

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

Lot 1 : construction et exploitation du modèle

Phase 2 : Etude et évaluation des leviers

Exploitation du modèle sur l'état actuel

1711822 R10

Décembre 2010

Programme de restauration de l'estuaire en aval de Nantes - études préalables à la tranche expérimentale - Année 2009



Étude cofinancée 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 l'estuaire en aval de Nantes - études préalables à la tranche expérimentale - Année 2009





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 2

Exploitation du modèle sur l'état actuel

DECEMBRE 2010

1 71 1822 R10

Suivi des versions

V2	24/12/2010	RWR	LHM	Version définitive après prises en compte des remarques du comité d'experts et du GIP LE
V1	15/09/2010	RWR	LHM	Calcul repris avec nouvelles conditions de MES à l'amont
Provisoire	09/06/2010	RWR	LHM	
VERSION	DATE	AUTEUR	RELECTEUR	COMMENTAIRES

SOMMAIRE

OBJET DE L'ETUDE	C
SYNTHESE ET CONCLUSIONS	D
1. DESCRIPTION DU MODELE GLOBAL DE L'ETAT ACTUEL	1
1.1. TYPE DE MODELE : GLOBAL EN CALAGE COUPLE	1
1.2. BATHYMETRIE	1
1.3. FORÇAGES ET CONDITIONS INITIALES	2
1.3.1. RECYCLAGE DES FLUX SORTANT A LA FRONTIERE MARITIME	3
1.4. ANALYSE DES PROCESSUS A L'ECHELLE DE L'ESTUAIRE	3
2. PROPAGATION ET ASYMETRIE DE LA MAREE	5
2.1. COURBE DES MAXIMA ET MINIMA DE NIVEAU D'EAU	5
2.2. COURBE DES TEMPS DE PLEINE MER ET BASSE MER	6
2.3. COURBE DES MAXIMA DE VITESSE EN FLOT /JUSANT	6
2.4. VOLUMES OSCILLANTS CHARGES ET DUREES DE FLOT ET JUSANT	7
3. INTRUSION HALINE.....	9
3.1. POMPAGE TIDAL	9
3.2. POMPAGE PAR DENSITE.....	10
4. SEDIMENT	11
4.1. MATIERE EN SUSPENSION	11
4.2. CREME DE VASE	11
5. DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE A COURT TERME	12
5.1. QUANTIFICATION D'UN BILAN SEDIMENTAIRE DE L'ESTUAIRE.....	13
5.1.1. ANALYSE PAR PHASES.....	13
5.1.2. ANALYSE EN MOYENNE TEMPORELLE	20
5.1.3. BILAN GLOBAL ET QUANTIFICATION DES APPORTS AMONT ET AVAL EN VASE	20
5.2. DYNAMIQUE DES DEPOTS SUR LES MILIEUX (VASIERES, PRAIRIES).....	21
5.3. DYNAMIQUE DES DEPOTS DANS LE CHENAL DE NAVIGATION.....	23
ANNEXE A : AJUSTEMENT DE LA LOI DE DEBIT SOLIDE AMONT POUR LE CALCUL DE REFERENCE DANS L'ETAT ACTUEL.....	25
FIGURES HORS-TEXTE.....	27

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 - EVOLUTION DE LA ZONE DE DEPOT DE RECYCLAGE DES FLUX SORTANT.....	3
TABLEAU 2 - COMPARAISON DES POURCENTAGES DE DEPASSEMENT DE LA COTE DE DEBORDEMENT DU LIT MINEUR DE +5.86MCM DANS LES SITUATIONS ACTUELLE ET TENDANCIELLE.....	5
TABLEAU 3 - COMPARAISON DES POURCENTAGES DE DEPASSEMENT DE LA COTE +2,00 M CM DANS LES SITUATIONS ACTUELLE ET TENDANCIELLE	6
TABLEAU 4 - RECAPITULATIF DES PKS ATTEINT POUR CHAQUE SEUIL DE SALINITE EN POMPAGE TIDAL	10
TABLEAU 5 - RECAPITULATIF DES PKS ATTEINTS POUR CHAQUE SEUIL DE SALINITE EN POMPAGE PAR DENSITE.....	10
TABLEAU 6 - BILAN SEDIMENTAIRE DE L'ESTUAIRE (EN MILLIONS DE TONNES)	14
TABLEAU 7 - BILAN GLOBAL.....	21
TABLEAU 8 - SURFACE DES ZONES POUR LES CUBATURES	23

LISTE DES FIGURES

FIG. 1. ZONE DE DEPOT DES SEDIMENTS SORTIS PAR LA FRONTIERE MARITIME	2
FIG. 2. JOURNEE 235 DANS SON CONTEXTE DE FORÇAGE	4
FIG. 3. PERIODES RETENUES POUR L'ANALYSE DU POMPAGE TIDAL	9
FIG. 4. PERIODES RETENUES POUR L'ANALYSE DU POMPAGE PAR DENSITE	10
FIG. 5. ZONES DE CUBATURES POUR LES SECTIONS.....	12
FIG. 6. ZONES REGROUPEES POUR L'ANALYSE.....	12
FIG. 7. PHASES ETUDIEES POUR LES BILANS ET FLUX	14
FIG. 8. PHASE1: JOUR 0 A 49	16
FIG. 9. PHASE 2: JOUR 49 A 98.....	17
FIG. 10. PHASE 3: JOUR 98 A 175.....	18
FIG. 11. PHASE 4: JOUR 175 A 231.....	19
FIG. 12. MOYENNE (MASSE- MASSE INITIALE) SUR 8 MOIS POUR CHAQUE SECTION.....	20
FIG. 13. ZONES DE CUBATURES ET SURFACES POUR L'ETUDE DES MILIEUX.....	22

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 qui comprend 3 phases. La phase 2 de ce lot consiste notamment à réaliser l'exploitation du modèle global sur la situation actuelle, la situation tendancielle et dans le cas du scénario morphologique global défini lors de l'étude de 2006.

Ce rapport décrit l'exploitation du modèle sur la situation actuelle.

SYNTHESE ET CONCLUSIONS

Le modèle global pour la situation actuelle a été construit puis calé en phase 1 (voir rapports R7 et R8). Il correspond à un état de fond essentiellement issu du MNTU 2002.

Durant cette première phase, ses conditions d'exploitation ont également été définies (rapport R9). Les conditions limites en matières en suspension ont été depuis modifiées à l'amont et à l'aval suite à un premier calcul (voir annexe au présent rapport).

Avec ces nouvelles conditions, le modèle a permis de simuler 8 mois exploitables de fonctionnement de l'estuaire. Ce calcul a permis de montrer que le modèle est capable de reconstituer un bouchon vaseux à l'amont après une forte crue pour une masse de l'ordre de 0,5 à 1,1 millions de tonnes lors des vives-eaux. L'estuaire interne est capable de faire remonter de l'aval au moins 3,4 millions de tonnes de sédiment. Cette quantité calculée est par contre très liée au stock disponible dans l'estuaire externe qui est actuellement renouvelé par les masses sortantes aux frontières maritimes.

Rappelons que sur une simulation précédente, l'estuaire interne pouvait perdre du sédiment si le stock au large n'était pas alimenté. La capacité de l'estuaire interne à pomper du sédiment du large dans son état actuel est donc bien testée ici et pourra être comparée à celle d'autres géométries : tendancielle et morphologique.

Le rapport fournit ensuite l'ensemble des paramètres définis dans le rapport R9.

1. DESCRIPTION DU MODELE GLOBAL DE L'ETAT ACTUEL

Toutes les cotes dans ce rapport sont exprimés en mètre Cote Marine 96 et les débits de Loire sont des débits journalier à Montjean.

1.1. TYPE DE MODELE : GLOBAL EN CALAGE COUPLE

Pour rappel, le modèle global développé et calé en phase 1 permet une analyse à l'échelle globale de la dynamique estuarienne : la taille de maille varie entre 50 et 2500m et les zones submersibles sont introduites de façon schématique (cf. rapport R7 : construction et calage simple)

Le modèle est utilisé ici en calage couplé (cf. rapport R8 : calage couplé), ce qui signifie que le coefficient de frottement lié à la crème de vase est appliqué localement en chaque point de calcul et à chaque pas de temps en fonction du dépôt de vase. Le calcul du frottement est alors complètement couplé au dépôt.

1.2. BATHYMETRIE

La bathymétrie utilisée pour la construction du modèle est une combinaison des données suivantes (cf. rapport R7 : construction et calage simple):

- Les levés SHOM pour la partie maritime du modèle ;
- Le levé MNTU 2002 étendu du GIP Loire Estuaire de l'estuaire externe à l'aval à Ancenis à l'amont ;
- Des levés plus récents du PANSN sur les tronçons SGC5 et SGC6 en remplacement des levés précédents qui étaient de 1987.

La bathymétrie résultante ne correspond pas nécessairement aux fonds durs mais parfois au toit de crème de vase. Le différentiel entre les levés 'Mesuris 2008' qui sont le plus représentatifs des 'fonds durs' et le MNTU 2002 étendu a été reporté dans le modèle sous forme de 6 zones schématiques avec un abaissement caractéristique (cf. rapport R8 : calage couplé)

Zone 1 : Pk -15 à -2, abaissement de 0,75m sous la cote -10mCM

Zone 2 : Pk -2 à 9.5, abaissement de 1,55m sous la cote -10mCM

Zone 3 : Pk 11.5 à 18, abaissement de 0.5m sous la cote -4mCM

Zone 4 : Pk 24 à 36, abaissement de 0,75m sous la cote -4mCM

Zone 5 : Pk 41.5 à 44.5, abaissement de 0,5m sous la cote -4mCM

Zone 6 : Pk 45.5 à 51.5, abaissement de 1m sous la cote -4mCM

Le maillage et la bathymétrie sont représentés sur les **figures 1.1 à 1.5**

1.3. FORÇAGES ET CONDITIONS INITIALES

Les conditions initiales et le forçage en débit, vent, houle, marée, niveau moyen et apports amont sont issus du rapport R9 : « Cadre d'exploitation », chapitre 3 : forçages long terme.

On rappellera ici simplement que la période simulée contient 49 jours d'initialisation et que la partie exploitée correspond à 243 jours (8 mois). Les forçages ont été conçus de façon à respecter au maximum les répartitions annuelles moyennes pour chacun d'eux. La condition initiale consiste en un apport de sédiment important dans la partie aval de l'estuaire de sorte que celle-ci soit expulsée par la crue et que l'estuaire se recharge de façon autonome.

Suites aux premiers résultats présentés au comité d'experts du 18 juin 2010, il est ressorti que le modèle de l'estuaire semble se comporter de façon cohérente, par contre l'estuaire externe qui est une source importante de sédiment pour l'estuaire, s'appauvrit au cours du temps. En effet, les flux sortant de sédiment à la frontière maritime sont perdus. La réimposition des flux sortant, en flux entrant est difficilement applicable, car les entrées et sorties de flux ne se font pas spatialement aux mêmes endroits sur la frontière maritime et les flux ne sont pas identiques entre chaque marée. Il a été donc fait le choix de récupérer la masse de sédiment qui sort par les frontières maritimes et de la déposer sous forme de dépôt au large de Saint-Nazaire (dans un rayon compris entre 15 et 20 km) dans l'estuaire externe comme indiqué sur la figure 1 ci-dessous.

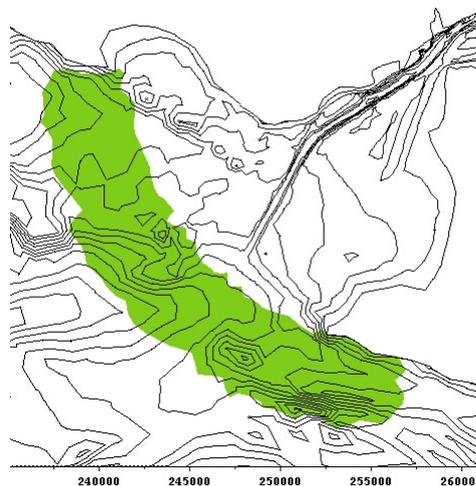


Fig. 1. ZONE DE DEPOT DES SEDIMENTS SORTIS PAR LA FRONTIERE MARITIME

Le modèle fonctionne donc en masse constante ou en augmentation au cours du temps grâce aux apports amont qui pour leur part ont également été revus après la même réunion. La nouvelle loi imposée est détaillée en annexe A.

1.3.1. RECYCLAGE DES FLUX SORTANT A LA FRONTIERE MARITIME

Comme expliqué précédemment, le flux sortant à la frontière maritime est recyclé sous forme de dépôt (crème de vase liquide) au large de Saint-Nazaire (dans un rayon compris entre 15 et 20 km) dans l'estuaire externe comme indiqué sur la figure 1 ci-dessus.

Pour mieux comprendre le fonctionnement et l'impact qu'à ce recyclage sur le calcul, nous avons cubé au cours du temps cette zone de dépôt.

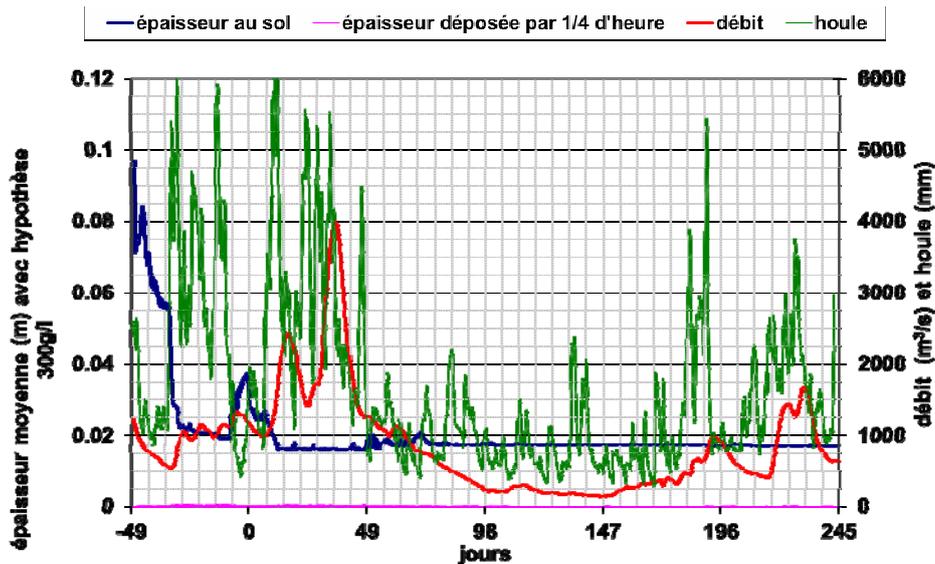


Tableau 1 - EVOLUTION DE LA ZONE DE DEPOT DE RECYCLAGE DES FLUX SORTANT

Le dépôt observé initialement sur la zone, correspond à la condition initiale. On voit que ces dépôts sont très fortement repris dès qu'il y a de la houle. Les dépôts recyclés qui correspondent aux flux sortant du large représentent des hauteurs inférieures au millimètre à l'échelle du ¼ d'heure sur la zone et sont repris quasi instantanément par l'écoulement, sauf sur certaines périodes où la houle est faible. On voit donc que la dynamique de reprise des sédiments est surtout liée à la houle sur cette zone. Le paramètre qui pourrait donc jouer sur le calcul est la façon dont on dépose le sédiment recyclé c'est-à-dire la consolidation que l'on choisit pour ce dépôt. Pour l'instant il s'agit de crème de vase liquide qui est quasiment reprise instantanément. On voit que les dépôts très consolidés déposés initialement peuvent ne pas être repris.

1.4. ANALYSE DES PROCESSUS A L'ECHELLE DE L'ESTUAIRE

Conformément au cadre d'exploitation défini en phase 1, deux types d'analyses sont effectués suivant les points kilométriques: la position des points de sondes correspondant est présentée sur **les figures 1.2 à 1.5**.

Une analyse à l'échelle des 243 jours exploitables du calcul est effectuée en passant par l'étude des temps de non-dépassement à des seuils pour les variables étudiées suivant les points kilométriques.

Une analyse à l'échelle de la journée sur une marée de vive eau typique suivant les points kilométriques est effectuée. La marée sélectionnée se situe au jour 135 du calcul (après initialisation), il s'agit d'un coefficient 89 avec un débit de 180 m³/s.

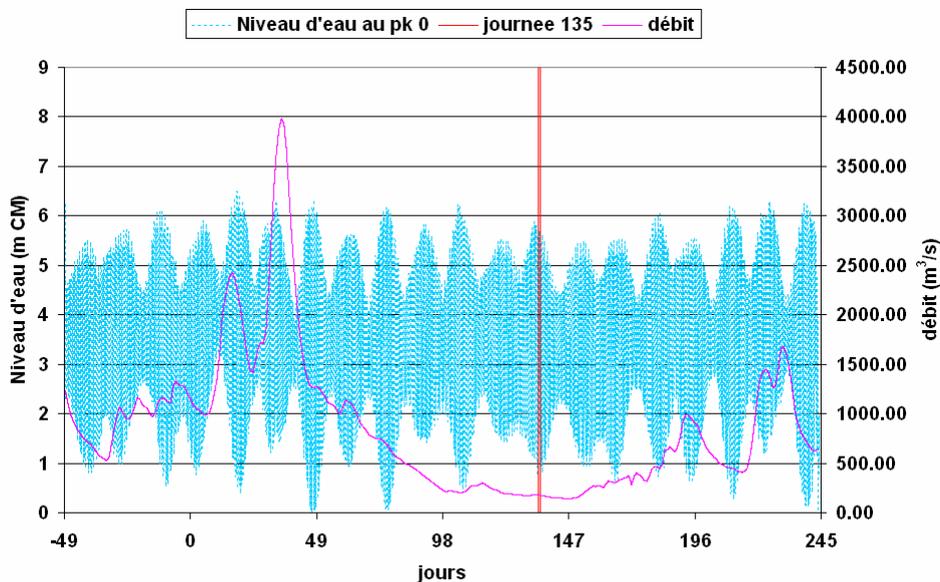


Fig. 2. JOURNEE 235 DANS SON CONTEXTE DE FORÇAGE

2. PROPAGATION ET ASYMETRIE DE LA MAREE

2.1. COURBE DES MAXIMA ET MINIMA DE NIVEAU D'EAU

La **figure 1.6** permet de repérer un maximum de pleine mer sur la section des pks 60 à 62 et un minimum de basse mer situé entre les pks 8 et 16.

Les niveaux de pleine mer augmentent de manière assez constante du pk-5 au pk 62 avec un léger replat entre les pks 30 et 40. Du pk 62 à 70 on assiste à diminution des pleines mers.

Les niveaux de basse mer diminuent de manière constante du pk-15 au pk 12. Du pk 16 au pk 36, les niveaux de basse mer augmentent de façon assez constante. Du pk 36 au pk 54, les niveaux de basse mer sont stables. Puis du pk 54 à 90 on assiste à une forte remontée des niveaux de basse mer.

Les temps de non dépassement pour 3 seuils : 2,00, 4,86 et 5,86 m sont présentés en **figure 1.7**.

% temps de non dépassement du seuil 5,86 m CM	Saint-Nazaire (Pk 0)	Paimboeuf (Pk 15)	Cordemais (Pk25)	Le Pellerin (Pk38)	Nantes aval (Pk53)
actuel	97 %	96 %	94 %	91%	87%

Tableau 2 - COMPARAISON DES POURCENTAGES DE DEPASSEMENT DE LA COTE DE DEBORDEMENT DU LIT MINEUR DE +5.86MCM DANS LES SITUATIONS ACTUELLE ET TENDANCIELLE

% temps de non dépassement du seuil 2,00 m CM	Saint-Nazaire (Pk 0)	Paimboeuf (Pk 15)	Cordemais (Pk25)	Le Pellerin (Pk38)	Nantes aval (Pk53)
actuel	11 %	13 %	12%	10%	7%

Tableau 3 - COMPARAISON DES POURCENTAGES DE DEPASSEMENT DE LA COTE +2,00 M CM DANS LES SITUATIONS ACTUELLE ET TENDANCIELLE

2.2. COURBE DES TEMPS DE PLEINE MER ET BASSE MER

La **figure 1.8** présente les décalages temporels de la basse mer et de la pleine mer en chaque pk par rapport à celles obtenues au pk0. Au PK 55, par exemple, la pleine mer arrive 84 mn après celle obtenue au pk0, alors que la basse mer arrive 150 mn après celle obtenue au pk0.

La **figure 1.9** présente le différentiel des décalages temporels, qui permet de comprendre à quels endroits les décalages de propagation entre PM et BM se font. Le décalage augmente de manière linéaire entre le pk 3 et 33 (65mn soit 2,2mn/kilomètre) puis à un rythme bien plus faible entre le pk 30 et 52 (6mn soit 0,3mn/kilomètre). Plus à l'amont, un fort décalage est observé entre les pks 52 et 65 (44mn soit 3,4mn/kilomètre).

2.3. COURBE DES MAXIMA DE VITESSE EN FLOT /JUSANT

Vitesses moyennes intégrées sur la verticale :

La **figure 1.10** présente les maxima de flot et de jusant obtenus pour la marée étudiée. Le pic de flot est principalement prédominant pour les pks compris entre 12 et 52.

La **figure 1.11** présente les temps de dépassement à la vitesse seuil de 0,5 m/s pour le flot et le jusant. On voit une forte divergence entre flot et jusant, des temps où la vitesse est supérieure à 0,5m/s à partir du pk 0.

Vitesses au fond+0,5m :

La **figure 1.12** présente les maxima de flot et de jusant obtenus pour la marée étudiée. Le pic de flot au fond est quasiment prédominant à quelques exceptions près sur tout le linéaire compris entre le pk -12 à 54.

La **figure 1.13** présente les temps de dépassement à la vitesse seuil de 0,5 m/s pour le flot et le jusant au fond. On voit une principale dominance du flot à l'aval du pk 15 et une dominance du jusant à l'amont.

2.4. VOLUMES OSCILLANTS CHARGES ET DUREES DE FLOT ET JUSANT

La **figure 1.14** présente les ratios de volumes oscillants pour une vitesse supérieure à 0,5 m/s pour la marée étudiée. Le flot semble prédominant jusqu'au pk 16. Le jusant devient pleinement dominant à partir du pk 20.

La **figure 1.15** présente les ratios de durée de jusant sur les durées de flot pour la marée étudiée. Dans ce cas la durée de jusant est supérieure au temps de flot sur l'ensemble de l'estuaire.

LOT 1-PHASE 2 : EXPLOITATION DU MODELE SUR LA SITUATION ACTUELLE

3. INTRUSION HALINE

L'analyse de l'intrusion saline par pompage tidal ou par pompage par densité est difficile à séparer étant donné que les deux phénomènes ne sont pas forcément découplés. Nous avons donc décidé de sélectionner les marées pour lequel un phénomène est largement prédominant sur l'autre :

Marnage à Saint-Nazaire >4,5 m et débit < 1000 m³/s : pompage tidal (soit 83 marées)

Marnage à Saint-Nazaire < 2,4m ou débit > 2500 m³/s : pompage par densité (soit 83 marées)

3.1. POMPAGE TIDAL

Les périodes retenues pour analyser le pompage tidal d'après les critères cités ci-dessus sont tracées en vert sur le graphique suivant :

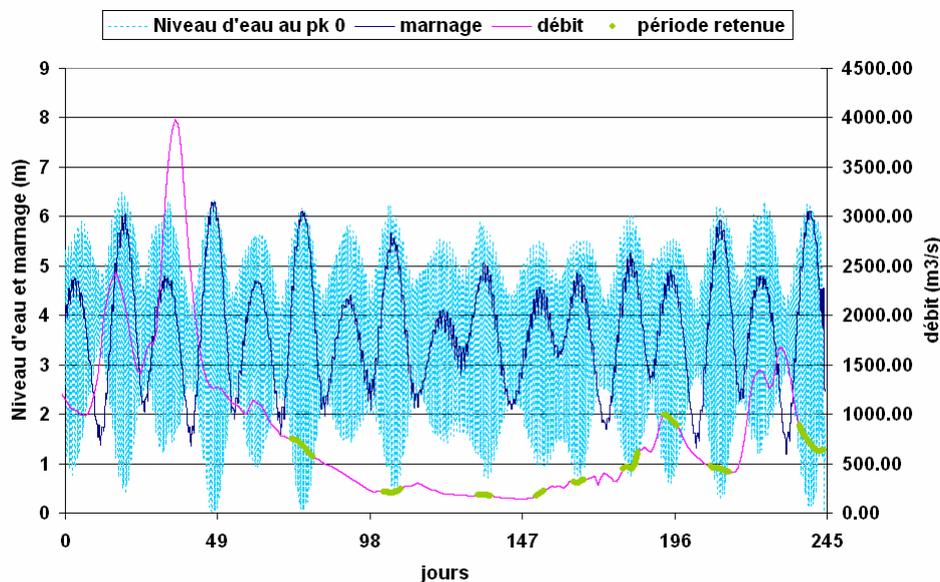


Fig. 3. PERIODES RETENUES POUR L'ANALYSE DU POMPAGE TIDAL

La **figure 1.16** présente le temps de non dépassement aux seuils 5,1 et 0,5 g/l pour la salinité au fond (+0,5m). Le seuil à 0,5 g/l atteint au maximum le pk 51 durant ces périodes et est toujours dépassé au pk 11. Le seuil à 5g/l atteint au maximum le pk 41 durant ces périodes et est toujours dépassé au pk 6.

Salinité fond +0,5m	toujours > au seuil	toujours < au seuil
seuil à 5 g/l	pk 6	pk 41
seuil à 1 g/l	pk 10	pk 48
seuil à 0.5 g/l	pk 11	pk 51

Tableau 4 - RECAPITULATIF DES PKS ATTEINT POUR CHAQUE SEUIL DE SALINITE EN POMPAGE TIDAL

3.2. POMPAGE PAR DENSITE

Les périodes retenues pour analyser le pompage par densité d'après les critères cités ci-dessus sont tracées en vert sur le graphique suivant :

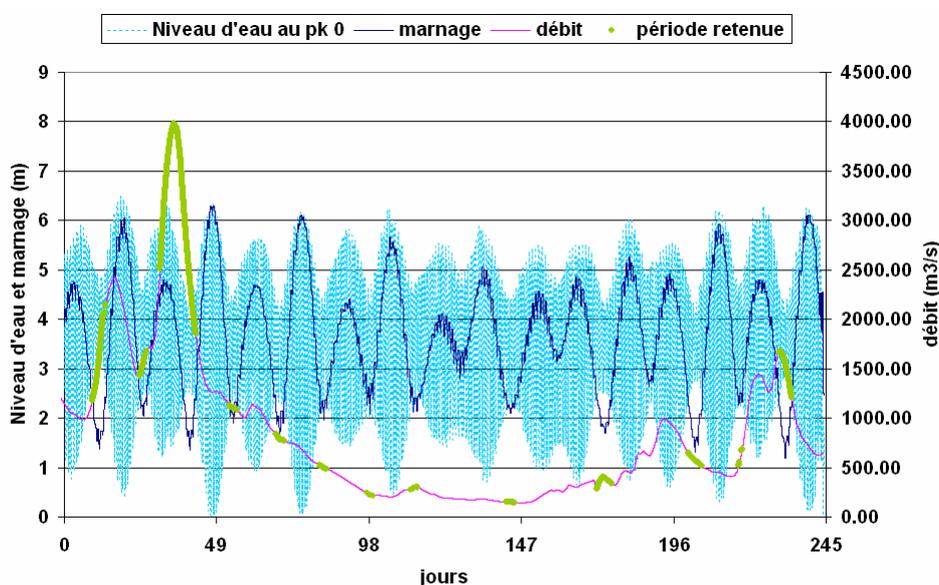


Fig. 4. PERIODES RETENUES POUR L'ANALYSE DU POMPAGE PAR DENSITE

La **figure 1.17** présente le temps de non dépassement aux seuils 5,1 et 0,5 g/l pour la salinité au fond (+0,5m). Le seuil à 0,5g/l atteint au maximum le pk 46 durant ces périodes et est toujours dépassé au pk 0. Le seuil à 5g/l atteint au maximum le pk 38 durant ces périodes et est toujours dépassé au pk -1. Il est intéressant de voir que par rapport au pompage tidal les trois courbes sont très resserrées, ce qui signifie que le front salin est très marqué, ce qui est représentatif des intrusions par densité.

Salinité fond +0,5m	toujours > au seuil	toujours < au seuil
seuil à 5 g/l	pk -1	pk 38
seuil à 1 g/l	pk -1	pk 44
seuil à 0.5 g/l	pk 0	pk 46

Tableau 5 - RECAPITULATIF DES PKS ATTEINTS POUR CHAQUE SEUIL DE SALINITE EN POMPAGE PAR DENSITE

4.SEDIMENT

4.1. MATIERE EN SUSPENSION

L'analyse du bouchon vaseux se fait à la fois sur le minima et maxima atteints lors de la journée 135 et à la fois sur les temps de dépassement de 3 seuils sur les 8 mois exploitables.

La **figure 1.18** présente le maximum et le minimum de MES atteint lors de la journée 135 du calcul. On observe un double pic de maxima de turbidité, un centré sur les pks 10 à 15 et un autre centré sur les pks 50 à 55

La **figure 1.19** vient confirmer sur l'ensemble de la période des 8 mois simulés, un double maxima de turbidité avec une intensité plus important à l'aval.

4.2. CREME DE VASE

L'analyse des épaisseurs de crème de vase se fait à la fois sur le minima et maxima atteints lors de la journée 135 et à la fois sur les temps de dépassement de 3 seuils sur les 8 mois exploitables pour la crème de vas liquide, stricto-sensu et consolidée.

Les **figures 1.20, 1.22 et 1.24**, présentent les maxima et le minima d'épaisseur de crème de vase atteint lors de la journée 135 du calcul. On retrouve alors un double pic de dépôt qui sont l'origine des doubles pics de turbidités mentionnés auparavant.

Les **figures 1.21, 1.23 et 1.25**, présentent les temps de non dépassement de ces épaisseurs de crème de vase.

5. DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE A COURT TERME

Une partie de cette analyse se base sur un ensemble de cubatures effectuées sur plusieurs sections (sections 1 à 12 définies par le GPMNSN pour le dragage) définies ci-dessous :

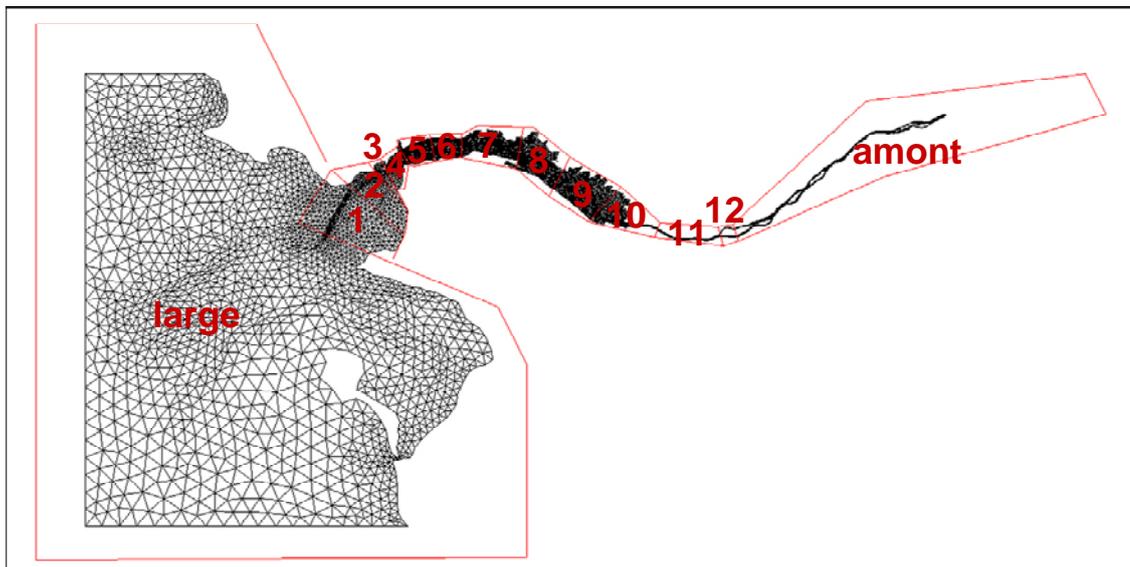


Fig. 5. ZONES DE CUBATURES POUR LES SECTIONS

Un regroupement de certaines sections ont été effectuées pour rendre plus aisée l'analyse du fonctionnement de l'estuaire :

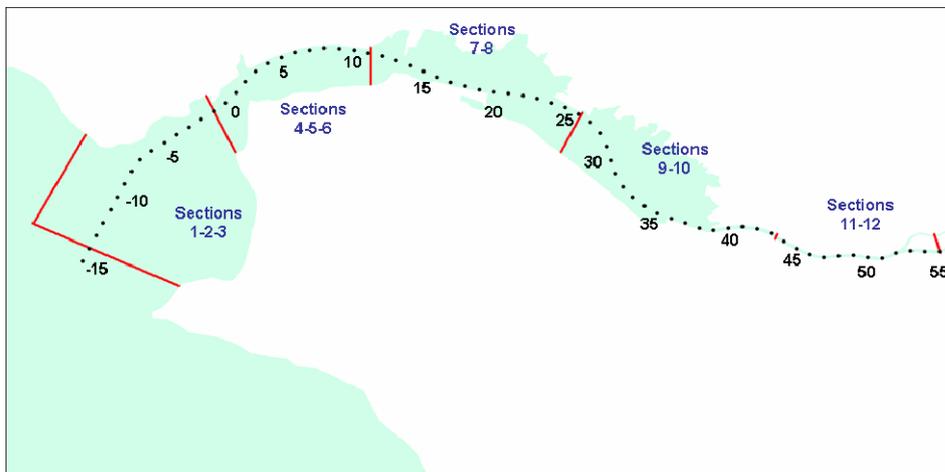


Fig. 6. ZONES REGROUPEES POUR L'ANALYSE

5.1. QUANTIFICATION D'UN BILAN SEDIMENTAIRE DE L'ESTUAIRE

L'évolution temporelle du bilan sédimentaire en suspension + dépôt (hors zone submersible fond < 4,86 m CM) est fournie sur la **figure 1.26**. La masse totale en suspension est présentée sur la **figure 1.27**.

On note que le bouchon vaseux est compris entre 0,5 et 1,1 Millions de tonnes et qu'il est capable de se reconstituer après la crue. On identifie bien une différence de masse maximale de bouchon vaseux fonction du type de coefficient caractérisant les différents cycles de marée.

On notera que ce chargement de l'estuaire en sédiment est rendu possible par le fait que la masse sortie du modèle par les frontières au large est remise en dépôt sur une zone au large de Saint-Nazaire (comprise entre +15 et +20 km). Le modèle fonctionne donc en masse de sédiment constante aux apports amont près (masse de sédiment initiale : 13,57 millions de tonnes initiaux + apports amonts)

Sans cela, l'estuaire interne a tendance à se décharger, car la source de sédiment au large n'est plus assez importante. Le bilan de l'estuaire est donc très fortement lié aux sources disponibles de sédiment au large et à la dynamique sédimentaire du large.

La valeur de la quantité initiale de sédiment a donc aussi certainement un rôle sur les bilans quantitatifs de l'estuaire calculés.

On voit sur la **figure 1.29** que sur la période d'exploitation, environ 19 Millions de tonnes de sédiments sont sortis par les frontières au large pour être redéposés au large de Saint-Nazaire (dont 12 Millions de tonnes sont sorties pendant les 49 premiers jours de crue).

5.1.1. ANALYSE PAR PHASES

Pour le bilan sédimentaire de l'estuaire, nous avons identifié 4 phases:

Phase 1 : du jour 0 au jour 49 : crue à décrue (1000 m³/s à 4000 m³/s à 1250 m³/s)

Phase 2 : du jour 49 au jour 98 : décrue à bas débits (1250 m³/s à 250 m³/s)

Phase 3 : du jour 98 au jour 175 : étiage et bas débits (250 m³/s à 150 m³/s à 350 m³/s)

Phase 4 : du jour 175 au jour 231 : bas débits à petite crue (350 m³/s à 1700 m³/s)

LOT 1-PHASE 2 : EXPLOITATION DU MODELE SUR LA SITUATION ACTUELLE

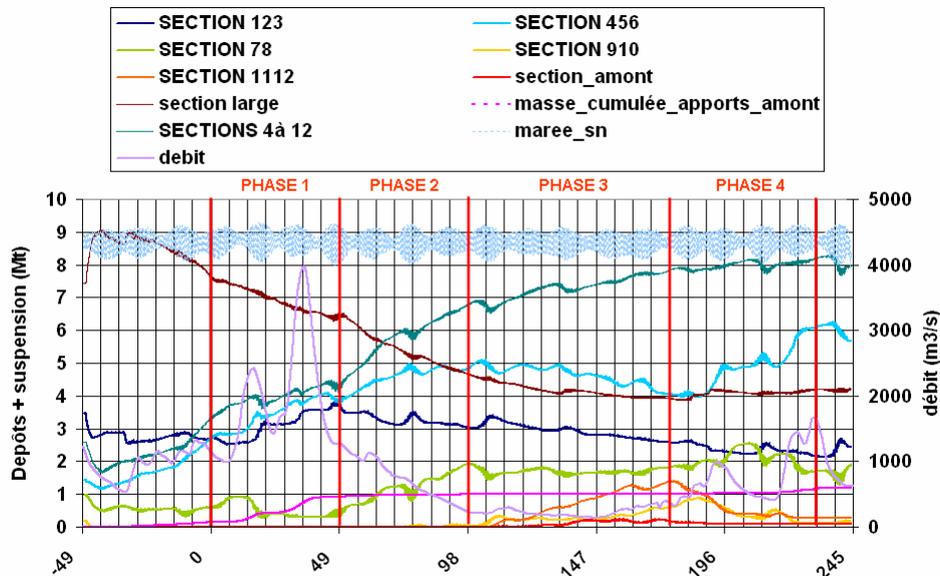


Fig. 7. PHASES ETUDIEES POUR LES BILANS ET FLUX

A partir de ces courbes nous avons construit le tableau ci-dessous qui récapitule par phase de calcul les chiffres obtenus. Les bilans sont présentés par zone en millions de tonnes :

	SECTIONS 1, 2 et 3	SECTIONS 4, 5 et 6	SECTIONS 7 et 8	SECTIONS 9 et 10	SECTIONS 11 et 12	SECTIONS 4 à 12	SECTIONS 1 à 12	SECTION AMONT	APPORT AMONT
Bilan total									
jour 0	2.70	2.76	0.63	0.00	0.00	3.40	6.10	0.00	0.00
jour 49	3.68	3.88	0.56	0.01	0.00	4.44	8.12	0.00	0.78
jour 0 à 49	0.98	1.11	-0.08	0.00	0.00	1.04	2.02	0.00	0.78
jour 98	3.03	4.90	1.92	0.04	0.00	6.86	9.89	0.00	0.85
jour 49 à 98	-0.65	1.03	1.36	0.04	0.00	2.43	1.78	0.00	0.07
jour 175	2.58	4.11	1.83	0.59	1.38	7.91	10.49	0.17	0.86
jour 98 à 175	-0.45	-0.79	-0.09	0.54	1.38	1.04	0.59	0.17	0.02
jour 231	2.16	6.18	1.70	0.13	0.27	8.28	10.44	0.09	1.02
jour 175 à 231	-0.42	2.07	-0.12	-0.46	-1.11	0.38	-0.05	-0.08	0.16
Bilan >4.86 mCM									
jour 0	0.000	0.044	0.000	0.000	0.000	0.044	0.044		
jour 49	0.000	0.052	0.002	0.000	0.000	0.054	0.054		
jour 0 à 49	0.000	0.008	0.002	0.000	0.000	0.010	0.010		
jour 98	0.000	0.056	0.002	0.000	0.000	0.058	0.058		
jour 49 à 98	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000	0.004	0.004		
jour 175	0.000	0.061	0.003	0.000	0.000	0.064	0.064		
jour 98 à 175	0.000	0.006	0.001	0.000	0.000	0.007	0.007		
jour 231	0.000	0.065	0.006	0.000	0.000	0.071	0.071		
jour 175 à 231	0.000	0.004	0.003	0.000	0.000	0.007	0.007		
Bilan <4.86 mCM									
jour 0	2.70	2.72	0.63	0.00	0.00	3.36	6.05		
jour 49	3.68	3.82	0.55	0.01	0.00	4.38	8.06		
jour 0 à 49	0.98	1.10	-0.08	0.00	0.00	1.03	2.01		
jour 98	3.03	4.85	1.92	0.04	0.00	6.81	9.84		
jour 49 à 98	-0.65	1.02	1.36	0.04	0.00	2.42	1.77		
jour 175	2.58	4.05	1.82	0.59	1.38	7.84	10.42		
jour 98 à 175	-0.45	-0.80	-0.09	0.54	1.38	1.04	0.59		
jour 231	2.16	6.11	1.70	0.13	0.27	8.21	10.37		
jour 175 à 231	-0.42	2.06	-0.13	-0.46	-1.11	0.37	-0.06		

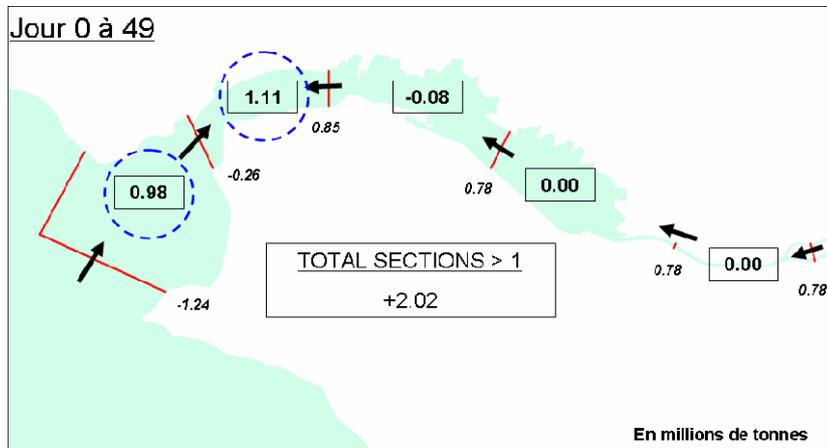
Tableau 6 - BILAN SEDIMENTAIRE DE L'ESTUAIRE (EN MILLIONS DE TONNES)

Ces bilans peuvent ensuite s'interpréter en termes de flux de sédiments par application de la loi de conservation de la masse. Cette loi s'écrit à chaque limite de zone de la façon suivante : flux aval = flux amont - volume déposé/érodé avec un flux considéré comme

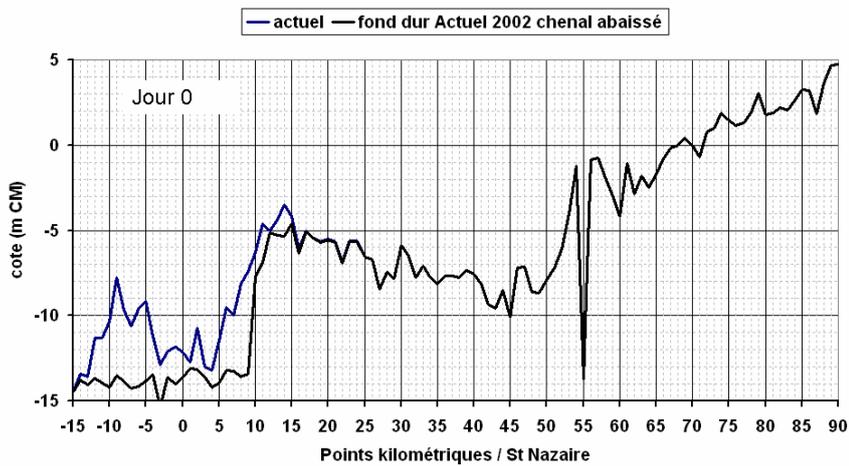
LOT 1-PHASE 2 : EXPLOITATION DU MODELE SUR LA SITUATION ACTUELLE

positif vers l'aval. Elle se construit d'amont vers l'aval en partant du flux d'apport par le fleuve qui est imposé en condition à la limite. Le bilan sur chaque période peut alors se visualiser comme indiqué ci-dessous. En encadré est affiché l'évolution résiduelle de chaque zone et en italique affiché la masse résiduelle qui a transité par la section.

