

# DEVELOPPEMENT ET EXPLOITATION D'UN MODELE HYDROSEDIMENTAIRE EN TROIS DIMENSIONS SUR L'ESTUAIRE DE LA LOIRE

Lot 1 : Construction et exploitation du modèle

Phase1 : Construction du modèle

Cadre d'exploitation  
1711822 R9

Décembre 2009

Programme de restauration de l'estuaire en aval de Nantes - études préalables à la tranche expérimentale - Année 2008



Établissement cofinancé par l'Union européenne.  
L'Europe s'engage en faveur de la Loire avec le Fonds européen de développement régional.



Établissement public du ministère  
chargé du développement durable





# PROGRAMME DE RESTAURATION DE LA LOIRE ESTUARIEENNE EN AVAL DE NANTES

## DEVELOPPEMENT ET EXPLOITATION D'UN MODELE HYDROSEDIMENTAIRE EN TROIS DIMENSIONS SUR L'ESTUAIRE DE LA LOIRE

LOT 1 – PHASE 1

Cadre d'exploitation

DECEMBRE 2009

1 71 1822 R9

Suivi des versions

Définitif	décembre 2009	RWR	
<b>VERSION</b>	<b>DATE</b>	<b>AUTEUR</b>	<b>COMMENTAIRES</b>

## SOMMAIRE

---

OBJET DE L'ETUDE .....	C
<b>1. LES BESOINS EN EXPLOITATION .....</b>	<b>1</b>
1.1. ANALYSE DES PROCESSUS A L'ECHELLE DE L'ESTUAIRE .....	1
1.1.1. LA PROPAGATION DE LA MAREE .....	1
1.1.2. INTRUSION HALINE.....	1
1.1.3. DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE A COURT TERME .....	1
1.2. PARAMETRES ESTUARIENS CONDITIONNANT L'EXERCICE DES USAGES EN ESTUAIRE	2
1.3. EVALUATION D'AMENAGEMENTS SPECIFIQUES ET LOCALISES .....	2
<b>2. LES MODELES.....</b>	<b>3</b>
2.1. LE MODELE GLOBAL.....	3
2.2. LE MODELE RAFFINE DES VASIERES NORD.....	5
2.3. LES ENSEIGNEMENTS DU CALAGE DU MODELE GLOBAL.....	6
<b>3. LES CONDITIONS DE FORÇAGE .....</b>	<b>9</b>
3.1. FORÇAGES LONG TERME.....	9
3.1.1. FORÇAGE EN DEBIT.....	9
3.1.2. FORÇAGE EN HOULE .....	14
3.1.3. FORÇAGE EN VENT .....	17
3.1.4. FORÇAGE EN MES A L'AMONT.....	18
3.2. FORÇAGES POUR LE COURT TERME .....	22
3.2.1. PARAMETRES ETUDIES : HYDRODYNAMIQUE ET SALINITE (MODELE CALAGE SIMPLE) .....	22
3.2.2. PARAMETRES ETUDIES : HYDRODYNAMIQUE, SALINITE ET MES (MODELE CALAGE COUPLE)	23
<b>4. LES SORTIES .....</b>	<b>25</b>
4.1. PARAMETRES A EXTRAIRE A POINTS FIXES.....	25
4.2. CUBATURES .....	26
4.2.1. CHENAL DE NAVIGATION .....	26
4.2.2. ESTRANS .....	26
4.3. POST-TRAITEMENT .....	27
<b>ANNEXE.....</b>	<b>29</b>

---

## LISTE DES TABLEAUX

---

TABLEAU 1 - LISTE DES VARIABLES SORTIES SUR FICHIER D'ANALYSE EXCEL .....	26
---	----

## LISTE DES FIGURES

---

FIG. 1.	MAILLAGE HORIZONTAL DU MODELE GLOBAL.....	3
FIG. 2.	BATHYMETRIE DU MODELE GLOBAL SUR LES VASIERES NORD .....	4
FIG. 3.	MAILLAGE DU MODELE GLOBAL SUR LES VASIERES NORD .....	4
FIG. 4.	BATHYMETRIE DU MODELE RAFFINE SUR LES VASIERES NORD.....	5
FIG. 5.	MAILLAGE DU MODELE RAFFINE SUR LES VASIERES NORD.....	6
FIG. 6.	DEBITS JOURNALIER SUR LA PERIODE 2000-2009 .....	9
FIG. 7.	DEBITS CLASSES .....	10
FIG. 8.	DEBITS CLASSES DES ANNEES 2000 A 2008 .....	10
FIG. 9.	DEBIT JOURNALIER DE L'ANNEE 2007 .....	11
FIG. 10.	DEBIT JOURNALIER 2007 RETENU AVEC ETIAGE 2009 .....	12
FIG. 11.	DEBIT CLASSE DE L'ANNEE RECOMPOSEE .....	12
FIG. 12.	DEBIT JOURNALIER DE LA PERIODE RECOMPOSEE ET RETRAVAILLEE .....	13
FIG. 13.	DEBIT CLASSE DE L'ANNEE RECOMPOSEE ET RETRAVAILLEE .....	13
FIG. 14.	DEBIT JOURNALIER, MAREE ET NIVEAU MOYEN DU FORÇAGE LONG TERME .....	14
FIG. 15.	POSITION DES POINTS D'EXTRACTION PREVIMER ET ANEMOC.....	14
FIG. 16.	FREQUENCE DE NON DEPASSEMENT DES HS ET Tp SUR LA PERIODE DE FORÇAGE .....	15
FIG. 17.	REPARTION DES HS MOYEN MENSUEL .....	15
FIG. 18.	REPARTION DES HS MOYEN MENSUEL AVEC MODIFICATIONS SUR LA PERIODE RETENUE.....	16
FIG. 19.	FREQUENCE DE NON DEPASSEMENT DES HS ET Tp DU FORÇAGE LONG TERME .....	16
FIG. 20.	FORÇAGE LONG TERME DES HOULES .....	17
FIG. 21.	FORÇAGE LONG TERME DES VENTS.....	18
FIG. 22.	MES MESUREE A BELLEVUE ET DEBIT.....	19
FIG. 23.	MES JOURNALIERE A BELLEVUE EN FONCTION DU DEBIT JOURNALIER.....	19
FIG. 24.	MES JOURNALIERE A BELLEVUE EN FONCTION DU DEBIT (Q>500 M <sup>3</sup> /s) .....	20
FIG. 25.	DISTINCTION DE TROIS GROUPES : MONTEE DE CRUE, DECRUE, INTERMEDIAIRE .....	21
FIG. 26.	RECOMPOSITION DU SIGNAL DE MES A PARTIR DES 3 LOIS D'INTERPOLATION .....	21
FIG. 27.	FORÇAGE LONG TERME EN MES.....	22
FIG. 28.	ZONES DE DRAGAGES.....	26

oOo

---

## OBJET DE L'ETUDE

---

Par marché attribué le 29 août 2008, Le GIP Loire Estuaire a confié à SOGREAH une étude portant principalement sur le développement et l'exploitation d'un modèle hydro-sédimentaire en trois dimensions sur l'estuaire de la Loire dans le cadre de son « Programme de restauration de la Loire estuarienne en aval de Nantes ». Ce marché comprend également des prestations d'études de scénarios et de leviers d'aménagement s'appuyant sur ce modèle.

Cette mission confiée par le GIP Loire Estuaire à SOGREAH comprend, en lot 1, la construction et l'exploitation d'un modèle 3D de l'estuaire de la Loire. La phase 1 de ce lot consiste notamment à réaliser la construction et le calage de ce modèle ainsi qu'à définir son cadre d'exploitation

Ce rapport définit le cadre d'exploitation du modèle d'une part à l'échelle de l'estuaire et d'autre part à une échelle plus locale.

L'exploitation du modèle sera en effet effectuée à l'échelle de l'estuaire en phase 2 sur trois situations de référence :

- La situation actuelle
- La situation tendancielle
- Le scénario morphologique global existant

Cette exploitation sera effectuée d'autre part à une échelle plus locale pour des leviers d'intervention ou des aménagements plus spécifiques et localisés.



---

## 1. LES BESOINS EN EXPLOITATION

---

### 1.1. ANALYSE DES PROCESSUS A L'ECHELLE DE L'ESTUAIRE

Les processus à étudier conformément au CCTP sont :

#### 1.1.1. LA PROPAGATION DE LA MAREE

La propagation de la marée sera étudiée à partir des points de sondes extraits à chaque PK, en prenant une marée de vive-eau typique :

- la courbe des maximum et minimum de niveau d'eau permettra d'étudier le marnage le long de l'estuaire,
- la courbe des temps de BM et PM en chaque pk permettra d'étudier la propagation de la marée et l'asymétrie de la marée dans l'estuaire,
- la courbe des maximum de vitesse en flot /jusant et les temps de dépassement des vitesses permettra l'analyse des courants
- les « volumes oscillants chargés » et les durées de flot et jusant (descriptions dans le rapport R6) seront calculés afin de quantifier l'asymétrie de la marée.

#### 1.1.2. INTRUSION HALINE

L'intrusion haline sera étudiée à partir des extractions à chaque PK, en moyenne sur la verticale et au fond. L'analyse sur des périodes de vives-eaux et morte-eaux combinées à un débit de crue ou d'étiage permettra d'évaluer l'intrusion haline sur une période où le pompage tidal est prédominant et sur une période où l'intrusion par densité est prédominante.

#### 1.1.3. DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE A COURT TERME

- Explication des processus d'accumulation de sédiments fins dans l'estuaire : analyse suivant le cas,
- Quantification des apports depuis l'amont et depuis l'aval en vase : des calculs temporels de flux de vase seront effectués en amont et en aval de l'estuaire,

- Quantification d'un bilan sédimentaire de l'estuaire : les bilans des apports amont : aval et des différentes cellules permettront d'évaluer dans le modèle un bilan sédimentaire,
- Dynamique des dépôts sur les milieux (vasières, prairies) : les courbes temporelles de cubature permettront l'évaluation de la dynamique suivant les forçages appliqués,
- Dynamique des dépôts dans le chenal de navigation : les courbes de cubatures temporelles dans chaque cellule permettra d'évaluer les transferts entre les cellules et décrire la dynamique.

## 1.2. PARAMETRES ESTUARIENS CONDITIONNANT L'EXERCICE DES USAGES EN ESTUAIRE

Ces paramètres ont été définis à la suite d'une analyse fonctionnelle effectuée par le GIP en mars 2006. Cette analyse et les paramètres qui en découlent est reprise en annexe de la présente note.

## 1.3. EVALUATION D'AMENAGEMENTS SPECIFIQUES ET LOCALISES

Il s'agit ici d'étudier d'une part l'impact de leviers sur l'ensemble de l'estuaire et d'autre part d'évaluer un levier du point de vue de son comportement hydraulique et sédimentaire local (impacts locaux, pérennité du levier).

---

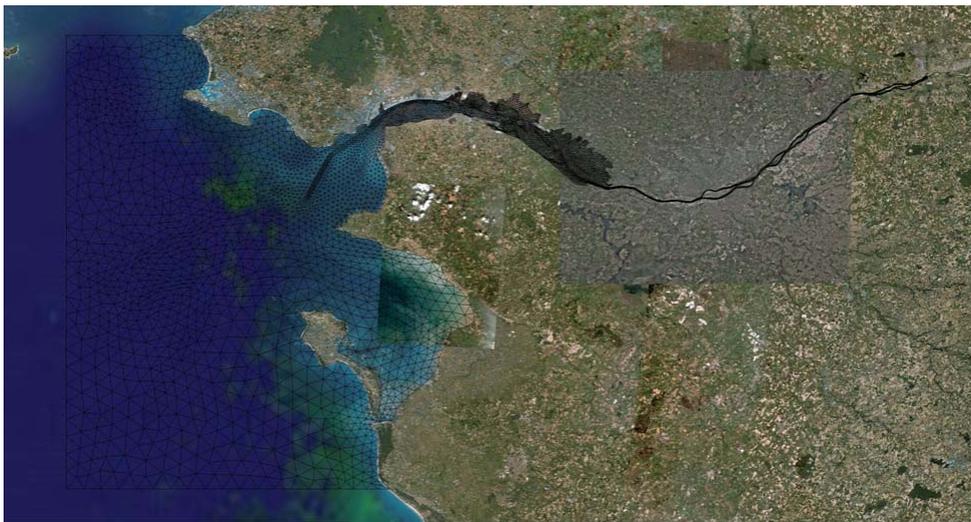
## 2. LES MODELES

---

Deux types de modèles sont disponibles actuellement. Un type de modèle dit global (utilisé jusqu'à présent pour le calage) qui permet l'analyse à l'échelle estuarienne et un type de modèle raffiné des vasières nord (modèle global avec diminution de la maille jusqu'à 10m, sur les vasières nord : pk12 à 25 ).

