

**Mise en œuvre du modèle hydro-sédimentaire 3D TELEMAC de
l'estuaire de la Loire sur des scénarios d'aménagement de
Bellevue :**

**SCENARIO C1 et TENDANCIEL avec un état amont des
fonds à 50 ans**

RAPPORT 8411793-R2- FINAL

Artelia Eau & environnement

6, rue de Lorraine
38130 Echirolles
Tel. : +33 (0)4.76.33.40.00
Fax : +33 (0)4.76.33.42.12



SCENARIO C1 et TENDANCIEL avec un état amont des fonds à 50 ans

Rapport 8411793-R2- final

N°8411793 - R2 - V1					
Version	Description	Rédaction	Vérfié	Approuvé	Date
V3	Rapport final	RWR			27/06/2019
V2	Rapport provisoire	RWR			27/05/2019
V1	Rapport provisoire	RWR	OBD		26/03/2019

SOMMAIRE

Objet de l'étude	1
Synthèse	2
1. DESCRIPTION DU MODELE 3D MORPHOLOGIQUE « VASE » DE L'ESTUAIRE	4
2. ADAPTATION DU MAILLAGE AUX CONFIGURATIONS D'AMENAGEMENT TESTEES	6
2.1. MAILLAGE	6
2.2. GEOMETRIE DU SCENARIO C1 ET FROTTEMENT ASSOCIE	8
2.3. BATHYMETRIE A 50 ANS DE L'ETAT TENDANCIEL ET DU SCENARIO C1	9
2.3.1. Tronçon : Pk 62-64	9
2.3.2. Tronçons : Pk 58-62 et 64-90	12
3. SIMULATIONS DU SCENARIO HYDRO-METEOROLOGIQUE DE REFERENCE	17
4. TYPE D'EXPLOITATION DES RESULTATS	18
4.1. ANALYSE SUIVANT LES POINTS KILOMETRIQUES	18
4.2. ANALYSE PAR CUBATURE DE ZONE	19
5. LES RESULTATS OBTENUS	20
5.1. HYDRODYNAMIQUE	20
5.2. INTRUSION HALINE	22
5.3. MATIERE EN SUSPENSION	22
5.4. CREME DE VASE	23
5.5. DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE A COURT TERME	23
5.6. MODIFICATION DES SECTIONS LE LONG DE L'ESTUAIRE	26
Figures hors-texte	32

TABLEAUX

TABL. 1 -	MASSE DU BOUCHON VASEUX EN VIVE-EAU (HORS-CRUE)	24
TABL. 2 -	BILAN DE MASSE GLOBAL	25

FIGURES

FIG. 1.	EMPRISE ET BATHYMETRIE DU MODELE HYDRO-SEDIMENTAIRE 3D EN VASE	4
FIG. 2.	MAILLAGE HORIZONTAL DU MODELE HYDRO-SEDIMENTAIRE 3D EN VASE	5
FIG. 3.	MAILLAGE VERTICAL DU MODELE HYDRO-SEDIMENTAIRE 3D EN VASE	5
FIG. 4.	MAILLAGE ADAPTE AU SCENARIO C1	7
FIG. 5.	SCHEMA DE PRINCIPE DU SCENARIO C1	8
FIG. 6.	BATHYMETRIE DU MODELE C1 A 50 ANS ENTRE LES PKS 62 ET 64 ET DIFFERENTIEL AVEC LA BATHYMETRIE 2008-2010 DU MODELE ACTUEL	10
FIG. 7.	BATHYMETRIE DU MODELE TENDANCIEL A 50 ANS ENTRE LES PKS 62 ET 64 ET DIFFERENTIEL AVEC LA BATHYMETRIE 2008-2010 DU MODELE ACTUEL	11
FIG. 8.	BATHYMETRIES DU BRAS PRINCIPAL DU MODELE TELEMAR-3D : BATHYMETRIE ACTUELLE (2008-2010), SCENARIO C1 A 50 ANS ET SCENARIO TENDANCIEL A 50 ANS	12
FIG. 9.	BATHYMETRIE ET EVOLUTIONS POUR LE SCENARIO C1 A 50 ANS ENTRE LES PKS 64 ET 78	13
FIG. 10.	BATHYMETRIE ET EVOLUTIONS POUR LE SCENARIO C1 A 50 ANS ENTRE LES PKS 78 ET 90	14
FIG. 11.	BATHYMETRIE ET EVOLUTIONS POUR LE SCENARIO TENDANCIEL A 50 ANS ENTRE LES PKS 64 ET 78	15
FIG. 12.	BATHYMETRIE ET EVOLUTIONS POUR LE SCENARIO TENDANCIEL A 50 ANS ENTRE LES PKS 78 ET 90	16
FIG. 13.	FORÇAGE DIT ACTUEL, EN MAREE, NIVEAU MOYEN ET DEBIT	17
FIG. 14.	JOURNEE 135 DANS SON CONTEXTE DE FORÇAGE	18
FIG. 15.	DEFINITION DES ZONES DE CUBATURE	19
FIG. 16.	POSITION DES PKS 62 ET 64 SUR LE SCENARIO C1 AVEC BATHYMETRIE A 50 ANS	21
FIG. 17.	DEFINITION DES ZONES DE CUBATURE	23
FIG. 18.	MASSE MOYENNE SUR 8 MOIS DE VASE PAR SECTIONS MOYENNE (MASSE – MASSE JOUR 0)	25
FIG. 19.	SOURCE : L.A. ROMANA, PRESIDENT DU CS, PRESENTATION 'AUTOUR DE LA LOIRE DE LA MAINE A LA MER, L'ESTUAIRE...' NANTES, LE 18 SEPTEMBRE 2018	26
FIG. 20.	SOURCE GIP LOIRE ESTUAIRE : PROGRAMME INTERREGIONAL LOIRE GRANDEUR NATURE PAYS DE LA LOIRE 2000-2006, ETUDES PROSPECTIVES AVAL	27
FIG. 21.	VARIATION DES SECTIONS DANS LE MODELE ACTUEL (BATHYMETRIE 2008-2010)	28
FIG. 22.	VARIATION DES SECTIONS POUR LES 3 SCENARIOS MODELISES	29

Objet de l'étude

Dans le cadre de la mise en œuvre du programme de rééquilibrage du lit de la Loire entre les Ponts-de-Cé et Nantes, les aménagements actuellement étudiés présentent une faisabilité favorable quant aux questions associées aux niveaux de crue, à la navigabilité du bief (essentiellement plaisance) ou encore vis-à-vis des enjeux de migration piscicole notamment associés à la civelle. La question du stock sédimentaire mobilisable et de la charge entrante sont des leviers clé de la stratégie qui devront faire l'objet d'une évaluation particulière dans le dispositif de suivi du programme global.

Dans ce contexte, et afin d'évaluer l'impact d'un aménagement sur le site de Bellevue, VNF a souhaité mobiliser le modèle numérique hydro-sédimentaire en trois dimensions de l'estuaire de la Loire, développé par SOGREAH en 2006-2010 pour le compte du GIP Loire Estuaire (GIP LE) dans le cadre de son « Programme de restauration de la Loire estuarienne en aval de Nantes ».

L'objet de la présente étude porte sur la mise en œuvre de ce modèle hydro-sédimentaire en trois dimensions de l'estuaire de la Loire, développé sous TELEMAC V6P1 par ARTELIA (anciennement SOGREAH) pour le compte du GIP Loire Estuaire (GIP LE).

Il s'agit de simuler l'évolution des niveaux d'eau, des vitesses du courant, de la salinité, de la matière en suspension et de la crème de vase à l'échelle de l'estuaire, suite à la réalisation d'un aménagement sur le site de Bellevue.

Dans un précédent rapport 8411793-R1-V3, les simulations présentées portaient sur l'état actuel, les configurations d'aménagements B1d et C1d de Bellevue issues des études préliminaires du LOT 1 du programme de rééquilibrage du lit de la Loire entre les Ponts-de-Cé et Nantes.

Dans ce présent rapport R2, est présenté les résultats de la configuration d'aménagement C1 avec un état amont des fonds à 50 ans et les résultats de l'état tendanciel avec un état amont des fonds à 50 ans.

Synthèse

Le scénario C1 d'aménagement sur le site de Bellevue, avec une bathymétrie amont à 50 ans qui est étudié ici, est la combinaison :

- D'un ouvrage dit C1 : principalement composé d'un duis submersible.
- D'une bathymétrie amont (> au pk 58) à 50 ans schématisée : application d'évolutions du lit par tronçons de 1km issues de modélisations morphodynamiques sableuses (CNR/Egis, Hydratec, Artelia).

La modélisation de ce scénario a été comparée au modèle dit actuel avec une bathymétrie 2008-2010 et au scénario tendanciel qui correspond à un état actuel avec une bathymétrie amont à 50 ans schématisée : application d'évolutions du lit par tronçons de 1km issues de modélisations morphodynamiques sableuses (CNR/Egis, Hydratec, Artelia).

Les principales conséquences de ce scénario C1 avec bathymétrie à 50 ans sur la dynamique estuarienne aval à l'ouvrage sont les suivantes:

Hydrodynamique

Niveaux de pleine mer :

A l'aval de l'ouvrage, l'impact moyen sur les pleines mers est inférieur à 6 cm et inférieurs à 5 cm à l'aval du pk 55. On peut considérer qu'à l'aval de ce pk l'impact sur la pleine mer reste de l'ordre de l'incertitude de modélisation. L'impact maximal sur la pleine mer peut avoisiner les 22 cm au droit de l'ouvrage. On voit que sur cette partie aval, que l'impact est déjà principalement compris dans l'impact de l'état tendanciel.

Niveaux de basse mer :

L'impact moyen à l'aval de l'ouvrage sur les basses mers est inférieur à 20 cm (diminution de la cote de basse mer) au droit de l'ouvrage et se réduit à moins de 5 cm à l'aval du pk 35. On peut considérer qu'à l'aval de ce pk l'impact sur la basse mer reste de l'ordre de l'incertitude de modélisation. L'impact maximal peut être de 50 cm au droit de l'ouvrage. On voit que sur cette partie aval, l'impact aval est principalement dû à l'ouvrage en lui-même et non à la remontée des fonds amont.

Impact moyen sur les vitesses en flot et jusant :

A l'aval de l'ouvrage, le flot est impacté entre l'ouvrage et le pk 56 avec un impact moyen supérieur à 5 cm/s. il n'y a aucun impact moyen supérieur à 5 cm/s pour le jusant. On peut donc considérer qu'à l'aval du pk 56 l'impact moyen sur la vitesse est de l'ordre de l'incertitude de modélisation. L'impact maximal se situe à l'aval immédiat de l'ouvrage où le flot est de diminué en moyenne de 25 cm/s.

Vitesses utiles au transport des vases :

Les vitesses utiles au transport (supérieures à 0,5 m/s) sont peu modifiées à l'aval des ouvrages sauf localement à l'aval immédiat de l'ouvrage où les vitesses de flot sont plus ralenties que celle de jusant. Par contre pour un seuil de vitesse plus important, comme 1 m/s qui correspond à des phases de transport plus intense, les temps de dépassement restent quasiment identiques en flot, mais sont diminués en jusant entre le pk 35 et l'ouvrage ce qui amplifie légèrement l'asymétrie des vitesses sur ce secteur.

Intrusion haline

Les modifications sur la dynamique haline pour le seuil à 0,5 g/l comme pour la salinité moyenne sur 8 mois sont inférieures à 0,1 g/l.

Matière en suspension et crème de vase

L'augmentation de l'asymétrie de la marée entre le pk 35 et l'ouvrage permet un transfert de la masse plus important de l'aval vers l'amont. La crème de vase est notamment plus importante dans le secteur compris entre le pk 47 et Nantes pk 55 (environ 10 cm de dépôt en plus, pendant 30 à 50% du temps) alors qu'elle diminue à l'aval entre les pks 4 et 35. Ces dépôts supplémentaires à l'amont sont à relativiser du fait qu'ils ne sont pas pérennes et que les variations journalières actuelles d'épaisseur de vase sont bien plus importantes. En effet, l'épaisseur de vase peut varier entre 2 et 5 mètres sur cette zone lorsque l'on est par faible débit.

Le scénario C1 à 50 ans a finalement un comportement assez similaire à celui de l'état tendanciel en terme d'impact sur le bouchon vaseux mais avec une intensité plus marquée.

Les MES suivent la même logique que la crème de vase avec en plus un recul du front de MES entre le pk 58 et l'ouvrage à cause de l'effet local de celui-ci. La masse du bouchon vaseux n'est pas significativement impactée par les deux scénarios.

Variation des sections le long de l'estuaire

Les sections calculées sous le niveau moyen ne sont pas fortement modifiées par rapport à l'état actuel. Les pentes moyennes de variations de sections en fonction des pks sont donc relativement peu modifiées ce qui permet de conforter le fait que l'ouvrage ne bouleversera pas le fonctionnement actuel de l'estuaire.

REPONSES AUX OBJECTIFS DE L'ETUDE

Question	Réponse
<p>Incidences du scénario d'aménagement C1 avec bathymétrie amont à 50ans sur l'estuaire aval en :</p> <p>niveau d'eau, vitesse, MES et salinité, sections sous le niveau moyen</p>	<p>Les impacts du scénario à l'aval des ouvrages sont jugés assez faibles et sont limités :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Au pk 55 pour la pleine mer (impact moyen < 5cm) ; • Au pk 35 pour la basse mer (impact moyen < 5cm) ; • Au pk 56 pour les vitesses (impact moyen < 5cm/s). <p>La salinité n'est pas impactée (impact moyen < 0,1g/l).</p> <p>La crème de vase comme la MES sont un peu plus transférées de l'aval vers l'amont mais le front amont est repoussée vers l'aval par l'ouvrage. Il en découle une concentration et une épaisseur plus forte de sédiment entre les Pks 47 et 55, alors que partout ailleurs on note une diminution. Cependant, les évolutions restent faibles vis-à-vis des variations journalières actuelles.</p> <p>La masse du bouchon vaseux est inchangée.</p> <p>Les pentes moyennes de variations de sections en fonction des pks sont relativement peu modifiées ce qui permet de conforter le fait que l'ouvrage ne bouleversera pas le fonctionnement actuel de l'estuaire.</p>

1. DESCRIPTION DU MODELE 3D MORPHOLOGIQUE « VASE » DE L'ESTUAIRE

Le modèle hydro-sédimentaire 3D « vase » opérationnel, élaboré par ARTELIA pour le compte du GIP Loire Estuaire avait pour objet de tester des scénarios d'aménagement à grande échelle du fleuve dans le cadre du programme Interrégional Loire Grandeur Nature. Il a été employé pour l'évaluation de scénarios de restauration de l'estuaire et de création de vasières intertidales en permettant de décrire à une échelle fine les écoulements et les transferts particuliers.

Le modèle développé est basé sur le système Telemac-3D développé par EDF-DRD. L'emprise modélisée s'étend d'Ancenis (point kilométrique 90 en amont à partir de Saint-Nazaire) à 40km des côtes au large. Le modèle tient notamment compte des zones submersibles latérales à l'aval de Le Pellerin.

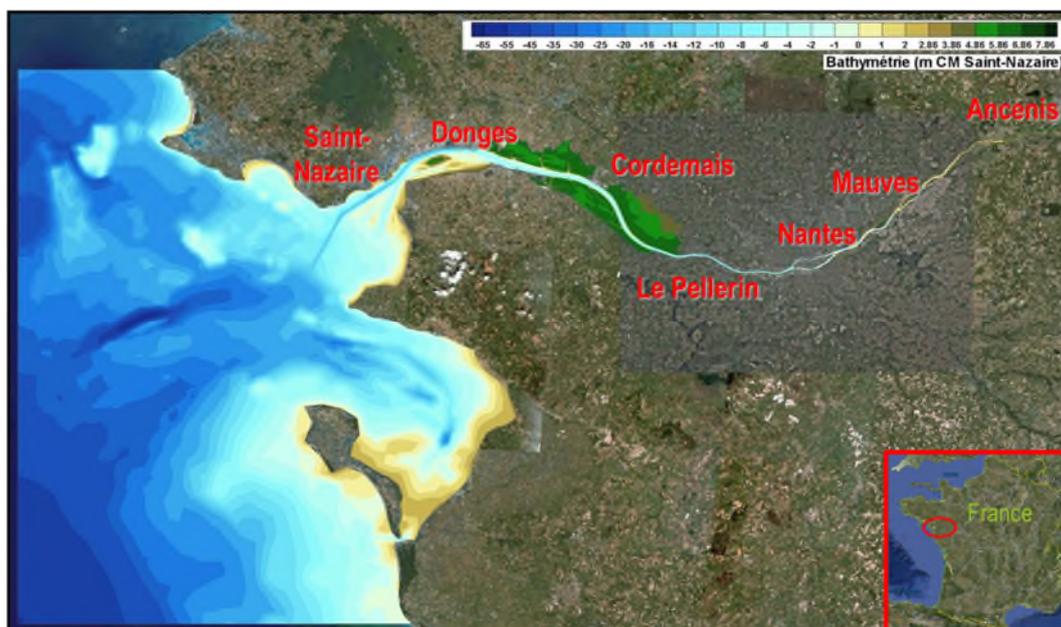


Fig. 1. Emprise et bathymétrie du modèle hydro-sédimentaire 3D en vase

Le maillage horizontal de ce modèle global est composé d'environ 42 000 nœuds avec les arêtes des éléments triangulaires variant de 2,5 km au large à 150 ou 50m dans la Loire (Fig.2).

Le maillage vertical (Fig.3) est composé de 16 plans avec une stratégie de plans fixes (en rouge sur la figure) et de plans « sigma » (en noir) pour avoir un raffinement près du fond (2 à 5 plans espacés de 0,25m pour capter les gradients de courant, de salinité et de MES) et près de la surface pour intégrer proprement les effets du vent.

Le modèle est forcé par le débit journalier de la Loire, la variation du niveau de marée astronomique, la variation des niveaux moyens due aux variations de pression, les conditions de vagues et les conditions de vent.

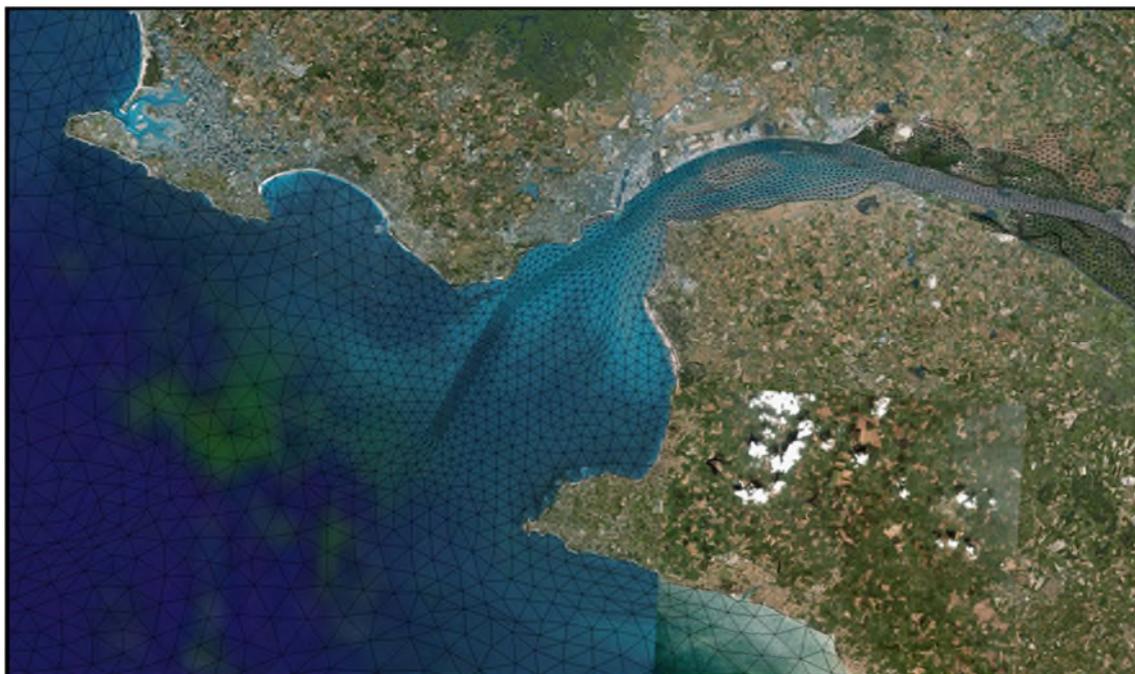


Fig. 2. Maillage horizontal du modèle hydro-sédimentaire 3D en vase

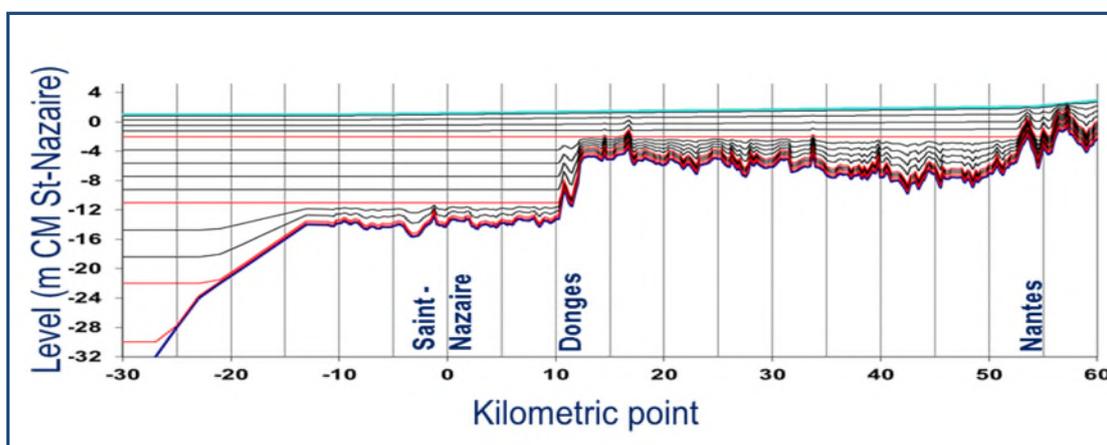
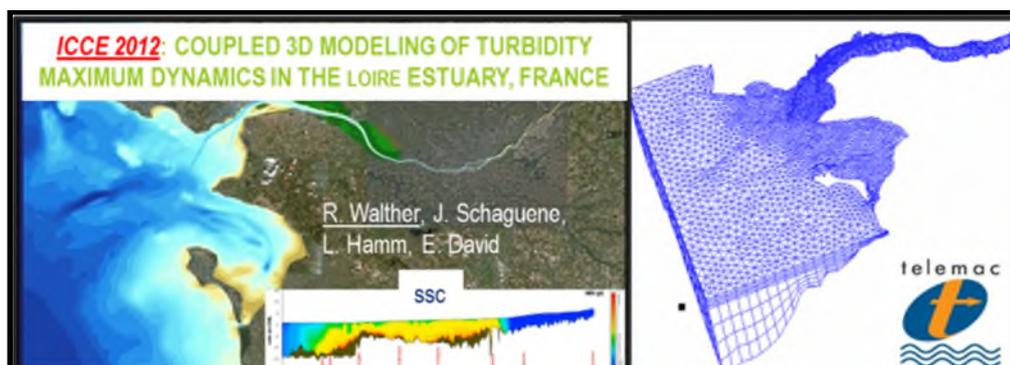


Fig. 3. Maillage vertical du modèle hydro-sédimentaire 3D en vase

Ce modèle 3D a été calibré et validé dans l'estuaire interne (*Walther et al., 2012*) et externe (*Walther et al., 2014*) en niveaux, courants, salinité et sédimentologie vaseuse (turbidité et morphologie).



Il inclut notamment :

- Une loi d'érosion spécifique à l'estuaire de la Loire (*M. Sanchez and D. Levacher, 2008*)
- Une loi de consolidation spécifique aux vases de la Loire (*M. Sanchez et al., 2004*)
- L'effet du glissement pour les vases liquides
- Un modèle de longueur de mélange multicouche pour le calcul de la turbulence en milieu stratifié (*R. Walther et al., 2009*)
- Le couplage de la rugosité du fond avec la crème de vase (*Hamm et Walther, 2008*)

Le modèle est capable de reproduire une année complète de dynamique de bouchon vaseux, en incluant l'expulsion de celui-ci par une forte crue et la recombinaison d'un bouchon vaseux dans l'estuaire interne par la suite (*Walther et al., 2012*).

Le modèle global développé et calé sur une bathymétrie 2008-2010 permet une analyse à l'échelle globale de la dynamique estuarienne : la taille des mailles varie entre 50 et 2500m et les zones submersibles sont introduites de façon schématique (*rapport 1711822- R17*). Le modèle sera utilisé ici en calage couplé (*rapport 1711822- R21*), 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. Ainsi un dépôt vaseux entraînera une diminution significative du frottement par rapport à un fond sableux.

Toutes les cotes dans le modèle et le présent rapport sont exprimées en mètre Cote Marine 96 et les débits de Loire sont les débits journaliers estimés à Montjean.

2. ADAPTATION DU MAILLAGE AUX CONFIGURATIONS D'AMENAGEMENT TESTEES

2.1. MAILLAGE

Le maillage du modèle a été localement raffiné entre le pk 62 et le pk 64 et forcé suivant des lignes de contrainte afin de pouvoir tenir compte de l'aménagement C1.

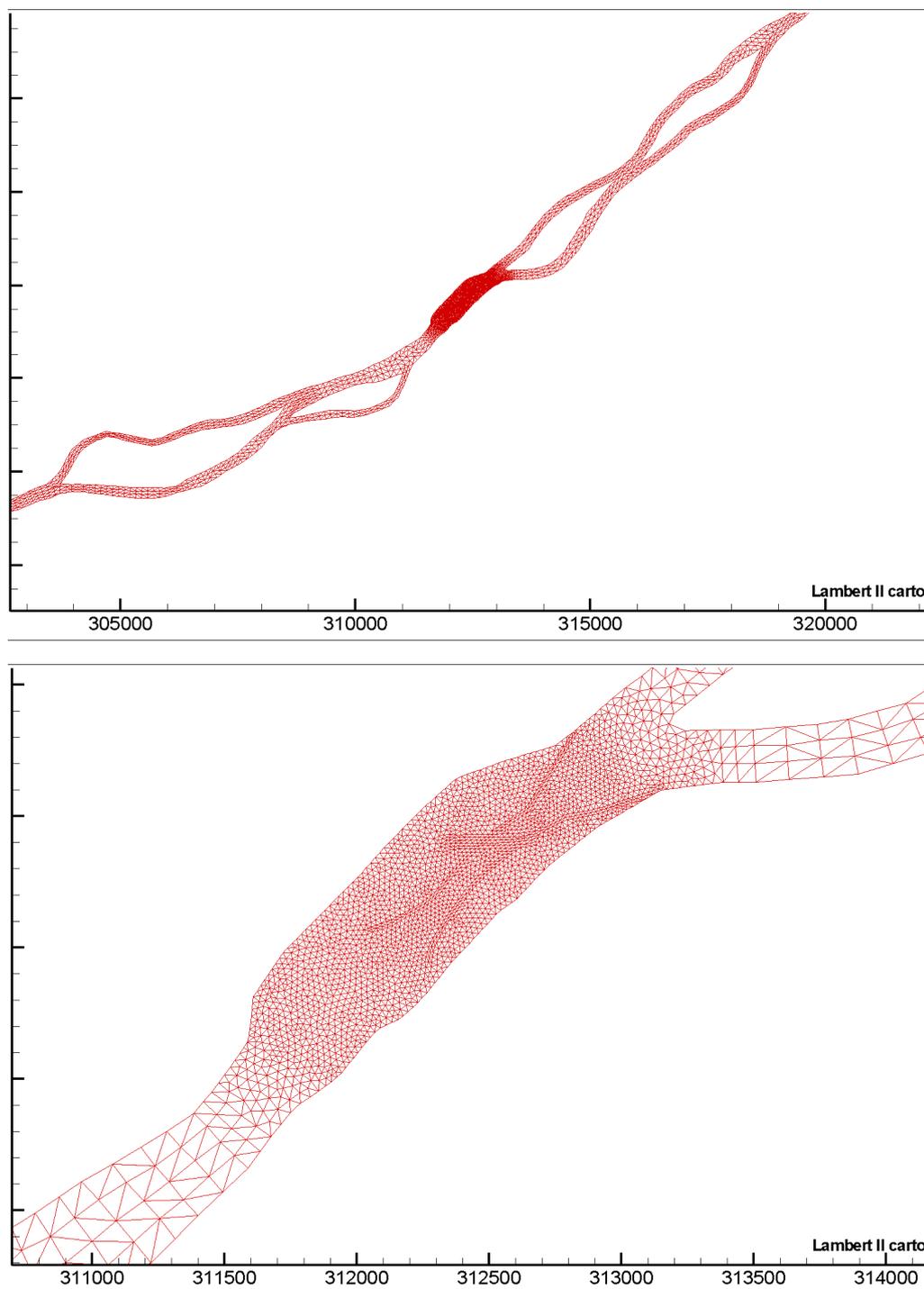


Fig. 4. Maillage adapté au scénario C1

La taille de maille reste cependant supérieure à 10 m, afin de pouvoir conserver le même pas de temps que celui utilisé dans le calage du modèle d'origine et de pouvoir aussi conserver des temps de calcul raisonnables. Le but de ce modèle ne sera donc pas d'étudier précisément l'écoulement 3D au niveau même de l'ouvrage. Il s'agit de tenir compte des modifications hydrodynamiques induites par chaque scénario, afin d'estimer les impacts sur l'estuaire aval à la fois sur l'hydrodynamique, la dynamique haline et le bouchon vaseux.

