique (ALLEN et al, 1980 ; 1982). Les deux causes peuvent se combiner en proportions variables. Nous ne nous attacherons pas à différencier ces causes dans le cas présent, mais à examiner les conséquences de l'évolution du bouchon vaseux, ce qui passe par l'analyse de ses fonctions.

Les fonctions du bouchon vaseux qui nous intéressent sont au nombre de deux. Il s'agit d'abord du stockage temporaire de particules, qu'elles soit minérales et organiques, lors de leur descente de l'estuaire. Le bouchon constitue un lieu de stationnement durant une certaine période avant que ces particules soient acheminées en mer ou définitivement sédimentées sur place. La deuxième fonction est constituée à la fois, par l'oxydation de la matière organique (dissoute ou particulaire), et par la nitrification de l'azote ammoniacal. Ces deux processus sont analogues à ceux mis en oeuvre dans les stations d'épuration des eaux usées, où ils concernent des concentrations bien supérieures. En estuaire également, ces mécanismes mettent en jeu une activité bactérienne. Ces bactéries sont *adsorbées sur*

les MES. Ces supports, même s'ils sont minéraux, leur permettent d'avoir un taux d'activité bien supérieur et de proliférer. Cela se traduit par une chute de l'oxygène dissous au niveau du bouchon vaseux, qui peut aller jusqu'à l'anoxie complète (MORRIS et al, 1982 ; GUILLAUD et ROMANA, 1984).

a) Nos résultats

Nos observations de MES sont figurées sur des coupes longitudinales (Figure 6) aux différentes situations marée. Les valeurs s'échelonnent entre 2,0 et 33,2 mg l⁻¹ en baie, et entre 7,9 et 497 mg l⁻¹ en estuaire. Les valeurs de fond sont toujours supérieures aux valeurs de surface. On observe un gradient décroissant de la côte vers le large bien caractérisé, sauf en situation de BM VE. C'est également la seule situation où l'on observe des valeurs significativement supérieures à 50 mg l⁻¹. Le bouchon vaseux y est présent à partir de 2 km en aval du barrage jusqu'à l'embouchure. La teneur maximum de MES est alors atteinte à la station 1 au fond.

La situation de BM VE est également la seule durant laquelle on observe un déficit d'oxygène dissous au fond par rapport à la valeur de saturation (Figure 6 en bas à droite).

b) Résultats de MAILLOCHEAU

Les valeurs de MES de MAILLOCHEAU obtenues après la construction du barrage sont représentées Figure 7. Elles correspondent à une période d'étiage prononcé (7 m³ s⁻¹) et de petite vive-eau (coefficient 86). Elles ne concernent que l'estuaire. Le maximum (1473 mg l⁻¹) est atteint à la station 3, au fond, à basse mer.

Les MES sont globalement plus élevées que celles observées par nous, ce qui est surprenant au vu des conditions comparées de débit et de coefficient. Autre paradoxe, les MES semblent plus abondantes à pleine-mer qu'à basse-mer. Dans les deux cas, le bouchon sort de l'estuaire et intéresse la baie.