### 2.1. LE MODELE GLOBAL

Pour rappel, le maillage horizontal du modèle global de l'état actuel est composé de 7052 nœuds, et la taille de maille varie entre 50 mètres et 2500 mètres. Ce maillage évoluera pour les autres situations tout en gardant la même philosophie de construction. Il y aura donc autant de modèles que de situations à tester.



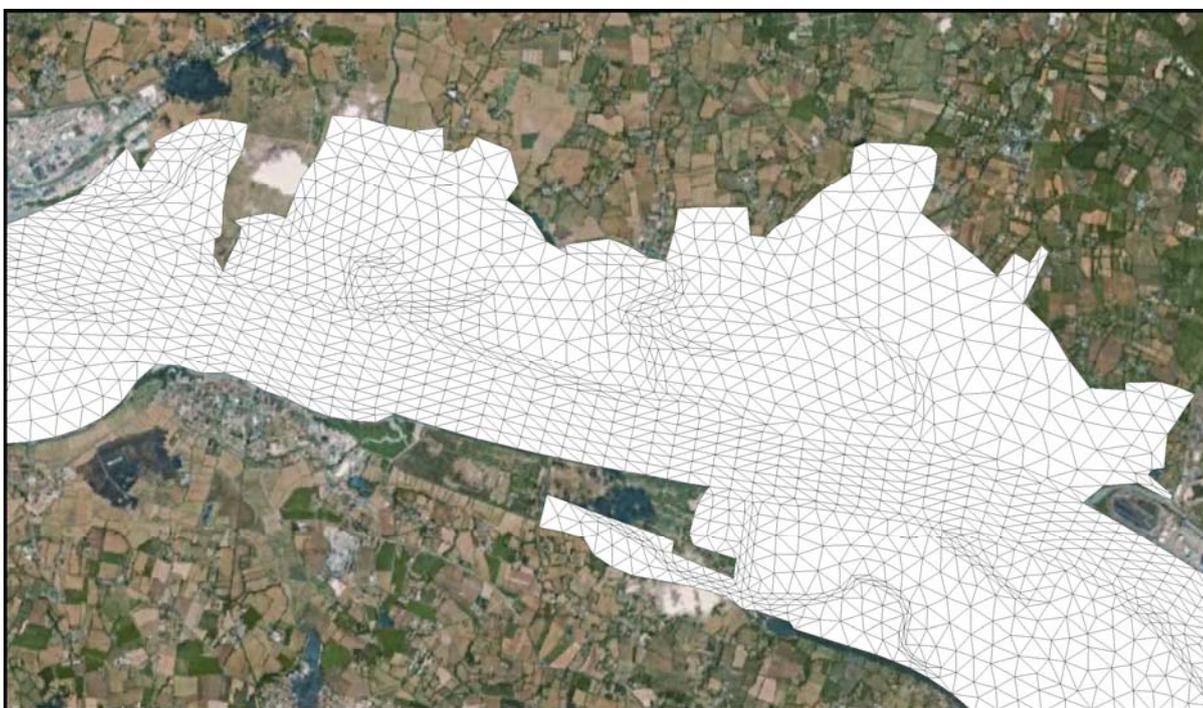
*Fig. 1. MAILLAGE HORIZONTAL DU MODELE GLOBAL-ETAT ACTUEL*

Les figures 2 et 3 présentent un zoom du modèle global sur la section intermédiaire qui correspond à la zone différenciant le modèle global du modèle raffiné.

Le modèle global peut permettre d'effectuer des calculs long-terme comme court-terme.



*Fig. 2. BATHYMETRIE DU MODELE GLOBAL SUR LES VASIERES NORD*



*Fig. 3. MAILLAGE DU MODELE GLOBAL SUR LES VASIERES NORD*

## 2.2. LE MODELE RAFFINE DES VASIERES NORD

Lors de la réunion du 8 juillet 2009, le GIP a demandé à Sogreah une mobilisation anticipée du modèle raffiné prévu en phase 2 du marché pour l'étude de la phase opérationnelle (création d'une vasière expérimentale). Ne connaissant pas encore la position de ce projet, le GIP a demandé un modèle raffiné de l'ensemble des vasières nord entre Donges et Cordemais. Sogreah a donc construit un tel modèle à partir du modèle global, pour lequel nous sommes venus raffiner l'ensemble des vasières nord entre les pk12 à 25.

La taille de maille minimale fixée sur la zone est de 10m. Le nombre de nœuds total du maillage horizontal est de 42 292 nœuds. Il s'agit donc d'un modèle de grande envergure construit dans l'optique d'étudier les écoulements hydrauliques (exutoire des marais, submersion) et la salinité à l'aide de calculs courts. Il ne permet pas d'effectuer des calculs longs sédimentologiques.

Un modèle raffiné local devra donc être mobilisé dans le cas où des calculs longs seraient jugés nécessaires par exemple pour évaluer la pérennité d'un projet précis.



*Fig. 4. BATHYMETRIE DU MODELE RAFFINE SUR LES VASIERES NORD*



*Fig. 5. MAILLAGE DU MODELE RAFFINE SUR LES VASIERES NORD*

### 2.3. LES ENSEIGNEMENTS DU CALAGE DU MODELE GLOBAL

Le modèle global a été calé en calage 'simple : cartes de frottement fonction du débit' avec la bathymétrie MTU 2002 étendue

- En hydrodynamique : sur 5 périodes courtes de débits représentatifs
- En salinité : sur 2 périodes courtes de débits représentatifs ayant des mesures de salinité (crue et débit moyen)
- En salinité et sédimentologie : sur une période longue de 5 mois de 2007

Le modèle global en calage 'couplé : frottement fonction du dépôt local de vase' est en cours avec la bathymétrie du MNTU 2002 étendue approfondie dans le chenal de navigation de manière schématique suivant les levés Mesuris de 2008 qui sont représentatifs des 'fonds durs'. Le calage s'effectue pour l'hydrodynamique, la salinité et la sédimentologie sur une période longue de 5 mois.

En effet, la stratégie de calage au cours de l'étude a évolué dans le sens où il est apparu pertinent d'effectuer des calculs courts pour l'étude de paramètres qui ont une réponse rapide aux forçages : surface libre, vitesse, salinité. Par contre, pour les paramètres de type sédimentologique (MES, morphologie) qui ont un temps de réponse plus long aux forçages, il est apparu nécessaire de simuler des périodes longues (5 mois).

La définition du cadre d'exploitation va donc évoluer dans le même sens, avec des calculs longs ou courts suivant le type de paramètre à étudier.

D'autre part, il faut garder à l'esprit que le modèle issu du calage simple ne peut être utilisé que pour des situations proches de l'état actuel du point de vue des cartes de frottement. Toute simulation de levier susceptible de faire évoluer ces cartes de frottement devra utiliser le modèle couplé.



## 3. LES CONDITIONS DE FORÇAGE

### 3.1. FORÇAGES LONG TERME

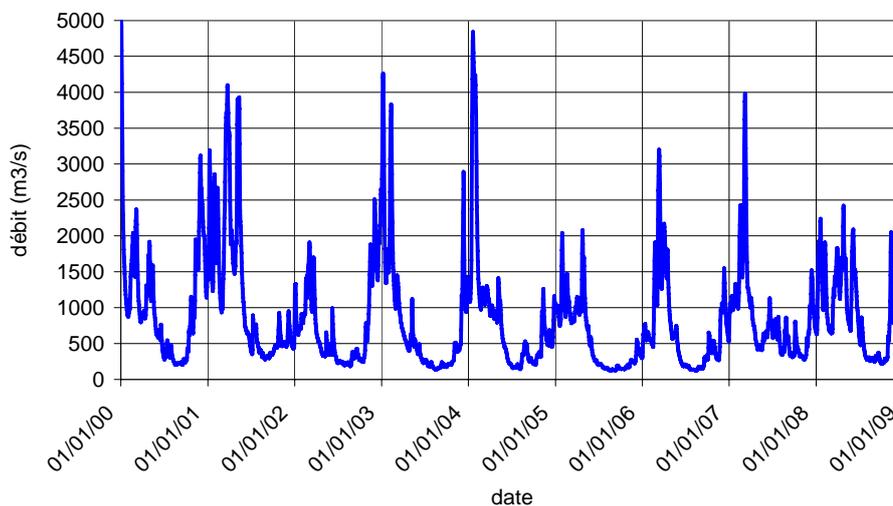
#### 3.1.1. FORÇAGE EN DEBIT

Pour les calculs à long-terme, il est prévu au cahier des charges d'effectuer des calculs sur un cycle (débits classés) sous la forme d'une année compressée.

Lors de la réunion du 14 septembre 2009, le comité d'expert a émis sa préférence pour un cycle hydro-météorologique réel plutôt qu'un cycle recomposé. En effet, le cycle recomposé pose le problème des vents et des houles à utiliser et de leur représentativité.

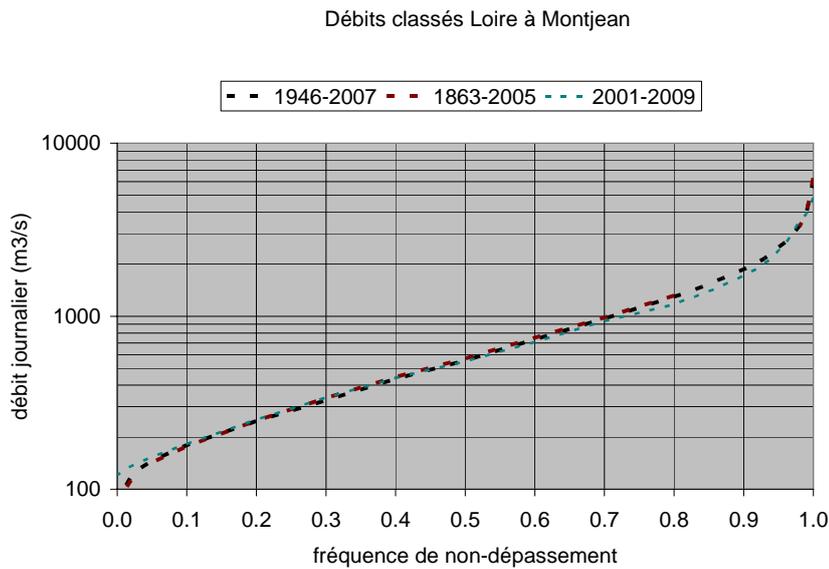
Nous avons donc fait porter notre travail sur des cycles réels de débits au cours des années comprises entre 2000 et nos jours, afin de ne pas avoir à récupérer des données hydrométéorologiques trop anciennes (vent, houle).