Phase 1 : crue à décrue (1000 m³/s à 4000 m³/s à 1250 m³/s)



profil fond dur + vase consolidé et sticto-sensu - jour n°0 à PM



profil fond dur + vase consolidé et sticto-sensu - jour n°49 à PM

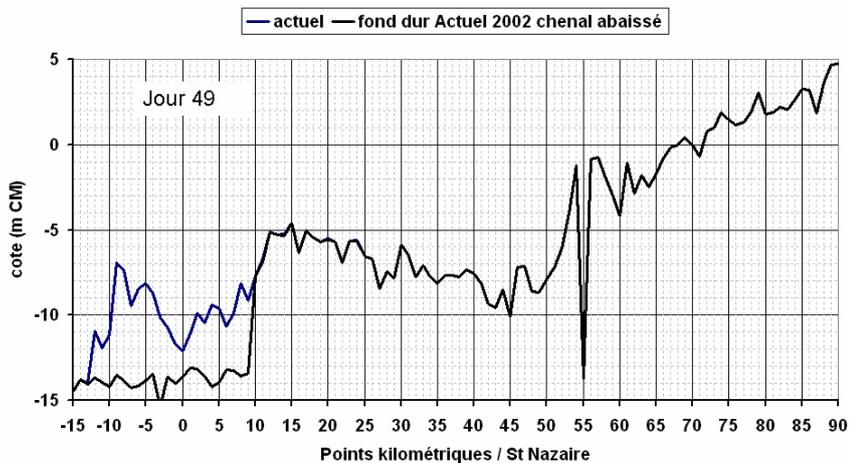
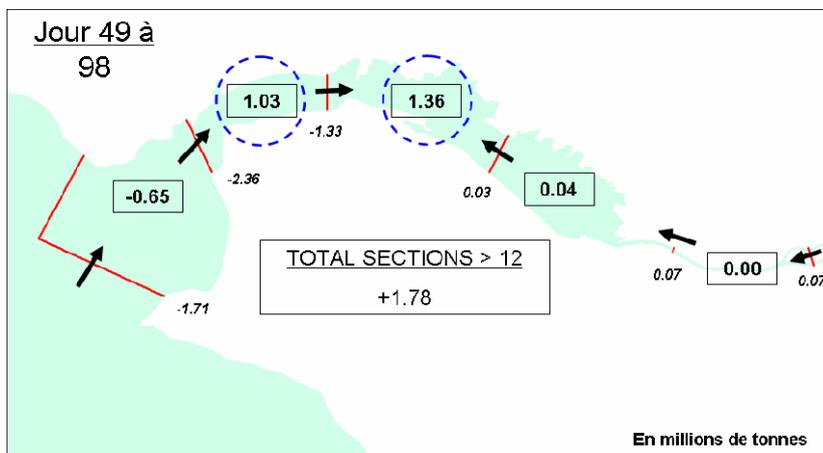
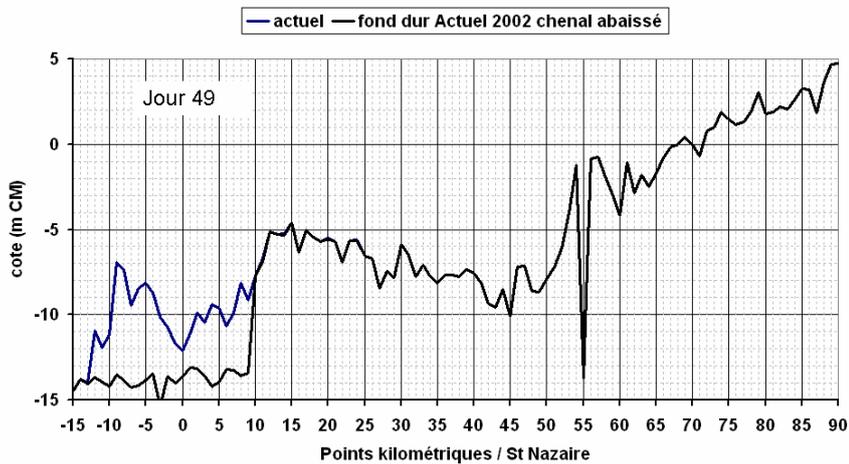


Fig. 8. PHASE1: JOUR 0 A 49

Phase 2 : décrue à bas débits (1250 m³/s à 250 m³/s)



profil fond dur + vase consolidé et sticto-sensu - jour n°49 à PM



profil fond dur + vase consolidé et sticto-sensu - jour n°98 à PM

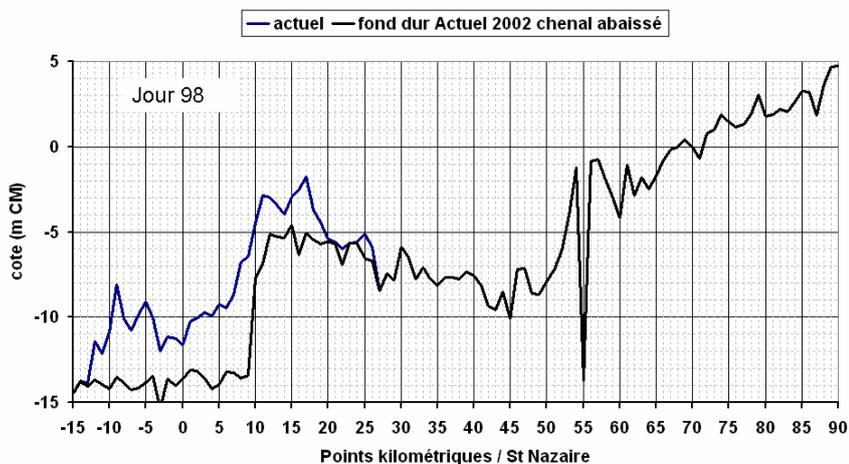
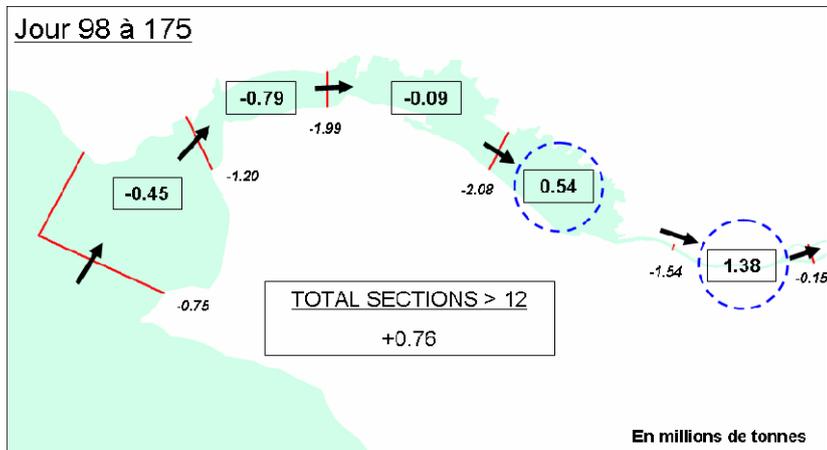
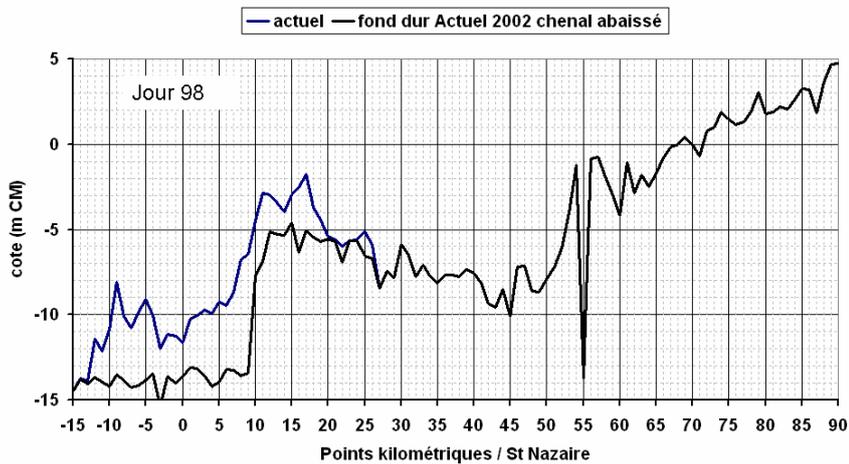


Fig. 9. PHASE 2: JOUR 49 A 98

Phase 3 : étiage et bas débits (250 m³/s à 150 m³/s à 350 m³/s)



profil fond dur + vase consolidé et sticto-sensu - jour n°98 à PM



profil fond dur + vase consolidé et sticto-sensu - jour n°175 à PM

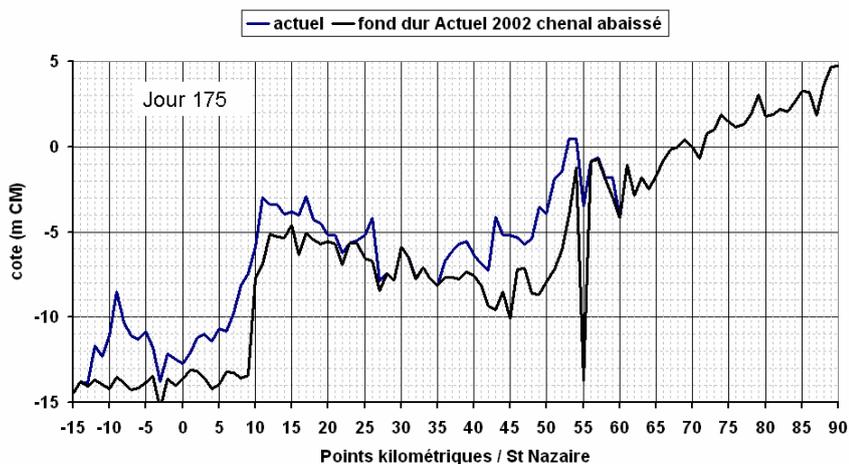
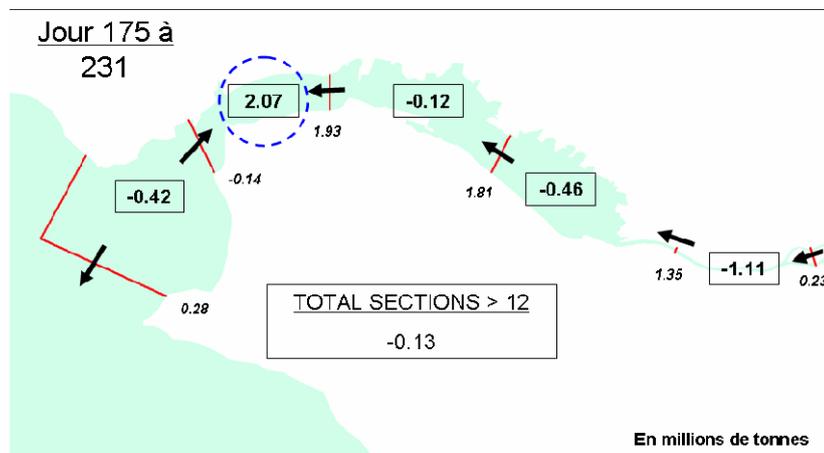
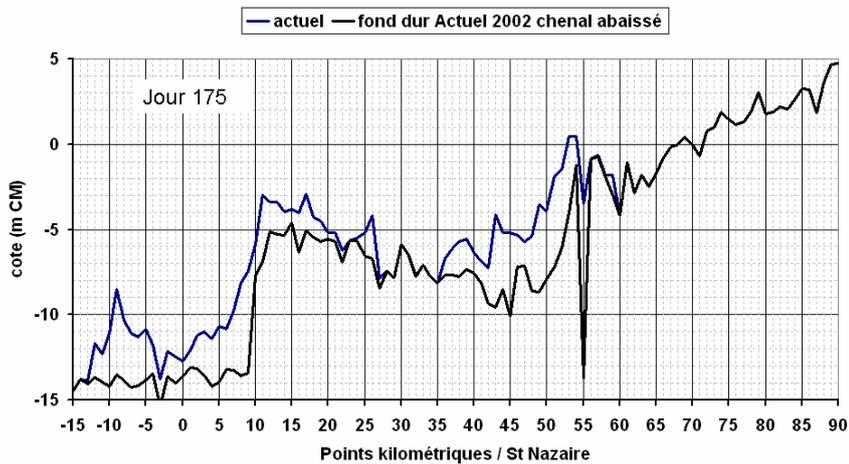


Fig. 10. PHASE 3: JOUR 98 A 175

Phase 4 : bas débits à petite crue (350 m3/s à 1700 m3/s)



profil fond dur + vase consolidé et sticto-sensu - jour n°175 à PM



profil fond dur + vase consolidé et sticto-sensu - jour n°231 à PM

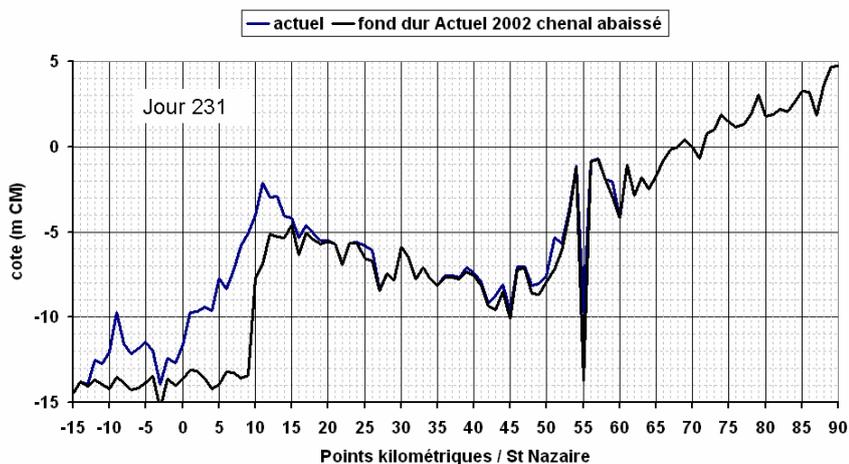


Fig. 11. PHASE 4: JOUR 175 A 231

Phase 1 : l'estuaire se vide de ses sédiments stockés à l'amont et piège les sédiments amont dans les sections 123 et 456. Durant cette phase, l'estuaire externe et les apports amont sont les principales sources de sédiments.

Phase 2 : lors de la décrue, c'est la section 4-5-6 et principalement 7-8 qui deviennent les zones privilégiées de piégeage des sédiments. L'estuaire externe et la section 123 sont alors les principales sources de sédiment.

Phase 3 : la zone de piégeage continue à se déplacer vers l'amont : la zone de convergence entre flux venant de l'amont et flux venant de l'aval se situe sur la zone 9-10 et principalement sur la zone 11-12. Ces 2 zones gagnent au total 1,92 millions de tonnes de sédiment sur cette phase. La majeure partie de cette masse provient de l'estuaire externe et de la section 456.

Phase 4 : la remontée des débits suite à l'étiage permet une redescente du sédiment qui est de nouveau piégé dans la section 456. Les 3 sections amont sont cette fois les sources de sédiment principales et les apports aval restent mineurs dans ce cas. La section aval se trouve cette en érosion avec des flux à la fois dirigés vers l'amont et l'aval.

5.1.2. ANALYSE EN MOYENNE TEMPORELLE

La masse moyenne (en Millions de tonnes) observée sur chaque section (en retranchant la masse observée au temps 0) montre bien sur la figure ci-dessous les sections les plus impactées temporellement dans l'année.

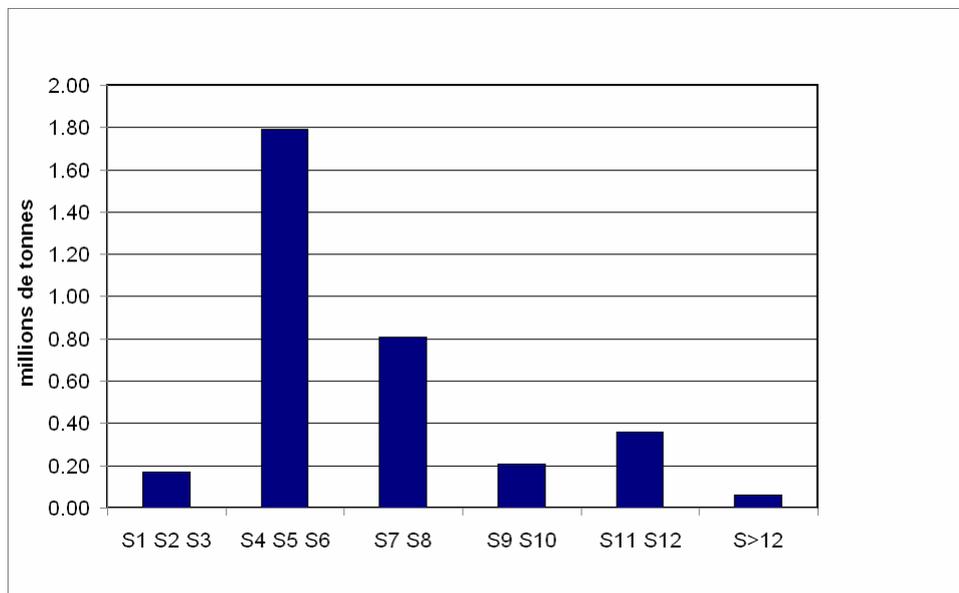


Fig. 12. MOYENNE (MASSE- MASSE INITIALE) SUR 8 MOIS POUR CHAQUE SECTION

5.1.3. BILAN GLOBAL ET QUANTIFICATION DES APPORTS AMONT ET AVAL EN VASE

Le tableau du bilan global sur 8 mois sur l'estuaire des sections 1 à 12 donne :

LOT 1-PHASE 2 : EXPLOITATION DU MODELE SUR LA SITUATION ACTUELLE

Scénario	Flux aval entrant par la section 1 (Mt)	Bilan de masse amont section 1 (Mt)	Flux amont entrant a Ancenis (Mt)
Actuel	+3.42	+4.48	+1.06

Tableau 7 - BILAN GLOBAL

La **figure 1.28** décrit les apports amont (transitant par l'amont de la section 12) et les apports aval (transitant par l'aval de la section 1). La différence entre les flux amont et aval sont remarquables.

On peut noter des variations du flux aval variant du simple au double suivant le type de coefficient de vive-eau que contient le cycle de marée. Quelque soit le cycle de marée, le flux aval le plus important est toujours tourné vers l'amont.

La **figure 1.29** décrit ces mêmes apports de façon cumulée, ainsi que le bilan sur les sections 1 à 12.

Les apports amont en section 12 sont quasi identiques à ceux imposés au niveau d'Ancenis : 0,97 Mt, et 0,08 Millions de tonnes restent à l'amont.

Sur la période d'exploitation, le flux aval intégré donne un apport dirigé vers l'amont de 3,42 Millions de tonnes.

Au total (flux amont – flux aval), l'estuaire sur la section 1 à 12 gagne 4,48 Millions de tonnes de sédiment durant la période d'exploitation.

Comme dit préalablement, cet apport par l'aval est possible du fait de l'imposition d'un stock de dépôt aval de vase (dépendant des sorties maritimes). La partie quantitative de ce résultat est donc lié l'hypothèse de ce stock. Cependant, la capacité de l'estuaire à pomper du sédiment du large, indépendamment de la dynamique externe sédimentaire est mise à l'épreuve ici. C'est cette capacité suivant les différents scénarios qui sera comparée.

5.2. DYNAMIQUE DES DEPOTS SUR LES MILIEUX (VASIERES, PRAIRIES)

12 zones ont été prédéfinies. Chaque zone est présentée sur la figure ci-dessous.

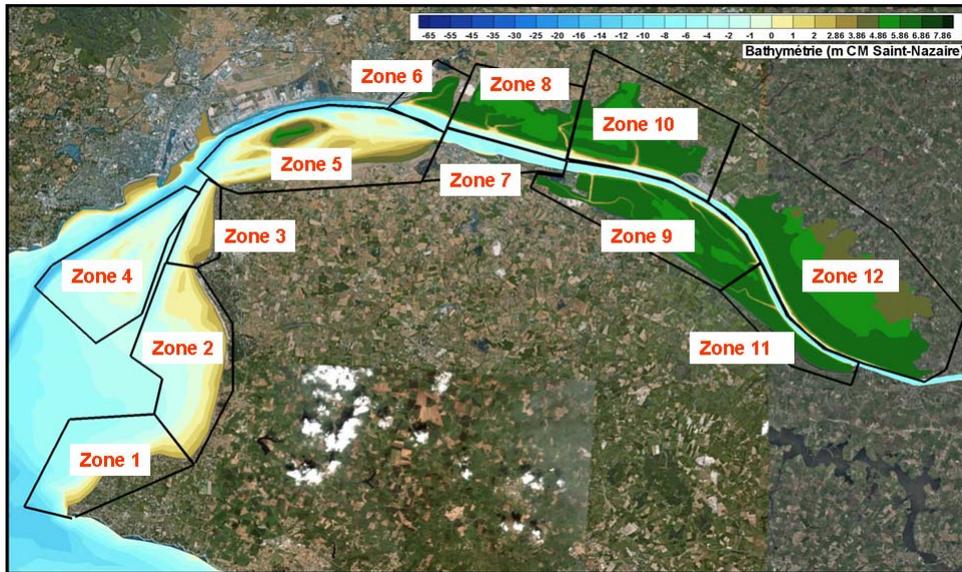


Fig. 13. ZONES DE CUBATURES ET SURFACES POUR L'ETUDE DES MILIEUX

Chaque zone a été sous divisée en deux zones : « estran » : -1mCM à 4,86mCM et « zone submersible » : > 4,86mCM.

Le tableau ci-dessous récapitule les surfaces correspondantes aux sous zones. Il est à noter que sur le maillage modèle global, le nombre de points représentant l'estran peut être limité.

LOT 1-PHASE 2 : EXPLOITATION DU MODELE SUR LA SITUATION ACTUELLE

ACTUEL	n°	surface (ha)
estran	1	379
estran	2	1495
estran	3	390
estran	4	768
estran	5	1752
estran	6	78
estran	7	14
estran	8	177
estran	9	181
estran	10	163
estran	11	72
estran	12	145
zone submersible	1	0
zone submersible	2	0
zone submersible	3	0
zone submersible	4	0
zone submersible	5	48
zone submersible	6	183
zone submersible	7	0
zone submersible	8	947
zone submersible	9	1647
zone submersible	10	1314
zone submersible	11	524
zone submersible	12	3354

Tableau 8 - SURFACE DES ZONES POUR LES CUBATURES

Les évolutions des masses de dépôt sont présentées pour chacune de ces zones sur les **figures 1.30 à 1.48**. Seules les zones ayant une surface non nulle sont présentées.

Sur les 4 zones aval qui se situent dans l'estuaire externe, on assiste à une érosion des sédiments mis en initialisation, mais on ne remarque pas de dynamique notable sur ces zones.

Les estrans des zones 6 à 10 vives aux rythmes des marées avec des dépôts qui se cumulent en fin de déchet lors des mortes-eaux. Ces dépôts sont majoritairement repris lors du revif. Le dépôt résiduel est de l'ordre de 1 à 2cm durant ces 8 mois. La zone 5 qui est la zone sud de Bilho à un dépôt résiduel un peu plus important qui est de l'ordre de 5 cm en 8 mois.

Les zones submersibles ont un rythme de vie différent des estrans. Les dépôts s'effectuent par palier, lorsqu'il y a submersion des prairies donc lors des fortes vives-eaux (les sédiments sont déposés à pleine mers et peu repris au jusant). Les ordres de grandeur sont compris entre 0,5 et 1,5 mm de dépôt en 8 mois.

5.3. DYNAMIQUE DES DEPOTS DANS LE CHENAL DE NAVIGATION

Les **figures 1.49 à 1.64**, montrent ponctuellement du pk -10 au pk 65 (de 5 en 5 kilomètres) l'évolution temporelle des dépôts qui décrit la dynamique des sédimentations à l'intérieur du chenal de navigation.

LOT 1-PHASE 2 : EXPLOITATION DU MODELE SUR LA SITUATION ACTUELLE

On voit clairement une zone de piégeage des dépôts entre le pk-5 et le pk+5 qui s'effectue pendant la crue.

On voit un système de fonctionnement inverse entre le pk10 et le pk20, puisque les dépôts sont complètement érodés sur cette zone pendant la crue. Par contre cette zone devient une zone de piégeage pour les débits inférieurs $1500 \text{ m}^3/\text{s}$. Cette zone a tendance à être érodée durant les cycles de fortes vives eaux et devient plutôt une zone dépôt dans les autres cas.

Pour les pks compris entre les pks 20 à 35, on observe une dynamique importante des dépôts pour des débits inférieurs à $500 \text{ m}^3/\text{s}$, avec un rythme qui suit encore l'oscillation, des cycles de marée.

Pour les pks compris entre le pk 40 et 60, on observe une dynamique importante des dépôts pour des débits inférieurs à $200 \text{ m}^3/\text{s}$. L'évolution dans cette partie est plus corrélée au cycle de débit, qu'au cycle des marées.

On voit qu'en général au centre du système on obtient entre 1 et 3 mètres de dépôt de vase et plus localement dans une forte zone de piégeage jusqu'à 5 mètres de dépôt (pk5 par exemple pendant la crue ou Pk 45 et 50 pendant l'étiage).

On notera que le point de pk 55 se trouve dans une fosse et que l'évolution calculée n'est pas représentative du système global.

La partie très active à l'échelle temporelle de la marée qui représentée par la crème de vase liquide est comprise entre 0,2 m et 1 mètre de dépôt pendant les vives-eaux.

Sur l'ensemble de ces points, on observe une très forte mobilité de la crème de vase que ce soit pour la partie liquide comme pour la partie stricto-sensu. La partie consolidée est peu atteinte.

**ANNEXE A : AJUSTEMENT DE LA LOI DE DEBIT SOLIDE AMONT POUR LE
CALCUL DE REFERENCE DANS L'ETAT ACTUEL**

LOT 1-PHASE 2 : EXPLOITATION DU MODELE SUR LA SITUATION ACTUELLE

A/TO : **P. BONA/ GIP LOIRE ESTUAIRE**

N°FAX :

*COPIE/
COPY :* REGIS WALTHER, SEBASTIEN LEDOUX

N°FAX :

DE/FROM : LUC HAMM

REF. : LHM/MAR/171 1822

N°TEL : 33 (0)4 76 33 4188

DATE : 8 JUILLET 2010

E-MAIL : Luc.hamm@sogreah.fr

N/PAGES : 2

RESTAURATION DE LA LOIRE ESTUARIENNE
MODELISATION 3D

OBJET/

SUBJECT : AJUSTEMENT DE LA LOI DE DEBIT SOLIDE AMONT POUR LE CALCUL DE REFERENCE DANS L'ETAT ACTUEL

1. OBJET DE LA NOTE

Cette note a pour objet de faire le point sur l'ensemble des données concernant les apports en suspension de la Loire afin de vérifier et d'affiner la condition limite en débit solide amont à introduire dans le calcul de référence de l'état actuel.

2. HISTORIQUE DES RECHERCHES SUR LE SUJET

Les apports en suspension de la Loire constituent un élément important dans l'établissement du bilan sédimentaire en vase de l'estuaire. Une première recherche a été effectuée en 2006 sur le sujet et une synthèse des mesures les plus fiables effectuées entre 1955 et 2004 avait abouti à une première proposition de lois linéaires simples distinguant phases de crue avec fortes arrivées de Mes et de décrue avec des arrivées beaucoup plus faibles. Ces relations furent utilisées pour représenter les apports solides en suspension de la Loire pendant une année représentative très schématique incluant la montée puis la redescende d'une unique et forte crue (voir paragraphe 2.3.2 du rapport 171 1457 R2-tome 2 de janvier 2007 et figure A.2.). L'intégration de cette loi d'apport sur 5 ans d'hydrologie de la Loire (2001 à 2005) avait abouti à un apport solide moyen annuel de 2,3 millions de t/an.

En 2009, le calage simple hydrosédimentaire a bénéficié des mesures du réseau de mesures en continu du GIP LE. Les données mesurées à Trentemoult et à Bellevue en 2007 ont été utilisées ensuite, dans le cadre d'exploitation du modèle, pour définir de nouvelles lois d'apports solides directement issues de ces mesures (voir par. 3.1.4 du rapport R9 de phase 1). Ces lois distinguaient également les périodes de crue et de décrue mais aussi les périodes intermédiaires (3 lois linéaires).

Elles ont été appliquées dans le cadre du premier calcul de référence sur l'état actuel effectué en mai 2010 et discuté au comité d'experts du 18 juin. En effet, après intégration du débit solide sur la période d'analyse de 8mois, on obtient 0,775 millions de t d'apport amont soit 1,16 millions de t sur 1 an, ce est deux fois plus faible que l'estimation effectuée en 2006

pour une année représentative. Ce premier calcul (partiel) devant être refait, il a été décidé, à cette occasion, de vérifier ces lois d'apports à partir de nouvelles mesures en nature effectuées actuellement pour le compte du GIP LE à Montjean.

Après réception et examen de ces données, il nous a paru utile de revoir la question dans son ensemble en repassant en revue l'ensemble des données disponibles.

3. ANALYSE DE LA BASE DE DONNEES DE MESURES ELARGIE

3.1. DONNEES MONTJEAN 2009-2010

La base de données de MES établie en 2006 a d'abord été élargi à ces nouvelles données mesurées à Montjean d'août 2009 à avril 2010 (9 mois de mesures, fig. A.1). A noter que l'intégration de ces mesures donne 428 000 tonnes pour 9 mois. Cela semble très faible, et pourrait être dû au fait que les débits ne dépassent pas 2500 m³/s durant cette période.

Protocole de mesure à préciser par le GIP LE.

La figure A.2 intègre ces nouvelles données dans la base existante. Elles se situent plutôt plus bas que les mesures EDF de 1998/99 avec des débits n'ayant pas dépassés 2500 m³/s. La figure A.3 compare ces mesures à loi de MES fonction du débit définie dans le cadre d'exploitation et la figure A.4 compare ces mesures à l'application des lois linéaires de 2006. On voit alors l'amélioration des lois proposées en 2009 par rapport à la loi proposée en 2006 pour ce type de débits, c'est-à-dire hors crue.

3.2. DONNEES DE LA FORTE CRUE DE JANVIER 2004

Les mesures de MES effectués lors de la forte crue de janvier 2004 (fig A.5) à Mauves en surface sont assez bien représentées par les lois de 2006 alors que l'application brutale des relations de 2009 surestiment ce débit solide. On sort en effet dans ce cas des limites d'application de ces relations qui ont été établies pour définir les MES hors crue (les mesures pendant la crue de février 2007 qui était exploitée étaient directement disponibles à Trentemoult). Les 3 lois crues, décrues et intermédiaires n'ont pas été bornées sur les forts débits, ce qui explique cette mauvaise adéquation avec les mesures de Janvier 2004.

3.3. MESURES DU RESEAU EN CONTINU

La figure A.6 reprend la figure A.2 en y ajoutant les données mesurées à Trentemoult (un point toutes les 15 min calculé comme moyenne glissante sur 24 heures) entre le 08/02/2007 et le 02/04/2008; On observe clairement les séries chronologiques d'apports mesurés en relation avec les débits de la Loire pour différentes crues. L'enveloppe définie en 2006 est bien respectée mais paraît plutôt conservatrice.

La figure A.7 reprend la précédente en y ajoutant les mesures effectuées à Bellevue de juin à novembre 2007.

Sous les débits de 500 m³/s, on voit encore à Bellevue l'influence du bouchon vaseux. Sinon on retrouve le même système de boucle de MES lors de la montée en débit et de

descente en débit qui se déplace suivant l'ordre d'arrivée des crues (les premières crues étant les plus chargées).

4. AFFINEMENT DE LA LOI D'APPORT SOLIDE AMONT

La figure A.7 indique également les nouvelles relations proposées pour les apports amont qui sont les suivantes :

Crue ($Q_j > Q_{\text{moyen des 5j précédents}} + 100$) : $\text{MES (g/l)} = 180/2000 * (Q_j - 500) + 10$

Décru ($Q_j < Q_{\text{moyen des 5j précédents}} - 100$) : $\text{MES (g/l)} = 80/5000 * (Q_j - 500) + 10$

Etat intermédiaire : $\text{MES (g/l)} = 120/3000 * (Q_j - 500) + 10$

Ces 3 lois sont bornées en limite supérieure pour les débits importants par la loi

$\text{MES (g/l)} = -70/3500 * (Q_j - 2000) + 180$

Elles sont également bornées en limite inférieure à une concentration minimum de 10 mg/l pour un débit inférieur à 500 m³/s.

Ces relations affinent celles proposées dans le cadre d'exploitation en 2009.

Elles sont d'abord vérifiées sur les mesures à Montjean en 2009/2010 (fig A.10). Puis elles sont comparées aux mesures effectuées à Bellevue (fig. A.10), Trentemoult (fig. A.11) et à Mauves (fig. A.12). Ces relations permettent d'avoir une bonne représentation de la MES quel que soit le débit.

Elles paraissent plus satisfaisantes pour application à l'année représentative définie dans le cadre d'exploitation. Le calcul sur 8 mois aboutit à un total de 1,04 millions de t ce qui donnerait sur une année un apport amont de 1,56 millions de tonnes.