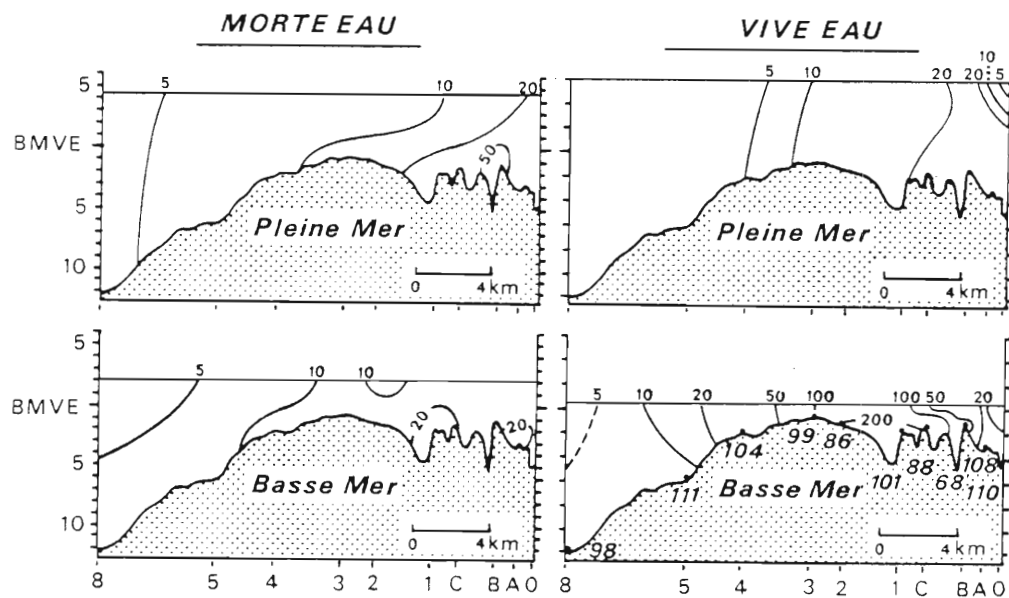


Figure n° 6 - Profils longitudinaux de répartition des matières en suspension (mg l^{-1}) dans l'estuaire et la baie de Vilaine, après la construction du barrage d'Arzal (débit en ME = $96 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, débit en VE = $83 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). A basse mer de vive-eau, les nombres en italiques représentent la teneur en oxygène dissous exprimée en pourcentage de saturation.

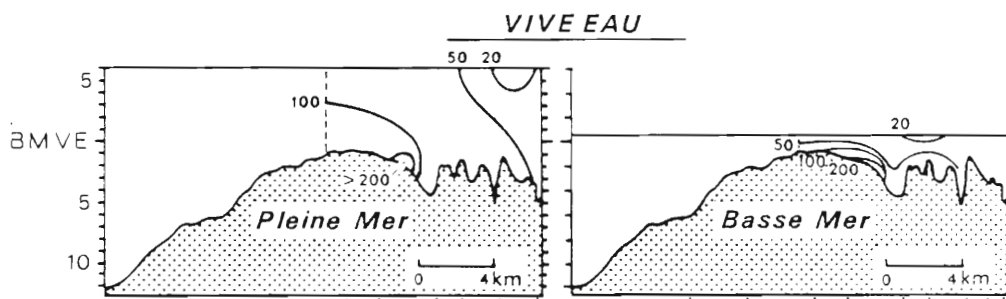


Figure n° 7 - Profils longitudinaux de répartition des matières en suspension (mg l^{-1}) dans l'estuaire de la Vilaine après la construction du barrage d'Arzal en période d'étiage (d'après MAILLOCHEAU, 1980).

Les observations climatologiques citées par MAILLOCHEAU font état d'un vent de sud/sud-ouest de 17 à 22 km h^{-1} ayant soufflé pendant les trois jours précédents. Il est vraisemblable que ceci a provoqué une remise en suspension du sédiment à partir des fonds assez faibles situés près de l'embouchure. Cette hypothèse peut expliquer ces teneurs élevées de MES situées très en aval de l'estuaire, alors que la situation d'étiage faisait attendre des valeurs maximums moins élevées, et situées plus en amont.

c) Résultats du L.C.H.F.

Les résultats du L.C.H.F. sont représentés par quatre situations-marées obtenues avant la construction du barrage, en période de faible débit (23 et $16 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) (Figure 9). Ces coupes sont incomplètes.

Les valeurs observées par le L.C.H.F. ne sont jamais inférieures à 50 mg l^{-1} (maximum de 5.000 mg l^{-1} un peu en aval d'Arzal), et sont plus élevées à basse mer qu'à pleine mer. A cette époque, la limite amont du bouchon vaseux se situait à 15 km en amont d'Arzal.

Par rapport à l'époque actuelle, le bouchon vaseux était donc beaucoup plus étendu géographiquement, de présence plus constante, aussi bien à pleine mer qu'à basse mer, même par débit et coefficient faibles. De plus, même ainsi, les teneurs maximum atteintes étaient plus élevées.

c) Conséquences

La diminution très importante de bouchon vaseux survenue depuis la construction du barrage a eu des conséquences