Loire -débit journalier - année 2000/2008



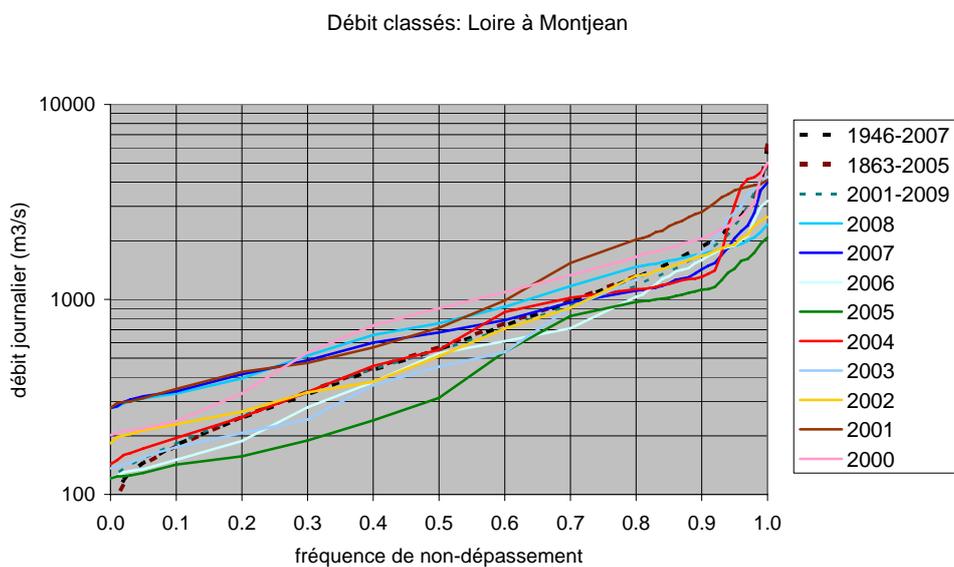
**Fig. 6. DEBITS JOURNALIER SUR LA PERIODE 2000-2009**

Nous avons repris la courbe des débits classés établie lors de l'étude de 2006 et mis à jours les débits classés pour la période post 2000.



**Fig. 7. DEBITS CLASSES**

Nous avons ensuite calculé les débits classés pour chaque année de 2000 à 2008 que nous avons replacés sur le même graphique :



**Fig. 8. DEBITS CLASSES DES ANNEES 2000 A 2008**

La lecture de ce graphique, nous montre qu'aucune de ces neuf dernières années ne peut être vraiment représentative d'un cycle annuel moyen.

Nous avons donc décidé de travailler sur le débit (en le modifiant le moins possible) d'une de ces années pour la rendre la plus représentative d'une année moyenne en terme de débit.

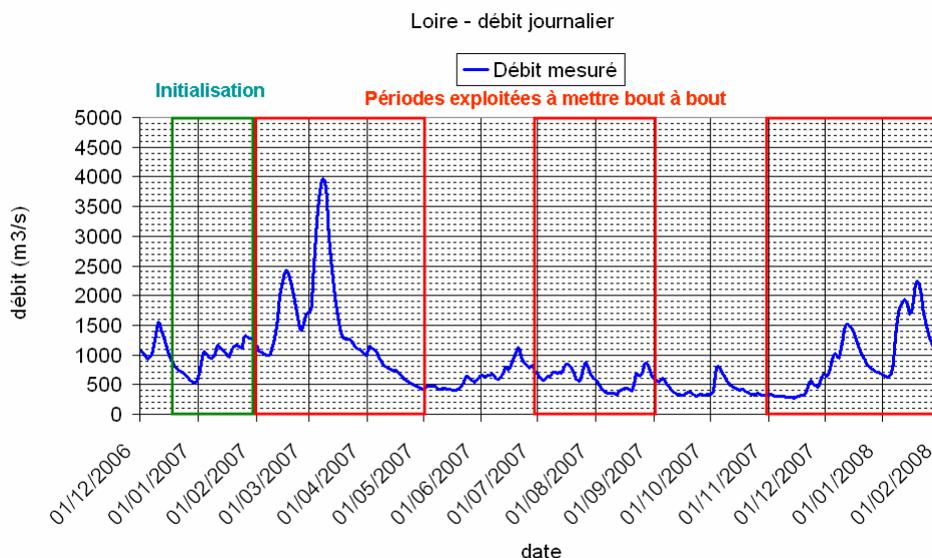
Nous avons décidé de prendre l'année 2007 comme base de travail :

- car nous disposons de mesures au cours de cette année (réseau de mesures en continu) ce qui est un atout,
- par le fait que la répartition et l'enchaînement des forts débits sont assez représentatifs d'une année moyenne (contrairement à l'année 2008). Par contre l'étiage n'a pas vraiment été présent cette année là.
- du fait que nous pouvons réunir toutes les conditions hydro-météorologiques de cette année (contrairement à 2004 par exemple, ou nous ne disposons pas de données de houle)
- de plus, le calage du modèle s'est effectué sur le début de cette année en temps réel.

Suite à la réunion d'expert du 14 décembre 2009 :

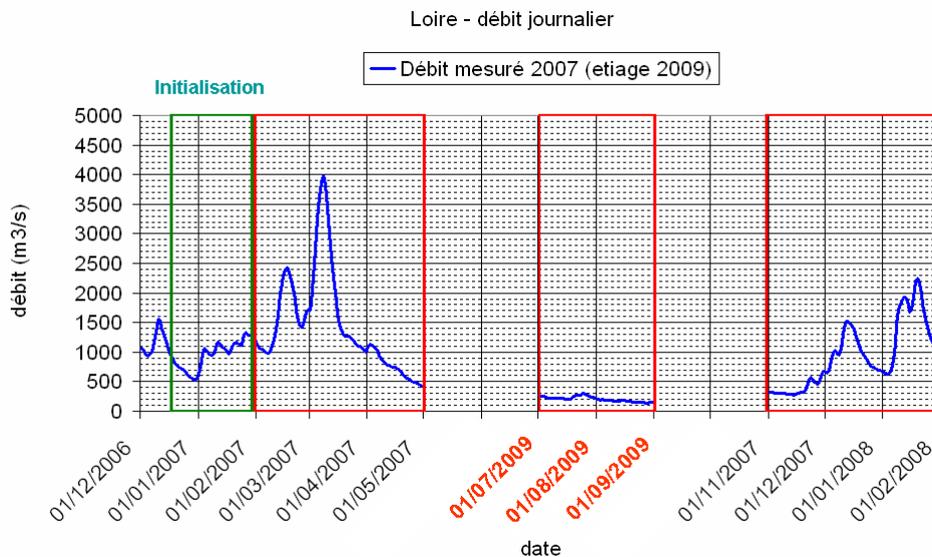
Il est décidé de raccourcir le cycle de débit à 8 mois exploitables, afin de conserver des temps de calculs réalistes (estimés à 15 jours en tenant compte de 1,5 mois d'initialisation).

Pour cela, il a été décidé de garder la période du 01/02/2007 au 01/02/2008 en supprimant les mois de mai, juin, octobre et novembre. Cela permet de garder une allure de cycle annuel sur 8 mois.



**Fig. 9. DEBIT JOURNALIER DE L'ANNEE 2007**

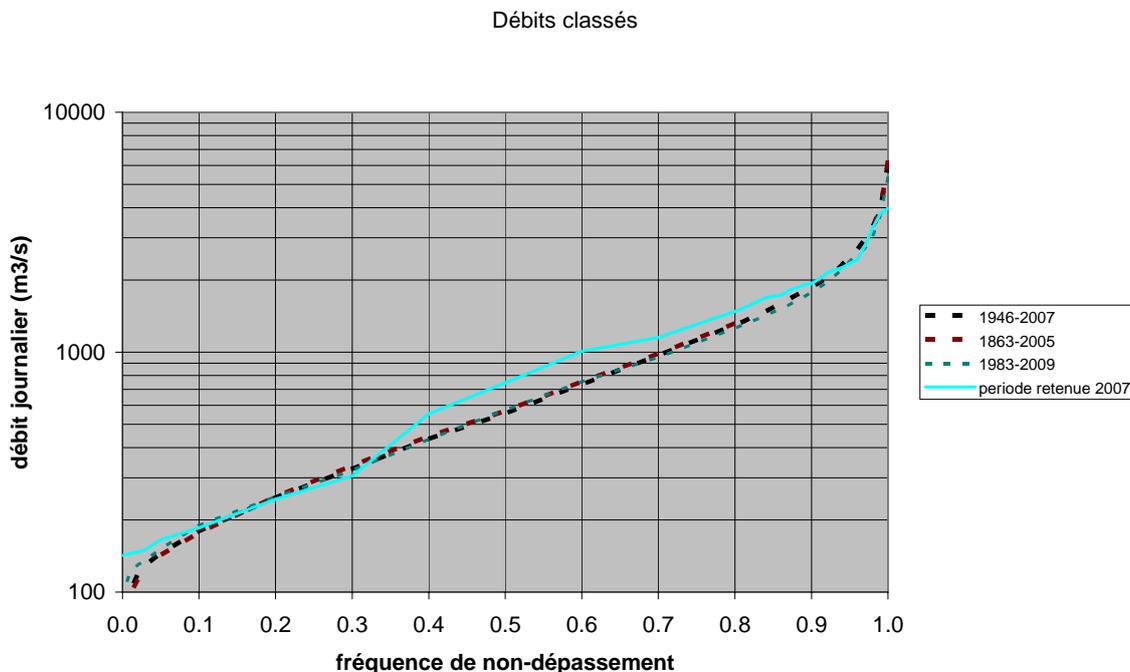
Suite à la réunion téléphonique du 17 décembre 2009 Sogreah/GIP Loire, il est préconisé par le GIP d'utiliser plutôt l'étiage de juillet-août 2009, qui est plus représentatif d'un étiage classique (1,5 à 2 mois de débits inférieur à 200 m<sup>3</sup>/s dont une semaine à environ 150 m<sup>3</sup>/s) :



**Fig. 10. DEBIT JOURNALIER 2007 RETENU AVEC ETIAGE 2009**

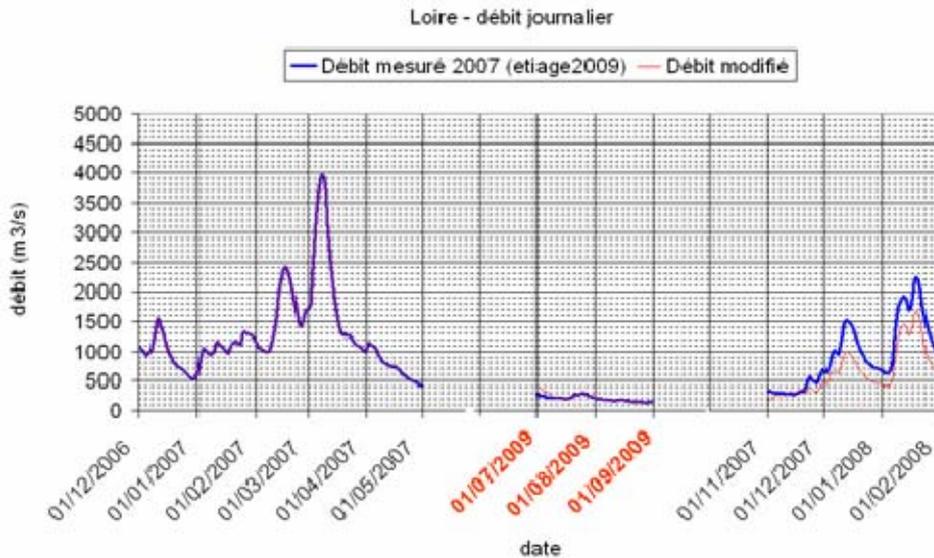
Suivant la courbe des débits classés obtenue sur cette nouvelle période, un travail a été effectué sur les 5 derniers mois pour recoller à une répartition statistique annuelle moyenne (basée sur les années 1983 à 2009, années pour lesquels un soutien d'étiage est effectué).

Le calcul des débits classés sur cette période (figure suivante) montre clairement que l'étiage 2009 est représentatif d'un étiage moyen par contre les débits intermédiaires sont encore trop importants.