Régis WALTHER/ Luc HAMM

P.J. 13 figures



Fig. A.1

Mesures à Montjean du 01/08/2009 au 30/04/2010

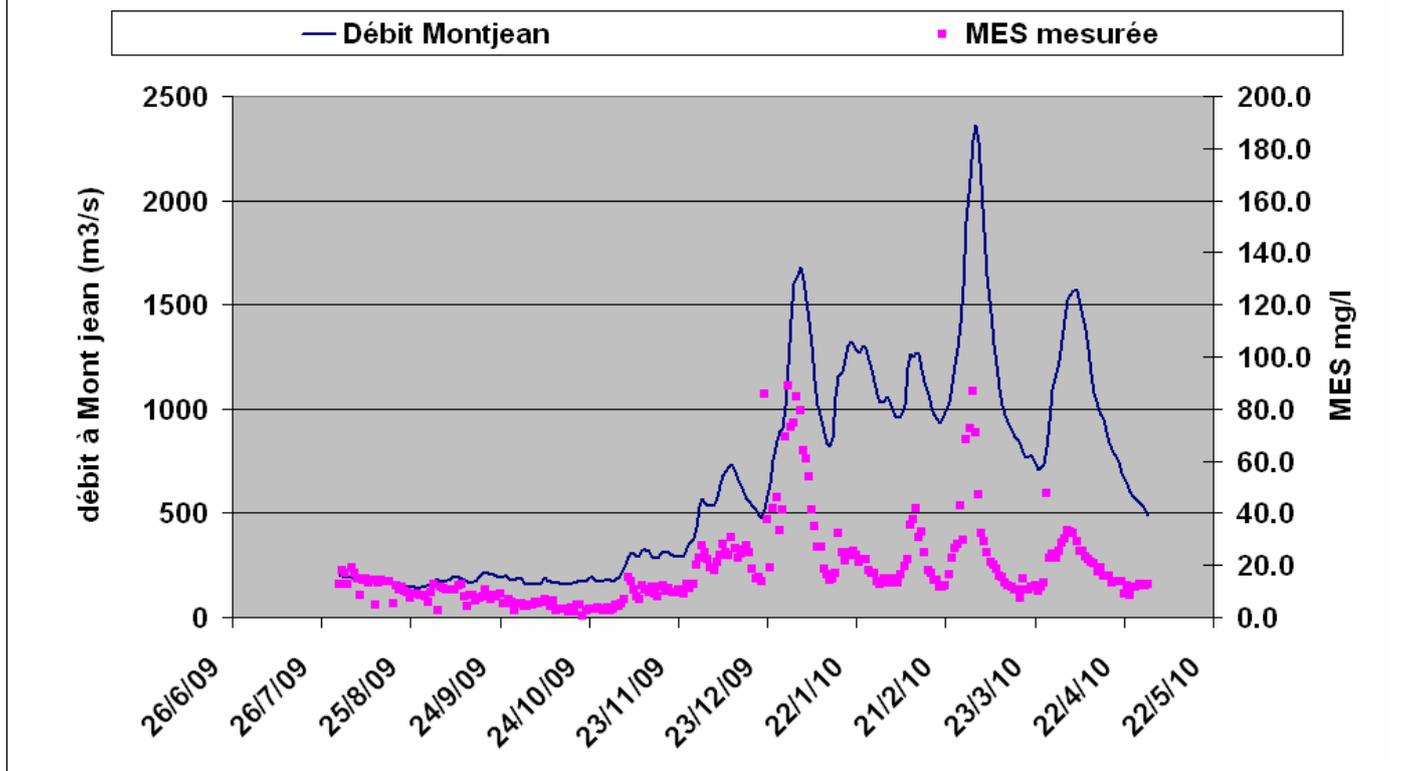


Fig. A.2

Comparaisons aux mesures générales disponibles à Montjean

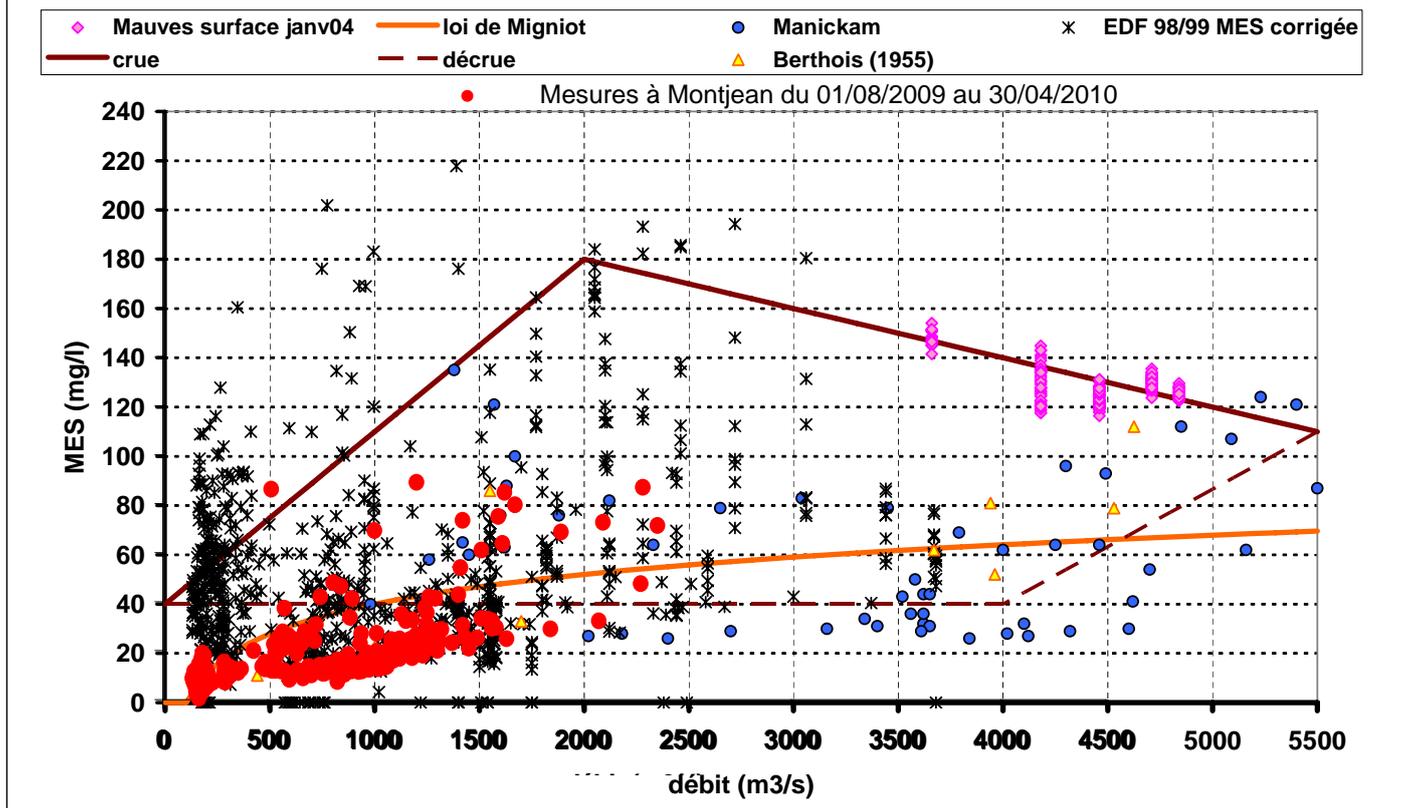


Fig. A.3

Recomposition du signal avec les lois utilisées dans le cadre d'exploitation

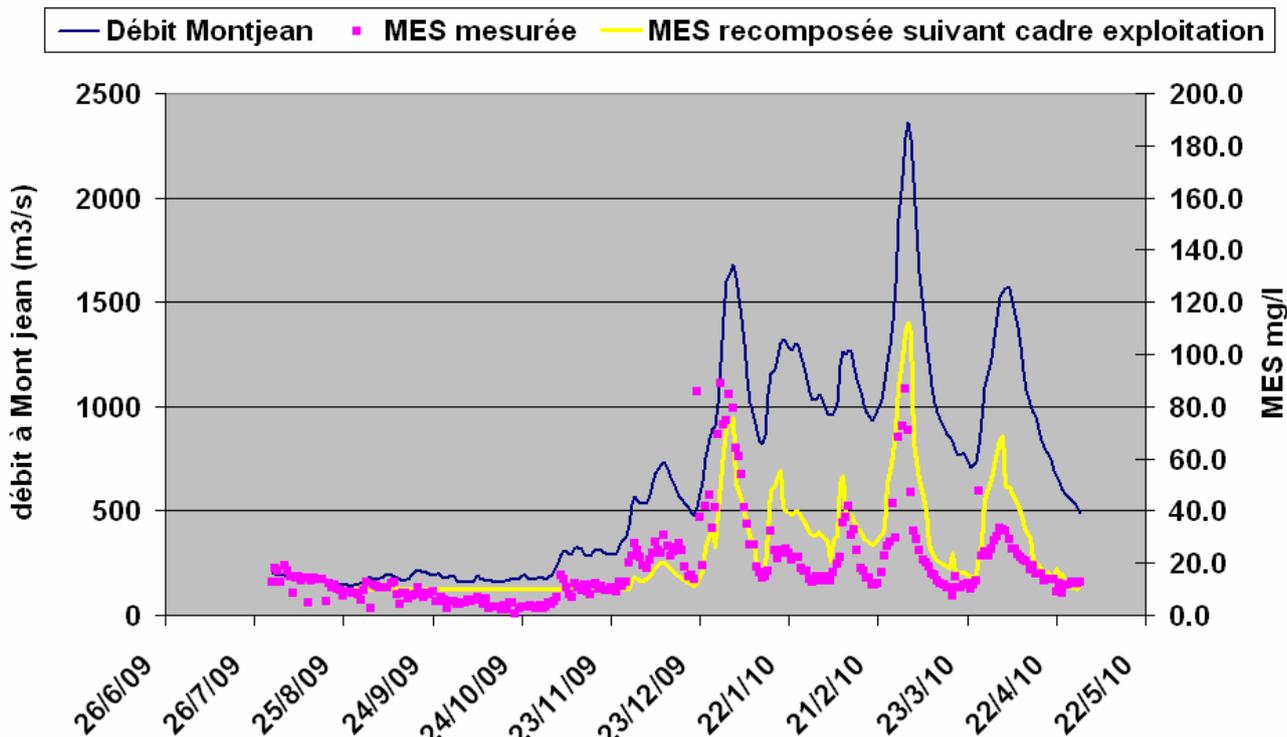


Fig. A.4

Recomposition du signal avec la loi utilisée en 2006

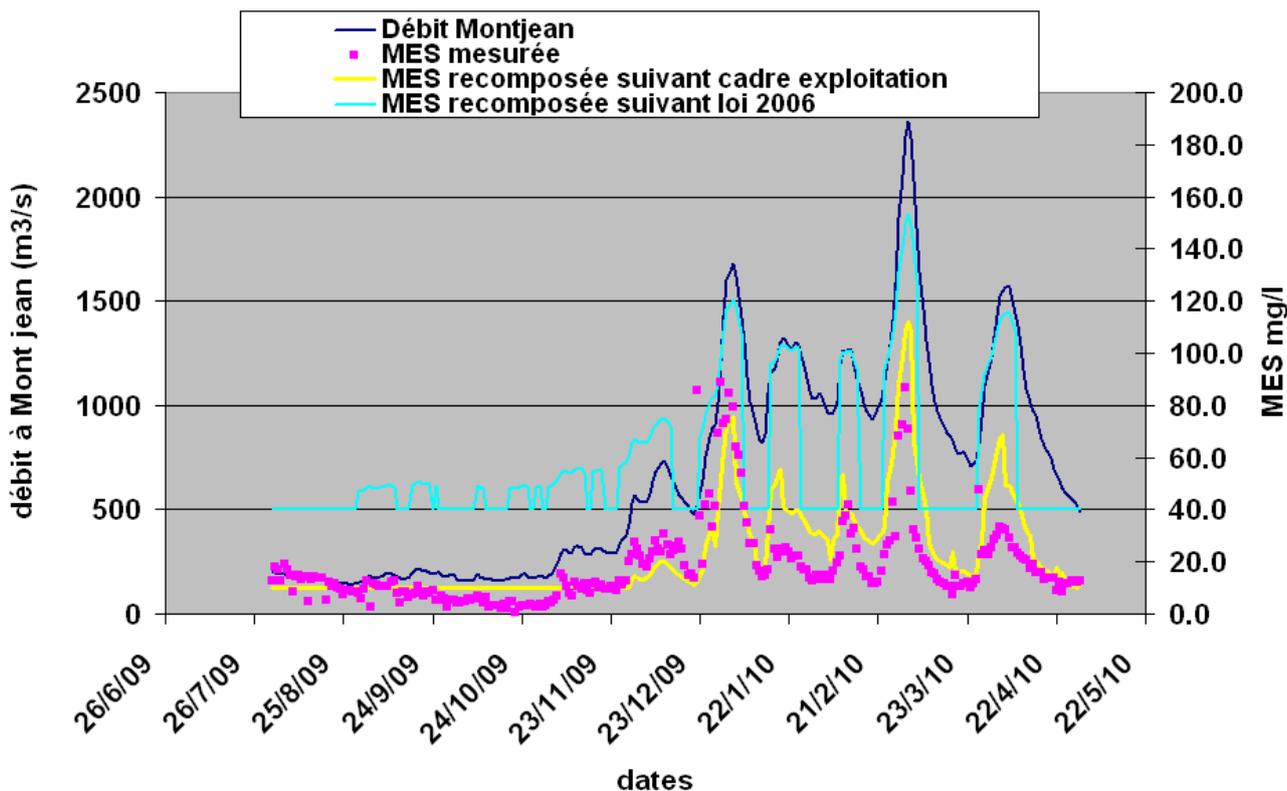


Fig. A.5

**Test sur la crue de Janvier 2004
 mesure à Mauves en surface**

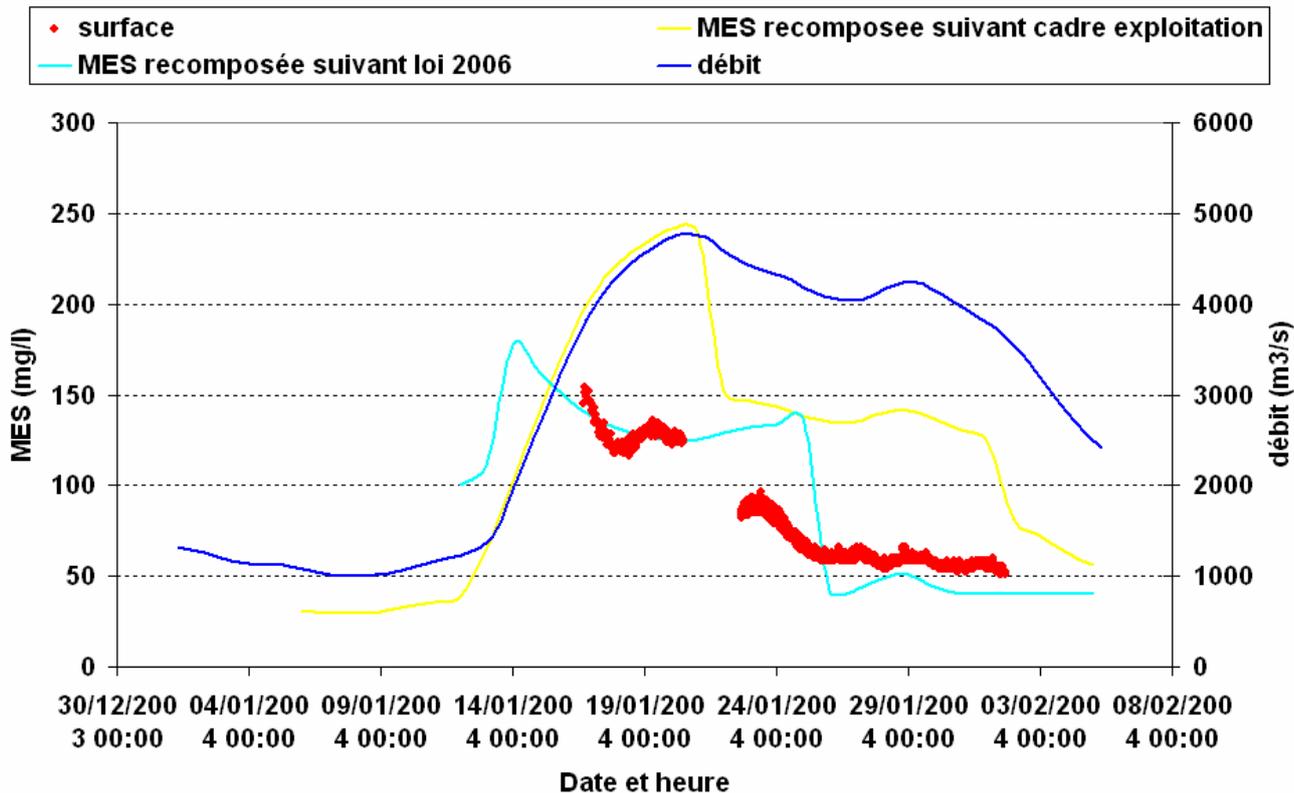


Fig. A.6

Comparaisons aux mesures générales disponibles à Montjean

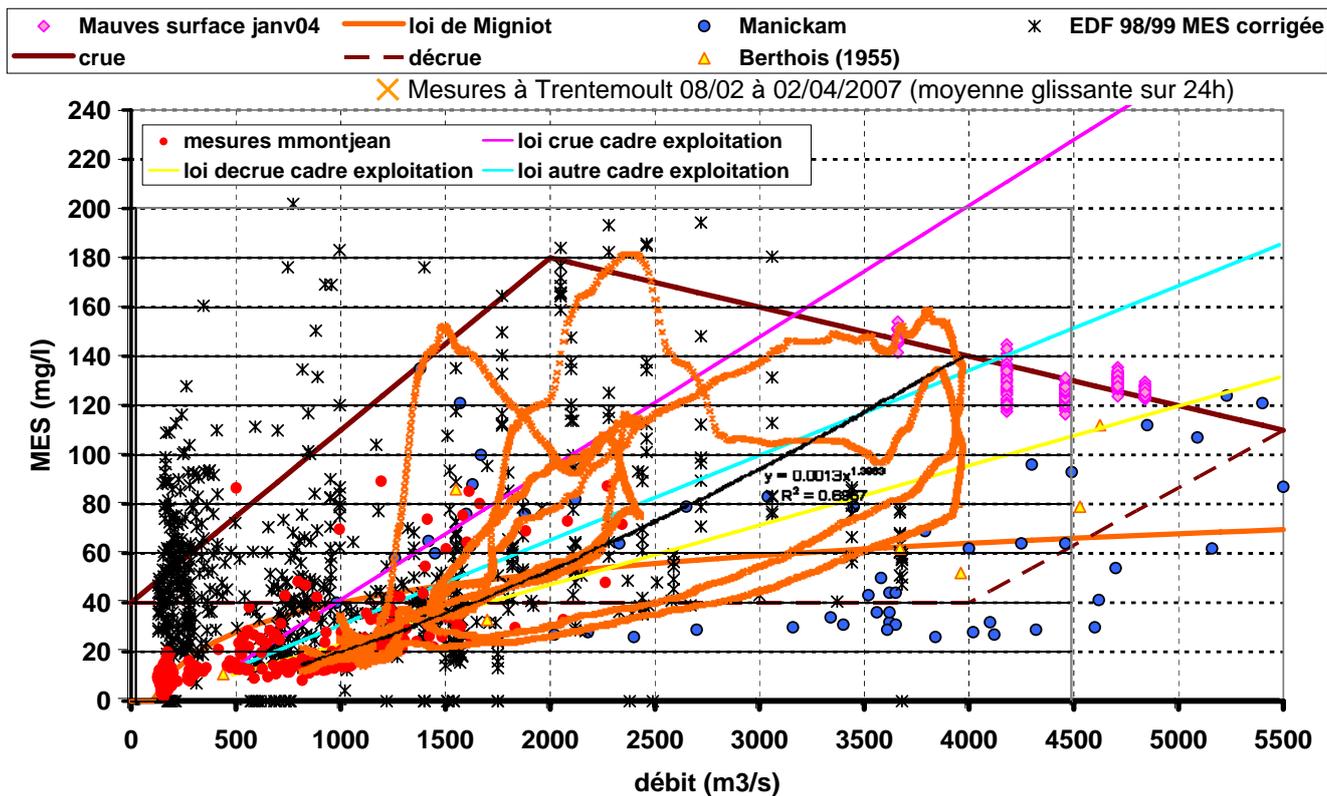


Fig. A.7

Récapitulatif des données de MES Amont

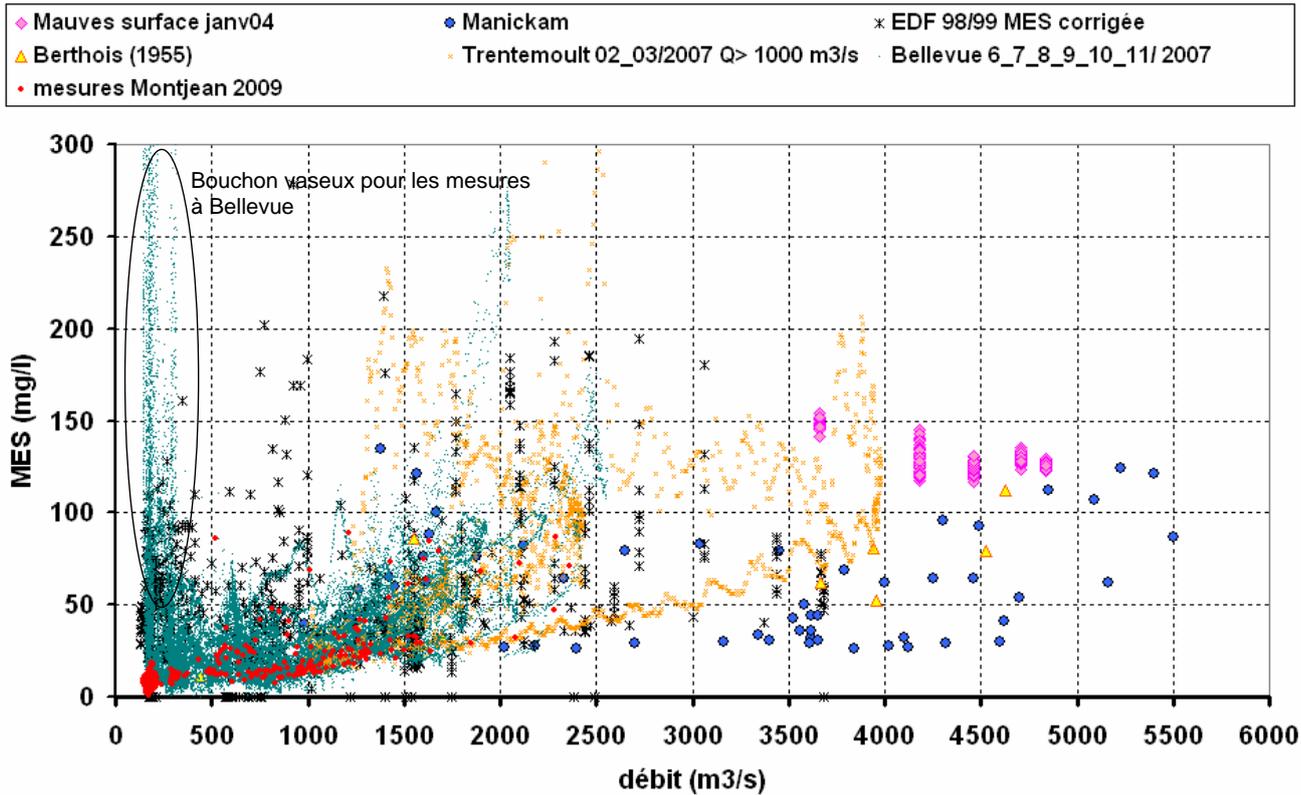


Fig. A.8

Proposition d'une nouvelle loi

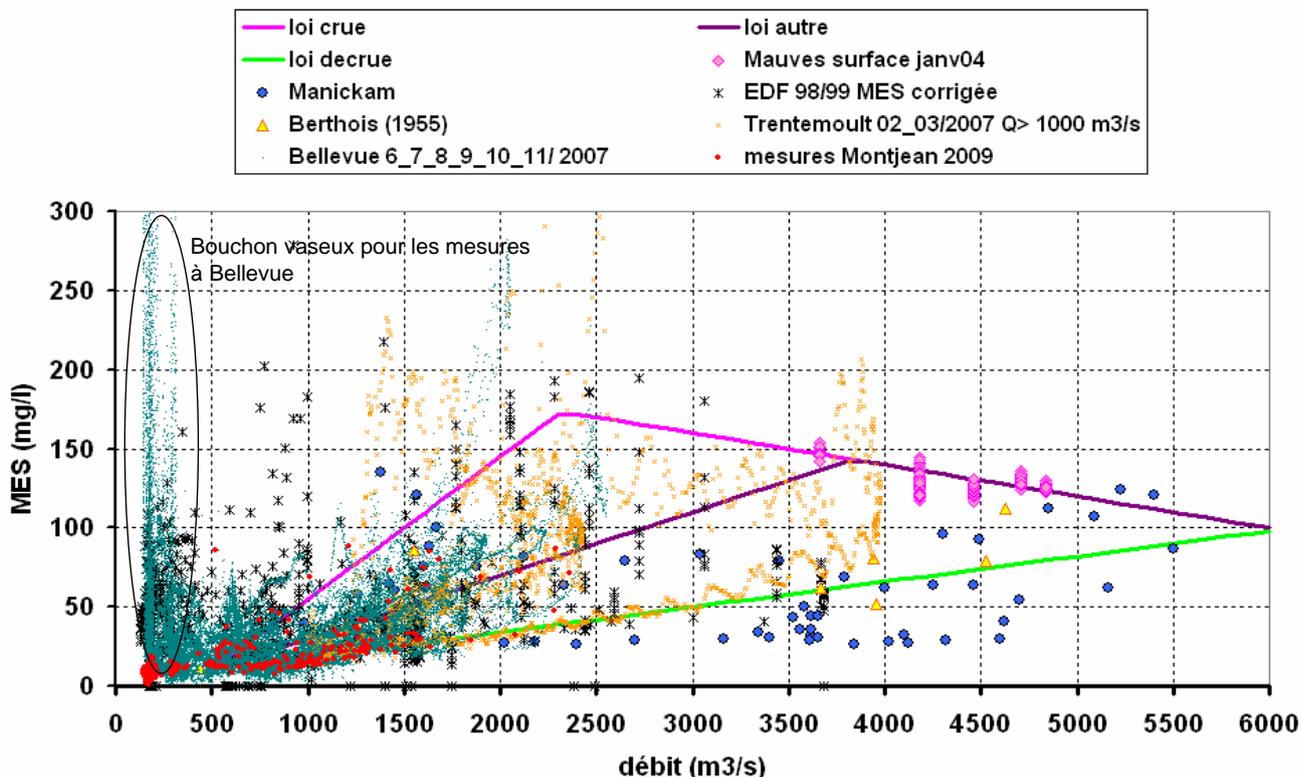


Fig. A.9

Mesures à Montjean

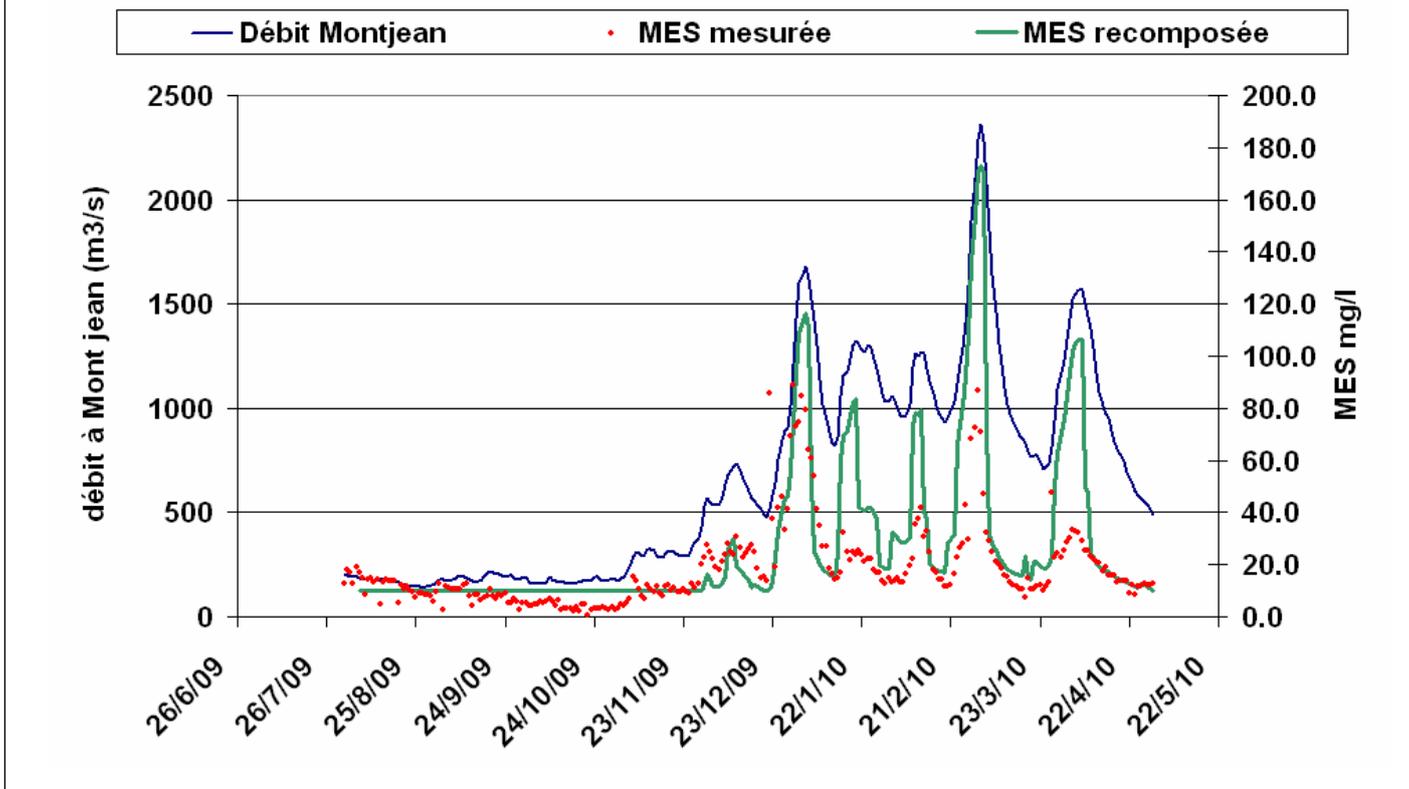


Fig. A.10

Mesure turbidité à Bellevue
MES=1,2*NTU

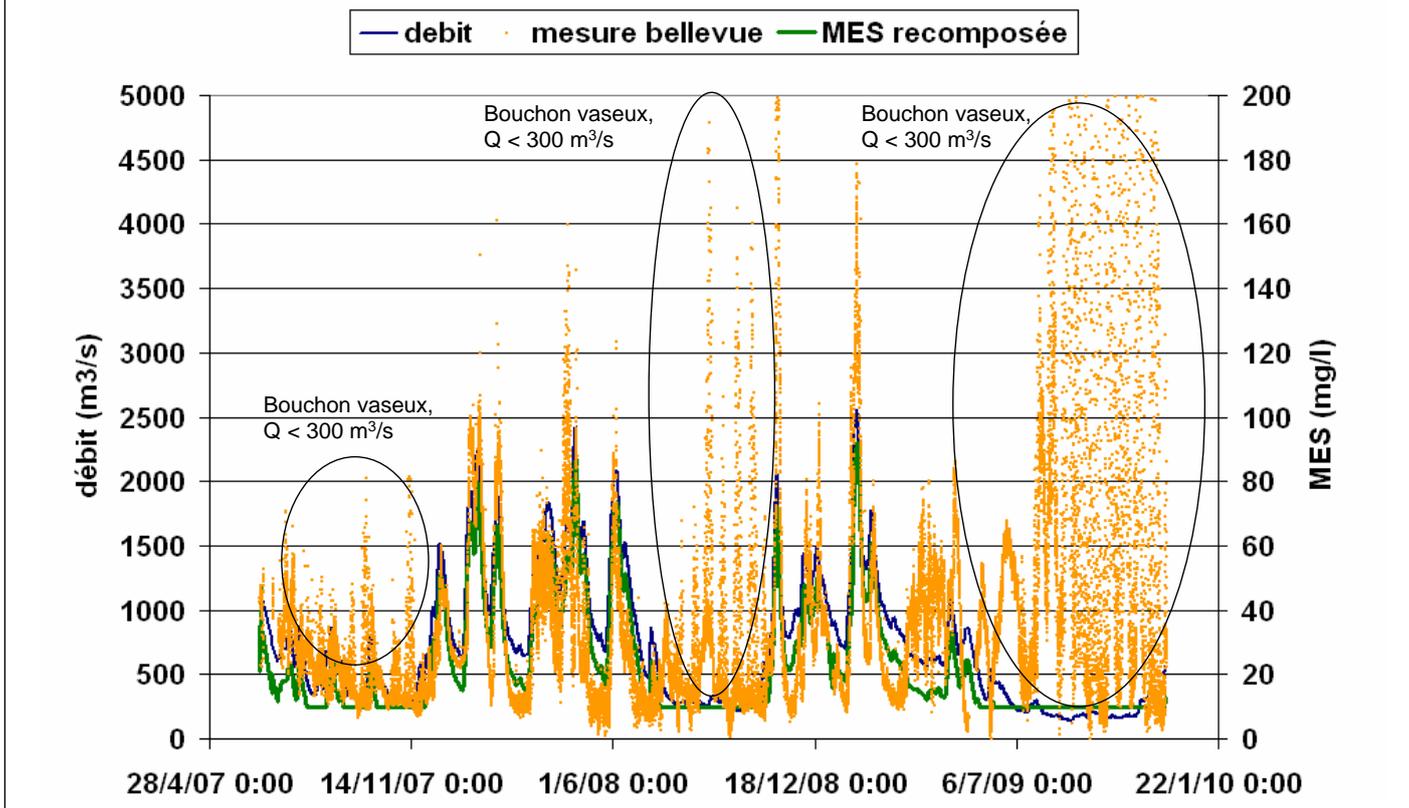


Fig. A.11

Mesure turbidité à Trentemoult
MES=1,2*NTU

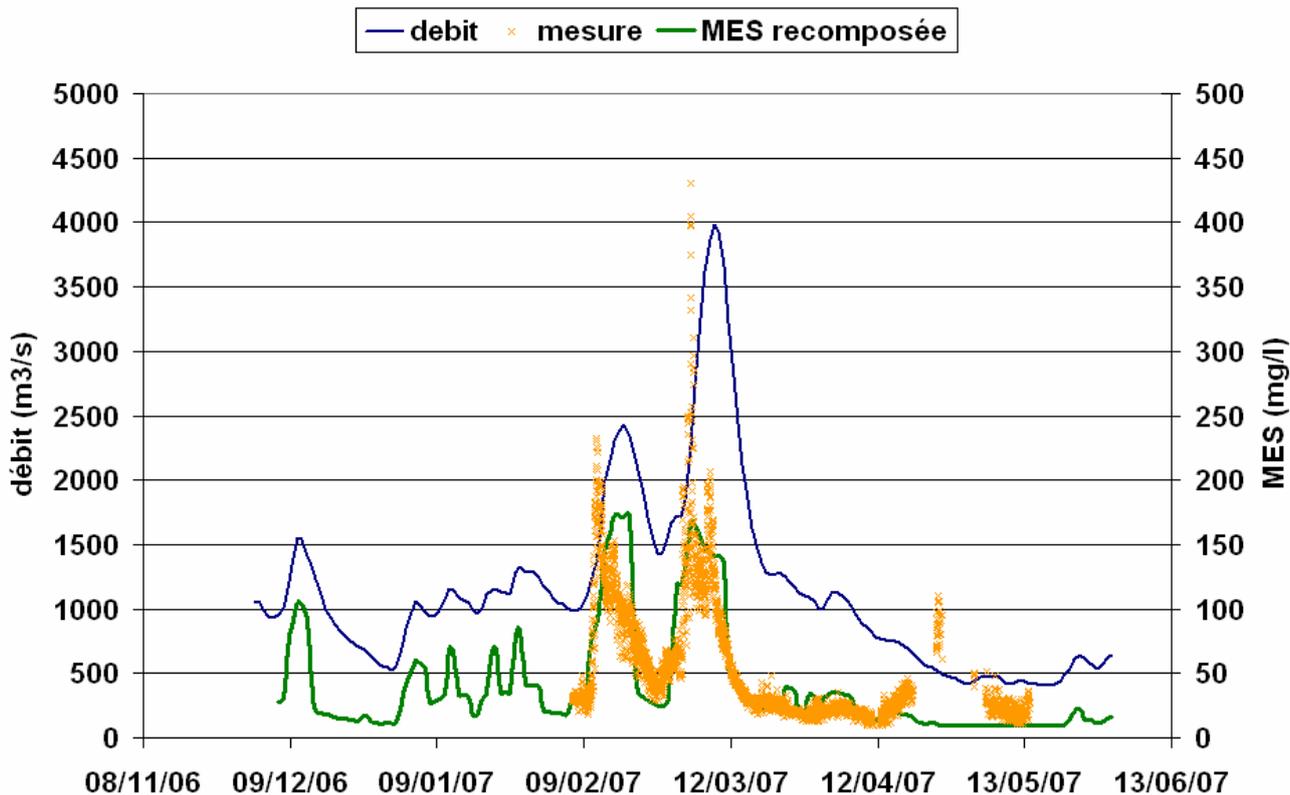


Fig. A.12

Mesure turbidité à Mauves

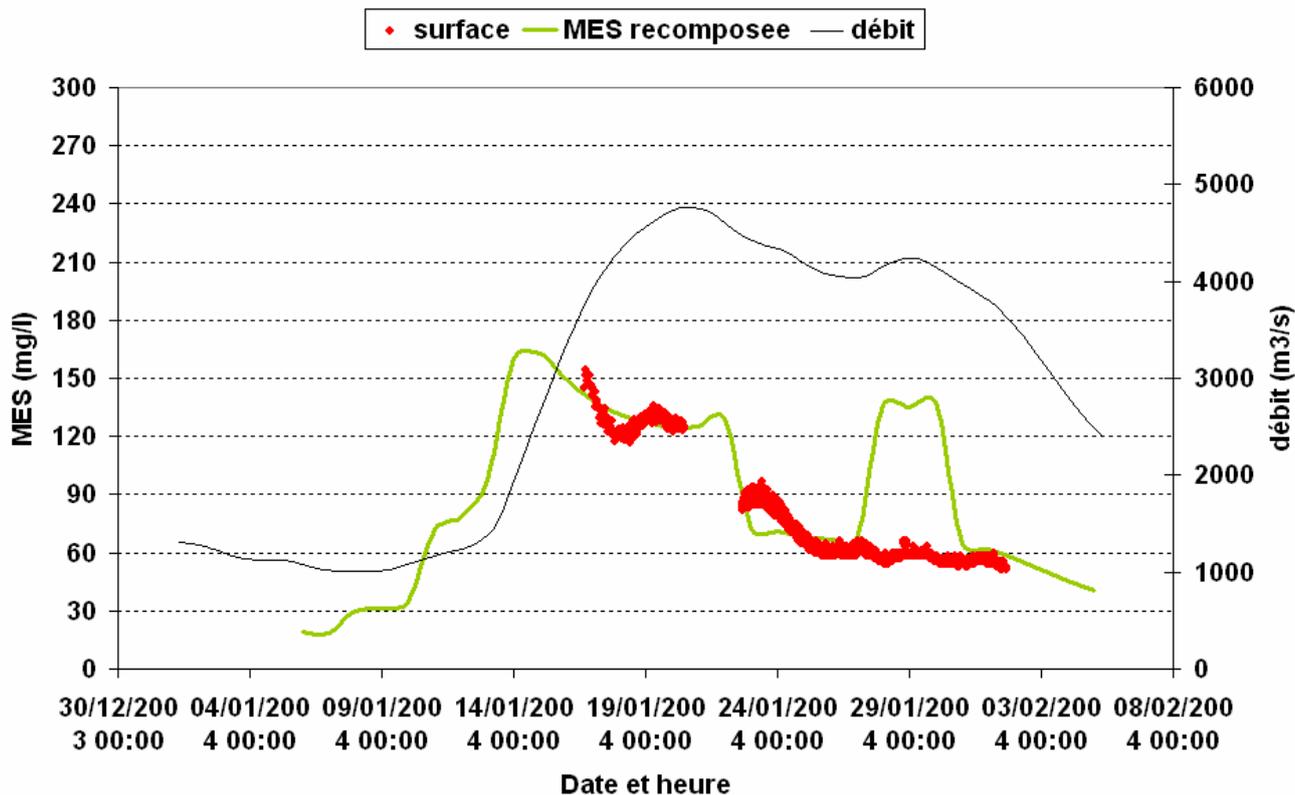
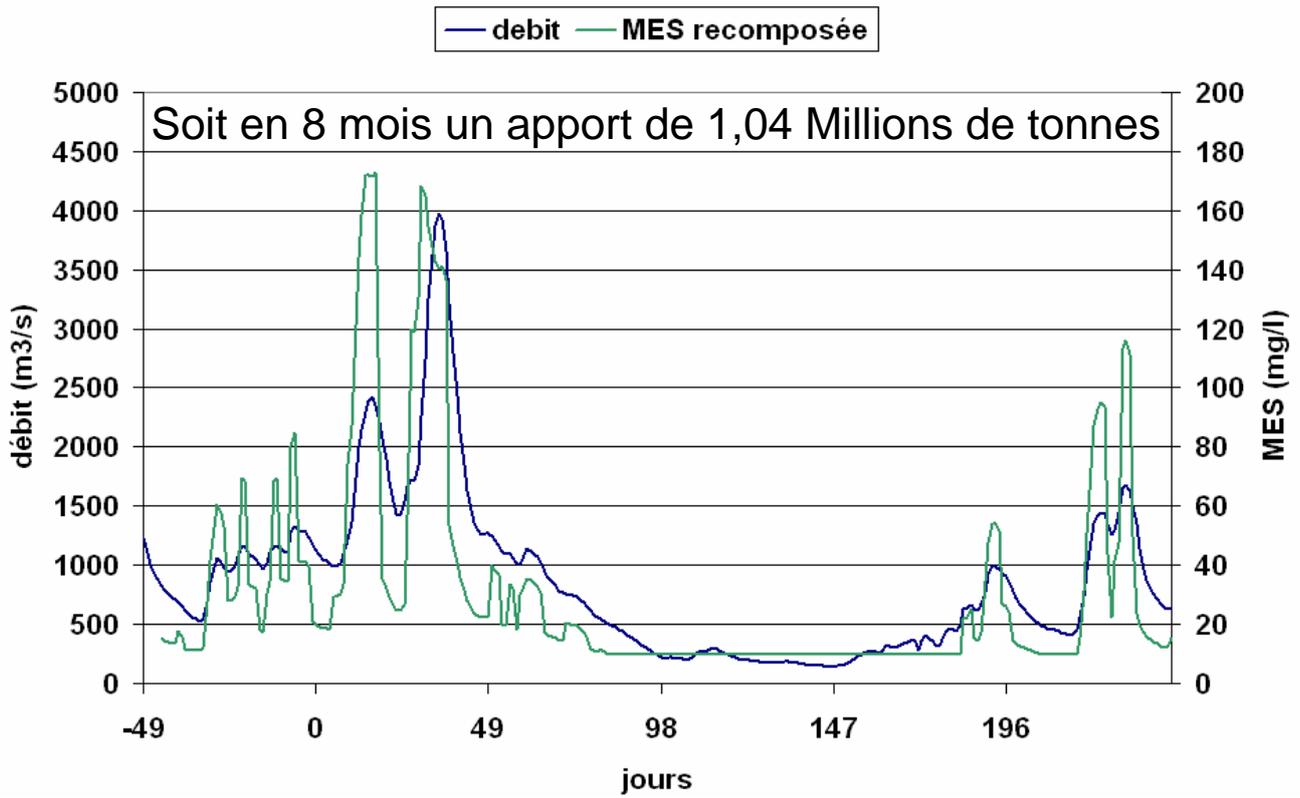