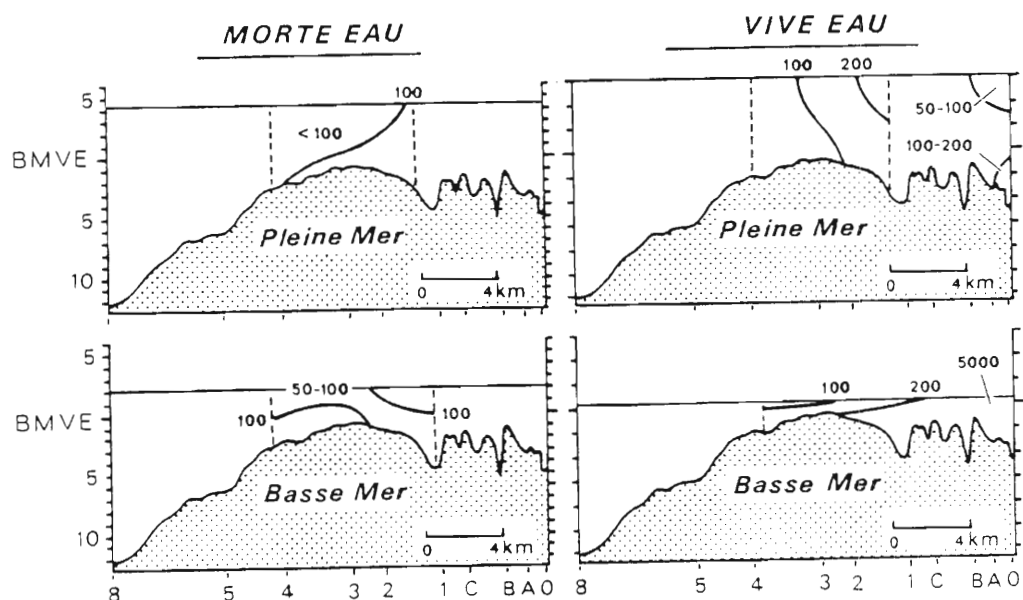


Figure n° 8 - Profils longitudinaux de répartition des matières en suspension (mg l^{-1}) dans l'estuaire de la Vilaine avant la construction du barrage d'Arzal en période d'étiage (d'après L.C.H.F., 1960, 1963 et 1964b).

sédimentaires majeures, sur lesquelles nous ne nous étendrons pas (comblement partiel des fosses du chenal, envasement rapide des bouchots mytilicoles). Nous avons vu plus haut le rôle joué par le bouchon vaseux dans le stockage des particules organiques (donc dégradables) et minérales. Ces particules favorisent les processus bactériens d'oxydation de la matière organique et de nitrification de l'azote, et par voie de conséquence l'abaissement de l'oxygène dissous en estuaire.

La réduction drastique du bouchon vaseux dans l'estuaire de la Vilaine suite à la construction du barrage d'Arzal, signifie que ces deux phénomènes épurateurs ne peuvent plus avoir lieu dans l'estuaire, sinon dans une proportion très faible par rapport à la situation avant-barrage. Le matériel non oxydé va se trouver pour partie sédimenté sur place, et pour partie transféré vers l'aval, c'est-à-dire en baie.

A ceci s'ajoute le fait signalé lors de l'étude des salinités, à savoir le très fort abaissement du temps de résidence de l'eau douce en estuaire. Celle-ci est porteuse des teneurs en substances dissoutes oxydables les plus élevées. Du fait de la réduction du temps de contact entre les MES et l'eau douce (ou déssalée), les possibilités d'oxydation de ce matériel dissous par le bouchon vaseux en estuaire sont diminuées.

3) Courants

Nous avons vu plus haut que les volumes liquides oscillant à la marée ont été fortement diminués par la construction du barrage (- 43 % en VE).

TABLEAU 3 - VOLUMES OSCILLANTS DANS L'ESTUAIRE DE LA VILAINE

	ME		VE	
	Avant barrage	Après barrage	Avant barrage	Après barrage
Volumes oscillants (10^6 m ³)	-	20	81	46

Cela a entraîné un ralentissement de la vitesse des courants. MAILLOCHEAU (1980) a effectué des mesures après barrage qu'il a pu comparer avec celles du L.C.H.F.

TABLEAU 4 - VITESSES COMPAREES DES COURANTS DANS L'ESTUAIRE DE LA VILAINE - AVANT ET APRES LA CONSTRUCTION DU BARRAGE D'ARZAL

Vitesses maximums	Coeff de marée	Avant barrage	Après barrage
Jusant ($m s^{-1}$)	faible	0,73	0,75
	moyen	1,06	0,76
	fort	0,85	0,90
Flot ($m s^{-1}$)	faible	0,75	0,38
	moyen	0,96	0,33
	fort	0,90	0,58

Les vitesses maximums en jusant sont globalement un peu inférieures à ce qu'elles étaient avant barrage. Les vitesses moyennes, quant à elles, ont été réduites de 25 %. Les vitesses maximums de flot sont abaissées de 36 à 66 % selon le coefficient de marée.

IV - CONCLUSION

La figure 9 schématise l'influence du barrage d'Arzal sur l'estuaire et la baie de Vilaine.