2.2. GEOMETRIE DU SCENARIO C1 ET FROTTEMENT ASSOCIE

Le scenario C1, consiste en :

- la construction d'un duis submersible à la côte +0.25m NGF (+3.41m CM), cette zone sera rugueuse et est représentée par un coefficient de Strickler de 30 ;
- le démontage d'épis ;
- le prolongement de la crête de l'îlot jusqu'au duis à la cote +0.25m NGF (+3.41m CM).

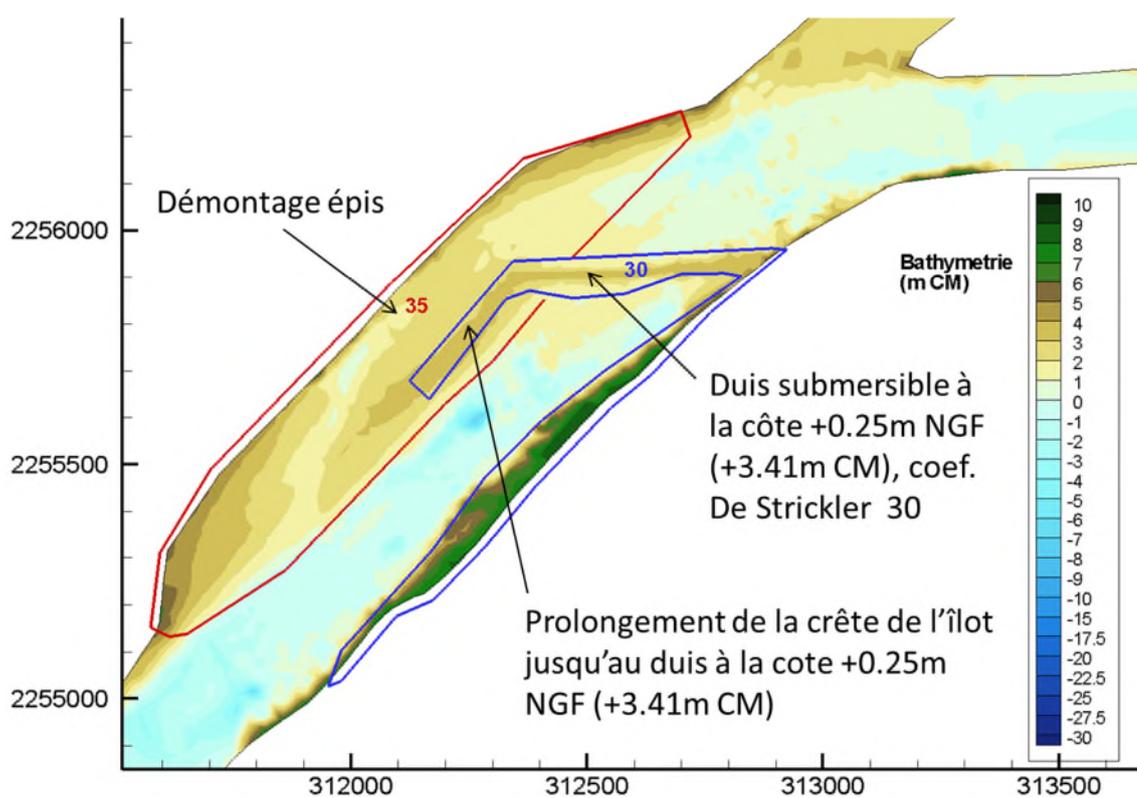


Fig. 5. Schéma de principe du scenario C1

2.3. BATHYMETRIE A 50 ANS DE L'ETAT TENDANCIEL ET DU SCENARIO C1

Des modélisations morphodynamiques sableuses de l'estuaire amont en présence de l'ouvrage de Bellevue C1 et sans l'ouvrage C1 ont été réalisées sur 50 ans :

- Par le groupement CNR/Egis entre les pks 58 et 73 (modélisation Telemac2D-Sisyphé en tenant compte de l'ouvrage de Bellevue).
- Par Hydratec entre les pks 64 et 90 (modélisation Hydra, en tenant compte de l'ouvrage de Bellevue et des différentes autres opérations amont du programme de rééquilibrage du lit de la Loire entre les Ponts-de-Cé et Nantes).
- Par Artelia, pour le bras de Neuve Macrière entre les pks 84 à 87 (modélisation Telemac2D-Sisyphé en tenant compte du remodelage des structures en enrochement entre les pks 82 et 100 : chevrettes, épis...)

Suivant les modèles et la finesse du maillage, soit des évolutions moyennées par tronçon de un kilomètre ont été appliqués sur la bathymétrie du modèle Telemac3d, soit une projection directe de la bathymétrie a été effectuée.

2.3.1. Tronçon : Pk 62-64

Entre le pk 62 à 64, le maillage du modèle Telemac-3D est suffisamment raffiné au niveau du maillage, pour pouvoir projeter directement les fonds issus du modèle 2D du groupement CNR/Egis après 50 ans de simulation:

SCENARIO C1 et TENDANCIEL avec un état amont des fonds à 50 ans

Rapport 8411793-R2- final

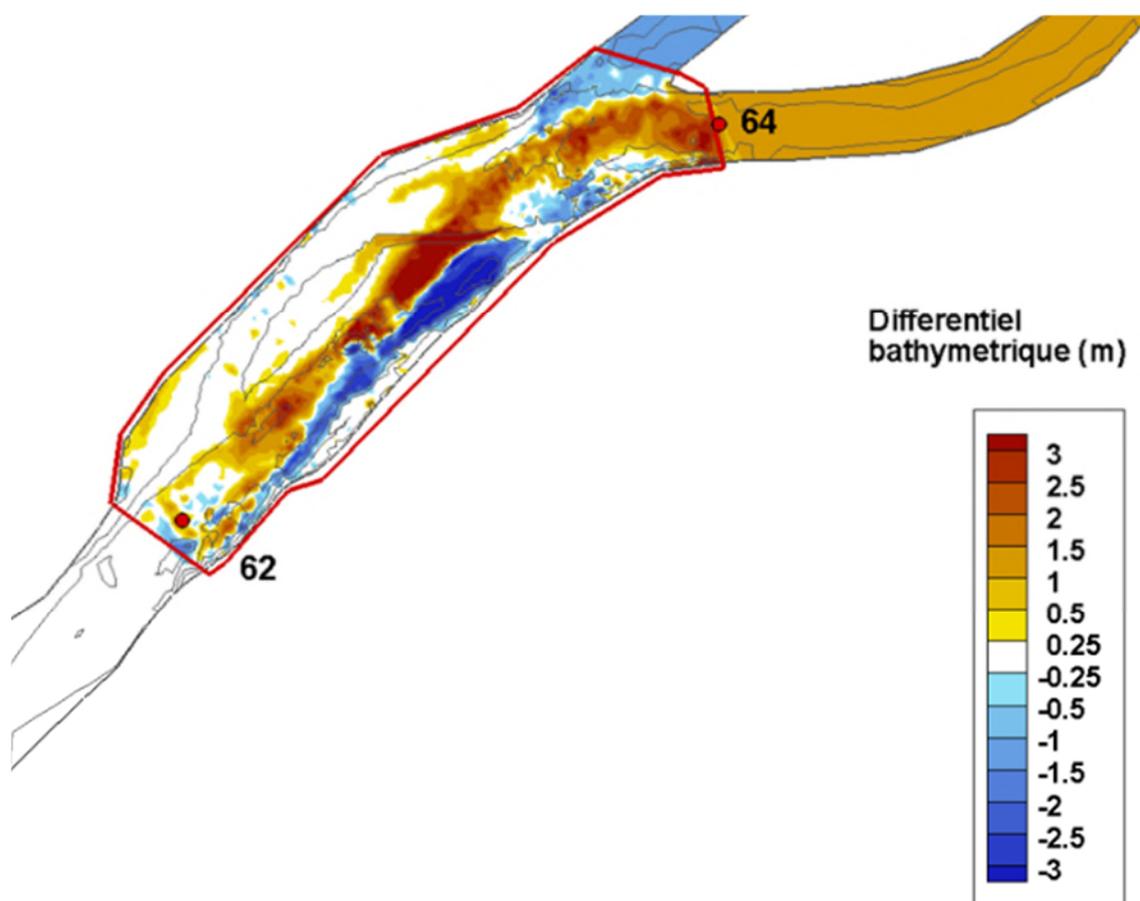
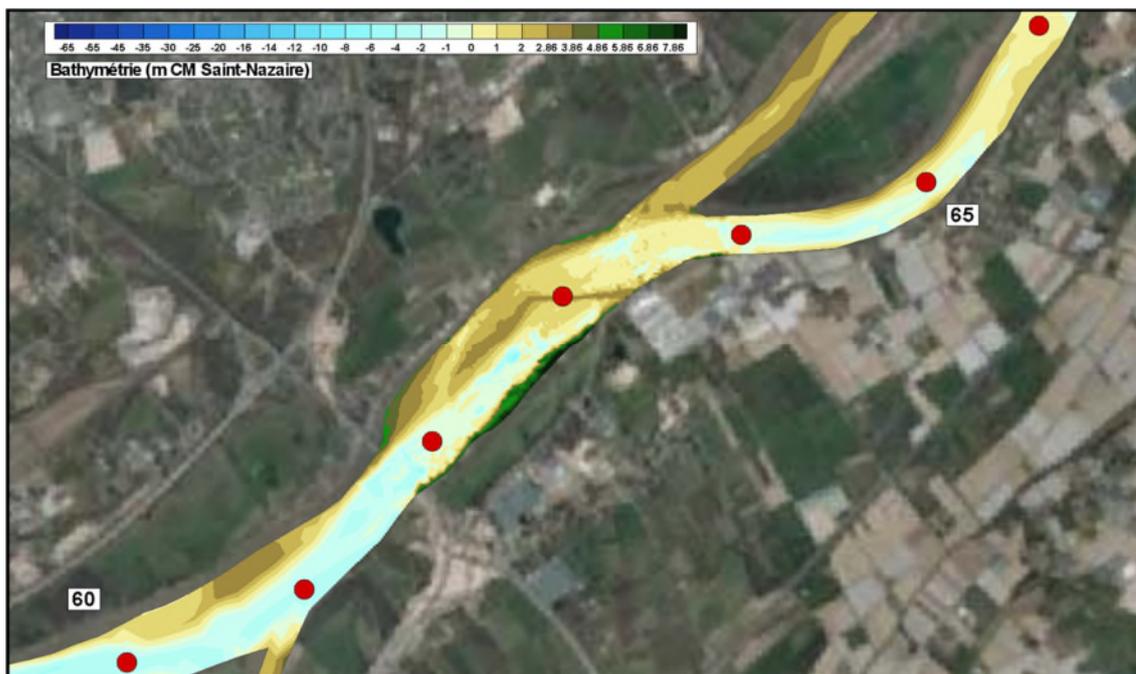


Fig. 6. Bathymétrie du modèle C1 à 50 ans entre les pks 62 et 64 et différentiel avec la bathymétrie 2008-2010 du modèle actuel

SCENARIO C1 et TENDANCIEL avec un état amont des fonds à 50 ans

Rapport 8411793-R2- final

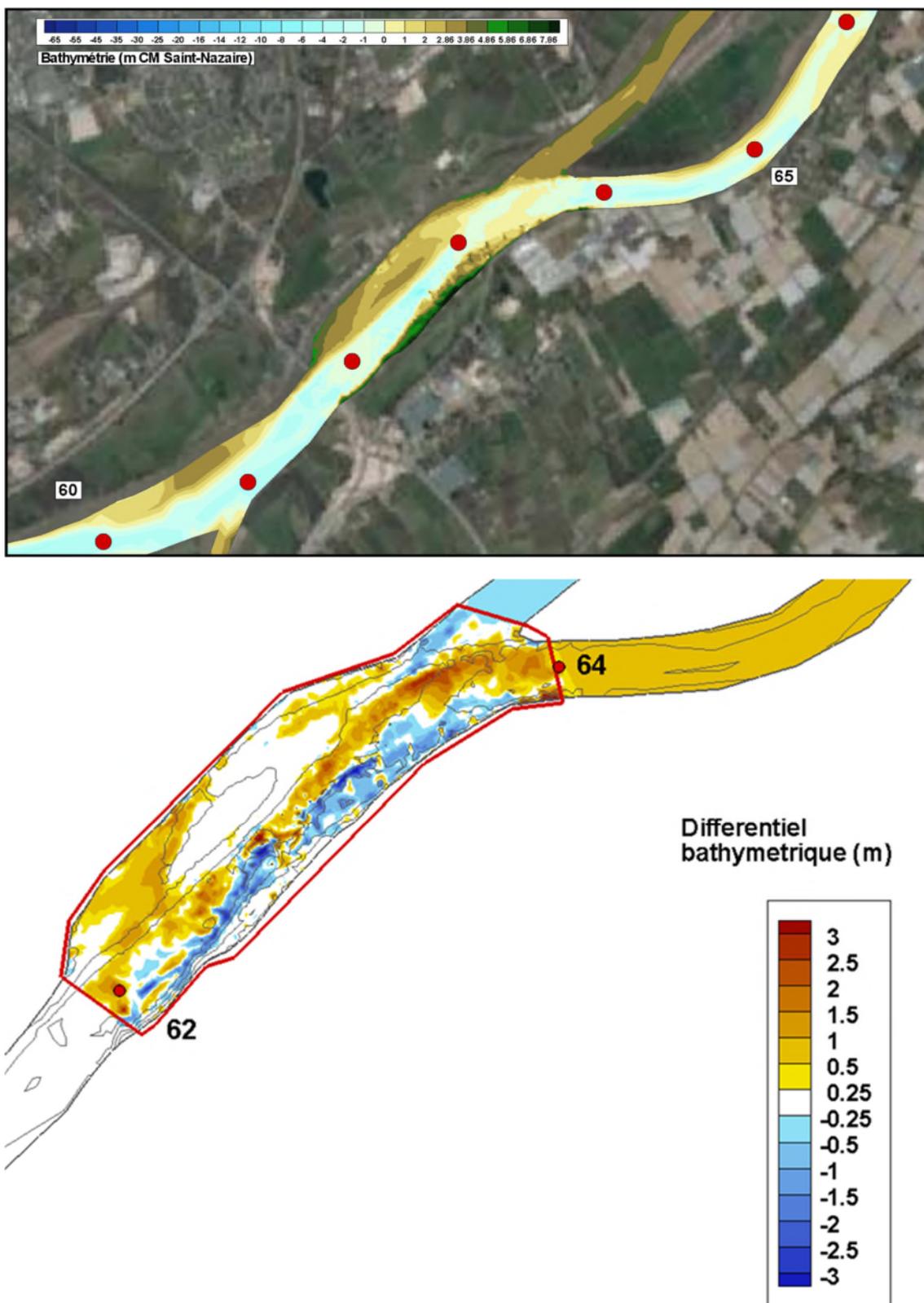


Fig. 7. Bathymétrie du modèle tendanciel à 50 ans entre les pks 62 et 64 et différentiel avec la bathymétrie 2008-2010 du modèle actuel

2.3.2. Tronçons : Pk 58-62 et 64-90

Sur les tronçons pk 58-62, pk 64-72 et le bras de Neuve Macrière, les bathymétries initiales moyennées par kilomètre issues des modèles :

- Telemac3D actuel (2008-2010) et le modèle Telemac2d-Sisyphe du groupement CNR/Egis (LOT 1),
- Telemac3D actuel (2008-2010) et le modèle Telemac2d/Sisyphe d'Artelia (LOT 2),

sont relativement semblables, nous avons directement donc pu utiliser directement les évolutions calculées par les différents modèles. Ces évolutions du lit mineur sont moyennées par tronçons de 1km.

Chaque section du modèle 3D (bathymétrie 2008-2010) a alors été modifiée par cette évolution. Ces évolutions sont interpolées sur une distance de 200m entre deux tronçons de 1 km afin de ne pas intégrer de rupture bathymétrique dans le modèle.

Sur le tronçon pk 72-90, les bathymétries initiales entre le modèle Telemac3D actuel (2008-2010) et la bathymétrie « morphodynamiquement » initialisée du modèle Hydra étant relativement différentes, nous avons utilisées la cote moyenne finale du modèle Hydra. Chaque section du modèle 3D (bathymétrie 2008-2010) a été modifiée pour obtenir cette cote moyenne. De même, ces évolutions sont interpolées sur une distance de 200m entre deux tronçons de 1 km afin de ne pas intégrer de rupture bathymétrique dans le modèle.

L'intégration de l'ensemble de ces résultats dans le modèle Telemac 3D donne les thalwegs suivant dans le lit mineur :

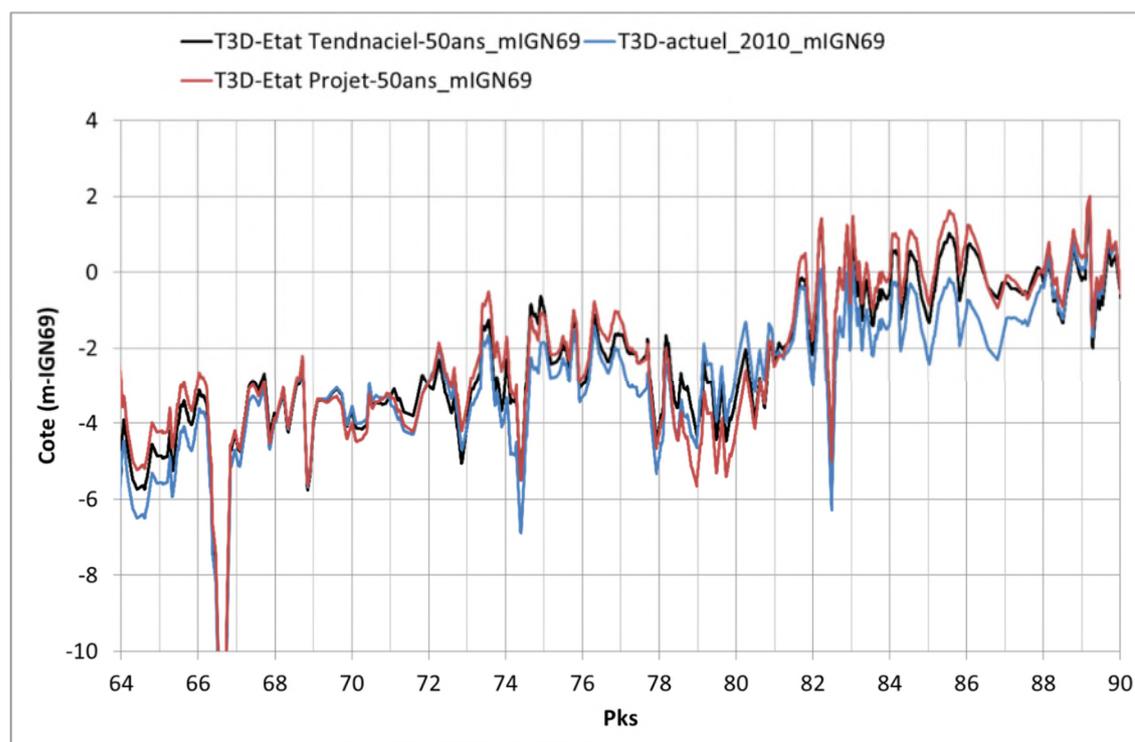


Fig. 8. Bathymétries du bras principal du modèle Telemac-3D : bathymétrie actuelle (2008-2010), scénario C1 à 50 ans et scénario tendanciel à 50 ans

SCENARIO C1 et TENDANCIEL avec un état amont des fonds à 50 ans

Rapport 8411793-R2- final

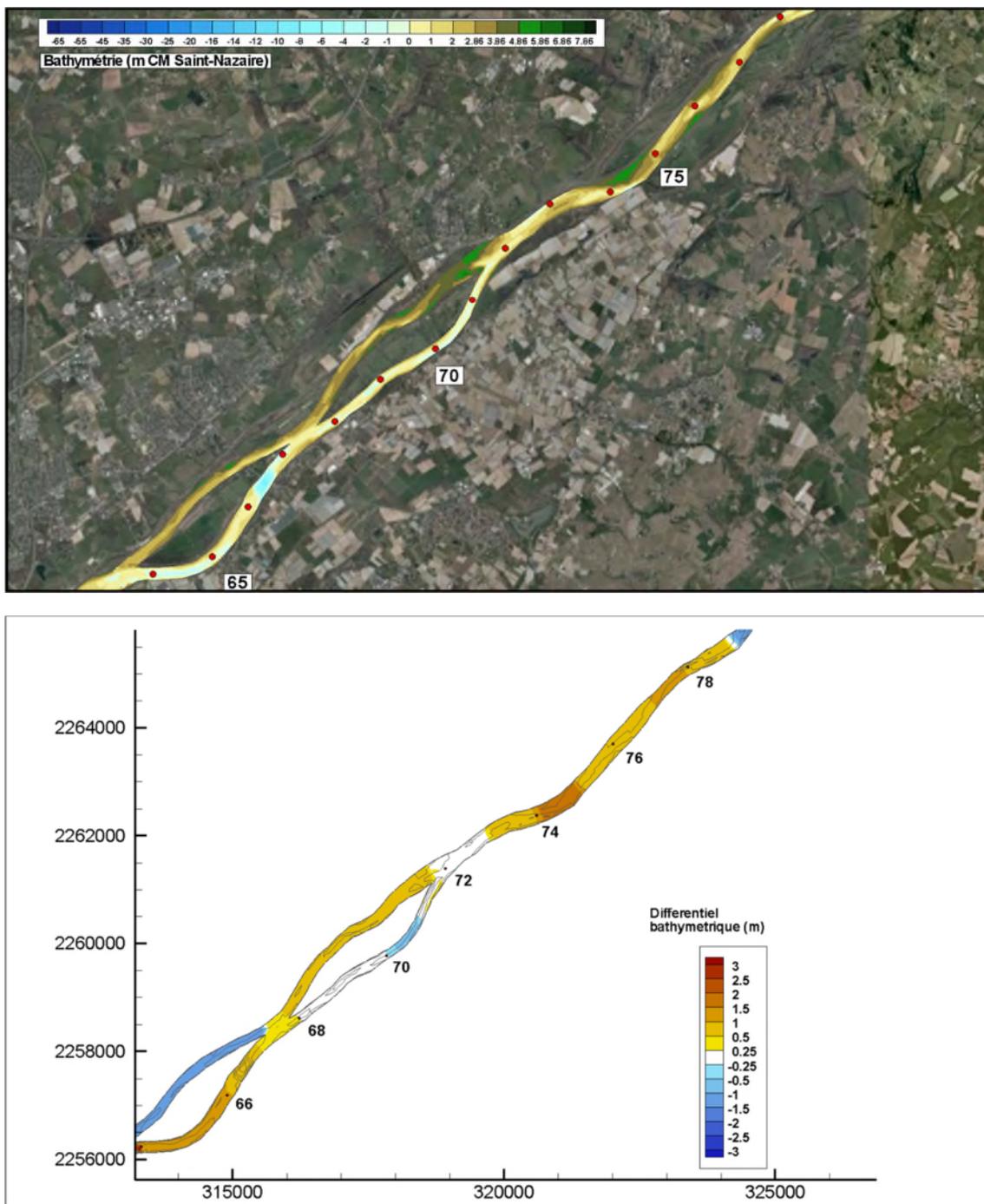


Fig. 9. Bathymétrie et évolutions pour le scenario C1 à 50 ans entre les pks 64 et 78

SCENARIO C1 et TENDANCIEL avec un état amont des fonds à 50 ans

Rapport 8411793-R2- final

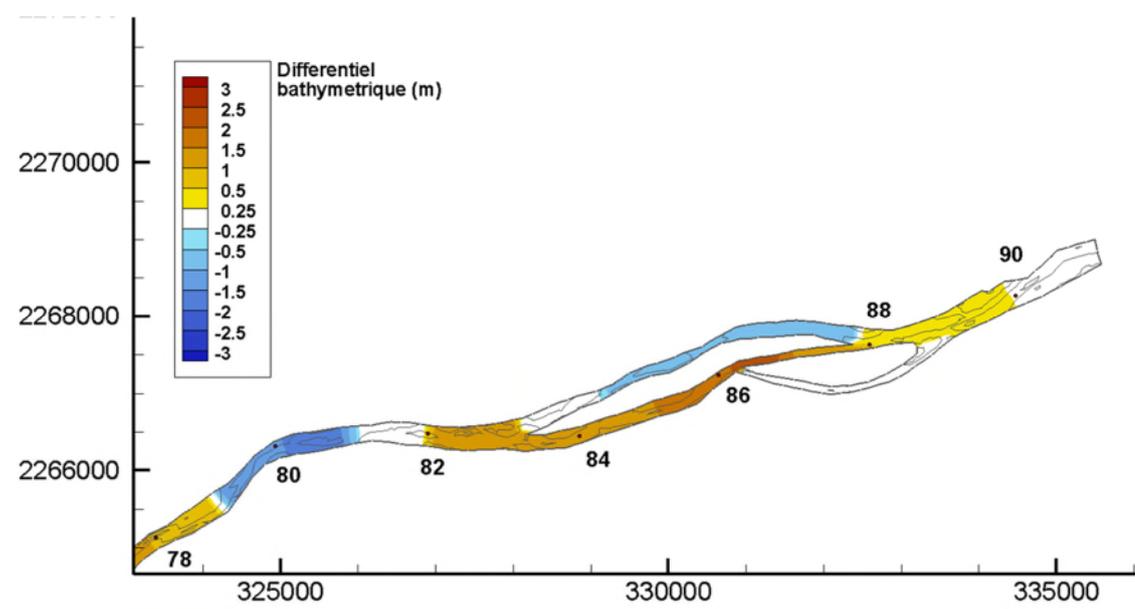
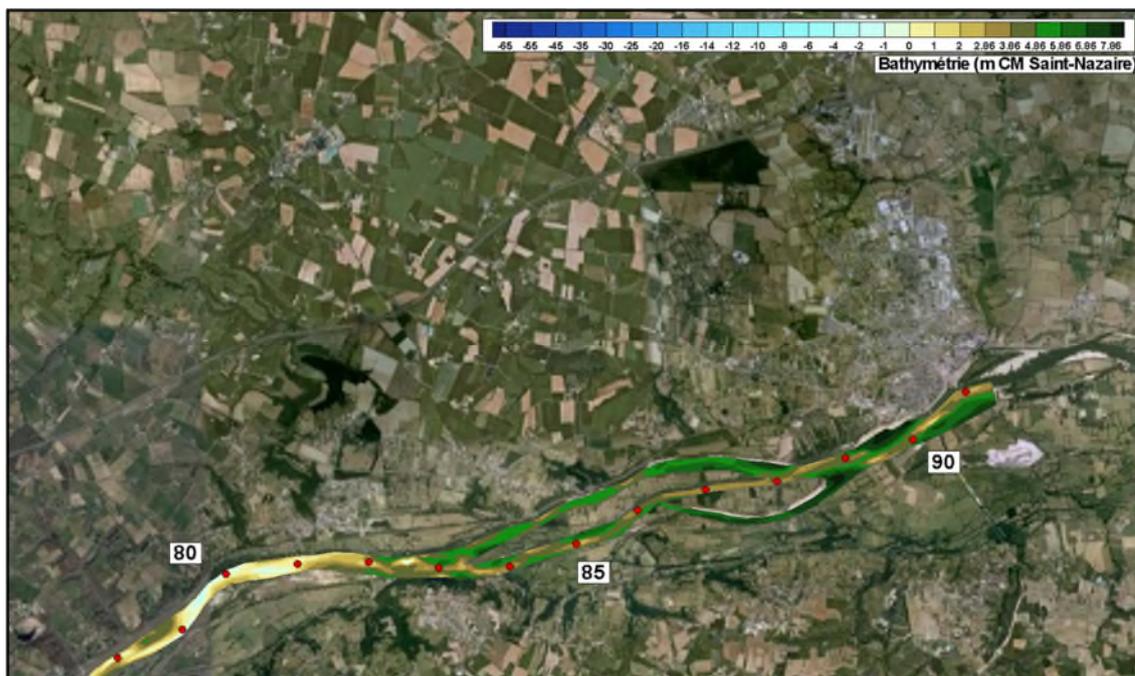