Fig. A.13

MES pour le forçage long terme



FIGURES HORS-TEXTE

LOT 1-PHASE 2 : EXPLOITATION DU MODELE SUR LA SITUATION ACTUELLE

Figure 1.1

**Modèle de l'état actuel de la Loire
MNT – Vue globale**

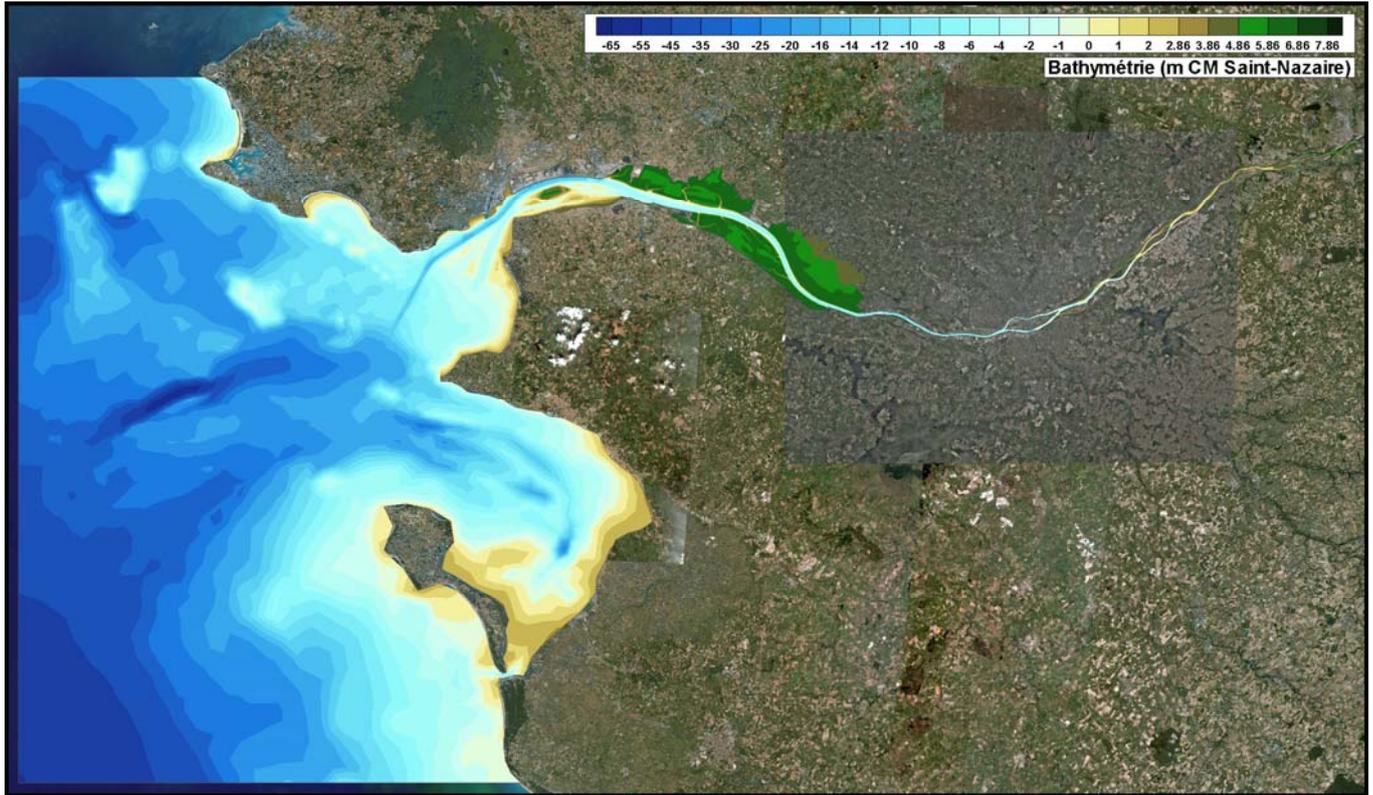


Figure 1.2

**Modèle de l'état actuel de la Loire
MNT – Estuaire externe**

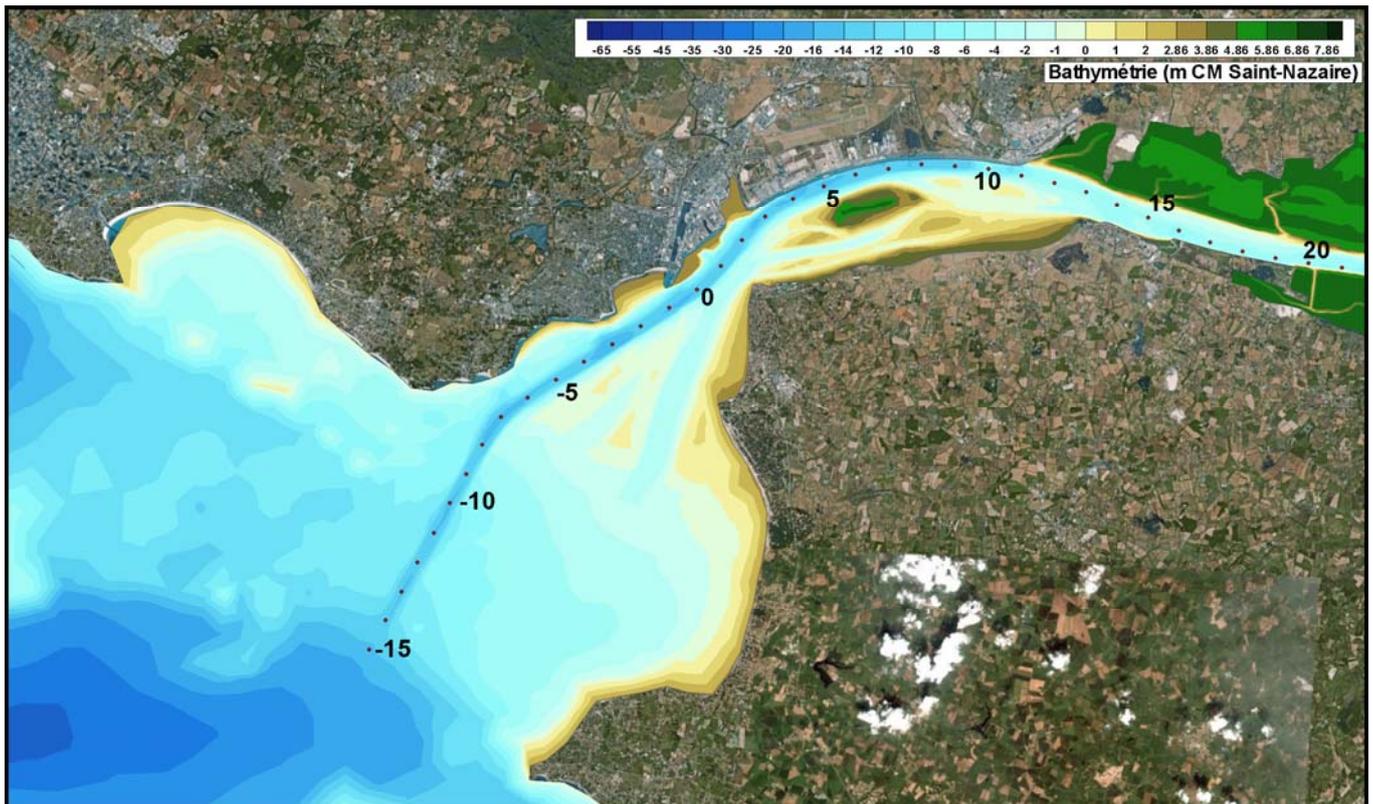


Figure 1.3

Modèle de l'état actuel de la Loire
MNT – Zones submersibles



Figure 1.4

Modèle de l'état actuel de la Loire
MNT – Nantes

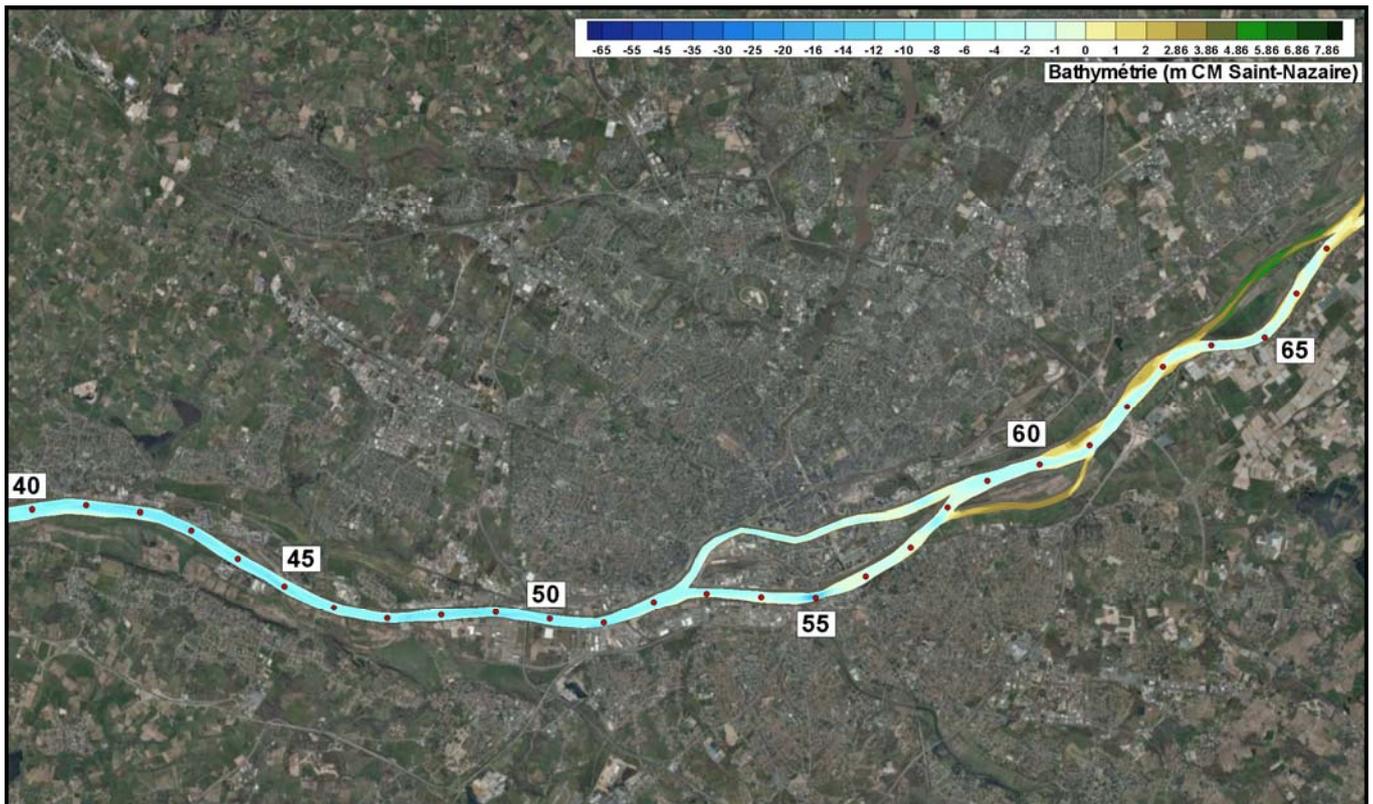


Figure 1.5

**Modèle de l'état actuel de la Loire
MNT – Secteur amont**

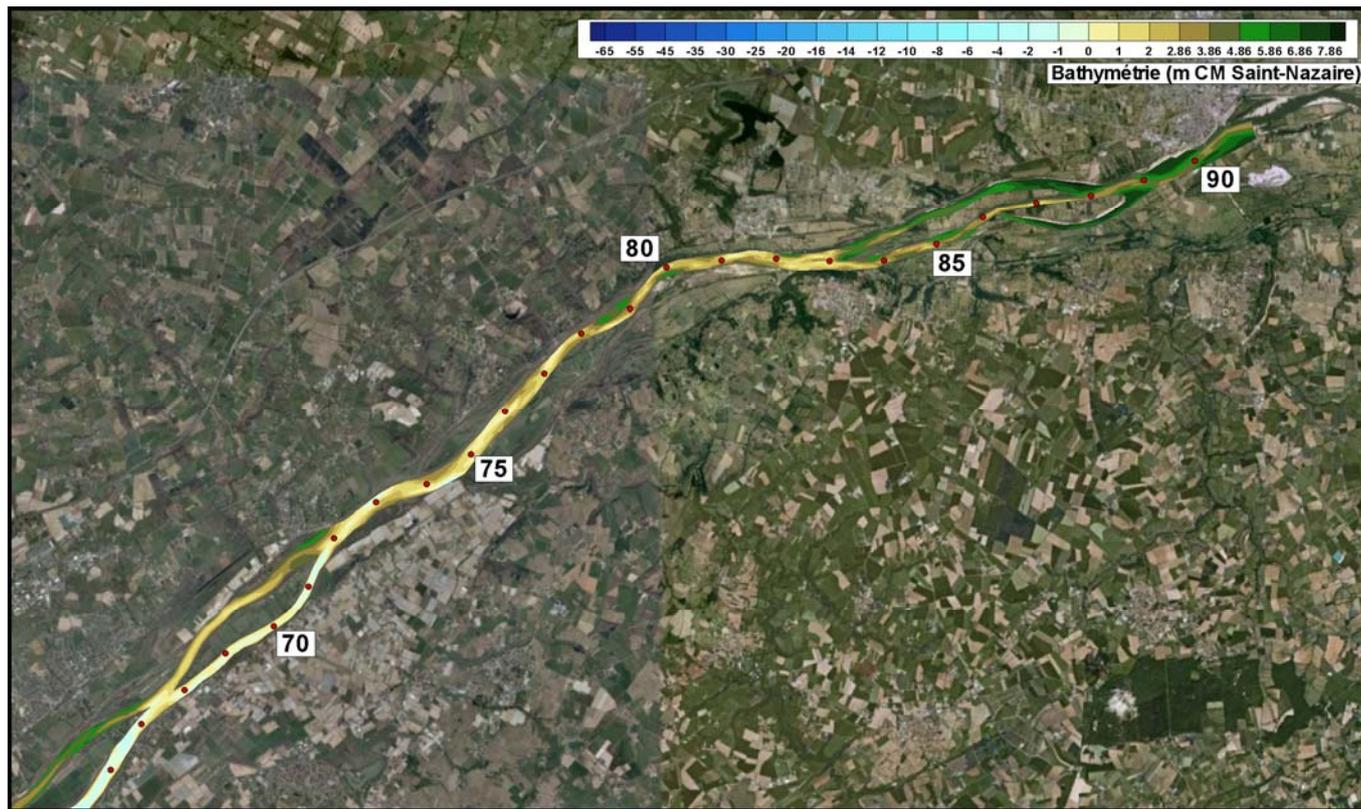


Figure 1.6

**Coefficient 89, Débit 180 m³/s:
Niveaux d'eau max et min**

Actuel - Vive-eau étiage

— actuel max - - - - - actuel min

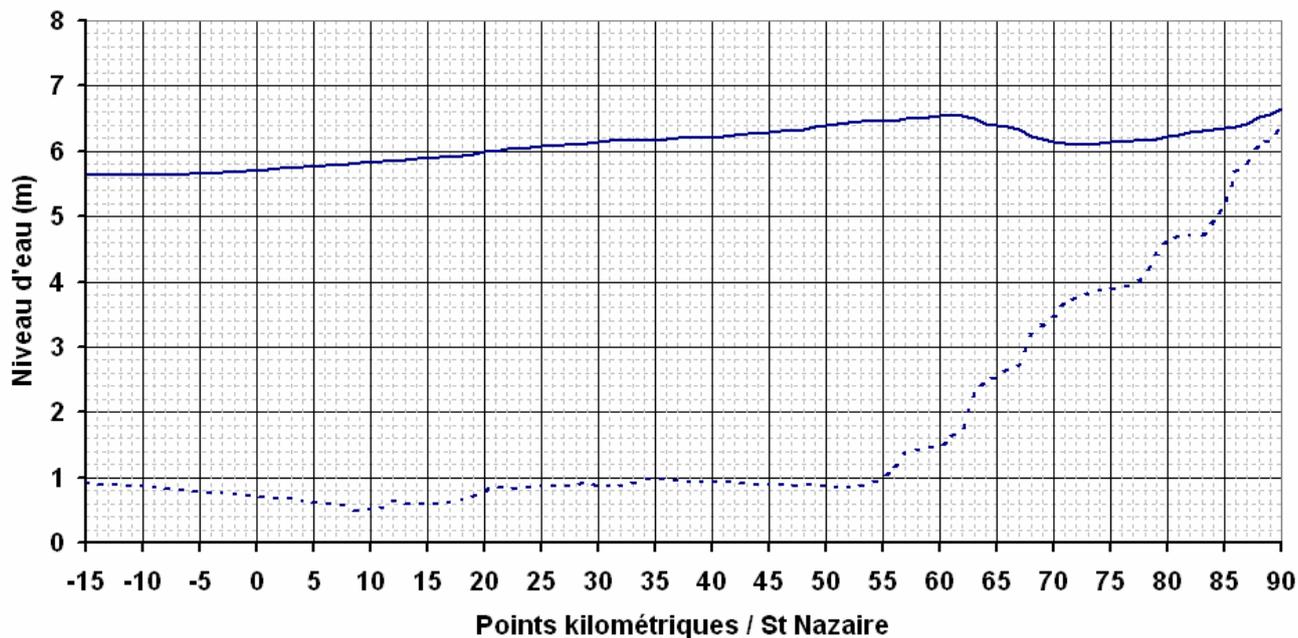


Figure 1.7

% de temps de non dépassement sur 8 mois des niveaux d'eau

Actuel - % Temps de non dépassement

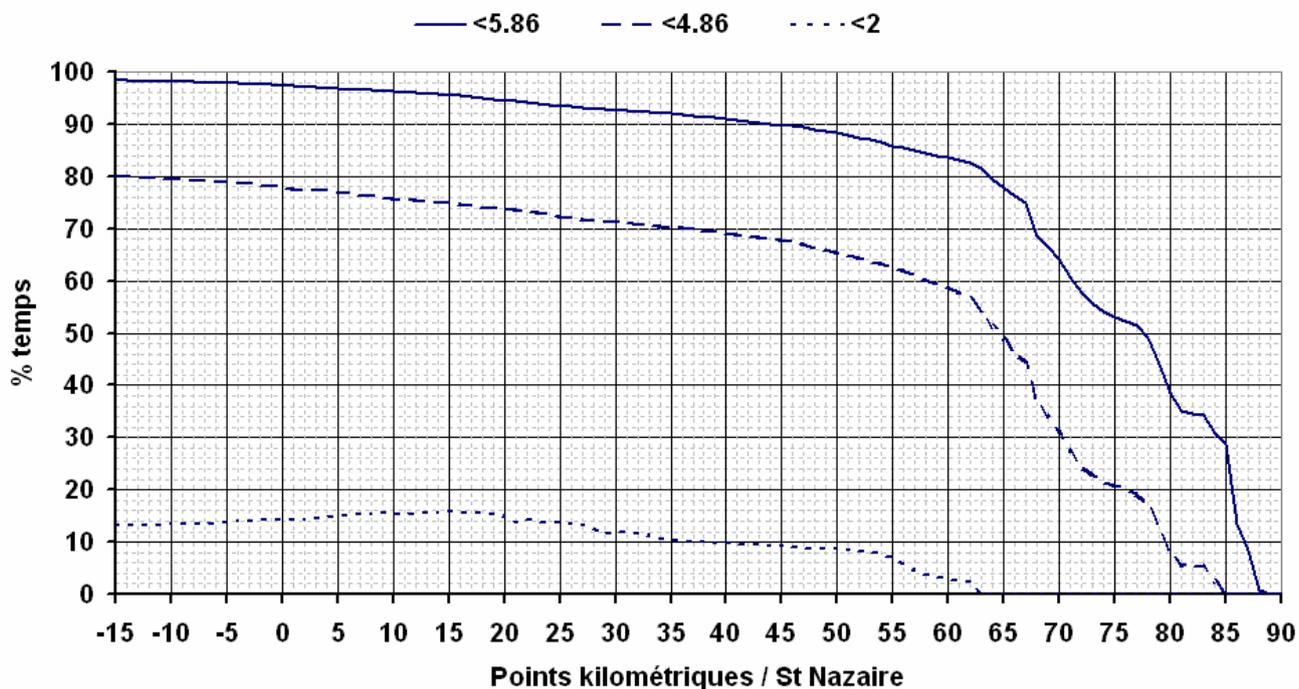


Figure 1.8

**Coefficient 89, Débit 180 m³/s:
 décalage temporel de la PM et la BM**

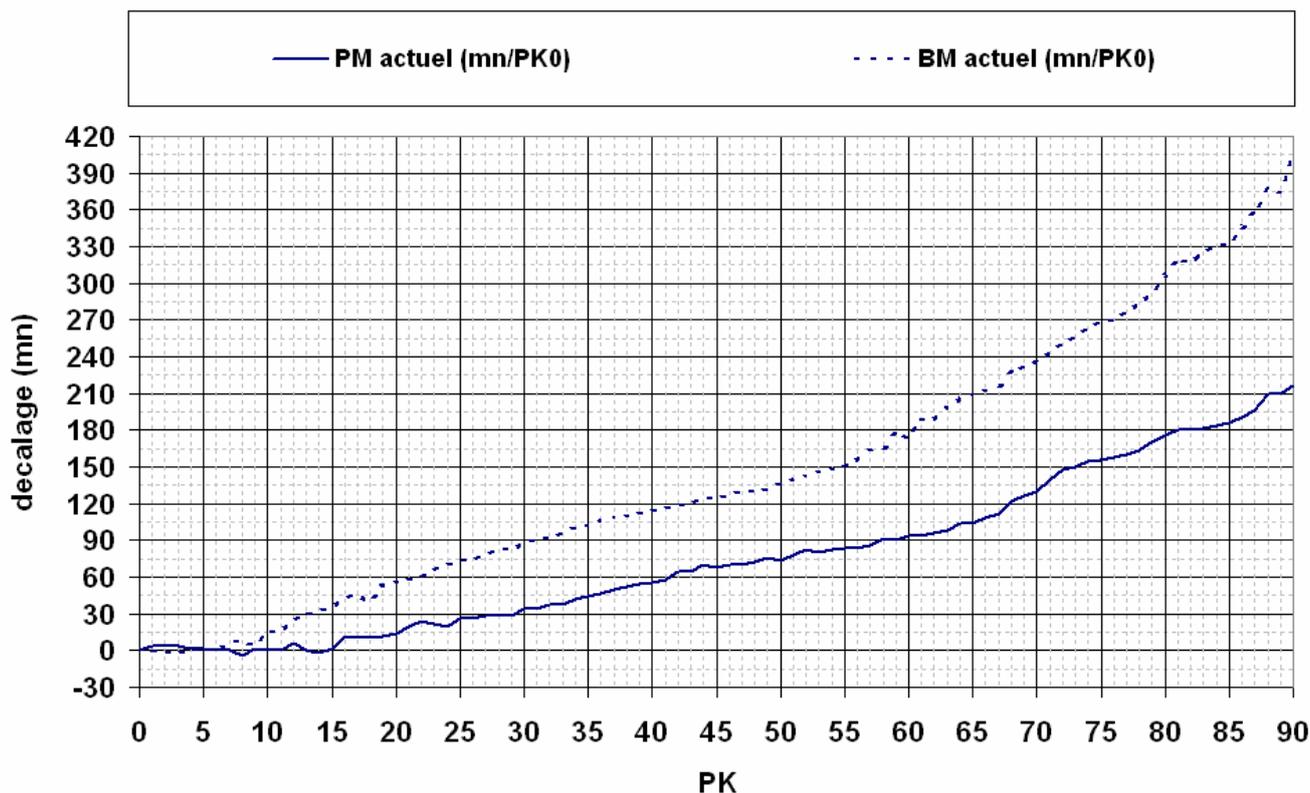


Figure 1.9

**Coefficient 89, Débit 180 m³/s:
 différentiel des décalages temporels de la BM et la PM**

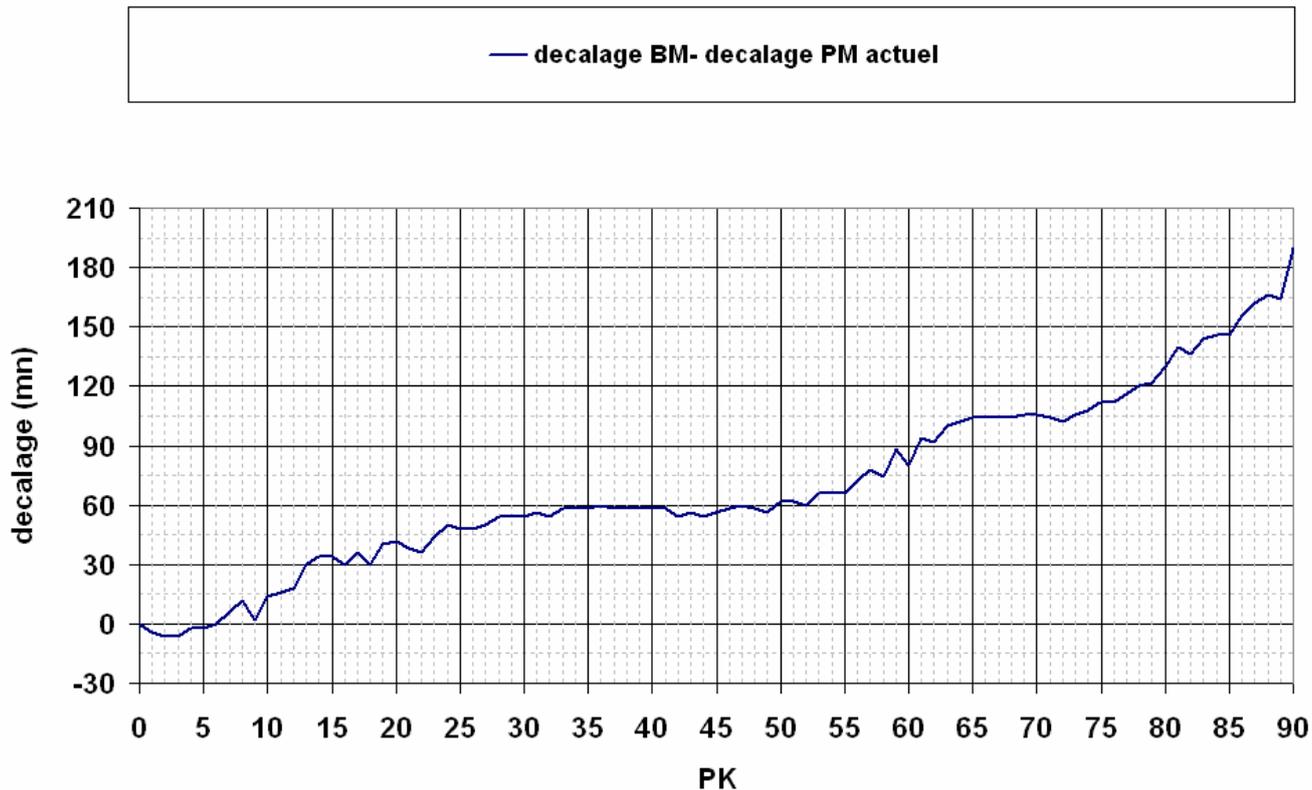
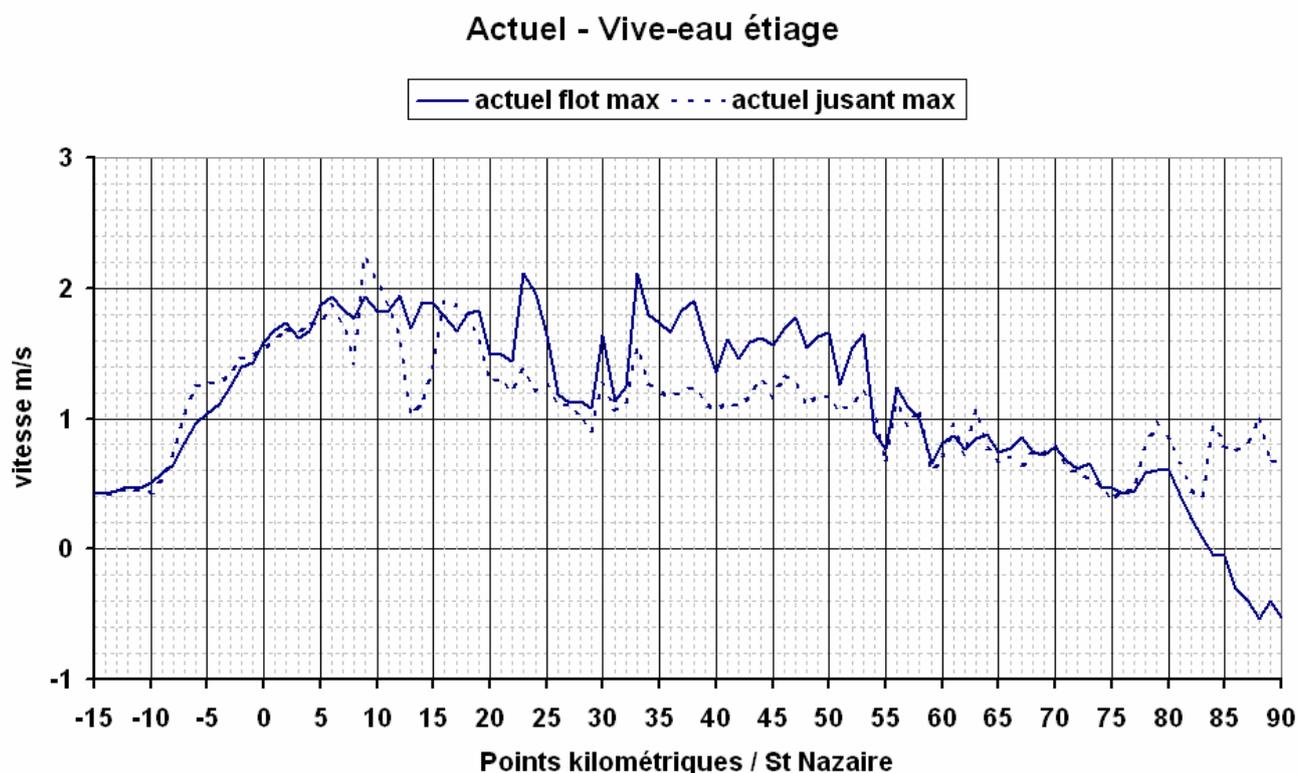
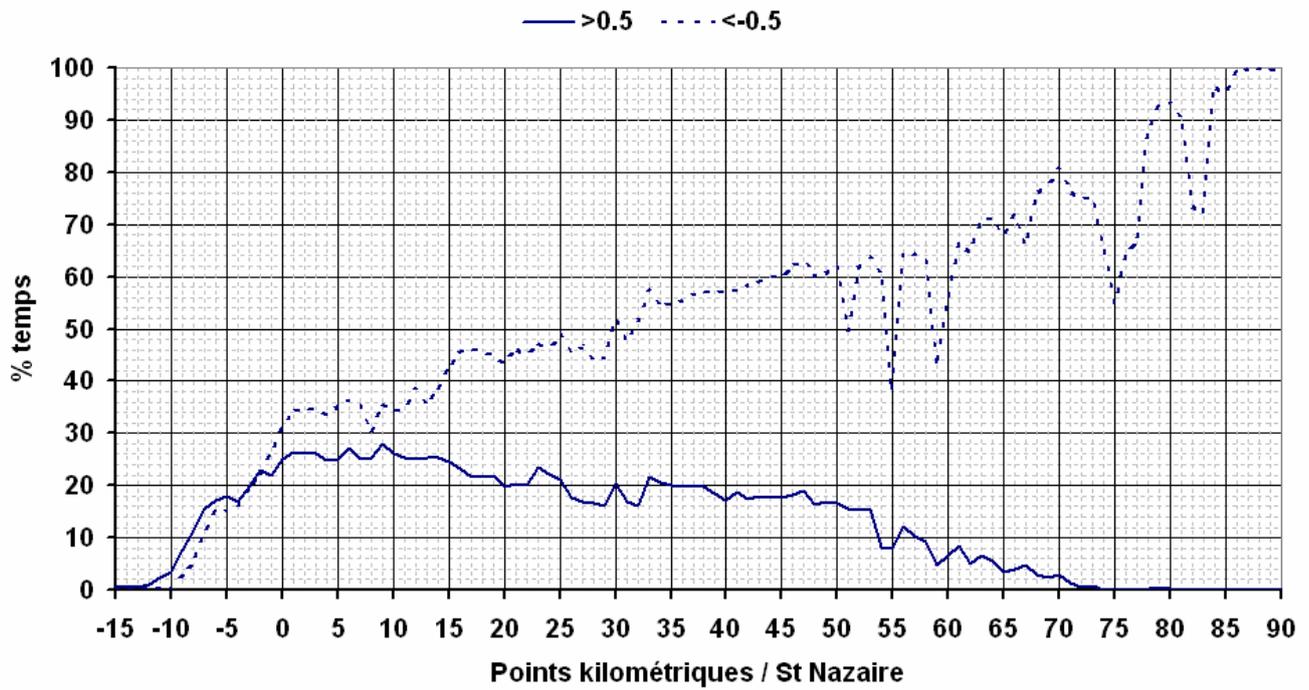


Figure 1.10

**Coefficient 89, Débit 180 m³/s:
 Vitesses moyennes max de jusant et flot**



Actuel - % Temps de dépassement



Actuel - Vive-eau étiage

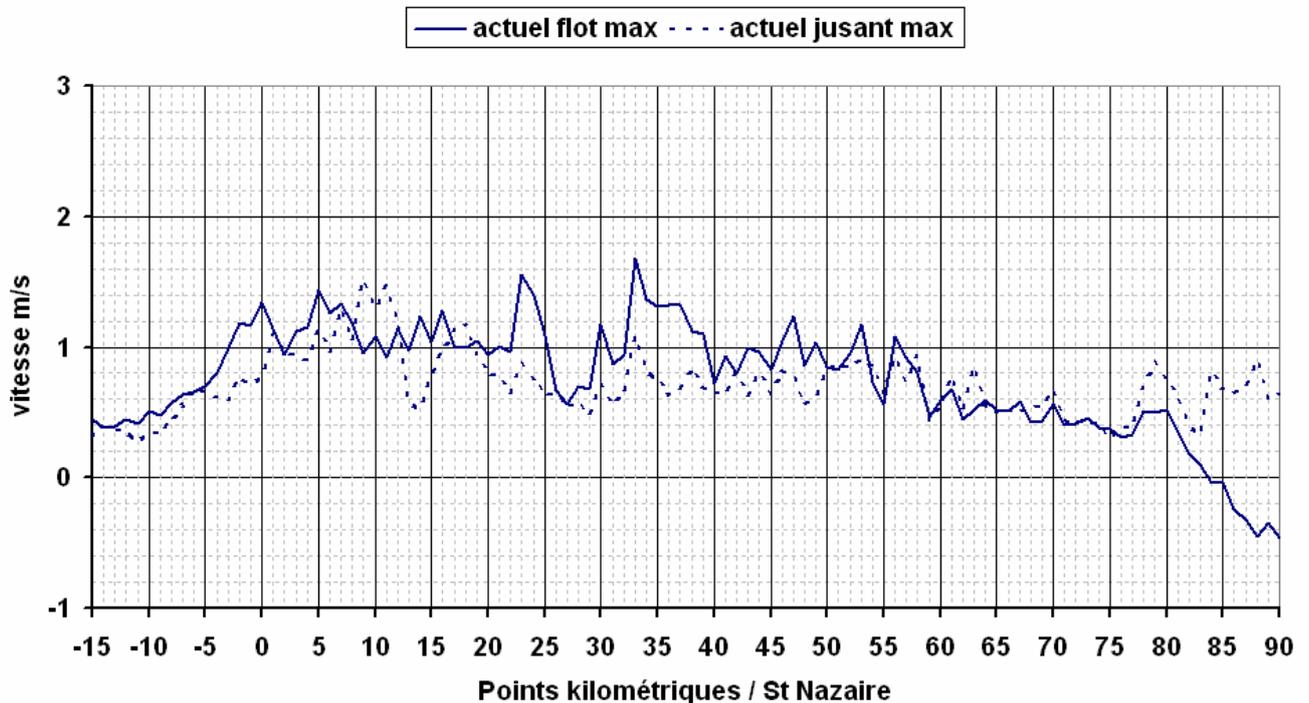


Figure 1.13

% de temps de non dépassement sur 8 mois des vitesses au fond (+0,5m)