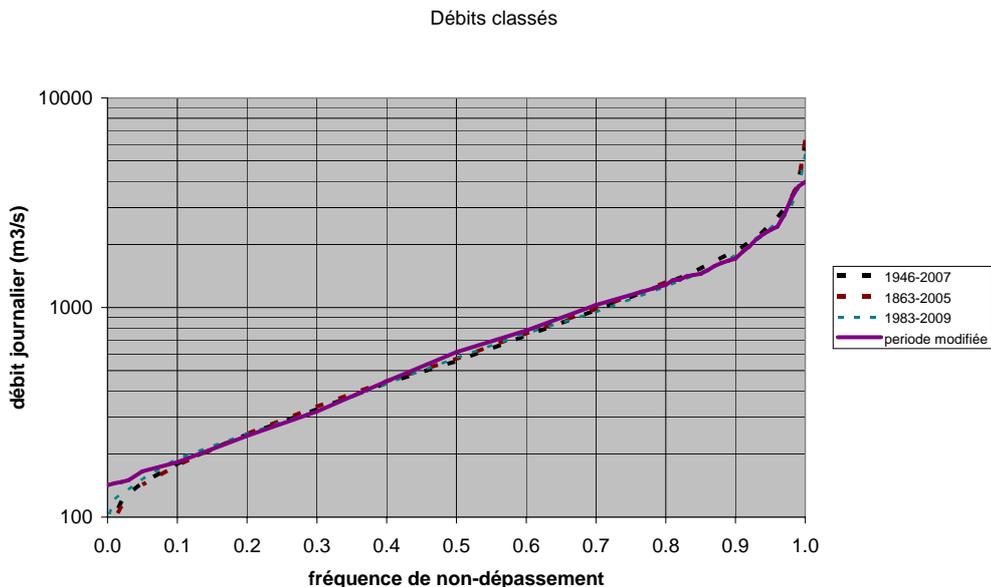
**Fig. 11. DEBIT CLASSE DE L'ANNEE RECOMPOSEE**

Un travail sur les débits à donc été effectué (courbe rouge sur la figure suivante), afin de respecter au mieux la courbe des débits classés d'une année moyenne. La modification des débits s'effectue principalement sur les 2 derniers mois, afin de garder la période de crue initiale intact, ce qui permet d'être comparatif aux mesures issues du réseau en continu sur cette période.



**Fig. 12. DEBIT JOURNALIER DE LA PERIODE RECOMPOSEE ET RETRAVAILLEE**

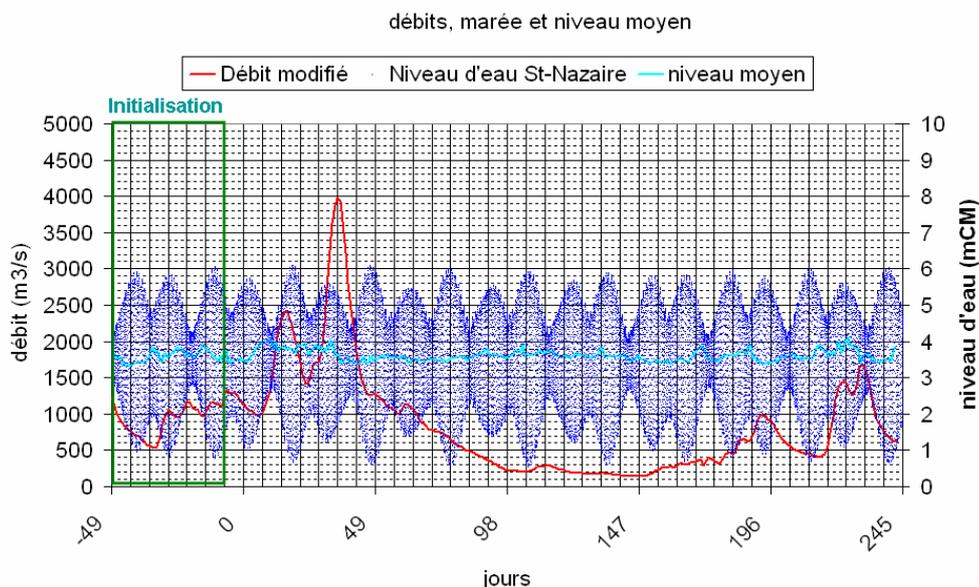
La courbe des débits classés pour la période avec les débits modifiés donne :



**Fig. 13. DEBIT CLASSE DE L'ANNEE RECOMPOSEE ET RETRAVAILLEE**

La mise bout à bout des périodes de débits retenues donne les forçages suivants en niveau et en débit pour l'exploitation des calculs à long terme.

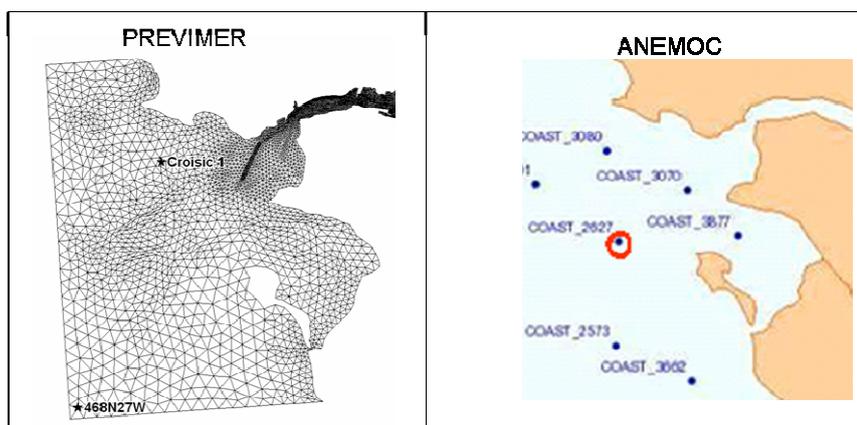
On notera que le signal de marée astronomique retenu correspond à la période allant du 14/12/2006 au 30/9/2007. Le signal de niveau moyen correspond par contre aux mois des vents qui sont pris en compte dans la simulation soit: 14/12/2006->30/04/2007 ; 01/07/2007->31/08/2007; 01/11/2007->31/01/2008.



**Fig. 14. DEBIT JOURNALIER, MAREE ET NIVEAU MOYEN DU FORCAGE LONG TERME**

### 3.1.2. FORÇAGE EN HOULE

Le forçage de la houle utilise les houles mesurées (Prévimer point 468N27W) durant les mois représentés de 2007. Si l'on effectue des statistiques sur les données ANEMOC 1979-2001 (point coast\_26\_27), on s'aperçoit que la période représentée est de forte intensité par rapport à une année moyenne.



**Fig. 15. POSITION DES POINTS D'EXTRACTION PREVIMER ET ANEMOC**

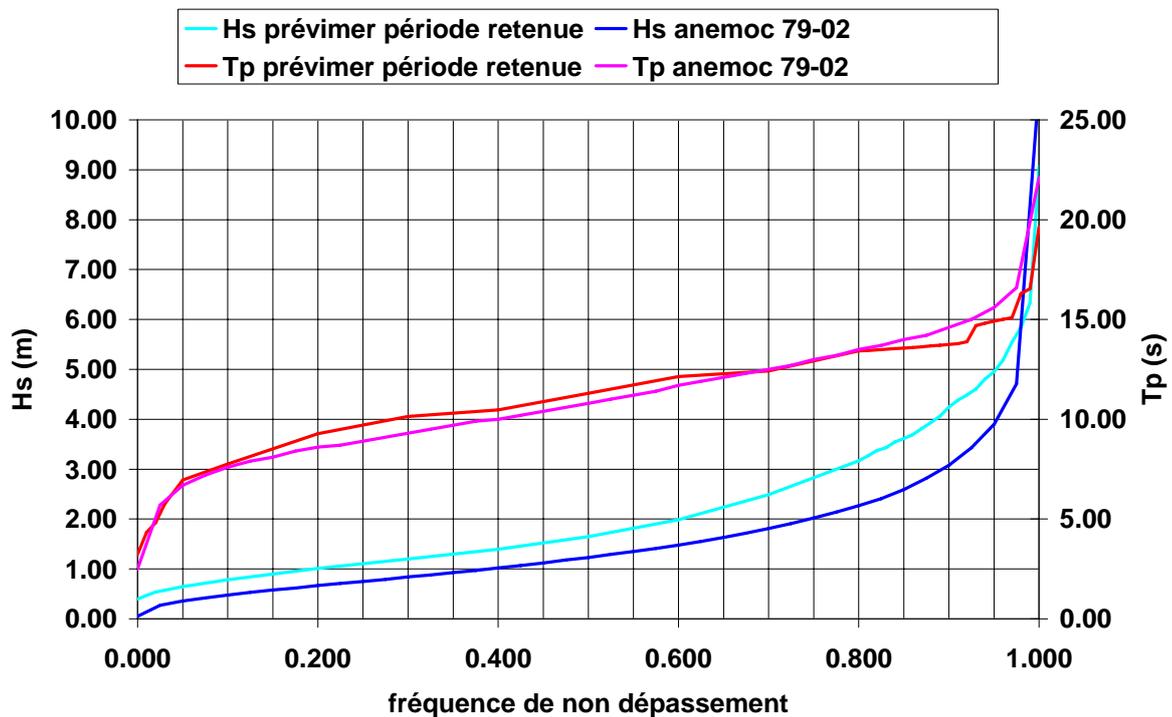


Fig. 16. FREQUENCE DE NON DEPASSEMENT DES Hs ET Tp SUR LA PERIODE DE FORÇAGE

La répartition du Hs moyen par mois se décompose comme suit :

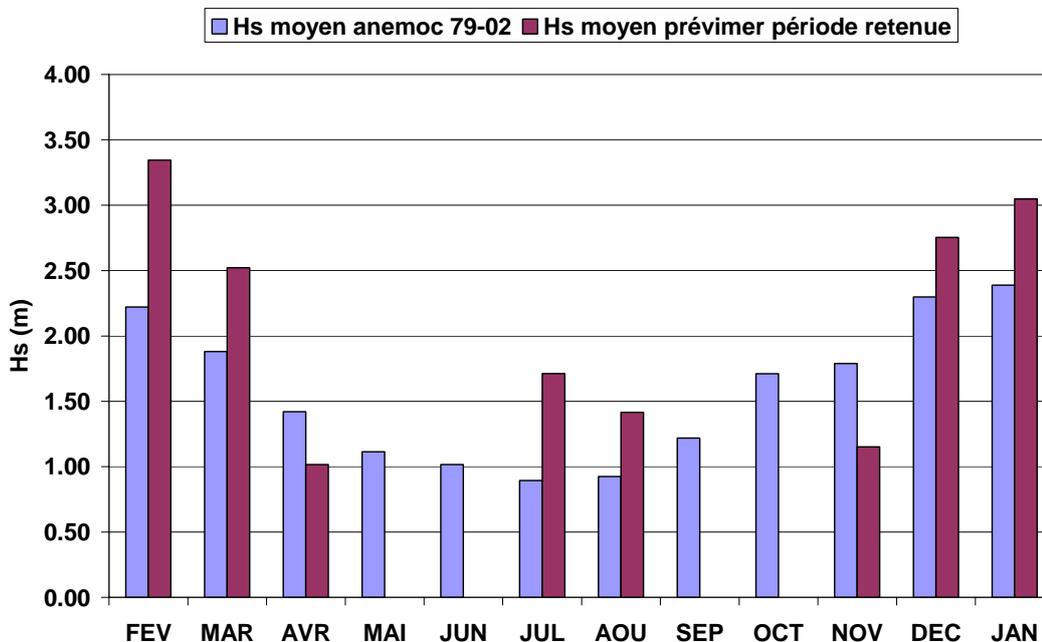


Fig. 17. REPARTITION DES Hs MOYEN MENSUEL

Pour que le climat de houle soit plus représentatif d'une année moyenne, les hauteurs significatives ont principalement été diminuées dans les 5 derniers mois, comme pour les débits :