Fig. 10. Bathymétrie et évolutions pour le scenario C1 à 50 ans entre les pks 78 et 90

SCENARIO C1 et TENDANCIEL avec un état amont des fonds à 50 ans

Rapport 8411793-R2- final

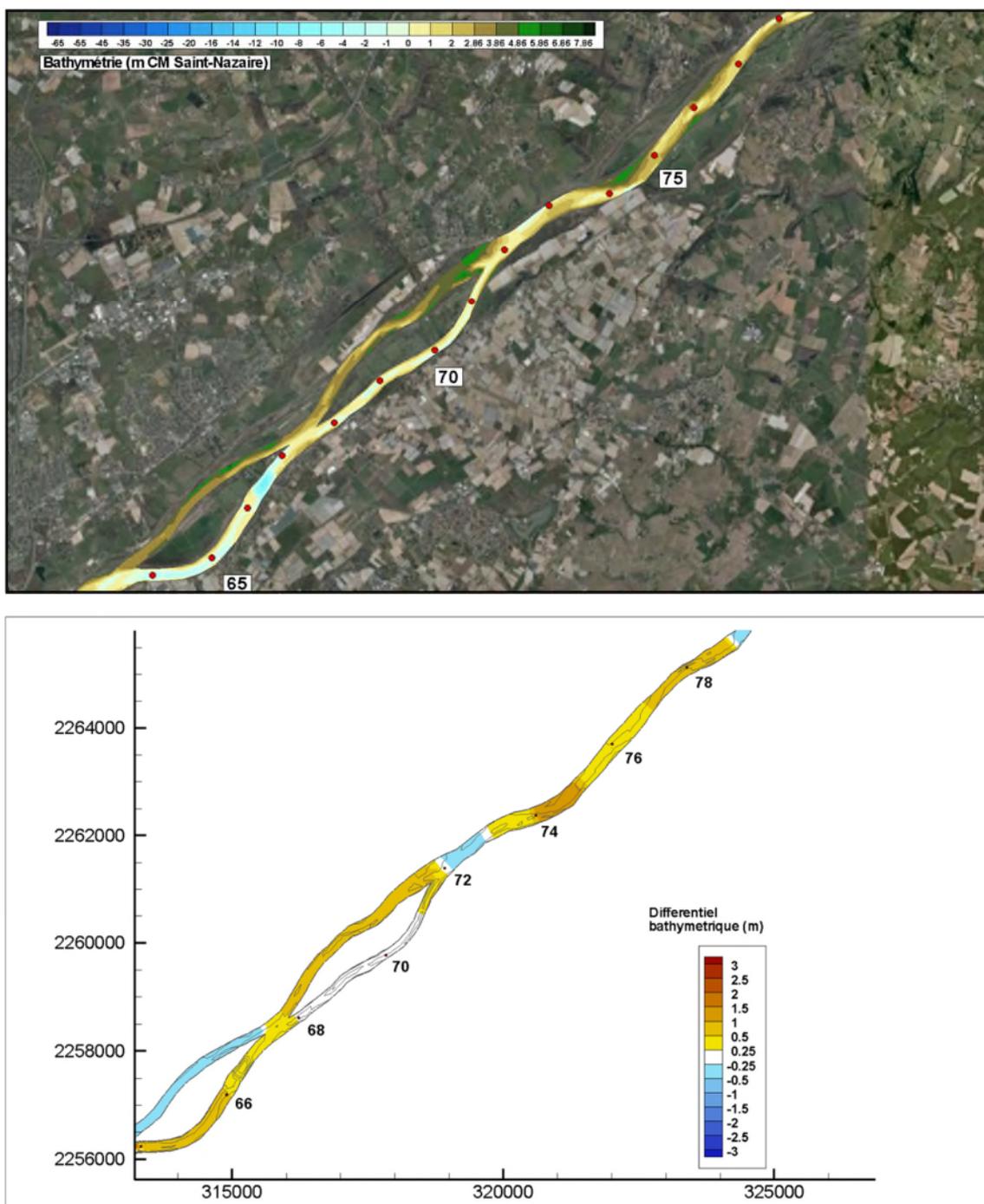


Fig. 11. Bathymétrie et évolutions pour le scenario tendencial à 50 ans entre les pks 64 et 78

SCENARIO C1 et TENDANCIEL avec un état amont des fonds à 50 ans

Rapport 8411793-R2- final

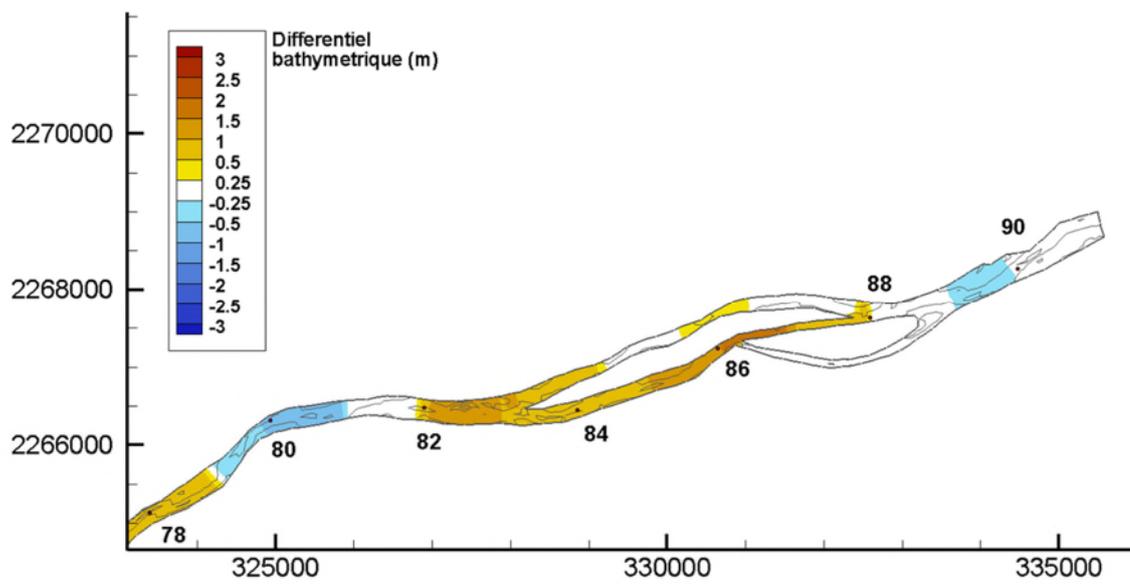
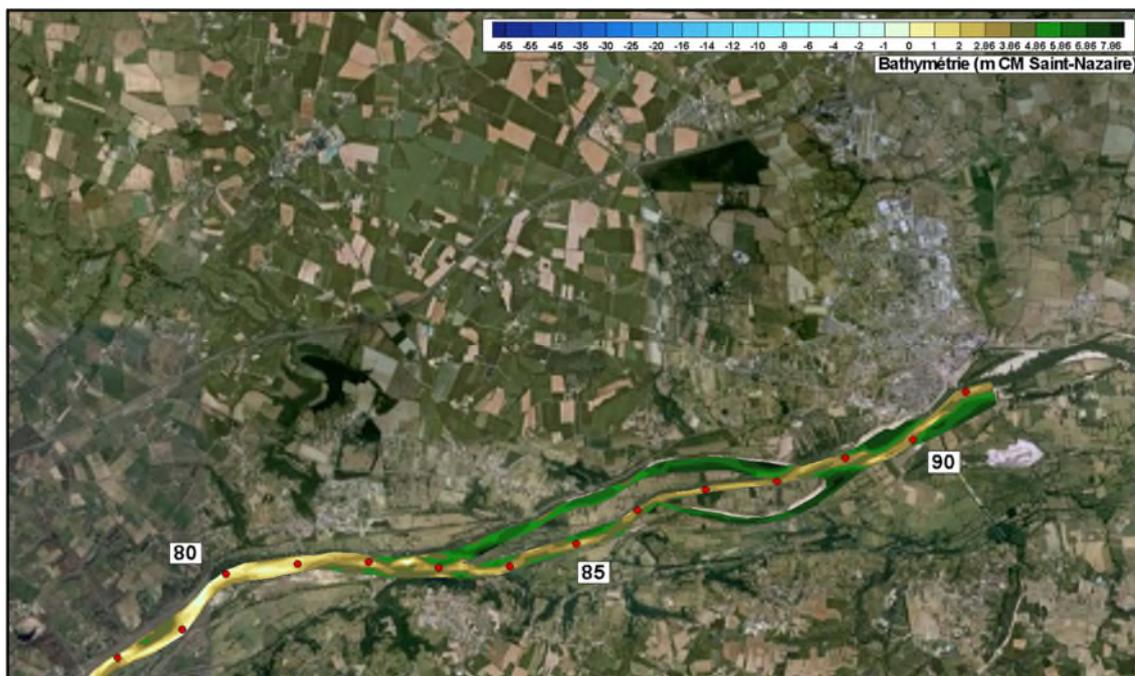


Fig. 12. Bathymétrie et évolutions pour le scénario tendanciel à 50 ans entre les pks 78 et 90

A l'aval du pk 58, faute d'information d'évolutions à 50 ans, l'état des fonds du modèle Telemac-3D bathymétrie 2008-2010 reste inchangé.

3. SIMULATIONS DU SCENARIO HYDRO-METEOROLOGIQUE DE REFERENCE

Les conditions initiales et le forçage en débit, vent, houle, marée, niveau moyen et apports amont sont issus du *rapport 1711822- 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.

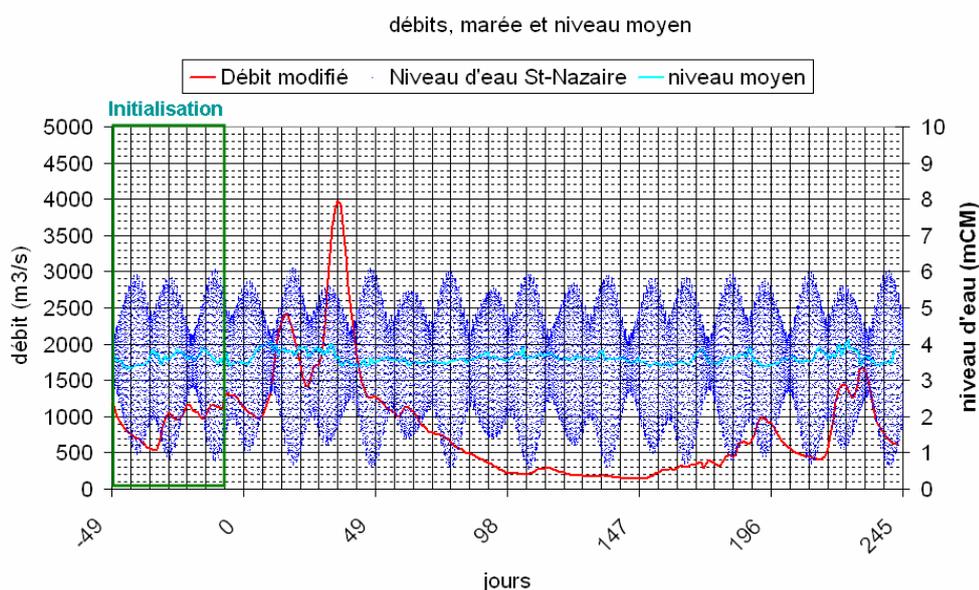


Fig. 13. Forçage dit actuel, en marée, niveau moyen et débit

Ces forçages sont identiques pour le scénario C1 à 50ans, le scénario tendanciel à 50 ans et le modèle avec bathymétrie actuelle (2008-2010). Le changement climatique n'est donc pas pris en compte dans ces calculs.

4. TYPE D'EXPLOITATION DES RESULTATS

Deux types d'analyses sont effectués et présentés ci-dessous. Dans tous les cas, tous les graphiques ne sont pas présentés, seuls ceux présentant un intérêt pour l'analyse le sont.

4.1. ANALYSE SUIVANT LES POINTS KILOMETRIQUES

Le premier type d'analyse des résultats porte sur les niveaux de surface libre, vitesse, salinité, MES et épaisseur de crème de vase suivant les points kilométriques.

Deux échelles de temps sont alors analysées:

- Une analyse à l'échelle des 243 jours exploitables du calcul, en passant par l'étude des temps de non-dépassement de seuils pour les variables étudiées suivant les points kilométriques, ou des graphiques temporels pour un pk donné.
- Une analyse à l'échelle de la journée sur une marée de vive eau typique suivant les points kilométriques. La marée sélectionnée se situe au jour 135 du calcul (après initialisation), il s'agit d'un coefficient 89 avec un débit de 120 m³/s.

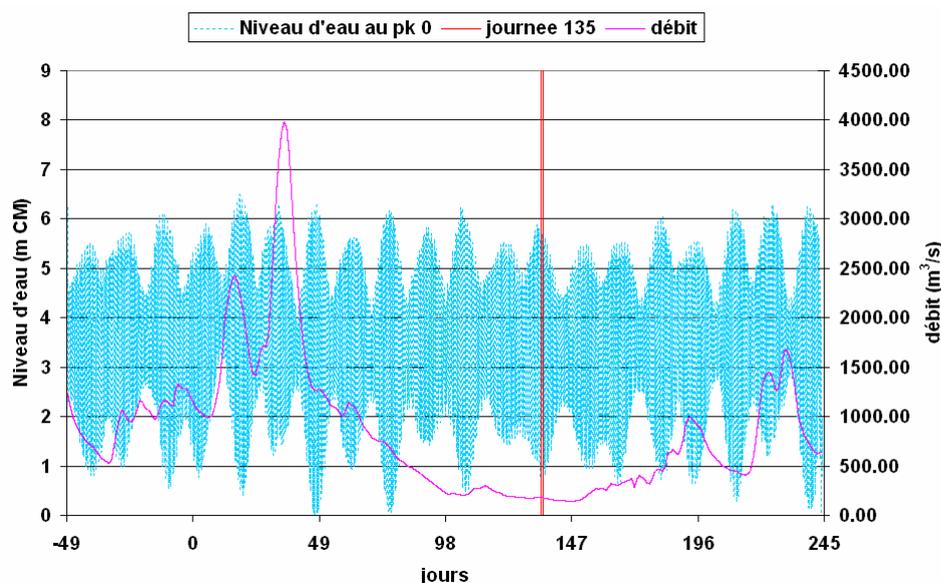


Fig. 14. Journée 135 dans son contexte de forçage

4.2. ANALYSE PAR CUBATURE DE ZONE

Un second type d'analyse porte sur des cubatures temporelles de variables telles que la crème de vase ou les MES, pour mieux appréhender les mouvements des masses dans l'estuaire.

Pour cela 6 grandes zones (basées sur les zones de dragage du port du GPMNSN) ont été définies : section 1-2-3, section 4-5-6, section 7-8, section 9-10, section 11-12 et section amont.

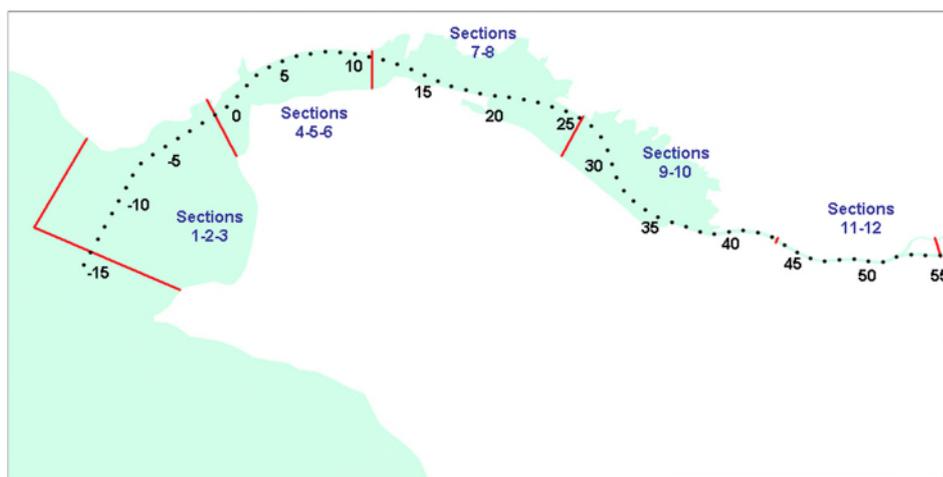


Fig. 15. Définition des zones de cubature

5. LES RESULTATS OBTENUS

5.1. HYDRODYNAMIQUE

La **figure hors-texte 1.1 (zoom en 1.2)** présente les temps de non dépassement des niveaux d'eau pour 3 seuils : 2,66 m, 4,16 m et 5,66 m CM, soit 1,5 m sous le niveau des duis, au niveau des duis et 1,5 m au-dessus du niveau des duis.

Temps de dépassement aux cotes : 2,66 m, 4,16 m et 5,66 m CM

A l'aval de l'ouvrage, les niveaux ne sont que très peu impactés par le scénario C1, seul le niveau bas (2,66 m CM) montre une diminution de temps de dépassement restant inférieure à 4% dont plus de la moitié de l'impact est déjà compris dans l'état tendanciel.

A l'amont de l'ouvrage, les cotes sont impactées du fait de l'implantation de l'ouvrage et du fait de la remontée des fonds amont. On voit que sur les niveaux 2,66 et 4,16 m CM, la majeure partie de l'impact (environ 10% d'augmentation pour le niveau 4,16 m CM) est due à l'ouvrage en lui-même pour les pks inférieurs à 75. Pour le niveau de 5,66 m CM l'impact (25% d'augmentation au maximum au pk 25) est principalement dû à la remontée des fonds (l'impact est déjà compris dans l'état tendanciel en majeure partie).

Les **figures hors-texte 1.5 et 1.6**, présentent l'impact moyen, maximum et minimum sur les niveaux de pleine et basse mer tout le long de l'estuaire. La **figure hors-texte 1.3 et 1.4** présente pour exemple, les niveaux de pleine-mer (PM) et basse-mer (BM) pour le jour 135 (vive-eau à l'étiage) et le jour 143 (morte-eau à l'étiage étiage). On notera qu'au-dessus du pk 83 en morte-eau il n'y a plus de marnage dans l'état tendanciel et projet ce qui n'est pas le cas dans l'état actuel.

Pleines mers :

A l'aval de l'ouvrage, l'impact moyen sur les pleines mers est au maximum de 6 cm et inférieurs à 5 cm à l'aval du pk 55, les impacts maximaux sont de 22 cm au droit de l'ouvrage. A l'amont de l'ouvrage, l'impact augmente de 10 cm en moyenne au pk 66 à 0.52 m en moyenne au pk 87.

On voit, par comparaison des scénarios, que cet impact sur les pleines mers est principalement dû à la remontée des fonds qui est comprise dans l'état tendanciel à 50 ans.

Basses mers :

L'impact moyen à l'aval de l'ouvrage sur les basses mers est inférieur à 20 cm (diminution de la cote de basse mer) au droit de l'ouvrage et se réduit à moins de 5 cm à l'aval du pk 35. L'impact maximum peut être de 50 cm au droit de l'ouvrage. On voit que sur cette partie aval, l'impact aval est principalement dû à l'ouvrage en lui-même et non à la remontée des fonds amont.

A l'amont de l'ouvrage, l'impact moyen sur la basse mer est au maximum de 0,95 m au droit de l'ouvrage et diminue jusqu'à 0,40 m au pk 72. Sur cette portion, c'est l'ouvrage qui crée la majeure partie de l'impact. Au-dessus du pk 82, l'impact augmente jusqu'à 0,9 m au pk 85, ce qui est principalement dû à la remontée des fonds sur cette zone.

Les **figures hors-texte 1.7 à 1.13**, présentent les impacts temporels sur les niveaux de pleine et basse mer aux pks 40, 50, 55, 58, 60 (aval de l'ouvrage), 70 (amont de l'ouvrage) et 87.

Ces figures permettent de montrer à quel moment ces impacts ont lieu. On voit par exemple que les impacts sont principalement présents à l'aval de l'ouvrage pour des débits inférieurs à 1500 m³/s et pour des marées de forts coefficients.

Les **figures hors-texte 1.14 à 1.17** montrent des sorties temporelles, au cours du jour 135, de la vitesse moyenne et de la surface libre aux pks : 50, 62 (aval immédiat de l'ouvrage), 64 (amont immédiat de l'ouvrage), 70.

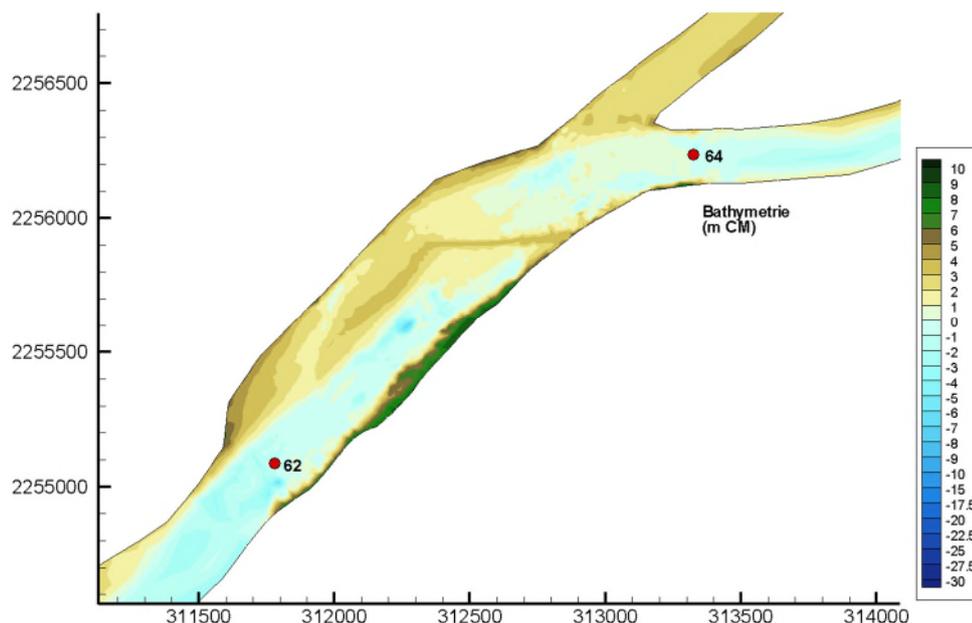


Fig. 16. Position des pks 62 et 64 sur le scénario C1 avec bathymétrie à 50 ans

A l'aval de l'ouvrage, du pk 50 au pk 62, les effets sont similaires mais amplifiés au fur et à mesure que l'on se rapproche de l'ouvrage avec une basse mer qui diminue de 5 à 40 cm au maximum au pk 62.

Les vitesses sont peu modifiées au pk 50, à part une forme en double pic au flot plus marquée. A l'aval immédiat des ouvrages, les vitesses de flots sont diminuées, le temps que le niveau aval récupère le niveau amont des ouvrages, puis les vitesses augmentent jusqu'à un pic de 1 m/s au lieu de 1,2 m/s dans l'état actuel. Au jusant, l'ouvrage ralentit l'écoulement de l'eau provenant de l'amont, avec une diminution d'environ 15 cm/s sur environ 3h.

A l'amont de l'ouvrage (**figure hors-texte 1.16**: pk 64), l'impact maximum sur la basse mer est d'environ 1,5 m. Le flot est retardé, le temps que les niveaux aval rejoignent les niveaux amont, puis les vitesses actuelles sont atteintes avec une diminution de 10 cm/s. Les vitesses de jusant sont diminuées d'environ 30 cm/s.

Au pk 70, le flot est moins modifié, mais les impacts persèverent notamment sur les vitesses de jusant.

Sur l'ensemble de ces pks, c'est l'ouvrage qui impact principalement les lignes d'eau et les vitesses, l'état tendanciel à peu de différence avec l'état actuel.

Impact moyen sur les vitesses en flot et jusant :

La **figure hors-texte 1.18** présente l'impact moyen sur les vitesses de flot et de jusant. Si l'on se met une limite arbitraire d'impact de 5 cm/s sur les vitesses, ce qui semble raisonnable vis à vis des vitesses rencontrées dans l'estuaire, on peut alors conclure qu'à l'aval de l'ouvrage, il n'y a pas d'impact sur le jusant alors que le flot est impacté entre l'ouvrage et le pk 56. L'impact maximum en flot se situe à l'aval immédiat de l'ouvrage où la vitesse est diminuée en moyenne de 25 cm/s.

A l'amont de l'ouvrage, les vitesses de flot sont en moyenne diminuées de 15 cm/s jusqu'au pk 75 et plus fortement diminuées par la suite du fait de la remontée des fonds à 50 ans. Les vitesses de jusant sont diminuées en moyennes de 5 à 10 cm/s jusqu'au pk 68 puis l'impact oscille assez sensiblement en fonction des modifications morphologiques apportées pour les états à 50 ans.

Vitesses utiles au transport des vases :

La **figure hors-texte 1.19** présente les temps de non-dépassement des vitesses utiles au transport (supérieures à 0,5m/s). Pour cette vitesse seuil, on note principalement, une diminution des vitesses de flot à l'aval immédiat de l'ouvrage (jusqu'au pk58) en comparaison aux vitesses de jusant qui restent stables, ce qui permet de diminuer l'asymétrie de la marée localement.

Par contre, avec une vitesse seuil plus importante de 1 m/s, ce qui correspond à un transport intense de MES (**figure hors-texte 1.20**), on peut remarquer à plus grande échelle spatiale que les temps de dépassement restent identiques en flot, mais sont diminués en jusant entre le pk 35 et l'ouvrage ce qui dans ce cas augmente l'asymétrie de la marée sur toute cette zone.

5.2. INTRUSION HALINE

La **figure hors-texte 1.21** présente les salinités moyennes calculées sur 8 mois. Les impacts sont toujours inférieurs à 0,1 g/l.

La **figure hors-texte 1.22** présente les temps de non-dépassement des salinités pour le seuil critique des 0,5 g/l. L'aménagement C1 avec bathymétrie à 50 ans n'a pas d'impact significatif sur ce critère.

5.3. MATIERE EN SUSPENSION

L'analyse du bouchon vaseux se fait à la fois sur les minima et maxima atteints lors de la journée 135 (**figure hors-texte 1.23**), sur la MES moyenne sur les 8 mois exploitables (**figure hors-texte 1.24**), sur l'impact moyen en MES sur les 8 mois exploitables (**figure hors-texte 1.25**), sur l'impact moyen en MES sur les 8 mois exploitables (**figure hors-texte 1.26**) et sur les temps de dépassement à un impact supérieur à 0,5 g/l sur les 8 mois exploitables (**figure hors-texte 1.27**). Les graphes conduisent aux conclusions ci-dessous.

L'analyse se fait principalement en moyenne temporelle, car comme le montre la **figure hors-texte 1.27**, les impacts supérieurs à 0,5 g/l (donc suffisamment conséquent puisque de l'ordre de la limite de définition du bouchon vaseux) montrent qu'ils peuvent être autant positifs que négatifs au même pk.

La MES moyenne (**figure hors-texte 1.24**) et son impact moyen (**figure hors-texte 1.25**) à l'aval de l'estuaire diminue par un léger transfert de masse vers l'amont du fait de l'augmentation de l'asymétrie, cela conduit en contre partie à une augmentation de la MES moyenne entre les Pk 51 et 58, avec un maximum de 0,05 g/l au pk 54. On remarquera que cette tendance est aussi présente dans l'état tendanciel.