Actuel - % Temps de dépassement

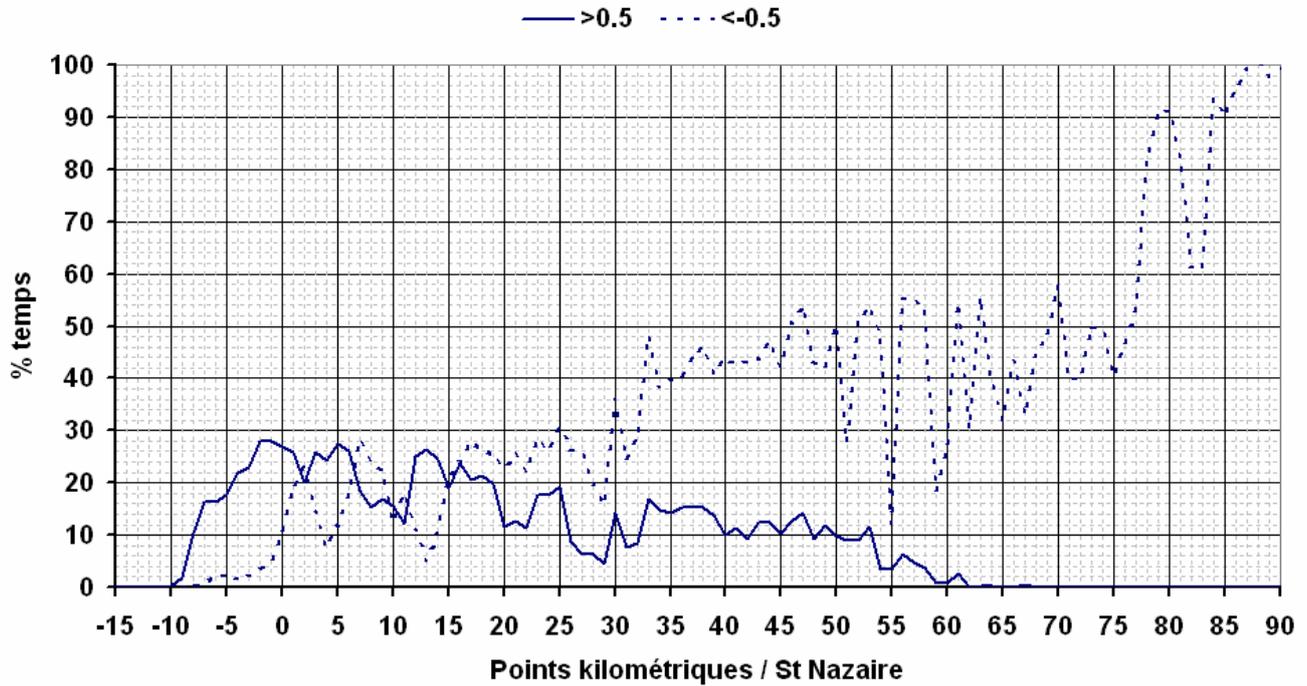


Figure 1.14

**Coefficient 89, Débit 180 m³/s:
 ratio des volumes oscillants chargés**

**Ratio des volumes oscillants chargés (vitesse seuil 0,5m/s)
 jusant /flot**

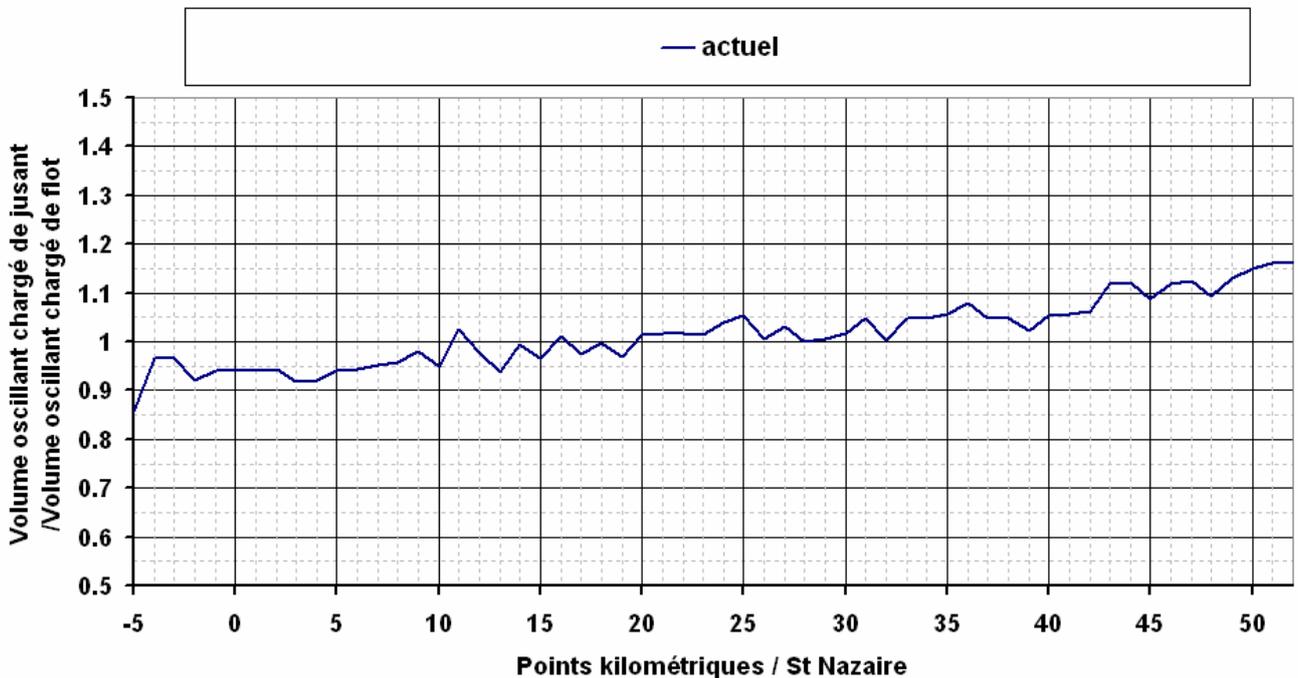


Figure 1.15

**Coefficient 89, Débit 180 m³/s:
 ratio des durées de jusant et flot**

**Ratio des durées de jusant et flot
 jusant /flot cf89 q=180 m³/s**

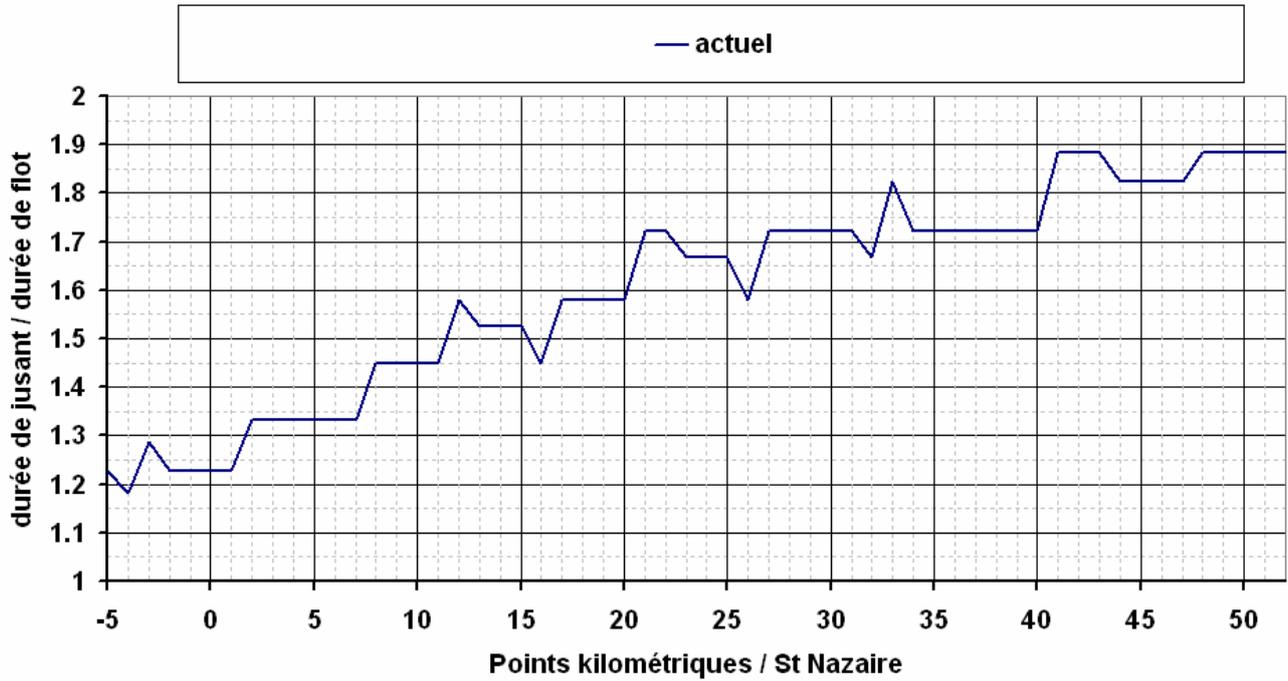


Figure 1.16

**% de temps de non dépassement des salinités pour les périodes
 marnage > 4.5m et Q < 1000m³/s (pompage tidal)**

Actuel - % Temps de non dépassement

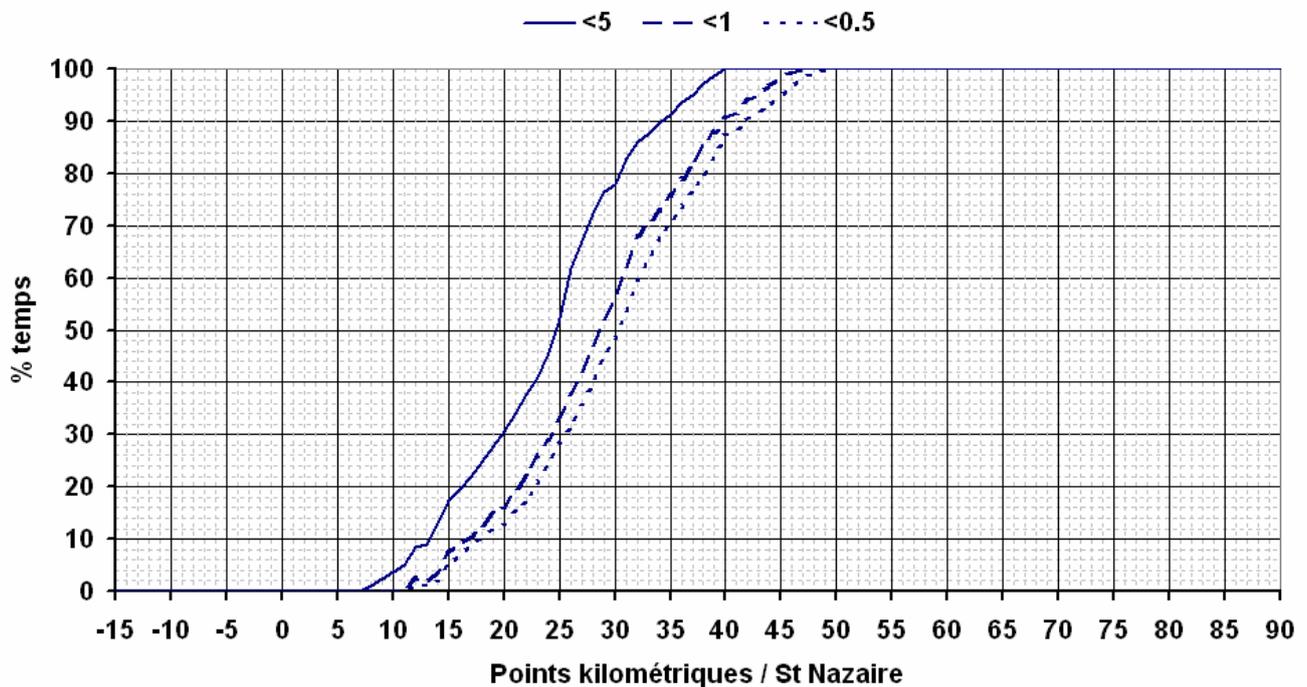


Figure 1.17

% de temps de non dépassement des salinités pour les périodes où: marnage < 2.4 m ou Q > 2500m³/s (pompage par densité)

Actuel - % Temps de non dépassement

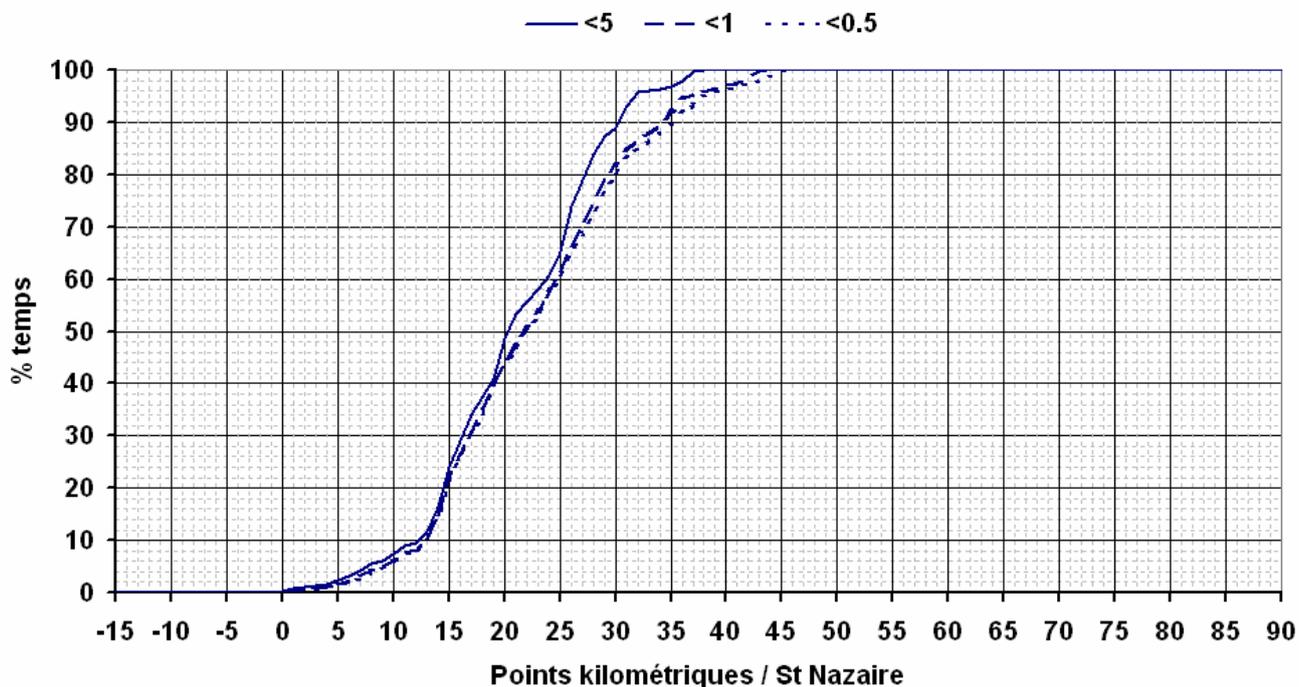


Figure 1.18

**Coefficient 89, Débit 120 m³/s:
 max et min de MES moyennée sur la verticale**

Actuel - Vive-eau étiage

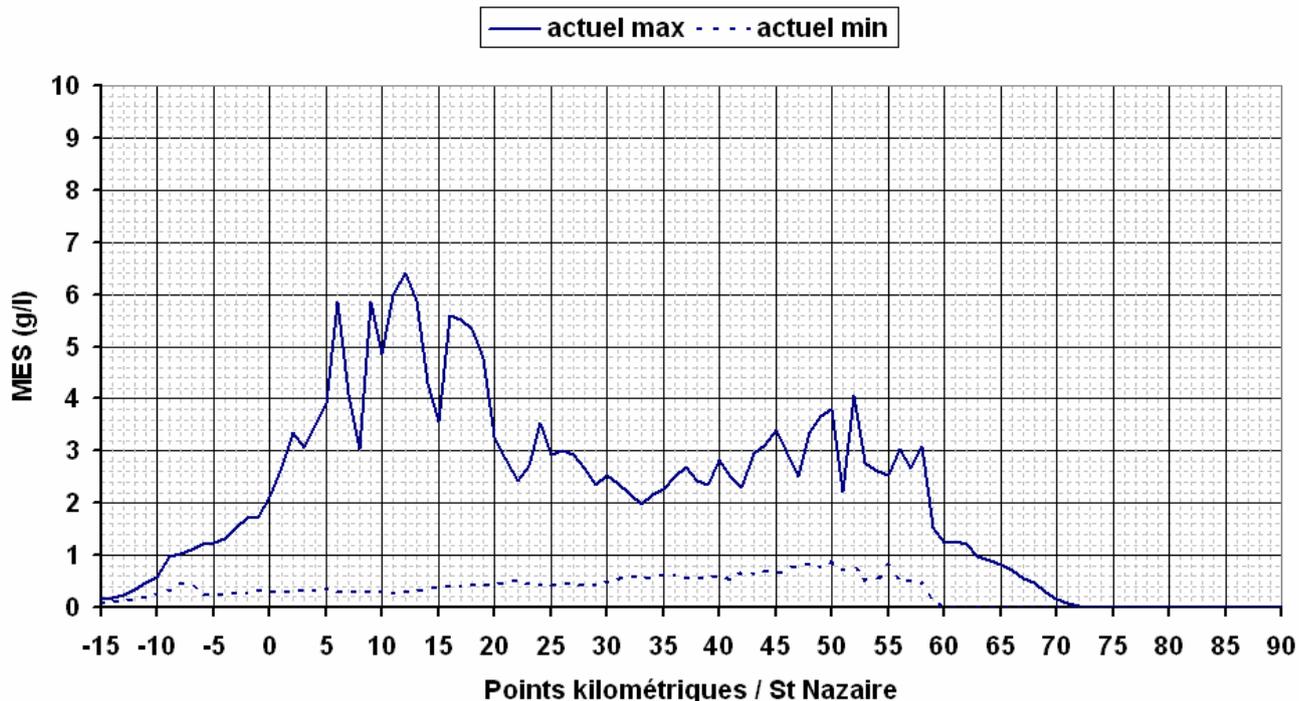


Figure 1.19

% de temps de non dépassement sur 8 mois des MES moyennes

Actuel - % Temps de non dépassement

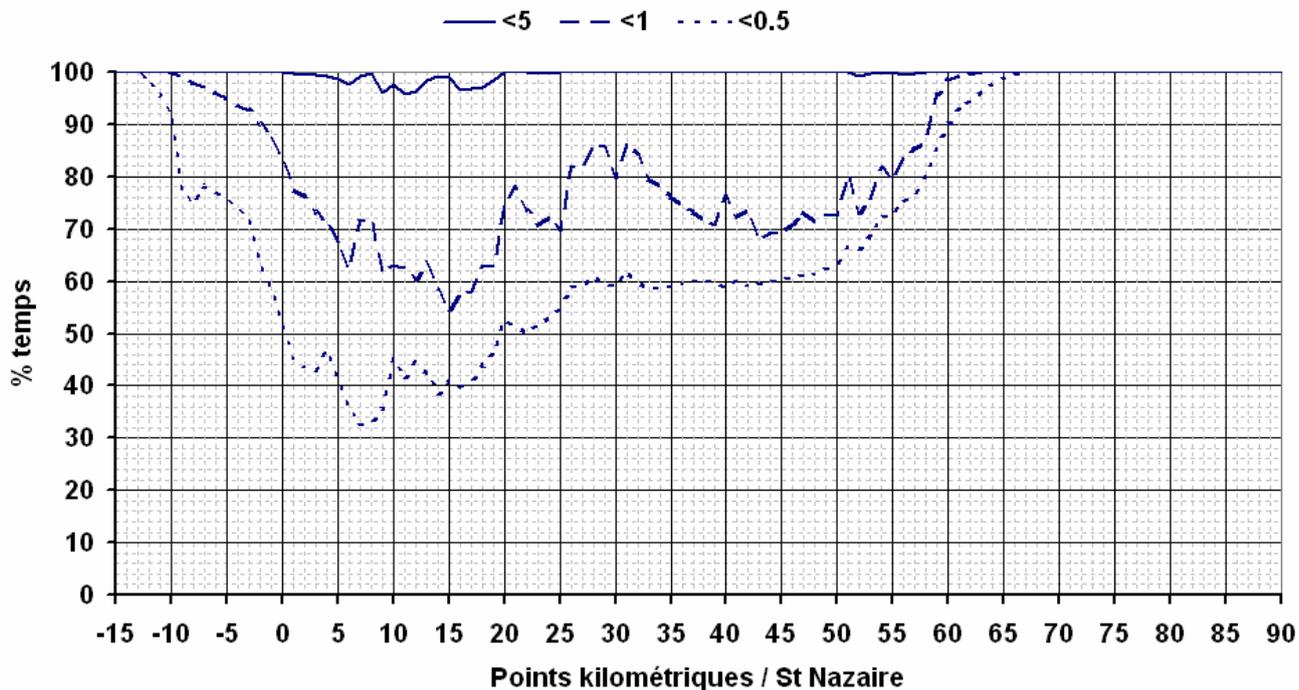


Figure 1.20

Coefficient 89, Débit 120 m³/s:
 max et min de crème de vase liquide

Actuel - Vive-eau étiage

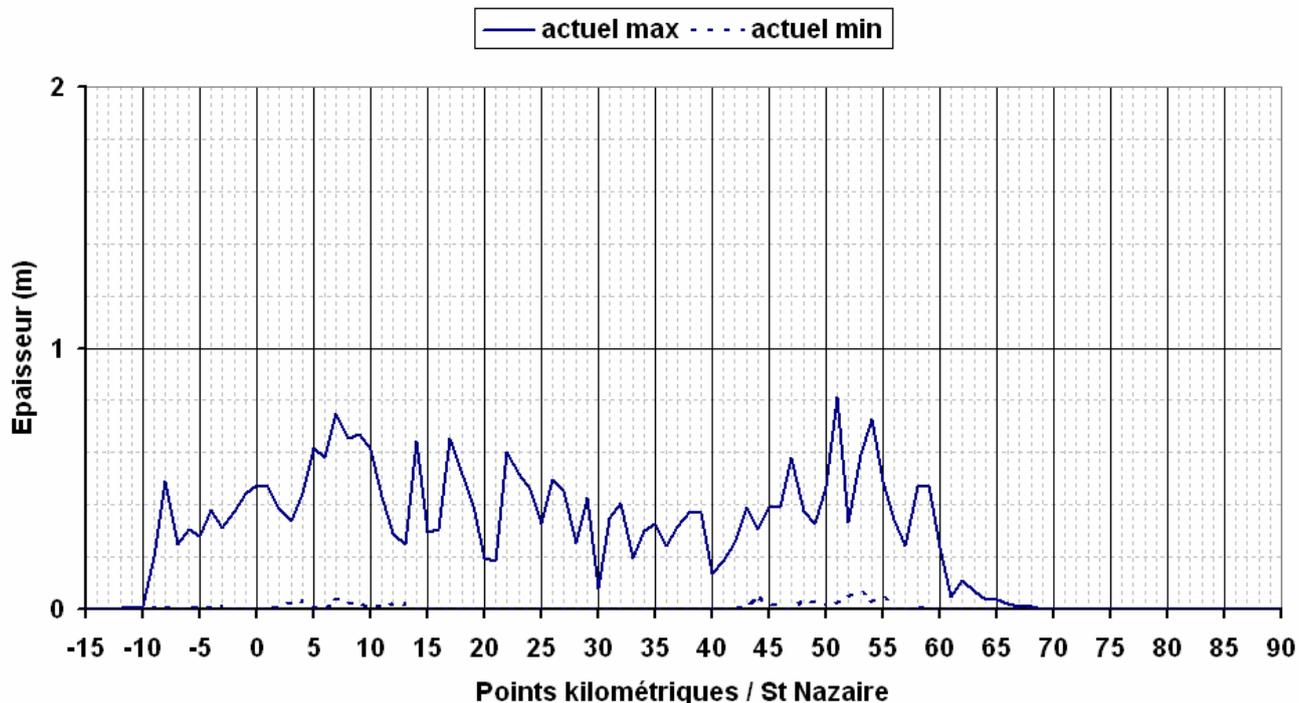


Figure 1.21

% de temps de non dépassement sur 8 mois des épaisseur de crème de vase liquide

Actuel - % Temps de non dépassement

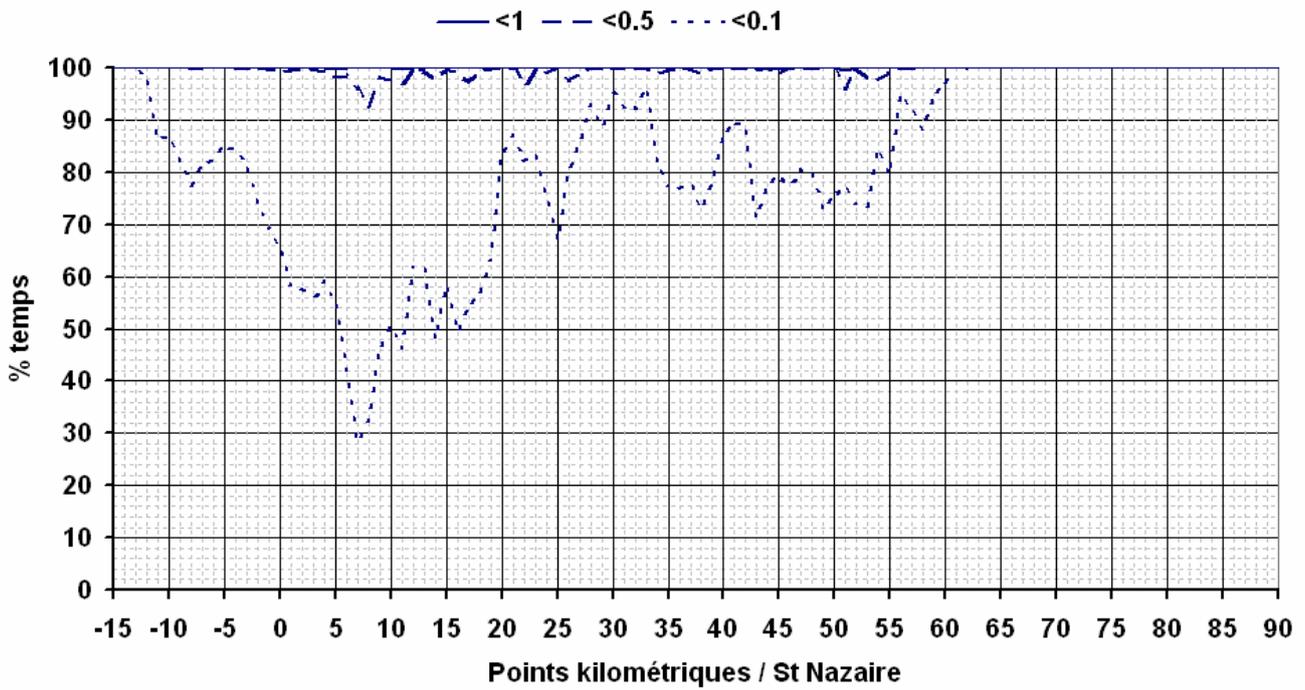
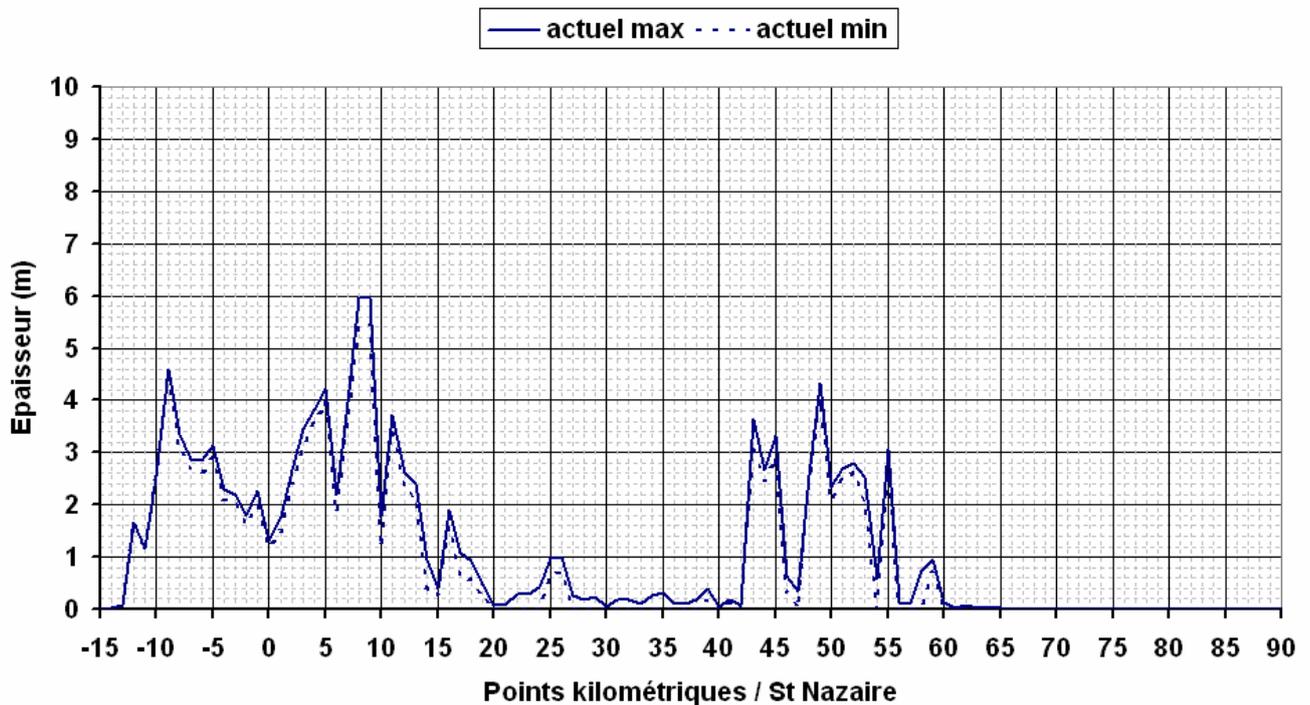


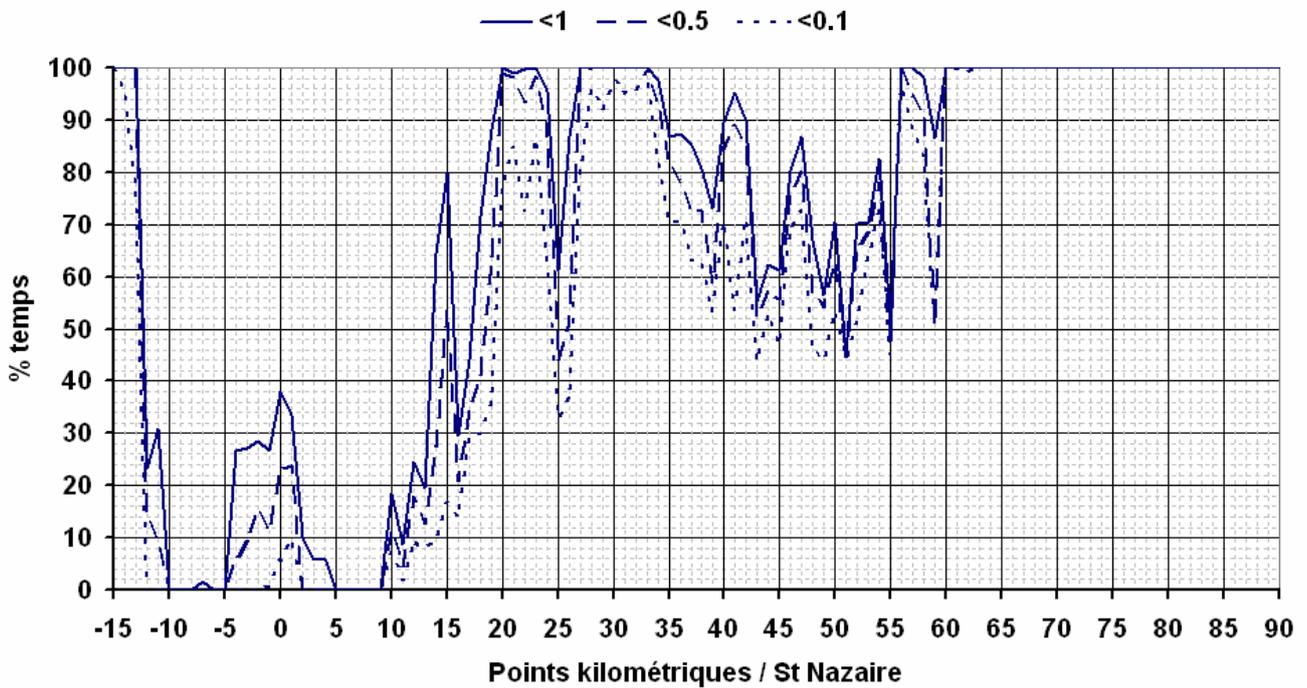
Figure 1.22

**Coefficient 89, Débit 120 m³/s:
 max et min de crème de vase stricto-sensu**

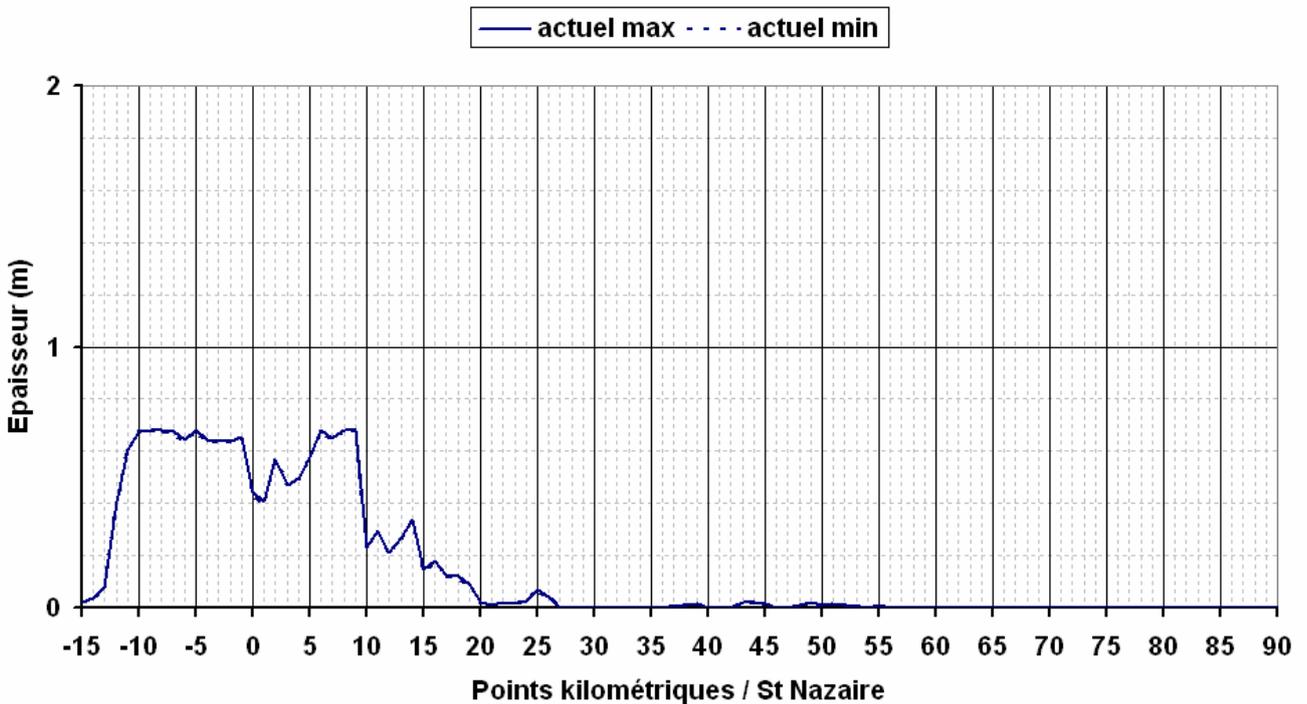
Actuel - Vive-eau étiage



Actuel - % Temps de non dépassement



Actuel - Vive-eau étiage



Actuel - % Temps de non dépassement

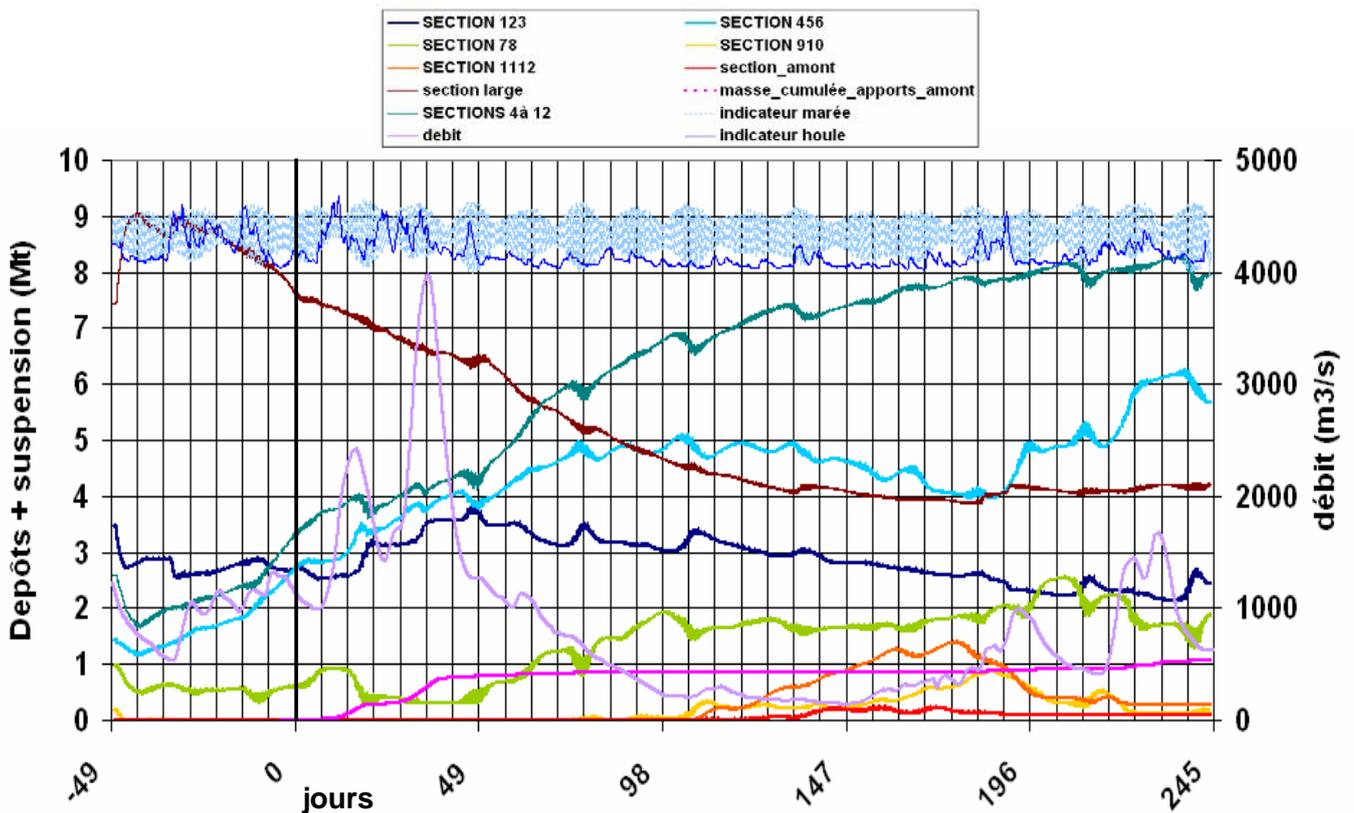
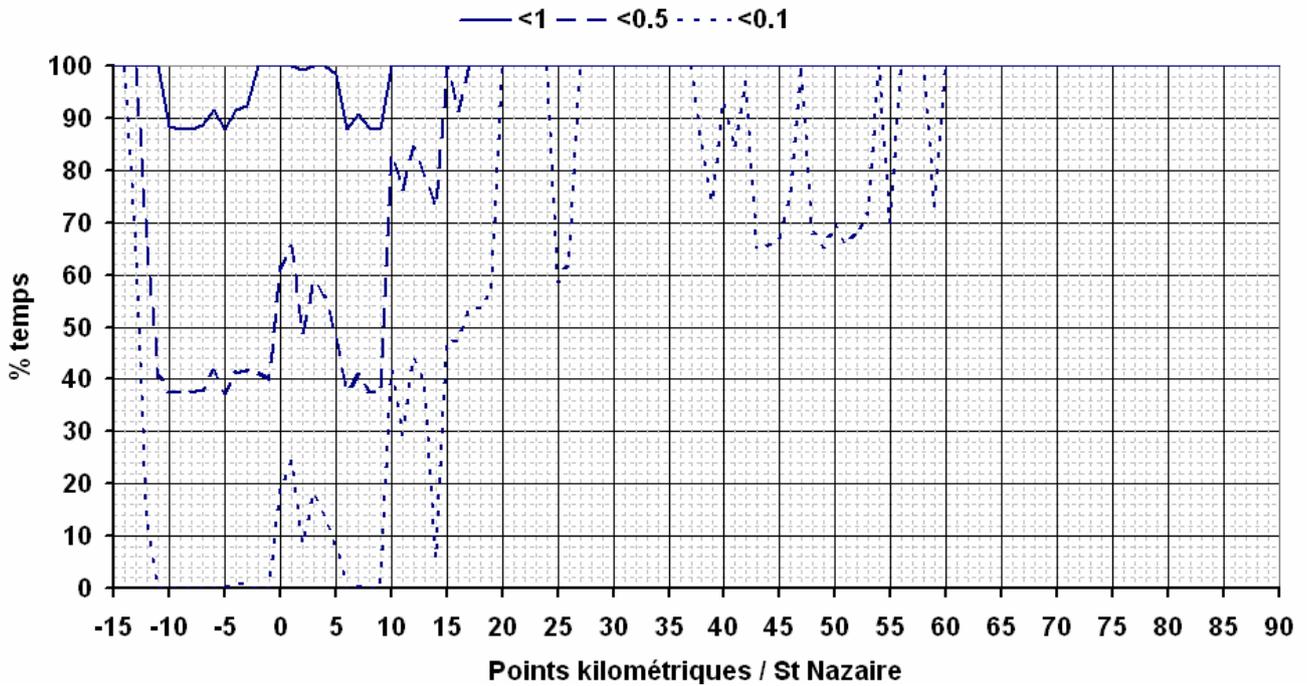