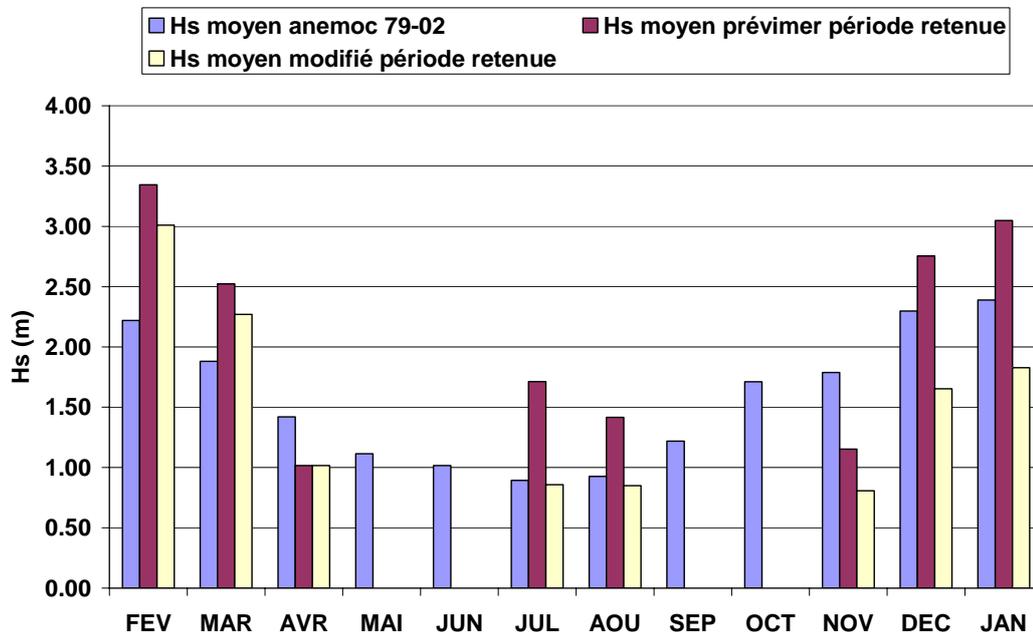


Fig. 18. REPARTITION DES HS MOYEN MENSUEL AVEC MODIFICATIONS SUR LA PERIODE RETENUE

La courbe de répartition des fréquences de non dépassement des hauteurs significatives de houle correspond mieux alors à celle d'une année moyenne :

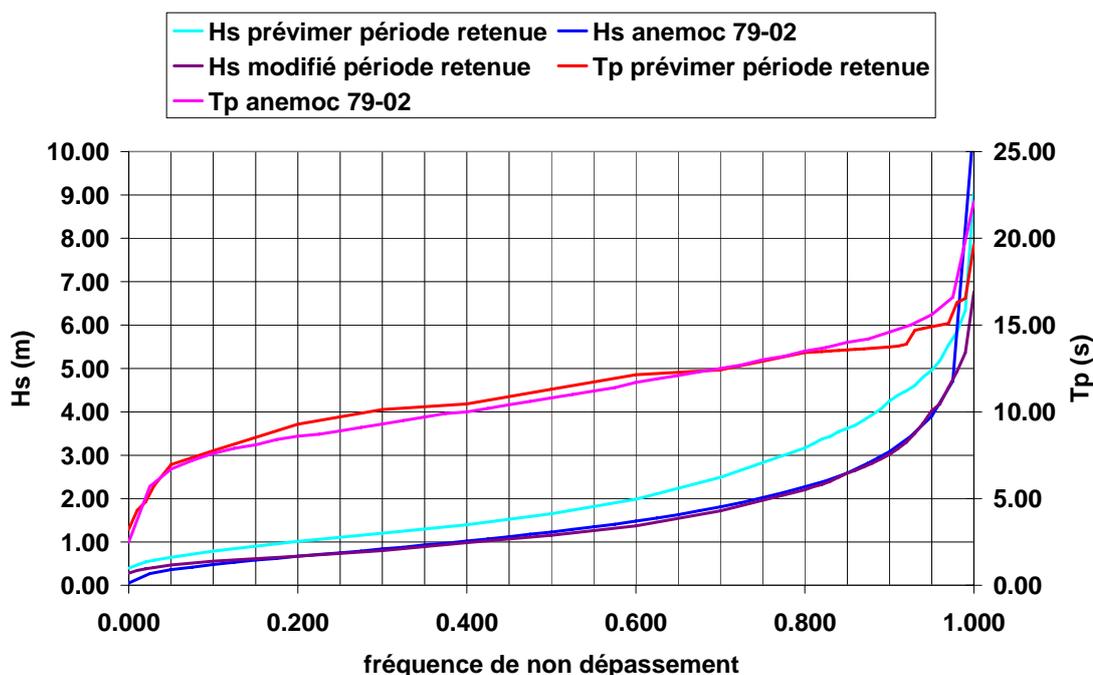
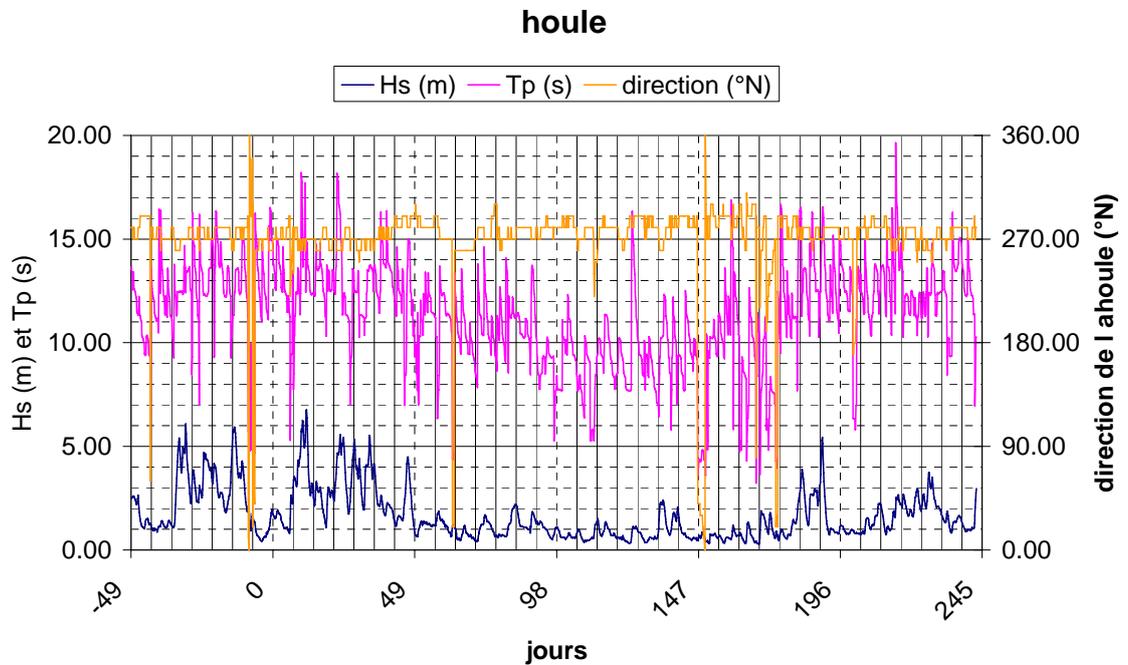


Fig. 19. FREQUENCE DE NON DEPASSEMENT DES HS ET Tp DU FORÇAGE LONG TERME

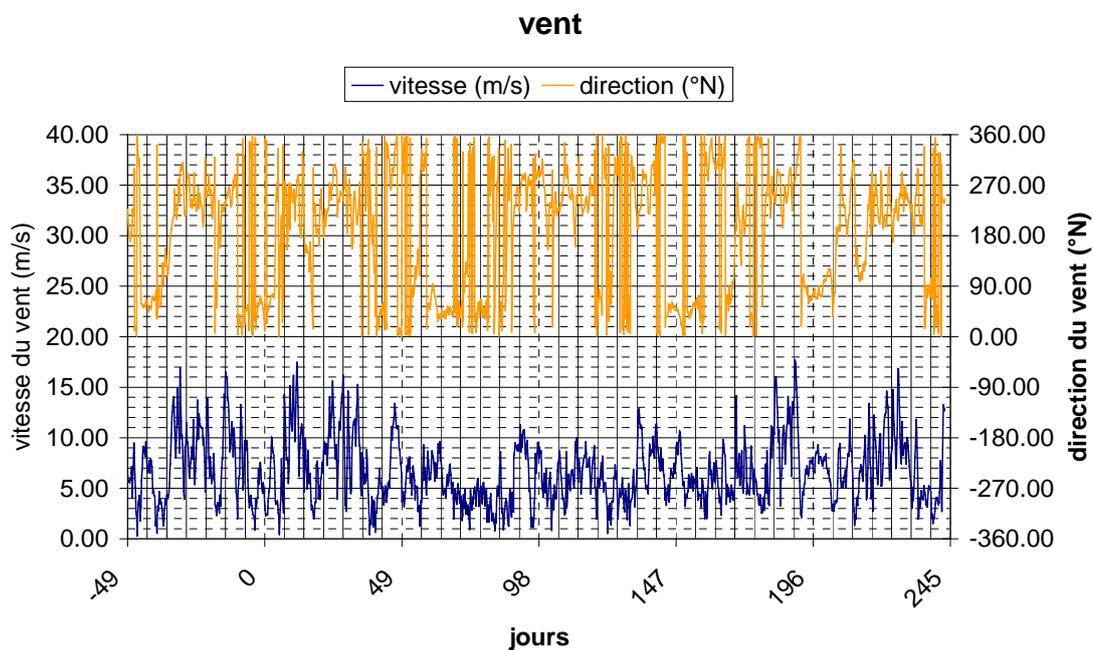
Le cycle de forçage des houles sur la période d'exploitation est alors représenté par le graphique ci-dessous :



*Fig. 20. FORÇAGE LONG TERME DES HOULES*

### 3.1.3. FORÇAGE EN VENT

Le forçage des vents utilise les vents calculés par Prévimer au point CROISIC durant les mois retenus de 2007. Les données Prévimer ne sont pas assez anciennes pour pouvoir effectuer des statistiques et les autres points de mesures ne sont pas localisés de façon à pouvoir comparer les mesures. Il est donc difficile d'affirmer pour le vent si le forçage est représentatif d'une année moyenne.

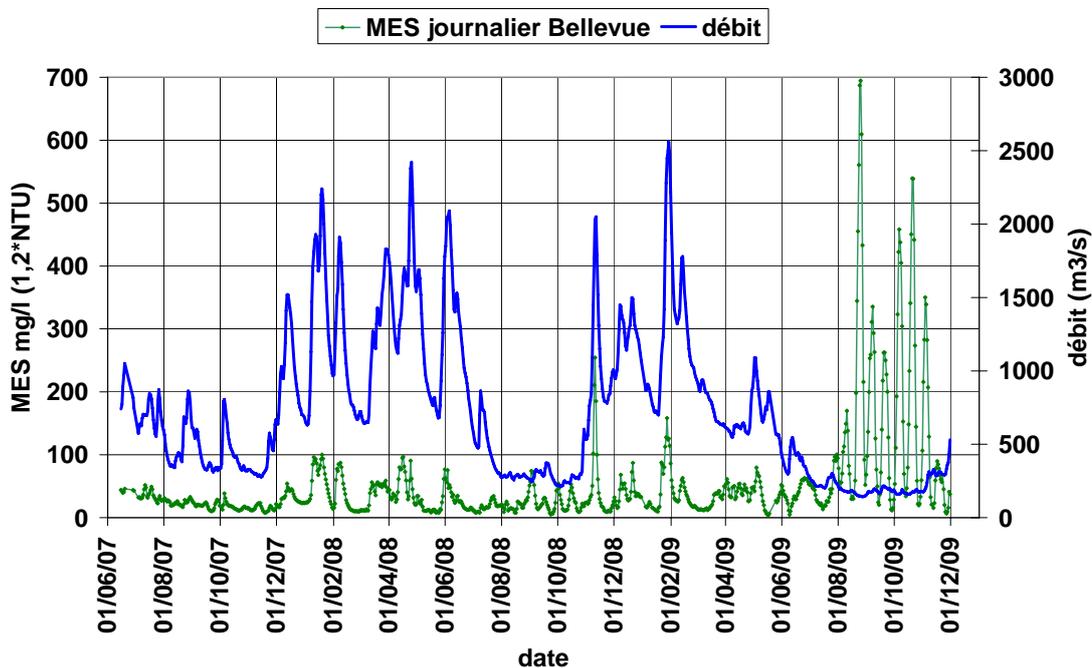


*Fig. 21. FORÇAGE LONG TERME DES VENTS*

#### 3.1.4. FORÇAGE EN MES A L'AMONT

Sur la période de crue, les mesures à Trentemoult seront utilisées comme pour le calage, les données à Bellevue n'étant pas disponible pour cette crue.