Le scénario C1 à 50 ans a finalement un comportement assez similaire à celui de l'état tendanciel en terme d'impact sur le bouchon vaseux mais avec une intensité plus marquée.

Les MES sont par contre diminuées à l'amont du Pk 58 dans le scénario C1. En effet, on observe un recul du front amont vers l'aval à cause de l'effet local de l'ouvrage de Bellevue qui réduit le flot.

Les **figure hors-texte 1.27 à 1.33** permettent d'illustrer temporellement l'impact en MES aux pks : 40, 45, 50, 55, 60, 65 et 70. Cela permet de visualiser quand l'impact peut avoir lieu en fonction

des débits et des pks et de valider le fait que la matière en suspension ne passe quasiment plus l'ouvrage au pk 65 en comparaison à l'état actuel et tendanciel.

5.4. CREME DE VASE

L'analyse de la crème de vase se fait sur les temps de dépassement des différentiels d'épaisseur de crème de vase stricto-sensu (100 à 300 g/l) entre le scénario C1 à 50 ans et l'état actuel (**figure hors-texte 1.34**), puis sur les minima et maxima d'épaisseur de crème de vase atteints lors de la journée 135 (**figure hors-texte 1.35**)

On voit tout d'abord sur le graphique du haut de la **figure hors-texte 1.34** que l'on obtient 10 cm de vase en plus que dans l'état actuel entre le pk 47 et 55 pendant 30% à 50% du temps, ce qui n'est pas compensé par une diminution des dépôts dans le graphique du bas. Ces valeurs sont à relativiser avec le fait que l'épaisseur de vase peut varier entre 2 et 5 mètres, sur cette zone lorsque l'on est par faible débit (**figure hors-texte 1.35**).

Sur le graphique du bas de **figure hors-texte 1.34**, on peut lire que le scénario induit une diminution de l'épaisseur de crème de vase de 10 cm entre le pk 4 et 12 pendant 50 à 90% du temps et entre le pk 12 et 27 pendant 5 à 30% du temps, sans que ce ne soit compenser par une augmentation du dépôt dans le graphique du haut.

Sur la journée de Vive-eau d'étiage (**figure hors-texte 1.35**), les modifications des épaisseurs de crème de vase traduisent le même effet que décrit précédemment, avec un léger transfert de masse de la crème de vase principalement comprise entre les pk 4 et 12 vers la zone comprise entre les pk 45 et 56.

Les arrivées les plus importantes de sédiment dans les installations portuaires s'effectuent sur les sections 4 5 et 6 de l'estuaire pour des débits moyens. Les **figures hors-texte 1.36 et 1.37**, montrent que sur deux période de débit moyen distinctes : post crue et post-étiage, les quantités de crème de vase ne sont pas augmentées sur la zone aval de l'estuaire, voir diminuent.

5.5. DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE A COURT TERME

Un ensemble de cubatures a été effectué sur plusieurs sections (sections 1 à 12 définies par le GPMNSN pour le dragage) qui ont été regroupées pour rendre plus aisée l'analyse du fonctionnement de l'estuaire.

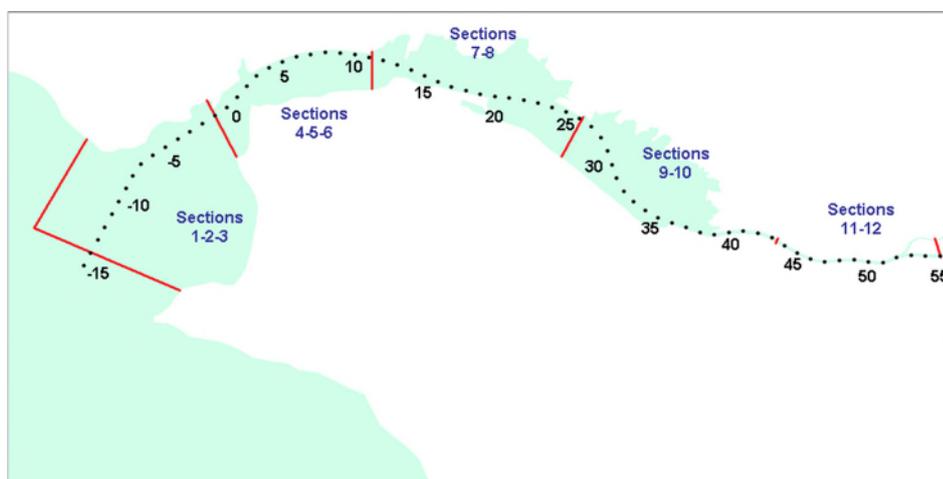


Fig. 17. Définition des zones de cubature

SCENARIO C1 et TENDANCIEL avec un état amont des fonds à 50 ans

Rapport 8411793-R2- final

L'évolution temporelle du bilan sédimentaire en suspension + dépôt (hors zone submersible : fond < 4,86 m CM) est fournie sur les **figures hors-texte 1.38 à 1.40**.

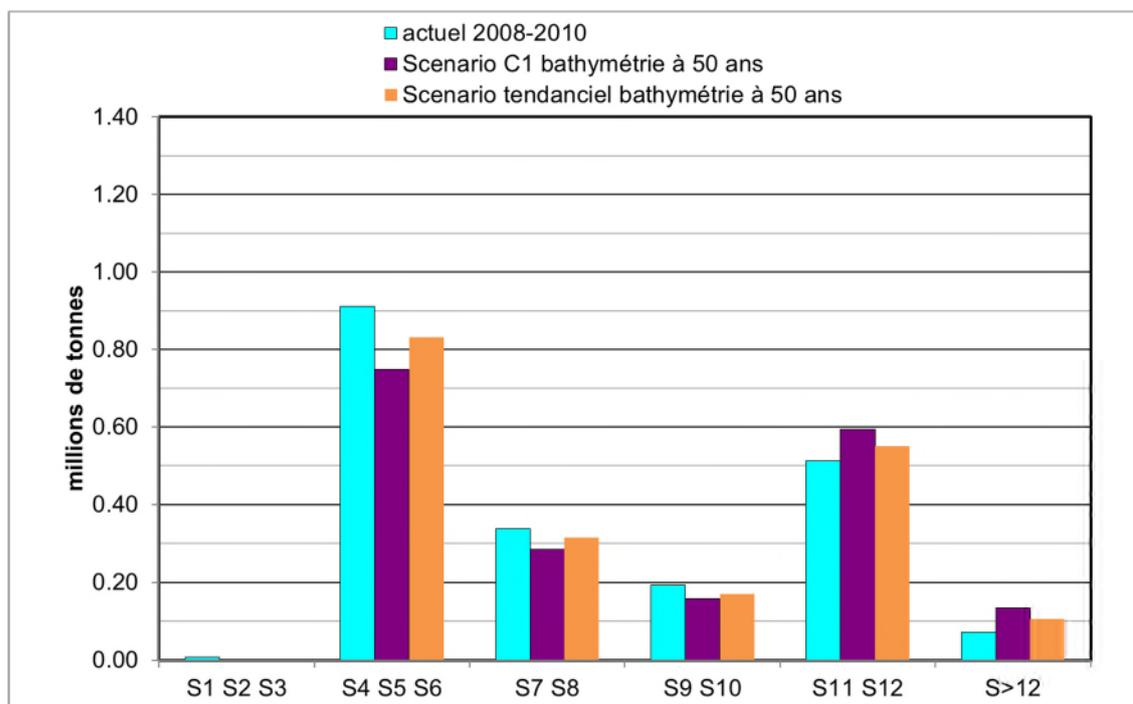
La masse totale en suspension est présentée sur les **figures hors-texte 1.41 à 1.43**.

A partir des résultats de ces graphiques, on peut quantifier les résultats reportés dans les tableaux et figures ci-dessous.

Masses contenues dans le bouchon vaseux en Vive eau hors crue (en Millions de tonnes)	Mini	Maxi
Actuel	0.4	1.0
Scenario tendanciel bathymétrie à 50 ans	0.4	1.0
Scenario C1 bathymétrie à 50 ans	0.4	1.0

Tabl. 1 - Masse du bouchon vaseux en Vive-eau (hors-crue)

	Flux aval entrant par la section 1 (Mt)	Bilan de masse amont section 1 (Mt)	Flux amont entrant à Ancenis (Mt)
Actuel	+1.93	2.99	+1.06
Scenario tendanciel bathymétrie à 50 ans	+1.80	2.86	+1.06
Scenario C1 bathymétrie à 50 ans	+1.86	2.92	+1.06

Tabl. 2 - Bilan de masse global**Fig. 18. Masse moyenne sur 8 mois de vase par sections moyenne (masse – masse jour 0)**

Les résultats entre scénario C1 avec bathymétrie à 50 ans, scénario tendencial avec bathymétrie à 50 ans et état actuel sont quasiment similaires à l'échelle de la dynamique estuarienne.

La masse importée par l'aval est sensiblement comparable entre l'état actuel et les scénarios (Tableau 4), même si ces apports sont légèrement à la baisse.

On rappelle que dans le fonctionnement du modèle, la masse de sédiment qui sort par les frontières maritimes est redéposée sous forme de dépôt au large de Saint-Nazaire dans l'estuaire externe, afin de ne pas trop appauvrir le modèle en masse de vase (actuellement, aucun modèle général de turbidité ne permet de forcer le modèle au large). Cette approximation permet de reconstituer un bouchon vaseux réaliste, même après expulsion lors d'une crue. Par contre, le flux aval calculé reste approximatif car le stock aval peut être légèrement différent suivant les sorties maritimes entre chaque calcul. C'est pourquoi nous concluons à partir des résultats très similaires du tableau 4 que les trois calculs donnent un flux aval comparable, ce qui signifie que l'aménagement C1 n'a pas d'impact significatif sur la masse totale de vase présente dans l'estuaire.

Un résultat plus net est que la masse de vase est légèrement transférée de l'aval : sections S4 à S8, vers l'amont : sections S9 à S12 dans le cas des 2 scénarios (Figure 18), ce qui a déjà été décrit précédemment. Ce transfert n'entraîne cependant pas d'augmentation de la masse maximale du bouchon vaseux dans les deux scénarios (Tableau 3).

5.6. MODIFICATION DES SECTIONS LE LONG DE L'ESTUAIRE

Une des méthodes d'étude des sections consiste à calculer en différents point kilométriques de l'estuaire, la surface de la section pour un niveau d'eau moyen. Le tracé logarithmique de ces résultats : sections en fonction du pk devraient s'aligner pour un estuaire relativement naturel et non contraint.

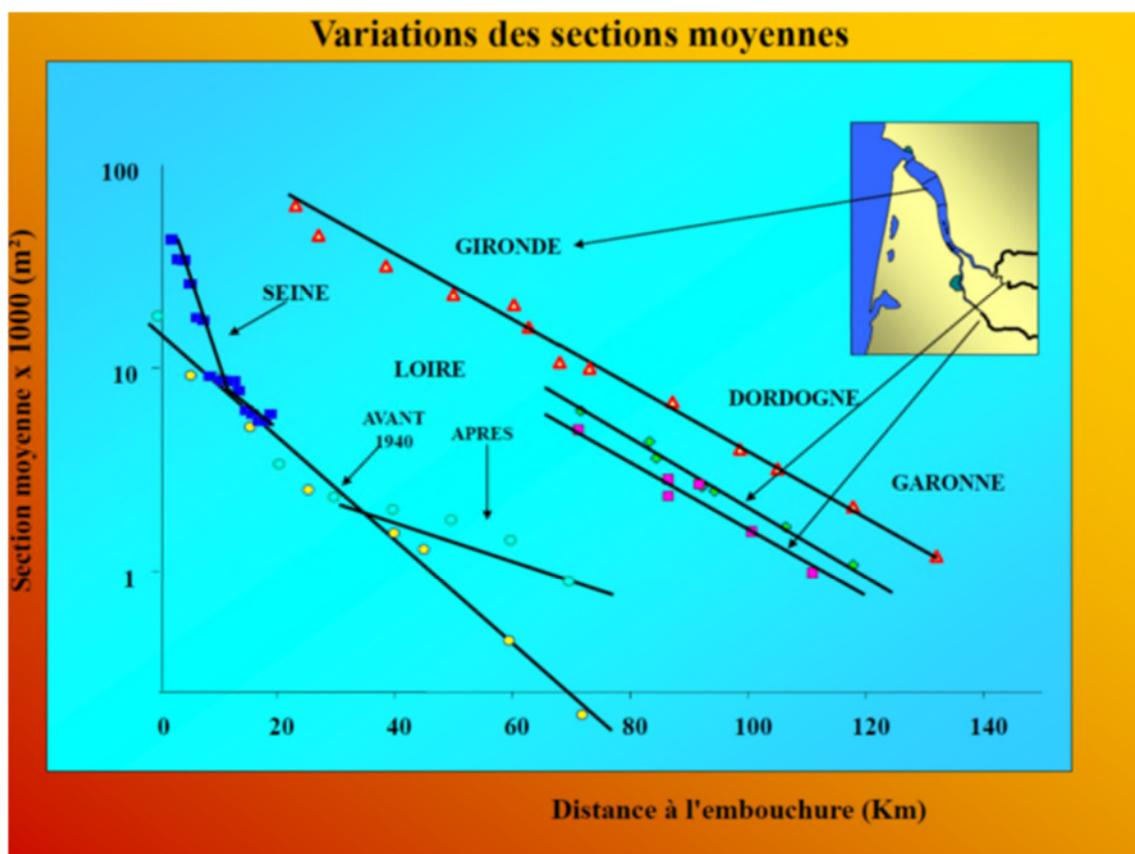
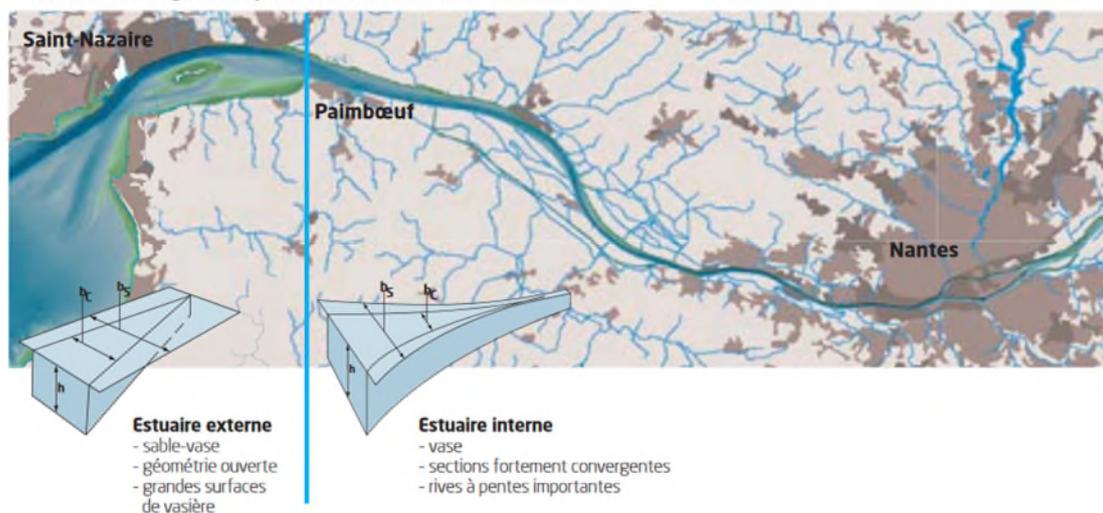


Fig. 19. Source : L.A. Romaña, Président du CS, présentation 'AUTOUR DE LA LOIRE de la Maine à la mer, L'ESTUAIRE...' Nantes, le 18 septembre 2018

La pente et la forme des alignements possibles donnent des informations sur le fonctionnement des estuaires. Ainsi, il a été possible de caractériser le fonctionnement de la Loire actuelle en un système d'estuaire externe et un système d'estuaire interne :

▼ Différenciation géométrique estuaire interne - estuaire externe

**Un nouveau regard porté sur la géométrie de l'estuaire**

Des scientifiques européens ont apporté une expertise nouvelle sur la géométrie de l'estuaire, abordée sous la forme de deux entités distinctes :

- **un estuaire interne, en amont de Paimbœuf**, à dominante vaseuse. Sa forme convergente amplifie l'onde de marée et la déforme, renforçant les courants de flot par rapport à ceux de jusant.

Cette asymétrie de la marée induit une plus forte capacité de piégeage des sédiments dans ce bief lors des débits faibles, sous la forme du bouchon vaseux et de la crème de vase.

- **un estuaire externe, en aval de Paimbœuf**, plus sableux, avec des surfaces importantes de vase. Son chenal nord, très profond, constitue un autre piège à sédiments pour des débits de Loire moyens et forts.

Fig. 20. Source GIP Loire Estuaire : Programme Interrégional Loire Grandeur Nature Pays de la Loire 2000-2006, études prospectives aval

Sur le même principe nous avons calculé les sections sur les trois géométries du modèle de l'estuaire :

- Modèle actuel: Bathymétrie: 2008-2010
- Scénario tendanciel avec bathymétrie à 50 ans
- Scénario C1 avec bathymétrie amont à 50 ans.

Il serait plus précis de calculer les surfaces des sections à partir d'un MNT plus dense que la résolution spatiale des nœuds des modèles, cependant il faut connaître le niveau moyen du niveau d'eau au cours d'une année. Cela est possible dans l'état actuel via les marégraphes, mais ce ne l'est pas pour les états aménagés. C'est pour cela qu'il est proposé de calculer cette variation des sections à partir de la géométrie des modèles afin d'être comparatif pour les trois scénarios.

Les sections calculées à partir de la géométrie du modèle actuel sont tout de même comparées à la figure 21 pour évaluation des résultats :

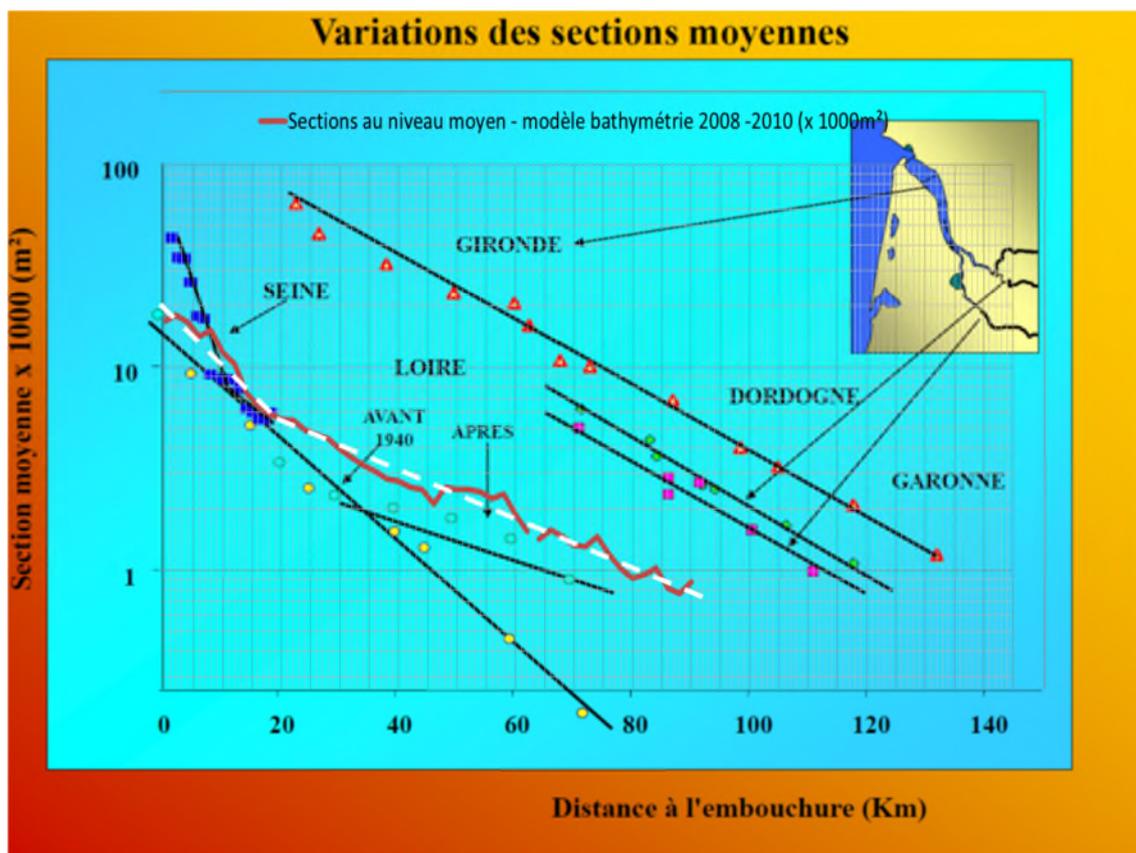


Fig. 21. Variation des sections dans le modèle actuel (bathymétrie 2008-2010)

Les sections moyennes du modèle actuel (bathymétrie 2008-2010), sont légèrement plus importantes que celles présentées sous la forme « après 1940 », ce qui peut être fortement possible, suivant l'année considérée pour effectuer ce calcul dit « après 1940 ». Les résultats trouvés dans le modèle actuel sont par contre très cohérents avec les résultats fournis par le GIP (figure 20), qui montre un fonctionnement estuarien en deux parties suivant si l'on se trouve à l'aval ou l'amont du pk 15. La courbe représentant les sections en fonction des pks semble effectivement prendre deux pentes moyennes différentes à l'aval et l'amont de ce pk.

Ce même calcul a été effectué sur les deux états aménagés :

SCENARIO C1 et TENDANCIEL avec un état amont des fonds à 50 ans

Rapport 8411793-R2- final

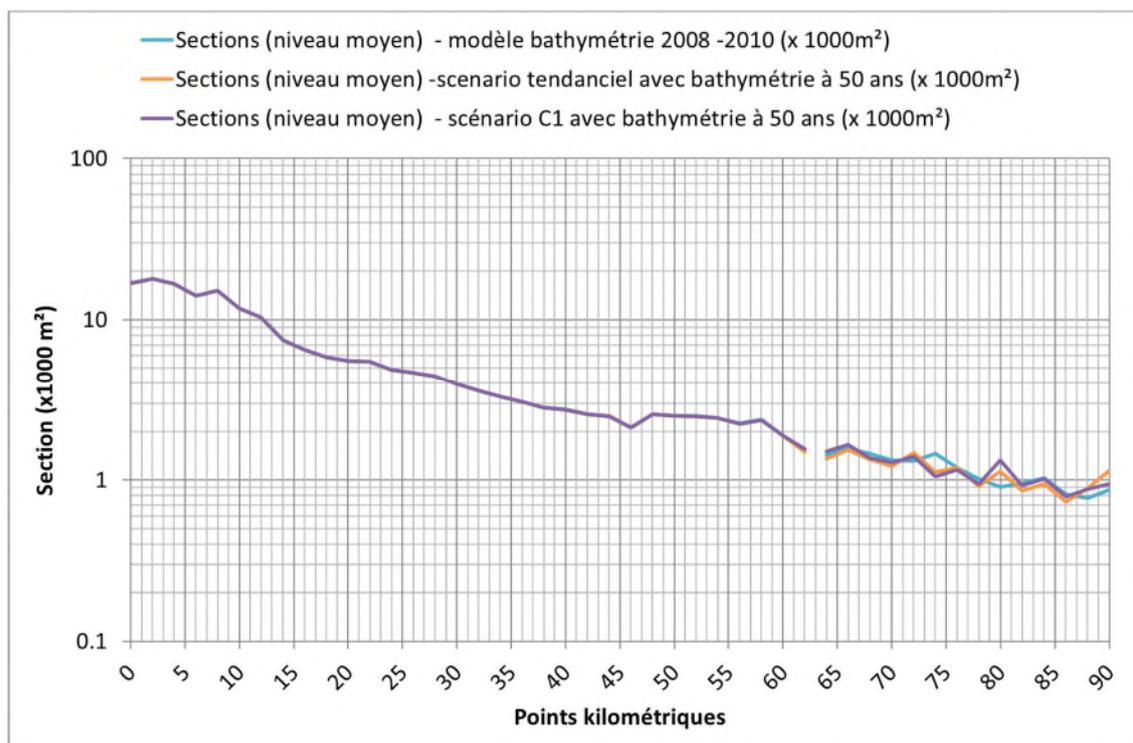


Fig. 22. Variation des sections pour les 3 scénarios modélisés

Etant donné que la bathymétrie est identique pour la partie aval au pk 58 pour les trois scénarios, et que les états aménagés ont peu d'impact sur les niveaux d'eau à l'aval de l'ouvrage, il est normal de trouver sur cette portion de l'estuaire les mêmes sections pour le niveau moyen.

Pour le scénario C1 avec bathymétrie à 50 ans, ou le scénario tendanciel à 50 ans, la pente moyenne des sections en fonction des points kilométriques à l'amont du pk 64 ne semble pas être profondément impactée par rapport à la pente moyenne de l'état actuel.

RÉFÉRENCES

Hamm L., Walther R., 2008, Morphodynamic coupling of bottom roughness and fluid mud for modeling tidal propagation in the Loire estuary, ICCE 2008, Hambourg

Sogreah, Décembre 2009, rapport 1711822 R9 : Cadre d'exploitation, développement et exploitation d'un modèle hydrosédimentaire en trois dimensions sur l'estuaire de la Loire, lot 1 – phase 1, GIP LE.

Sogreah, Décembre 2010, rapport 1711822 R17 : Reprise de la construction et du calage simple du modèle sur la bathymétrie 2008-2010, développement et exploitation d'un modèle hydrosédimentaire en trois dimensions sur l'estuaire de la Loire, lot 1 – phase 2, GIP LE.

Sogreah, Décembre 2010, rapport 1711822 R21 : Calage couplé actualisé, développement et exploitation d'un modèle hydrosédimentaire en trois dimensions sur l'estuaire de la Loire, lot 1 – phase 2, GIP LE.

Sanchez M., Levacher D., 2008). Erosion d'une vase de l'estuaire de la Loire sous l'action du courant. Bull Eng Envir, 67, p597-605

Sanchez M., Grimigni P. Delanoe Y., 2004. Distribution des sédiments cohésifs en relation avec la vitesse de la phase solide dans l'estuaire de la Loire . comptes-rendus des VIIIemes journées Nationales Génie Civil-Génie Côtier, Compiègne 7 et 9 septembre 2004.

Walther R., Rivier A., Rieu J., David E. and Hamm L.,2009. Modeling three-dimensional hydro-sedimentary of the estuary of the Loire - evaluation of vertical turbulence model, Société hydraulique de France, Morphodynamics and sediment management in estuaries, bays and deltas, Paris, France, 22-23 September 2009

Walther R., Schaguene J., Hamm L., David E., 2012. Coupled 3D modeling of turbidity maximum dynamics in the Loire estuary, Coastal Engineering Proceedings, 1(33).