Figure 1.27

Cubaturs suspension pour les zones < 4,86mCM

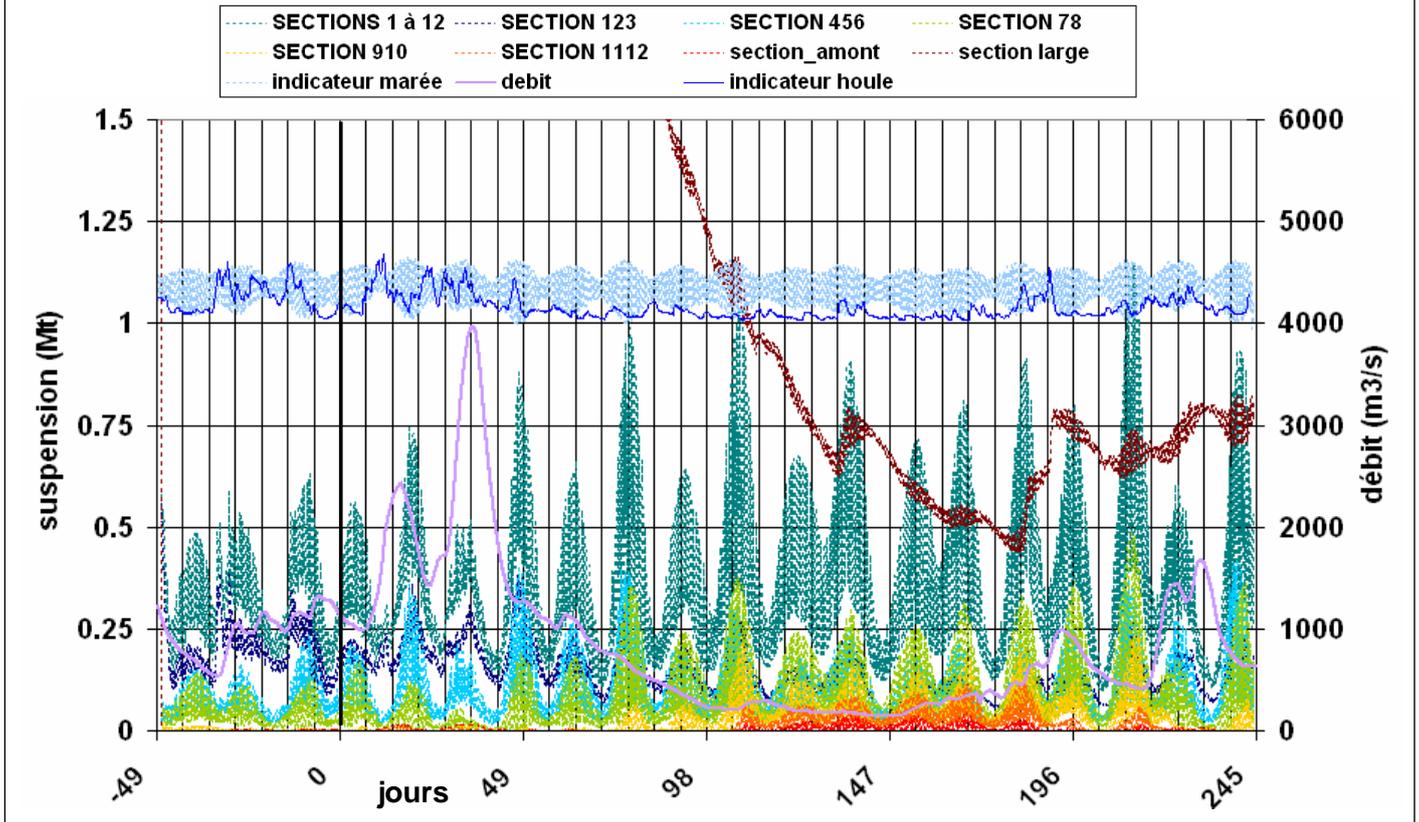


Figure 1.28

Apports amonts (section12) et apports aval (section1) entrant dans l'estuaire aval

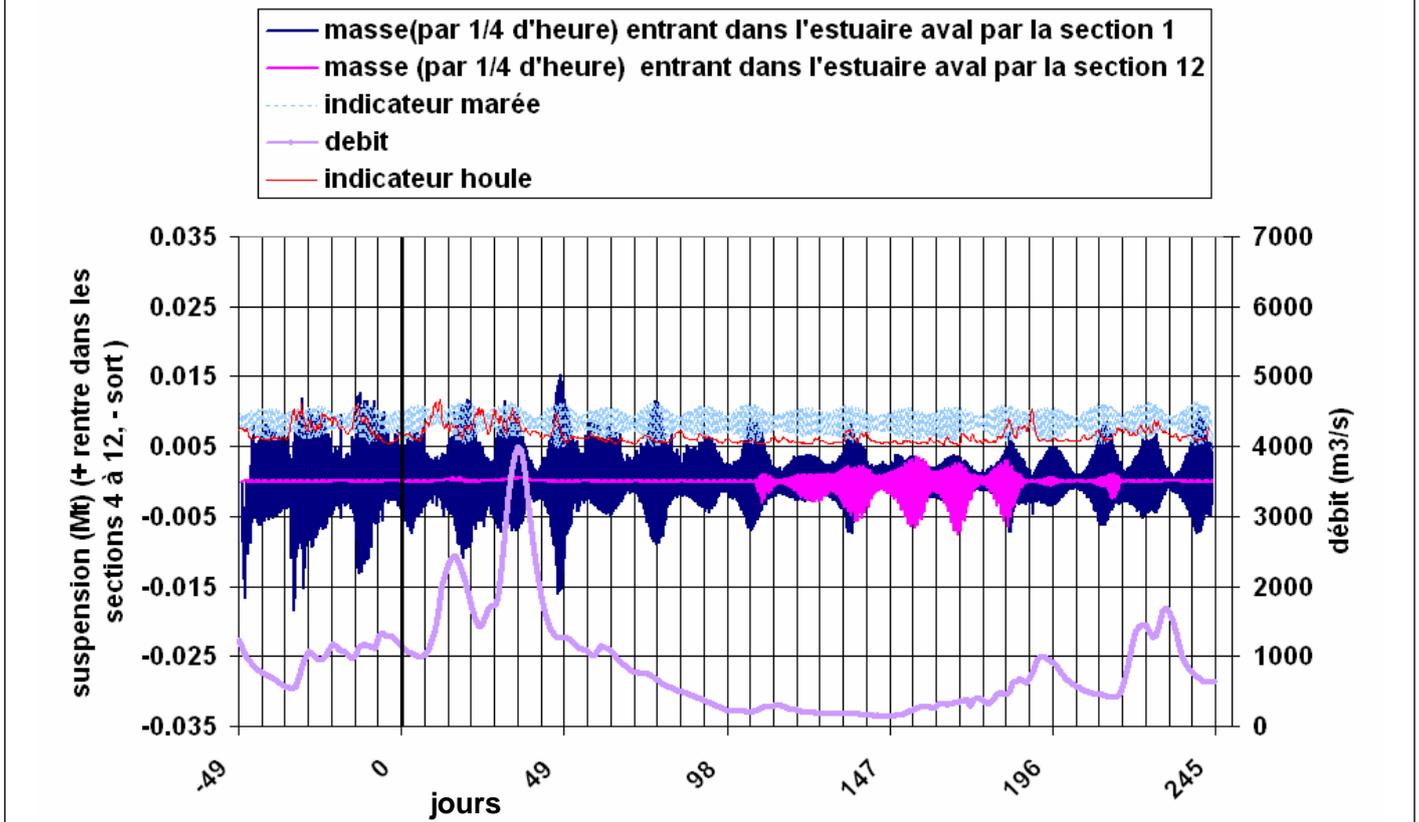


Figure 1.29

Apports amonts (section12) et apports aval (section4) cumulés entrant dans l'estuaire aval

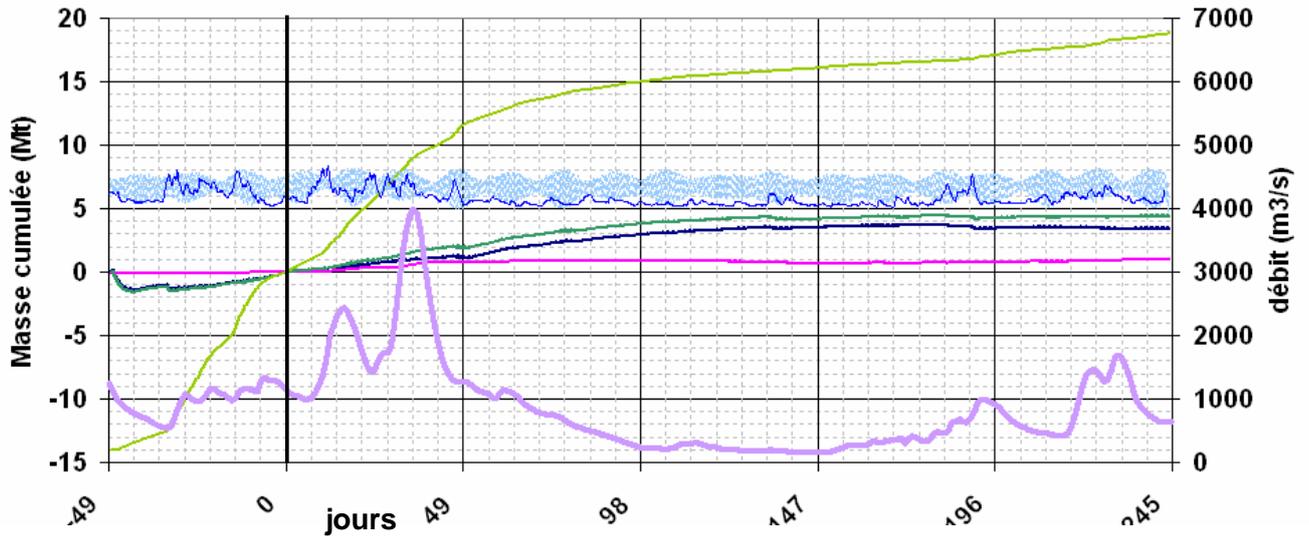
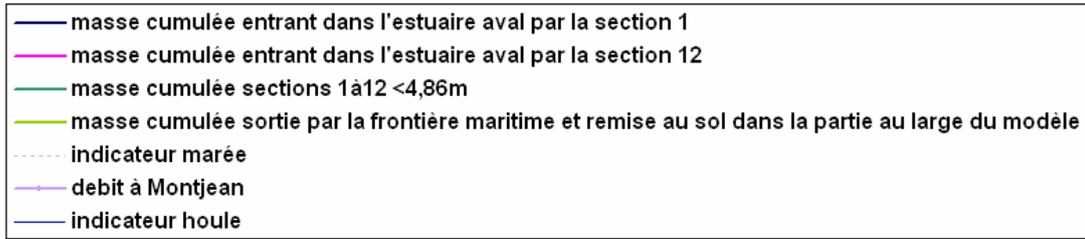


Figure 1.30

Cubatures des dépôts sur les estrans

Zone 1 estran

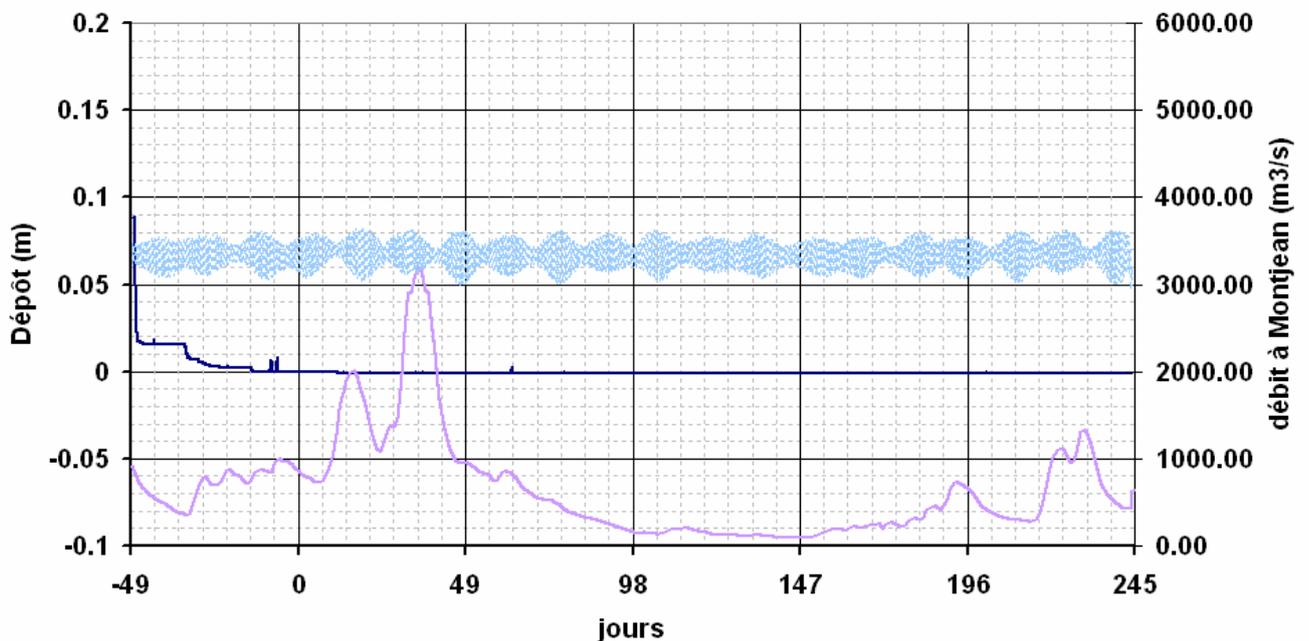
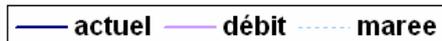


