



# Mémoire

## *Caractérisation hydrodynamique et hydrosédimentaire des estuaires de la Gironde, de la Loire et de la Seine.*

Estuaire de la Gironde d'après CNES® 2000

Tuteur: Héri ANDRIAMAHEFA

Année 2004 / 2005

LECARPENTIER THOMAS  
Maîtrise d'IUP IMACOF

## Remerciements

---

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire, par leur soutien, leur disponibilité et leur accueil.

Je remercie donc Monsieur Loïc Guézennec de l'agence de l'eau Seine-Normandie de m'avoir aiguillé et mis en relation avec des acteurs de l'estuaire de la Seine.

Monsieur Robert Lafite, professeur à l'Université de Rouen pour son accueil et ses explications.

Monsieur Régis Hocdé du Groupement d'intérêt Public Seine-Aval, également pour son accueil et sa gentillesse.

Bernard Prudhomme, de la cellule de mesure et de bilans de l'estuaire de la Loire, pour sa disponibilité.

Je tiens également à remercier mes deux colocataires Tioun et Guilhem pour leurs soutiens tout au long de cette année.

## Résumé

---

L'estuaire, est un milieu particulier à l'interface entre milieux continentaux et marins, est régi par différents processus hydrodynamiques et sédimentaires. La caractérisation de ces processus sur trois estuaires Français : la Gironde, la Loire et la Seine, a permis de réaliser une synthèse des données existantes sur chacun des estuaires et de comprendre leur fonctionnement respectif. Ainsi, il est possible de constater que ces trois estuaires possèdent une origine commune et sont régis par des processus similaires. Cependant, il est possible de constater que d'un estuaire à l'autre ces processus s'expriment de façons différentes, ceci est essentiellement dû à des échelles et des régimes hydrologiques différents. Ces trois estuaires sont aujourd'hui contrôlés par les aménagements anthropiques réalisés au cours des 50 dernières années et ont ainsi perdu leur caractère sauvage du début du XX<sup>ème</sup> siècle. On assiste donc à un changement d'équilibre sédimentaire par des phénomènes de remontée de l'intrusion saline et du bouchon vaseux, dus à l'endiguement et à la chenalisation des estuaires.

**Mots clés** : estuaire, morphologie, marée, débits fluviaux, bouchon vaseux.

## ABSTRACT

---

An Estuary, defined as a particular meeting place of continental and marine water, is governed by different hydrodynamic and sedimentary processes. The characterisation of these processes on three French estuaries : the Gironde, the Loire and the Seine has allowed to carry out an analysis of existing data on each estuary, and therefore understand their respective functioning. It has been possible to establish that these three estuaries have a common origin and are governed by similar processes. However, it becomes clear that from one estuary to the other these processes present themselves in different ways. This is essentially due to their differing scales and hydrological cycles. Today, these three estuaries have lost their wild characteristics of the beginning of the 20th century, as a result of the anthropogenic development which has happened during the last 50 years. This has created a change to the sedimentary balance, through a rising of the saline intrusion and of the turbid plume, due to damming of banks and channelling of estuaries.

**Key words**: estuary, morphology, tide, fluvial flow, turbid plume.

# Sommaire

---

<b>Introduction .....</b>	<b>2</b>
<b>I/ Caractéristiques générales d'un estuaire .....</b>	<b>3</b>
1) Définition .....	3
2) Les différents milieux constitutifs d'un estuaire .....	5
3) Présentation des estuaires .....	7
3.1) L'estuaire de la Gironde .....	7
3.2) L'estuaire de la Loire .....	9
3.3) L'estuaire de la Seine .....	10
<b>II/ Caractérisation de la morphologie des estuaires.....</b>	<b>12</b>
1) Géologie du substratum.....	12
2) Origine des estuaires .....	13
3) Classification géomorphologique.....	15
4) Morphologie descriptive .....	16
5) Morphologie quantitative .....	20
<b>III/ Caractérisation du fonctionnement hydrodynamique des estuaires .....</b>	<b>22</b>
1) Hydrologie.....	22
2) Le marnage et les surfaces marnantes .....	24
2.1) Le marnage .....	24
2.2) Les surfaces marnantes.....	25
3) Le volume oscillant .....	26
4) La propagation de l'onde de marée .....	28
5) L'intrusion saline.....	31
6) Circulation estuarienne.....	33
<b>VI/ Caractérisation du fonctionnement sédimentaire des estuaires.....</b>	<b>36</b>
1) Les apports de sédiments.....	36
1.1) Les sédiments grossiers .....	36
1.2) Les sédiments fins .....	37
2) Transport des sédiments fins dans les estuaires .....	38
2.1) Généralité sur les processus de circulation des sédiments fins .....	38
2.2) Formation du bouchon vaseux .....	39
2.2.1) Bouchon vaseux lié à la circulation résiduelle .....	40
2.2.2) Bouchon vaseux lié à l'asymétrie de la marée.....	40
2.3) Caractéristique du bouchon vaseux de chaque estuaire .....	41
2.4) La crème de vase .....	43
<b>V/ Tableaux de synthèses sur les estuaires.....</b>	<b>45</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>48</b>
<b>Glossaire.....</b>	<b>49</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>50</b>
<b>Table des illustrations .....</b>	<b>54</b>

## Introduction

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la troisième année de l'IUP IMACOF en vue de l'obtention du titre d'ingénieur maître.

Le sujet abordé concerne la caractérisation du fonctionnement hydrodynamique et hydrosédimentaire de trois grands estuaires Français que sont la Gironde, la Loire et la Seine. En effet, ce sujet répond à une demande exprimée par des acteurs de ce milieu (Agence de l'eau Seine-Normandie, GIP Seine-aval...), ne possédant pas de document synthétiques sur les processus se déroulant sur chacun des estuaires. Ce mémoire a donc pour objectif de réunir des données sur chacun des estuaires, afin de pouvoir les caractériser mais aussi de les comparer les uns par rapports aux autres. Le travail fourni pour ce mémoire consiste donc à une synthèse bibliographique des données existantes sur les estuaires, mais aussi à définir à partir de la littérature des indices morphologiques, hydrodynamiques et hydrosédimentaires simples permettant de caractériser les estuaires les uns par rapport aux autres.

Nous nous attacherons donc à définir ce qu'est un estuaire et à présenter les trois estuaires de l'étude, puis nous nous intéresserons à leur formation au cours des temps géologiques pour en comprendre leur morphologie actuelle. Par la suite nous caractériserons les processus hydrosédimentaires et hydrodynamiques se déroulant en estuaire et plus particulièrement sur chacun des estuaires de l'étude, enfin la réalisation de tableau de synthèse regroupant toutes les données présentent dans la rapport permettra une lecture facilité et une caractérisation des estuaires en vue d'une comparaison.

(\*) expliqué dans le glossaire

## **I/ Caractéristiques générales d'un estuaire**

### **1) Définition**

Un estuaire est défini comme un milieu de transition entre le milieu marin et le milieu continental.

Selon l'étymologie, le terme estuaire provient du latin *aestus* (marée) substantif du verbe *aesto* signifiant « bouillonner ». Le terme estuaire suggère donc l'effet bouillonnant de la marée montante lors de sa rencontre avec les eaux continentales (Ottman, 1965, in Ouraq 1996).

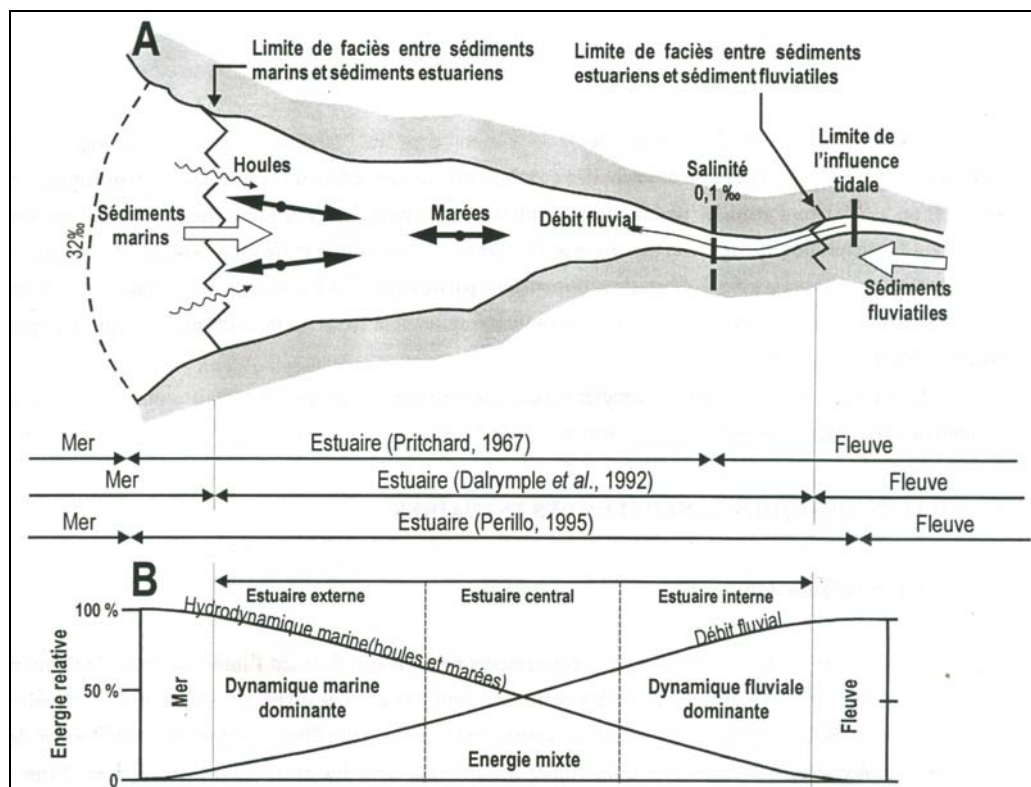
Il n'existe pas une définition unique d'un estuaire, selon les disciplines, l'estuaire ne correspond pas à la même entité spatiale (figure 1) :

Ainsi, pour Ottman (1965), les estuaires correspondent à une forme de déboucher à la mer, des fleuves et rivières continentaux. Ce sont généralement des embouchures uniques, parfois encombrées de bancs de sable, formant un creux sur la ligne de la côte et pénétrées par la mer. Pritchard (1967) quant à lui complète la définition d'Ottman en définissant l'estuaire comme une masse d'eau confinée ayant une connexion libre avec la mer ouverte et à l'intérieur duquel l'eau de mer est diluée d'une façon mesurable avec de l'eau douce issue du drainage du bassin versant (*in Romana, 1994*)

Dalrymple & al. (1992) s'intéressent plus à un aspect sédimentaire pour définir l'estuaire, et considèrent l'estuaire comme la limite entre sédiments marins, estuariens et fluviaux.

Perillo (1995) définit plus largement un estuaire en prenant en compte un large éventail de disciplines scientifiques. Les éléments qui composent cette définition sont :

- \_un plan d'eau côtier semi-confiné qui s'étend jusqu'à la limite effective de l'influence tidale,
- \_une ou plusieurs connections libres avec la mer,
- \_les eaux marines ou les eaux côtières salées y pénètrent librement,
- \_les eaux salées sont diluées de manière significative avec les eaux de drainage en provenance du bassin versant,
- \_les espèces présentes sont euryhalines.



**Figure 1: Différentes définitions d'un estuaire**

(A) Représentation schématique d'un estuaire. D'après Dionne (1963), Pritchard (1967), Dalrymple & al. (1992) et Perillo (1995).

(B). Distribution schématique de l'énergie des processus physiques. D'après Dalrymple & al. (1992).  
D'après Lesourd, 2000. Non modifié

D'un point de vue fonctionnel, un estuaire se comporte comme un réceptacle gigantesque alimenté suivant les cas par des apports de l'amont ou de l'aval, stockant provisoirement ces apports, les déplaçant localement et alternativement sur des distances plus ou moins longues suivant les marées et les soumettant à des remontées (étiages) ou des descentes (crues) sur toute la longueur de l'estuaire en fonction du débit fluvial (Migniot, 1982).

Au niveau écologique, l'écotone\* que constitue l'estuaire est le reflet d'une dynamique sédimentaire, hydrologique, chimique et biologique intense, et représente un milieu complexe où les interactions entre phénomènes marins et continentaux induisent une dynamique de fonctionnement propre à chaque estuaire.

L'estuaire est donc un milieu complexe, qui est à la fois un lieu de concentration et un exutoire des eaux, des sédiments et de polluants provenant du drainage du bassin versant le constituant, mais aussi un lieu d'intérêt écologique majeur par les rôles qu'il joue dans le nourrissage, l'abris et migration de l'avifaune et l'ichtyofaune essentiellement.

## 2) **Les différents milieux constitutifs d'un estuaire**

L'estuaire n'est pas seulement caractérisé par la rencontre des eaux marines et fluviales, mais aussi par les zones humides annexes qui lui sont étroitement liées.

Les variations graduelles du milieu, en fonction du niveau bathymétrique, déterminent les changements de composition de la faune et de la flore présente sur un estuaire. Il est possible de distinguer différents étages d'un estuaire, représentant chacun un intérêt écologique fort :

**\_En zone subtidale\***, l'estuaire représente une zone d'abris, de nourricerie et de nurserie pour l'ichtyofaune et les crustacés marins euryhalins\* (soles, bars, flets, anchois, crevettes...). C'est aussi un lieu de passage obligé pour les espèces amphihalines\* (saumon, truite de mer, lamproie, esturgeon) lors de leur migration. Cette zone s'avère être un système complexe, composé d'une grande diversité de milieux présentant des gradients de salinités et de profondeurs.

**\_En zone intertidale\*** la valeur ornithologique de l'estuaire s'explique par la présence de biotopes complémentaires : zones d'eau libre, vasières, prairies inondables, à laquelle s'ajoute l'effet positif de la rencontre entre eaux douces et eaux marines. Ces milieux assurent alors des zones de :

- Séjour, de nombreuses espèces s'y arrêtent par milliers lors d'étapes migratoires,
- Nourrissage, soulignant le rôle important de nombreux oiseaux dans la chaîne trophique.
- Nidification, assurant le maintien de certaines espèces et contribuant à qualifier l'importance et la valeur ornithologique d'un estuaire.

Ces zones humides constituent un domaine naturel assez exceptionnel et sont constituées d'écosystèmes en fortes interactions les uns avec les autres, ces milieux sont (figure 2) :

- les vasières à forte productivité et à l'origine de réseaux alimentaires complexes, La vasière peut être considérée en deux parties distinctes :
  - La slikke (du néerlandais "slijk" = boue) ou vasière. La limite haute de cette zone correspond aux hautes mers de morte eau\*. C'est un milieu saumâtre (concentration en sel de l'ordre de 10 g/l). Dans sa partie basse, cet estran vaseux ou sablo-vaseux est aisément remanié par le flot et cette instabilité rend la fixation végétale impossible. Cependant, la slikke est très biogène car de nombreuses larves ou juvéniles d'organismes marins s'y regroupent lors de leur développement (crevettes, coquilles Saint-Jacques, poissons...). Elle joue donc un rôle de nurserie, mais également de nourricerie. La slikke joue donc un rôle important dans le transit de matières, le zoobenthos y est



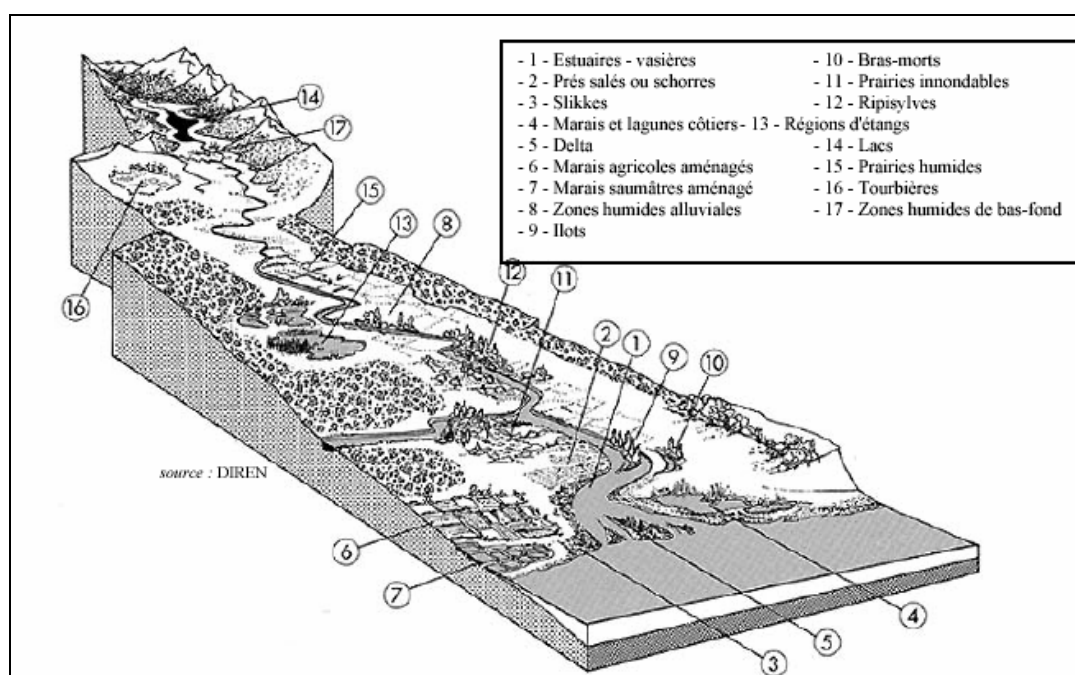
fortement présent et les flux trophiques permettent l'alimentation de nombreuses espèces (avifaune, ichthyofaune) (Etudes sur l'eau n°89. Agences de l'eau).

- Le schorre (du néerlandais "schor" = pré-salé) ou herbu, est la partie haute des vasières littorales, plus ferme et présentant un couvert végétal plus fort que la slikke. Il n'est submergé que lors des grandes marées et des tempêtes. Le schorre est très souvent mis en pâture du fait de la présence d'une végétation halophile pionnière supportant un contact non submersif mais quotidien avec les eaux salées.
- les roselières et les prairies sub-halophiles jouent un rôle épurateur, mais aussi d'abris d'hivernage et assure une nourriture abondante pour de nombreuses espèces d'oiseau (rousserolles, butors, limicoles, canards),

Ces différents milieux sont soumis aux variations cycliques des hauteurs d'eau (zones de marnage) pouvant être à la fois des lieux de sédimentation et de remobilisation de sédiment.

En zone supratidale\*, il est possible de retrouver des milieux tels que les prairies humides avec leur riche flore et leur rôle de site de reproduction et d'étape migratoire. Mais aussi, les marais littoraux, formés par l'accumulation plus ou moins permanente d'eau douce continentale dans les dépressions, soustraites au rythme des marées. L'eau y est plus ou moins saumâtre car l'eau de mer y parvient par infiltration ou lors des tempêtes, favorisant ainsi les espèces halophiles. Les marais littoraux abritent une faune riche et variée. On y trouve par exemple de nombreux batraciens et de multiples insectes.

([www.univ-lehavre.fr/cybernat](http://www.univ-lehavre.fr/cybernat))



**Figure 2: Les différents milieux présent sur un estuaire**

La diversité des milieux de l'estuaire induit une flore riche et de répartition variée en fonction de la salinité du substrat et du niveau d'eau. Des espèces remarquables sont ainsi présentes, et font l'objet de protection spéciale. La diversité floristique contribue donc à une mosaïque de milieux constitutifs de l'intérêt de l'estuaire.

\_L'estuaire représente un axe majeur dans le trafic de marchandises, il a donc une très forte valeur économique pour la région où il se situe. Cette activité portuaire, souvent intense, sur un estuaire implique des infrastructures (port, complexes industriels) et des aménagements souvent lourds (digues, chenalisation...) afin d'assurer le trafic portuaire.

L'estuaire est aussi un moteur économique par la pêche professionnelle, le développement des loisirs (pêche, chasse, voile...) et l'exploitation de sédiment par extraction.

L'estuaire est une zone de transition entre deux milieux bien différents, c'est ce qui lui assure une diversité de paysages et d'espèces tant animales que végétales. Lieux de transit et de concentration des populations, l'estuaire est un moteur pour l'économie locale permettant une liaison entre le domaine maritime et l'intérieur du pays. C'est pour cela qu'une prise en compte de tous ces enjeux présents sur l'estuaire est nécessaire afin d'en assurer sa pérennité.

Sources : [www.seine-aval.crihan.fr](http://www.seine-aval.crihan.fr) ; Cotten (1996) : *La Gironde un écosystème estuarien*.

### **3) Présentation des estuaires**

#### **3.1) L'estuaire de la Gironde**

##### **➤ Ses caractéristiques :**

Principal exutoire hydrographique du bassin Aquitaine, l'estuaire de la Gironde entaille la façade Ouest Atlantique vers 45°36' de latitude Nord et 1°08' de longitude Ouest. C'est un estuaire occupant à marée haute une superficie de 625 Km<sup>2</sup>, il s'agit du plus grand estuaire Français avec une longueur de 170 Km.

L'estuaire de la Gironde draine un bassin versant d'une superficie de 81 000 Km<sup>2</sup>. La large ouverture sur l'océan qu'offre l'estuaire de la Gironde se confronte à une double influence fluviale avec:

- la Garonne, longue de 580 Km, elle draine un bassin versant de 57 000 Km<sup>2</sup> et prend sa source en Espagne dans le Val d'Aran,
- la Dordogne, longue de 484 Km, elle draine un bassin versant de 24 000 Km<sup>2</sup> et prend sa source dans le département du Puy de Dôme au Mont Dore (Mauvais, & Guillaud, 1994).

Ces deux réseaux hydrographiques confluent au Bec d'Ambès.

L'estuaire de la Gironde couvre les départements de la Charente-Maritime et de la Gironde mais aussi deux régions le Poitou-Charentes et l'Aquitaine. En plus de ses limites administratives l'estuaire de la Gironde est à cheval entre deux cultures : en rive gauche la culture Bordelaise viticole et en rive droite la culture du pays Charentais.

Le bassin versant de la Gironde semble, avec une pression anthropique faible et une dynamique industrielle moyenne, être relativement peu pollué. La Gironde est ainsi fréquemment considérée comme l'estuaire européen ayant conservé le comportement le plus « naturel ».

➤ **Evolution et aménagement de l'estuaire depuis le siècle dernier :**

En Gironde pendant très longtemps la navigation s'est effectuée sans que les profondeurs aient été gênantes pour les bateaux qui profitaient de la marée pour remonter jusqu'à Bordeaux. Avec l'augmentation du tirant d'eau des navires, des problèmes de navigation sont apparus, liés à des chenaux nombreux, des passages sinueux entre les bancs et les îles ou encore à des franchissements de seuils et de passes. Des travaux d'aménagement de l'estuaire (annexe 1) ont alors été prévus au milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle afin de permettre le passage des bateaux.

Deux périodes d'aménagement sont distinguables :

- 1850-1939 : Où la régularisation des rives et à la construction d'ouvrage de calibrage de courant a été réalisée. Ainsi la profondeur minimale sur différents seuils passe de 1 m à près de 3 m sous étiage. A la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle le tracé du chenal et les profondeurs entre Ambès et Bordeaux sont améliorées avec un maintien des fonds entre -3.5 m et -4 m. En 1939, grâce aux travaux de calibrage et aux dragages d'approfondissement, le chenal navigable présentait, sur une largeur de 200 m environ, des profondeurs de l'ordre de 5 m sous étiage.
- 1939-1993 : Où les travaux consistent surtout :

\_à l'approfondissement du chenal au moyen de dragages. Depuis les années soixante le volume annuel moyen dragué au titre de l'approfondissement du chenal est de l'ordre du million de m<sup>3</sup>.

\_à l'entretien des chenaux par dragage également, vers 1975 les volumes extraits sont de l'ordre de 10 millions de m<sup>3</sup> par an, dans les années 90 cette valeur est réduite d'un tiers passant à 7 millions de m<sup>3</sup> par an (Mauvais & Guillaud 1994).