Walther R., Cayrol C., Hamm L., Delouis A., Lehay D. Assessment of an offshore disposal site in the Loire estuary through field monitoring and 3D numerical modeling, ICCE 2014, Seoul 16-20 juin 2014

oOo

Figures hors-texte

FIG 1.1 Impact sur les niveaux d'eau

% Temps de dépassement : aux cotes 5.66, 4.16 et 2.66m CM

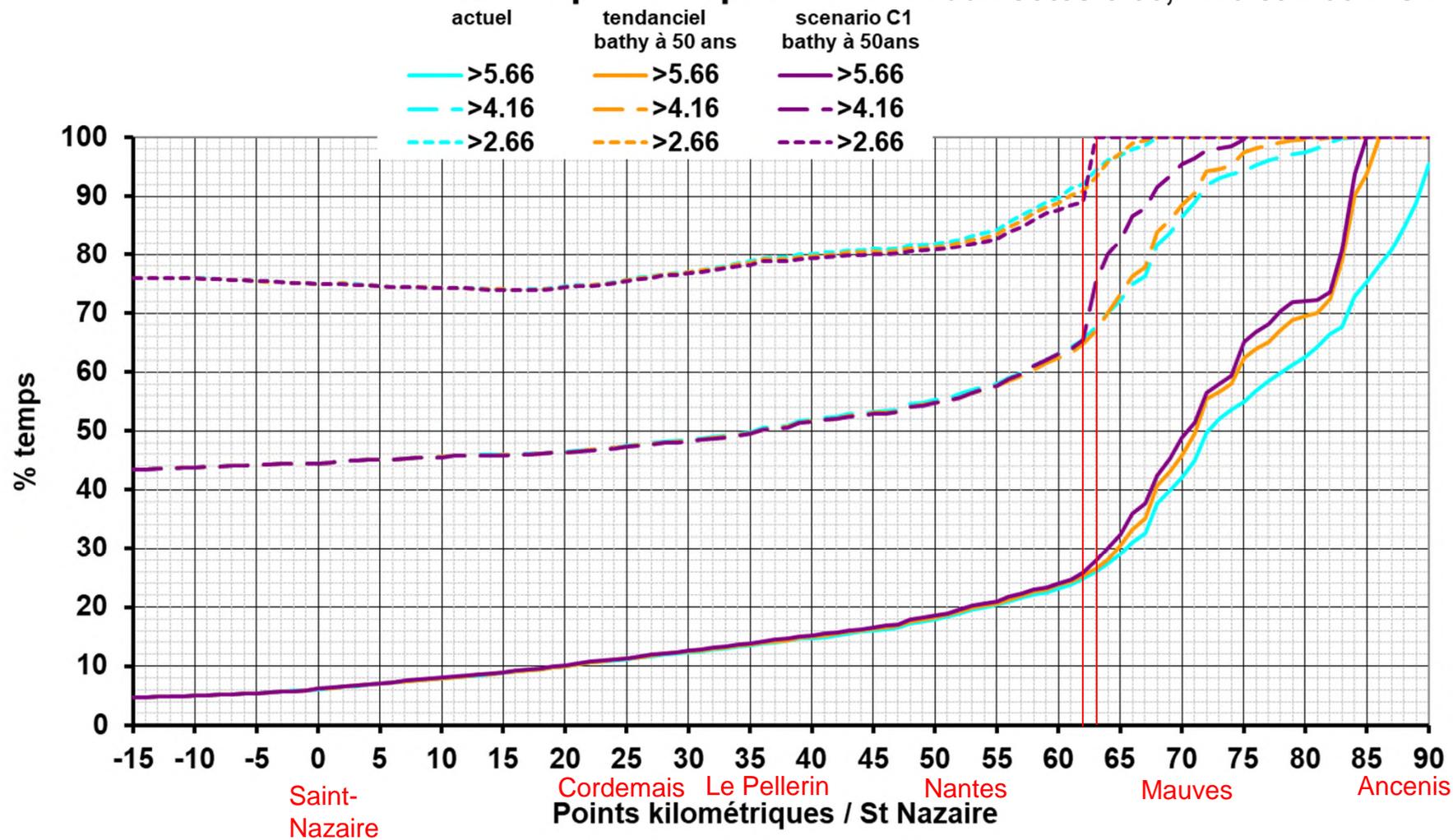


FIG 1.2 Impact sur les niveaux d'eau (zoom)

% Temps de dépassement

: aux cotes 5.66, 4.16 et 2.66m CM

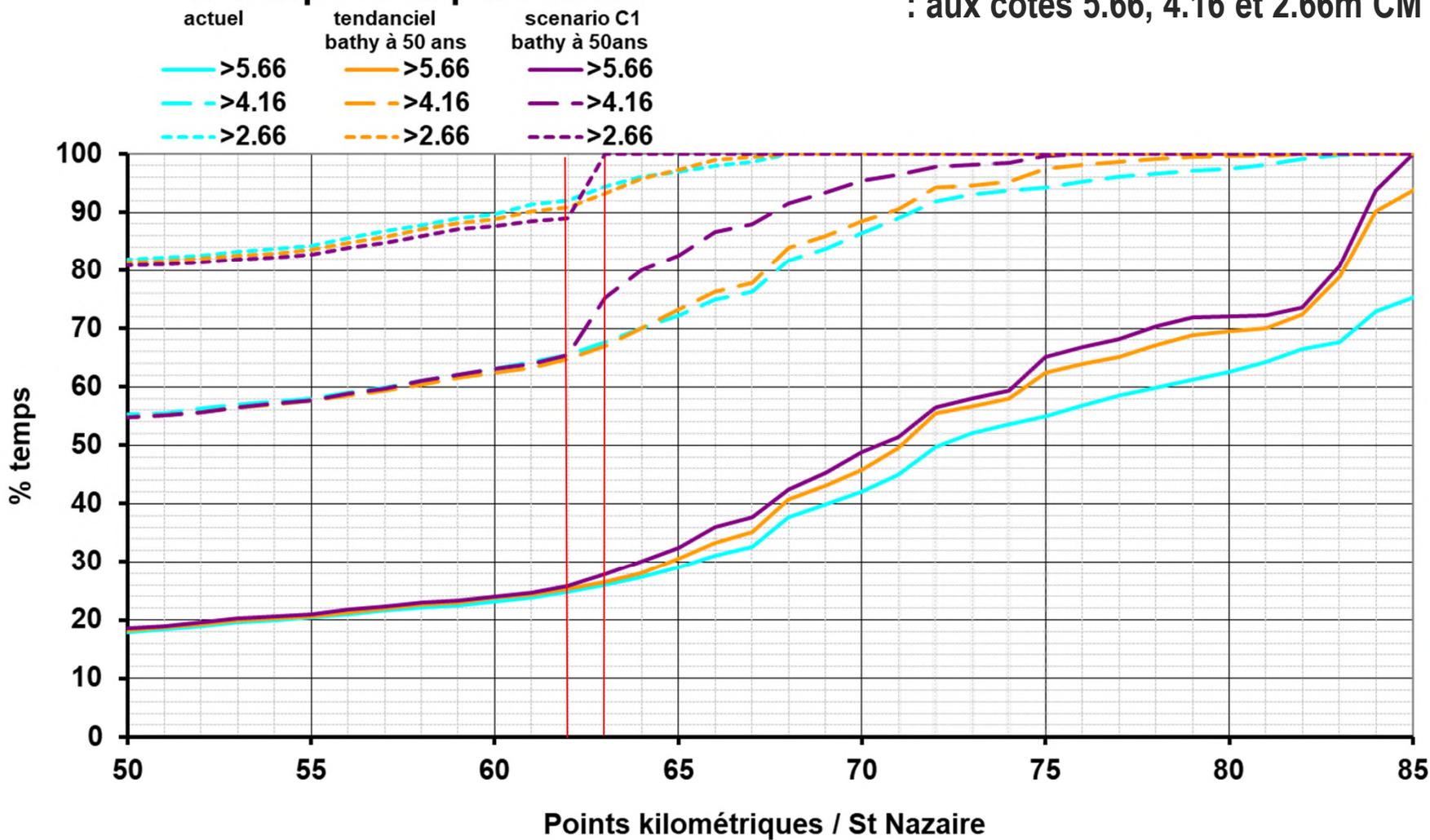


FIG 1.3 Illustration de l'impact sur les niveaux en VE étage

niveaux d'eau max et min - jour n°135- vive-eau étiage

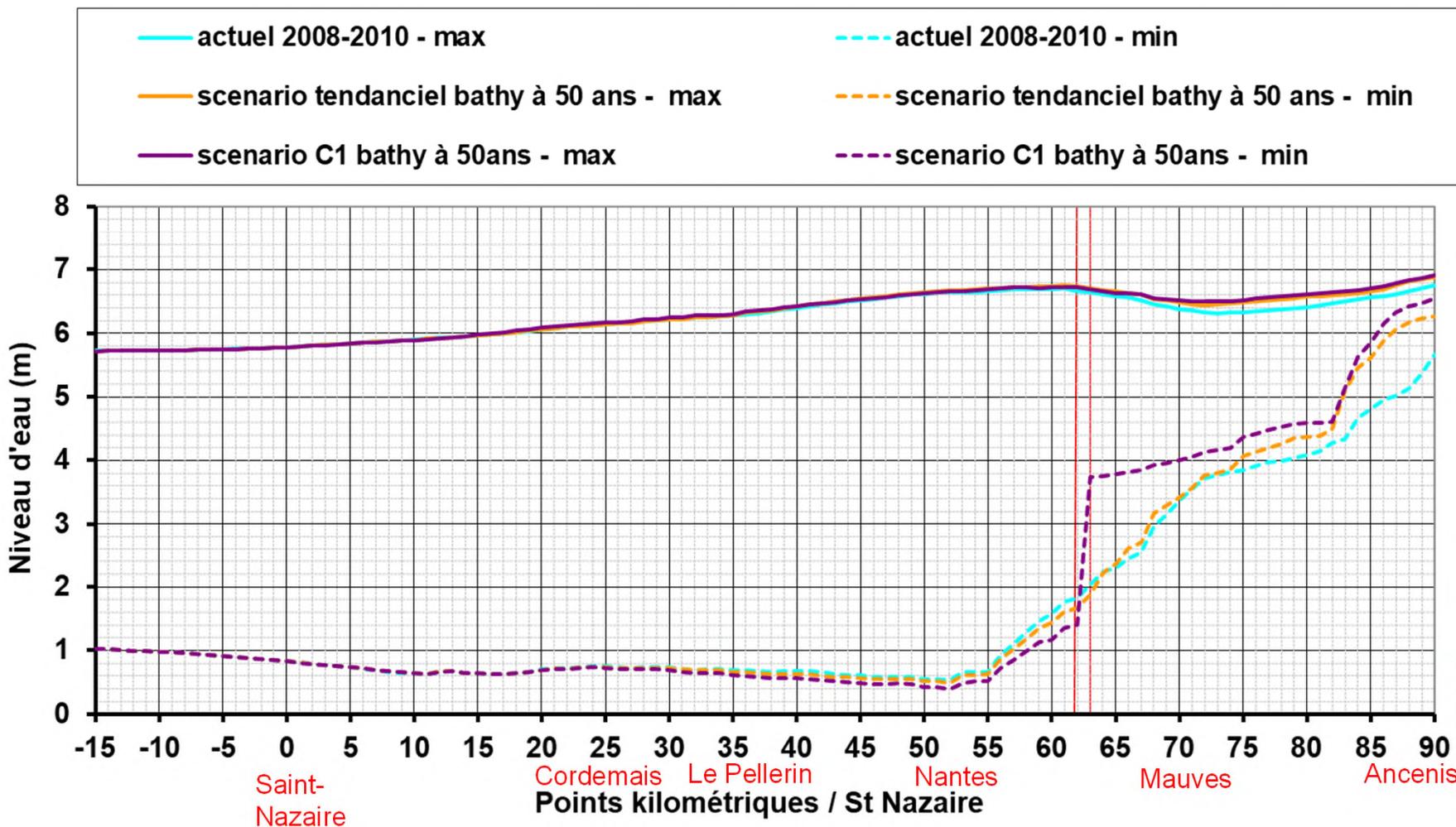


FIG 1.4 Illustration de l'impact sur les niveaux en ME étiage

niveaux d'eau max et min - jour n°143- morte-eau étiage

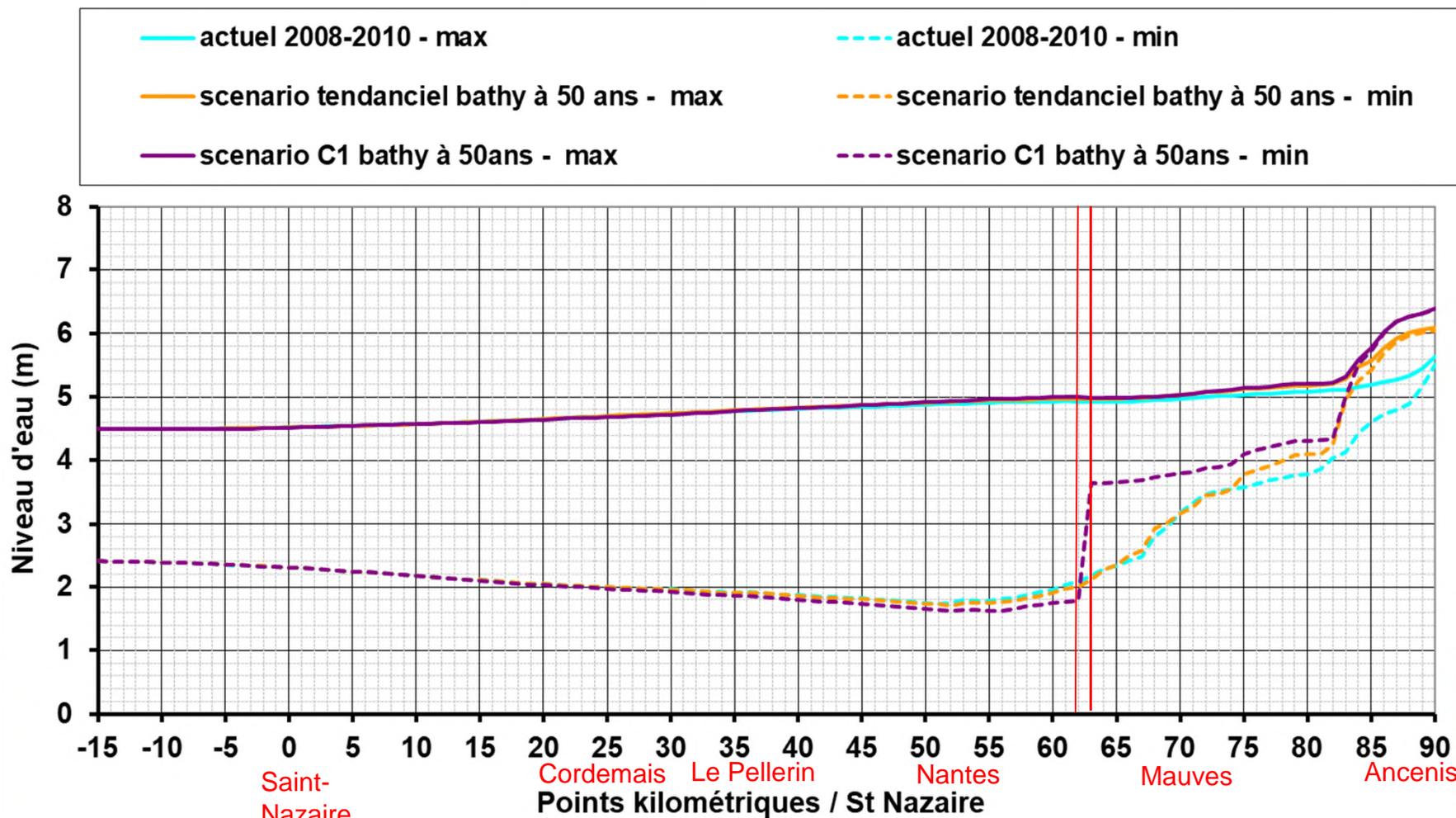


FIG 1.5 Niveau d'eau: Analyse temporelle sur 8 mois
impact sur le niveau de pleine mer suivant les pks

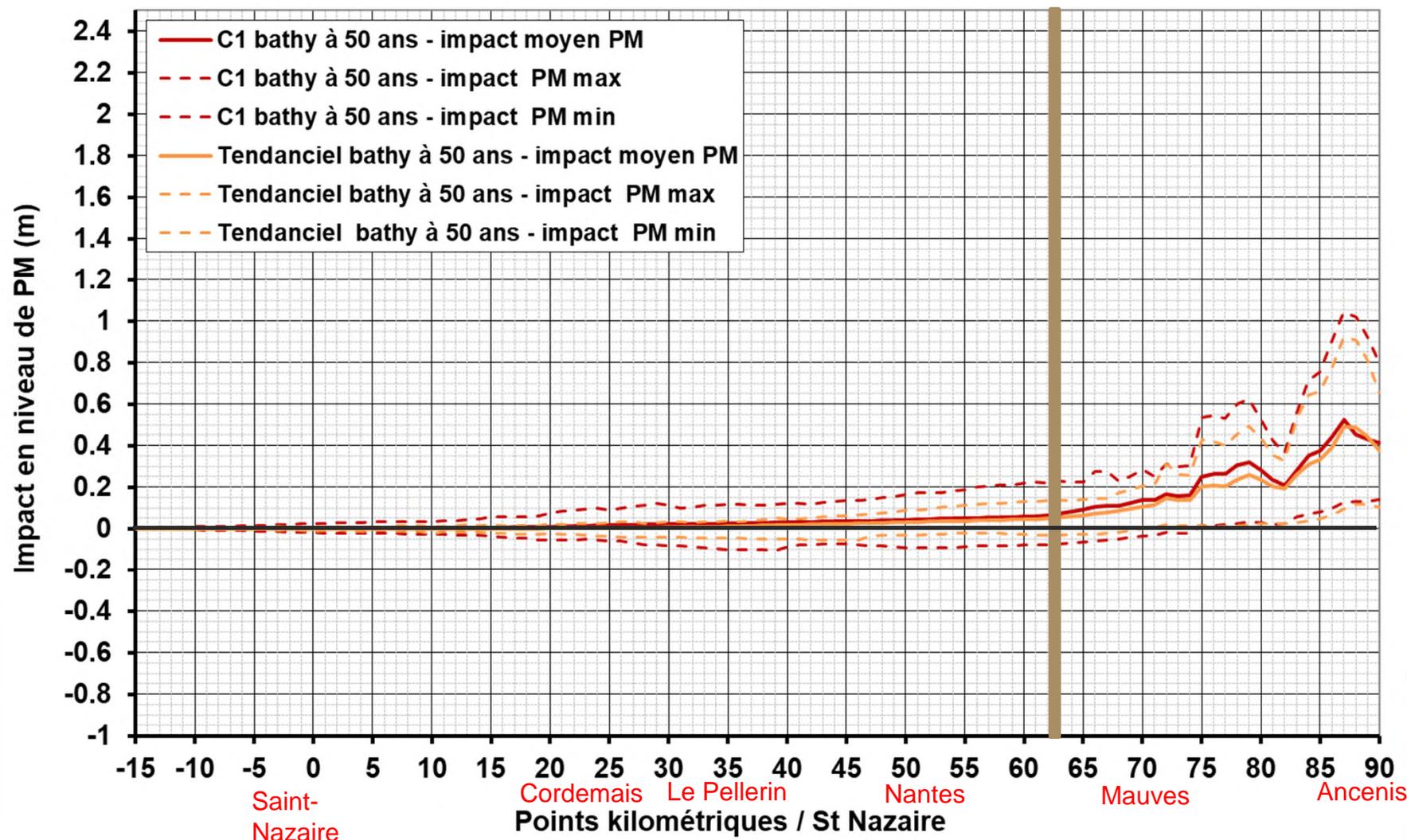


FIG 1.6 Niveau d'eau: Analyse temporelle sur 8 mois
impact sur le niveau de basse mer suivant les pks

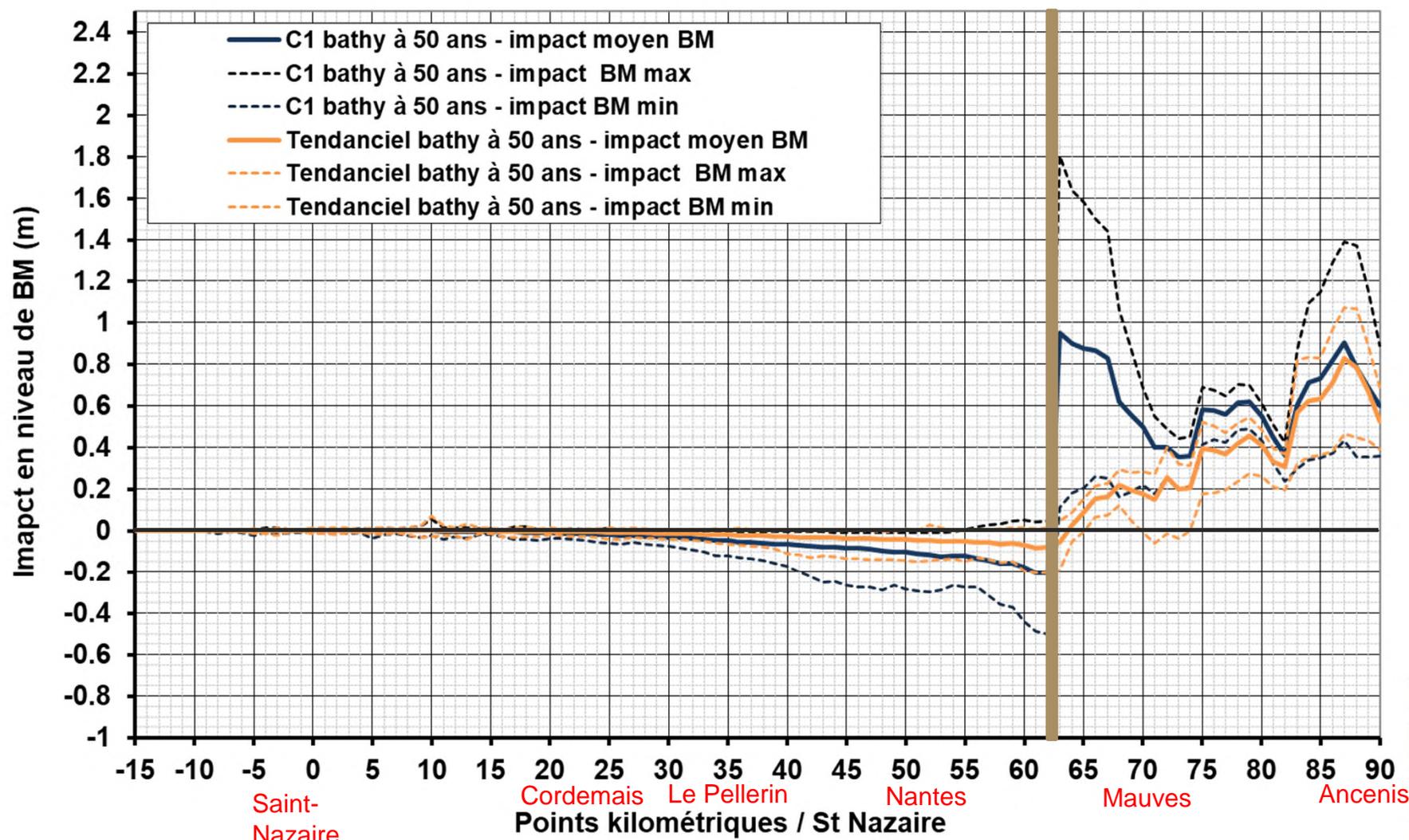


FIG 1.7 Niveau d'eau: Analyse temporelle sur 8 mois impact sur les niveaux de pleine et basse mer au pk 40

Impact = scénario – actuel

débits, marée et niveau moyen

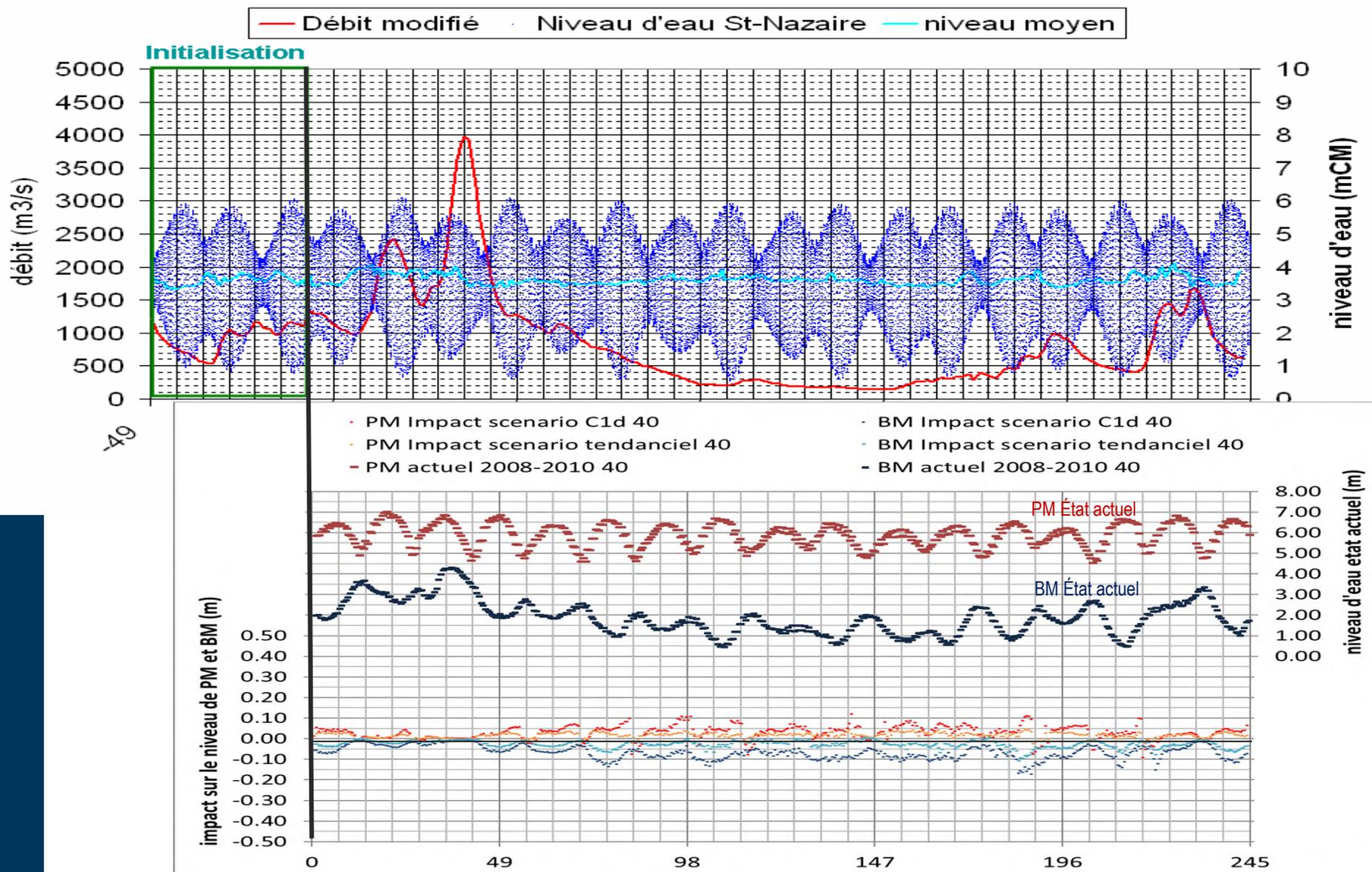


FIG 1.8 Niveau d'eau: Analyse temporelle sur 8 mois impact sur les niveaux de pleine et basse mer au pk 50