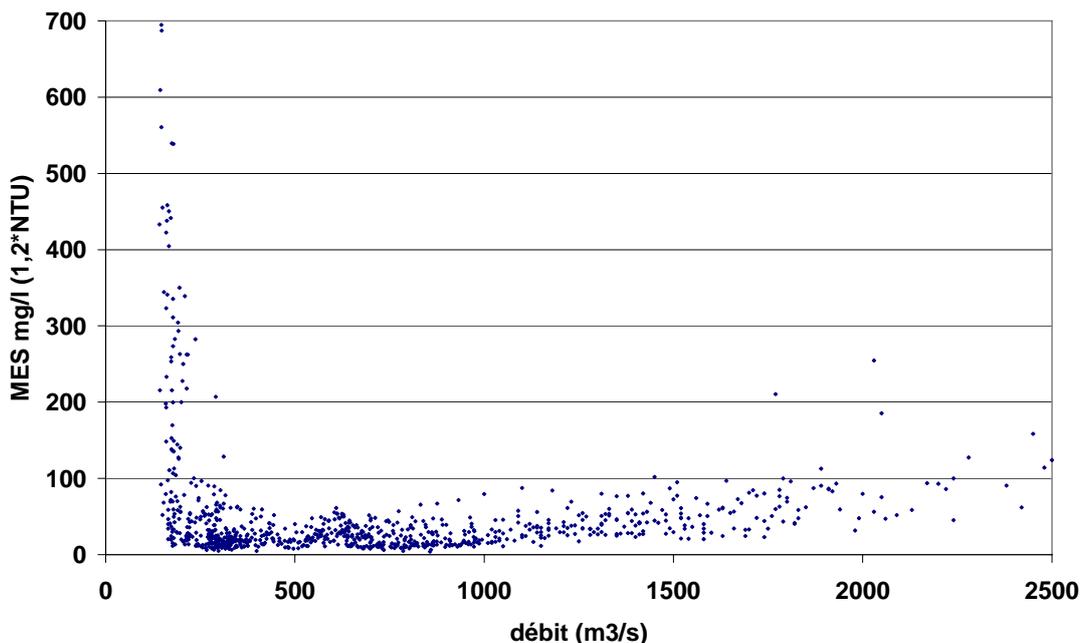
Pour le reste de la période, pour laquelle les débits ont été modifiés, nous avons établi une loi de MES fonction du débit à Bellevue, à partir des données du réseau de mesure en continu à Bellevue (on notera qu'il n'y a pas de fortes crue sur la période mesurée  $Q < 2500 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Pour être relié au débit journalier, les mesures ont aussi été moyennées sur la période d'une journée:



*Fig. 22. MES MESUREE A BELLEVUE ET DEBIT*

La première chose que l'on remarque est l'influence très probable du bouchon vaseux jusqu'à Bellevue en période d'étiage, notamment en 2009 avec une périodicité des pics de 15 jours en phase avec le cycle de marée.

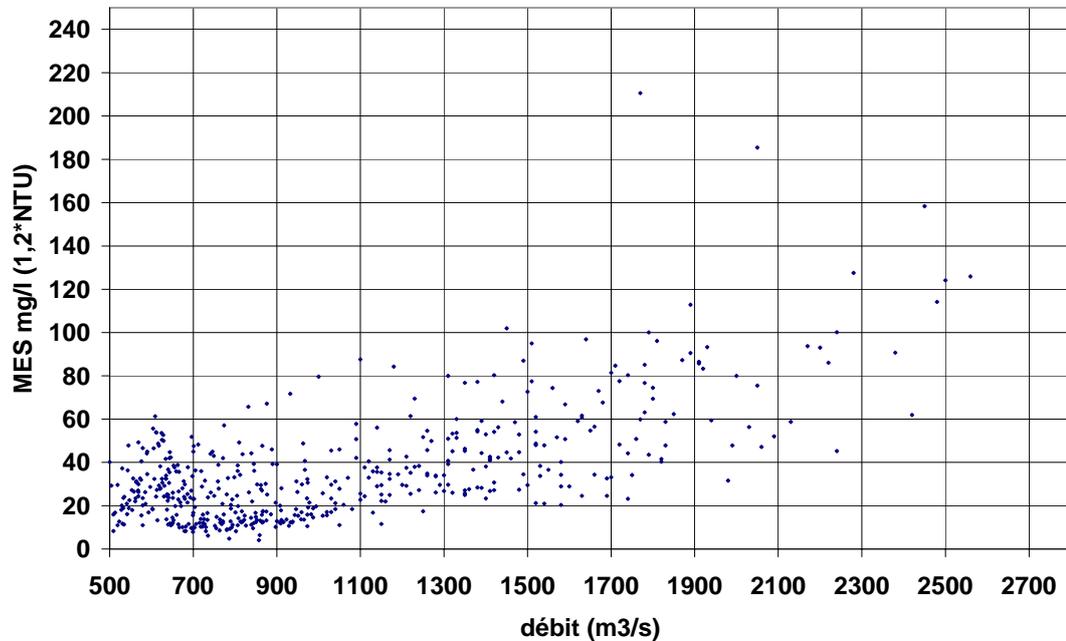
Si l'on trace à partir de ces données le graphique classique Mes fct(Q), on obtient :



*Fig. 23. MES JOURNALIERE A BELLEVUE EN FONCTION DU DEBIT JOURNALIER*

On voit que sous 300 m<sup>3</sup>/s, les données de mesures amont sont polluées par les remontées de sédiment venant de l'aval.

Nous décidons donc de travailler sur les débits supérieurs à 500 m<sup>3</sup>/s pour établir une loi :



**Fig. 24. MES JOURNALIERE A BELLEVUE EN FONCTION DU DEBIT ( $Q > 500 \text{ m}^3/\text{s}$ )**

Les études précédentes ayant montré l'existence de cycles de MES en crue/décru, nous avons voulu voir s'il était possible de séparer les mesures en différents groupes de données, en analysant les jours de débits précédents la mesure.

Nous avons pu alors clairement identifier 3 groupes :

Un groupe de crue lorsque le  $Q_j > Q_{\text{moyen des 5j précédents}} + 200$

Un groupe de décrue lorsque  $Q_j < Q_{\text{moyen des 20j précédents}} - 200$

Un groupe intermédiaire lorsque la classification n'est ni crue, ni décrue

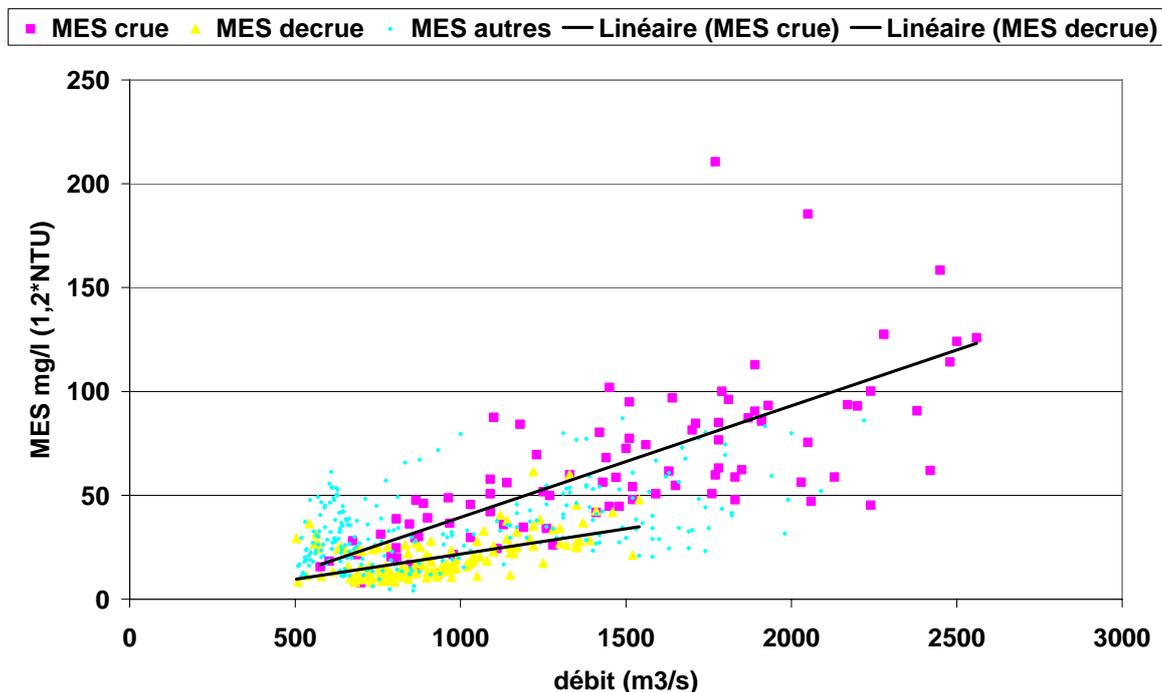


Fig. 25. *DISTINCTION DE TROIS GROUPES : MONTEE DE CRUE, DECRUE, INTERMEDIAIRE*

Trois lois d'interpolation linéaire ont pu alors être établies. En utilisant ces 3 lois et une MES minimum de 10mg/l pour les débits inférieurs à 300 m³/s, on peut recomposer le signal en MES à partir de la donnée de débit :