Figure 1.31

Cubatures des dépôts sur les estrans

Zone 2 estran

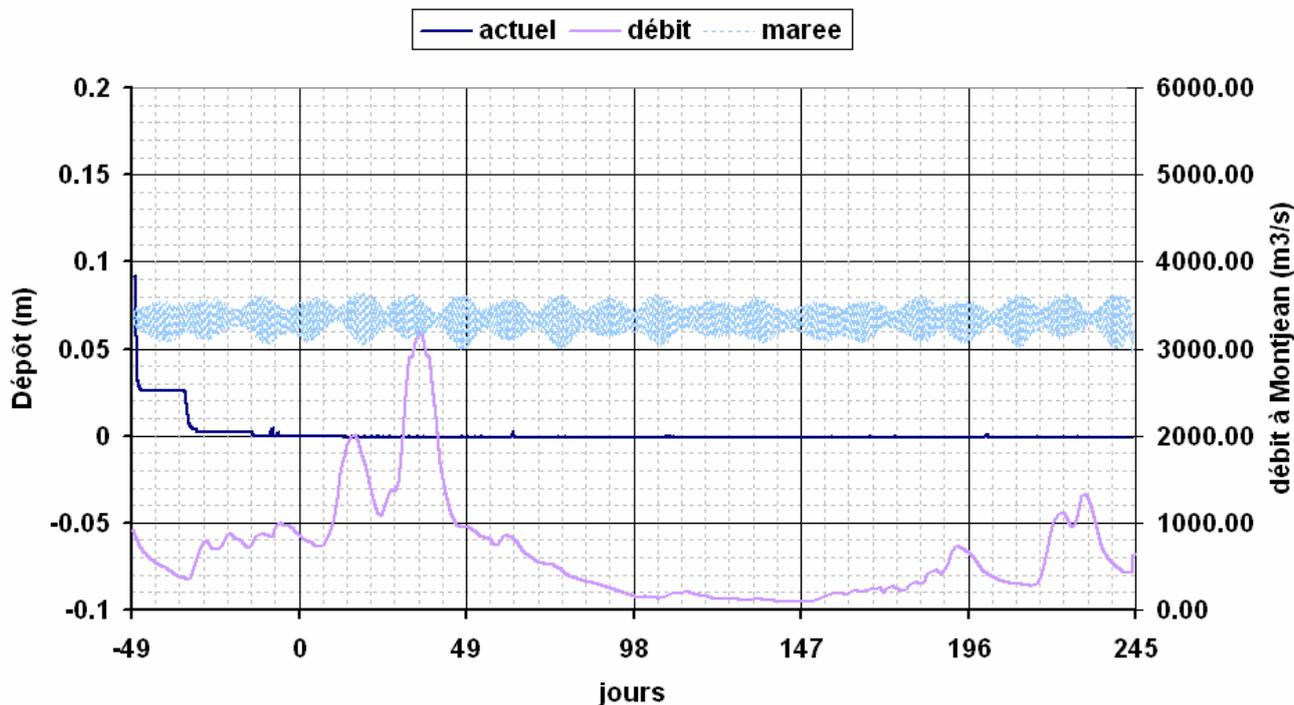


Figure 1.32

Cubatures des dépôts sur les estrans

Zone 3 estran

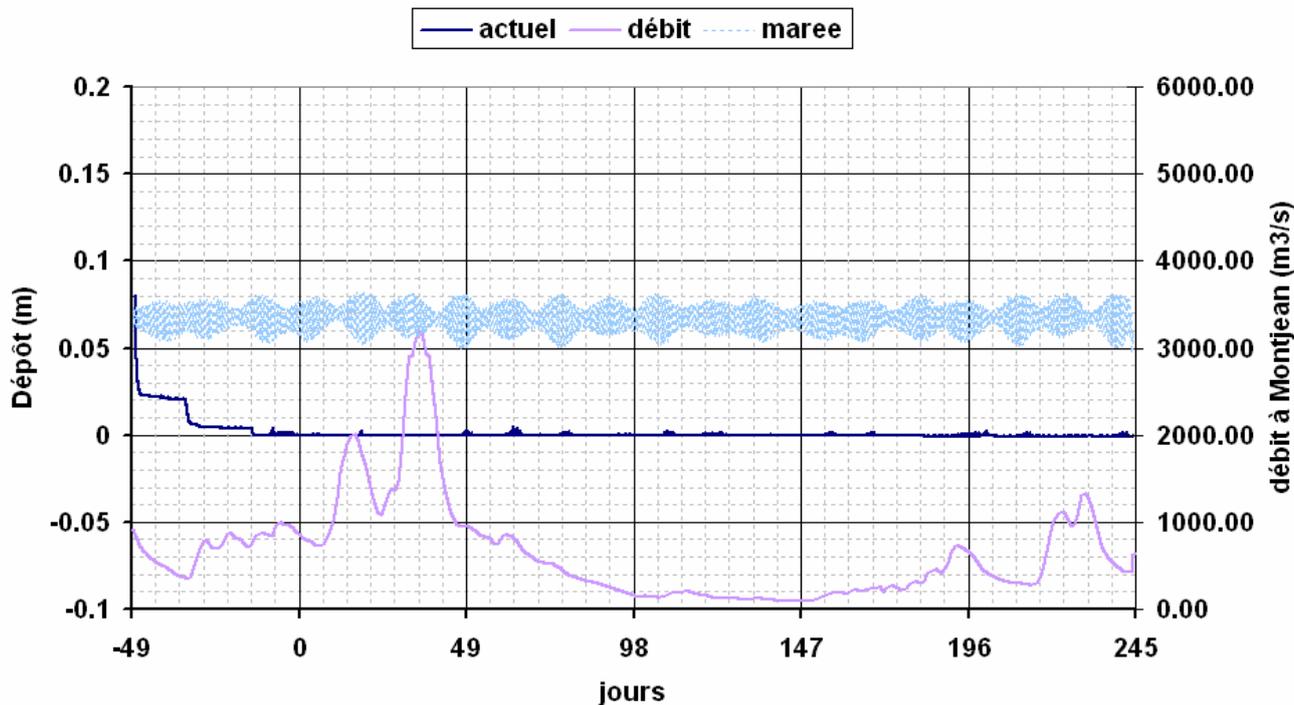


Figure 1.33

Cubatures des dépôts sur les estrans

Zone 4 estran

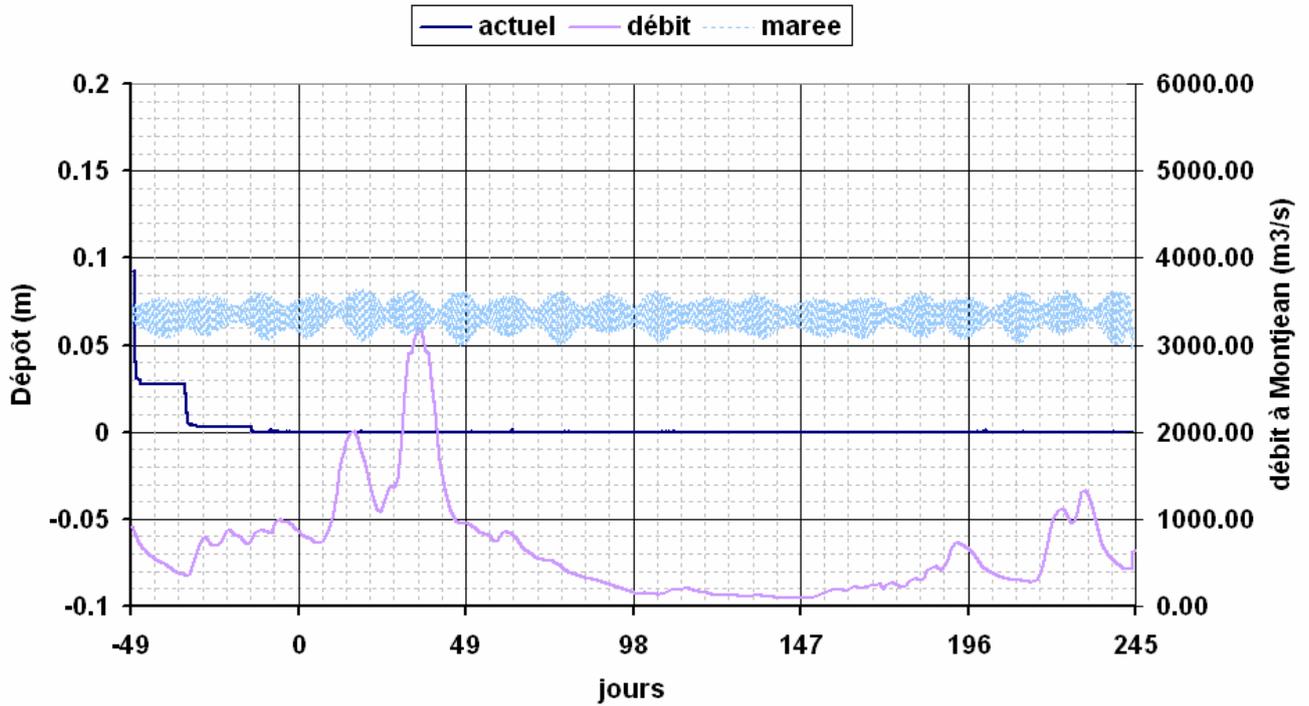


Figure 1.34

Cubatures des dépôts sur les estrans

Zone 5 estran

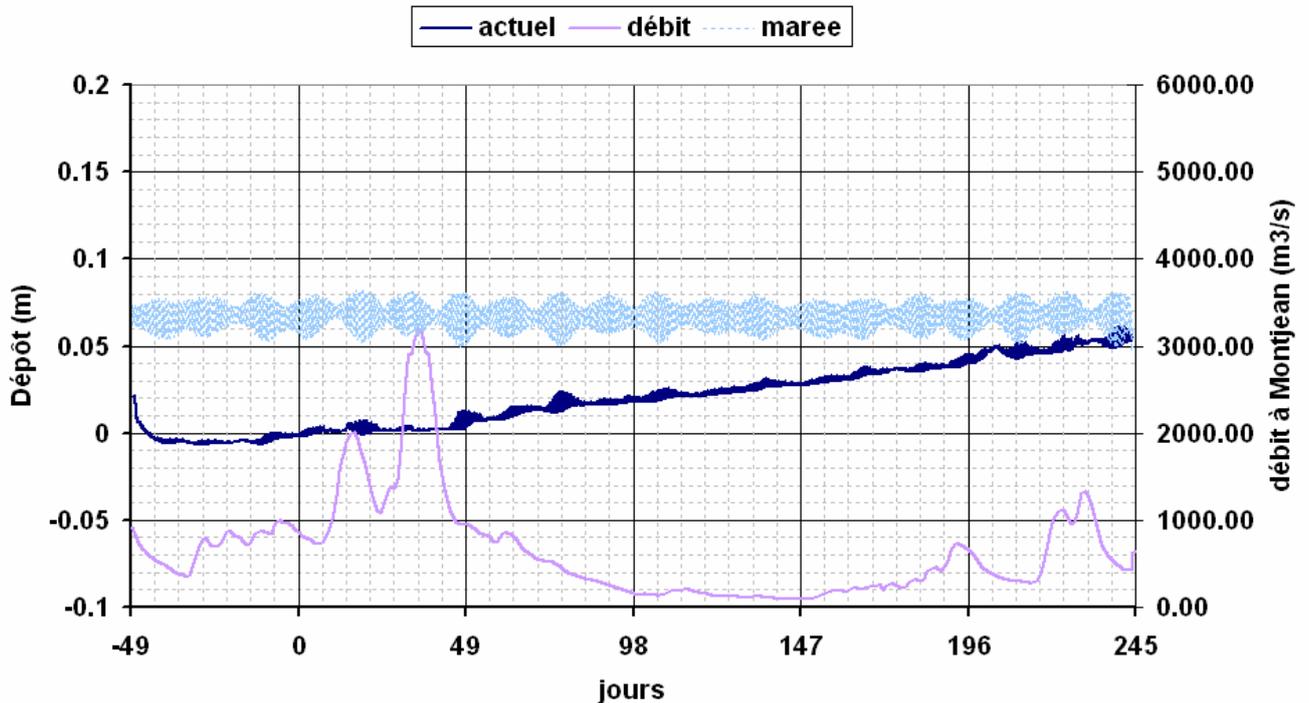


Figure 1.35

Cubatures des dépôts sur les estrans

Zone 6 estran

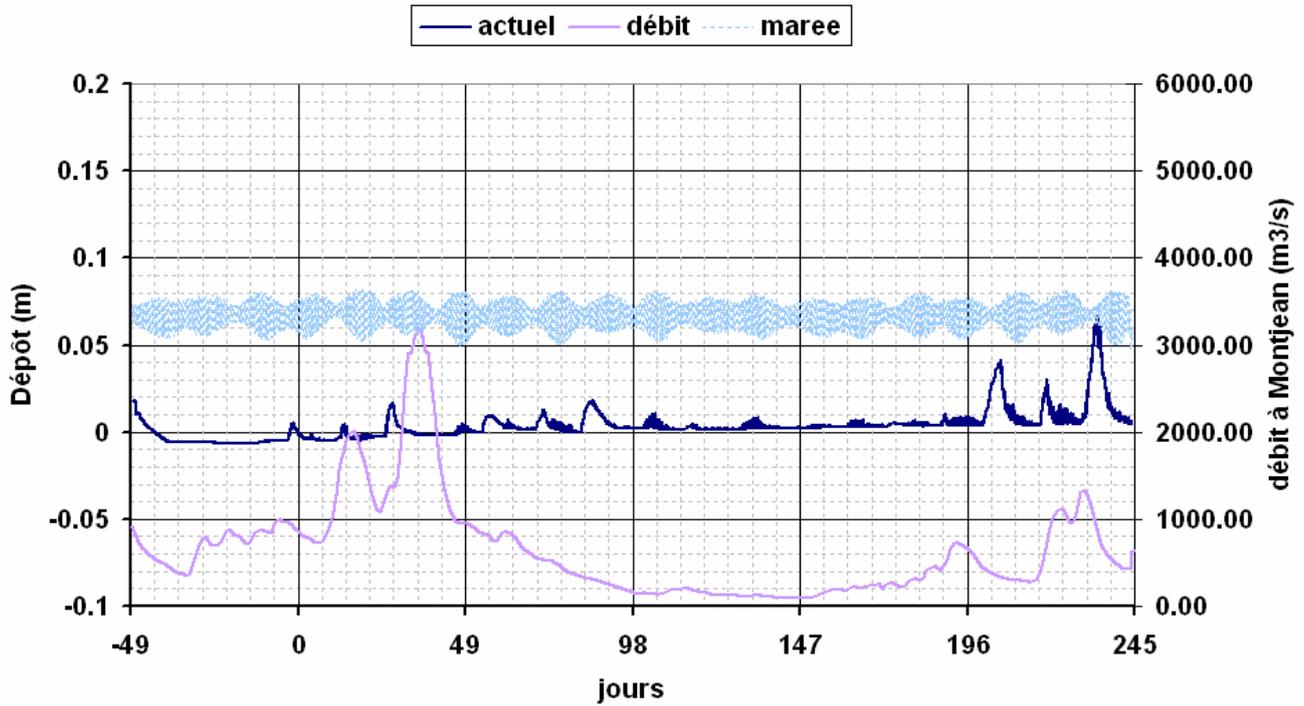


Figure 1.36

Cubatures des dépôts sur les estrans

Zone 7 estran

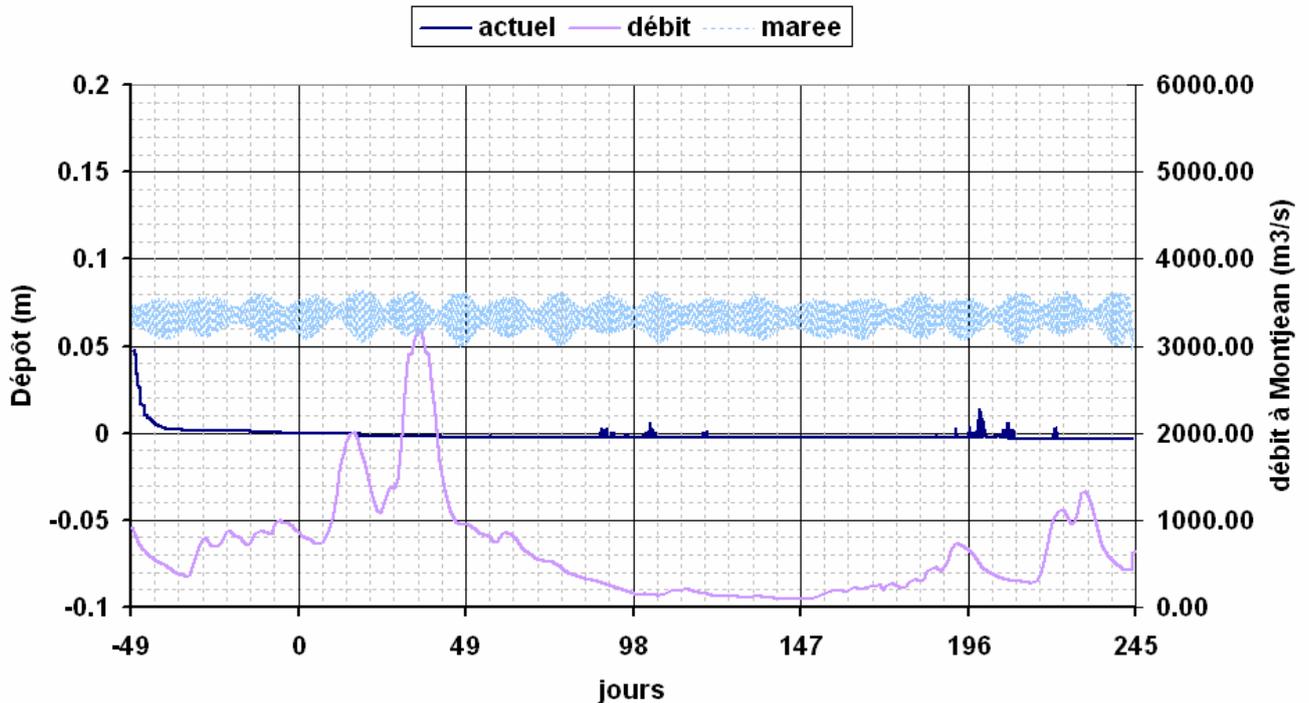


Figure 1.37

Cubatures des dépôts sur les estrans

Zone 8 estran

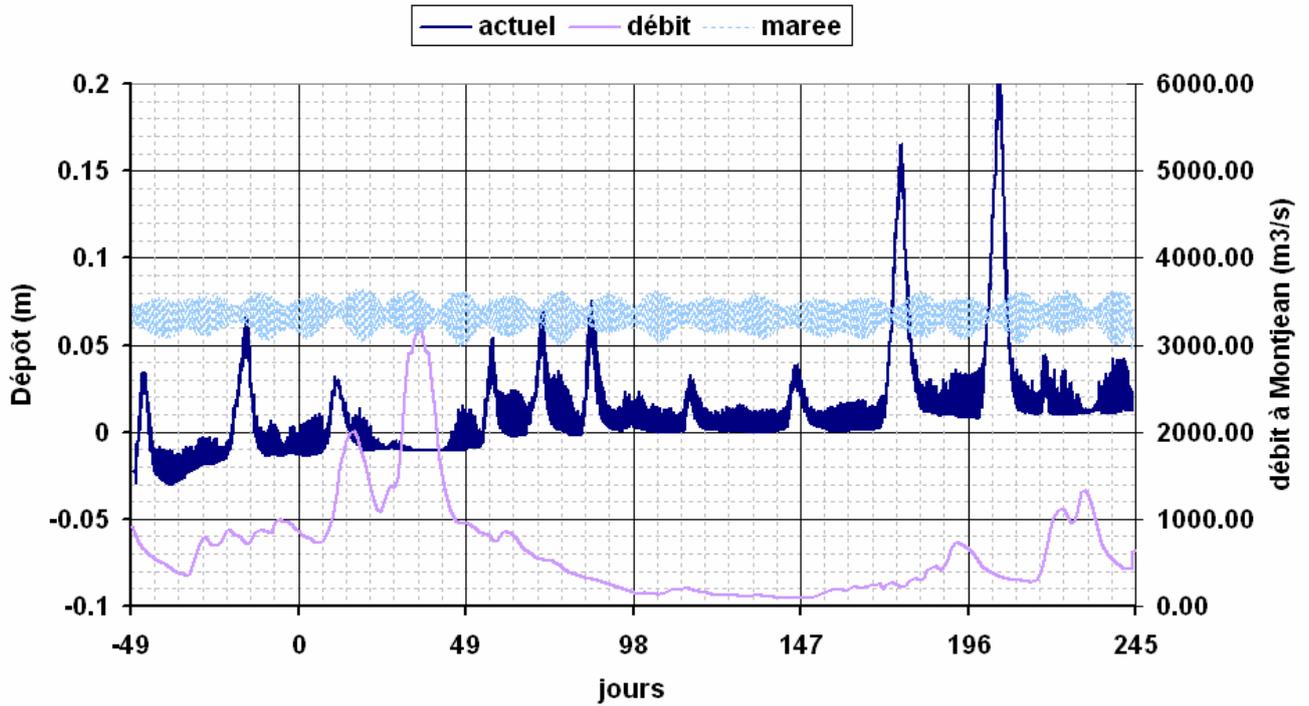


Figure 1.38

Cubatures des dépôts sur les estrans

Zone 9 estran

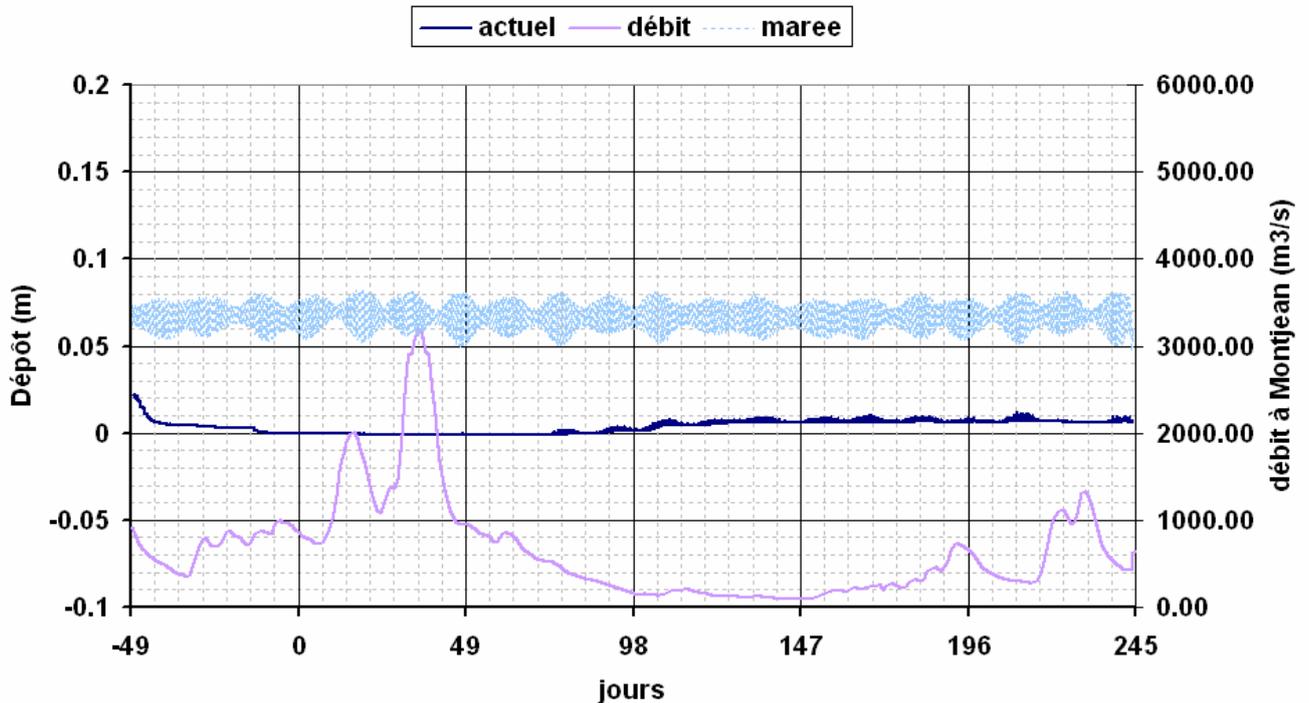


Figure 1.39

Cubatures des dépôts sur les estrans

Zone 10 estran

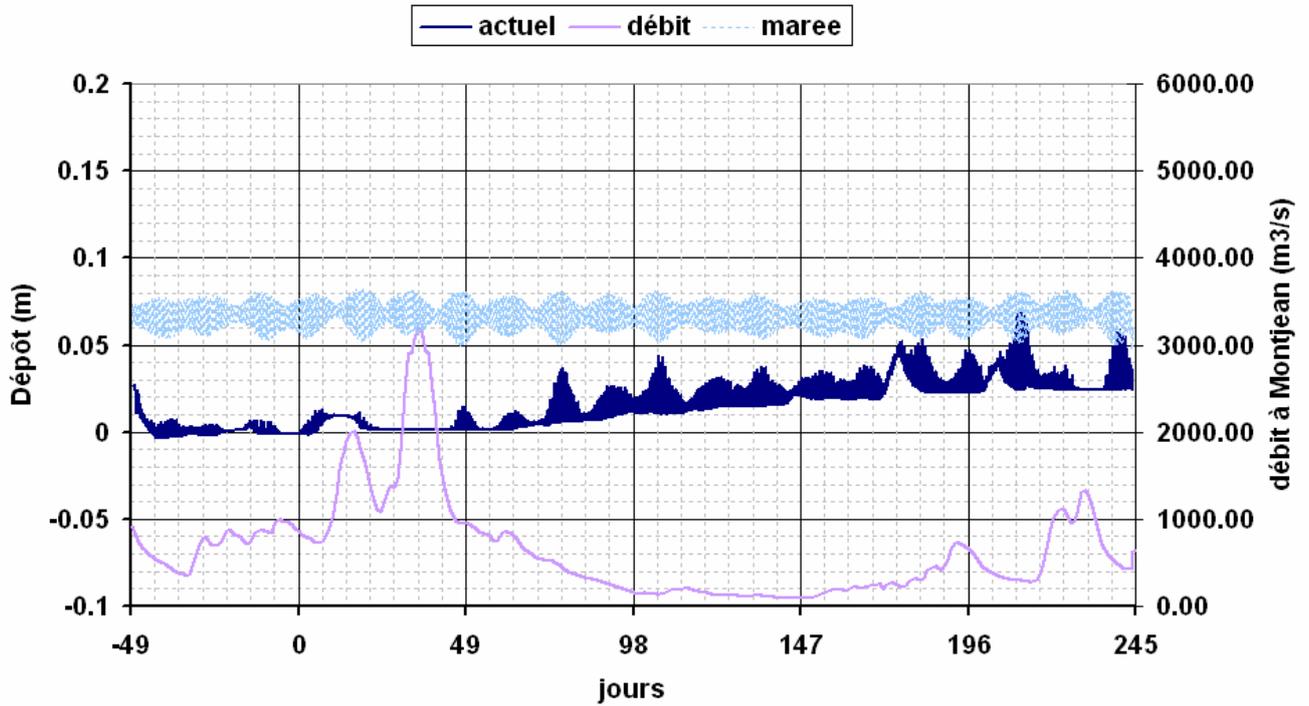


Figure 1.40

Cubatures des dépôts sur les estrans

Zone 11 estran

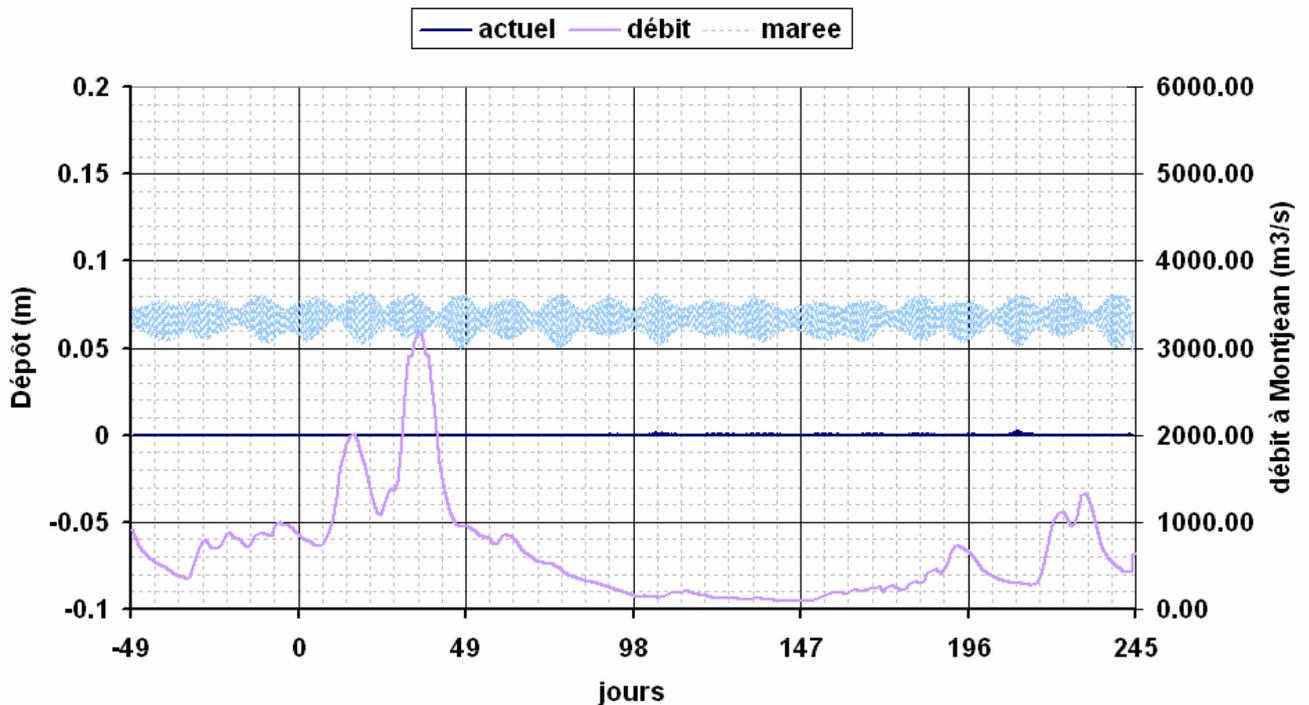


Figure 1.41

Cubatures des dépôts sur les estrans

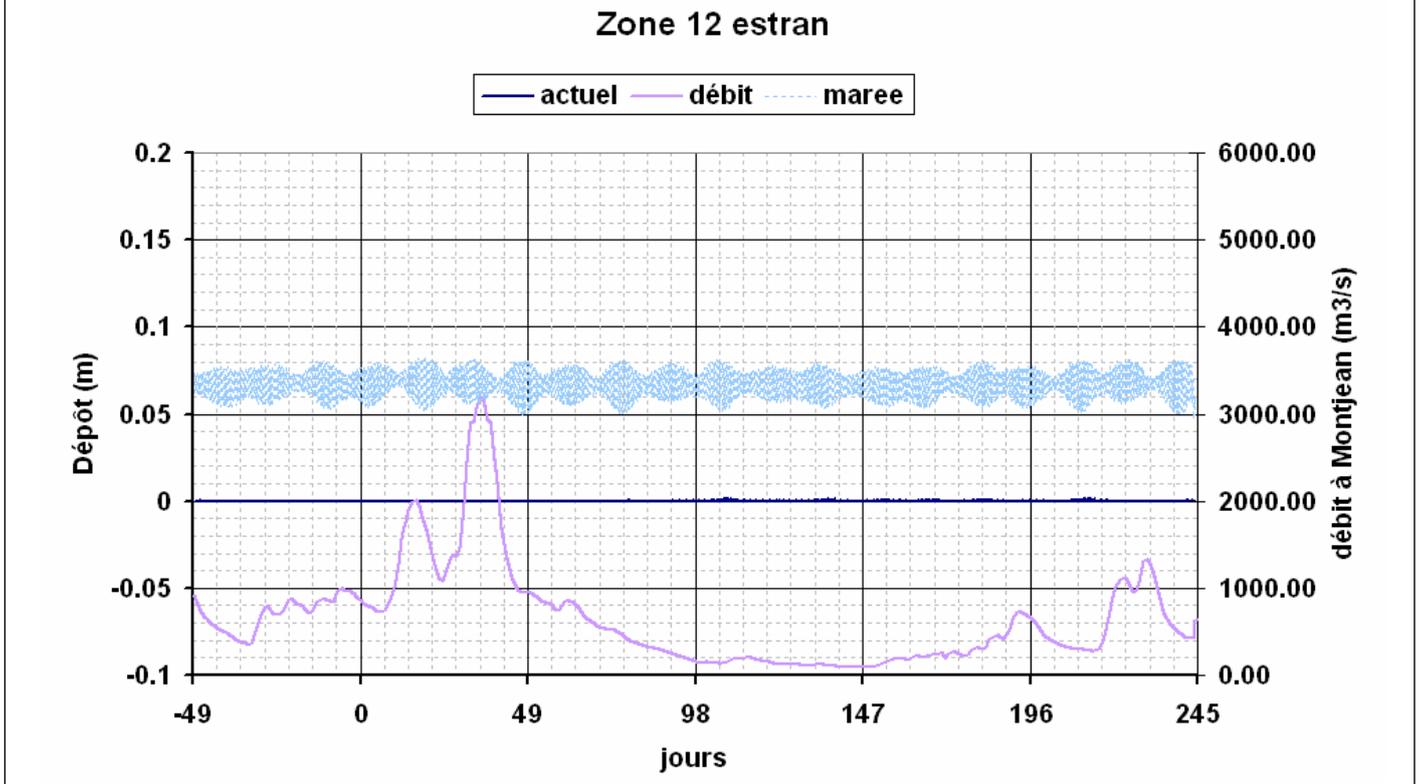


Figure 1.42

Cubatures des dépôts sur les zones submersibles

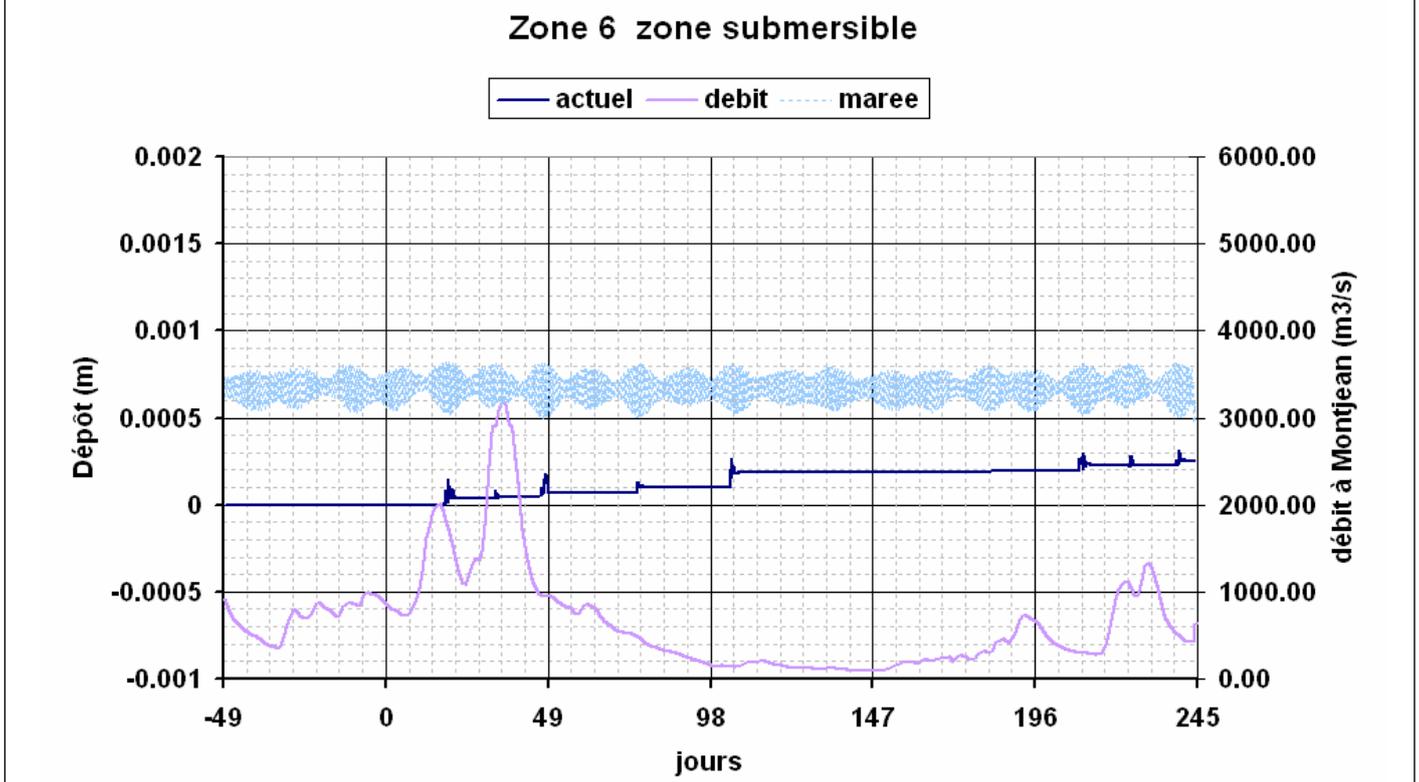


Figure 1.43

Cubatures des dépôts sur les zones submersibles

Zone 7 zone submersible

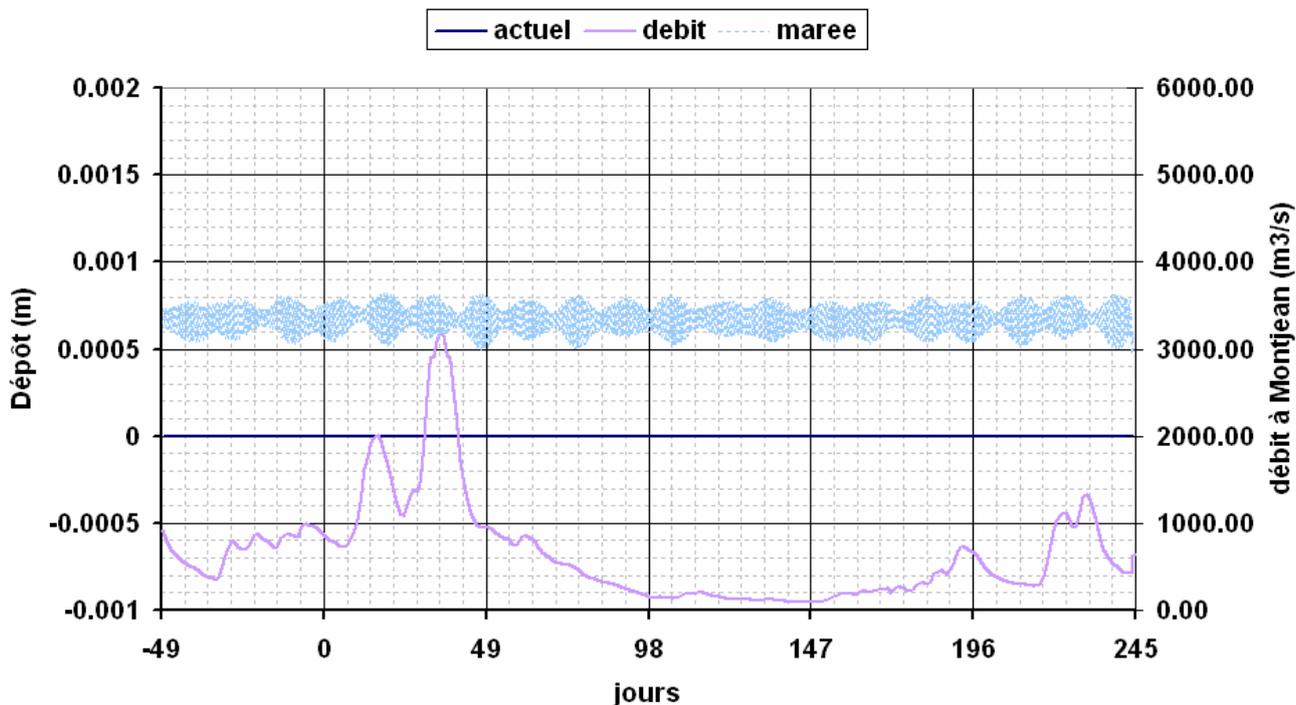


Figure 1.44

Cubatures des dépôts sur les zones submersibles

Zone 8 zone submersible

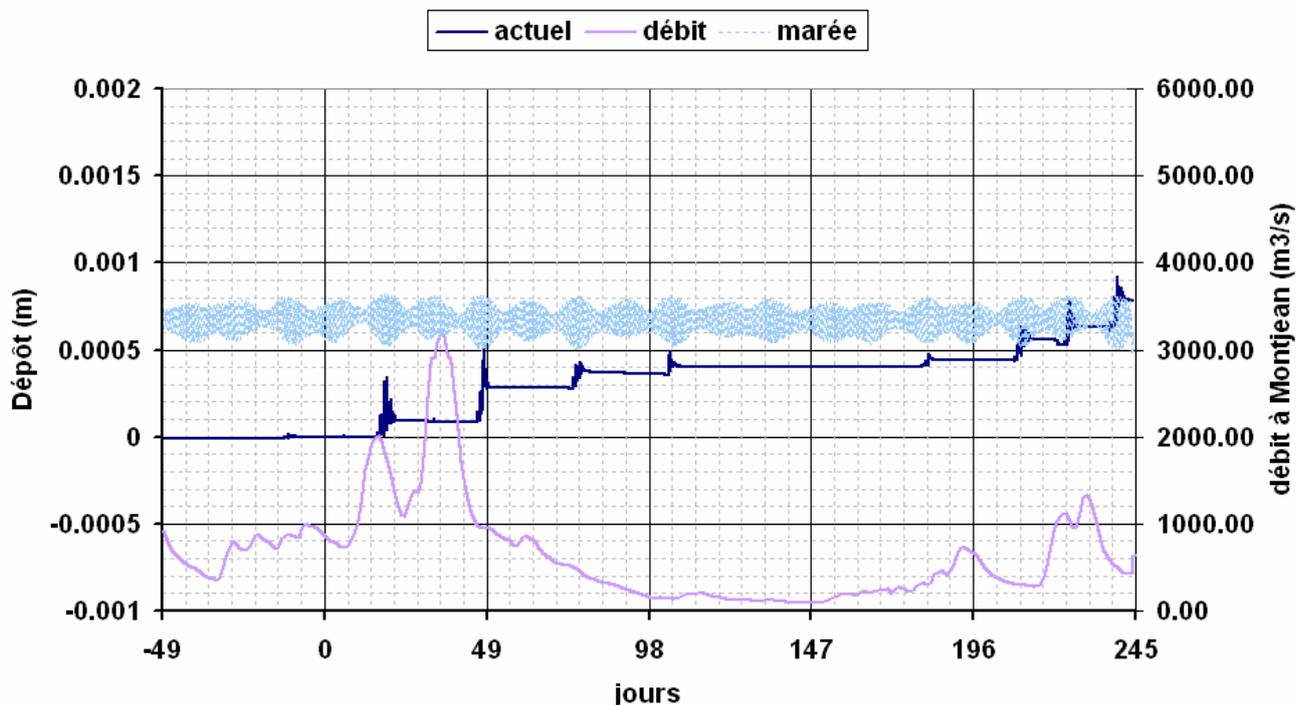


Figure 1.45

Cubatures des dépôts sur les zones submersibles

Zone 9 zone submersible

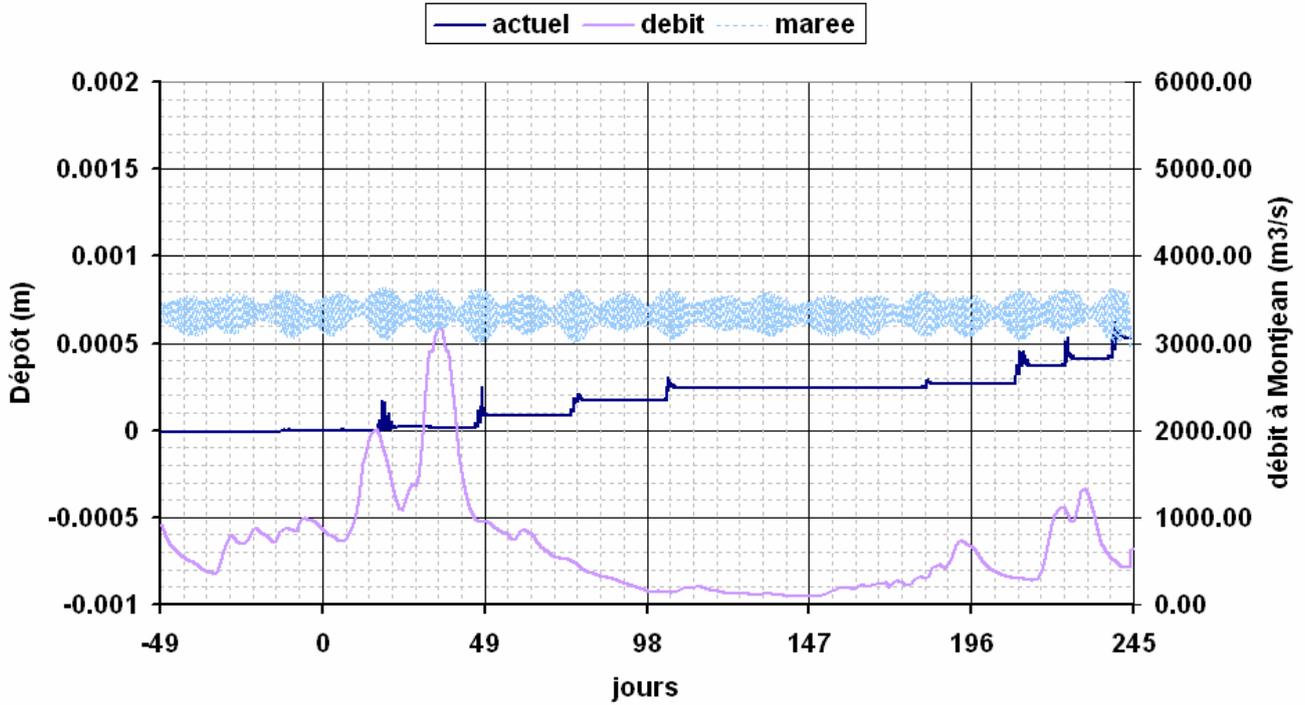


Figure 1.46

Cubatures des dépôts sur les zones submersibles

Zone 10 zone submersible

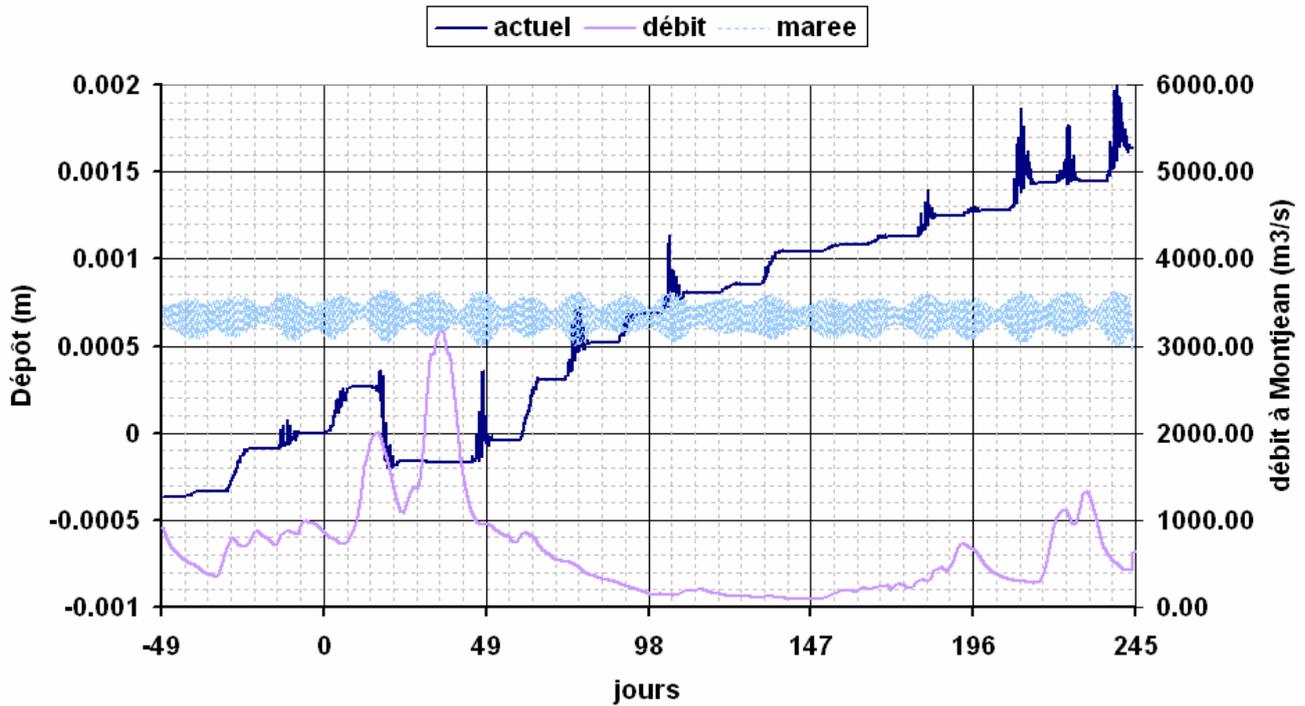


Figure 1.47

Cubatures des dépôts sur les zones submersibles

Zone 11 zone submersible

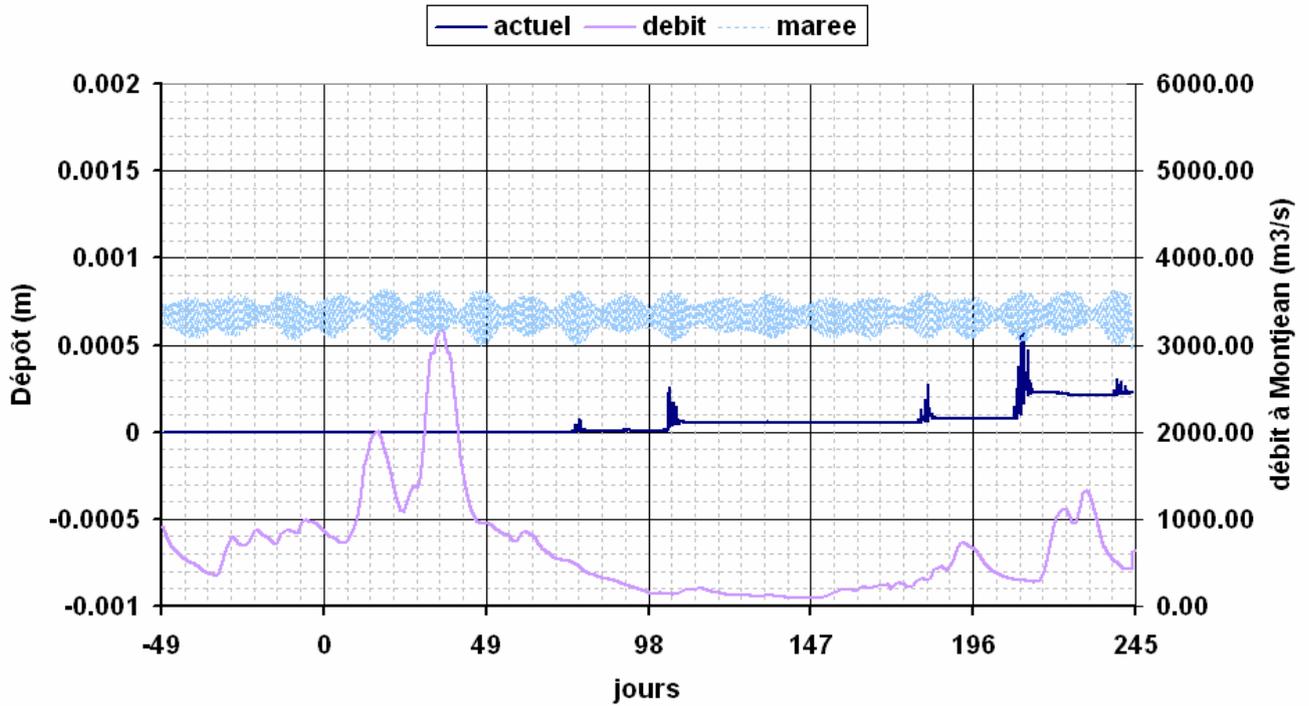


Figure 1.48

Cubatures des dépôts sur les zones submersibles

Zone 12 zone submersible

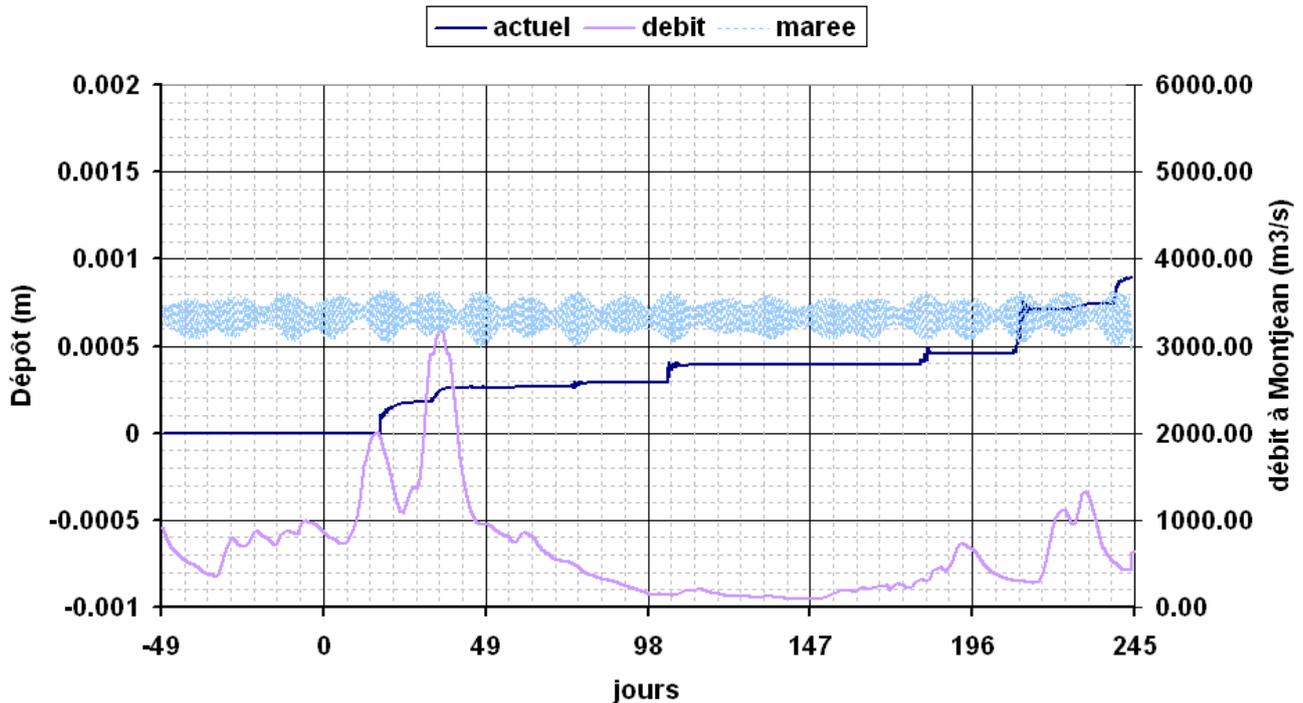


Figure 1.49

Dépôt de crème de vase au point de pk -10

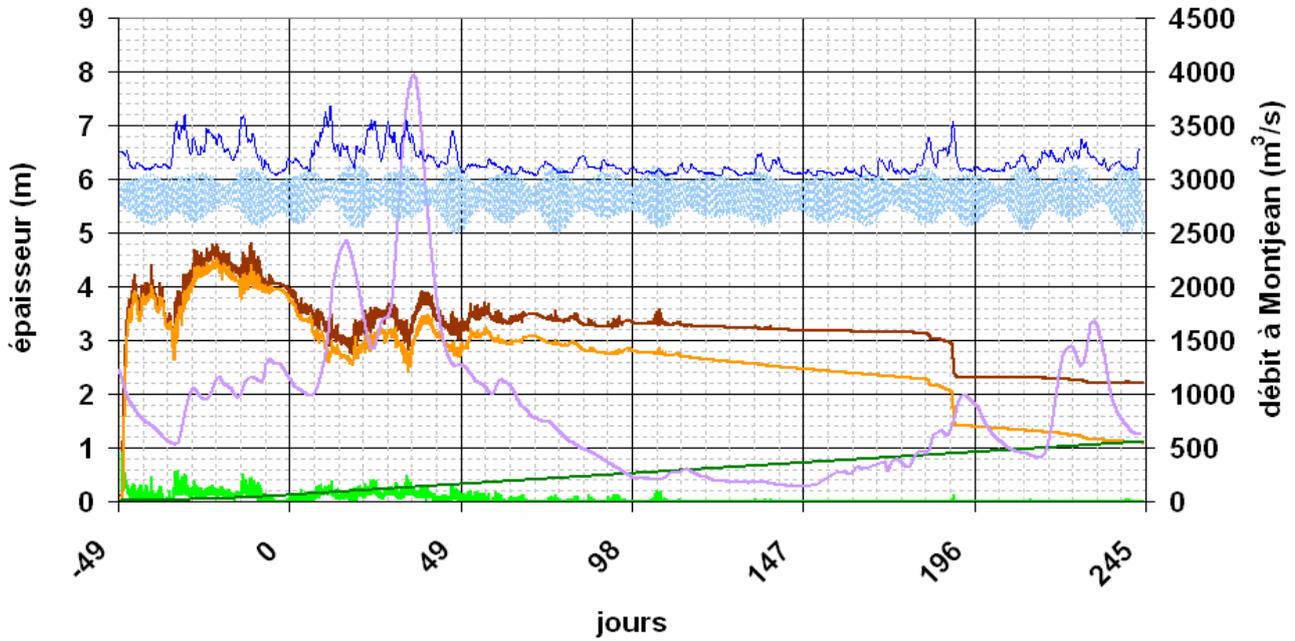
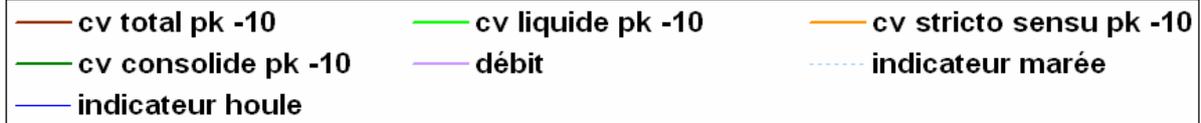


Figure 1.50

Dépôt de crème de vase au point de pk -5

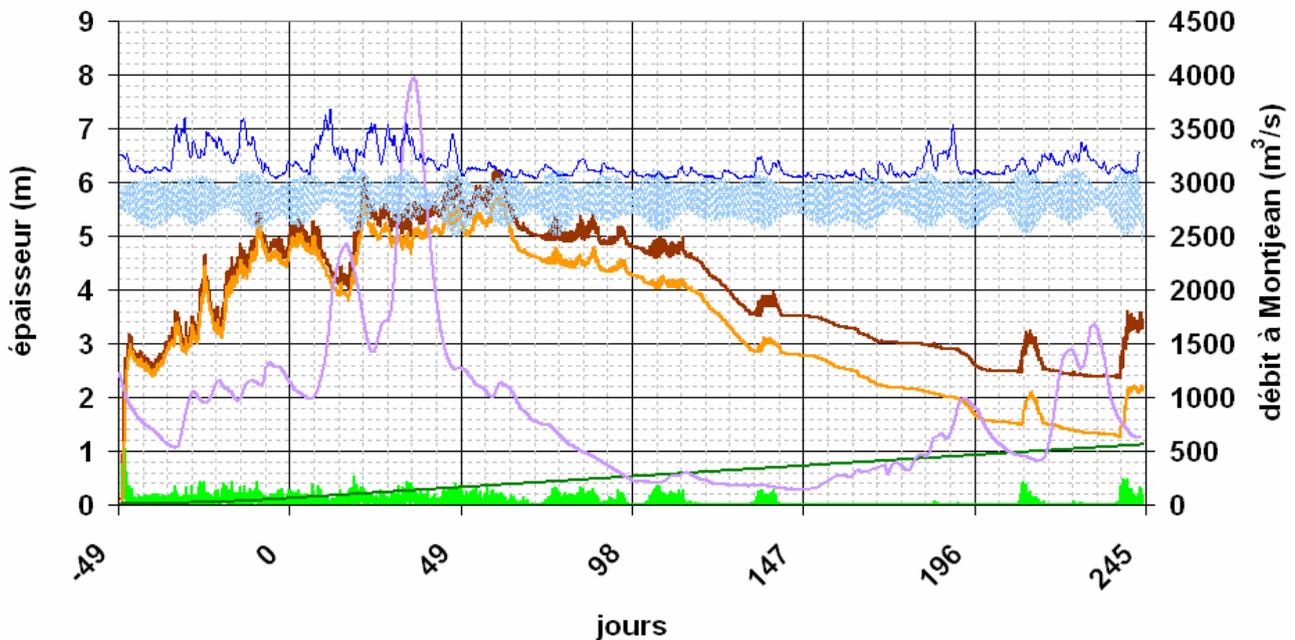
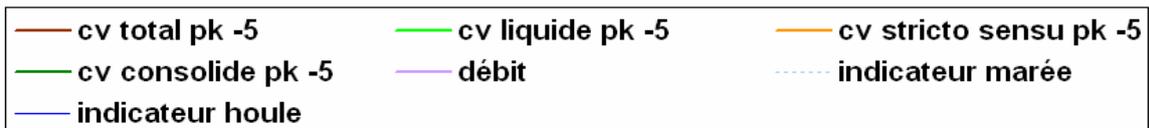