Impact = scénario – actuel

débits, marée et niveau moyen

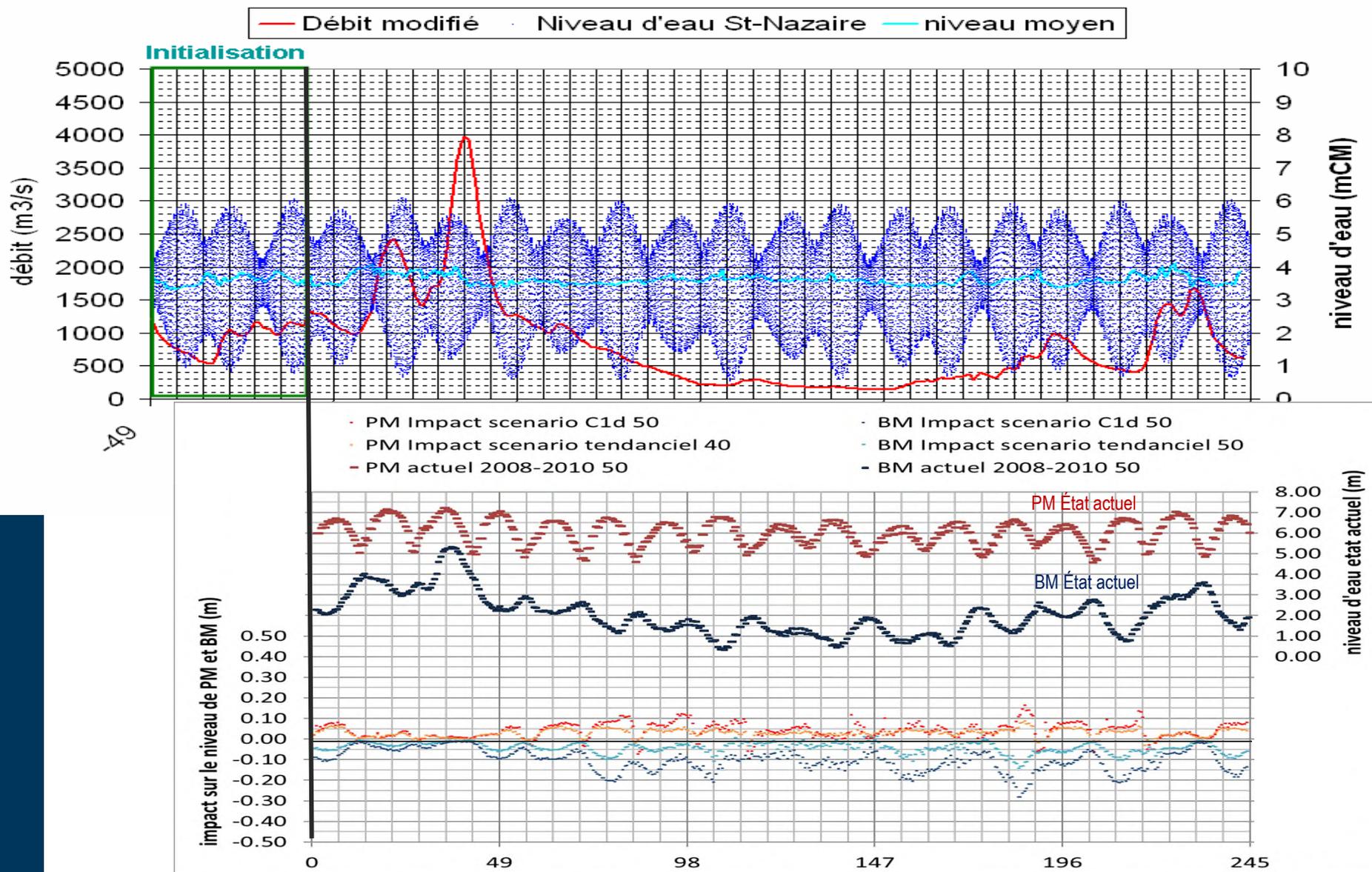


FIG 1.9 Niveau d'eau: Analyse temporelle sur 8 mois impact sur les niveaux de pleine et basse mer au pk 55

Impact = scenario – actuel

débits, marée et niveau moyen

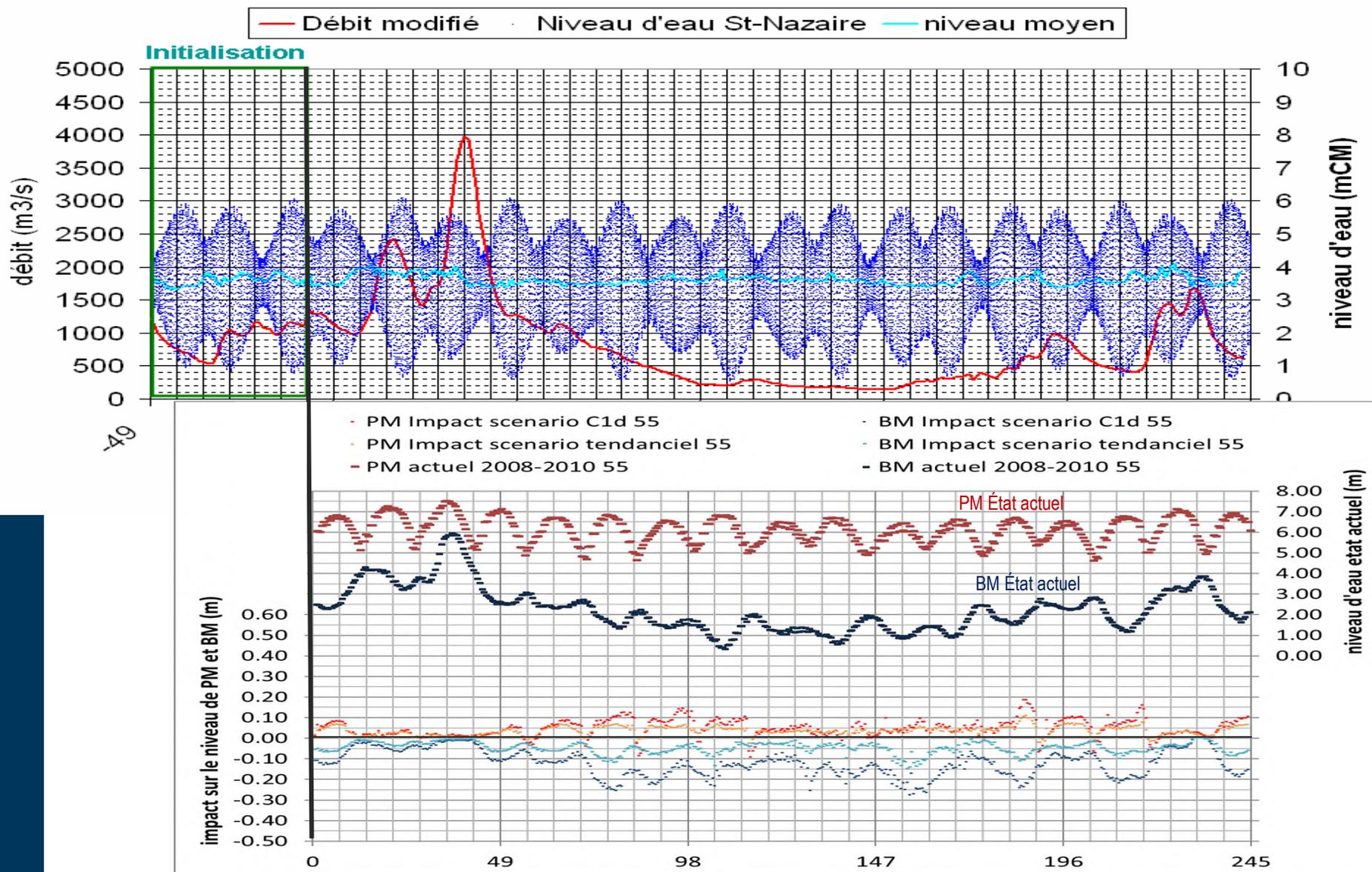


FIG 1.10 Niveau d'eau: Analyse temporelle sur 8 mois impact sur les niveaux de pleine et basse mer au pk 58

Impact = scénario – actuel

débits, marée et niveau moyen

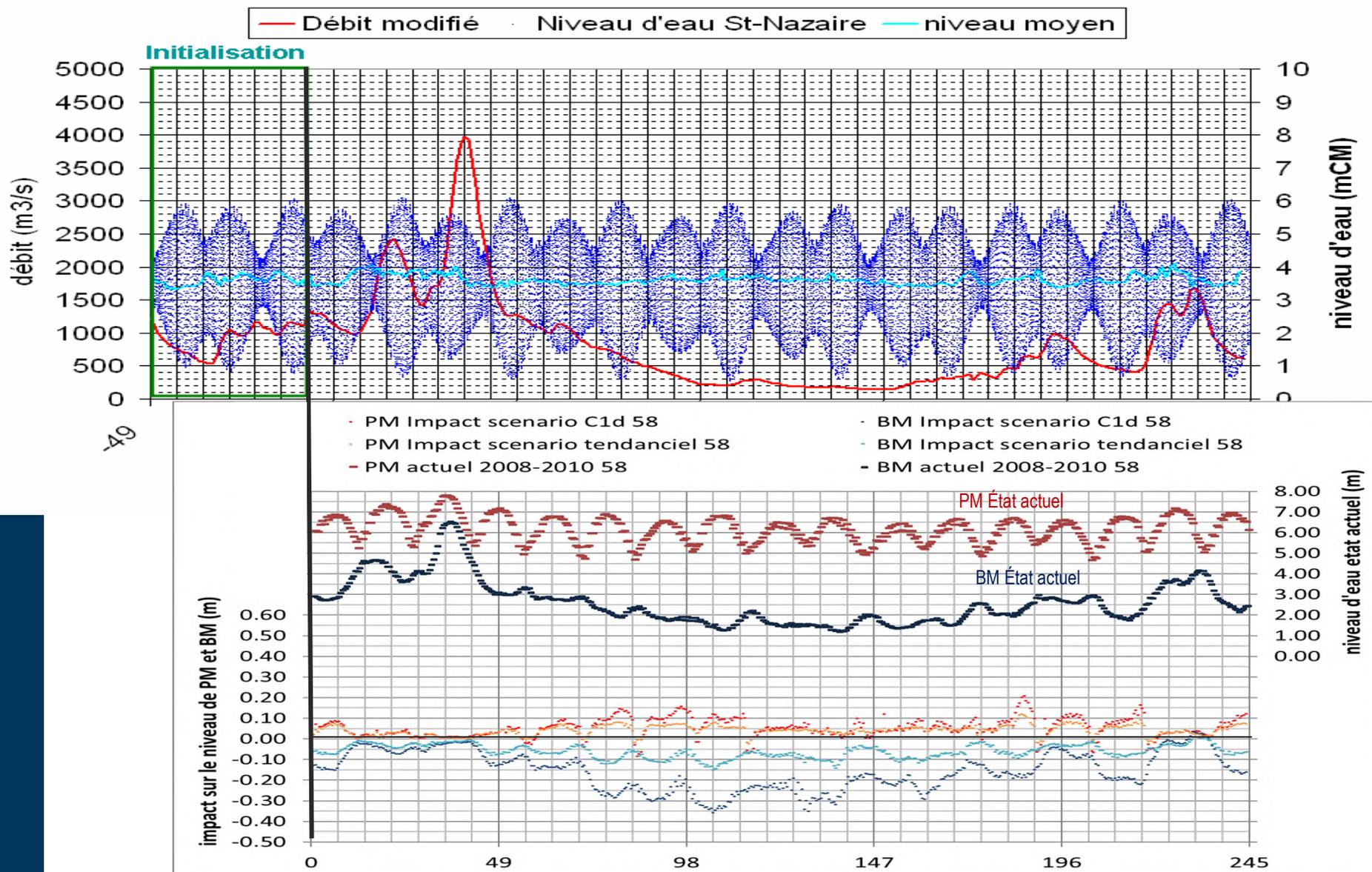


FIG 1.11 Niveau d'eau: Analyse temporelle sur 8 mois impact sur les niveaux de pleine et basse mer au pk 60

Impact = scénario – actuel

débits, marée et niveau moyen

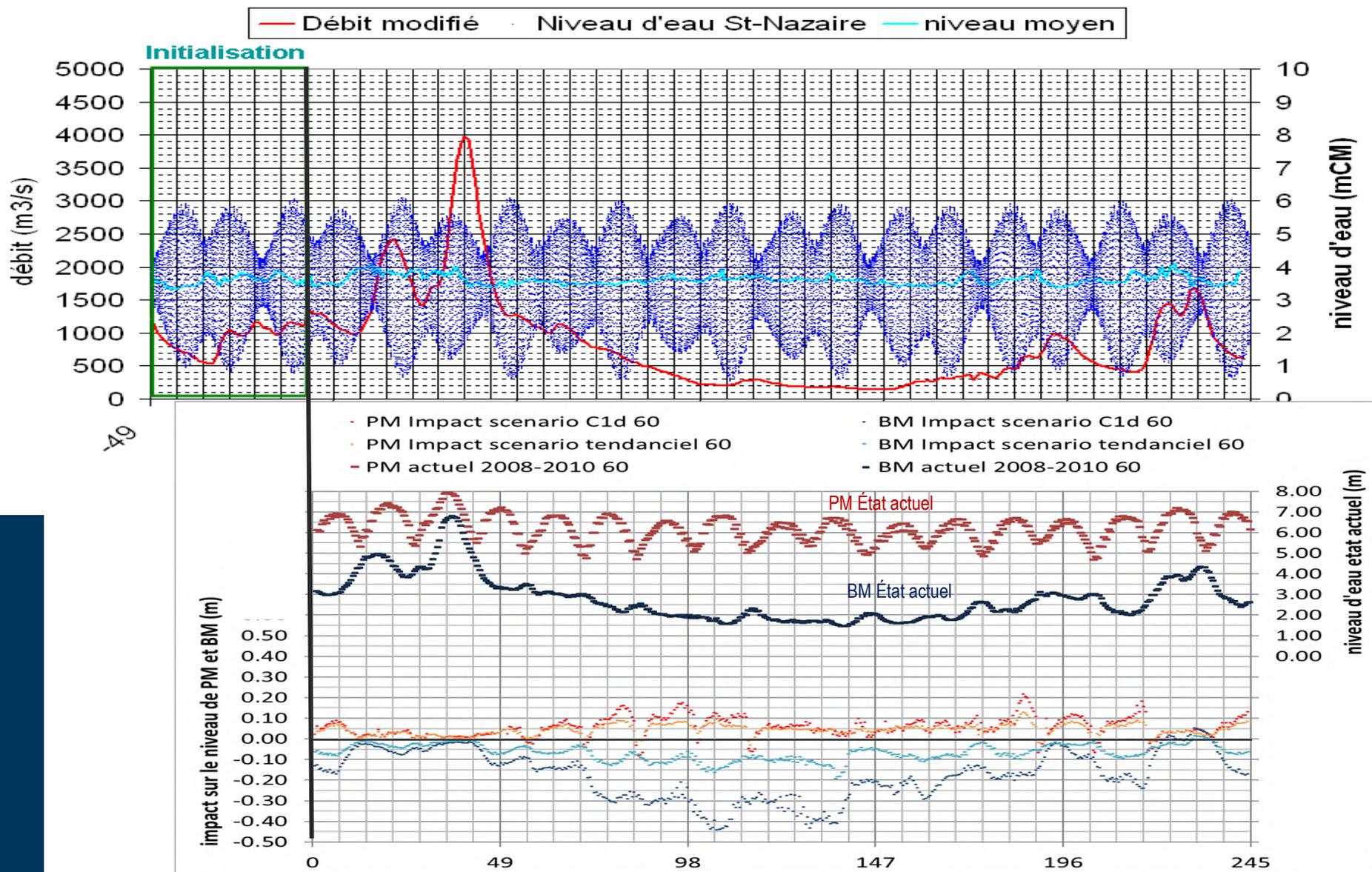


FIG 1.12 Niveau d'eau: Analyse temporelle sur 8 mois impact sur les niveaux de pleine et basse mer au pk 70

Impact = scénario – actuel

débits, marée et niveau moyen

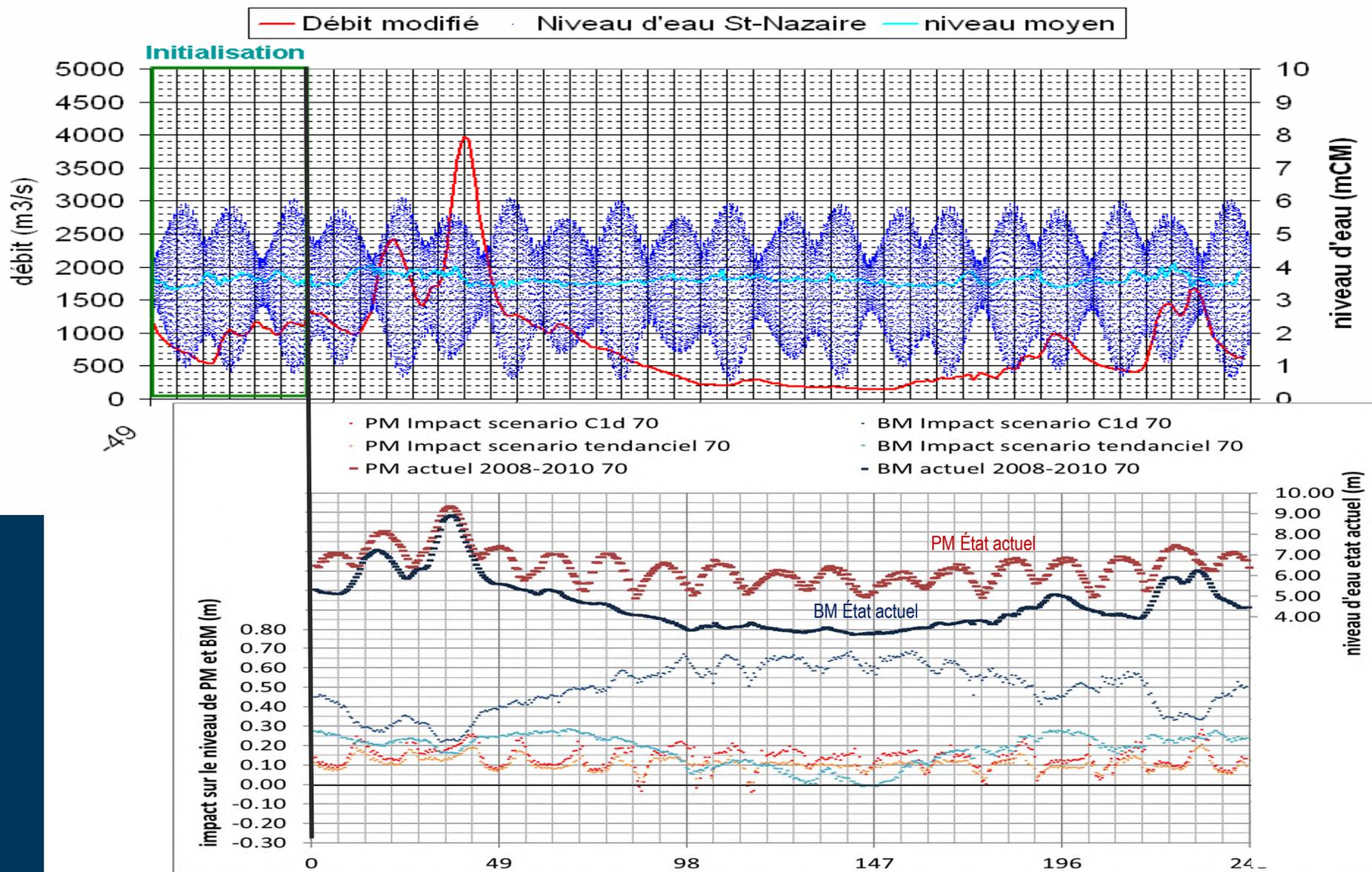


FIG 1.13 Niveau d'eau: Analyse temporelle sur 8 mois impact sur les niveaux de pleine et basse mer au pk 87