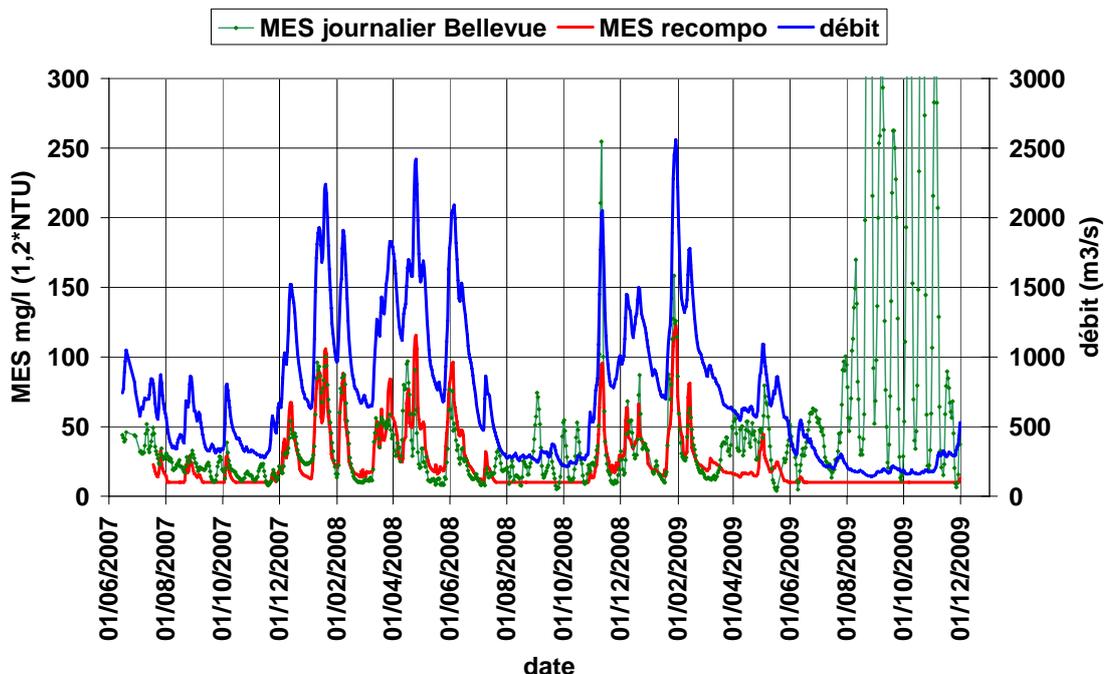
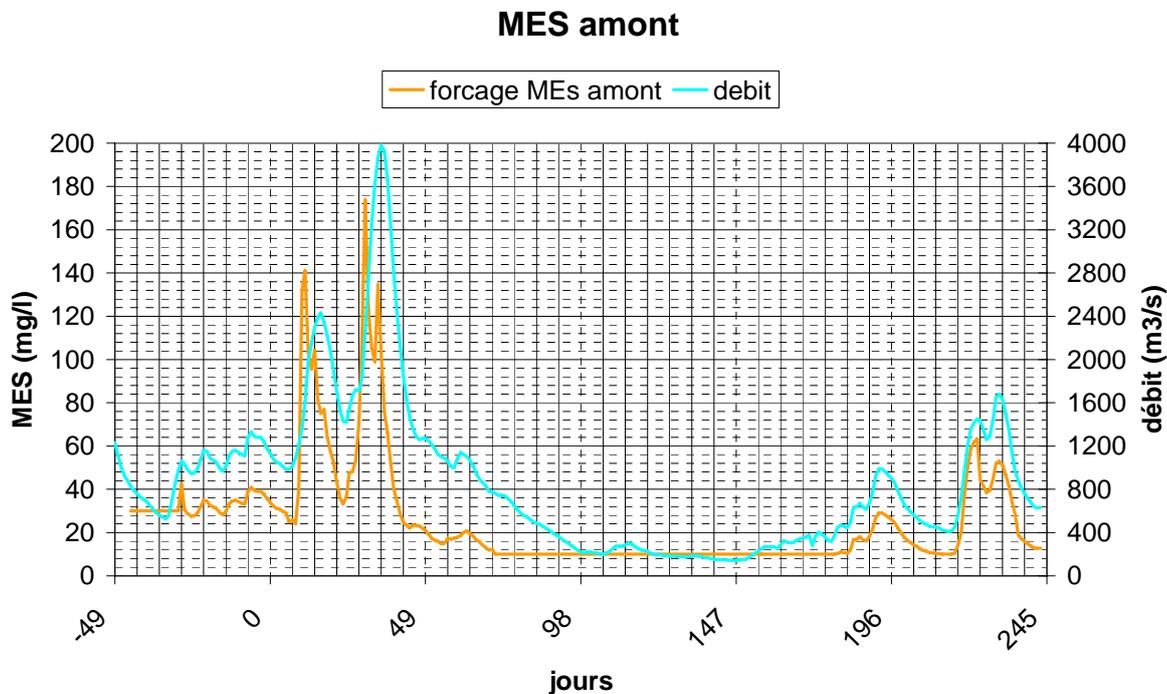


Fig. 26. *RECOMPOSITION DU SIGNAL DE MES A PARTIR DES 3 LOIS D'INTERPOLATION*

Cette ensemble de 3 lois est donc utilisé pour compléter le signal de MES à l'amont dans le modèle pour la période de forçage long terme :



*Fig. 27. FORÇAGE LONG TERME EN MES*

## 3.2. FORÇAGES POUR LE COURT TERME

### 3.2.1. PARAMETRES ETUDIES : HYDRODYNAMIQUE ET SALINITE (MODELE CALAGE SIMPLE)

Le calage simple peut être utilisé pour étudier uniquement l'hydrodynamique et la salinité sur des configurations ne modifiant pas sensiblement les cartes de frottement de l'état actuel. Il est à rappeler que les cartes de frottement fonction du débit ont été calées sur l'état actuel. Les aménagements testés ne seront donc pas censés modifier la dynamique globale estuarienne actuelle.

Les calculs court-terme permettront d'exploiter 1 mois de simulation. Une période préalable de 15 jours sera prévue pour l'initialisation du modèle.

Le débit de la Loire sera fixe au cours de la période comme proposé par le GIP dans le CCTP. La valeur du débit sera fixée suivant les objectifs visés d'exploitation. Il en sera de même pour les autres paramètres de forçage (niveau moyen, marée et vent).

### 3.2.2. PARAMETRES ETUDIES : HYDRODYNAMIQUE, SALINITE ET MES (MODELE CALAGE COUPLE)

Le calage couplé est indispensable à utiliser lorsque la configuration à étudier est susceptible de modifier les cartes de frottement par rapport à l'état actuelle ou lorsque le calcul de la MES est demandé. Ces calculs court-terme permettront d'exploiter 1 mois de simulation. Une période préalable de 2 mois sera prévue pour l'initialisation du modèle :

Le premier mois et demi d'initialisation sera commun à celui des calculs long-terme et permet l'expulsion des conditions initiales vis-à-vis du scenario testé.

Le mois et demi suivant se réalisera à débit fixe (à fixer suivant l'objectif visé) : les 15 premiers jours permettent de replacer le bouchon turbide en position en fonction du débit fixé et le mois suivant sert à l'exploitation.



## 4. LES SORTIES

---

### 4.1. PARAMETRES A EXTRAIRE A POINTS FIXES

Une extraction à points fixes sera effectuée toutes les 15 minutes sur l'ensemble des 6 mois pour les 20 variables rappelées par des croix dans le tableau ci-dessous.

Ces points fixes couvrent 106 points le long du talweg disposés tous les deux kilomètres entre les PK -15 et +90. Ces points ne tombent pas exactement à l'entrée de chaque étier, annexe, vannage ou prise d'eau. Compte tenu du caractère global du modèle, le point fixe le plus proche pourra être utilisé pour l'évaluation sans que cela ne conduise à une dégradation de la qualité de l'évaluation.

Un fichier Excel sera fourni pour chaque variable avec quatre onglets correspondant aux trois scénarios testés plus l'état actuel. Dans chaque onglet, les séries temporelles sur l'ensemble des points fixes seront fournies en colonnes. Les minis et maxi sur la période seront calculés sur l'ensemble de la période. Les courbes de non-dépassement avec une série de seuils « standard » seront également incluses dans des onglets graphiques. Ces seuils seront facilement modifiables.

De plus, des graphes comparatifs sur une journée typique seront établis entre chaque scénario et la situation actuelle (courbes différentielles) ainsi qu'entre chaque scénario et le scénario tendanciel.

Chaque utilisateur de ces fichiers pourra, à partir de cette base, ajouter des lignes de calcul (minis-maxis sur des périodes plus courtes, etc...) ou des onglets pour calculer par exemple des variables différentielles, des variables croisées entre deux fichiers ou sortir d'autres types de graphiques selon leurs besoins propres. Vingt fichiers seront donc fournis au total.

	Surface libre	vitesse	salinité	turbidité	Epaisseurs vase consolidée et crème de vase
Cotes variables dans le temps	X				X, X
Moyenne sur verticale		X	X	X	
Sub-surface= surface libre -1m		X	X	X	
Près du fond = toit crème de vase +0,5m		X	X	X	

Limite submersibilité : cote +5,86 m CM96			X	X	
Vannes pour l'agriculture : cotes +4,2mCM96 et +4,86mCM96			X, X	X, X	
Prises d'eau industrielles : cote -1mCM96			X	X	

Tableau 1 - LISTE DES VARIABLES SORTIES SUR FICHIER D'ANALYSE EXCEL

## 4.2. CUBATURES

### 4.2.1. CHENAL DE NAVIGATION

Une extraction des cubatures sur les 12 zones de dragages sera effectuée pour chaque calcul en séparant la masse en suspension de la masse au sol et de la partie de la masse se trouvant sur des fonds au dessus de 0mCM. Les fichier Excel correspondants seront fournis.

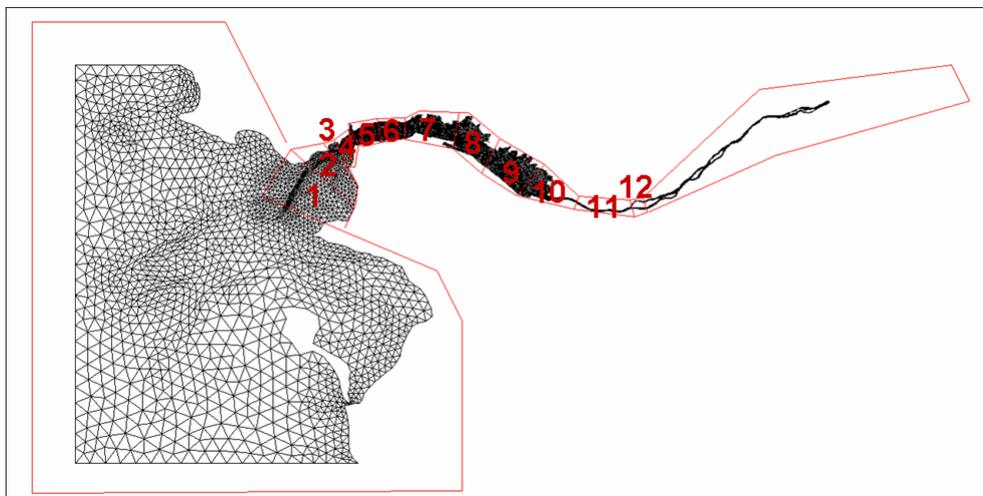


Fig. 28. ZONES DE DRAGAGES

### 4.2.2. ESTRANS

Une extraction des dépôts moyens sur les 9 estrans précisés dans l'annexe seront aussi fournis dans des fichiers Excel.

### 4.3. POST-TRAITEMENT

Les résultats des modèles pourront être fournis au GIP, pour que celui-ci puisse extraire d'autres points de sonde, ou visualisation que ceux prévus dans le cadre d'exploitation.

Il est proposé au GIP d'utiliser le logiciel de pre-post-traitement FUDAA, logiciel gratuit fourni avec la chaîne TELEMAC. Il permet l'analyse des résultats 2D et des résultats 3D sur chacun des plans.

Le logiciel et sa documentation sont téléchargeables sur :

<http://www.fudaa.fr/prepro/>



**ANNEXE**



A/TO: **GIP LOIRE-ESTUAIRE**

COPIE/  
COPY:

DE/FROM : LUC HAMM  
 N°TEL : 33 (0)4 76 33 41 88  
 N° FAX : 33 (0)4 76 33 43 33  
 E-MAIL : Luc.hamm@sogreah.fr

REF. :  
 DATE : 7 DECEMBRE 2009  
 N/PAGES : 5

OBJET/  
SUBJECT:

**Cadre d'exploitation du modèle numérique 3D de l'estuaire de la Loire. Annexe A : Paramètres estuariens conditionnant l'exercice des usages dans l'estuaire**  
 (actualisation de l'annexe A du rapport Sogreah 171 1457 R4 de janvier 2007)

## 1. FORMULATION DES OBJECTIFS

Le travail de formulation des objectifs conduit par le GIP Loire estuaire a permis par une analyse fonctionnelle de définir 4 grands enjeux à l'intérieur desquels des grandes familles de fonctions ont été définies (rapport de travail GIP- mars 2006). La grande majorité des fonctions recensées est largement déterminée par six critères estuariens quantifiables.

La figure 1 donne une vue d'ensemble de cette analyse fonctionnelle.