### 3.2) L'estuaire de la Loire

#### ➤ Ses caractéristiques :

L'estuaire de la Loire se situe au centre de la façade Ouest Atlantique de la France, il se localise plus au Nord que l'estuaire de la Gironde vers une latitude 47°15' Nord et une longitude de 1°40'Ouest ([www.loire-estuaire.org](http://www.loire-estuaire.org)). D'une superficie de 55 Km<sup>2</sup> à marée haute et d'une longueur de 95 Km, l'estuaire de la Loire est plus étroit que l'estuaire de la Gironde (Anonyme, 2000).

La Loire, plus long fleuve de France (1020 Km), prend sa source dans le département de l'Ardèche au mont Gerbier de Jonc et draine le plus grand bassin versant de France (109 930 Km<sup>2</sup>). Ce bassin versant est plus développé (1.6 fois plus grand) et riche que celui du système Garonne - Dordogne ([www.loire-estuaire.org](http://www.loire-estuaire.org)).

L'estuaire de la Loire se situe dans le département de la Loire-Atlantique en région des Pays de la Loire. C'est un lieu de transition entre la culture Bretonne et Vendéenne.

L'ensemble du bassin de la Loire semble peu pollué, bien que soumis à de fortes pressions agricoles. L'estuaire subit une pression anthropique très marquée. La Loire-Atlantique est l'un des départements les plus industrialisés de France avec une densité de population de 166 hab/Km<sup>2</sup> ([www.interieur.gouv.fr](http://www.interieur.gouv.fr)) La région possède un cadre de vie apprécié, qui repose notamment sur la grande richesse de ses milieux naturels et de son patrimoine : 15% du territoire régional sont identifiés au titre des milieux naturels remarquables.

#### ➤ Evolution et aménagement de l'estuaire depuis le siècle dernier :

Sous les actions naturelles et sous les interventions humaines, l'estuaire de la Loire a subi d'importantes modifications de sa géométrie au cours du dernier siècle se traduisant par un approfondissement et une régularisation de son chenal principal dans le but de faciliter le passage des grands navires à destination des ports de Nantes et de Saint-Nazaire, mais aussi par une variation du linéaire des rives et des surfaces marnantes.

Deux périodes sont également distinguables :

- \_du début du XIX<sup>ème</sup> siècle à 1976, de nombreux travaux ont été lancés afin de réunir les eaux en un chenal unique. Ces travaux incluent des dragages sur toute la période. Ils sont estimés en aval de Nantes entre 1.3 et 1.7 millions de m<sup>3</sup> par an de 1903 à 1959, principalement sur les sections intermédiaires et aval. A partir de 1960, ces valeurs passent entre 3.3 et 4.7 millions de m<sup>3</sup> par an avec une dominance dans la section aval, près de 45 % de l'extraction provient des dragages d'entretien. En amont de Nantes, les extractions de sable pour la création d'un bassin de marée au début puis pour la commercialisation des sables sont estimées en moyenne à 0.5 millions de m<sup>3</sup> par an avant 1960, à 1 millions de m<sup>3</sup> par an entre 1960 et 1965, à 2.1

millions de m<sup>3</sup> par an entre 1965 et 1970 puis 2.5 millions de m<sup>3</sup> par an entre 1960 et 1980.

- de 1976 à 1992, les opérations effectuées consistent à des dragages d'entretien, d'une moyenne de 6.5 millions de m<sup>3</sup> par an valeur plus élevée que dans la première partie du siècle ; à des extractions en amont de Nantes atteignant des valeurs de 1.25 millions de m<sup>3</sup> par an, valeur en régression par rapport à la première période de travaux ; mais aussi à des comblements de zones industrielles par la réutilisation d'une partie des matériaux de dragages.

Suite à ces travaux effectués sur l'estuaire, des modifications de son comportement sont notables. Ainsi, la partie de l'estuaire située en amont de Saint-Nazaire, l'estuaire moyen, constitué par des chenaux multiples sillonnant à travers de nombreuses îles, va atteindre une configuration régulière. Le colmatage naturel de l'estuaire a été accéléré par le remblaiement de zones limitrophes recouvertes par les marées de vives eaux\*, dans un but d'extension des zones industrielles, les vasières du secteur Montoire-Donge ont vu leur superficie diminuer fortement alors que celles situées plus en aval voient leur superficie augmenter de près de 50%. Les extractions massives en amont de Nantes ont causé une modification de la nature des fonds de l'estuaire, avec diminution des éléments sableux grossiers et augmentation des éléments fins, mais aussi une remontée de la marée dynamique ainsi que du bouchon vaseux et de l'intrusion saline (Migniot & Le Hir, 1997).

### **3.3) L'estuaire de la Seine**

#### **➤ Ses caractéristiques :**

Situé vers une latitude de 49°27' Nord et une longitude de 0°10' Est, l'estuaire de la Seine entaille la côte de la Manche au niveau de la Haute-Normandie (Le Hir & Silva Jacinto, 2001). Tout comme la Loire, l'estuaire de la Seine possède une superficie réduite (50 Km<sup>2</sup> à marée haute), et s'étend sur près de 160 Km de long jusqu'au barrage de Pose.

La Seine d'une longueur totale de 776 Km, prend sa source sur le plateau de Langres. Elle draine un bassin versant relativement proche de la superficie du bassin de l'Aquitaine avec 78 650 Km<sup>2</sup>. Ce bassin versant très industrialisé concentre 40 % de l'activité économique française et 50 % du trafic fluvial national, impliquant ainsi des aménagements lourds (Guézennec & al., 2001).

Deux pôles majeurs sont discernables sur l'estuaire: Rouen et Le Havre tous deux caractérisés par leur importance au niveau du transport maritime de marchandise.

L'estuaire de la Seine se situe à cheval sur 3 départements, la Seine-Maritime, le Calvados, l'Eure, et sur deux régions, la Haute et Basse Normandie. L'estuaire est ainsi ancré dans une culture purement Normande.

➤ **Evolution et aménagement de l'estuaire depuis le siècle dernier :**

Avant son aménagement au milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle, la Seine était un large système très divaguant et peu profond. Le chenal d'accès à Rouen n'offrait que des profondeurs maximales de 4.30 m en vives eaux et 1.80 m en mortes eaux (Migniot, 1991 in Lesueur & Lesourd 2001). De nombreuses îles divisaient alors son cours en plusieurs bras. Les difficultés de navigation sur un tel fleuve, alors comparable à la Loire actuelle en amont de Nantes ont conduit à partir de 1846, à des aménagements de grande ampleur (annexe 2) (Joubert & al. 1994 in Lesueur & Lesourd 2001).

Ainsi, la seconde moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle est caractérisée par l'endiguement de l'estuaire sur le tronçon situé entre La Mailleraye (pk\* 302) et le confluent de la Risle sur les deux rives, parallèlement l'approfondissement du chenal sur ce secteur fut réalisé. Le port du Havre entreprend le creusement du canal de Tancarville et d'une nouvelle passe d'accès portuaire au Nord-ouest pour pallier au comblement de la passe Sud-Ouest (annexe 3).

Le début du XX<sup>ème</sup> siècle est marqué par le prolongement des digues insubmersibles jusqu'à Honfleur afin d'éviter l'accentuation de la divagation du chenal dans l'estuaire moyen et aval et de le stabiliser.

Après la seconde guerre mondiale, les travaux d'endiguement se poursuivent vers l'aval, avec la construction de digues submersibles, la digue du Ratier et la digue basse nord, figeant ainsi le tracé de l'actuel chenal. La digue basse Nord est ensuite prolongée vers l'aval permettant l'extension des zones portuaires et industrielles, mais fermant aussi une importante zone de vasière.

Afin de continuer à gagner des surfaces sur l'estuaire le port du Havre construit dans les années 70 une digue en crochet à convexité aval. De même, la construction d'épis (principalement l'épi du Hode) a permis de limiter la circulation alternative des eaux à ces endroits créant des bassins de décantation se comblant par la suite. Dans les vingt dernières années des brèches ont été faites dans les digues submersibles afin d'éviter le comblement des chenaux Nord et Sud, la construction du remblai du pont de Normandie a également été réalisée provoquant une élévation des fonds en amont et une réduction d'espace. Ces travaux d'aménagement comprennent évidemment des travaux de dragage d'entretien du chenal de navigation de l'ordre de 4 millions de mètres cubes par an.

Suite à ces aménagements la profondeur disponible pour les navires passe de 3 m en 1850 à 10 m en 1980 (Migniot, 1991 in Lesueur & Lesourd 2001).

Cependant, ces travaux ont engendré des réajustements morphologiques et sédimentaires considérables. Ainsi, il est possible de constater :

\_une réduction du volume de l'estuaire sur différente section, la zone aval de l'estuaire, comprise entre Le Havre et Tancarville (Avoine, 1981 in Lesueur & Lesourd 2001).

\_un rétrécissement des zones intertidales, lié aux endiguements qui ont favorisé la sédimentation et le remblaiement de vasières pour étendre la zone industrielle et portuaire du Havre. Le comblement d'un taux moyen de + 0.6 m/an entre 1963 et 1986 et l'exhaussement des fonds ont permis au schorre de progresser très rapidement, de l'ordre de 50 m à plus de 150 m par an entre 1978 et 1985 et de 55 m par an entre 1985 et 1994.

Depuis 1978, près de 90 ha de vasières nues ont été colonisées par le schorre. Il ne subsiste pratiquement plus de zones intertidales en amont du pont de Normandie, les hauts niveaux se sont progressivement transformés en marais maritimes puis en roselières, révélatrices de la continentalisation de l'estuaire.

Ainsi, le contrôle de l'évolution morphologique de la Seine est considéré comme majeur depuis la fin des aménagements en 1980 (Lesueur & Lesourd, 2001).

Les trois grands estuaires français de cette étude présentent donc chacun des caractéristiques géographiques particulières. Cependant ils ont la caractéristique commune d'avoir subi un remaniement de leur géométrie durant la première partie du siècle dernier. Les aménagements effectués sur chaque estuaire ont modifié l'échelle de temps de l'évolution morphologique des estuaires, en passant d'une échelle géologique à une échelle humaine. Seul l'estuaire de la Gironde a su préserver un caractère relativement « naturel », mais il est possible de considérer que les estuaires « sauvages » du 18<sup>ème</sup> siècle ont définitivement disparu.

## **II/ Caractérisation de la morphologie des estuaires**

### **1) *Géologie du substratum***

La nature lithographique du socle rocheux de chaque estuaire va être décrite afin de mieux comprendre leur morphologie actuelle.

L'embouchure de la Gironde est caractérisée par une série d'affleurement de calcaire Eocène, entre la pointe de la Grave et Soulac. La zone centrale de l'embouchure est soutenue par un vaste haut fond calcaire qui affleure à l'île de Cordouan et dans les hauts-fonds environnants. En aval du bec d'Ambès jusqu'à Blaye et dans la moitié gauche, le substratum est formé par l'Eocène supérieur, puis par l'Eocène moyen en aval de Saint-Christoly et dans la moitié droite de l'estuaire. En amont du bec d'Ambès, au niveau de la Dordogne, le substratum est formé par les calcaires de l'Eocène supérieur, en Garonne se sont les marnes de l'Oligocène inférieur qui dominent (annexe 4) (Allen, 1972).

La géologie tourmentée de l'estuaire de la Loire est constituée de roches dures et anciennes (formation métamorphiques et granitiques). Ainsi l'estuaire se trouve dans une vaste

dépression enclavée entre deux coteaux : le sillon de Bretagne et le coteau Saint-Père-en-Retz. Ces pointements rocheux imposent son tracé au fleuve. Au-delà de Couëron, le lit s'étale au Sud du sillon de Bretagne et prend la forme d'un entonnoir ouvert en direction du Nord-Ouest. Il s'infléchit ensuite progressivement vers l'Ouest puis le Sud-ouest au passage des barres rocheuses de Donges/Paimboeuf et de Saint-Nazaire/Mindin, fermant véritablement le fleuve à son embouchure. Cette succession d'étranglement et d'élargissement complexifie notablement la configuration des courants et contraint les chenaux à divaguer successivement entre les deux rives de l'estuaire (Lebret, 2001).

L'embouchure de la Seine, quant à elle est caractérisée par des calcaires argileux (le Kimméridgien), plus en amont jusqu'à Tancarville. La basse Seine passe dans une auge encadrée de falaise et dont le fond est composé de sable et de marne (l'Aptien et l'Albien). En aval de Rouen, le substratum rocheux de la Seine est constitué de formation d'âge secondaire où l'estuaire se serait établi à la fin de l'ère tertiaire (annexe 5) (Lesueur & Lesourd, 2001).

## **2) Origine des estuaires**

Les trois estuaires étudiés ont acquis chacun leur morphologie actuelle d'événements passés. En effet, se sont des vallées incisées résultant de l'érosion active des fleuves lors de la dernière glaciation Würmienne (30 000 ans BP). Lors de cette période le niveau marin chute et atteint un minimum il y a 18 000 ans contribuant à l'incision des vallées. La Garonne, la Dordogne, la Loire et la Seine creusent alors leur lit dans le substratum du tertiaire. Lors de la dernière phase de refroidissement, la mer se trouvait à un niveau de 120 m en dessous de son niveau actuel engendrant de fortes pentes d'écoulement, des variations très brutales du débit fluvial et assurant le creusement des vallées par les « paléo-fleuves ».

L'histoire géologique des estuaires se poursuit par un comblement dû à la transgression flandrienne à l'Holocène. Dans les zones tempérées, un comblement des estuaires a débuté lors du ralentissement de l'élévation du niveau marin et depuis la stabilité post-Holocène, il y a 5 000 (Nichols & Biggs, 1985, *in* Lesourd, 2000) ou 4 000 ans B.P. (Fairbanks, 1989 ; Allen & Posamentier, 1993, *in* Lesourd, 2000). Un autre facteur du comblement estuarien, est la production de sédiments associée à l'alimentation par les fleuves (Boyd & *al.* 1992 ; Chappell & Woodroffe, 1994, *in* Lesourd, 2000).

La transgression Flandrienne s'est effectuée par étape (figure 3), ainsi:

—Entre **10 000 et 8 000 ans BP** le taux de remontée de la mer est le plus fort et atteint un niveau de -15 m par rapport au niveau actuel. La remontée du niveau marin va conduire à un remblaiement intense de la partie aval de l'estuaire, par un apport de matériaux marins



grossiers (sable, graviers, galets). La remontée du niveau marin engendre un changement de régime fluvial par une baisse d'énergie du système par réduction de pente. La fin de cette période est caractérisée par une légère phase de régression (9000-8500 BP), où l'apport de matériaux fins (colluvions argileux, matériaux organiques) vient recouvrir la nappe de fond précédemment établie en remaniant sa couche superficielle pour former des argiles sableuses.

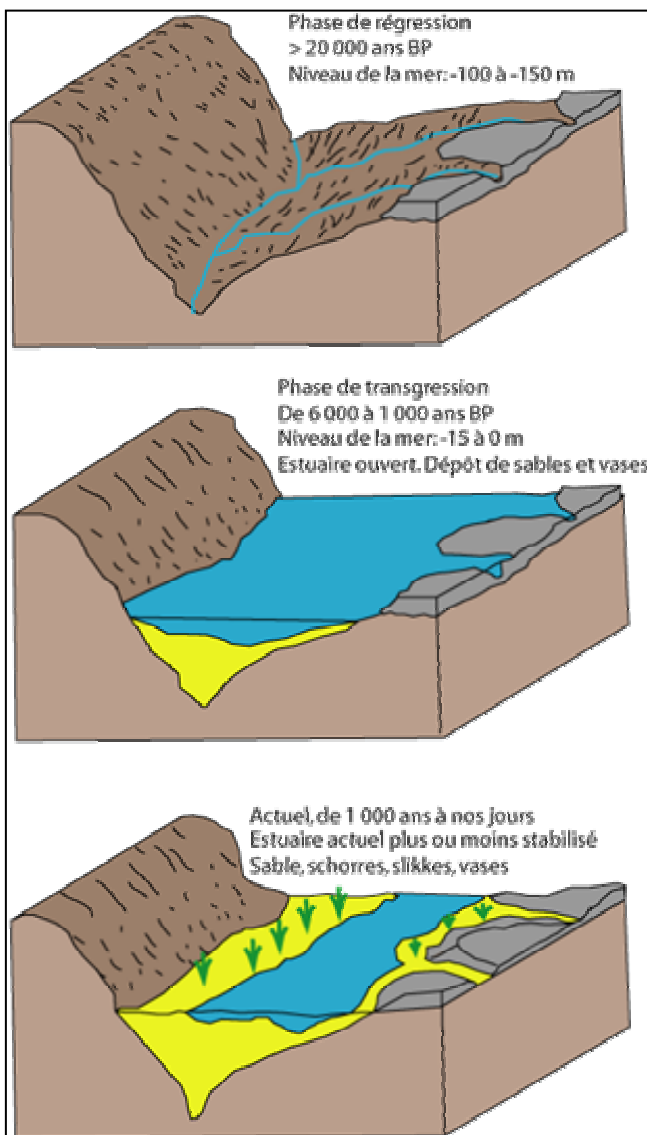
Ainsi les paléo-vallées des trois fleuves se comblent d'une part de sédiments grossiers poussés par la transgression, mais aussi de sédiments continentaux fins et organiques provenant d'un changement du systèmes fluvial.

On assiste donc à une phase de comblement important des parties aval de la paléo-vallée de chaque estuaire, les surfaces gagnées sur la paléo-vallée permettent la mise en place de

milieux connexes à l'estuaire comme des marais et des prairies humides.

Entre 6 000 ans BP et le présent, la transgression se poursuit pour arriver au niveau actuel de la mer, les estuaires sont envahis par de très gros volumes d'eau de mer, le comblement des estuaires se poursuit par des dépôts d'origine continentale constitué de sable coquiller et fin, d'argile, de matériaux organiques mais aussi marin avec surtout des matériaux plus fins que précédemment (silt-limon\* 2 - 50µm) (Ottman, 1965)

Cette période marque donc l'installation du régime estuarien pour la Gironde, la Loire et la Seine. Les estuaires de l'étude ont tous trois acquis leur géométrie d'événements géologiques datant de la dernière glaciation du Würmien et de la transgression Flandrienne. Ils se sont formés à partir de conditions climatiques semblables qui ont ainsi influencés leur géométrie et leur fonctionnement.



**Figure 3 : Evolution schématique de la morphologie des estuaires**

(D'après Mauvais & Guillaud, 1994)

### **3) Classification géomorphologique**

Plusieurs classifications ont été mises en place afin de caractériser un estuaire, ainsi :

\_Pritchard (1960), distingue les vallées noyées par la transgression flandrienne, les fjords, les estuaires formés par la migration des barres littorales (« bar-built estuaries » ou lagons côtiers), et les estuaires tectoniques,

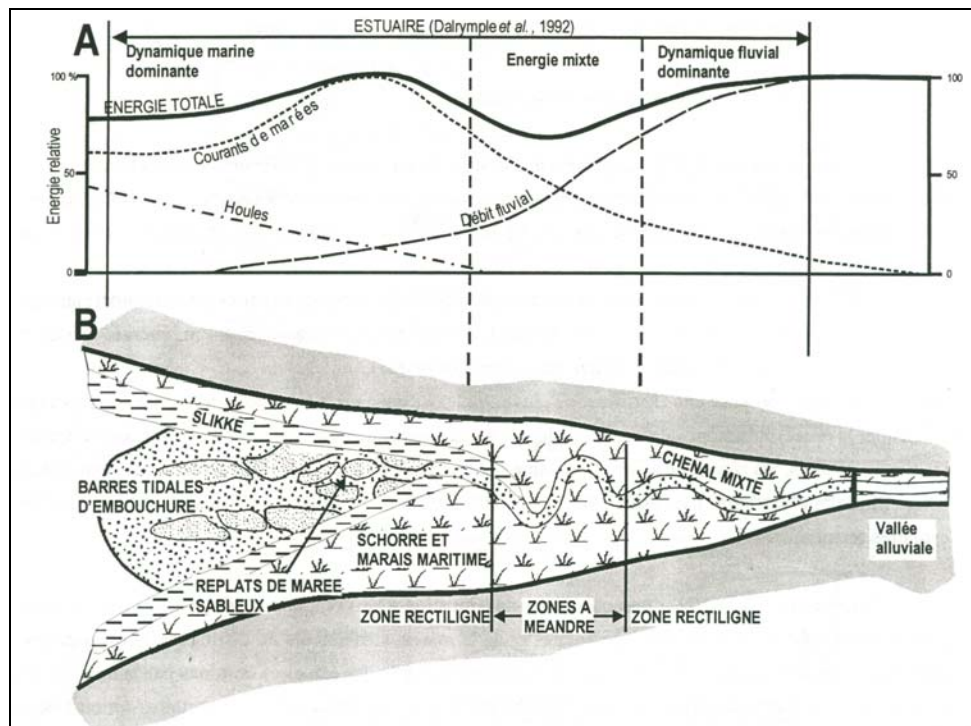
\_Hayes (1975), classe les estuaires selon leur marnage. Il différencie les estuaires microtidaux possédant un marnage inférieur à 2 m, dominés par l'action du vent et des vagues ; des estuaires mésotidaux dont le marnage est compris entre 2 et 4 m, possédant une énergie mixte ; des estuaires macrotidaux dont le marnage est supérieur à 4 m, dominés par les courants de marée,

\_Fairbridge (1980), propose une classification basée sur la morphologie de l'embouchure et le mode de circulation des eaux. Cette classification permet de distinguer les fjords et fjards, les rias, les estuaires de plaine côtière plus ou moins ouverts sur la mer, les estuaires à barres littorales (« bar-built »), les estuaires aveugles (temporairement fermés), les estuaires deltaïques et les estuaires tectoniques.

\_Dalrymple & al. (1992) proposent une classification intégrant la notion d'environnement sédimentaire et combinant l'importance relative de la rivière, des vagues et de la marée. Ces auteurs ne distinguent ainsi que trois principaux types d'estuaires : les estuaires dominés par la marée, les estuaires dominés par la houle et les estuaires mixtes (figure 4).

\_Perillo (1995) prend en compte des considérations génétiques et morphologiques. Il distingue les estuaires principaux, formé lors de la dernière transgression, des estuaires secondaires formés par les processus marins récents ou sub-actuels (dérive littorale, etc....). Parmi les estuaires principaux, il distingue les anciennes vallées fluviales (estuaires de plaine côtière et rias), les anciennes vallées glaciaires (fjords et fjards), les estuaires dominés par la dynamique fluviale (rivière tidale et estuaires de front de delta) et les estuaires structuraux (d'origine tectonique).

Ces classifications ne prennent pas en compte l'influence anthropique affectant les caractéristiques morphologiques et sédimentaires des estuaires. L'évolution récente des estuaires est due à des perturbations incluant la déforestation, l'agriculture et la construction de barrages au niveau du bassin versant (Milliman & Meade, 1983 ; Lesueur & al., 1996 ; Mouchel & al., 1998. *In* Lesourd, 2000). Au niveau de l'embouchure, les activités agricoles et industrielles conduisent à des travaux de poldérisation tandis que les impératifs de navigation conduisent à la construction de digues et à un dragage intensif.