Impact = scénario – actuel

débits, marée et niveau moyen

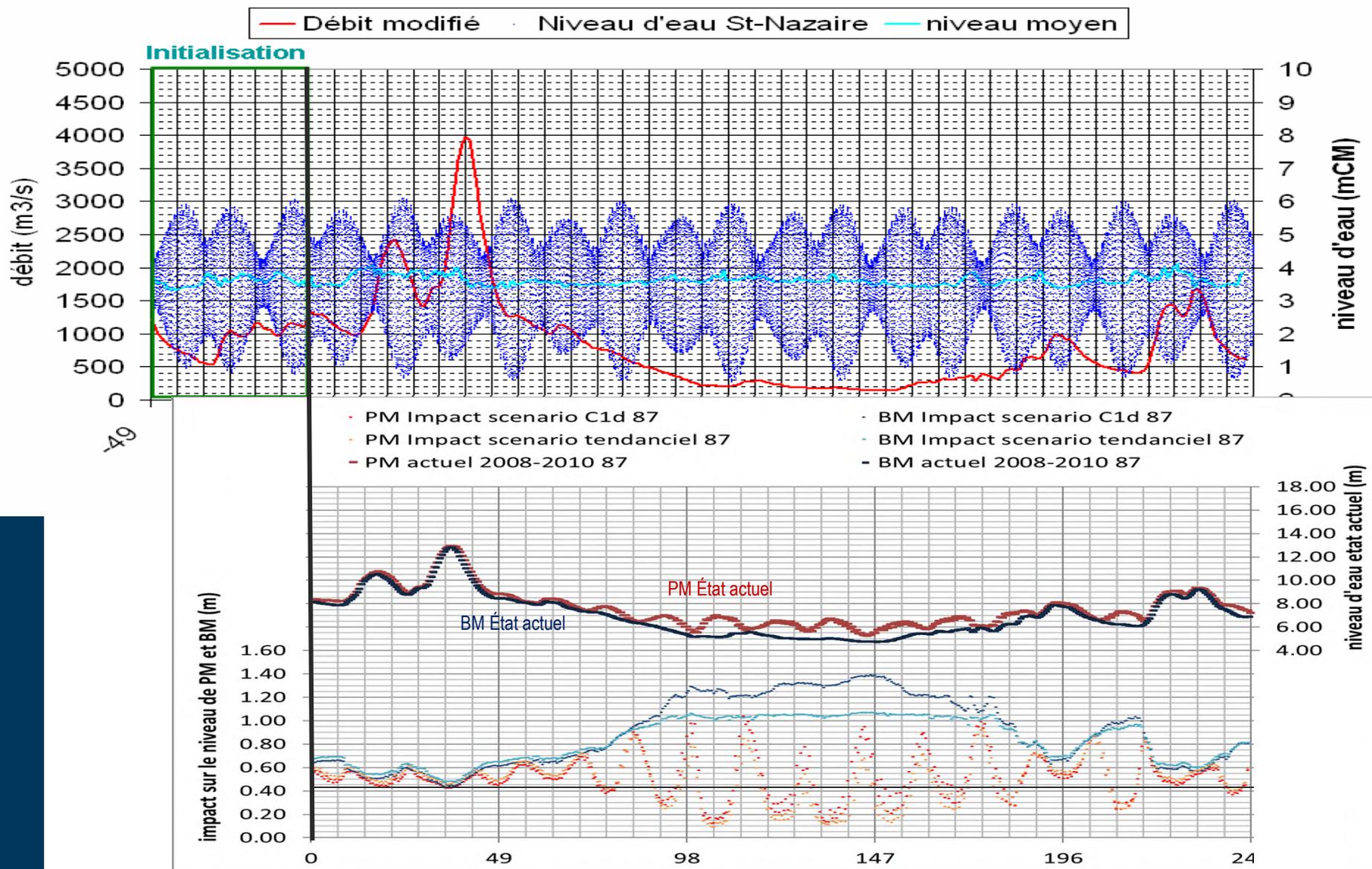


FIG 1.14 PK50: Vitesses moyennes –jour 135- Vive-eau , étiage

Vitesses moyennes-jour 135 - Vive-eau étiage

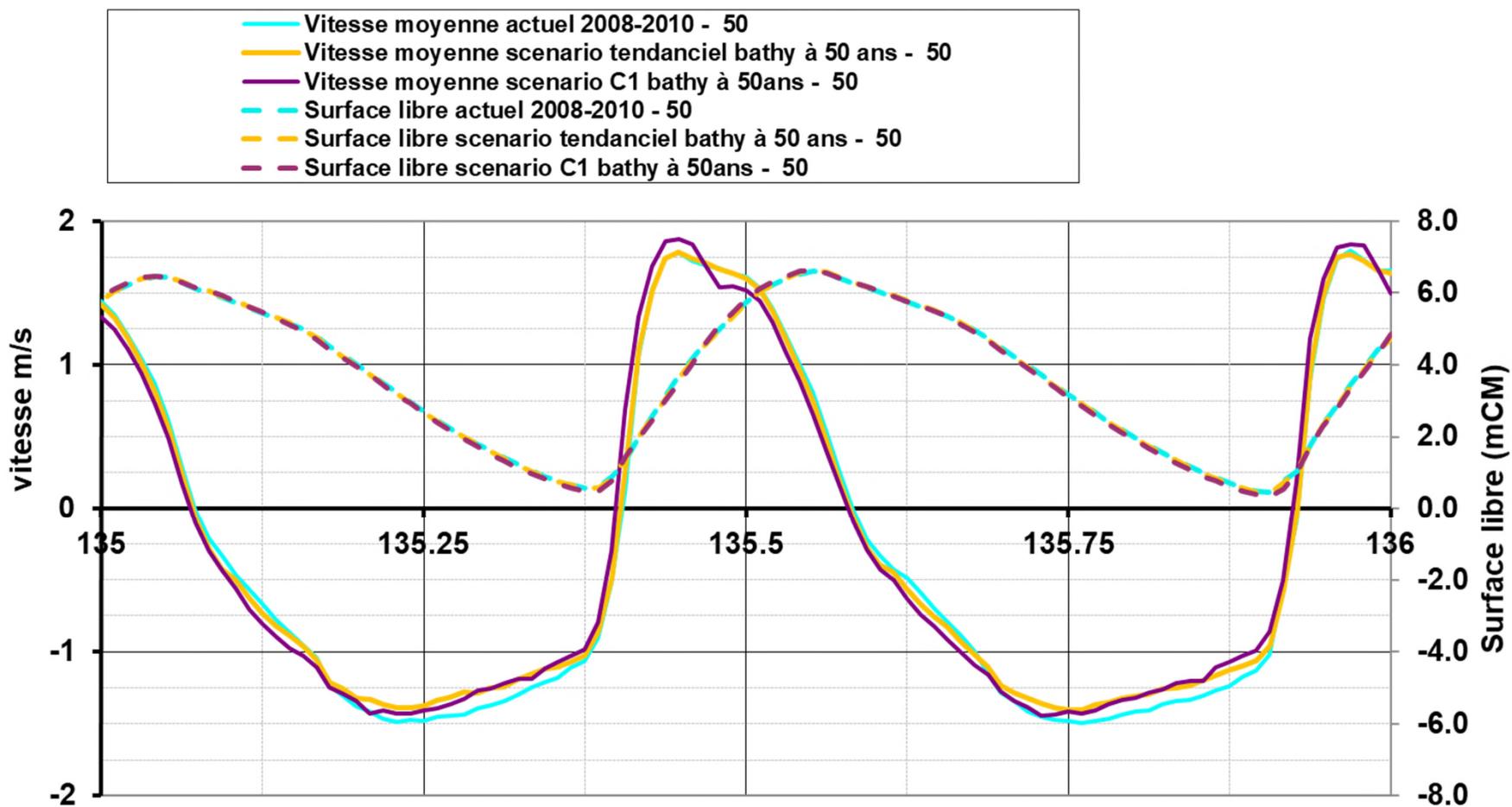


FIG 1.15 PK62: Vitesses moyennes –jour 135- Vive-eau , étiage

Vitesses moyennes-jour 135 - Vive-eau étiage

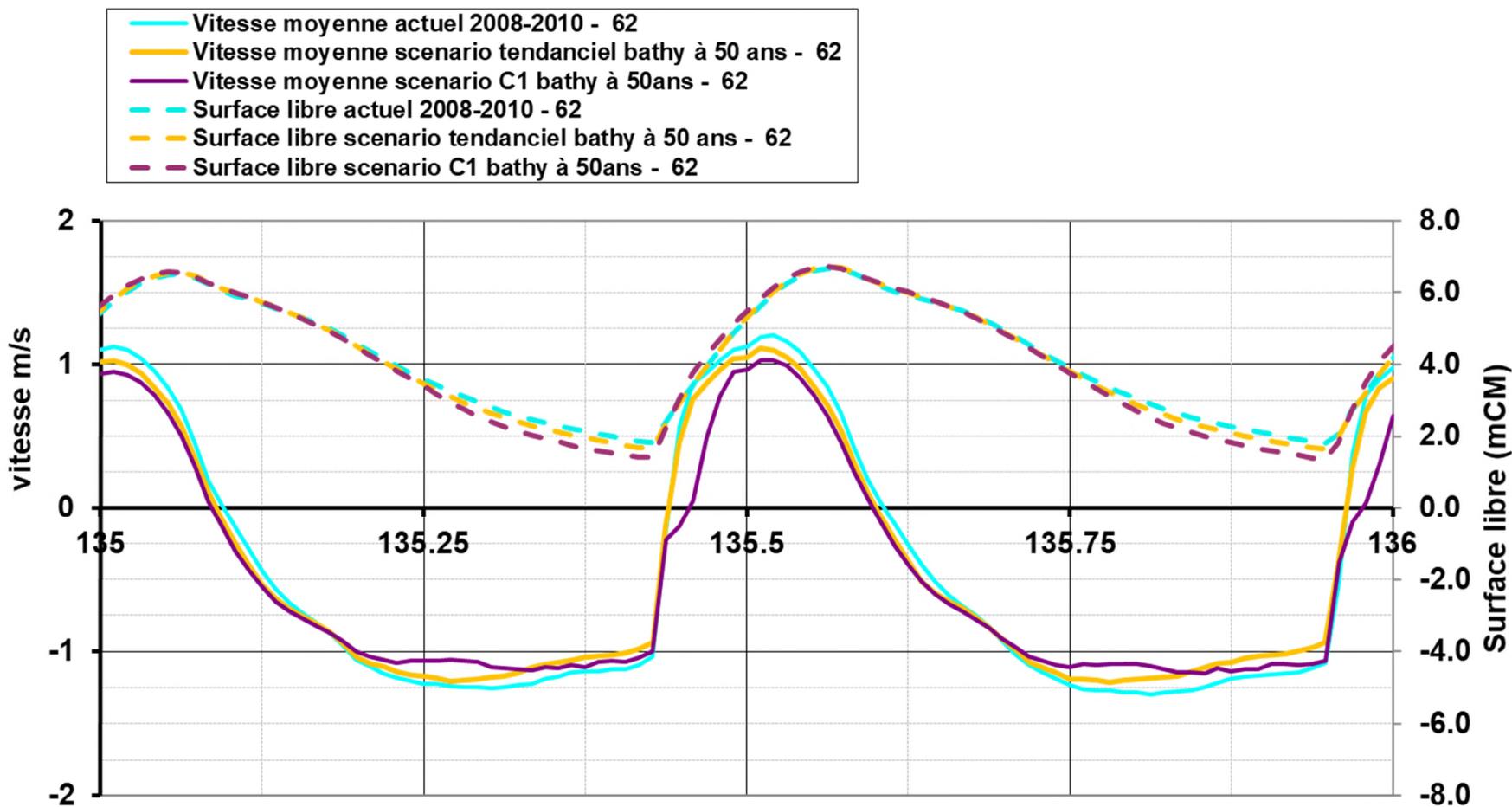


FIG 1.16 PK64: Vitesses moyennes –jour 135- Vive-eau , étiage

Vitesses moyenne- jour 135 - Vive-eau étiage

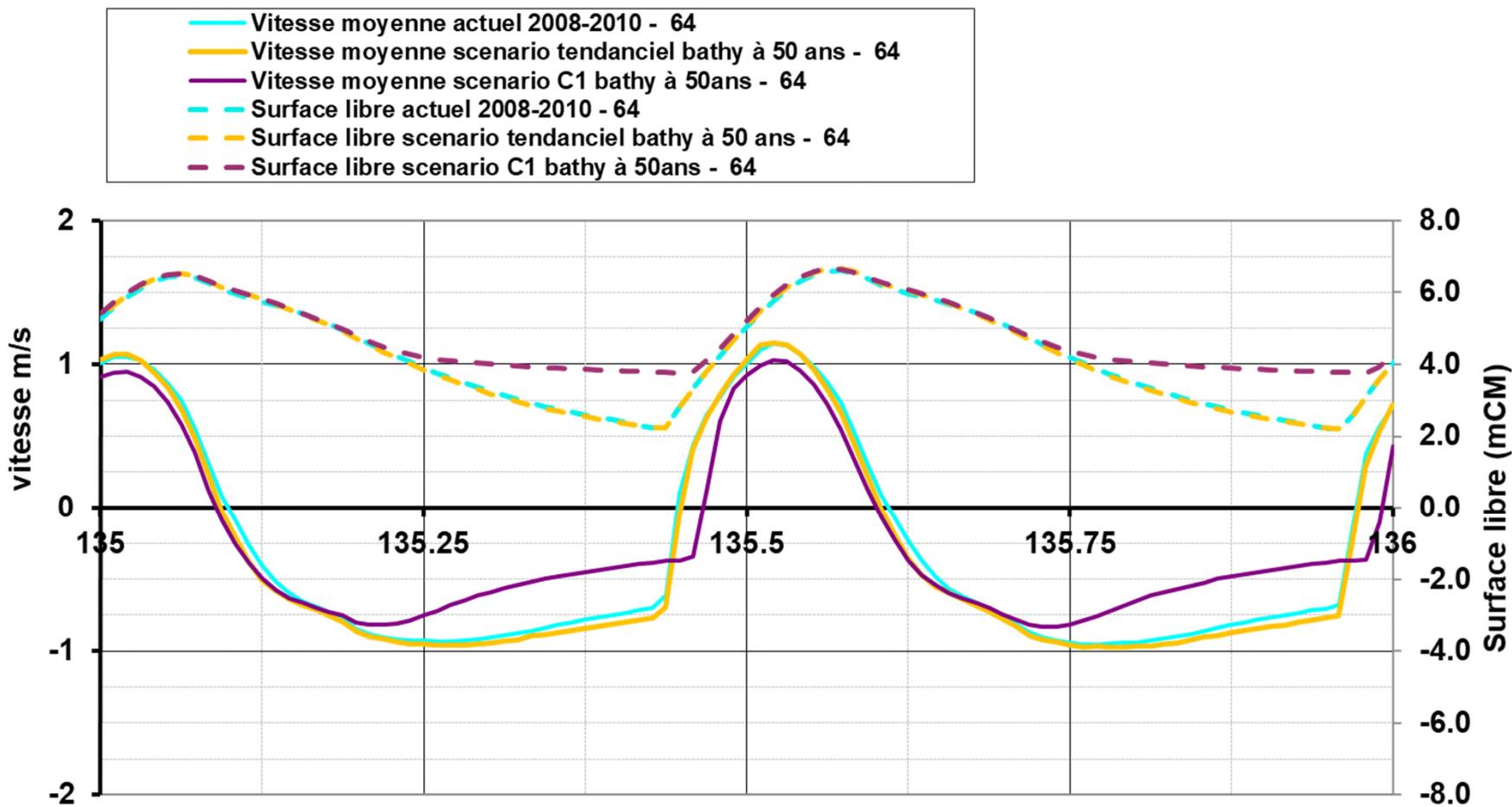


FIG 1.17 PK70: Vitesses moyennes –jour 135- Vive-eau , étiage

Vitesses moyennes-jour 135 - Vive-eau étiage

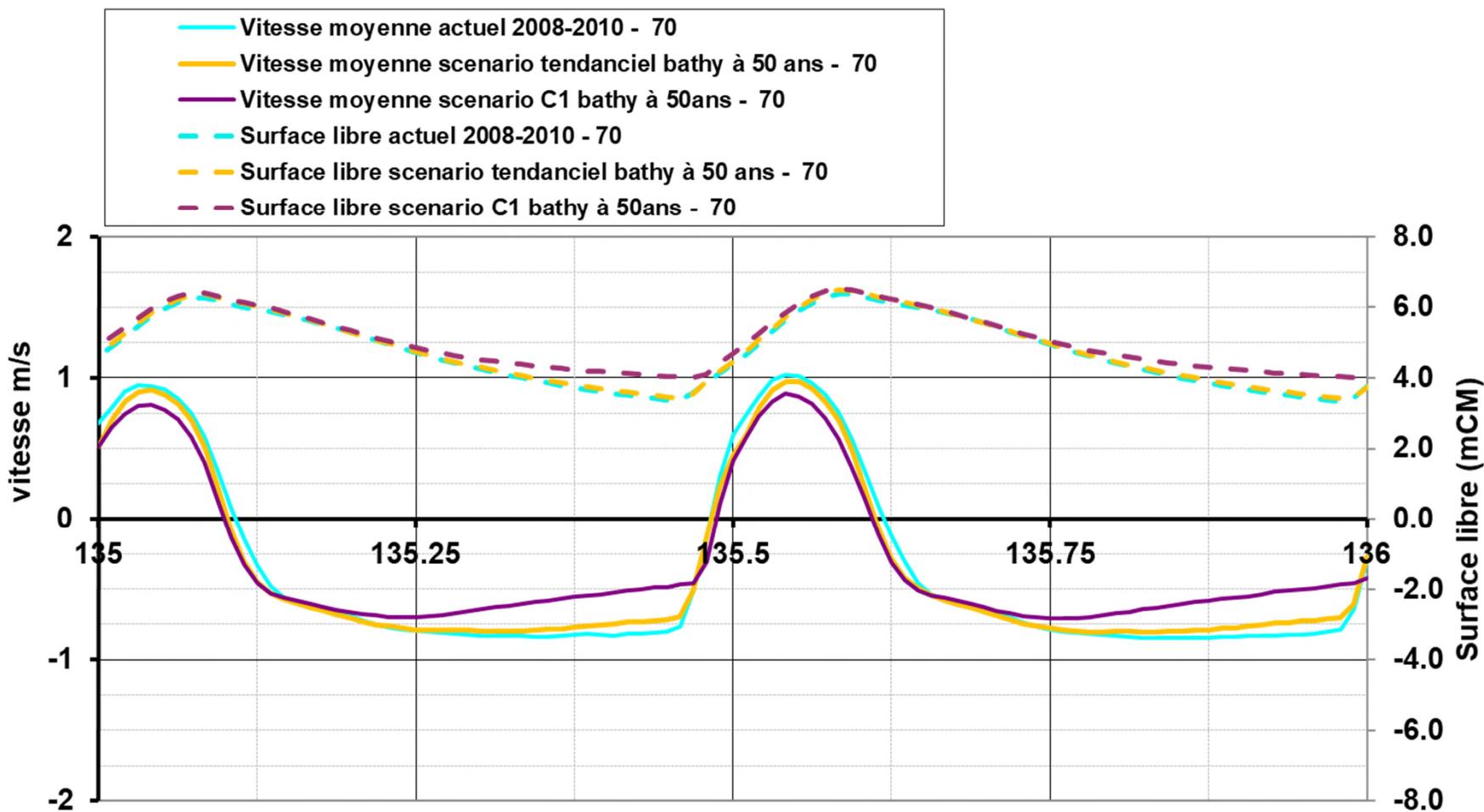


FIG 1.18 Impact moyen sur les vitesses de flot et de jusant

Calcul sur 8 mois

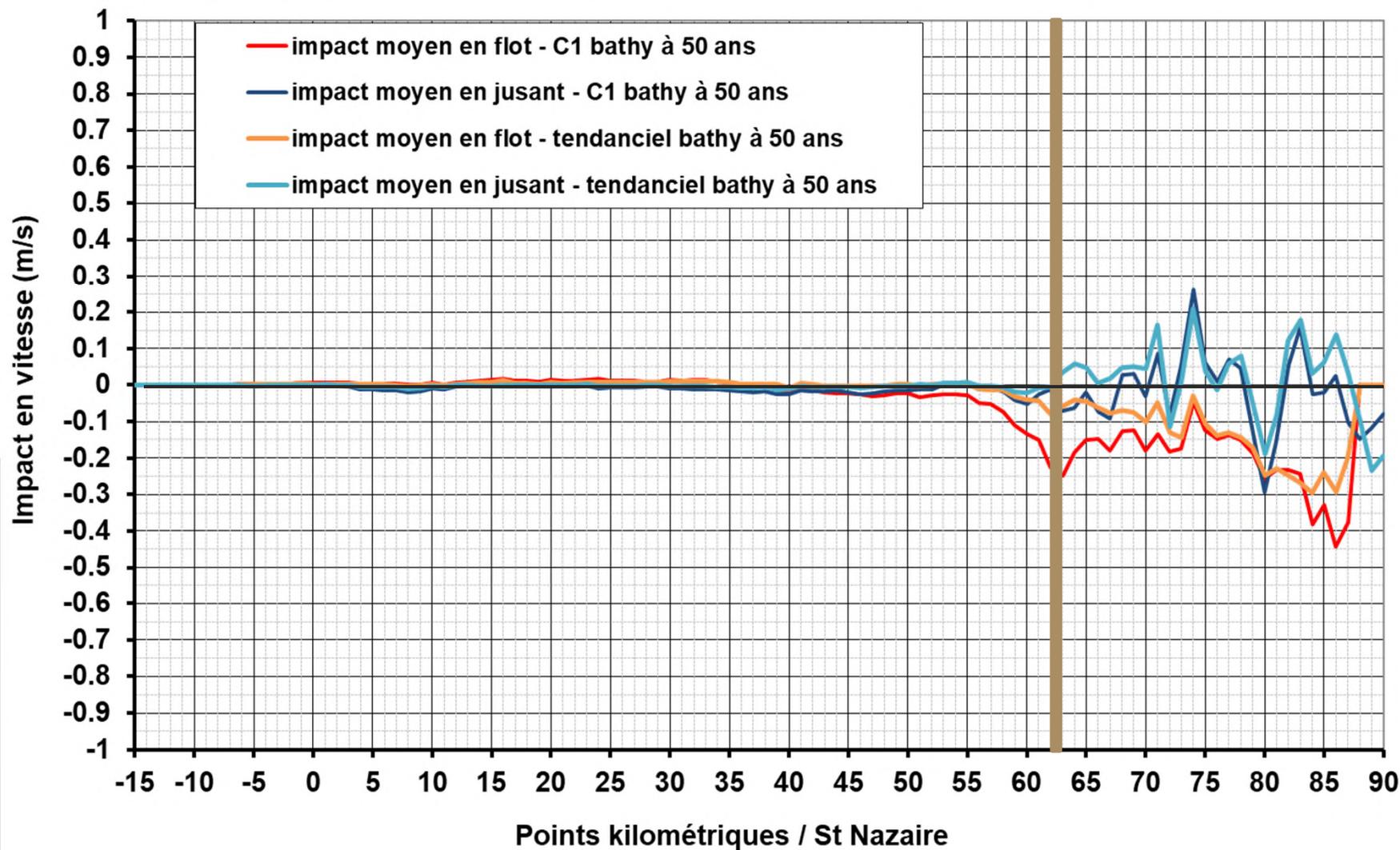


FIG 1.19 Impact sur les vitesses supérieures à 0,5m/s

Calcul sur 8 mois

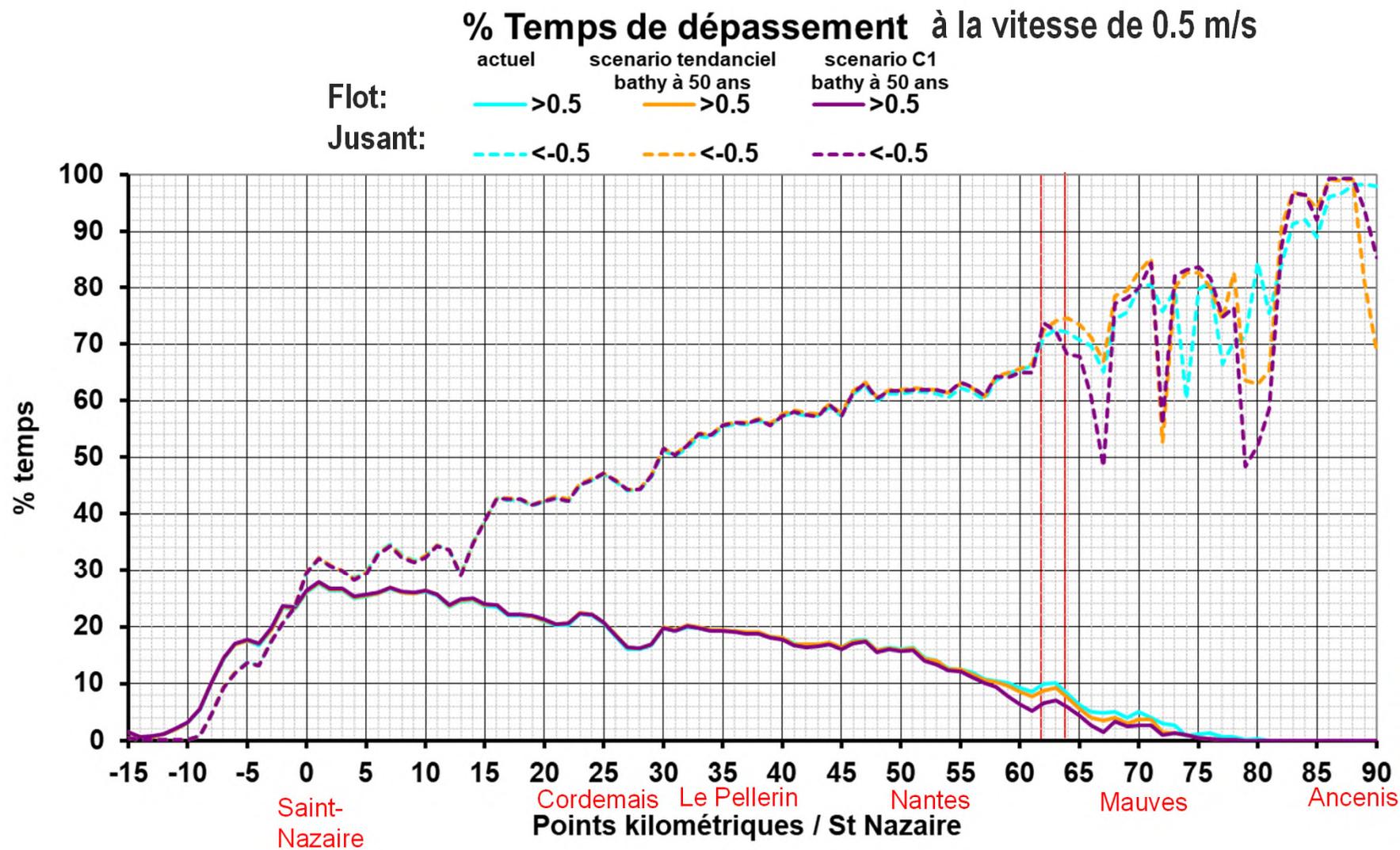


FIG 1.20 Impact sur les vitesses supérieures à 1 m/s

Calcul sur 8 mois

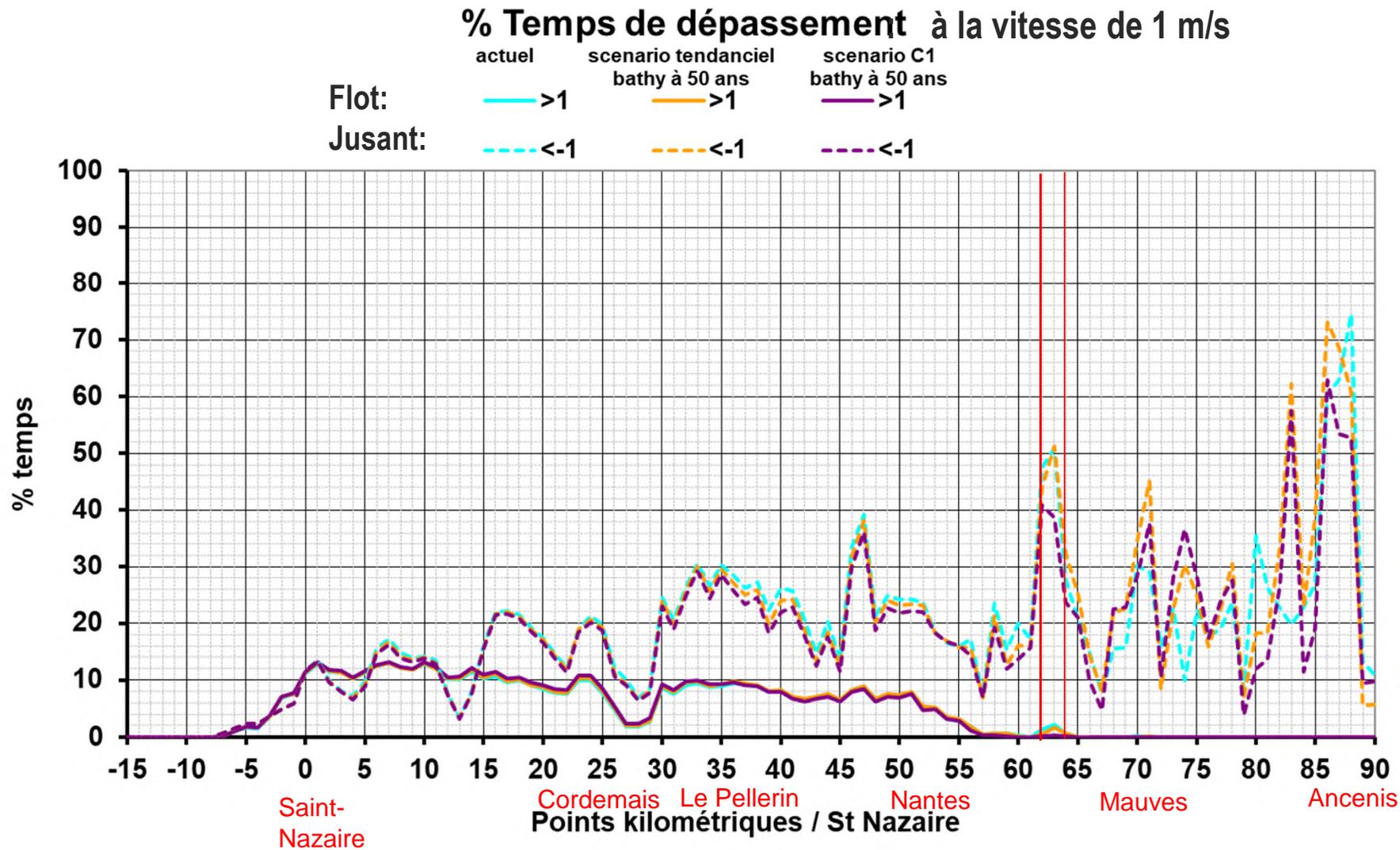


FIG 1.21 Salinité moyenne

Calcul sur 8 mois

Salinité moyenne

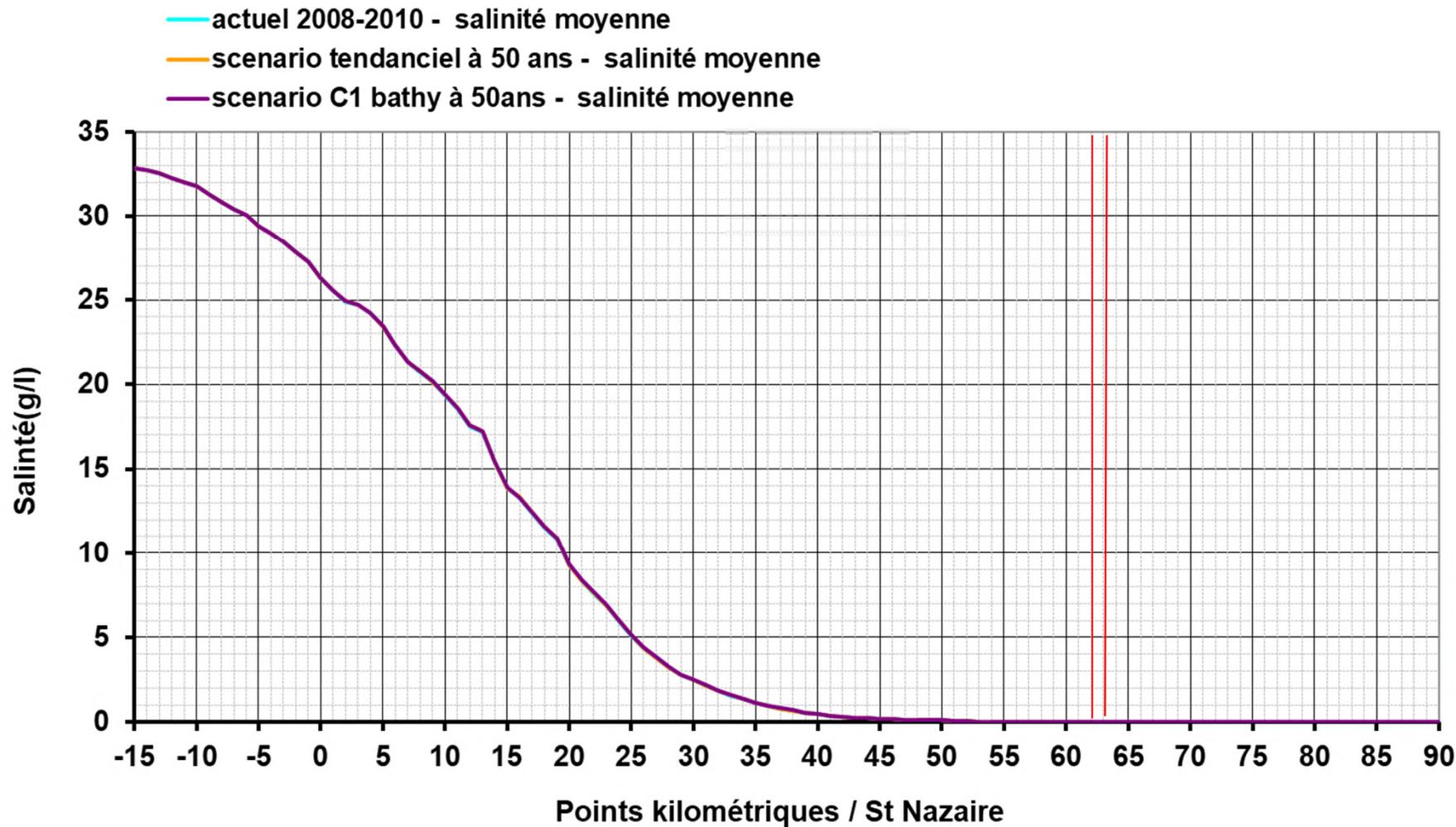


FIG 1.22 Evolution de l'intrusion saline - seuil à 0,5 g/l

Calcul sur 8 mois