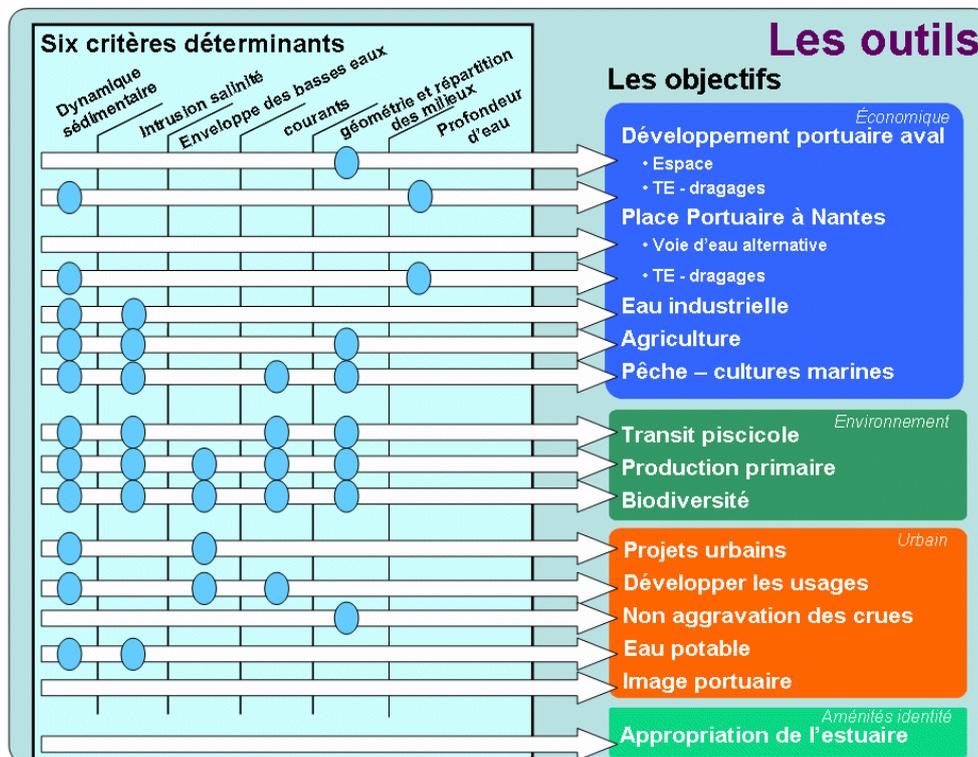


Figure 1 (source : GIP Loire – estuaire) : Fonctions et critères estuariens

De plus, un certain nombre de fonctions à contrôler ont été identifiées pour chaque fonction (rapport de travail GIP– mars 2006).

## 2. IDENTIFICATION DES BESOINS EN INDICATEURS

Un document de travail identifiant les besoins en indicateurs hydrosédimentaires pour évaluer les fonctions à satisfaire a été établi par le GIP. L'étude de ce document et les discussions menées avec le GIP au cours de l'étude de 2006 ont aboutis aux indicateurs suivants.

### 2.1. ACTIVITES PORTUAIRES

Quatre indicateurs sont décrits dans la note GIP :

- a) Talweg du chenal : cet indicateur ressort directement des géométries de chaque scénario.
- b) Navigation : vitesses maximales à l'étiage. Ce paramètre ressort directement des sorties actuelles du modèle. Il s'appliquera aussi bien à la navigation commerciale qu'à la pêche ainsi qu'aux navettes urbaines à Nantes.
- c) Chenalage : Les indicateurs de niveaux d'eau et de vitesses seront utilisés par les pilotes pour évaluer la navigabilité des scénarios.
- d) Dragage d'entretien : Une approche comparative entre les scénarios sera effectuée à partir des résultats du calcul.

### 2.2. EAU INDUSTRIELLE

Les prélèvements d'eau industrielle se situent à 1m sous la surface libre (cote variable) et à la cote fixe de -1m CM96 pour les installations existantes construites à Saint-Nazaire, Donges, Paimboeuf, Cordemais, Indre et Nantes (sub-surface).

Les industries dont nous avons connaissance (GDF, EDF) n'ont pas de seuils critiques opérationnels en salinité et turbidité qui seraient surveillés et susceptibles d'entraîner l'arrêt des pompes.

Chez GDF, c'est la saturation de la fosse de décantation des vases qui déclenche l'arrêt pour curage et il n'y a pas de contrainte opérationnelle liée à la salinité. Chez EDF, une étude récente fixe les seuils contraignants à 1800microS/cm pour la salinité et 1200 NTU en turbidité pour leur circuit d'eau industrielle. Les courbes de calibration des instruments permettant de convertir ces valeurs en g/l n'ont pas pu être obtenues.

Nous proposons donc de fournir pour ces installations, les courbes de non-dépassement de plusieurs seuils de salinité et de turbidité de façon à pouvoir apprécier ensuite les risques pour chaque scénario y compris l'état actuel.



### 2.3. EAU POTABLE

A Mauves, le prélèvement d'eau s'effectue par un seuil à la cote **XXX** qui déverse dans un puisard. Le pompage s'arrête lorsque la valeur de 200mg/l de chlorures ou 880 microS/cm est atteinte. Cela correspond à une limite en salinité de l'ordre de 0,35g/l en considérant un taux de chlorures de 55% dans une eau de mer « standard ». La contrainte fournie en turbidité est de 0,5 g/l. Un calcul de temps d'indisponibilité sera donc effectué pour ces deux seuils pour la prise de Mauves.

Un pompage dans la nappe est effectué à Basse-Goulaine et la salinité y est contrôlée. Une tendance à la hausse sur le long-terme a été enregistrée. Les temps de non-dépassement pour la salinité moyenne seront calculés pour différents seuils.

### 2.4. AGRICULTURE

Ces indicateurs concernent les entrées d'étiéris pour les 3 systèmes hydrauliques majeurs que sont : les marais de Brière, les marais Nord-Loire entre Lavau et Coueron et les marais Sud-Loire et le lac de Grand lieu.

Les marais de Brière sont reliés à l'estuaire par trois canaux dont un seul (le canal de la Taillée) sert à transférer en été de l'eau de la Loire vers les marais. Les deux autres servant à évacuer le surplus d'eau en hiver. La sortie du canal de la Taillée sera donc le point de référence pour calculer les indicateurs en salinité et turbidité. Une cote de +4,2mCM96 sera utilisée pour ce vannage.

12 étiéris indépendants assurent la communication entre les marais Nord-Loire et le fleuve. Nous suggérons de considérer ici trois points représentatifs de la section de la Loire comprise entre Lavau et Coueron pour l'analyse. La cote de +4,2m CM96 sera également utilisée.

Enfin, les marais du sud-Loire sont alimentés par les trois biefs du canal maritime qui se remplissent séparément à partir des vannages du Carnet-ChampsNeufs (cote +4,2m CM96), du Buzay (cote +4,9mCM96) et de la Martinière (cote +4,2mCM96). Ces trois points serviront donc de points de référence. Le remplissage est piloté par un système qui tient compte de la salinité de l'eau entrante avec un seuil habituel fixé à 0,4 g/l qui peut ne jamais être atteint sur plusieurs jours en cas de marées de vive-eau à l'étiage. Un seuil dégradé de 0,8 g/l est alors utilisé. La turbidité n'est pas utilisée pour contrôler le système par contre, les volumes entrants se décantent et nécessitent des entretiens. C'est pourquoi, les indicateurs que nous proposons sont les suivants :

- a) salinité : calcul du temps total de prélèvement possible au dessus de la cote des seuils et en deçà de deux seuils limites en salinité mesurés à la cote des seuils.
- b) turbidité : courbes de non-dépassement de seuils en turbidité mesurée à la cote des seuils estimées uniquement sur le temps de prélèvement possible.

D'autre part, l'eau de submersibilité naturelle au dessus d'un seuil de +5,86mCM96 le long des rives de la Loire doit rester apte aux usages agricoles et à la productivité environnementale. Nous proposons pour cela de calculer les temps de non-dépassement pour différents seuils en salinité et turbidité tout le long de l'estuaire interne.



## 2.5. PECHE, CULTURES MARINES ET FONCTIONNALITES ENVIRONNEMENTALES

Le territoire couvert par les activités de pêche s'étend sur l'ensemble de l'estuaire ainsi qu'en mer. Le point-clé pour la pêche est l'augmentation de la ressource qui dépend de l'amélioration des fonctionnalités environnementales. Les cultures marines sont circonscrites à six zones situées dans l'estuaire externe à l'aval de Saint-Nazaire. Les fonctionnalités environnementales s'intéressent à l'ensemble de l'estuaire entre la limite de la marée dynamique à l'amont (Ancenis) et la ligne Pointe de Chemoulin-Pointe de St-Gildas à l'aval.

Signalons que l'analyse des indicateurs utiles à l'évaluation des fonctionnalités environnementales nécessite un certain nombre de paramètres qui ne sont pas accessibles au modèle hydrosédimentaire à savoir : la teneur en oxygène dissous, la température, la hauteur de la couche euphotique ainsi que l'évolution granulométrique des estrans.

Pour ces indicateurs nous distinguerons l'estuaire interne à l'amont de Paimboeuf dans lequel les variations longitudinales dominent de faibles variations transversales et l'estuaire externe dans lequel une approche 3D complète est nécessaire.

### 2.5.1. ESTUAIRE INTERNE

En sus de la fourniture des niveaux d'eau, les valeurs des vitesses, salinités et turbidités calculées sur un mois pour un débit de Loire variant de l'étiage au module seront fournies tout le long du talweg avec un intervalle de 2 km:

- a) en valeur moyenne (intégration sur la verticale),
- b) à des cotes variables en subsurface (-1m sous la surface libre) et près du fond à +0,5m au dessus du toit de la crème de vase
- c) à des cotes fixes de -1m, +4,2m et +4,86mCM96.

Ces fichiers de résultats permettront de calculer les valeurs maximales et minimales de ces paramètres sur toute période considérée comme représentative par les environnementalistes.

Les variations transversales des niveaux d'eau, salinité et turbidité étant très faibles dans le modèle sur cette zone, les valeurs de ces paramètres le long du talweg pourront aussi être utilisées pour estimer les niveaux d'eau, salinité et turbidité sur les estrans. Ainsi, on utilisera les valeurs à -1m CM96 pour le bas d'estran et les valeurs à +4,2 et +4,86m CM96 pour le haut d'estran.

Pour les estrans, l'évolution sur un mois des dépôts de vase sera fournie sous forme d'une valeur moyenne par estran toutes les 10 minutes. Pour cela neuf estrans seront considérés :

- Trois estrans en rive sud de l'estuaire externe (Pte de Mindin-Le Pointeau ; Le pointeau-Port-Giraud ; Port-Giraud-Pte de St-Gildas) jusqu'à la cote -1mCM96,
- Le banc des Morées jusqu'à la cote -1mCM96,
- Les bancs de Bilho et des Brillantes jusqu'à la cote -1mCM96,
- Les zones d'estran 1 à 4 entre Donges-Est et St-Jean de Boiseau définies dans notre synthèse des contraintes et correspondant aux quatre estrans restaurés dans le scénario alternatif jusqu'à 0,0mCM96



Pour les 7 annexes situées entre Nantes et Ancenis (limite amont du modèle), le temps de connexion pourra être calculé sur un cycle de marées à l'étiage à partir des séries temporelles de niveaux. Il en sera de même pour les limites dynamiques de la marée estimées à partir des séries temporelles de niveaux d'eau et d'inversion des courants estimées à partir des séries temporelles de vitesses moyennes sur la verticale.

#### 2.5.2. ESTUAIRE EXTERNE (AVAL DE PAIMBOEUF)

Le même traitement que précédemment sera effectué pour le chenal et les estrans.

#### 2.6. DEVELOPPEMENT URBAIN

Les paramètres de niveaux d'eau et de turbidité seront disponibles comme dans le chenal de Nantes tous les deux kilomètres le long du talweg. Cela permettra en particulier de calculer des courbes de non-dépassement de niveau et de turbidité.

Par contre, les estrans à Nantes ont une surface très inférieure aux estrans de l'aval. La maille du modèle à cet endroit est insuffisante pour fournir des résultats fiables sur les dépôts vaseux visibles à marée basse.