Figure 1.51

Dépôt de crème de vase au point de pk 0

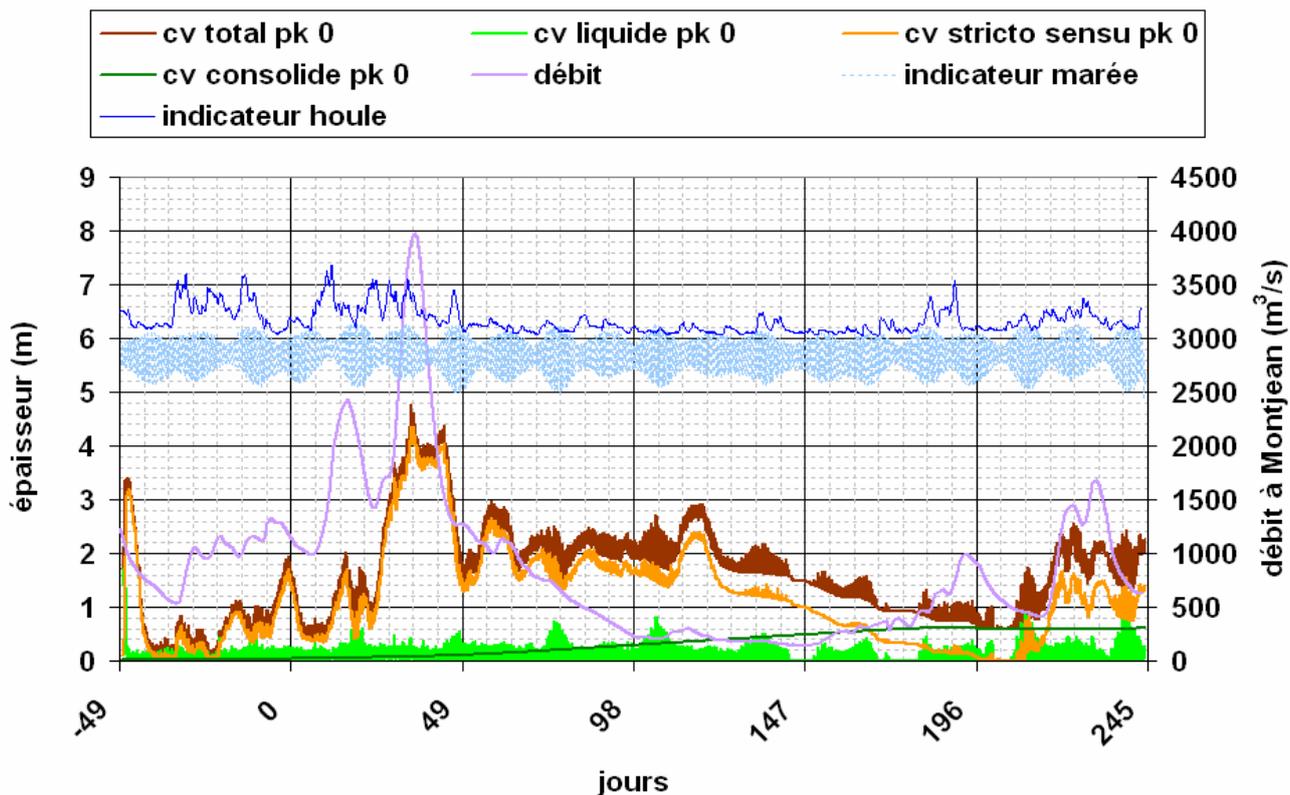


Figure 1.52

Dépôt de crème de vase au point de pk 5

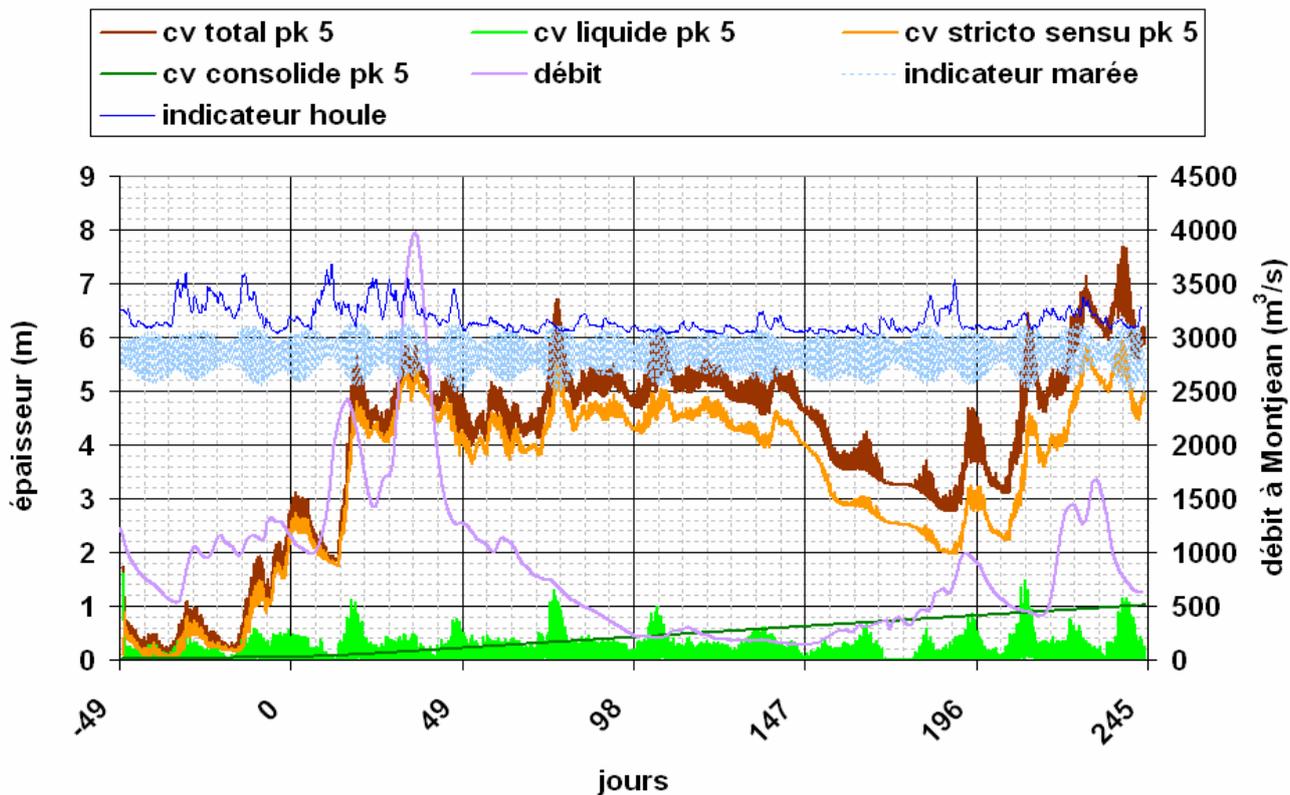


Figure 1.53

Dépôt de crème de vase au point de pk 10

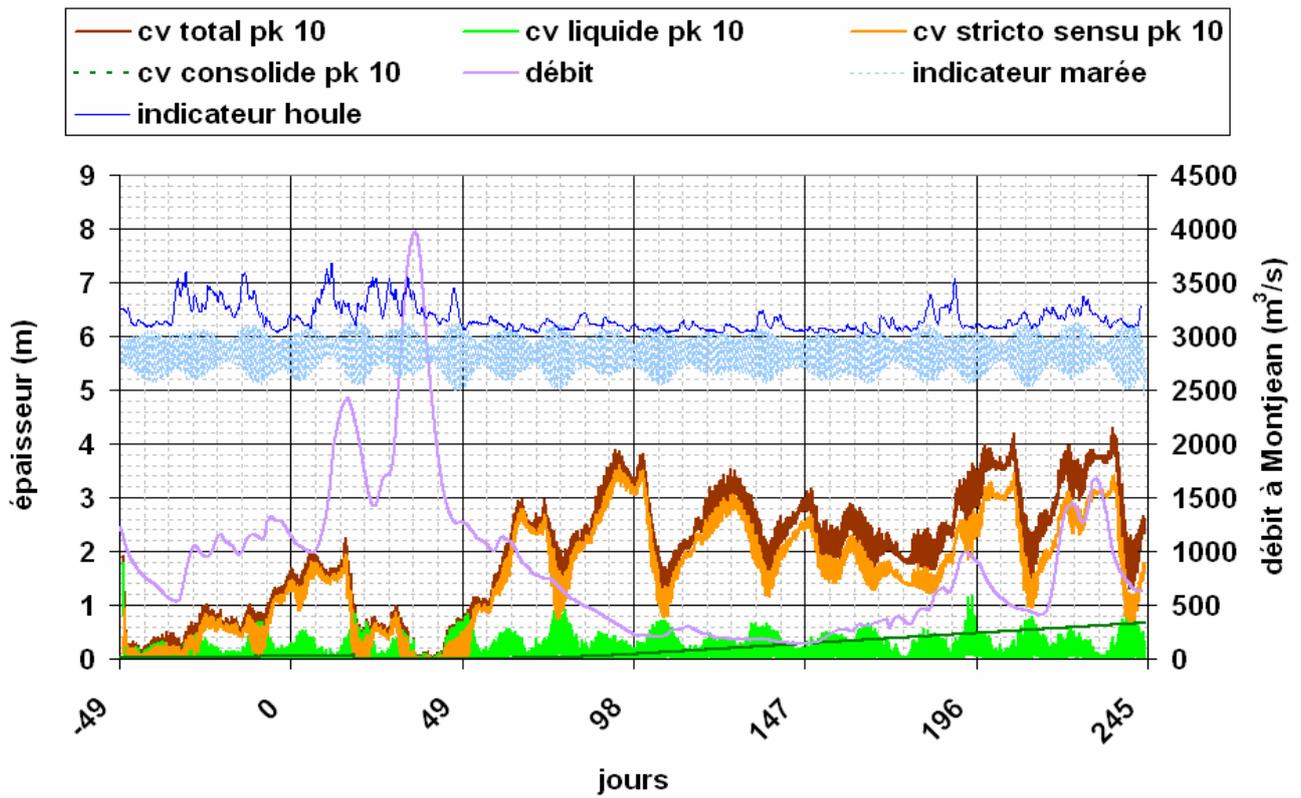


Figure 1.54

Dépôt de crème de vase au point de pk 15

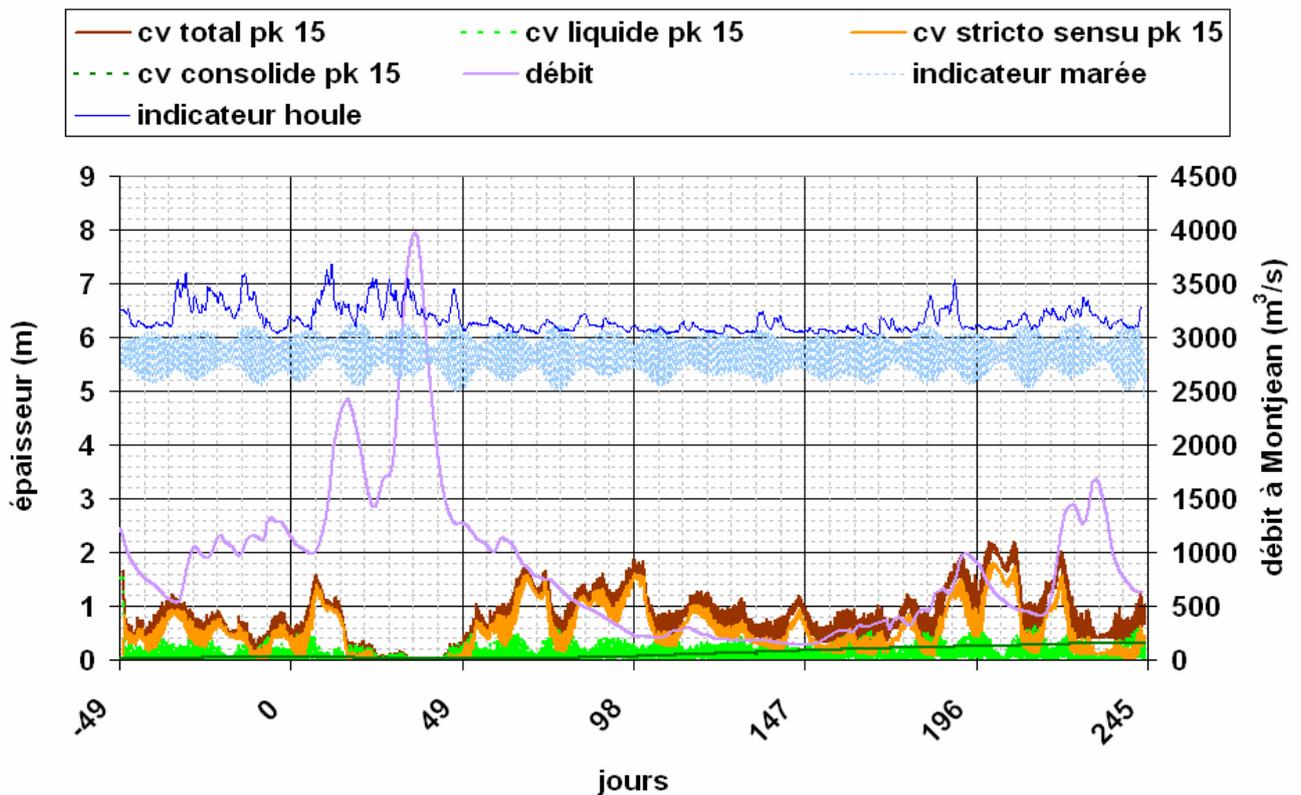


Figure 1.55

Dépôt de crème de vase au point de pk 20

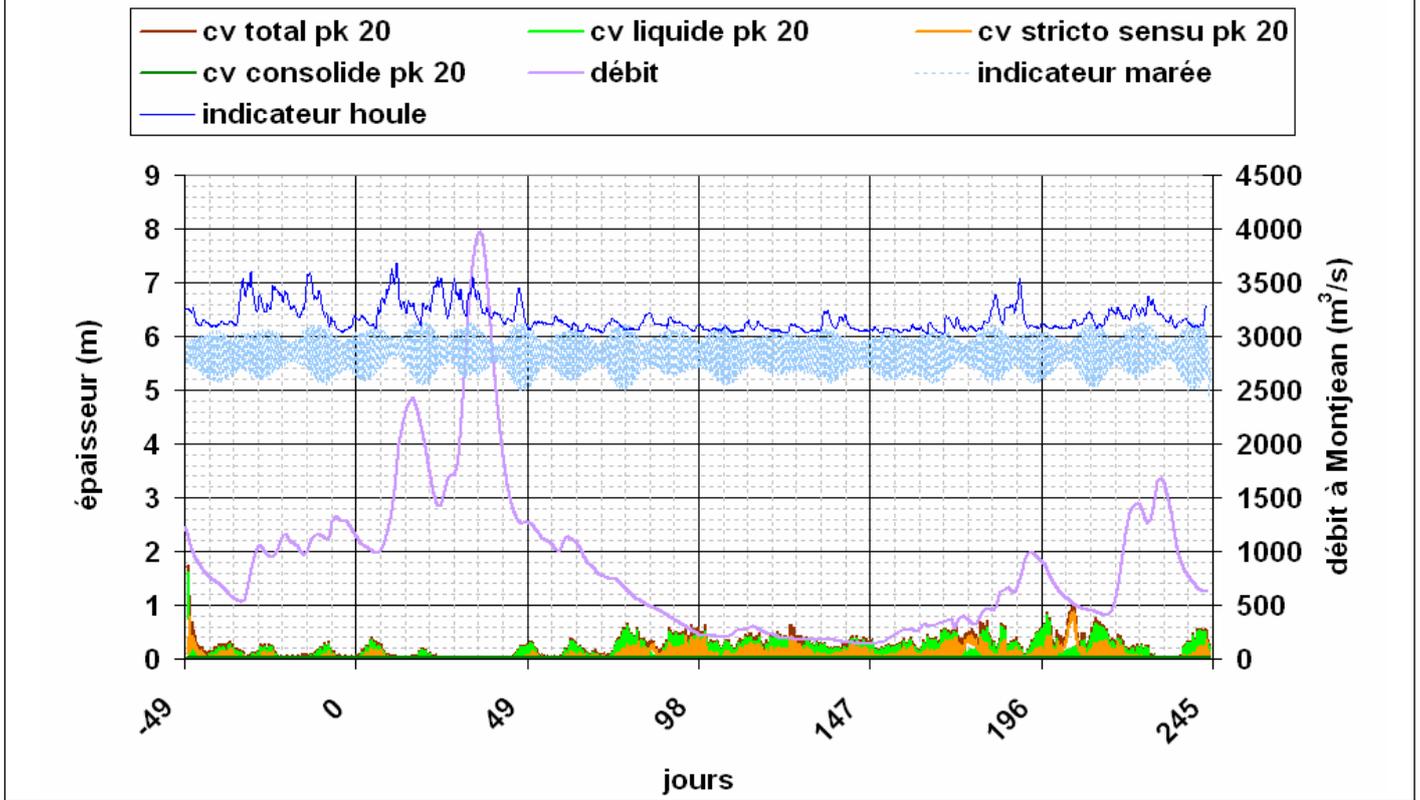


Figure 1.56

Dépôt de crème de vase au point de pk 25

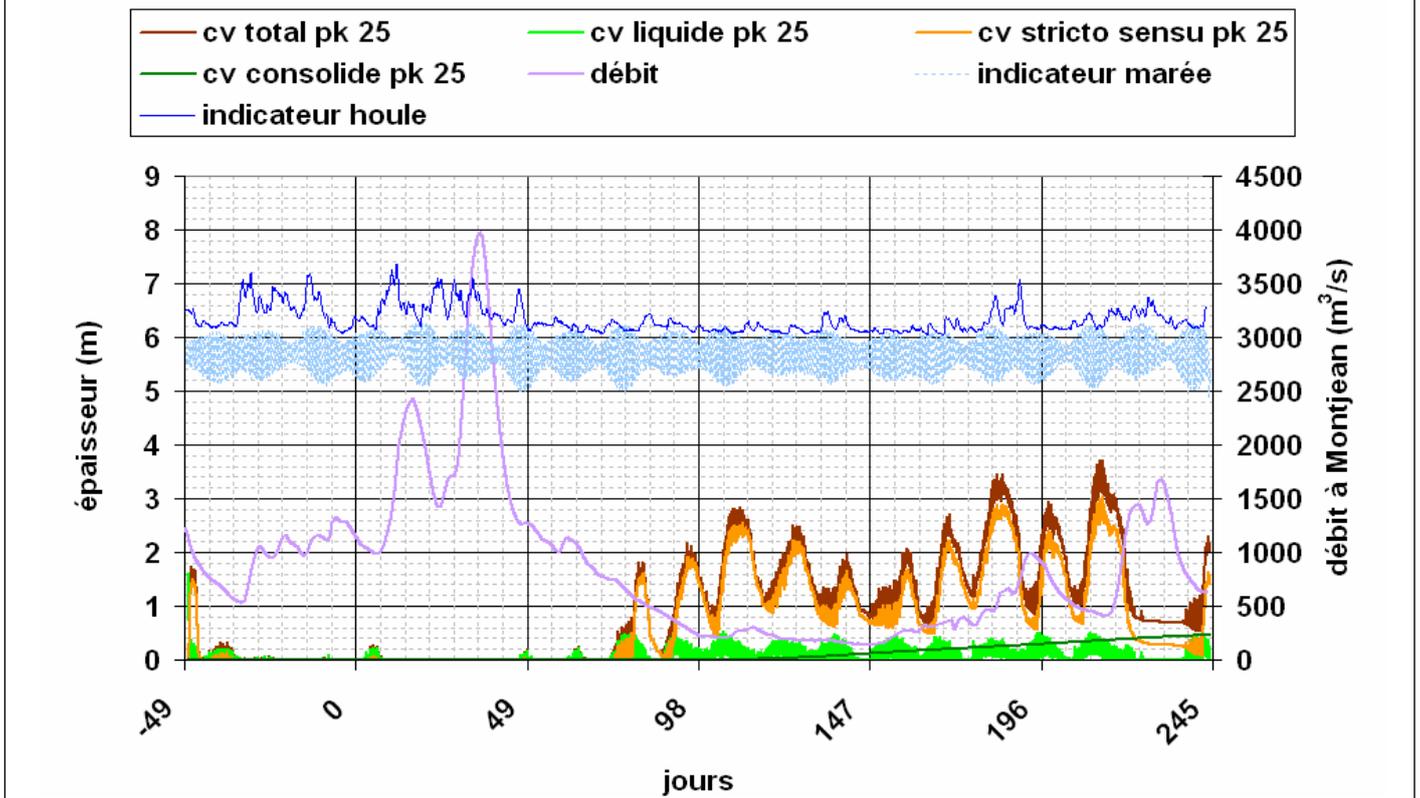


Figure 1.57

Dépôt de crème de vase au point de pk 30

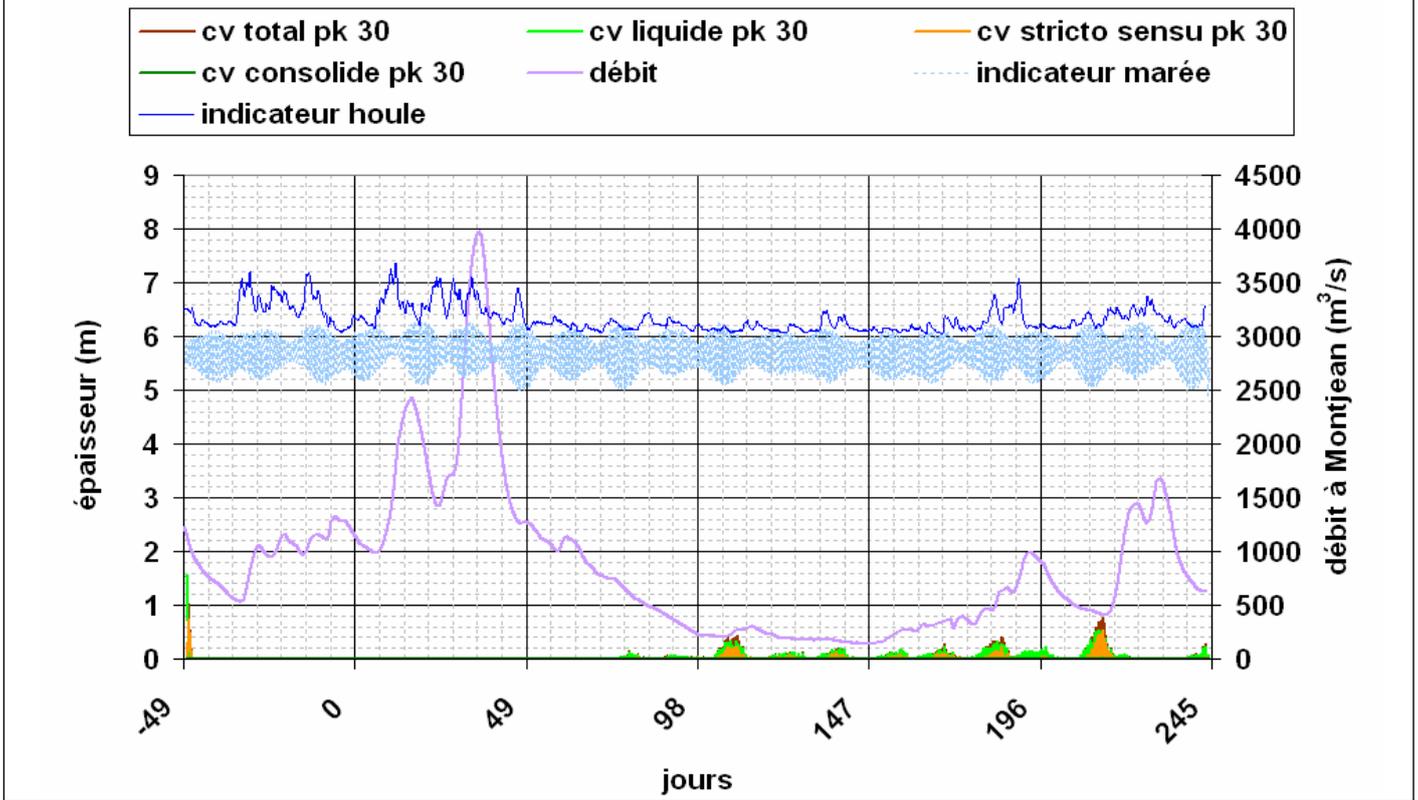


Figure 1.58

Dépôt de crème de vase au point de pk 35

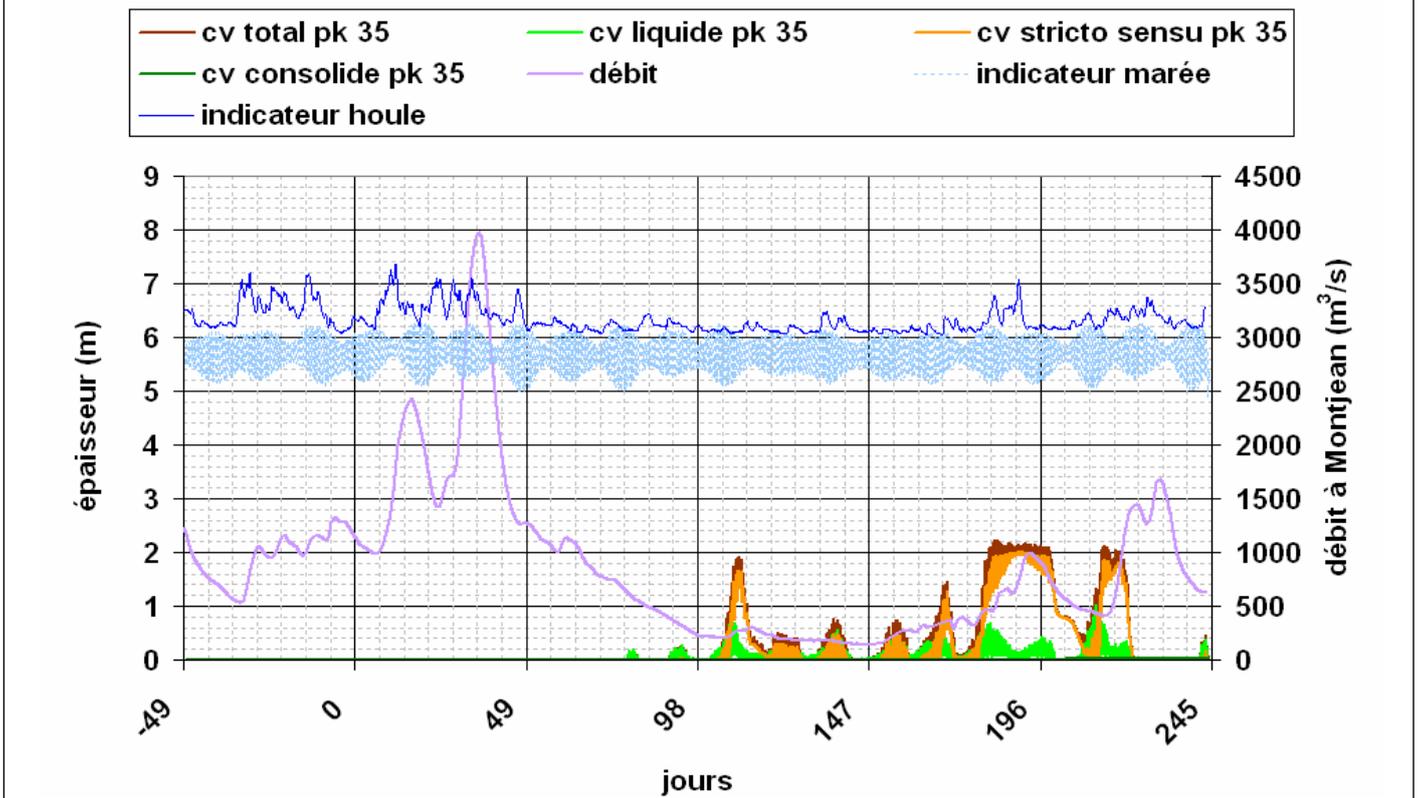


Figure 1.59

Dépôt de crème de vase au point de pk 40

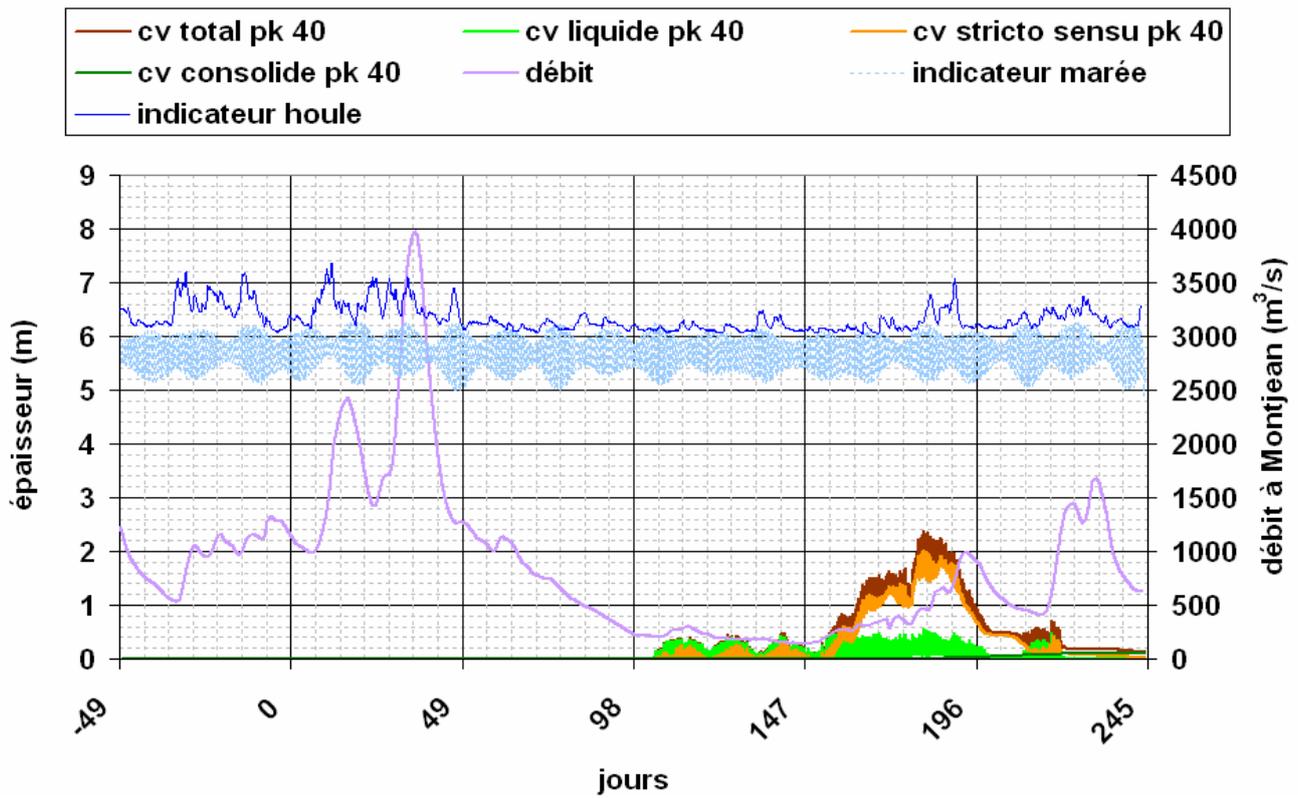


Figure 1.60

Dépôt de crème de vase au point de pk 45

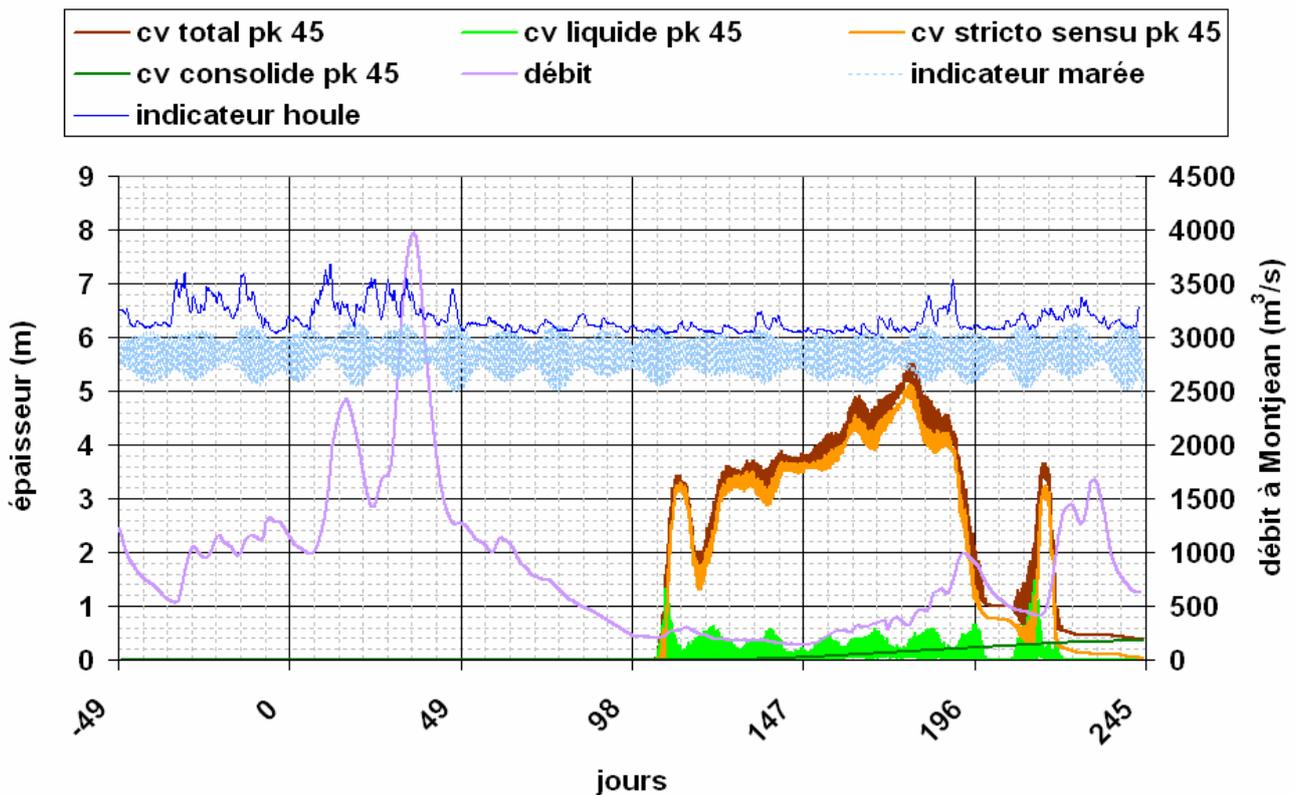


Figure 1.61

Dépôt de crème de vase au point de pk 50

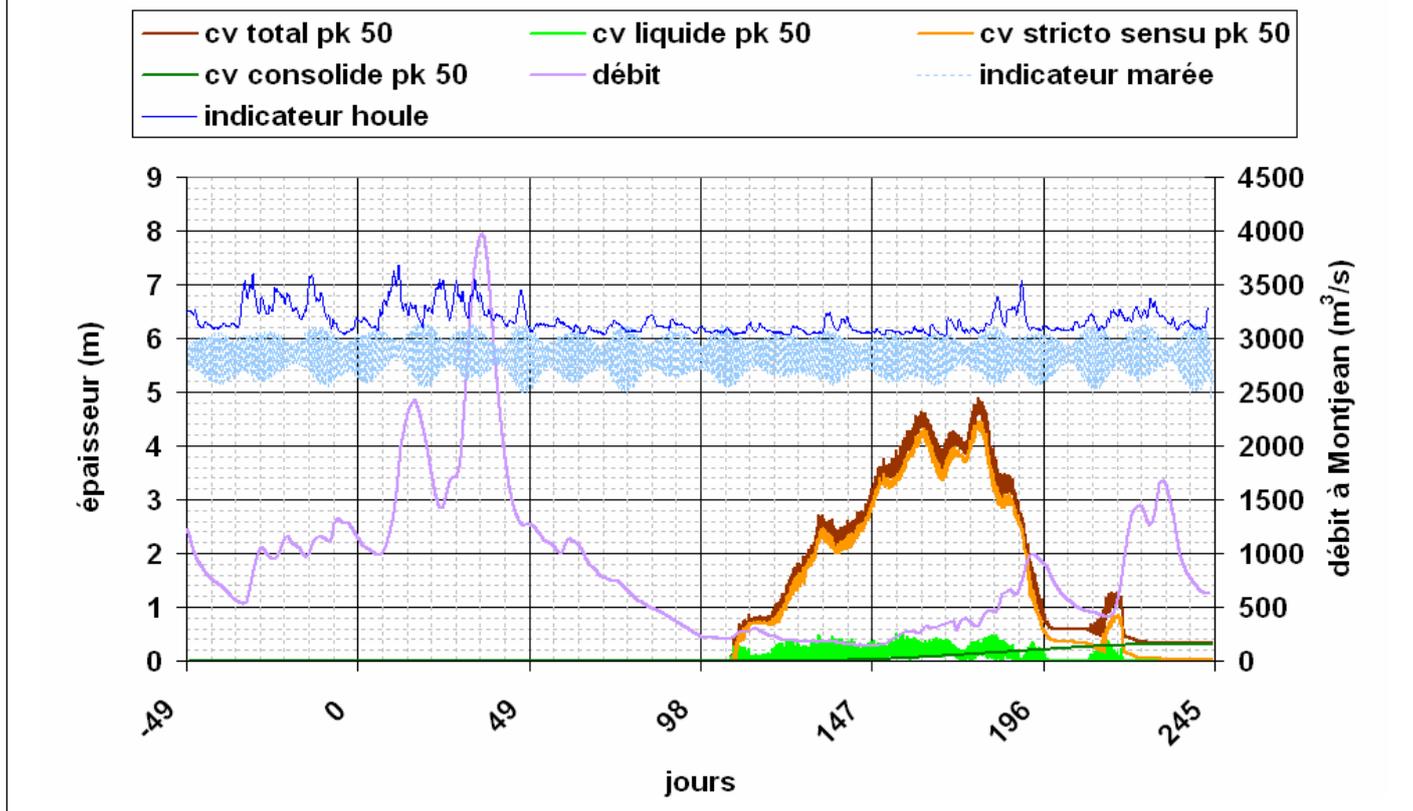


Figure 1.62

Dépôt de crème de vase au point de pk 55

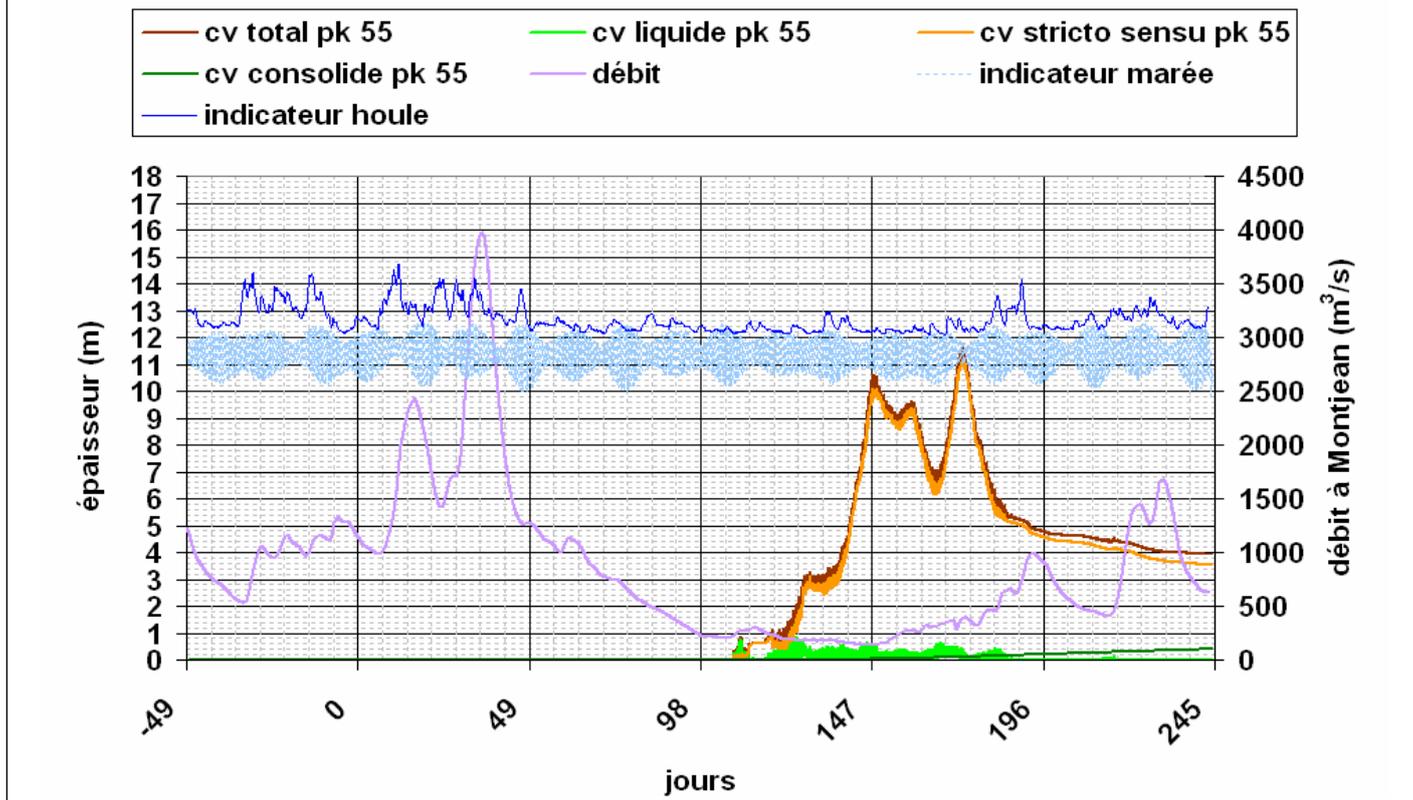


Figure 1.63

Dépôt de crème de vase au point de pk 60

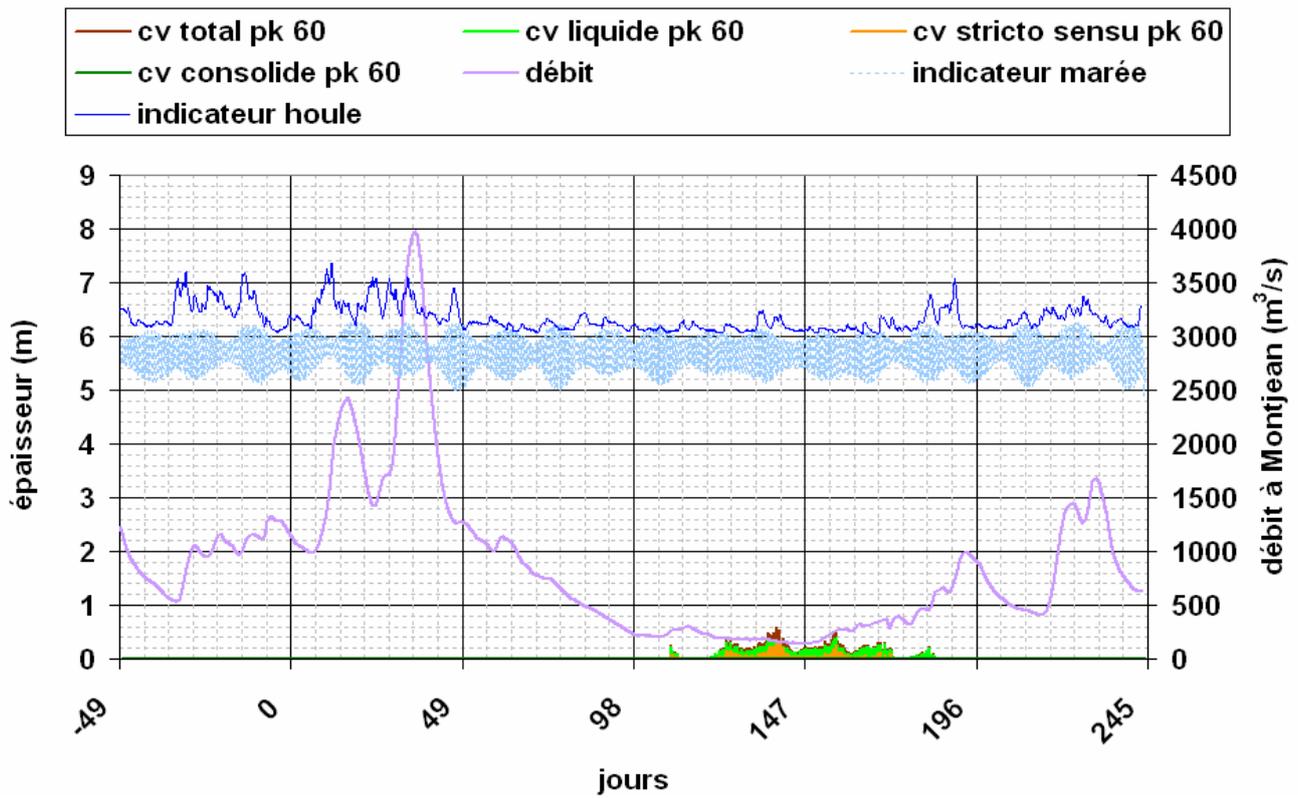


Figure 1.64

Dépôt de crème de vase au point de pk 65