Par la diminution du volume oscillant et la diminution de la vitesse des courants, le barrage d'Arzal a induit dans l'estuaire de la Vilaine une modification des salinités et des MES. La nouvelle répartition des salinités correspond à une accentuation de la stratification estuarienne qui se répercute dans la baie, où elle inhibe la réoxygénation du fond à partir de la surface.

En corollaire, le temps de résidence de l'eau douce en estuaire a été fortement diminué. Le bouchon vaseux qui était très développé a subi une réduction drastique du fait du barrage. L'épuration de la matière organique et la nitrification, que le bouchon vaseux favorisait par voie bactérienne au niveau de l'estuaire, ont été repoussées vers l'aval, c'est-à-dire en baie de Vilaine, en même temps que la consommation d'oxygène inhérente à ces processus. De surcroît, la production primaire en baie tend à être plus superficielle, ce qui, par l'assombrissement du fond qui en résulte et par compétition dans l'utilisation des substances nutritives, conduit à une diminution de la production primaire au fond, donc de la production d'oxygène à ce niveau. Tous ces phénomènes ont pour origine l'existence même du barrage, et contribuent à diminuer la concentration en oxygène dissous dans la baie au niveau du fond.

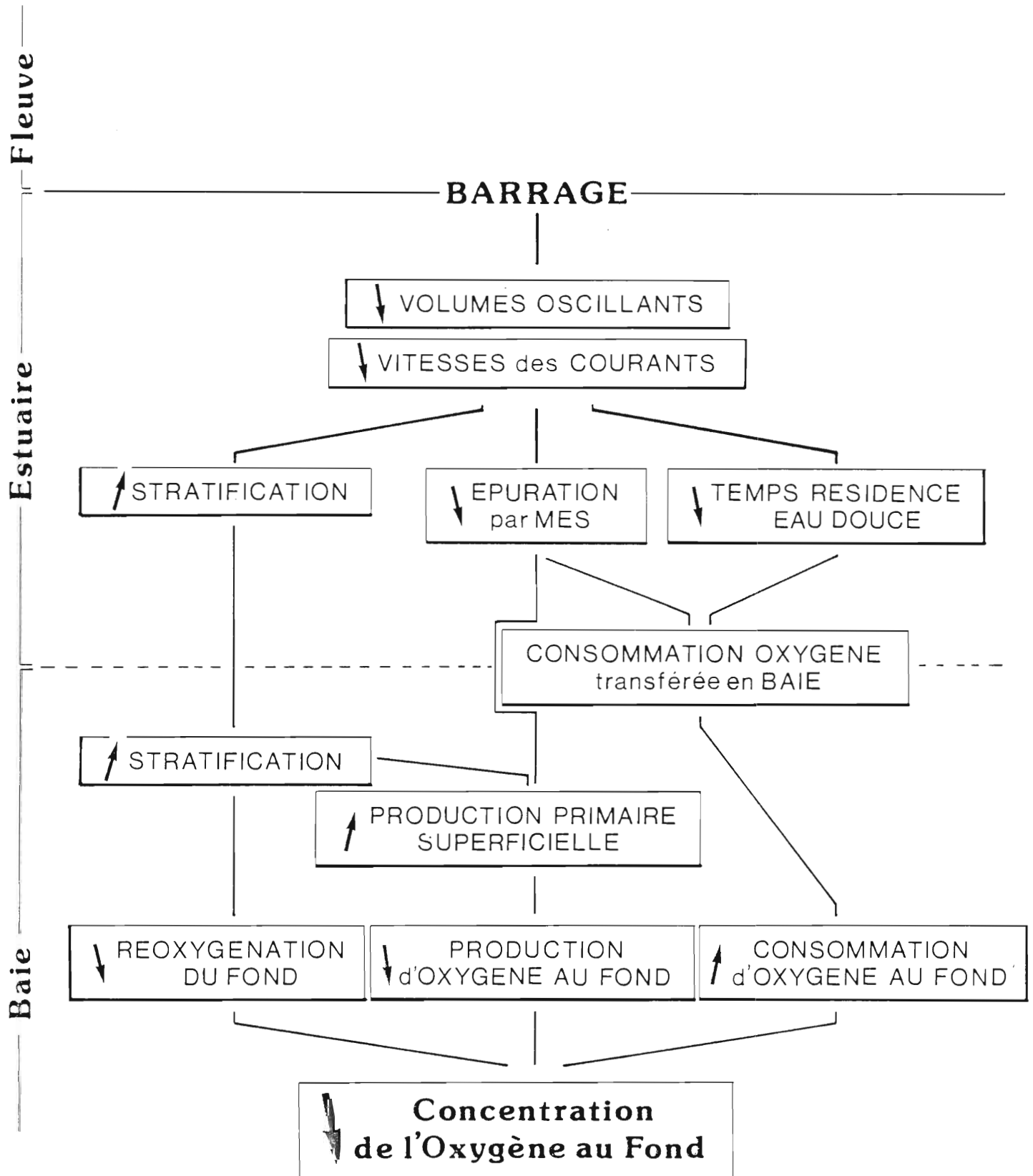


Figure n° 9 : Impact du barrage d'Arzal sur la qualité des eaux du système estuaire - baie de Vilaine (schéma).

Les caractéristiques primitives de l'estuaire de la Vilaine ont été fortement altérées par le barrage d'Arzal au point que ses fonctions de mélange des eaux douce et salée, d'oxydation de la matière organique et de nitrification, sont maintenant assurées en grande partie dans la baie. D'un point de vue théorique, ce déplacement vers l'aval des processus consommateurs d'oxygène pourrait être considéré comme une solution pour améliorer l'état de santé des estuaires d'ores et déjà dégradés. En effet, pour bon nombre d'entre eux cela pourrait être un moyen de retrouver une qualité d'eau satisfaisante, la mer ouverte se chargeant de disperser la demande supplémentaire en oxygène, et d'assurer l'homogénéisation de la colonne d'eau. Or, la baie de Vilaine est une zone dont l'hydrodynamisme est faible. Les courants que nous y avons enregistrés durant plusieurs mois ne sont jamais supérieurs à $0,50 \text{ m s}^{-1}$ en surface et à $0,45 \text{ m s}^{-1}$ au fond. Par ailleurs, la configuration du site est telle que seuls les