**Figure 4 : Estuaire dominé par la marée selon la classification de Dalrymple & al., 1992.**

*A. Distribution des processus dynamiques le long de l'estuaire figuré en B.*

*B. Distribution des principaux composants morphologiques.*

*In Perillo (1995), modifié d'après Dalrymple & al., 1992.*

*D'après Lesourd, 2000. Non modifié*

Si l'on replace chaque estuaire selon les classifications précédemment citées, nous pouvons observer qu'ils sont tous les trois des estuaires dont la vallée a été noyée lors de la dernière transgression Flandrienne selon la classification de Pritchard (1960) et de Perillo (1995) (voir II-2). D'après la classification de Hayes (1975) les estuaires de la Gironde, de la Loire et de la Seine sont des estuaires macrotidaux car ils possèdent un marnage supérieur à 4 m (voir III-2.1). Se sont également des estuaires de plaine côtière plus ou moins ouverts sur la mer (voir III-3.1 marnage relatif) (Fairbridge, 1980 ; Perillo, 1995) avec une influence des marées dominantes (Dalrymple & al., 1992)

Ainsi, en plus d'avoir des origines géologiques communes (dernière glaciation et transgression Flandrienne) les trois estuaires montrent qu'ils sont également tous les trois soumis à une influence dominante de la marée (estuaires macrotidaux).

#### **4) Morphologie descriptive**

Selon les classifications précédemment citées, il est possible de définir différentes parties de l'estuaire.

Ainsi, Fairbridge (1980) (*in* Guézennec, & al., 2001) propose une définition et un découpage de l'estuaire en plusieurs secteurs:

« Un estuaire est un bras de mer pénétrant une vallée fluviale jusqu'à la limite amont de propagation de la marée, habituellement divisible en 3 secteurs :

- \_un bas estuaire ou estuaire marin caractérisé par la prédominance de l'eau salée,
- \_un estuaire moyen sujet à d'importants mélanges entre eaux douces et eaux salées, caractérisé par la présence du bouchon vaseux,
- \_un haut estuaire ou estuaire fluvial caractérisé par de l'eau douce, ce compartiment subit tout de même l'influence de la marée dynamique, cette zone est considérée comme étant plus fluviale qu'estuarienne. Les limites entre ces trois secteurs sont variables et sujettes aux constantes variations du débit fluvial.»

Bas et moyen estuaires sont souvent regroupés sous le terme d'estuaire « proprement dit ». Cette compartimentation est essentiellement liée aux caractéristiques hydrologiques du système estuarien, les étendues de chaque compartiment peuvent varier selon trois échelles temporelles : la saison (en fonction du débit fluvial) d'une part, une échelle bimensuelle au cours du cycle mortes eaux - vives eaux d'autre part, et enfin une échelle quotidienne au cours du cycle pleine mer - basse mer.

#### ➤ Zonation interne de l'estuaire de la Gironde :

La subdivision de l'estuaire permet de distinguer trois compartiments mais aussi les limites longitudinales de l'estuaire (carte 1):

**\_l'estuaire marin**, limité à l'aval par la flèche de la Coubre, la partie occidentale de l'île de Cordouan et la pointe de la Grave, en amont sa limite se situe au niveau de Mortagne. L'estuaire marin est caractérisé par deux chenaux: le chenal de navigation longeant la rive gauche et le chenal de Saintonge longeant la rive droite jusqu'à Mortagne, ils sont séparés par une succession de hauts fonds, d'îles ou de bancs de sables,



**Carte 1 : L'estuaire de la Gironde et ses limites longitudinales**

*D'après Livre blanc de l'estuaire de la Gironde, 1994, modifié*

**\_l'estuaire moyen**, s'étend de Mortagne jusqu'à la limite de l'influence remontée de la marée de salinité située à 100 Km de l'embouchure au niveau du bec d'Ambès. Cette partie est caractérisée par des bras et des chenaux secondaires, séparés par des bancs de sable ou des îles, représentant l'action croissante vers l'aval des courants de marée. Cette grande complexité topographique manifeste un caractère de rivière anastomosée, typique des écoulements à forte pente et charges sédimentaires trop importantes pour l'écoulement moyen (Léopold & Wolman, 1967 *in* Allen, 1972).

**\_l'estuaire fluvial**, poursuit l'estuaire moyen jusqu'à la limite d'influence de la marée dynamique à 170 Km en amont de l'embouchure, à La Réole pour la Garonne et Pessac pour la Dordogne. La Dordogne et la Garonne présentent dans cette partie les caractéristiques de cours d'eau à méandre bordés par des bourrelets alluviaux et un chenal unique (Cotten, 1996). D'autre part le caractère non marin de ce milieu est souligné aussi par la quasi absence de zones intertidales. Celles-ci, dans cette partie de l'estuaire ne font qu'une cinquantaine de mètres de largeur au maximum (Allen, 1972).

Latéralement, les limites de l'estuaire s'arrêtent aux zones humides des marais, indissociables de ce milieu.

#### ➤ **Zonation interne de l'estuaire de la Loire:**

Les limites longitudinales de l'estuaire de la Loire selon la classification de Fairbridge (1980) correspondent à (carte 2):

- **l'estuaire marin**, est la partie purement maritime de l'estuaire, elle se limite à l'amont par l'alignement constitué par la pointe Saint Gildas et le phare du Charpentier.
- **l'estuaire moyen**, s'étend de Saint-Nazaire jusqu'à Nantes (pk 55) cette partie est subdivisée en 3 zones distinctes :
  - la section aval dite de transition, comprise entre les goulets de Saint-Nazaire et de Paimbœuf,
  - la section intermédiaire à caractère fluviomaritime de Paimbœuf au canal de la Martinière,
  - la section endiguée, de 156 Km de long allant de Pellerin à Nantes avec une dominance du régime fluvial

Cette partie appelée « l'écharpe verte » présente entre les deux ports maritimes de l'estuaire (Nantes et Saint-Nazaire), un espace intermédiaire où les pressions anthropiques sont moindres permettant la succession de vasières et de roselières.

- **l'estuaire fluvial**, se prolonge jusqu'à la limite de la marée dynamique à Ancenis situé à près de 95 Km de l'embouchure. Cette partie est fortement endiguée (Ouraq, 1996).

De même que pour l'estuaire de la Gironde, les limites latérales de l'estuaire de la Loire se cantonneront à la limite des zones humides associées à l'estuaire.



**Carte 2 : L'estuaire de la Loire et ses limites longitudinales**

*D'après Ouraq, 1996, modifié*

#### ➤ Zonation interne de l'estuaire de la Seine :

Selon la définition de Fairbridge (1980), l'estuaire de la Seine est hiérarchisé en trois secteurs (carte 3):

- **l'estuaire marin**, s'étend de la limite Est de la baie de Seine jusqu'à l'aval de Honfleur (pk\* 364,77). On y distingue 3 chenaux : le chenal principal, le chenal Nord et le chenal Sud, séparé par des barres sableuses : le banc du Ratier et le banc intermédiaire. Le chenal principal ou chenal de navigation est bordé au Sud par la digue basse du Ratier et au Nord par la digue basse Nord. Les chenaux Nord et Sud sont des reliques d'anciens chenaux de navigation et sont en voie de comblement.
- **l'estuaire moyen**, correspond à la zone de mélange entre eaux douces et eaux salées. Cette zone s'étend de l'aval de Honfleur (pk 364,75) jusqu'aux environs de Vieux-Port (pk 324). Cette limite varie en fonction des conditions de marée et des conditions hydrologiques, entre Tancarville et Caudebec. L'estuaire moyen est le siège du bouchon vaseux, le lit de la Seine y est délimité par deux digues insubmersibles avec un chenal bordé sur sa rive droite par une vasière,
- **l'estuaire fluvial**, l'amont de ce secteur est matérialisé par le barrage de Poses (pk 202), limite artificielle à la propagation de la marée. En aval, de ce secteur s'étend la

limite amont de l'estuaire moyen. La Seine y présente les caractères d'une rivière à méandres. Le chenal est maintenu à une côte constante par dragage. Les zones intertidales sont pratiquement inexistantes du fait de l'étroitesse du lit fluvial. La partie de l'estuaire en aval de Rouen est entièrement endiguée et seuls quelques secteurs en amont de l'agglomération rouennaise présentent encore des berges «naturelles» ([www.univ-lehavre.fr/cybernat](http://www.univ-lehavre.fr/cybernat)).



**Carte 3 : L'estuaire de la Seine et ses limites longitudinales**

*D'après GIP-SA modifié*

### **5) Morphologie quantitative**

Certains paramètres géométriques peuvent être calculés afin de définir la morphologie d'un estuaire. Nous pouvons ainsi retenir les évolutions de largeur, de profondeur et d'aire d'une section. Ces paramètres entrent tous dans l'établissement de l'évolution des sections que nous retiendrons pour analyser les estuaires. En effet, ce paramètre permet de se rendre compte de l'étranglement de l'estuaire jouant un rôle important dans leur hydrodynamisme.

Ainsi, Bonnefille, 1970 in Allen 1972, a mis en équation l'évolution des sections de la Gironde :

$$A_M = (1.2 \cdot 10^5) (10^{-X/67.5})$$

Où  $x$  représente la distance en amont de l'embouchure et  $A_M$  est la superficie moyenne de la section ( $m^2$ )

Il en ressort que la Gironde se trouve dans un estuaire de forme exponentielle, où les paramètres géométriques progressent exponentiellement d'amont en aval suivant une certaine régularité (Annexe 4).

L'évolution des sections sur l'estuaire de la Loire a également été calculée par Migniot & Le Hir en 1997 et donne:

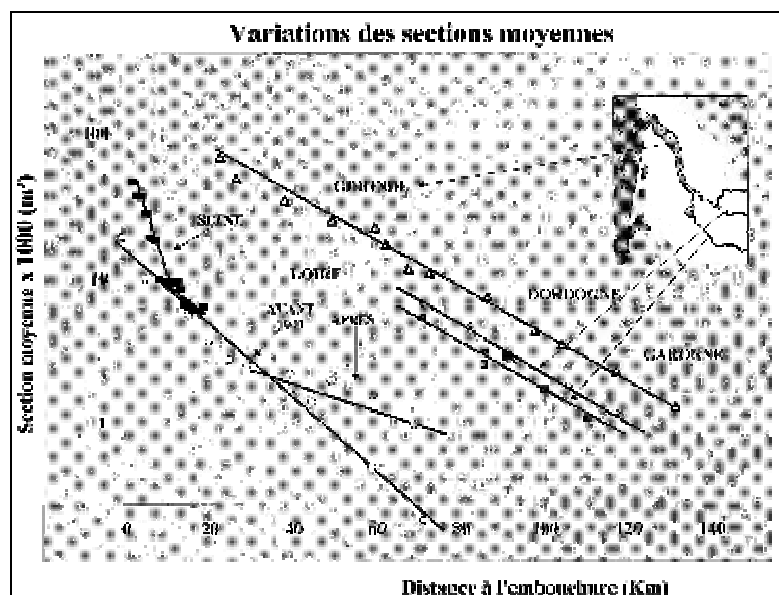
$$S_x = S_0 e^{-0.045X}$$

Où x représente la distance en amont de l'embouchure et  $S_0$  est la superficie moyenne de la section à l'embouchure ( $m^2$ ).

Nous n'avons pas recueilli de données concernant l'équation de l'évolution des sections sur la Seine mais des informations ressortent tout de même de la figure 4.

Ainsi, il nous est possible d'effectuer une comparaison des variations de sections en fonction de la distance à l'embouchure sur les trois estuaires actuels. Le graphique montre que la Loire et la Seine ne suivent pas une évolution exponentielle progressive des sections, mais indique à environ 35 Km de l'embouchure pour la Loire et 10 Km pour la Seine, un changement brutal des sections. Ce changement peut s'expliquer par les aménagements fait sur ces deux estuaires. En effet, il est possible de remarquer pour la Loire que la variation des sections, avant les aménagements en 1940, suit une équation exponentielle comme l'estuaire de la Gironde, et qu'après les aménagements les sections se sont modifiées.

Ainsi les estuaires de la Loire et de la Seine ont vu leur géométrie se modifier fortement suite aux aménagements effectués dans le siècle dernier. La Gironde quant à elle, a gardé une variation exponentielle de ses sections, du fait d'aménagement moins contraignants et d'un fonctionnement plus naturel.



**Figure 5 : Comparaison des sections moyennes sur chaque estuaire**

D'après L.A. Romana, communication R. Hocdé, GIP-SA



### **III/ Caractérisation du fonctionnement hydrodynamique des estuaires**

L'hydrodynamisme d'une zone côtière est défini par des processus généralement physiques se sont les forçages\*, mais aussi la configuration des fonds. On peut distinguer différents types de forçage, les forçages externes, qui sont essentiellement la marée et le vent, et les forçages internes à la masse d'eau, principalement constitués par des différences de densité (gradient de densité) phénomène très important en estuaire du fait de la rencontre entre les eaux douces apportées par la rivière et les eaux salées marines (Le Hir, P. & Silva Jacinto, 2001).

Deux phénomènes régissent donc l'hydrodynamisme d'une zone estuarienne : l'hydrologie du bassin versant drainé et les marées. Nous verrons les caractéristiques de chacun de ces phénomènes qui nous permettront de comprendre comment s'effectue la stratification des eaux, mais aussi par la suite les processus sédimentaires (bouchon vaseux, transport de sédiments) ayant lieu dans un estuaire.

#### **1) Hydrologie**

Le débit liquide d'un fleuve est le facteur primordial pour l'interprétation des phénomènes liés au système fluvial. Il joue un rôle capital pour le transport de sédiments, l'irrigation, etc.... De façon moins importante, il joue parfois un rôle dans la granulométrie et la minéralogie des sédiments fluviaux (Manickam, 1980).

Nous allons ici nous intéresser à l'hydrologie de chaque estuaire, afin de les caractériser les uns par rapport aux autres et de comprendre, par la suite, comment les débits fluviaux peuvent intervenir dans l'hydrodynamisme estuarien et jouer un rôle important dans le transport de sédiments.

L'estuaire de la Gironde subit les effets cumulés de la Garonne et de la Dordogne. Nous nous attacherons à définir les régimes hydrologiques ainsi que les débits caractéristiques d'un tel système.

En amont de Toulouse, la forte pente caractérise le régime hydrologique de la Garonne par un débit très variable, qui est surtout lié à la fonte des neiges, dans cette région la Garonne est donc soumise à un régime nival. En aval de Toulouse, la pente est moins forte et le débit est contrôlé non seulement par la fonte des neiges (influence amont) mais aussi par les pluies. Le régime y est alors pluvio-nival. La Dordogne quant à elle, possède un régime hydrologique pluvial (Allen, 1972). La Gironde est donc caractérisée par des étiages en août-septembre de débit moyen mensuel de  $235 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  et des crues d'hiver avec un maximum

moyen mensuel en janvier de  $1450 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  les crues extrêmes peuvent atteindre  $7\,500 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  (Allen 1972 ; Castaing, 1981 ; Latouche & Jouanneau, 1994 in Mallet 1998). Le débit moyen inter-annuel à l'entrée de l'estuaire de la Gironde est de  $989 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  (Mauvais & Guillaud, 1994) sur une période de près d'un siècle, avec des moyennes annuelles allant de  $518 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  pour une année sèche (1989) à  $1302 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  pour une année humide (1966), et des débits instantanés compris entre  $100 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  et  $7\,000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  (Taillez, 2004). La Gironde présente une variabilité interannuelle forte, décembre apparaissant comme le mois le plus variable ( $4191 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  en 1965 et  $318 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  en 1985) (Mauvais & Guillaud, 1994). La contribution de la Garonne aux apports d'eau dans l'estuaire, avoisine les deux tiers avec un débit moyen journalier de  $647 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ . La Dordogne avec un débit moyen journalier de  $342 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  contribue pour sa part au tiers restant. Pour une année hydrologique moyenne, les débits supérieurs à  $1\,200 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  représentent 25 % du temps des apports et amènent 55 % du volume d'eau entrant dans l'estuaire (Taillez, 2004).

La Loire est un des fleuves les plus irréguliers de France par sa pente, son régime et les vents qui alimentent en pluie et en neige son bassin versant. Elle est donc sous l'influence d'un régime hydrologique complexe.

Le débit moyen interannuel de la Loire à Montjean-sur-loire situé à quelques kilomètres en amont d'Ancenis est de  $830 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  pour la période 1990-2003, avec des moyennes inter-annuelles allant de  $438 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  pour une année sèche (1990) à  $1368 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  pour une année humide (1994), et des débits instantanés compris entre  $100 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  et  $5\,600 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ . Les débits instantanés extrêmes furent enregistrés lors de la crue en décembre 1910 à  $6\,300 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  et en étiage en août 1949 à  $49 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  (Taillez, 2004).

Pour une année hydrologique moyenne, les débits supérieurs à  $1\,000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  représentent 25 % du temps et amènent 60 % du volume d'eau entrant dans l'estuaire (Taillez, 2004).

Le bassin versant de la Seine est soumis à un régime pluvial océanique modéré avec des périodes hivernales de type continental froid et sec. Le débit de la Seine est donc contrôlé par les épisodes de pluies saisonnières à périodicité hivernale.

A l'entrée de l'estuaire de la Seine (Poses) le débit moyen inter-annuel est de  $418 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  pour la période 1960-1993 (Le Hir & Silva Jacinto, 2001), alors qu'il est de  $500 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  sur la période 1994 - 2003. Sur la période 1994 - 2003, les moyennes annuelles passent de  $334 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  pour une année sèche (1996) à  $902 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  pour une année humide (2001), et des débits instantanés compris entre  $60 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  et  $2\,280 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  (Taillez, 2004). Les débits instantanés extrêmes ont été enregistrés en août 1992 à  $40 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  lors d'une période de sécheresse et à  $2\,480 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  lors de la crue de 1882 (Garnaud, 2003). Pour une année

hydrologique moyenne, les débits supérieurs à  $800 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  représentent 25 % du temps et amènent 50 % du volume d'eau entrant dans l'estuaire (Taillez, 2004).

Il est ainsi possible de souligner le caractère plus ou moins capricieux du régime hydrologique des trois fleuves. La Seine est assurément la plus régulière : les valeurs de débits journaliers extrêmes mesurées s'écartent au maximum d'un facteur de 4.5 du débit inter-annuel moyen. La Loire et le système Garonne-Dordogne ont respectivement des facteurs de 6.7 et 7 révélant un caractère plus capricieux. Le système Garonne-Dordogne a des débits extrêmes plus éloignés des valeurs de débit moyen que la Loire, qui elle atteint des débits extrêmes plus fréquemment. Ainsi, nous pouvons considérer que le système Garonne-Dordogne possède une plus grande variabilité de son régime hydrologique suivit de la Loire et enfin de la Seine (Taillez, 2004).

## 2) Le marnage et les surfaces marnantes

Un rappel concernant le fonctionnement des marées se trouve en annexe (annexe 6).

### 2.1) Le marnage

Les estuaires de la Gironde de la Loire et de la Seine sont tous les trois soumis à des marées de type semi-diurne (12h25).

Pour des coefficients de vives eaux moyennes (coeff. 95) (figure 8) les marnages à l'entrée de l'estuaire de la Gironde, de la Loire et de la Seine atteignent respectivement 5.5 m, 6 m et 8 m (CMB, janvier 2002).

Ces marnages de forte amplitude (>4m) sont caractéristiques d'estuaires macrotidaux.

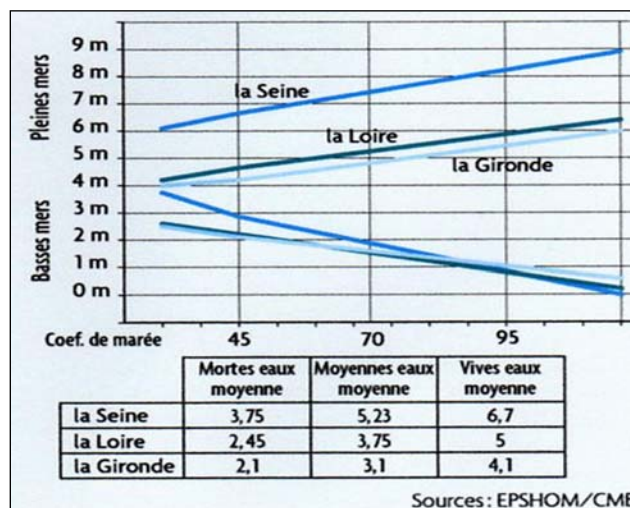


Figure 6 : Marnages des trois estuaires

D'après CMB, janvier 2002

Ainsi, d'après Mauvais & Guillaud (1994), le marnage sur l'estuaire de la Gironde ne semble pas dépasser 6 m, quel que soit le lieu et le coefficient de marée. En période de vives eaux, le marnage est important et constant pour le système Gironde-Garonne jusqu'à 120 ou 130 Km de l'embouchure.

En revanche, sur la Dordogne le marnage décroît rapidement vers l'amont dès le Bec d'Ambès.

Sur la Loire, en vives-eaux moyennes, le plus grand marnage se trouve vers Le Pellerin où avec 5,85 m, il dépasse de 0,85 m le marnage à l'embouchure. En mortes eaux, le maximum est à Nantes avec 3,45 m soit 1 m de plus qu'à Saint-Nazaire.

En vives-eaux, le marnage au Havre peut atteindre un maximum de 8 m, à Poses le marnage n'est plus que de quelques décimètres (Le Hir & Silva Jacinto, 2001).

## 2.2) Les surfaces marnantes

Deux fois par jour, l'intrusion de la marée dans l'estuaire se traduit par le recouvrement puis le découvrement d'une partie des rives de l'estuaire. L'extension de ses surfaces est fonction :

- \_du marnage, c'est-à-dire la différence de niveau entre pleine mer et basse mer,
- \_de la pente des rives, plus elle est faible, plus les surfaces marnantes sont étendues.

Les surfaces marnantes ont deux rôles majeurs dans l'estuaire :

- \_elles opposent aux eaux de marée des frottements liés à leur extension et à leur rugosité. Elles atténuent alors les courants le long des rives et épuisent l'énergie des ondes de marée durant leurs progressions,
- \_se sont des pièges à sédiments témoignant sur le long terme du colmatage de l'estuaire à l'échelle géologique. A l'échelle annuelle, ces surfaces participent au bilan sédimentaire de l'estuaire engraissement au printemps et en été et érosion totale ou partielle de ces dépôts en hiver (CMB, 2004) (figure 9).

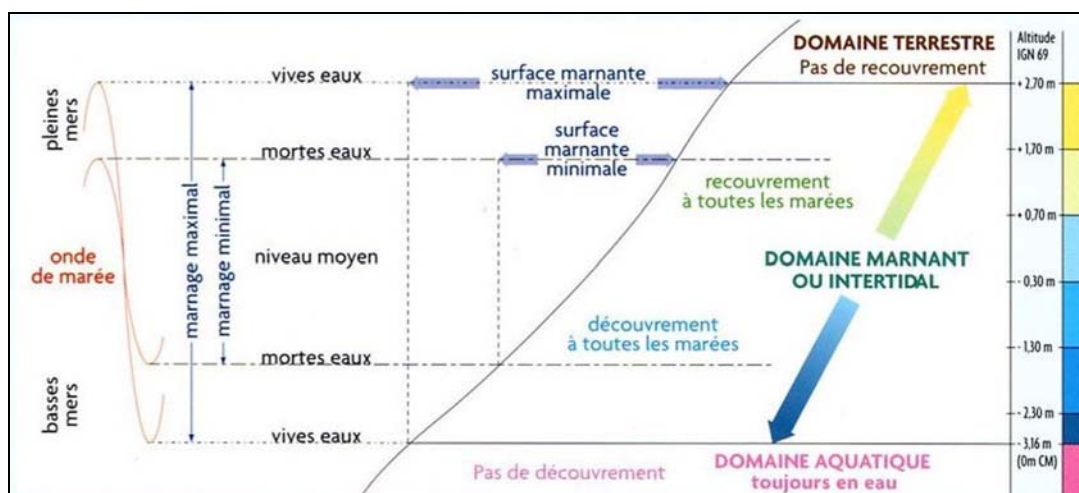


Figure 7 : Marnage et surfaces marnantes

D'après CMB, mai 2004

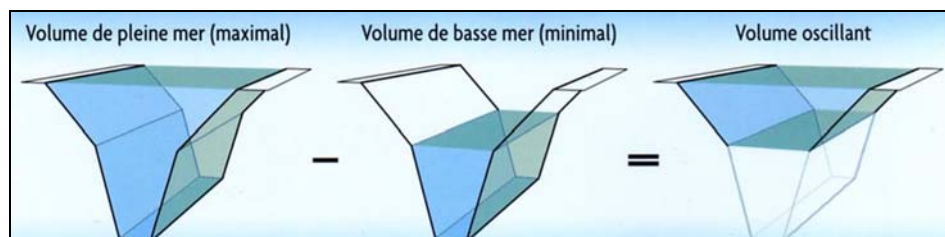
Aucunes valeurs d'évolution des surfaces marnantes n'ont pu être retrouvées pour l'estuaire de la Gironde.

La superficie totale de l'estuaire de la Loire est de 55 Km<sup>2</sup> dont 31.5 km<sup>2</sup> (57 %) sont toujours en eau quel que soit le coefficient de marée, et 23.5 Km<sup>2</sup> (43 %) sont soumis au marnage. Les surfaces marnantes auraient peu varié depuis une vingtaine d'année de Saint-Nazaire à Nantes. Avec des surfaces de 30 Km<sup>2</sup> en 1957, 21.5 Km<sup>2</sup> en 1982 et 22 Km<sup>2</sup> en 2002. Il semblerait donc que la régression considérable de ces surfaces (plus de la moitié de celles présentes en 1881, soit 47 Km<sup>2</sup>, ont disparu un siècle plus tard) fût enrayée en Loire, et les pertes en superficie des vasières de Montoir et des bras de Lavau et du Carnet ont été compensées par les gains sur la rive Sud entre Paimboeuf et Mindin et sur la rive Nord entre Cordemais et Donges (CMB, mai 2004).

Sur l'estuaire de la Seine, les surfaces marnantes ou zones intertidales se sont comblées progressivement au fil des années. Ainsi, en 1677 les surfaces marnantes représentaient 140 Km<sup>2</sup> et sont passées à 130 Km<sup>2</sup> en 1834. Suite aux aménagements, cette superficie n'était plus que de 62 Km<sup>2</sup> en 1962 et 31 Km<sup>2</sup> en 1978 et enfin en 1999 plus que 29 Km<sup>2</sup>. Ces réductions de surface ont des conséquences importantes pour l'écosystème estuarien (CSLHN, 1999) en particulier pour les vasières nues. La vasière Nord a vu la superficie de sa slikke passer de 10 Km<sup>2</sup> en 1974 à 3.2 Km<sup>2</sup> en 1999 (Lesourd, 2000).

### 3) **Le volume oscillant**

Le volume oscillant correspond à la différence de volume maximal emmagasiné à pleine mer et le volume minimal (résiduel) à basse mer (figure 10). Il correspond en fait au volume d'eau introduit par la marée. Le volume oscillant diminue vers l'amont jusqu'à disparaître en un point situé à la limite de l'intrusion de la marée dynamique, c'est son amortissement, qui sera d'autant plus prononcé que le débit fluvial est élevé.



**Figure 8 : Détermination du volume oscillant**

*D'après CMB, mars 2004*

Cet indicateur permet de suivre l'évolution de l'influence marine dans l'estuaire et d'appréhender les répercussions d'une modification de sa géométrie. Il permettra par la suite de définir les types de circulation estuarienne.

Les déplacements de la masse d'eau ou volume oscillant, dépendant de l'amplitude de la marée et du débit fluvial, ils diminuent en fonction de la distance à l'embouchure.

Le calcul du volume oscillant pour la Gironde donne d'après Allen (1982) un volume d'eau compris entre  $1.1$  et  $2.10^9 \text{ m}^3$  introduit dans l'estuaire à chaque flot. Ainsi en vives-eaux (pour un débit fluvial moyen) le volume d'eau annuel introduit dans l'estuaire ( $\Omega$ ) est  $2.10^9 \text{ m}^3$  et (Allen, 1972 in Taillez, 2004). Ce volume décroît vers l'amont en suivant une loi exponentielle (Bonnefille, 1970) de la forme :

$$\Omega = 0.1 C^{2/3} (10^{-x/75}) \text{ pour la Gironde}$$

$$\Omega = 0.2 C^{2/3} (10^{-x/55}) \text{ pour la Dordogne + Garonne}$$

Avec  $\Omega$  le volume introduit au flot,  $C$  le coefficient de marée et  $x$  la distance à l'embouchure (Km).

Ainsi à Bordeaux en vives-eaux, seulement  $5.2 \cdot 10^7 \text{ m}^3$  sont introduit au flot.

L'ouverture de l'estuaire de la Gironde induit alors une influence marine marquée, ceci est dû au volume d'eau de mer pénétrant dans l'estuaire (prisme tidal) 30 à 40 fois supérieur au volume apporté par les fleuves (Taillez, 2004).

Sur la Loire, d'après les dernières estimations (1976), par marée de coefficient 100 et étiage de  $150 \text{ m}^3/\text{s}$ , les volumes emmagasinés par le flot (en millions de  $\text{m}^3$ ) en amont de certaines stations de l'estuaire étaient :

Saint-Nazaire	Petit Carnet	Cordemais
270	130	77
Le Pellerin	Aval Nantes	Nantes Amont
50	40	23

**Tableau 1: Volume d'eau de mer introduit sur l'estuaire de la Loire**

D'après [www.loire-estuaire.org](http://www.loire-estuaire.org)

Pour un même coefficient de marée, les volumes d'eau oscillant seraient donc, en 1982 (par modélisation), légèrement supérieurs à Petit Carnet et à Cordemais, que ceux mesurés en 1976. Au niveau de l'embouchure le volume aurait diminué légèrement suite à la réduction des surfaces inondables. Dans cette partie, le volume oscillant en vives-eaux est de  $300.10^6 \text{ m}^3$  alors qu'en mortes-eaux il n'est plus que de  $140.10^6 \text{ m}^3$ . En revanche, en amont de Nantes ce volume a encore augmenté, suite aux extractions faites (bassin de marée). Le rapport débit de marée / débit fluvial s'est donc accru, augmentant les possibilités de propagation de la salinité vers l'amont de l'estuaire (Migniot, & Le Hir, 1997). Au cours d'une année les volumes d'eau oscillant sont estimés à 140 milliards de  $\text{m}^3$  alors que les apports d'eau douce à la mer ne sont que de 26 milliards de  $\text{m}^3$ .

Ainsi, le prisme tidal n'est plus que 6 fois supérieur aux apports fluviaux. L'influence maritime de l'estuaire de la Loire se fait donc moins ressentir que pour l'estuaire de la Gironde. Ceci est essentiellement dû à l'apport d'un volume d'eau continentale plus fort (Taillez, 2004).

Sur l'estuaire de la Seine, en vives-eaux le volume d'eau introduit par la marée est de  $380.10^6 \text{ m}^3$  et  $200.10^6 \text{ m}^3$  en mortes-eaux (Brenon, 1997)

Le rapport entre le prisme tidale et les apports fluviaux sur l'estuaire de la Seine donne un facteur de 13. Ainsi, L'estuaire de la Seine bien que caractérisé par une embouchure étroite, est plus ouvert que l'estuaire de la Loire, ceci conjugué à des débits plus faibles montre une influence marine plus marquée sur l'estuaire de la Seine que sur celui de la Loire. (Taillez, 2004).

L'estuaire de la Gironde possède donc une influence maritime forte (avec un prisme tidal 35 fois supérieur aux apports fluviaux) comparée aux deux autres estuaires. Cependant, la superficie de l'estuaire ( $625 \text{ km}^2$ ) joue un rôle dans cette prédominance de la marée. Pour une superficie à marée haute relativement proche entre l'estuaire de la Seine ( $50 \text{ km}^2$ ) et de la Loire ( $60 \text{ km}^2$ ), la Seine présente une influence marine deux fois supérieure à la Loire. Cette différence est essentiellement due à la géométrie de l'estuaire mais aussi aux apports fluviaux plus forts sur la Loire à cause d'un régime hydrologique plus complexe.

#### **4) La propagation de l'onde de marée**

La propagation de l'onde de marée à l'intérieur de l'estuaire dépend de différents facteurs, ainsi Allen (1980) in Lesourd (2000) distingue:

\_les frottements sur le fond qui dissipent l'énergie et diminuent l'amplitude de la marée. Le marnage relatif peut être calculé pour définir la zone où la friction entraîne une diminution de l'amplitude de marée. Glenne (1967) in Allen 1972, définit le marnage relatif ( $M_R$ ), correspondant au rapport entre le marnage en un point donné et celui à l'embouchure. Si le rapport est supérieur ou égale à 1, l'estuaire est défini comme relativement ouvert, et l'effet de friction n'est alors pas considéré comme important.

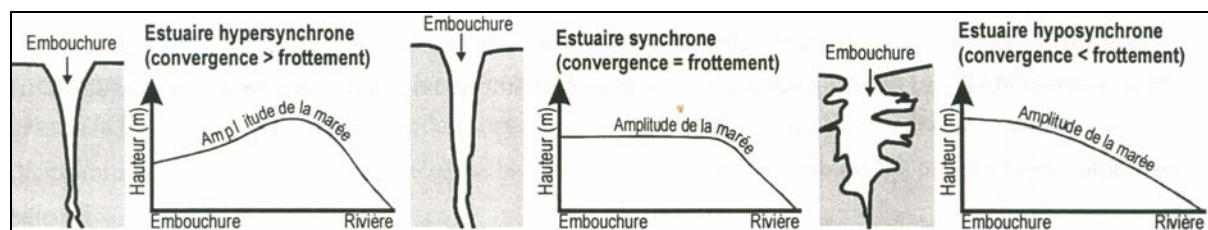
\_la diminution de la hauteur d'eau qui provoque l'asymétrie de l'onde de marée ; elle se traduit par une inégalité, croissante vers l'amont, des durées et donc des vitesses d'écoulement de flot et de jusant,

\_le rétrécissement des sections qui concentre l'énergie de la marée et peut entraîner une augmentation de son amplitude. Le Floch (1961) a distingué trois types d'estuaires en fonction du frottement et de la convergence (figure 11) :

\_dans les estuaires hypersynchrones, l'amplitude de la marée augmente vers l'amont car l'effet de la convergence est supérieur à celui de l'amortissement,

\_dans les estuaires hyposynchrones, l'inverse se produit et le marnage diminue vers l'amont,

\_dans les estuaires synchrones, l'amplitude de la marée est constante avant de s'amortir très rapidement.



**Figure 9 : Modalité de la propagation de la marée dans les estuaires.**

*D'après Le Floch, 1961, in Salomon & Allen 1983*

La vitesse de propagation de l'onde de marée ( $C_m$ ), par faible profondeur  $h$  (m), est égale à  $C_m = (g \cdot h)^{1/2}$  où  $g$  est l'accélération de la pesanteur ( $9.81 \text{ m.s}^{-2}$ ). Cette équation est tirée du principe de conservation de masse d'eau impliquant une continuité entre un point et son voisin. En conséquence, une variation brutale des sections d'écoulements liés à la topographie (remontée du fond ou réduction de largeur) est susceptible de générer une variation inverse des vitesses (Le Hir & Silva Jacinto, 2001).

La propagation de l'onde de marée dépend donc essentiellement de la topographie de l'estuaire, mais dépend également du cycle de marée et du débit fluvial pouvant entraîner des variations des vitesses de propagation et de la zone d'influence de la marée dynamique dans l'estuaire.

L'onde de marée pratiquement symétrique à l'embouchure des estuaires, devient dissymétrique en se propageant, du fait d'une convergence des rives, et se traduit par un raidissement de l'onde de marée, les estuaires sont alors caractérisés par une plus grande durée du jusant que du flot.

Du fait d'un rétrécissement des sections vers l'amont, l'estuaire de la Gironde présente un caractère hypersynchrone (Nagy Breitenstein, 1993). Ainsi la Gironde est caractérisée en vives-eaux et marée moyenne par une courbe marégraphique très cambrée en amont du Bec d'Ambès (75 Km de l'embouchure) car la phase de flot est courte (4 à 5 h). La phase de jusant plus longue atteint une durée de 8 h 25 à Bordeaux (Allen, 1980). Ceci se traduit par une brutale accélération des courants au début du flot. A ce moment on observe une arrivée rapide d'eau marine dans la moitié ou le tiers inférieur de l'écoulement, toujours accompagnée d'une forte accélération des vitesses. La célérité de l'onde de marée pour une



hauteur moyenne de 4.1 m en vives-eaux moyenne est de  $6.34 \text{ m.s}^{-1}$ , l'onde de marée met donc 7 h 26 min pour transiter au long des 170 Km de l'estuaire.

La limite de la marée dynamique se situe aussi bien en Garonne qu'en Dordogne à 170 Km de la Pointe de Grave. (Mauvais & Guillaud 1994).

Des valeurs de marnage relatif ( $M_R$ ) ont été établies pour la Gironde par Allen (1972). Il en ressort qu'en étiage le marnage relatif en vives-eaux est supérieur à 1 jusqu'à 130 Km de l'embouchure pour le système Gironde-Garonne, en revanche au Bec d'Ambès ce rapport décroît au dessous de 1 pour la Dordogne. Dans l'estuaire, entre le Bec d'Ambès et l'embouchure, le  $M_R$  est plus ou moins constant et supérieur à 1. Ainsi, en vives-eaux tout l'estuaire est largement ouvert à la marée. En mortes-eaux, le marnage relatif augmente aussi vers l'amont, et atteint des valeurs supérieures à 1.8 en Garonne à 130 Km de l'embouchure. En Dordogne, le  $M_R$  est plus faible qu'en Garonne, et atteint un maximum de 1.4 au Bec d'Ambès, mais décroît plus lentement vers l'amont qu'en vives-eaux. En étiage, l'estuaire paraît donc être largement ouvert aux influences de la marée qui se propage sans trop de pertes d'énergie se produisant surtout en amont de Bordeaux pour la Garonne et au Bec d'Ambès pour la Dordogne (Allen, 1972).

Aucune valeur de marnage relatif n'a pu être trouvée pour les deux autres estuaires.

Confrontée à des frottements croissants dus au débit fluvial et à la diminution des profondeurs, l'onde de marée de la Loire se déforme, s'amortit et s'épuise jusqu'à disparaître en un point où les variations du niveau de l'eau ne sont plus dictées que par la seule influence fluviale. C'est donc un estuaire de type hypersynchrone.

Ainsi, au large de l'estuaire de la Loire l'onde de marée est symétrique, mais à Saint-Nazaire, la marée montante en vives eaux dure moins longtemps que la marée descendante. Ainsi on obtient une phase de flot courte de 4-5 h et une phase de jusant plus longue de 8 h entraînant donc une marée haute à Saint-Nazaire quand elle est basse à Nantes, et inversement (Migniot & Le Hir 1997).

La crête de l'onde de marée parcourt les 95 Km de l'estuaire à une vitesse moyenne de  $7 \text{ m.s}^{-1}$  pour une profondeur moyenne de 5 m, l'onde se propage ainsi au travers de l'estuaire en 3 h 36 min.

L'onde de marée ne conserve pas la même amplitude tout au long de l'estuaire. En vives-eaux moyennes, le plus grand marnage se trouve vers Le Pellerin où avec 5,85 m, il dépasse de 0,85 m le marnage à l'embouchure. En mortes eaux, le maximum est à Nantes avec 3,45 m soit 1 m de plus qu'à Saint-Nazaire.

Actuellement, le point extrême d'extension de l'onde de marée se trouve à 5 Km au-dessus d'Ancenis ou à 95 Km de Saint-Nazaire, soit 24 Km plus en amont qu'au début du siècle. Par crue de  $4\,000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ , l'extension de la marée dynamique diminue de 30 Km. A Ancenis le

marnage est encore de 0.85 à 1 m lors des marées de vives eaux exceptionnelles en étiage ([www.loire-estuaire.org](http://www.loire-estuaire.org)).

Selon Germaneau (1969), l'estuaire de la Seine est synchrone. Selon Salomon (1988), l'estuaire de la Seine est un fleuve synchrone en mortes-eaux et hyposynchrone en vives-eaux. L'estuaire de la Seine, est également caractérisé par une durée de flot beaucoup plus bref que le jusant. La montée des eaux est extrêmement rapide en vives-eaux, et peut provoquer le phénomène de mascaret, cependant, ce phénomène a considérablement réduit au cours des dernières décennies par les aménagements.

L'onde de marée sinusoïdale à son entrée dans la Manche, se déforme lors de sa propagation par petits fonds. La durée du montant devient plus courte (4-5 h) que celle du perdant (7-8 h). Cette dissymétrie se traduit par des écarts dans la vitesse des courants de flot et de jusant. La courbe de marée aux abords du Havre présente un aplatissement au voisinage de la pleine mer correspondant à une stabilisation du niveau marin qui varie peu pendant 2 h à 2 h 30.

L'étranglement du fleuve associé à la propagation dans des petits fonds augmente la durée du jusant par rapport au flot et accentue la déformation de la courbe de marée.

La célérité de l'onde de marée est de  $8.9 \text{ m.s}^{-1}$  pour une hauteur d'eau moyenne de 8 m, ce qui donne un temps de propagation moyen de 4 h 42 min. pour parcourir les 150 Km séparant Honfleur de Poses.

La limite amont de la marée dynamique est à l'écluse de Poses à 160 Km de l'embouchure : le marnage y est encore de quelques décimètres en vive eau (Le Hir & Silva Jacinto, 2001).

## **5) L'intrusion saline**

Au sein des estuaires, les eaux douces se mélangent aux eaux marines sous l'effet de la propagation de la marée, de l'action des houles et des forts débits fluviaux (Dyer, 1986). Ce mélange eaux douces - eaux salées entraîne l'établissement de gradients de salinité :

\_longitudinaux, où la salinité décroît de façon régulière vers l'amont. Hansen et Rattray (1965) y distinguent trois compartiments : une zone extérieure à faible gradient longitudinal, correspondant à la partie marine de l'estuaire ; une zone centrale à fort gradient et une zone interne, à faible gradient correspondant à la jonction estuaire-milieu fluvial,

\_verticaux, assurés par la différence de densité entre les eaux fluviale et marine,

\_latéraux, à partir d'une certaine largeur de l'estuaire, une circulation latérale se met en place (Pritchard, 1952).

Les variations de salinité en un point donné de l'estuaire varient également selon des échelles temporelles (Allen, 1972) :

\_le cycle semi-diurne, l'effet des marées semi-diurnes étant de faire entrer et sortir à chaque période de flot et de jusant un volume d'eau marine. La salinité dans l'estuaire varie donc selon un cycle de 12 h 30 et est maximale au voisinage des pleines mers et minimal lors des basses mers.

\_l'évolution de l'amplitude des marées en fonction du cycle semi-lunaire diurne (14 jours) produit l'évolution de la salinité selon un même cycle semi-diurne. Ainsi, lors des phases de revif\* de marée ou de déchet\* des différences appréciables apparaîtront,

\_la variation annuelle de débits fluviaux modifie également la salinité dans l'estuaire. Lors de débits importants le front de salinité sera repoussé vers l'aval

Dans la Gironde et le chenal de navigation, la limite amont de l'intrusion saline (salinité  $> 0.5$  ‰) est située à environ 75 Km de l'embouchure pendant des périodes d'étiages des fleuves, lors des crues elle se situe à environ 40 Km (annexe 7).

La stratification saline la plus marquée s'observe dans le chenal de navigation au moment des forts débits fluviaux par marée de mortes-eaux. La valeur de la salinité au fond peut alors être de deux fois supérieure à la valeur de surface. Par ailleurs, toujours dans le chenal, il existe une zone où le gradient vertical est particulièrement bien prononcé. Cette zone migre vers l'amont ou l'aval en fonction du débit fluvial. Elle est localisée à 25 Km de l'embouchure pendant l'été et l'automne et dans l'embouchure en hiver et au printemps (Allen, 1972).

Il existe un gradient de salinité transversal. L'eau est en moyenne plus salée près de la rive gauche que de la rive droite, ceci est dû à l'action de la force de Coriolis dans l'hémisphère Nord (Nagy Breitenstein, 1993).

Dans l'estuaire de la Loire, la différence de position du front de salinité entre une marée de vives-eaux et une marée de mortes-eaux peut être de 10 Km. De même au cours de la marée, le front de salinité peut se déplacer en Loire de 20 à 22 km en vives-eaux et 13 à 14 Km en mortes-eaux. Pour un débit d'étiage de  $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  le front de salinité se trouvait en 1976 au niveau de pk 52 en aval de Nantes pour progresser de 10 Km trois ans plus tard (1979), en 1989-91 le front de salinité se trouvait au pk 70.

L'estuaire de la Seine est caractérisé par un gradient longitudinal de salinité (Avoine, 1981). La limite du front de salin migre de 20 à 30 Km en vives-eaux et de 10 Km en mortes-eaux, quelque soit le débit fluvial. Entre des périodes de fortes crues et d'étiage, la remontée du front de salinité est de l'ordre de 14 Km. La salinité de l'estuaire varie ainsi dans des proportions importantes. Si les eaux sont toujours douces en surface en amont du pk 330 et au fond en amont de Vieux Port, l'estuaire endigué peut être entièrement en eau douce en basse mer de vives-eaux (annexe 8).

La position moyenne du front de salinité a migré de 40 Km vers l'aval entre 1955 et la fin des années 60. Cette modification est due à la canalisation du chenal de Seine qui a induit une augmentation de l'écoulement fluvial entre les digues. La position moyenne de l'intrusion saline est toutefois étroitement dépendante du débit fluvial ; lors des années sèches, elle peut remonter une dizaine de Kilomètre (Avoine & al. 1996).

## 6) *Circulation estuarienne*

Les écarts de densité liés aux différences de salinité et de température entre l'eau douce et l'eau de mer se traduisent par un poids de la colonne d'eau et donc une pression plus importante en aval de l'estuaire qu'en amont. Ce gradient de pression provoque un déplacement des masses d'eau des hautes pressions vers les basses pressions. Une circulation dite « estuarienne » se met alors en place : les eaux salées remontent partiellement l'estuaire près du fond tandis que, par compensation, les eaux douces s'écoulent vers le large en surface, les écarts de densité retardant le mélange avec les eaux marines du fond, cela entraîne la formation d'un coin salé. Des stratifications apparaissent lorsque les courants de marée ne sont pas suffisants pour mélanger toute la colonne d'eau (par turbulence). Des courants de densité sont associés à cette stratification saline, et peuvent induire des courants résiduels (figure 12). En estuaire macrotidal, les courants de marée intenses génèrent une turbulence qui mélange les masses d'eaux sur la verticale, contrariant alors la circulation estuarienne (Le Hir, P. & Silva Jacinto, 2001).

Le point nodal est défini comme le lieu où les vitesses résiduelles au fond sont nulles et à l'amont duquel la masse fluviatile s'écoule vers l'aval sur toute la tranche d'eau. En général ce point marque la pénétration maximale de la salinité. Lorsque la stratification est importante, ce point de convergence induit la formation d'une zone de concentration turbide ou bouchon vaseux de turbidité (Dupont & al. 2002).

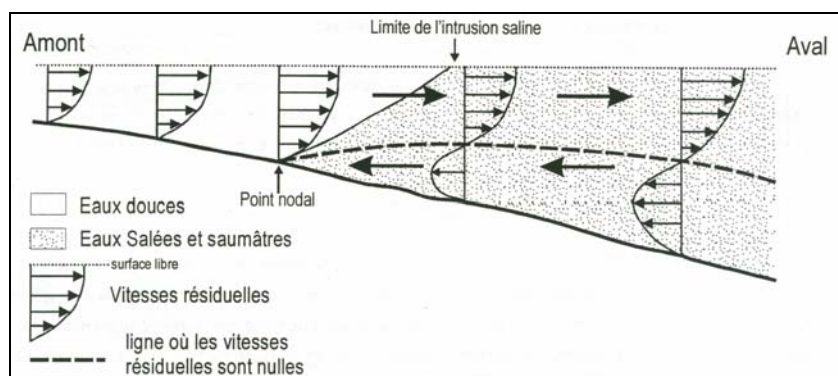


Figure 10 : Schématisation de la circulation résiduelle de densité dans un estuaire.