vents d'ouest à sud peuvent créer une agitation susceptible de s'opposer efficacement à la stratification. Des zones présentant les mêmes caractéristiques, bien qu'étant de plus grande étendue, comme le German Bight, le New-York Bight, la Chesapeake Bay, le golfe du Mexique, l'étang de Berre, sont également fréquemment le siège d'hypoxies ou d'anoxies, chroniques ou récurrentes en période estivale (WESTERNHAGEN et DETHLEFSEN, 1983 ; FALKOWSKI et al, 1980 ; OFFICER et al, 1984 ; SELIGER et al. 1985 ; FOTHERINGHAM et al, 1979 ; MINAS, 1976). Bien qu'il n'existe aucune mesure d'oxygène en baie de Vilaine avant la construction du barrage d'Arzal, il est très vraisemblable qu'il existait un certain déficit estival dans les eaux de fond. Ainsi, le transfert de charge polluante vers l'aval engendré par le barrage est "traité" dans la baie, mais y provoque de façon chronique l'aggravation d'un déficit estival préexistant.

Il faut considérer que le barrage ne constitue pas le seul facteur d'aggravation chronique. Ainsi, sur le bassin versant, l'arasement des talus séparant les parcelles cultivées, qui constitue un élément de modernisation des structures agricoles, contribue également à abaisser la qualité des eaux de fond en

baie de Vilaine. L'écoulement des précipitations sur les parcelles n'étant plus retardé par les talus, il s'ensuit une plus grande brutalité des crues et de ce fait, une augmentation de la stratification en estuaire et en baie. Il en est de même de l'augmentation considérable des apports d'engrais azotés sur les cultures du bassin versant, qui s'est traduite depuis une dizaine d'années par la multiplication par un facteur de 2 environ des teneurs en nitrates des eaux de la Vilaine à leur arrivée dans l'estuaire. Un accroissement de la production de matière organique oxydable en est la conséquence logique.

D'autre part, des facteurs occasionnels peuvent contribuer temporairement à l'aggravation du phénomène. Ainsi, de fortes précipitations suivies d'une période de vents faibles concordant avec un période de mortes-eaux ont-elles été constatées au moment des mortalités massives de poissons survenues en juillet 1982.

S'il est évident que ce n'est pas la seule présence du barrage d'Arzal qui a provoqué les mortalités de poissons en baie de Vilaine, il ne fait pas de doute qu'il y a cependant contribué. Ceci constitue un exemple concret de l'impact qu'un aménagement en estuaire peut exercer sur l'environnement côtier avoisinant.