*D'après Allen, 1972 in Lesourd 2000*

La circulation de densité permet de définir différents types de circulation estuarienne. Ces classifications utilisent en général le débit fluvial et le volume d'eau introduit par la marée.

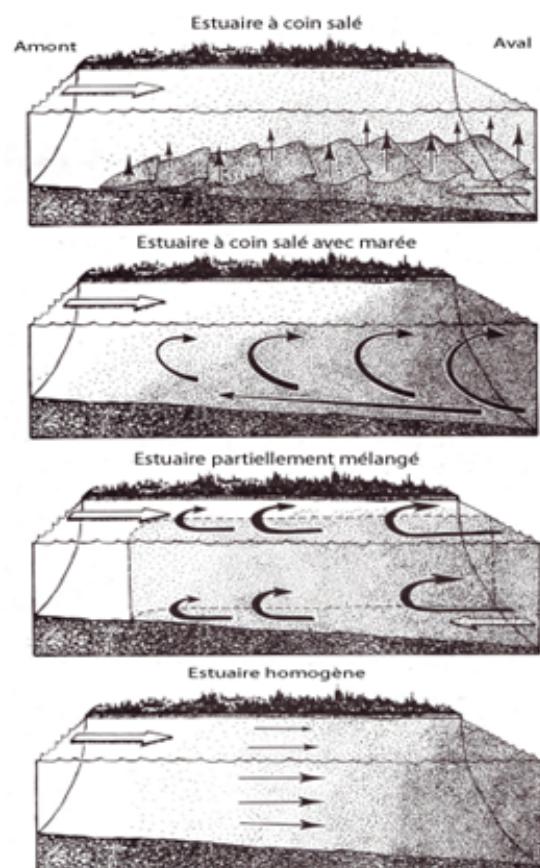
Pritchard (1952) a défini que plus le rapport entre le débit fluvial et le volume d'eau introduit par la marée est important, moins se font les mélanges, et donc plus forts sont les gradients de salinité. Ceci pour deux raisons : d'abord un débit fluvial extrêmement important empêche l'entrée d'eau de mer dans l'estuaire, et ensuite la majeure partie de l'énergie de mélange des masses d'eau provient du jeu des marées. Il distingue ainsi en 1955, quatre types d'estuaires (figure13) :

\_les estuaires très stratifiés à coin salé, où les gradients verticaux sont très importants. C'est le cas d'estuaire à faible marnage pour lesquels la lentille d'eau salée est pratiquement immobile (Dyer, 1986). A l'interface entre les deux couches (ou halocline), l'écoulement fluvial produit l'apparition d'ondes internes, qui provoquent un mélange, uniquement d'eau salée dans l'eau douce,

\_Les estuaires à coin salé avec marée, caractérisés par des gradients verticaux plus faibles, et un mélange plus important,

\_les estuaires partiellement mélangés, le plus fort marnage implique un mélange plus important. L'écoulement est généralement dirigé vers l'aval sur toute la tranche d'eau. Il s'effectue un mélange des eaux salées vers les eaux douces mais aussi des eaux douces vers les eaux salées.

\_les estuaires homogènes ou bien mélangés ne présentent aucun gradient vertical de salinité. Ces estuaires sont en général peu profonds et ont un fort marnage.

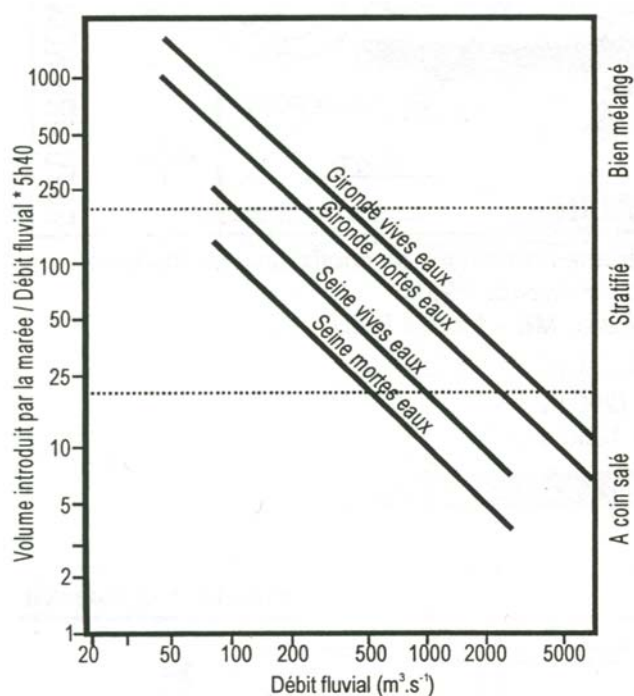


**Figure 11 : Circulation estuarienne**

*D'après Allen 1972*

Le mélange eau douce / eau salée varie selon les fluctuations du débit fluvial et les différents coefficients de marée. Le diagramme de Simmons (1955) permet de définir les variations saisonnières de la stratification en fonction du débit fluvial (figure 14).

Selon la classification de Simmons (1955), L'estuaire de la Gironde peut être stratifié à coin salé ou homogène en fonction des débits fluviaux et des coefficients de marée. L'estuaire est plus stratifié en mortes eaux qu'en vives-eaux. En période de crue l'estuaire est très stratifié et présente un coin salé, en étiage l'estuaire est homogène et ne présente plus de stratification verticale. L'estuaire de la Seine quant à lui, peut être soit stratifié avec un coin salé, soit partiellement stratifié. L'estuaire est plus stratifié en mortes-eaux qu'en vives-eaux,



surtout au moment de la basse mer où un coin salé existe. En période de crue, l'estuaire est bien stratifié. Cette stratification s'atténue rapidement au sein de l'estuaire amont. La stratification est toujours bien marquée en marée de vive eau, surtout en période de crue. En morte eau, les eaux sont très stratifiées en crue, alors qu'en période d'étiage, les variations verticales de salinité sont très faibles. La pénétration de l'intrusion saline au cours du flot se fait sous la forme d'un coin salé en crue. Elle se fait en masse, sur toute la tranche d'eau en étiage.

**Figure 12 : Diagramme de Simmons pour la Seine et la Gironde**

*D'après Avoine 1981 in Lesourd, 2000*

Selon Migniot & Le Hir (1997), l'estuaire de la Loire peut être stratifié à coin salé ou partiellement stratifié. Il est stratifié en mortes-eaux et homogène sur la verticale en vives eaux. Les eaux sont partiellement mélangées pour une marée de vives-eaux et un débit d'étiage alors qu'il y a stratification pour une marée de morte eaux et un débit d'étiage. Il existe une très forte stratification ou coin salé pour une marée moyenne avec un fort débit de crue.

Les estuaires de la Loire et de la Seine ont un fonctionnement relativement proche concernant la stratification des eaux. Ils seront donc considérés comme semblables dans le diagramme de Simmons.

La comparaison entre les estuaires montre que l'estuaire de la Gironde, contrairement à celui de la Seine et de la Loire, est mélangé en période d'étiage. Ceci s'explique par de plus

faibles débits fluviaux en période d'étiage, mais aussi une influence marine plus importante sur l'estuaire de la Gironde que sur celui de la Seine et de la Loire.

## **VI/ Caractérisation du fonctionnement sédimentaire des estuaires**

Les trois estuaires de la présente étude sont tous les trois caractérisés par des apports sédimentaires fins et grossiers. Nous tâcherons donc de définir ces différents sédiments, leur origine, leur mode de transport ainsi que les quantités mise en jeu pour chaque estuaire. Nous nous intéresseront par la suite aux phénomènes sédimentaires typique des estuaires macrotidaux: le bouchon vaseux et la crème de vase.

### **1) Les apports de sédiments**

#### **1.1) Les sédiments grossiers**

Ce type de sédiments correspond aux sables possédant moins de 5% d'éléments supérieurs à 500  $\mu\text{m}$ . Ces sédiments possèdent une vitesse de chute forte et ne peuvent pas être transporté dans la colonne d'eau, se sont des sédiments benthiques se déplaçant sur le fond par succession de sauts (saltation) ou par roulement (charriage), et concerne les éléments les plus lourds (sables et graviers). Leur origine peut provenir du bassin versant drainé ou par des apports de la marée, dans ce cas les sables sont plus grossiers et présentent des fragments coquiller.

La Gironde est soumise à des apports de sable fluviaux de l'ordre 800 000 tonnes / an selon Cremer (1975) ces sables, s'accumulent dans les banc et îles et, dans une moindre mesure, dans les chenaux, jusqu'au pk 72. Les apports de sables marins remplissent le chenal de Saintonge à l'embouchure, et le chenal de navigation jusqu'au pk 72 et constituent les bancs à l'aval du pk 70. L'apport de sable marin aurait été quantifié pour la période 1930-1952 entre 5 et 10 millions de tonnes par an (Castaing, 1981 *in* Breitenstein, 1993).

Sur la Loire à Nantes les apports de sable par charriage ont pu atteindre 1 million de tonne par an (500 000  $\text{m}^3$  par an) et sont estimés en 1997 à 150 000 tonnes par an soit 75 000  $\text{m}^3$  (Migniot & Le Hir, 1997) et représenterait 10 % du transport en suspension ([www.loire-estuaire.org](http://www.loire-estuaire.org)).

Sur la Seine, compte tenu de l'obstacle que constitue le barrage de Pose en partie amont de l'estuaire, le charriage sur le fond des sables originaires du bassin versant sont négligeables. Les apports solides hérités du bassin versant amont sont donc composés de matières en



suspension. Les apports en sables marins n'ont pas été quantifiés (Lesueur & Lesourd, 2001).

### **1.2) Les sédiments fins**

Se sont des particules fines d'un diamètre inférieur à 50  $\mu\text{m}$ , elles possèdent une faible vitesse de chute ce qui leur permet d'être transporté dans la colonne d'eau, elles prennent alors le nom de matières en suspension. Ce type de sédiment est essentiellement originaire du bassin versant amont, toutefois des apports océaniques peuvent avoir lieux mais ont une importance secondaire dans le flux de sédiments, et sont mal quantifiés. Nous nous intéresseront dans le cadre de ce mémoire, seulement aux minéraux constituant la matière en suspension, la matière organique sera englobée dans les flux, mais ne fera pas l'objet d'une caractérisation sur les trois estuaires.

Sur la Gironde les apports annuels en matière en suspension sont estimés à  $2,2 \cdot 10^6$  tonnes / an, dont 1,7 tonne provenant de la Garonne. Ce débit solide annuel peut varier fortement de  $7 \cdot 10^6$  tonnes / an à moins de  $1 \cdot 10^6$  tonne / an suivant les conditions hydrologiques (annexe 9), ces apports se font essentiellement lors des crues des fleuves. Les sédiments sont constitués de minéraux variés comprenant entre 25 et 65% d'argile inférieure à 2 micromètres, le reste est constitué de silts fins et grossiers ([www.svt.ac-bordeaux.fr](http://www.svt.ac-bordeaux.fr)).

Les apports en suspension provenant de la Loire sont estimés entre  $1,45 \cdot 10^6$  tonnes / an pour les fortes hydraulités (module de  $1250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) et seulement  $0,375 \cdot 10^6$  tonnes pour les faibles hydraulités. Ces apports sont constitués de vases et de sable très fins (10 à 15 % de sables très fins et 85 à 90 % d'éléments inférieurs à 40  $\mu\text{m}$ ) (annexe 10) (Migniot & Le Hir, 1997).

L'estuaire de la Seine est quant à lui caractérisé par des flux moyens en matière en suspension de l'ordre de  $0,65 \cdot 10^6$  tonnes / an. Cette masse varie cependant largement sur la période comprise entre 1960 et 1993, entre  $0,13 \cdot 10^6$  et  $1,73 \cdot 10^6$  tonnes par an selon Avoine (1994) in Lesueur & Lesourd, 2001 (annexe 11). Les minéraux constituant la matière en suspension sont essentiellement des silts ou des limons de diamètre compris entre 5 et 30  $\mu\text{m}$ .

La figure 15, montre que la Seine possède un débit faible par rapport à la superficie de son bassin versant comparativement à celui des autres grands fleuves français, en outre la Gironde pour une même superficie de bassin versant possède un débit liquide presque deux fois supérieur, ceci est dû aux apports de la Dordogne et de la Garonne. Le taux d'érosion mécanique du bassin versant, traduit la capacité d'apport en matériaux en suspension dans l'estuaire. Sur la Seine ce taux est très faible ( $8,1 \text{ t} \cdot \text{km}^2 \cdot \text{an}^{-1}$ ) et signifie donc de faibles apports en matériaux en suspension dans l'estuaire. Par contre sur la Loire et la Gironde ce taux est respectivement de  $12,5 \text{ t} \cdot \text{km}^2 \cdot \text{an}^{-1}$  et  $27,5 \text{ t} \cdot \text{km}^2 \cdot \text{an}^{-1}$  expliquant de plus forts apports en



matières en suspension. La valeur de la Gironde, bien qu'ayant une superficie de bassin versant équivalente (selon Dupont & al, 20002), peut s'expliquer par un régime pluvio-nival qui a la capacité de mobiliser plus de sédiments.

Fleuve	Superficie 10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup>	Débit liquide km <sup>3</sup> .an <sup>-1</sup>	Débit solide 10 <sup>6</sup> t.an <sup>-1</sup>	Taux d'érosion t.km <sup>-2</sup> .an <sup>-1</sup>
Rhône	0,10	53,6	3,3	33
Loire	0,12	27,0	1,5	12,5
Garonne + Dordogne	0,08	24,1	2,2	27,5
Seine	0,08	13,0	0,65	8,1

**Tableau 2 : Comparaison des bilans de transferts des grand fleuves Français**

*D'après Dupont & al, 2002.*

Il est possible de constater que la charge de sédiments en suspension, n'est pas uniforme dans le temps et dans l'espace, en effet, au niveau de l'estuaire, il existe une zone où la concentration en sédiment est élevée, de l'ordre de 10 g.l<sup>-1</sup>: c'est le bouchon vaseux.

## **2) Transport des sédiments fins dans les estuaires**

Dans ce mémoire nous nous intéresserons principalement au transport des sédiments fins en estuaire, phénomène le plus caractéristique de ces milieux et le plus étudié. Cela permettra une comparaison du fonctionnement hydrosédimentaire\* des trois estuaires de l'étude.

### **2.1) Généralité sur les processus de circulation des sédiments fins**

Le transport des sédiments fins s'effectue en suspension et résulte des courants advectifs. Sous l'effet de facteurs chimiques (salinité) et physiques (température, concentration et turbulence) les particules fines s'agglomèrent et forment des particules de taille plus grossière ou floccs. Sous l'effet de la gravité, les floccs chutent vers le fond, leur vitesse de chute varie en fonction de leur concentration. Ce processus conduit à l'accumulation de masse turbide, sous forme d'une suspension de plus en plus concentrée, quelquefois à des vases fluides puis à des dépôts vaseux proprement dit. Sous l'action des agents dynamiques, essentiellement les courants de marée, les dépôts sont susceptibles d'être érodés. Mehta (1991) distingue trois modes d'érosion: l'entraînement, qui s'applique aux vases fluides, l'arrachement de floccs et leur réintroduction dans la colonne d'eau, l'érosion par arrachement de copeaux ou de blocs qui forment des galets mou (figure 16). Le matériel particulaire réintroduit dans la colonne d'eau peut subir un nouveau cycle ou être entraîné par le courant advectif (Lesourd, 2000).

Trois types de mouvements dynamiques des sédiments peuvent être défini dans les estuaires:

\_la dynamique longitudinale: par suite de mouvement de marée, les particules transportées en suspension subissent un mouvement alternatif au sein de l'estuaire, sauf en période de crue où l'écoulement est continu vers l'aval,

\_la dynamique verticale: les particules subissent un mouvement vertical oscillant au rythme des étales et des reprises du courant de flot ou de jusant. C'est le flot qui en progressant par le fond, provoque la remise en suspension maximale des sédiments déposés,

\_la dynamique latérale: en flot, les suspensions sont repoussées sur les vasières latérales et en jusant elle refluent vers le chenal, l'expulsion des particules vers la mer se trouve donc considérablement retardée, elle sont alors "accumulées" au sein de l'estuaire et forment des masses d'eau à forte turbidité: le bouchon vaseux en suspension et de la crème de vase dense et visqueuse déposée sur le fond en se consolidant progressivement (Nagy Breitenstein, 1993).

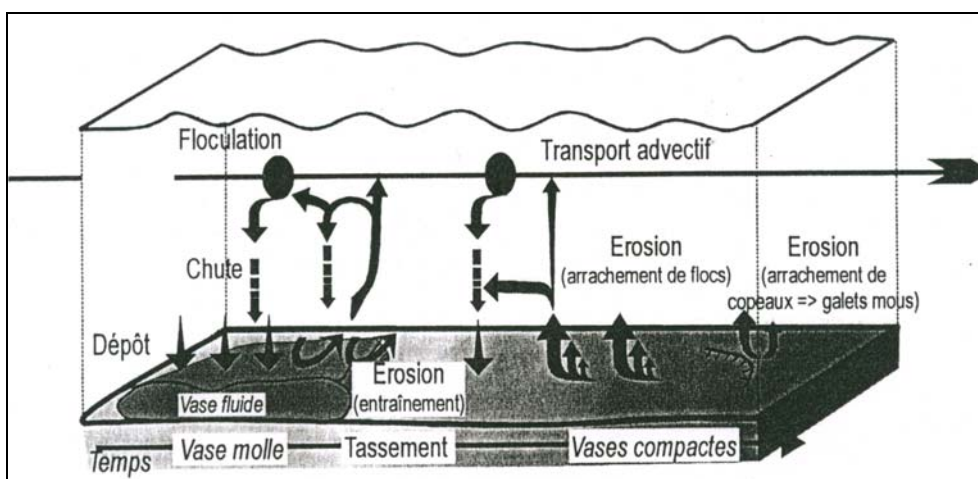


Figure 13 : Schématisation des processus de la sédimentation fine dans un milieu estuarien.

*D'après Lesourd, 2000*

## 2.2) Formation du bouchon vaseux

En terme de dynamique sédimentaire, la zone où la concentration en matériel particulaire est la plus forte est caractéristique de la plupart des estuaires dominés par la marée (Wells, 199). Cette zone où la teneur en MES est la plus importante est nommée "bouchon vaseux" (Lesourd, 2000). Il est défini comme une masse d'eau turbide dont la concentration en sédiments en suspension est comprise entre  $1 \text{ g.l}^{-1}$  et  $10 \text{ g.l}^{-1}$  en moyenne. Ses limites sont floues, car fluctuantes au cours du temps (Nagy Breitenstein, 1993).

Le bouchon vaseux est lié à différents phénomènes tels que la circulation résiduelle et l'asymétrie de la marée. Nous tacherons d'expliquer ces phénomènes avant de voir comment sur le bouchon vaseux des estuaires de l'étude.

### 2.2.1) Bouchon vaseux lié à la circulation résiduelle

Au niveau du point nodal, les particules de l'écoulement fluvial transitant en surface peuvent intégrer la circulation dirigée au fond vers l'amont. Elle convergeraient alors vers le point nodal et pourraient amorcer un nouveau cycle (Castaing, 1981). Ce phénomène implique que les estuaires soient stratifiés ou "à coin salé avec marée" selon la terminologie de Pritchard (1955), cette notion comportant un échange réciproque entre la masse d'eau salée et la masse d'eau douce (Dyer, 196) (figure 17). Dans les estuaires macrotidaux, le mélange vertical estompe ce mécanisme; seules les conditions de fort débit et de mortes-eaux seront favorables à la formation d'un bouchon vaseux par circulation de densité (*in* Lesourd, 2000).

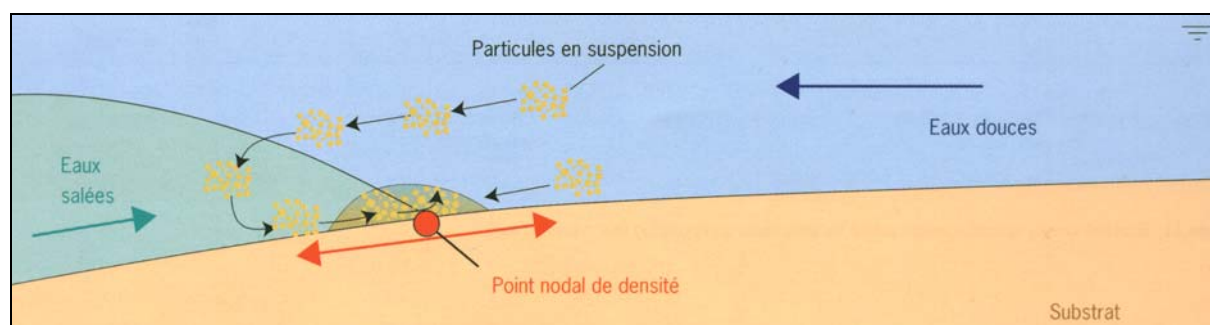


Figure 14 : Représentation schématique de la mise en place du bouchon vaseux de densité.

*D'après Dupont & al., 2001*

### 2.2.2) Bouchon vaseux lié à l'asymétrie de la marée

Dans les estuaires macrotidaux, la formation du bouchon vaseux est gouvernée par la remise en suspension des sédiments, provoquée par la propagation de la marée. Dans ce cas le bouchon vaseux est dit dynamique. Les vitesses d'écoulement plus fortes en vives-eaux qu'en mortes-eaux et l'asymétrie des courants impliquent une étale de pleine mer plus longue que celle de basse mer et un flot plus court, mais plus puissant que le jusant. Cela conduit à un transport préférentiel vers l'amont ("pompe tidale") jusqu'à un point nodal au-delà duquel la circulation fluviale est prépondérante. Le mécanisme d'accumulation serait ainsi contrôlé (Salomon & Allen, 1983 ; Sottolichio, 1999) par :

- \_une remise en suspension plus importante en flot qu'en jusant,
- \_une masse particulaire en suspension plus importante en flot qu'en jusant,
- \_une décantation des particules plus importante à pleine mer qu'à basse mer (*in* Lesourd, 2000) (figure 18).

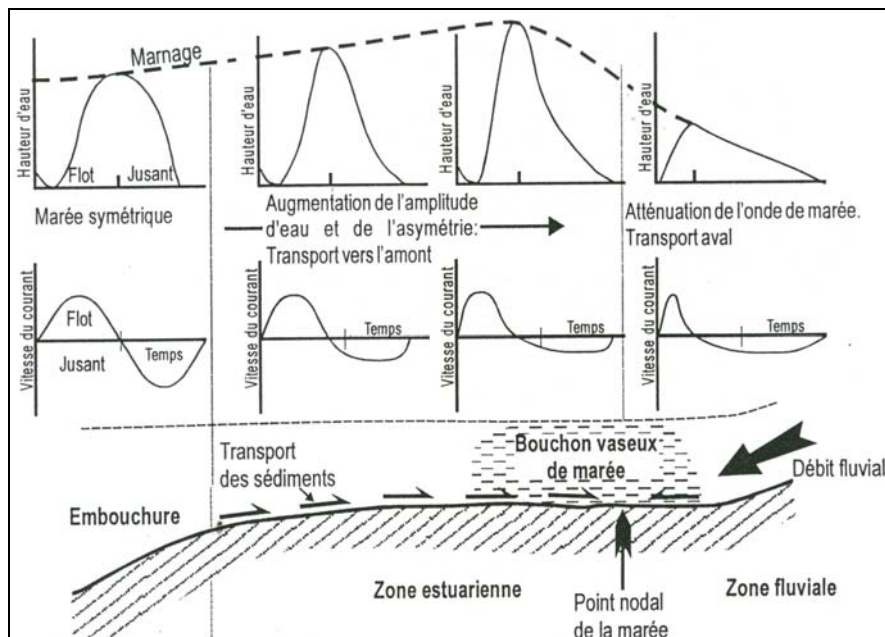


Figure 15 : Mécanisme de formation du bouchon vaseux par l'asymétrie des ondes de marée

*D'après Allen & al., 1980 in Lesourd 2000*

Dans les estuaires macrotidaux, ce principe de formation du bouchon vaseux l'emporte sur les processus liés à la circulation de densité.