BIBLIOGRAPHIE

- ALLEN G.P., 1972. Etude des processus sédimentaires dans l'estuaire de la Gironde. Thèse, Bordeaux, 314 pp.
- ALLEN G.P., CASTAING P. et SALOMON J.C., 1982. Effets de la marée sur les mouvements de l'eau et des sédiments dans les estuaires. Mémoires de la Société Géologique de France, Nouvelle Série, **144**, pp. 5 - 16.
- ALLEN G.P., SALOMON J.C., BASSOULLET P., DU PENHOAT Y. et DE GRANDPRE C., 1980. Effects of tides on mixing and suspended sediment transport in macrotidal estuaries. Sedimentary Geology, **26**, pp. 69-90.
- AMINOT A., 1983. Mesure des matières en suspension. In : Manuel des analyses chimiques en milieu marin. (CNEXO ed.), pp. 169-175.
- BASSOULLET P., 1979. Etude de la dynamique des sédiments en suspension dans l'estuaire de l'Aulne (Rade de Brest). Thèse de 3ème cycle, Brest, 136 pp.
- FALKOWSKI P.G., HOPKINS T.S. et WALSH J.J., 1980. An analysis of factors affecting oxygen depletion in the New York Bight. Journal of Marine Research., **38** (3), pp. 479-506.
- FOTHERINGHAM N., WEISSBERG G.H., DAMES et MOORE, 1979. Some causes, consequences and potential environmental impacts of oxygen depletion in the Northern gulf of Mexico. Offshore Technology Conference, Houston. 30 april - 3 may 1979, pp. 2205-2208.
- GUILLAUD J.F., 1984. La gestion des estuaires en France. Norois, **121**, pp. 97-112.
- Laboratoire Central d'Hydraulique de France, 1960. Mission d'études de la Vilaine. Campagnes de mesures et d'observations. Rapport de fin de mission.
- Laboratoire Central d'Hydraulique de France, 1963. Estuaire de la Vilaine. Rapport de la mission complémentaire.
- Laboratoire Central d'Hydraulique de France, 1964a. Barrage d'Arzal. Etude hydraulique. Rapport général.
- Laboratoire Central d'Hydraulique de France, 1964b. Barrage d'Arzal. Etude sédimentologique. Rapport général.
- MAILLOCHEAU F., 1980. L'envasement de l'estuaire de la Vilaine en aval du barrage d'Arzal. DEA, Nantes, 64 pp.
- MINAS M., 1976. Oxygène dissous et saturation dans un milieu de forte production organique (Etang de Berre). Rôle d'une halocline sur leur distribution et sur les rapports oxygène-phosphate. Notion de bilan. Hydrobiologia, **51** (2), pp. 149-162.

- MORRIS A.W., LORING D.H., BALE A.J., HOWLAND R.J.M., MANTOURA R.F.C. et WOODWARD E.M.S., 1982. Particle dynamics, particulate carbon and the oxygen minimum in an estuary. Oceanologica Acta, 5 (3), pp. 349-353.
- OFFICER C.B., BIGGS R.B., TAFT J.L., CRONIN L.E., TYLER M.A. et BOYNTON W.R., 1984. Chesapeake Bay anoxia : origin, development and significance. Science, 223, pp. 22-27.
- ORGERON C., 1968. Etude sur modèle réduit de la sédimentation dans l'estuaire de la Vilaine après construction du barrage d'Arzal. La Houille Blanche, 7, pp. 621-630.
- ROSSIGNOL-STRICK M., 1985. A marine anoxic event on the Brittany coast, july 1982. Journal of Coastal Research, 1 (1), pp. 11-20.
- SELIGER H.H., BOGGS J.A. et BIGGLEY W.H., 1985. Catastrophic anoxia in the Chesapeake Bay in 1984. Science, 228 pp. 70-73.
- Service Régional de l'Aménagement des Eaux de Bretagne (SRAE), 1984. Qualité des eaux dans la retenue d'Arzal en 1983. Rapport, 34 pp.
- SIMMONS H.B., 1955. Some effects of upland discharge on estuarine hydraulics. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 81, pp. 1-20.
- VAN SLUIS J.W. et LIJKLEMA L., 1984. Water quality aspects of the Nakdong estuary barrage. Water Science Technology, 16 (1-2), pp. 243-252.
- WESTERNHAGEN H.V. et DETHLEFSEN V., 1983. North Sea oxygen deficiency 1982 and its effects on the bottom fauna. Ambio, 12 (5), pp. 264-266.