### 2.3) Caractéristique du bouchon vaseux de chaque estuaire

Le bouchon vaseux de l'estuaire de la Gironde est caractérisé par un déplacement saisonnier en fonction de la position des points nodaux de marée et de densité. Lorsque le débit fluvial est élevé, les gradients de densité sont plus importants et le bouchon vaseux se situe au voisinage de la limite de salinité. En période d'étiage, la marée prend le pas sur la circulation de densité. Il semblerait qu'il puisse y avoir une combinaison des deux mécanismes de formation du bouchon vaseux (Castaing, 1981 ; Salomon, 1983 ; Sottolichio, 1999).

Ainsi lors des périodes de crue, le bouchon vaseux est repoussé vers l'aval et une partie des matières en suspension s'échappent en mer. Le bouchon vaseux se situe alors aux environs du pk 70 et s'étend sur 30 km. Pour un débit supérieur à  $2000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  le bouchon vaseux se situe au niveau de l'embouchure. Durant les périodes d'étiage, le bouchon vaseux migre vers l'amont et les particules sont temporairement bloquées au niveau de Bordeaux. La position moyenne du bouchon vaseux se situe alors au pk 50, il est bien développé et s'étend sur près de 50 km (Mauvais & Guillaud, 1994).

La formation du bouchon vaseux de la Gironde semble être beaucoup plus dépendante des mécanismes hydrodynamiques\* que des mécanismes de densité.

La masse totale de sédiments en suspension dans le bouchon vaseux est estimée entre  $2.5$  et  $5.10^6 \text{ m}^3$  selon les marées et les crues. Migniot (1972), estime cette masse de sédiments entre  $4$  et  $5.10^6$  tonnes de sédiments en vives-eaux, correspondant à environ 2 ans d'apport annuel de sédiments en suspension provenant de la Garonne et de la Dordogne. Une partie des sédiments du bouchon vaseux est piégée définitivement dans l'estuaire et contribue à son colmatage, cette partie représente près de  $1,2.10^6 \text{ t.an}^{-1}$ , l'autre partie des sédiments est expulsée en mer.

Les expulsions de matières en suspension se produisent lors des forts débits fluviaux par marées de vives-eaux. Le bouchon vaseux est alors dans le bas estuaire. Ces conditions sont réunies entre 15 et 50 jours par an (35 jours en moyenne). En année moyenne, les expulsions seraient de  $1.10^6 \text{ t.an}^{-1}$ . Elles varient entre  $0,5$  et  $1,5.10^6 \text{ t.an}^{-1}$ .

Compte tenu des apports fluviaux de matières en suspension ( $2,2.10^6 \text{ t.an}^{-1}$ ), du piégeage définitif dans l'estuaire ( $1,2.10^6 \text{ t.an}^{-1}$ ), de la masse totale de suspensions dans le système bouchon vaseux-crème de vase ( $4$  à  $6.10^6 \text{ t.an}^{-1}$ ) et des expulsions moyennes à l'océan ( $1.10^6 \text{ t.an}^{-1}$ ), le taux de renouvellement du stock de matières en suspension présent dans l'estuaire est d'environ 50 % par an, soit un temps de résidence moyen des particules de 2 ans environ (Mauvais & Guillaud, 1994).

Sur la Loire, le mécanisme de formation du bouchon vaseux est essentiellement dû à des phénomènes d'ordre dynamique, et résulte:

\_du décalage existant entre la vitesse de déplacement d'une particule et la vitesse d'écoulement des eaux qui l'entraînent,

\_du décalage lié au courant, entre le lieu où la particule commence à se déposer et celui où elle atteint le fond,

\_de la différence entre les vitesses de sédimentation et de remise en suspension d'une particule par le mouvement alternatif des masses d'eau douces et salées (Ouraq, 1996).

Ainsi, pour de faibles débits de la Loire le bouchon vaseux se situe aux environs du pk 65 (pour des débits compris entre  $250$  et  $350 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ), et peut s'étendre sur près de 45 km. Pour des débits élevés le bouchon vaseux se situe au niveau du pk 30 (pour des débits compris entre  $950$  et  $1500 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ ) et s'étend alors sur 20 à 25 km ([annexe XX](#)).

Cette masse turbide accumulée dans l'estuaire est estimée (1981) à  $0,5.10^6 \text{ t}$  en étiage et en vives-eaux. En débit moyen de la Loire et en vives-eaux, elle est estimée à  $1.10^6 \text{ t}$ . Pour un apport moyen annuel de  $0,85.10^6 \text{ t}$  de matières en suspension venant de la Loire, la masse turbide moyenne du bouchon vaseux de la Loire correspond à environ 1 an d'apport. Les temps de résidence moyen des particules en suspension est donc d'1 an.

Les échanges de particules en suspension avec le large correspondraient pour un débit fluvial de  $1\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  à  $0,6\cdot 10^6\text{ t}\cdot\text{an}^{-1}$ . Le bouchon vaseux est partiellement expulsé hors de l'estuaire lors des crues de débit équivalent à  $3000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  (Anonyme, 2002).

Les deux principaux facteurs qui contrôlent la dynamique du bouchon vaseux de la Seine sont l'asymétrie de la propagation de la marée et le débit fluvial de la Seine. Le bouchon vaseux est piloté par des processus à très court pas de temps, la masse du bouchon vaseux évolue de manière significative sur le cycle de la marée.

Ainsi en période d'étiage, le bouchon vaseux est situé dans la partie aval de l'estuaire aux environs du pk 350 et peut s'étendre sur 30 Km entre Honfleur et Quillebeuf. En période de crue, le centre du bouchon vaseux oscille entre les pk 363 et 348.

La capacité de stockage du bouchon vaseux de la Seine est estimée en moyenne à 300 000 tonnes mais peut varier entre 200 000 et 400 000 tonnes (Lesourd, 2002).

La masse que représente le bouchon vaseux de la Seine représente un tiers des apports annuel de la Seine, le temps de séjour d'une particule peut alors être estimée à 3 - 4 mois (communication orale R. Hocdé). Sur la Seine, il y a expulsion d'une partie du bouchon vaseux lorsque certaines conditions de marée et de débit fluvial sont réunies. C'est principalement en période combinée de marée de vives-eaux et à basse mer, et/ou de forts débits fluviaux de la Seine que l'expulsion peut se produire. Avoine (1981) estime qu'à partir d'un régime fluvial de  $550\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , la partie aval du bouchon vaseux sort de l'estuaire de la Seine (Lesourd, 2002).

Le caractère macrotidal de ces trois estuaires nous montre que le mécanisme de formation du bouchon vaseux est essentiellement régi par les phénomènes dynamiques de marée et de débits fluviaux. Au cours des dernières années ce mécanisme s'est amplifié du fait de l'aménagement des estuaires, permettant une plus forte amplitude de migration du bouchon vaseux en fonction des conditions hydrodynamiques. Cette migration s'est aujourd'hui équilibrée mais a renforcé le caractère anthropisé de chaque estuaire.

#### **2.4) La crème de vase**

La décantation d'une partie du bouchon vaseux engendre la formation de couches de vases très fluides appelée crème de vase.

La crème de vase est constituée d'un ensemble de lentilles d'eau très turbide qui est localisé sur le fond. Cette crème est individualisée du bouchon vaseux, et présente avec la profondeur, une stratification des concentrations en sédiments. La crème de vase à la base de la colonne d'eau, peut atteindre des concentrations de l'ordre de quelques dizaines de grammes par litre. Malgré le fait qu'elle est individualisée du bouchon vaseux, elle suit ses

migrations dans l'estuaire. Possédant de nombreux points communs avec le bouchon, elle diffère sur un élément : sa durée dans le temps. En effet, la crème de vase est soumise à un cycle d'érosion - accumulation lié au cycle de la marée. A coefficient décroissant, la crème de vase se forme et atteint son maximum aux mortes eaux. Par contre, à coefficient croissant, les lentilles d'eau et de vase se divisent en petites unités qui sont alors érodées et remises en suspension au cours des vives eaux.

Dans l'estuaire de la Gironde, le dépôt de ces matières en suspension se produit principalement dans le chenal de navigation et dans les fosses naturelles ou artificielles. En période d'étiage, les formations de crème de vase se rencontre entre Bordeaux et le Bec d'Ambès, alors qu'en période de forts débits ces dépôts interviennent dans le bas estuaire. La crème de vase suit donc le bouchon vaseux. Les concentrations en matières en suspension de la crème de vase peuvent atteindre  $400 \text{ g.l}^{-1}$  avec des valeurs moyennes comprises entre 100 et  $300 \text{ g.l}^{-1}$ . Les lentilles de crème de vase peuvent avoir plusieurs mètres de large et, 10 à 15 km de long. Il a été estimé une quantité de vase de l'ordre de 4 à  $6.10^6$  tonne de matière en suspension contenu dans la crème de vase lors des mortes-eaux et 2 à  $3.10^6$  tonne lors des vives-eaux (Mauvais & Guillaud, 1994).



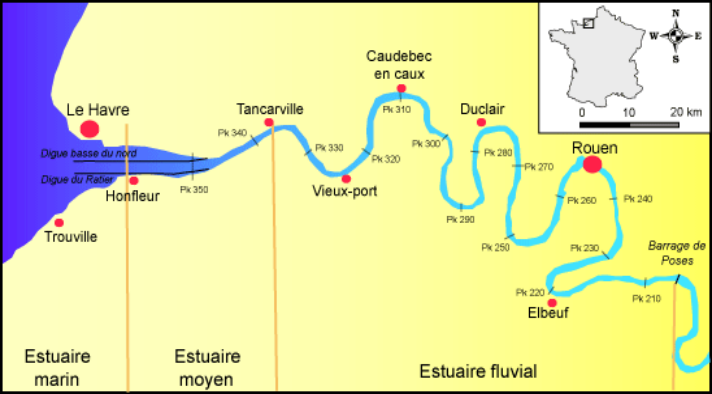
Dans l'estuaire de la Loire, il y a formation de la crème de vase pour des coefficients de marée inférieurs à 70 au-delà la vase est remise en suspension. L'accumulation la crème de vase la crème de vase peut atteindre 2 à 3 m d'épaisseur avec des concentrations entre 100 et  $300 \text{ g.l}^{-1}$ . Elle s'étend sur une vingtaine de kilomètres de longueur en étiage et sur 5 km en crue (Migniot & Le Hir, 1997). Pour une lentille de crème de vase d'une longueur de 6.5 km, Ouraq (1996) estime la masse de matière sèche à environ 78 000 t pour un coefficient de marée de 63.

Dans l'estuaire de la Seine, la crème de vase est appelée vapie, la vapie s'accumule sur une épaisseur de quelques décimètres. En Seine le phénomène de crème de vase est moins prononcé que sur les estuaires de la Loire et de la Gironde du fait des concentrations relativement faibles du bouchon vaseux (Dupont & al. 2001).

Il est donc possible de remarquer que les estuaires de la Gironde et de la Loire présentent des caractères similaires de crème de vase avec des remises en suspension et des décantations pour de mêmes coefficients, les concentrations de crème de vase sont semblables. Par contre, la Seine présente des caractéristiques de crème de vase moins prononcé du fait d'apports de sédiments fins moins important du bassin versant.



V / Tableaux de synthèse sur les estuaires

	Estuaire de la Gironde		Estuaire de la Loire	Estuaire de laSeine
Localisation				
Longueur	170 km [1]		95 km [2]	160 km [3]
Superficie de l'estuaire à marée haute	625 km² [3]		60 km² [3]	50 km² [3]
Densité population moyenne sur le bassin	61 hab/km² [7]		71 hab/km² [7]	203 hab/km² [7]
Densité population moyenne sur l'estuaire	129 hab/km² [7]		166 hab/km² [7]	168 hab/km² [7]
Fleuve	Garonne	Dordogne	Loire	Seine
Superficie totale de Bassin versant drainé	81 000 km² [4]		109930 km² [5]	78650 km² [6]
Longueur	478 km [8]	484 Km [8]	1020 km [5]	776 km [6]
Pression industrielle	Moyenne [8]		Forte [5]	Forte [6]
Remontée marée dynamique	170 km [8]		95 km [5]	160 km [6]
Remontée intrusion saline	100 km [8]		55 km [5]	45 km [6]

Sources:

Taillez (2004) [1] ; Anonyme (2000) [2] ; Guézennec & al. (2001) [3] ; Ouraq (1996) [4] ; www.loire-estuaire.org [5] ; Guézennec & al., 2001 [6] ; Ignasse & al.(2002) [7] ; Mauvais & Guillaud (1994) [8]

Tableau 3 : Présentation des estuaires



	Estuaire de la Gironde		Estuaire de la Loire	Estuaire de la Seine
HYDROLOGIE				
Cours d'eau	Garonne	Dordogne	Loire	Seine
Longueur du cours d'eau	580 km [1]	484 km [1]	1020 km [5]	776 km [6]
Superficie du bassin versant	55 000 km <sup>2</sup> [1]	16 000 km <sup>2</sup> [1]	109 930 km <sup>2</sup> [5]	78 650 km <sup>2</sup> [6]
Régime hydraulique	Nival en amont de Toulouse Pluvio-nival en aval [2]	Pluvial [2]	Complexe	Pluviale
Débit moyen inter-annuel	989 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> (sur un siècle) dont 65% (647 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ) provient de la Garonne et 35% (342 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ) de la Dordogne [2]		830 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> (entre 1990 et 2003) [4]	418 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> (1960-1993) 500 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> (1994-2003) [ [7]]
Débit instantané compris entre	100 et 7 000 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> [4]		100 et 5 6900 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> [4]	60 et 2 280 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> [4]
Débit instantané extrême de crue	7 500 (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ) [3]		6300 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> (1910) [4]	2480 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> (1882) [8]
Débit instantané extrême d'étiage	270 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> [16]		49 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> (1949) [4]	40 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> (1992) [8]
Moyenne annuelle année humide	1 302 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> (1966) [4]		1368 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> (1994) [4]	902 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> (2001) [4]
Moyenne annuelle année sèche	518 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> (1989) [4]		438 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> (1990) [4]	334 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> (1996) [4]
Débit pour une année moyenne	1 200 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> [4]		1000 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> [4]	800 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> [4]
Pourcentage du temps des apports annuels	25% [4]		25% [4]	25% [4]
Pourcentage du volume d'eau douce annuel	60% [4]		55% [4]	50% [4]
CARACTERISTIQUES DES MAREES				
Type de marée	Semi-diurne (12 h 25)		Semi-diurne (12 h 25)	Semi-diurne (12 h 25)
Marnage Vives Eaux moyenne (coefficient 95)	5,5 m [9]		6 m [9]	8 m [9]
Marnage Moyennes Eaux moyenne (coefficient 70)	3,1 m [9]		3,75 m [9]	5,23 m [9]
Marnage Mortes Eaux Moyenne (coefficient 45)	2,1 m [9]		2,45 m [9]	3,75 m [9]
Marnage relatif (étiage en Vives-eaux)	>1 jusqu'à 130 Km de l'embouchure [2]	>1 jusqu'au Bec d'Ambès [2]	*	*
Marnage relatif (étiage en Mortes-eaux)	1,8 jusqu'à 130 Km de l'embouchure [2]	1,4 jusqu'au Bec d'Ambès [2]	*	*
Types d'estuaire en fonction du frottement et de la convergence (Classification Le Floch, 1961)	Hypersynchrone		Hypersynchrone	Synchrone en Mortes-eaux Hyposynchrone en Vives-eaux
Durée du Montant	4-5 h [11]		4-5 h [13]	4-5 h [7]
Durée de la phase du Descendant	8 h25 [11]		8 h [13]	8 h [7]
Célérité de l'onde de marée (Vives-eaux moyennes)	6,34 m.s <sup>-1</sup> [12]		7 m.s <sup>-1</sup> [12]	8,9 m.s <sup>-1</sup> [7]
Influence marée dynamique	170 Km [1]		95 Km [13]	160 Km [7]
Surfaces marnantes	*		22 Km² (2002) [15]	29 Km² (1999) [14]
Volume oscillant (Ω)	1,1*10 <sup>9</sup> m³ en mortes-eaux (embouchure) [10] 2*10 <sup>9</sup> m³ en vives-eau (embouchure) [10]		300*10 <sup>6</sup> m³ en vives-eaux [10] 140,106 m3 en mortes-eaux [10]	380*10 <sup>6</sup> m³ (vives-eaux) [10] 200*10 <sup>6</sup> (mortes-eaux) [10]
Rapport prisme tidal / apport fluviaux	30 à 40 [4]		6 [4]	13 [4]
Limite amont de l'intrusion saline	75 Km de l'embouchure (étiage) 40Km de l'embouchure (crue)		70 Km de l'embouchure (étiage) 26 Km de l'embouchure (crue)	46 km de l'embouchure (étiage) 30 km de l'embouchure (crue)
Migration du front de salinité	55 km étiage		20 à 22 km en vives-eaux 13 à 14 Km en mortes-eaux	20 à 30 Km en vives-eaux 10 Km en mortes-eaux
Stratification des eaux	Stratifié à coin salé (crue) ou homogène (étiage) [14]		Stratifié à coin salé (crue) ou partiellement mélangé (étiage) [13]	Stratifié à coin salé (crue) ou partiellement mélangé (étiage) [14]

Sources :

Mauvais & Guillaud (1994) [1] ; Allen (1972) [2] ; Allen (1972), Castaing (1981) ; Latouche & Jouanneau (1994) in Mallet (1998) [3] ; Taillez (2004) [4] ; www.loire-estuaire.org [5]  
Guézennec et al. (2001) [6] ; Le Hir & Silva Jacinto (2001) [7] ; Garnaud (2003) [8] ; CMB (janvier 2002) [9] ; Allen (1982) [10] ; Allen (1980) [11] ; Déterminé dans l'étude [12] ;  
Migniot & Le Hir 1997 [13] ; Lesourd (2000) [14] ; CMB (mai 2004) [15] ; Braud (1986) [16] ; \* donnée non trouvée

Tableau 4 : Données hydrodynamiques sur les trois estuaires

	Estuaire de la Gironde	Estuaire de la Loire	Estuaire de la Seine
<b>Morphologie</b>			
<b>Formation de la vallée</b>	Lors de la transgression Flandrienne	Lors de la transgression Flandrienne	Lors de la transgression Flandrienne
<b>Type d'estuaire selon Hayes, 1975</b>	Macrotidal	Macrotidal	Macrotidal
<b>Type d'estuaire selon Fairbridge, 1980</b>	De plaine côtière plus ou moins ouvert sur la mer	De plaine côtière plus ou moins ouvert sur la mer	De plaine côtière plus ou moins ouvert sur la mer
<b>Equation d'évolution des sections</b>	$A_M = (1.2 \cdot 10^5) (10^{-X/67.5})$ [1]	$S_x = S_o e^{-0.045X}$ [2]	*
<b>Apport sédimentaire</b>			
<b>Apport de sable fluviatile</b>	8000 000 t.an <sup>-1</sup> [3]	150 000 t.an <sup>-1</sup> [2]	Négligeable [5]
<b>Apport de sable marin</b>	5 à 10.10 <sup>6</sup> t.an <sup>-1</sup> entre 1930 et 1952 [4]	*	*
<b>Apport de sédiments fins moyen</b>	2,2.10 <sup>6</sup> t.an <sup>-1</sup> dont 1,7.10 <sup>6</sup> t provenant de la Gironde [6]	1,5.10 <sup>6</sup> t.an <sup>-1</sup> [8]	0.65.10 <sup>6</sup> tonnes / an [7]
<b>Variation des apports sédimntaires fins</b>	7.10 <sup>6</sup> à 1.10 <sup>6</sup> t.an <sup>-1</sup> [6]	1,45.10 <sup>6</sup> t.an <sup>-1</sup> (module de 1250 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ) à 0,375.106 t.an-1 (faible hydraulicité) [2]	0.13.106 et 1.73.106 t.an-1 [7]
<b>Taux d'érosion</b>	27,5 t.km <sup>-2</sup> .an <sup>-1</sup> [8]	12,5 t.km <sup>-2</sup> .an <sup>-1</sup> [8]	8,1 t.km <sup>-2</sup> .an <sup>-1</sup> [8]
<b>Volume de sédiments fins dans le bouchon vaseux</b>	2,5 et 5.10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> [9]	*	*
<b>Masse de sédiments fins dans le bouchon vaseux</b>	4 à 5.10 <sup>6</sup> t [9]	0,5.106 t.an-1 en étiage et vives-eaux et 1.106 t.an-1 en débit moyen et vives-eaux [11]	0,3.10 <sup>6</sup> t [12]
<b>Expulsion moyenne du bouchon vaseux</b>	1.106 t.an <sup>-1</sup> [9]	0,6.106 t.an-1 (débit 1000 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ) [11]	*
<b>Variation de l'expulsion du bouchon vaseux</b>	0,5 à 1,5.106 t.an <sup>-1</sup> [9]	*	*
<b>Condition d'expulsion</b>	Fort débit fluviaux lors des vives-eaux [9]	Expulsion partielle à partir d'un débit de 3000 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> [11]	marée de vives-eaux et à basse mer, et/ou de forts débits fluviatiles de la Seine ( > 550 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ) [12]
<b>Temps de résidence moyen d'une paticule</b>	2 ans [10]	1 ans [11]	3 - 4 mois [13]
<b>Concentration de la crème de vase</b>	100 à 300 g.l <sup>-1</sup> [9]	100 à 300g.l <sup>-1</sup> [2]	*
<b>Masse de sédiments dans la crème de vase</b>	4 à 6.10 <sup>6</sup> t étiage 2 à 3.10 <sup>6</sup> t en crue [9]	78 000 t pour une lentille de 6,5 km et un coefficient de 63 [14]	*

Sources:

Bonnefille in Allen (1980) [1] ; Migniot & Le Hir (1997) [2] ; Cremer (1975) [3] ; Castaing (1981) in Breitenstein, (1993) [4] ; Lesueur & Lesourd (2001) [5] ; [www.svt.ac-bordeaux.fr](http://www.svt.ac-bordeaux.fr) [6] ; Avoine (1994) in Lesueur & Lesourd (2001) [7] ; Dupont & al (2002) [8] ; Mauvais & Guillaud (1994) [9] ; Allen (1980) [10] ; Anonyme (2002) [11] ; Lesourd (2002) [12] ; Communication Orale R. Hocdé [13] ; Ouraq (1996) [14]; \* Donnée non trouvée.

Tableau 5 : Données sédimentaires

## Conclusion

Nous avons donc pu, définir les mécanismes hydrodynamiques et sédimentaires se déroulant sur chaque estuaire et en décrire les caractéristiques.

On remarque ainsi, que les trois estuaires possèdent des caractéristiques similaires : origines communes (érosion Würmienne, transgression Flandrienne), forte influence maritime (estuaires macrotidaux). Cependant, ils ont évolués de façon différente pour atteindre chacun un équilibre par rapport aux différentes contraintes rencontrées (régime hydrologique, influence maritime, apports sédimentaires, aménagements anthropiques).

Les données recueillies permettent de faire une synthèse du fonctionnement des estuaires. Il a été également possible de définir certains indices caractéristiques du fonctionnement d'un estuaire (marnage, évolution des sections, ouverture, rapport des apports fluviaux et maritimes) permettant de procéder à des comparaisons. Toutefois, la récupération des données à partir de la littérature est parfois difficile d'un estuaire à l'autre, chaque auteur ne procédant pas aux mêmes analyses ou les données sont définies pour des conditions différentes (coefficient de marée, débits, échelles spatiales et temporelles...), rendant la comparaison des données difficile.

Ce mémoire présente donc une liste non exhaustive des nombreux processus agissant sur le comportement de chaque estuaire, mais permet toutefois de définir les grands processus hydrodynamiques et sédimentaires caractéristiques des estuaires de la Gironde, de la Loire et de la Seine.

## Glossaire

---

- **Âge de la marée** : intervalle de temps entre la syzygie (phases de nouvelle lune et de pleine lune) et le maximum de marnage qui suit.
- **Amphialine (espèce)** : espèce migratrice qui effectue une partie de son cycle en eau douce et l'autre en mer.
- **Bathymétrie** : évolution de la profondeur des eaux par rapport au zéro des cartes marines.
- **BP** : Before Présent = Avant le Présent.
- **Compétence** : capacité de transport des matériaux.
- **Courant résiduel** : vecteur vitesse qui est calculé au niveau d'une station ou d'une section de tranche d'eau correspondant à la résultante en direction et en intensité sur la durée d'un cycle de marée.
- **Déchet** : période de diminution de l'importance des marées entre une vive-eau et une morte-eau.
- **Euryhaline** : espèces qui n'est pas inféodé de façon stricte au milieu estuarien mais qui peut y vivre car elle supporte les variations de salinité.
- **Forçage** : processus physique agissant sur le milieu et provoquant des mouvements ou des changements d'état.
- **Hydrodynamique** : adjectif s'appliquant à la dynamique des masses d'eaux. Il inclut les données courantologiques et leurs fluctuations dans le temps, qu'elles soient cycliques ou aléatoires.
- **Hydrosédimentaire** : adjectif incluant l'ensemble des processus de transport de matériaux associés aux déplacement des masses d'eaux.
- **Intertidal** : zone de balancement des marées (découverte à basse mer). On qualifie une espèce qui vit dans cette zone d'espèce intertidale.
- **Limons** : particule sédimentaire dont le volume correspond à des éléments d'un diamètre équivalent sphérique compris entre 2 et 40 µm.
- **Macrotidal** : relatif à des milieux subissant des amplitudes de marée importantes (plus de 4 à 5 m).
- **Marnage** : dénivellation entre la pleine mer et la basse mer.
- **Morte-eau** : marée d'amplitude la plus faible se produisant deux fois par mois (premier et dernier quart de lune).
- **Pk** : point kilométrique permettant un positionnement le long du cours d'eau depuis la référence pk 0 situé en amont ou en aval selon l'estuaire.
- **Subtidal** : zone située en dessous de la zone de balancement des marées et ne découvrant donc pas à marée basse.
- **Supratidale** : zone située au dessus de la zone de balancement des marées et ne pouvant être immergé que lors d'événement exceptionnels.
- **Tidal** : relatif à la marée.
- **Vive-eau** : marée d'amplitude maximale correspondant aux périodes de pleine et nouvelle lune.
- **Weichsélien** : dernière période froide du Quaternaire comprise entre 115 000 et 10 000 ans avant notre époque.
- **Zone intertidale** : zone marine qui découvre à marée basse.

## Bibliographie

---

**Allen, G. (1972).** *Etude des processus sédimentaires dans l'estuaire de la Gironde*. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université Bordeaux 1, 309 p.

**Allen G.P., Salomon J.C., Bassoulet P., Du Penhoat Y., De Granpré C. (1980).** *Effects of tides on mixing and suspended sediment transport in macrotidal estuaries*. *Sedimentary Geology*, 26, 69-90.

**Allen, G.P., Posamentier, H.W. (1993).** *Sequence stratigraphy and facies models of an incised valley fill : the Gironde Estuary, France*. *Journal of sedimentary Petrology*, 63, 378-391.

**Anonyme. (2000).** *Modélisation prospective de la Loire estuarienne tranche n°2*. BCEOM, Danish Hydraulique Instituts, Agence de l'eau Loire Bretagne & Communauté Européenne. 50p.

**Barbaroux, L.H. (1980).** *Evolution des propriétés physiques et chimiques des sédiments dans le passage continent-océan. L'effet estuarien*. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Faculté des sciences et techniques de Nantes, 431 p.

**Boyd R., Dalrymple, R.W., Zaitlin B.A., (1992).** *Classification of classic coastal depositional environments*, *Sedimentary Geology*, 80, 139-150.

**Braud, F. (1986).** *La dynamique sédimentaire à l'embouchure d'un estuaire : intérêt du sonar latéral à l'étude de la passe Sud Gironde*. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université Bordeaux 1, 306 p.

**Brenon, I. (1997).** *Modélisation de la dynamique des sédiments fins dans l'estuaire de la Seine*. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, université de Bretagne occidentale, 207 p.

**Chaïb, J. & Thorez, J.P. (2001).** *Vallée de Seine : Entre naissance et renaissance*. AREHN. 18 p.

**Chappell, J., Woodroffe, C.D, (1994).** *Macrotidal estuaries*. In *Coastal evolution; Late quaternary shoreline dynamics*, Carte R.W.G. and Woodroffe C.D. (eds.), Calbridge Univ. Press., 187-218.1994

**Cojan, I. & Renard, M. (2003).** *Sédimentologie*. Sciences sup-DUNOD, 418 p.

**Cotten, A. (1996).** *La Gironde un écosystème estuarien*. Conservatoire de l'estuaire de la Gironde. 17p.

**Cremer, M. (1975).** *Etude de la dynamique de bancs de sable dans l'estuaire de la Gironde*. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université Bordeaux 1, 109 p.

**Dalrymple, R.W., Zaitlin B.A., Boyd R., (1992).** *Estuarine facies models: Conceptual basis and stratigraphic implication – Reply*. *Journal of sedimentary petrology*, B64, 1, 76-77. et al.

**Douard, A.S.** (2003). *Etude des paramètres influençant la diversité piscicole dans les estuaires*. Mémoire MST IMACOF, 43 p.

**Dupont, J.-P., Guézennec, L., Lafite, R., Le Hir, P. & Lesueur, P.** (2001). *Matériaux fins. Le cheminement des particules en suspension*. Programme scientifique Seine-Aval, 4. IFREMER, 40 p.

**Dyer K. R.**, (1986). *Coastal and estuarine sediments dynamics*. J Wiley & Sons publication, 342 p.

**Fairbanks, R.G.** (1989). *A 17 000-year glacio-eustatic sea level record: influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation*. *Nature*, 343, 637-642.

**Fairbridge, R.W.**, (1980). *The estuary : its definition and geodynamique cycle*. In: E. Olausson and I. Cato (eds.), *Chemistry and biogeochemistry of estuaries*, Wiley, NY, 1-35.

**Garnaud, S.** (2003). *La sédimentation fine sur une plate-forme interne actuelle macrotidale : la baie de Seine sud-orientale*. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, université de Caen, 378 p.

**Glennie B.**, (1967). *Classification system of estuaries*. Proc. Am. Soc. Civ. Engin., J Waterways and Harbors Div, February 1967, p. 56-61.

**Guézennec, L., Romana, L.A., Goujoun, R. & Meyer, R.** (2001). *Seine aval un estuaire et ses problèmes*. Programme scientifique Seine-Aval, 1. IFREMER, 37 p.

**Hayes, M.O.**, (1975). *Morphology of sand accumulation in estuaries : an introduction to the symposium*. In: L.E. Cronin (eds.), *Estuarine research*, vol II. Academic press, NY, 3-22.

**Ignasse , C., M.F. Intradraccolo & M. Zannettacci** (2202). *Annuaire statistique de la France*. Ed INSEE, vol. 105, n° 47, 968 P.

**Lebret S.** (2001). *Etude de la végétation et des habitats d'intérêt communautaire de la Loire, en aval d'ancenis, relation avec la dynamique estuarienne*. Mémoire de fin d'étude, DESS IHCE université de Tours. 101p.

**Le Hir, P. & Silva Jacinto, R.** (2001). *Courants, vagues et marrées : les mouvements de l'eau*. Programme scientifique Seine-Aval, 2. IFREMER, 32 p.

**Le Floch J.F.**, (1961). *Propagation de la mare dynamique dans l'estuaire de la Seine et de la Seine-Maritime*. Thèse, Paris, 507 P.

**Lesourd, S.** (2000). *Processus d'envasement d'un estuaire macrotidal : Zoom temporel du siècle à l'heure ; application à l'estuaire de la Seine*. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, université de Caen 280 p.

**Lesueur, P. & Lesourd, S.** (2001). *Sables, chenaux, vasières : dynamique des sédiments et évolution morphologique*. Programme scientifique Seine-Aval, 3. IFREMER, 39 p.

**Loire Estuaire Cellule de Mesures et de Bilans**, 2002. *Cahier indicateurs n°1 : livret de présentation et mode d'emploi*. Loire Estuaire Cellule de mesures et de bilans. 6p

**Loire Estuaire Cellule de Mesures et de Bilans**, mars 2004. *Cahier indicateurs n°1 : l'amortissement de flot ou volume oscillant*. Loire Estuaire Cellule de mesures et de bilans.

**Loire Estuaire Cellule de Mesures et de Bilans**, mai 2004. *Cahier indicateurs n°1 : Les surfaces marnantes*. Loire Estuaire Cellule de mesures et de bilans.

**Loire Estuaire Cellule de Mesures et de Bilans**, janvier 2002. *Cahier indicateurs n°1 : Les amplitudes de l'onde de marée*. Loire Estuaire Cellule de mesures et de bilans.

**Loire Estuaire Cellule de Mesures et de Bilans**, janvier 2002. *Cahier indicateurs n°1 : Les apports d'eau douce dans l'estuaire*. Loire Estuaire Cellule de mesures et de bilans

**Mallet, C.** (1998). *Etude de la dynamique des sédiments non-cohésifs de l'embouchure de la Gironde*. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université Bordeaux 1, 215 p.

**Manickam, S.** (1982). *Etude hydrologique de la zone de transition entre la Loire fluviale et l'estuaire*. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Institut des sciences de la nature de Nantes, 281 p.

**Mauvais, J.L & Guillaud, J.F.** (1994). *Livre blanc de l'estuaire de la Gironde*. Agence de l'eau Adour-Garonne. 115p.

**Migniot, C.** (1982). *Etude de la dynamique sédimentaire marine, fluviale et estuarienne*. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle. Université de Paris sud, 488 p.

**Migniot, C. & Le Hir, P.** (1997). *Rapports de synthèse de l'APEEL 1984-1994, Volume 1 : Hydrosédimentaire*. Association pour la Protection de l'Environnement de l'Estuaire de la Loire. 83 p.

**Milliman, J.D., Meade, R.H.**, (1983). *Worldwide delivery of river sediments to the oceans*. Journal of Geology. 91, 1-21

**Mouchel, J.M., Boët P., Hubert G. Guerrini M.C.**, (1998). *Un bassin et des hommes : une histoire tourmentée*. In : *La Seine et son bassin. Fonctionnement écologique d'un système anthropisé*, Meybeck M. éd., Elsevier, 345-389.

**Nagy Breitenstein, G.** (1993). *Analyse quantifiée de l'évolution hydro-morphologique séculaire de l'estuaire amont de la Gironde*. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Université Bordeaux 1, 194 p.

**Nichols M.M., Biggs, R.B.**, (1985). *Estuaries*. In Coastal sedimentary environments, Davis R.A. Jr (eds.), Springer\*Verlag, 77-113

**Ottman, F.** (1965). *Introduction à la géologie marine et littorale*. Masson et Cie. Editeurs, 132 p..

**Ouraq, Y.** (1996). *Contribution à l'étude du comportement des sédiments dans l'environnement estuarien : cas de l'estuaire de la Loire*. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Faculté des sciences et techniques de Nantes, 169 p.

**Perillo G.M.E.**, (1995). *Definitions and geomorphologic classifications of estuaries*. In Geomorphology and sedimentology of estuaries. Developments in sedimentology 53, 17-47. G.M.E. Perillo ed., 471P.1995

**Pritchard D.W.**, (1960). *Lectures on estuarine oceanography*. B. Kinsman (Editor), J. Hopkins Univ., 154 P.

**Pritchard D.W.**, (1967). *What is an estuary : Physical viewpoint*. In: G.H. Lauff (Editor), Estuaries. AAAS Washington, CD. Pub. 83, 3-5.

**Ramez, P.** (1995). *Erosion et transport solide en rivière, Tome 1 : Guide pour la compréhension des phénomènes*. CEMAGREF, 130 p.

**Romana, L.A.** (1994). *Les grands estuaires Français*. Revue Equinoxe.7 p.

**Romana, L.** (2001). *Gestion des sédiments de la source à la mer*. 166<sup>ème</sup> session du Comité Scientifique et Technique Société Hydrotechnique de France.

**Taillez, A.** (2004). *Le Carbone organique particulaire dans les bouchons vaseux des estuaires de la Gironde, de la Loire et de la Seine : origine et labilité*. Master ENVOLH. Université de Bordeaux 1. 32 p.

**Tardivo, G. & Thevenin J.P.** (1981). *L'écologie et l'aménagement de la Loire*. Actes du colloque, Fédération Régionale des Associations de Protection de l'Environnement du Centre, Ministère de l'environnement. 479 p.

▪ Les sites Internet :

[www.svt.ac-bordeaux.fr](http://www.svt.ac-bordeaux.fr)

[www.loire-estuaire.org](http://www.loire-estuaire.org)

[www.conservatoire-du-littoral.fr](http://www.conservatoire-du-littoral.fr)

[www.educnet.education.fr](http://www.educnet.education.fr) - Dynamique sédimentaire dans l'estuaire de la Loire.

[www.estuaire.loire.free.fr](http://www.estuaire.loire.free.fr)

[www.epoc.u-bordeaux.fr](http://www.epoc.u-bordeaux.fr) - Hydrodynamique et dynamique sédimentaire en milieu côtier.

[www.epoc.u-bordeaux.fr](http://www.epoc.u-bordeaux.fr) - Hydrodynamique sédimentaire et évolution morphodynamique des embouchures tidales.

[www.estuairegironde.net](http://www.estuairegironde.net) - Le plus vaste estuaire d'Europe.

[www.seine-aval.crihan.fr](http://www.seine-aval.crihan.fr)

[www.univ-lehavre.fr/cybernat](http://www.univ-lehavre.fr/cybernat)

[www.ulg.ac.be-océan](http://www.ulg.ac.be-océan) - Les grands paysages du globe et les processus sédimentaires.



## Table des illustrations

---

### Figures

Figure 1: Différentes définitions d'un estuaire .....	4
Figure 2: Les différents milieux présent sur un estuaire .....	6
Figure 3 : Evolution schématique de la morphologie des estuaires .....	14
Figure 4 : Estuaire dominé par la marée selon Dalrymple & al., 1992. ....	16
Figure 5 : Comparaison des sections moyennes sur chaque estuaire .....	21
Figure 6 : Marnages des trois estuaires .....	24
Figure 7 : Marnage et surfaces marnantes .....	25
Figure 8 : Détermination du volume oscillant .....	26
Figure 9 : Modalité de la propagation de la marée dans les estuaires .....	29
Figure 10 : Schématisation de la circulation résiduelle de densité dans un estuaire .....	33
Figure 11 : Circulation estuarienne .....	34
Figure 12 : Diagramme de Simmons pour la Seine et la Gironde .....	35
Figure 13 : Schématisation des processus de la sédimentation fine dans un milieu estuarien. ....	39
Figure 14 : Représentation schématique de la mise en place du bouchon vaseux de densité. ....	40
Figure 15 : Mécanisme de formation du bouchon vaseux par l'asymétrie des ondes de marée .....	41

### Cartes

Carte 1 : L'estuaire de la seine et ses limites longitudinales .....	17
Carte 2 : L'estuaire de la Loire et ses limites longitudinales .....	19
Carte 3 : L'estuaire de la seine et ses limites longitudinales .....	20

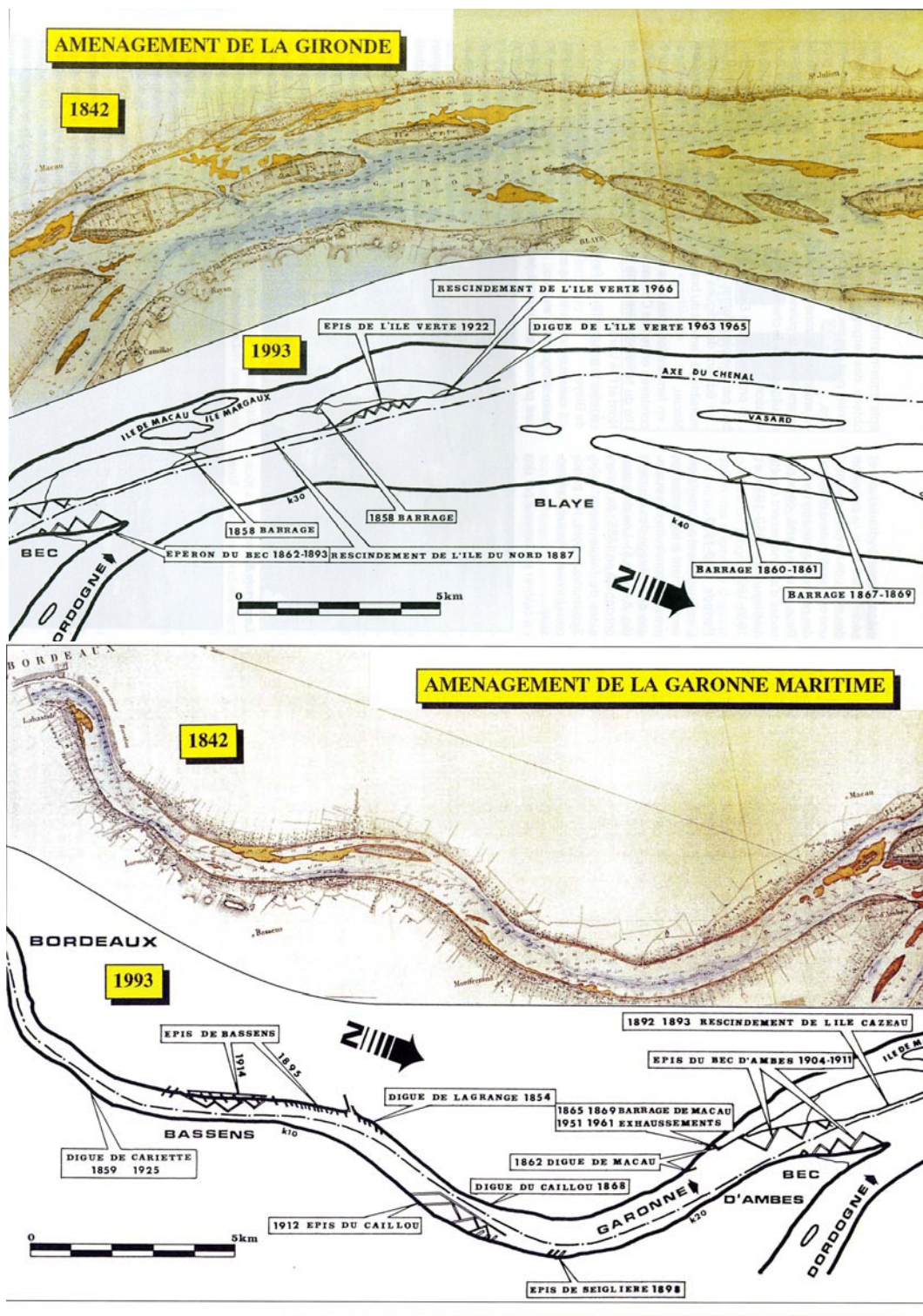
### Tableaux

Tableau 1: Volume d'eau de mer introduit sur l'estuaire de la Loire .....	27
Tableau 2 : Comparaison des bilans de transferts des grand fleuves Français .....	38
Tableau 3 : Présentation des estuaires .....	45
Tableau 4 : Données hydrodynamiques sur les trois estuaires .....	46
Tableau 5 : Données sédimentaires .....	47

## Annexes

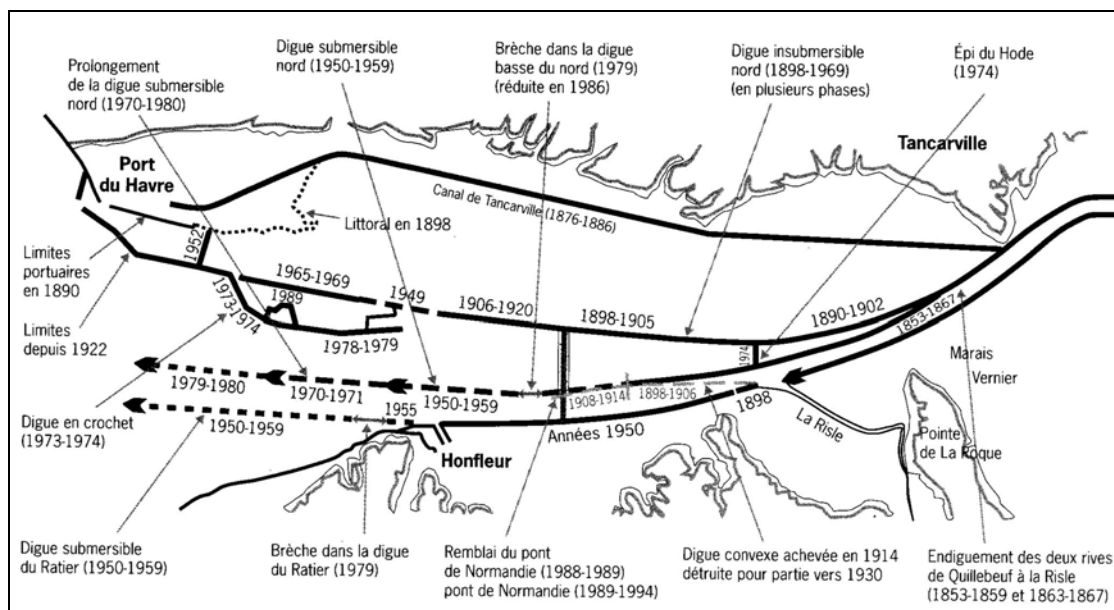
---

Annexe 1: Aménagement et évolution du lit de la Gironde entre 1842 et 1993 .....	II
Annexe 2: Aménagement de l'estuaire de la Seine.....	III
Annexe 3: Evolution de l'estuaire de la Seine entre 1850 et 1999 .....	III
Annexe 4 : carte géologique de l'estuaire de la Gironde .....	IV
Annexe 5: Carte géologique de l'estuaire de la Seine.....	IV
Annexe 6: Rappels concernant les marées.....	V
Annexe 7 : Répartition de la salinité moyenne dans le chenal de navigation de la Gironde. .	VII
Annexe 8 : Répartition de la salinité dans l'estuaire de la Seine en fonction de différentes conditions de marée et de débits fluviaux .....	VII
Annexe 9: Débits solides moyens annuels estimés des apports fluviaux à la Gironde depuis 1898.....	VIII
Annexe 10 : Apport solides en suspension de la Loire .....	VIII
Annexe 11 : Evolution quotidienne des débits fluviaux, des concentration pondérales de MES calculées et des flux de MES sur la Seine.....	IX



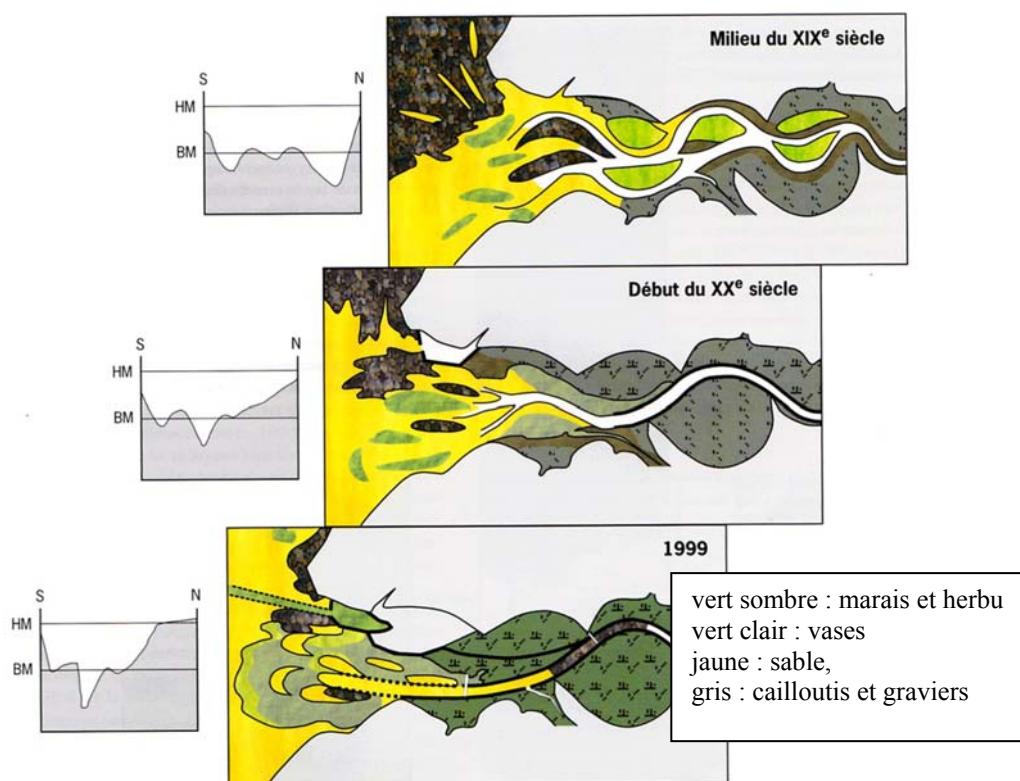
Annexe 1: Aménagement et évolution du lit de la Gironde entre 1842 et 1993

*D'après livre blanc de l'estuaire de la Gironde, 1999*



## Annexe 2: Aménagement de l'estuaire de la Seine

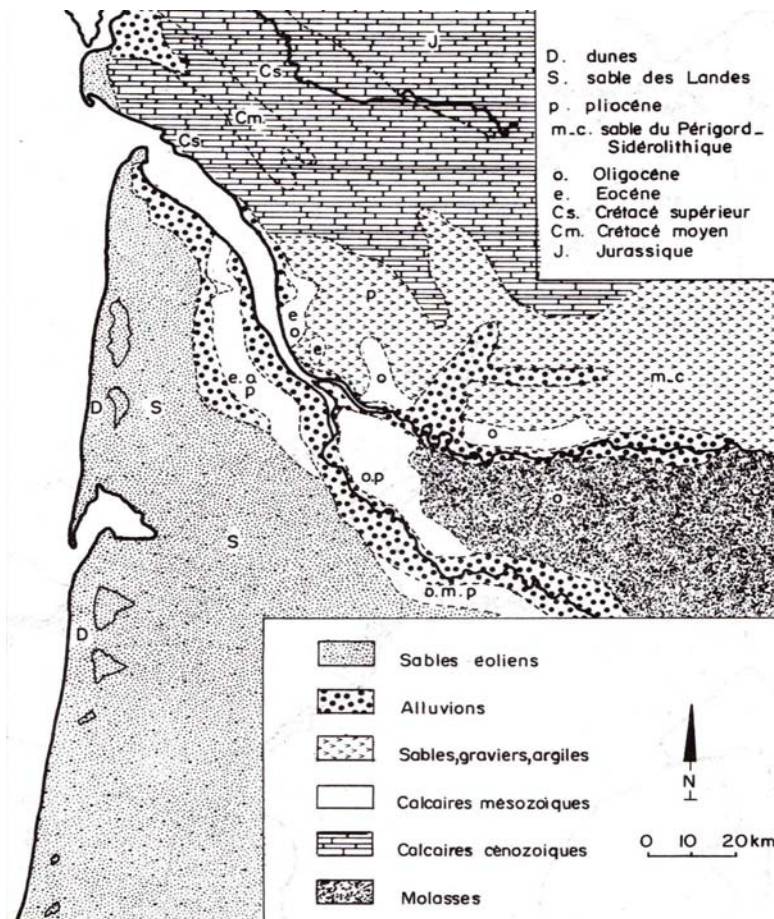
*D'après sables, chenaux, vasières. GIP-SA, 2001*



## Annexe 3: Evolution de l'estuaire de la Seine entre 1850 et 1999

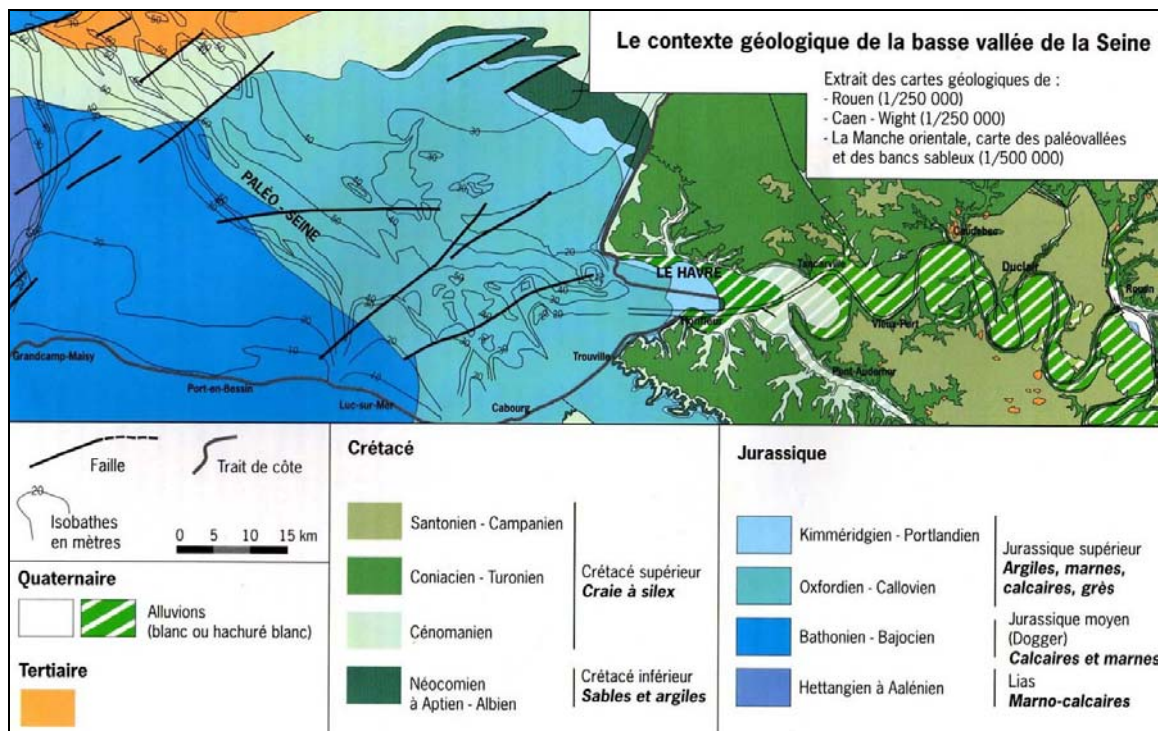
*D'après sables, chenaux, vasières. GIP-SA, 2001*





**Annexe 4 : carte géologique de l'estuaire de la Gironde**

*D'après Prud'homme, 1972 in Allen 1972*



**Annexe 5: Carte géologique de l'estuaire de la Seine**

*D'après Sables, chenaux, vasière. GIP-SA, 2001*

## **Annexe 6: Rappels concernant les marées**

Dans la plupart des estuaires la marée joue un rôle primordial. Ce rôle se manifeste par deux mécanismes :

\_l'action des courants de marée, qui peuvent parfois être très violents (en tout cas presque toujours plus fort que les courants fluviaux), et qui engendrent des mouvements de sédiments. La répartition des courants est liée à la morphologie de l'estuaire.

\_des phénomènes de mélange et de diffusion entre les eaux marines et fluviales. Les marées jouent ainsi le rôle de moteur, fournissant l'énergie requise pour les phénomènes advectifs engendrant les courants de densité qui contrôlent les répartitions des zones d'accumulation sédimentaires (Allen, 1972).

Nous nous attacherons à décrire les courants de marée au travers de la propagation de l'onde de marée et des volumes oscillant dans l'estuaire. Nous décrirons aussi les phénomènes de courants résiduels engendrés par la rencontre entre eau douce et marine provoquant une stratification des eaux.

La marée est une manifestation de la gravitation universelle appliquée au système formé par la Terre, le Soleil et la Lune. Elle se traduit par une variation de la surface libre qui se propage à travers l'océan (marée astronomique) en s'amplifiant sur les hauts fonds et près de côtes (marée dynamique).

La force génératrice de la marée est la résultante de deux forces :

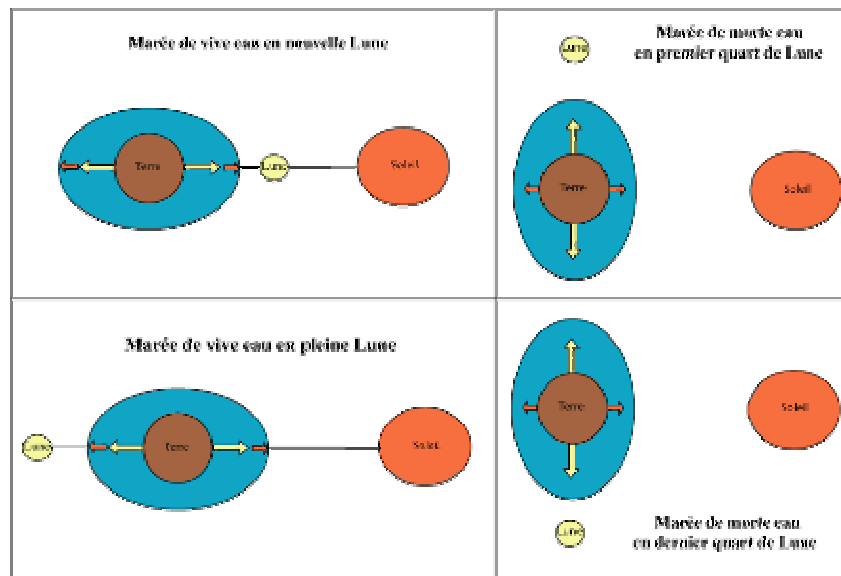
\_la force d'attraction gravitationnelle, processus de déformation d'un astre sous l'action gravitationnelle d'un ou plusieurs autres, ici se sont les océans qui se déforment,

\_la force centrifuge, due au mouvement de la Terre sur son orbite autour du centre de gravité du système Terre-astre.

La marée étant générée par la Lune et le Soleil, les actions de ces deux astres peuvent s'ajouter ou se contrarier selon leurs positions relatives (figure 6). Lorsque le marnage\* passe par un maximum, la marée est dite de vive-eau. Elle correspond aux phases de nouvelle et de pleine Lune appelées syzygies. Elle s'explique par les effets conjugués de la Lune et du Soleil. Au contraire, lorsque le marnage\* passe par un minimum, la marée est dite de morte-eau et correspond aux phases de premier et dernier quartier de Lune appelées quadratures. Elle s'explique par les effets opposés de la Lune et du Soleil.

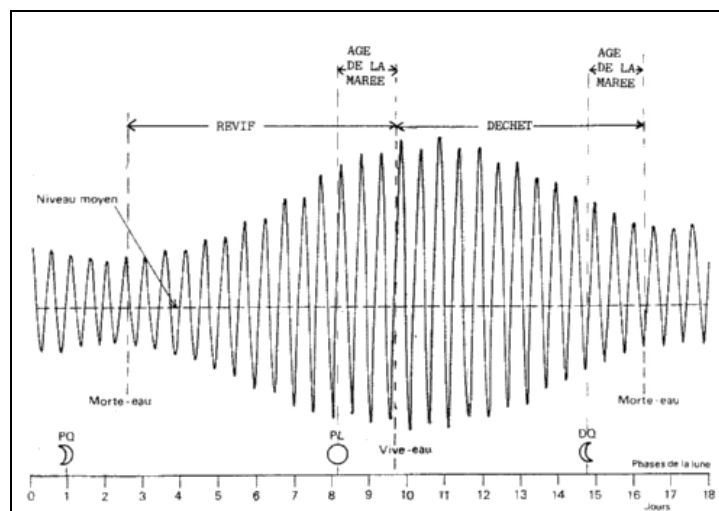
Donc, à chaque pleine lune et à chaque nouvelle lune, environ tous les quinze jours, les amplitudes de marée passent par un maximum. A chaque premier quartier et dernier quartier, les amplitudes de marée passent par un minimum.

Les vives-eaux et mortes-eaux interviennent avec un certain retard par rapport aux syzygies et aux quadratures. Ce retard est l'âge de la marée (figure 7).



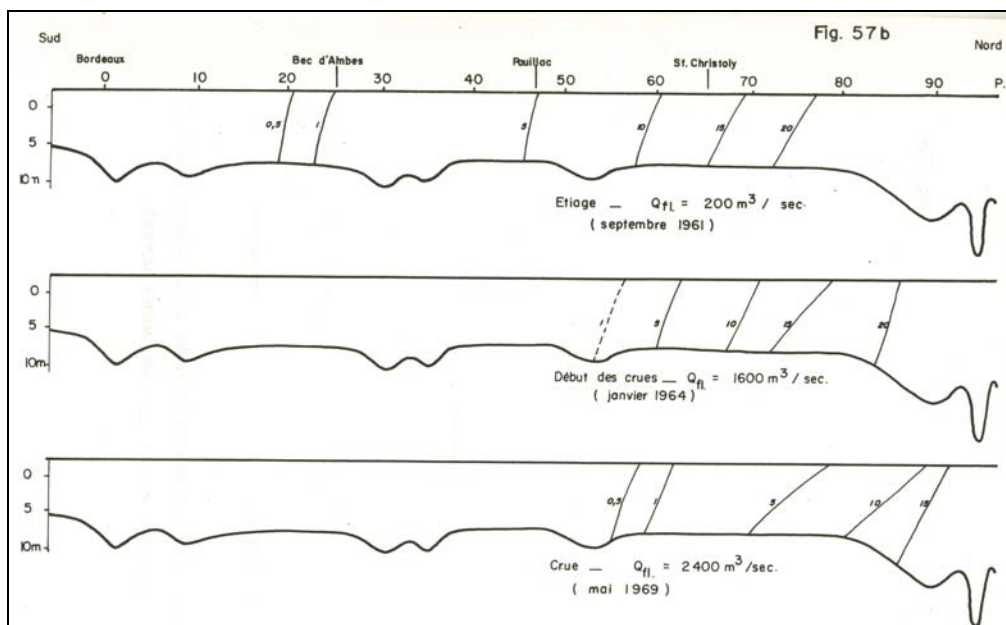
### Cycle des marées de vives et mortes-eaux

(D'après SHOM, modifié)



### Variations d'une marée de type semi-diurne en fonction des phases de la Lune

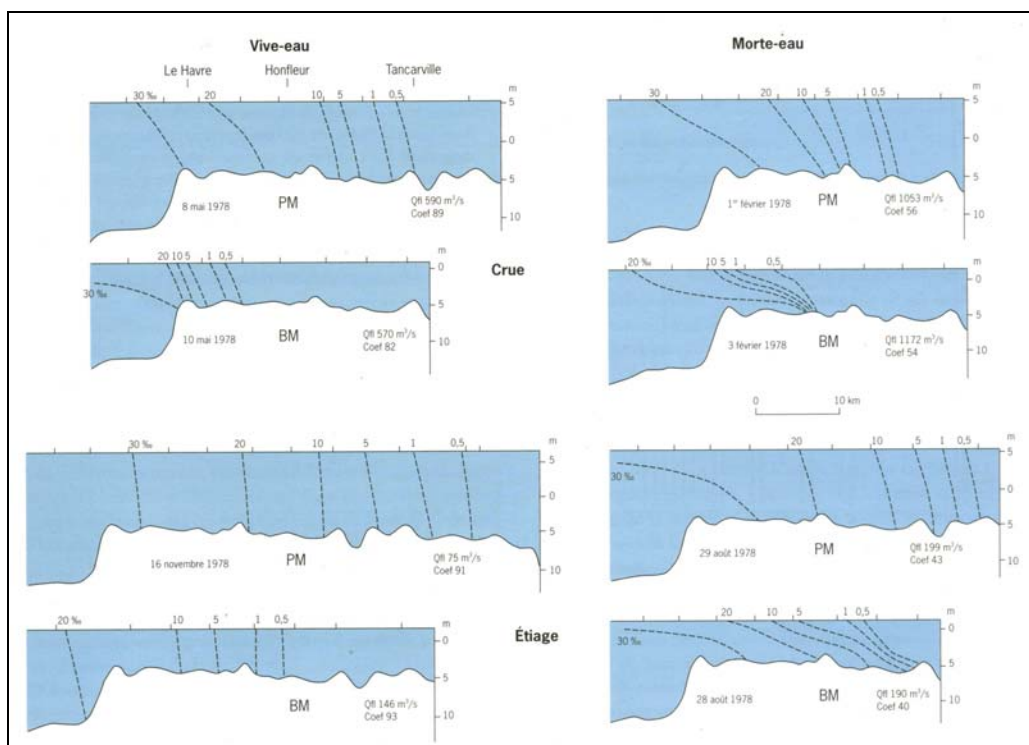
(D'après SHOM)



#### Annexe 7 : Répartition de la salinité moyenne dans le chenal de navigation de la Gironde.

Pour différents débits fluviaux (marées moyennes)

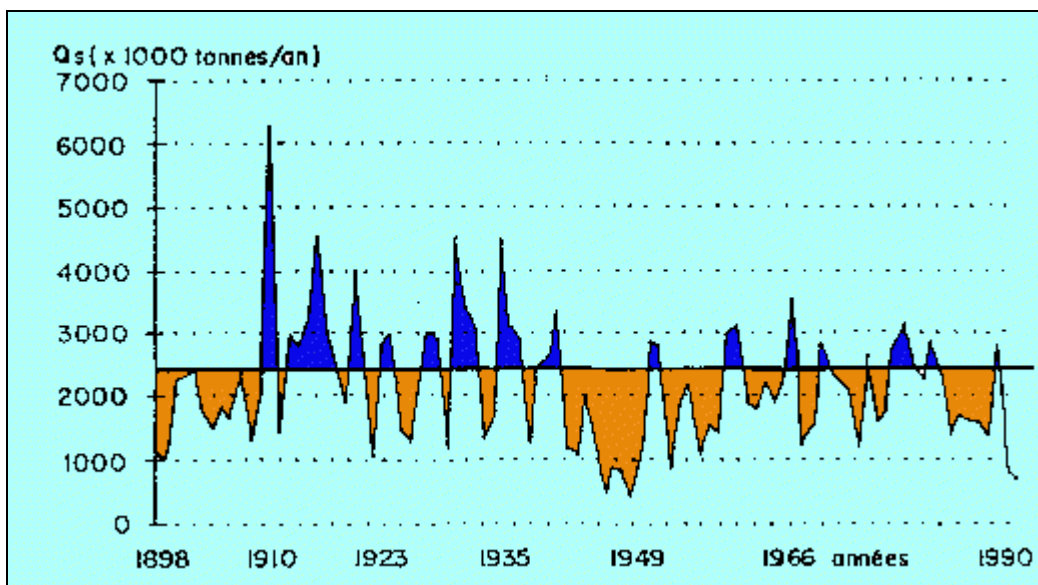
D'après Allen, 1972



#### Annexe 8 : Répartition de la salinité dans l'estuaire de la Seine en fonction de différentes conditions de marée et de débits fluviaux

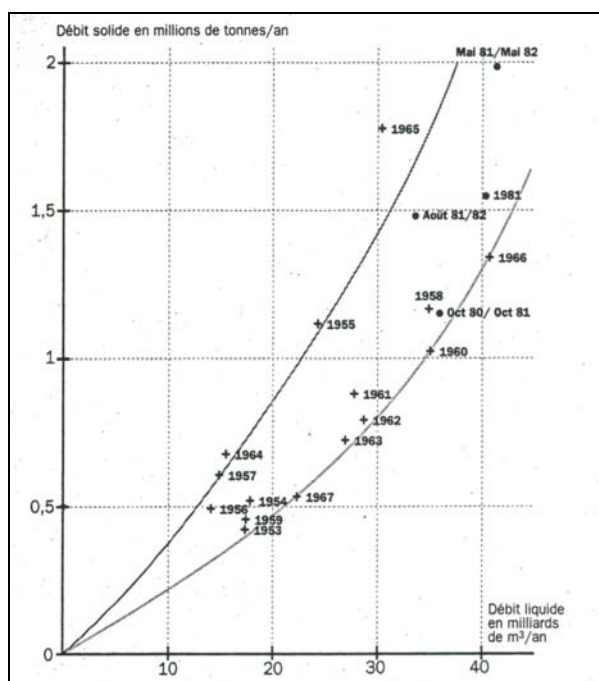
D'après Avoine 1981 in Le Hir & Silva Jacinto 2001





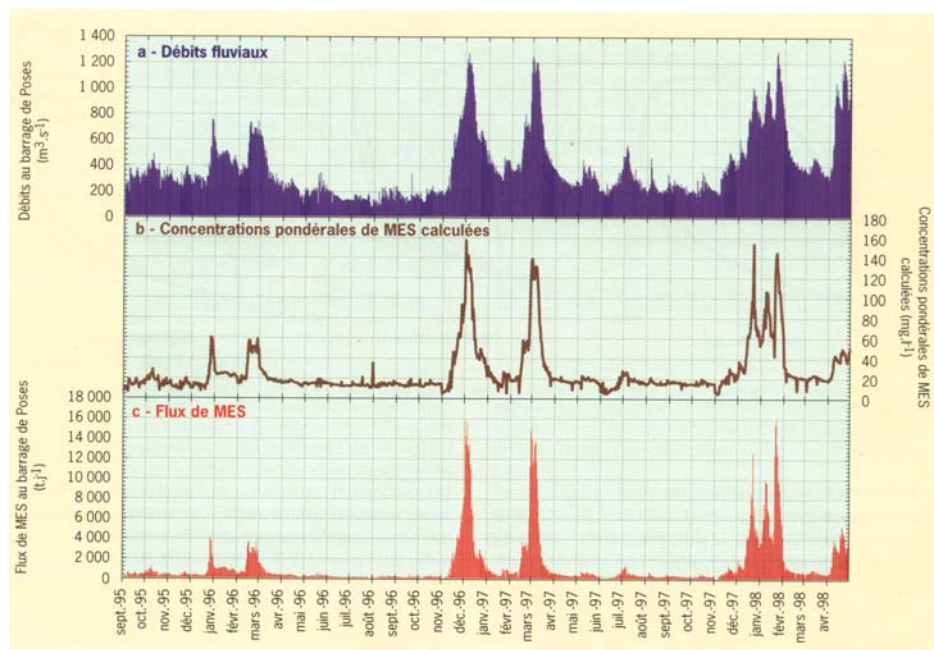
Annexe 9: Débits solides moyens annuels estimés des apports fluviaux à la Gironde depuis 1898.

D'après [www.svt.ac-bordeaux.fr](http://www.svt.ac-bordeaux.fr)



Annexe 10 : Apport solides en suspension de la Loire

D'après Migniot. & Le Hir, 1997



**Annexe 11 : Evolution quotidienne (a) des débits fluviaux, (b) des concentration pondérales de MES calculées et (c) des flux de MES sur la Seine.**

Au barrage de Poses entre le 1<sup>er</sup> septembre 1995 et le 30 avril 1998 (données SNS)  
*D'après Dupont et al, 2001*