Salinité moyenne - % Temps de non dépassement au seuil de 0,5 g/l

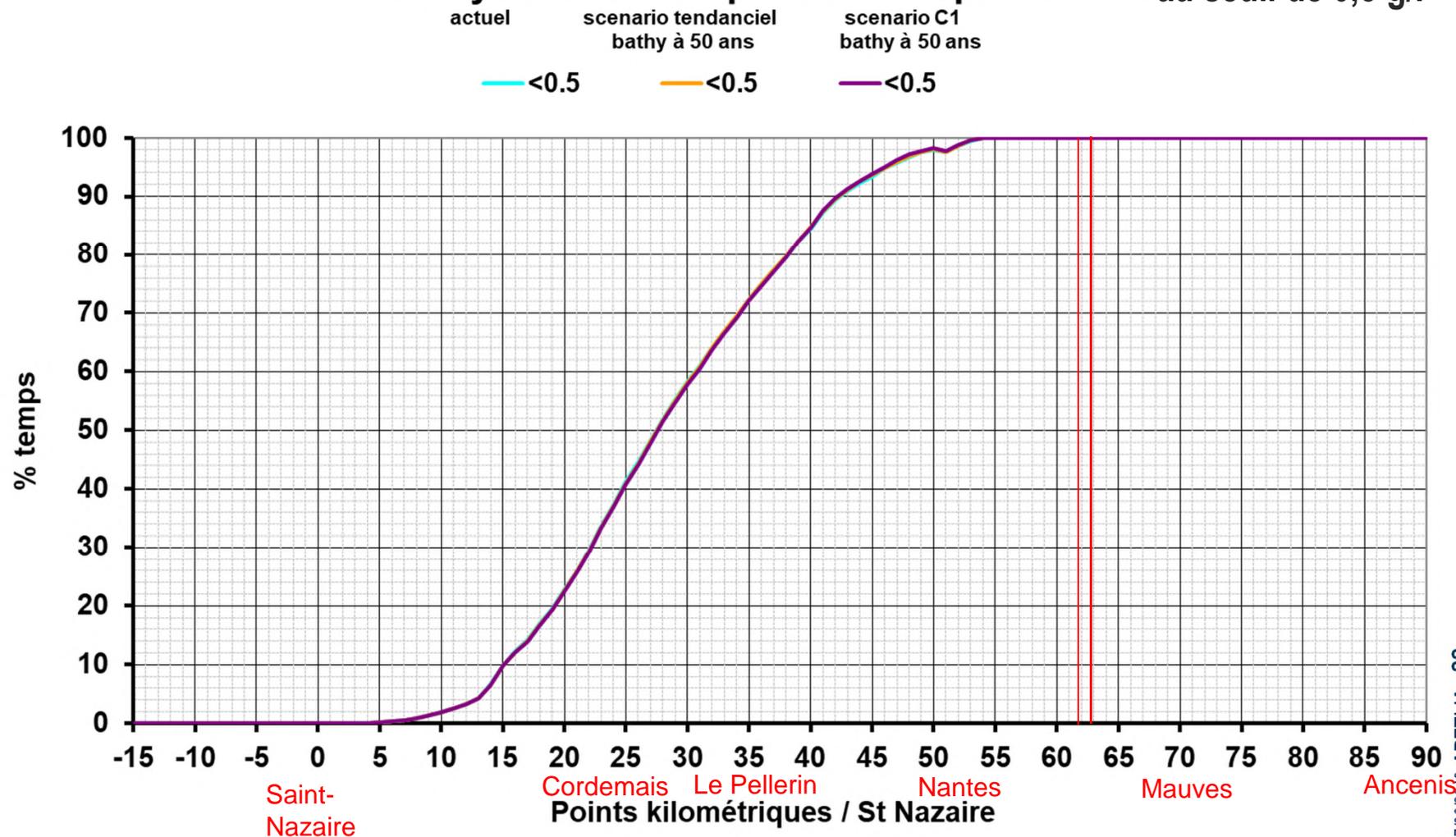


FIG 1.23 Etendue du bouchon vaseux en vive eau à l'étiage

Max et min de turbidité moyenne - jour 135- vive-eau étiage

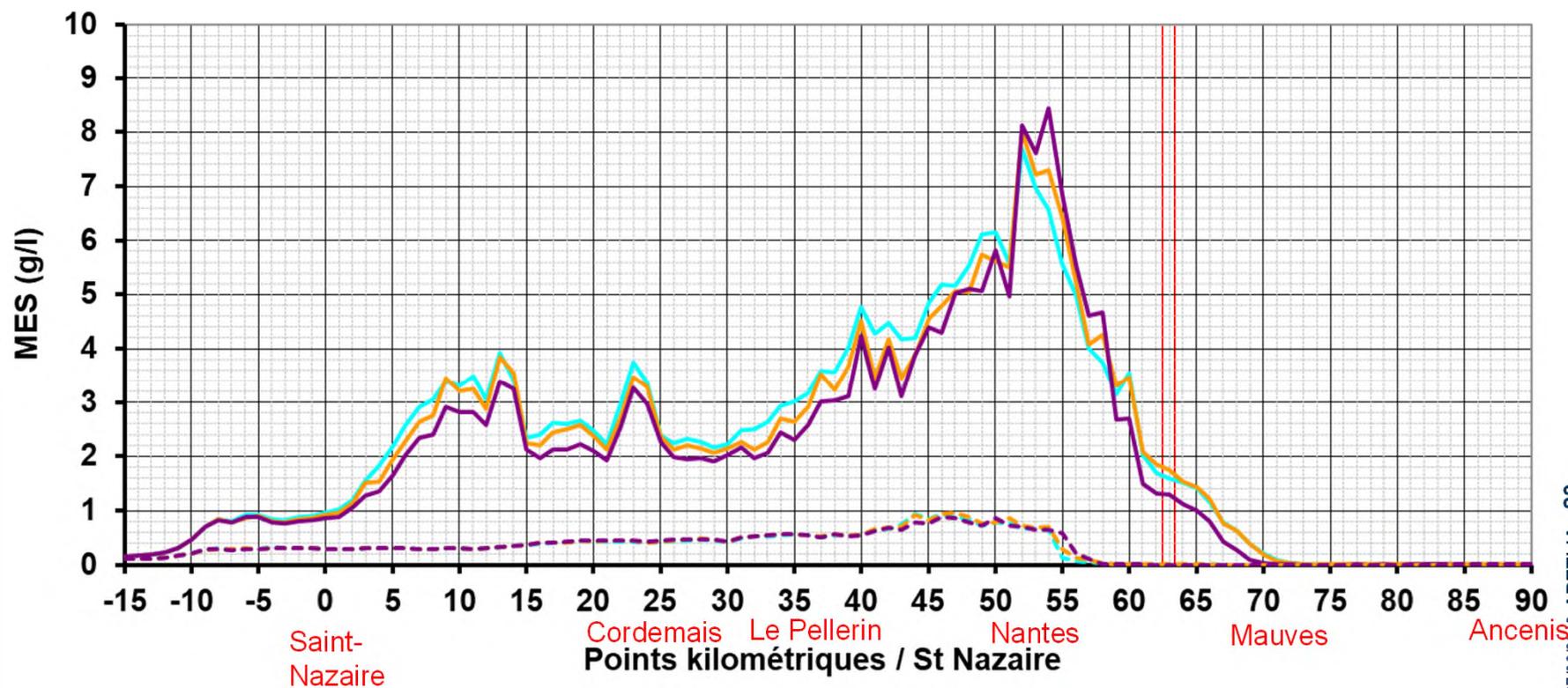
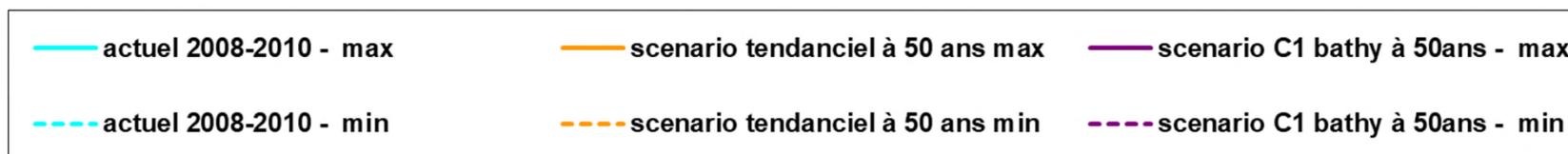


FIG 1.24 MES: Analyse temporelle sur 8 mois - Mes moyenne suivant les pks

Calcul sur 8 mois

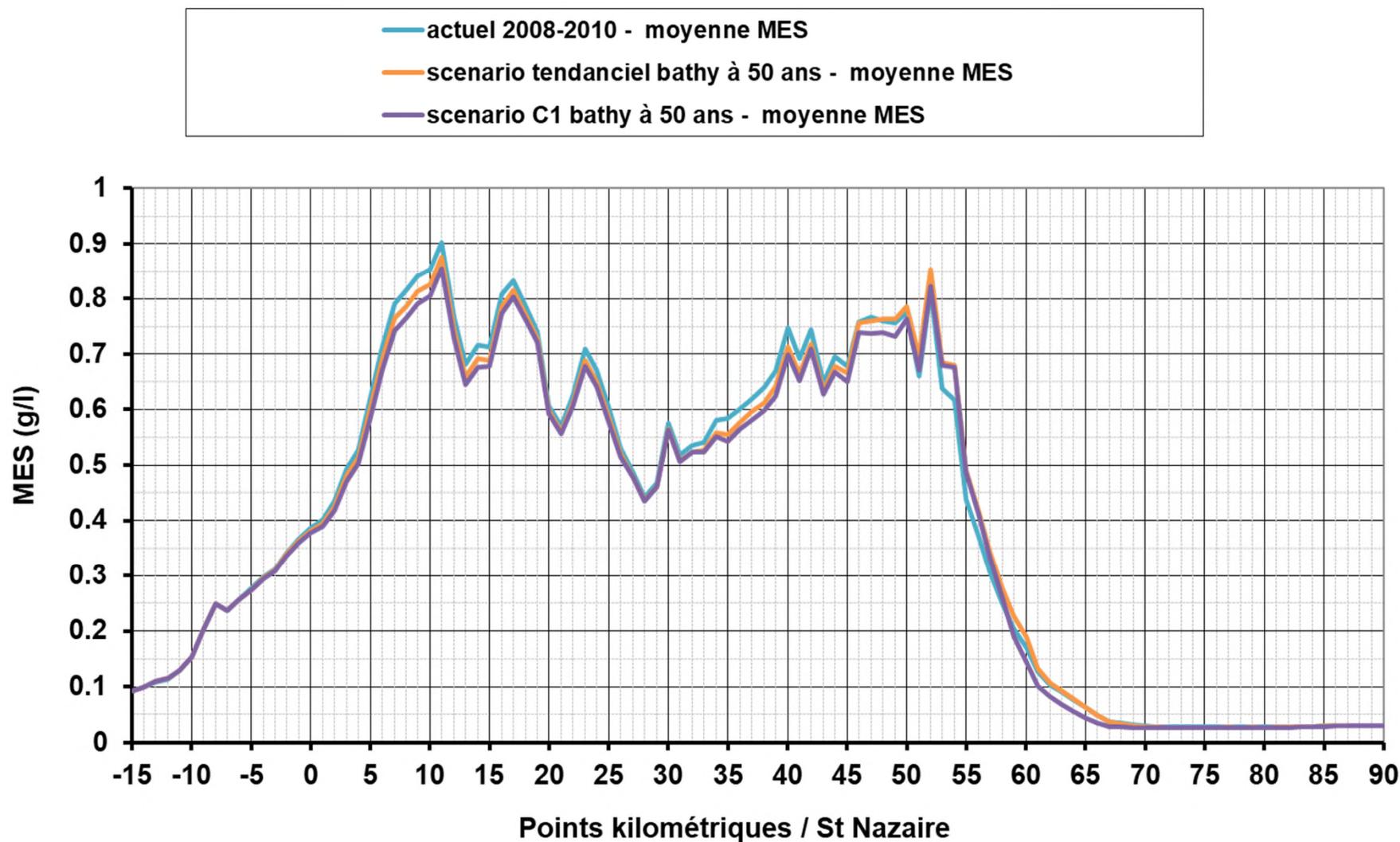


FIG 1.25 MES: Analyse temporelle sur 8 mois impact moyen suivant les pks

Calcul sur 8 mois

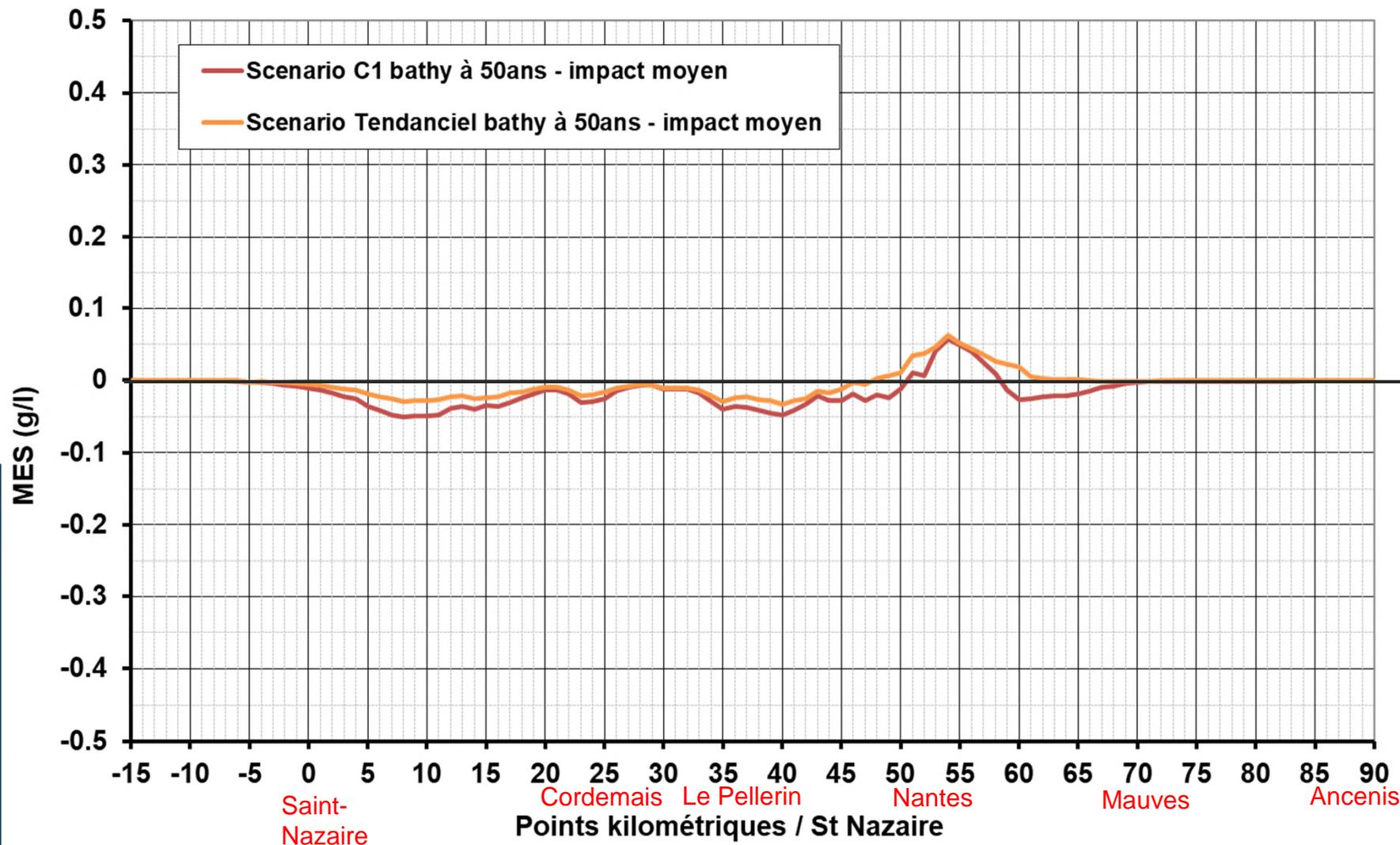


FIG 1.26 Evolution de la MES- % de temps où l'impact dépasse 0,5g/l

Calcul sur 8 mois

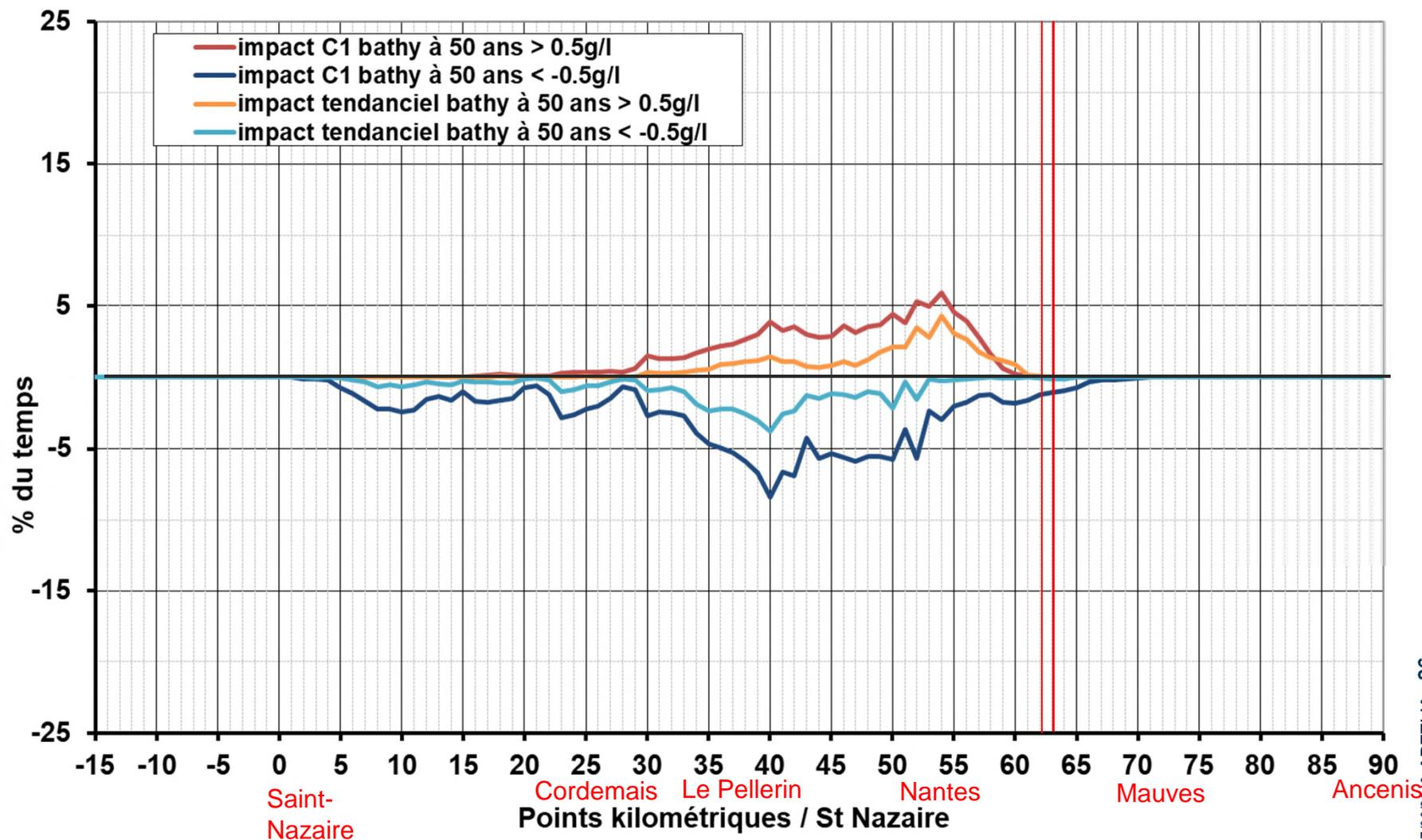


FIG 1.27 MES: Analyse temporelle sur 8 mois
 impact sur la MES au pk 40

débits, marée et niveau moyen

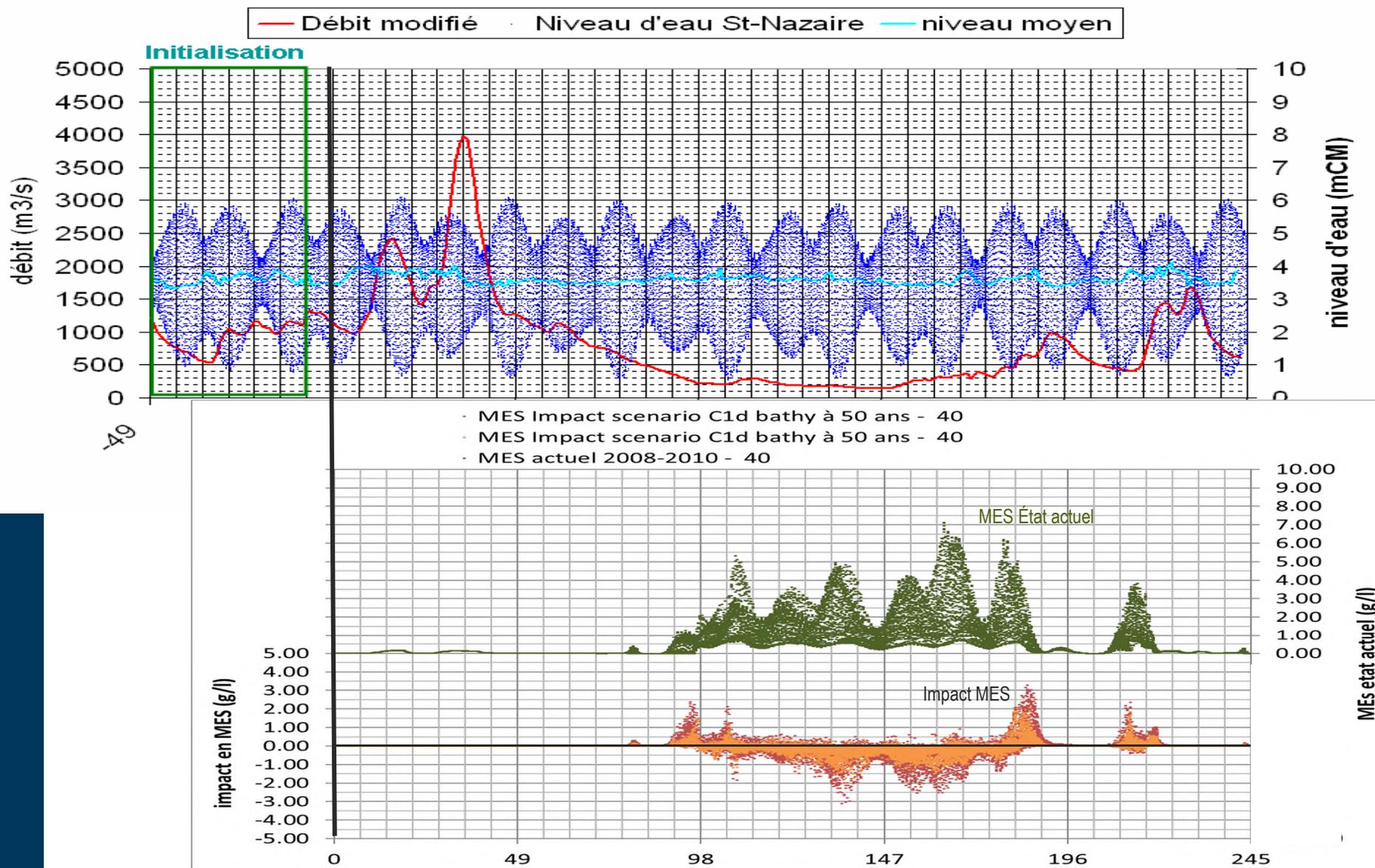


FIG 1.28 MES: Analyse temporelle sur 8 mois
 impact sur la MES au pk 45

débits, marée et niveau moyen

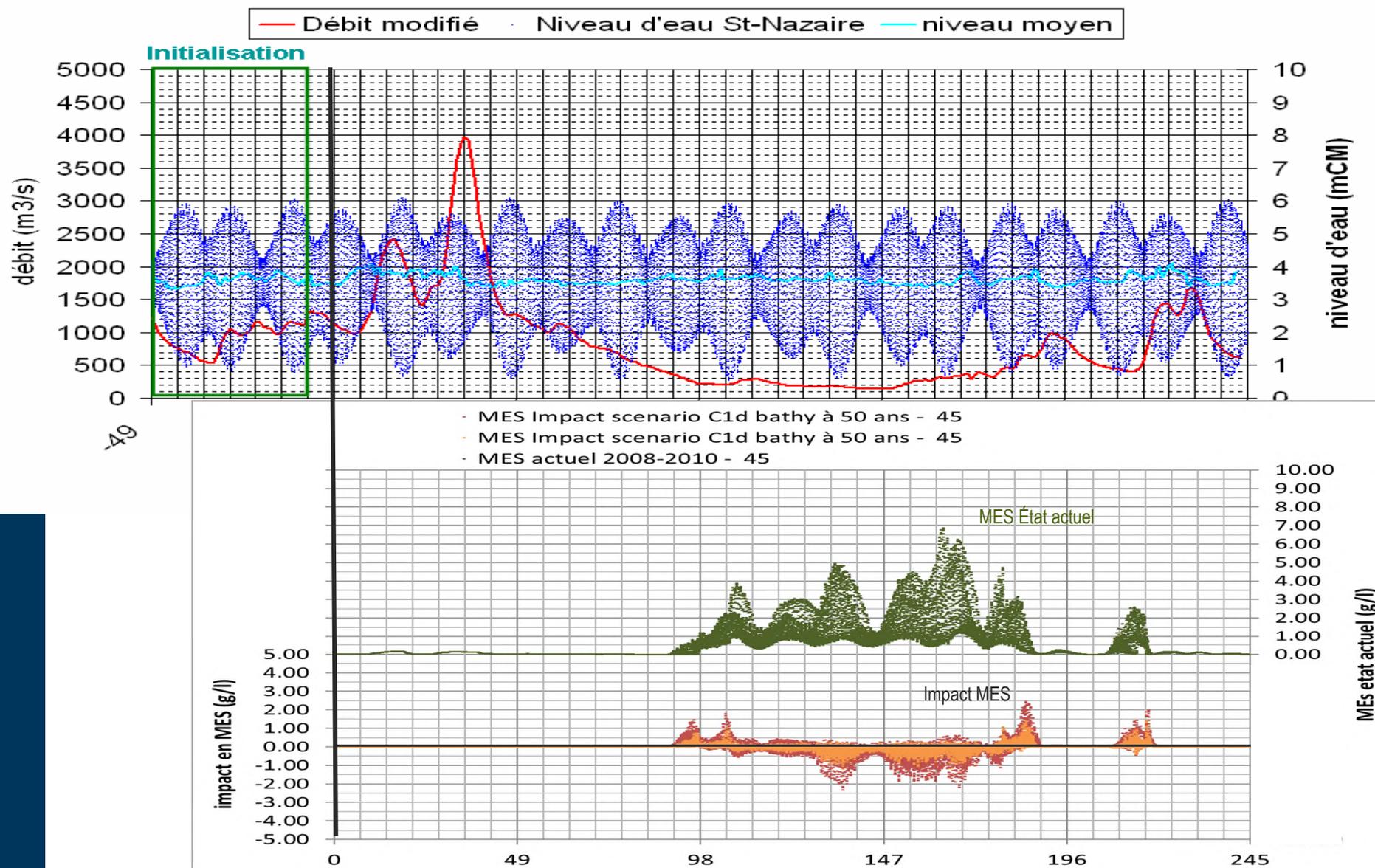


FIG 1.29 MES: Analyse temporelle sur 8 mois
impact sur la MES au pk 50

débits, marée et niveau moyen

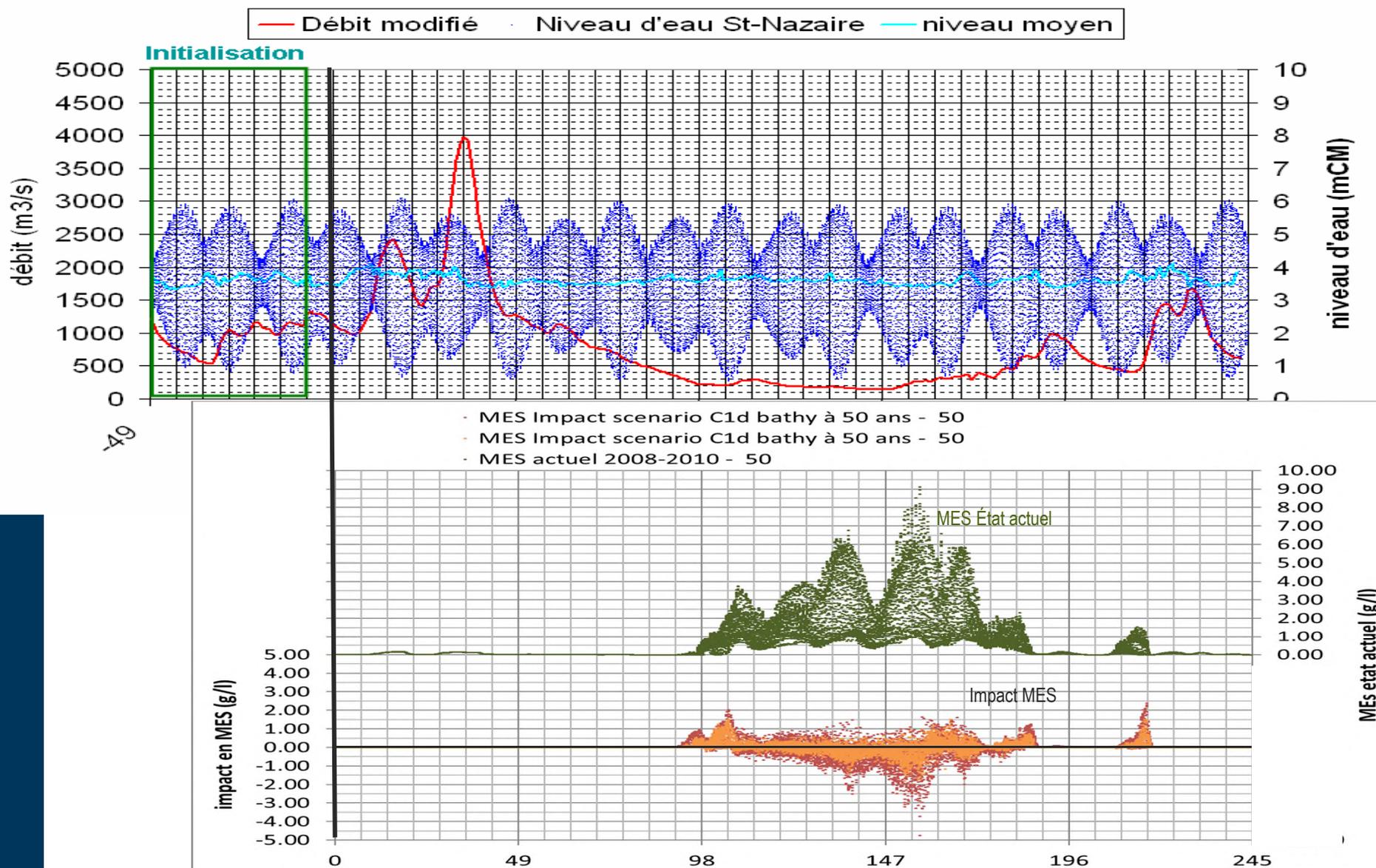


FIG 1.30 MES: Analyse temporelle sur 8 mois
 impact sur la MES au pk 55

débits, marée et niveau moyen

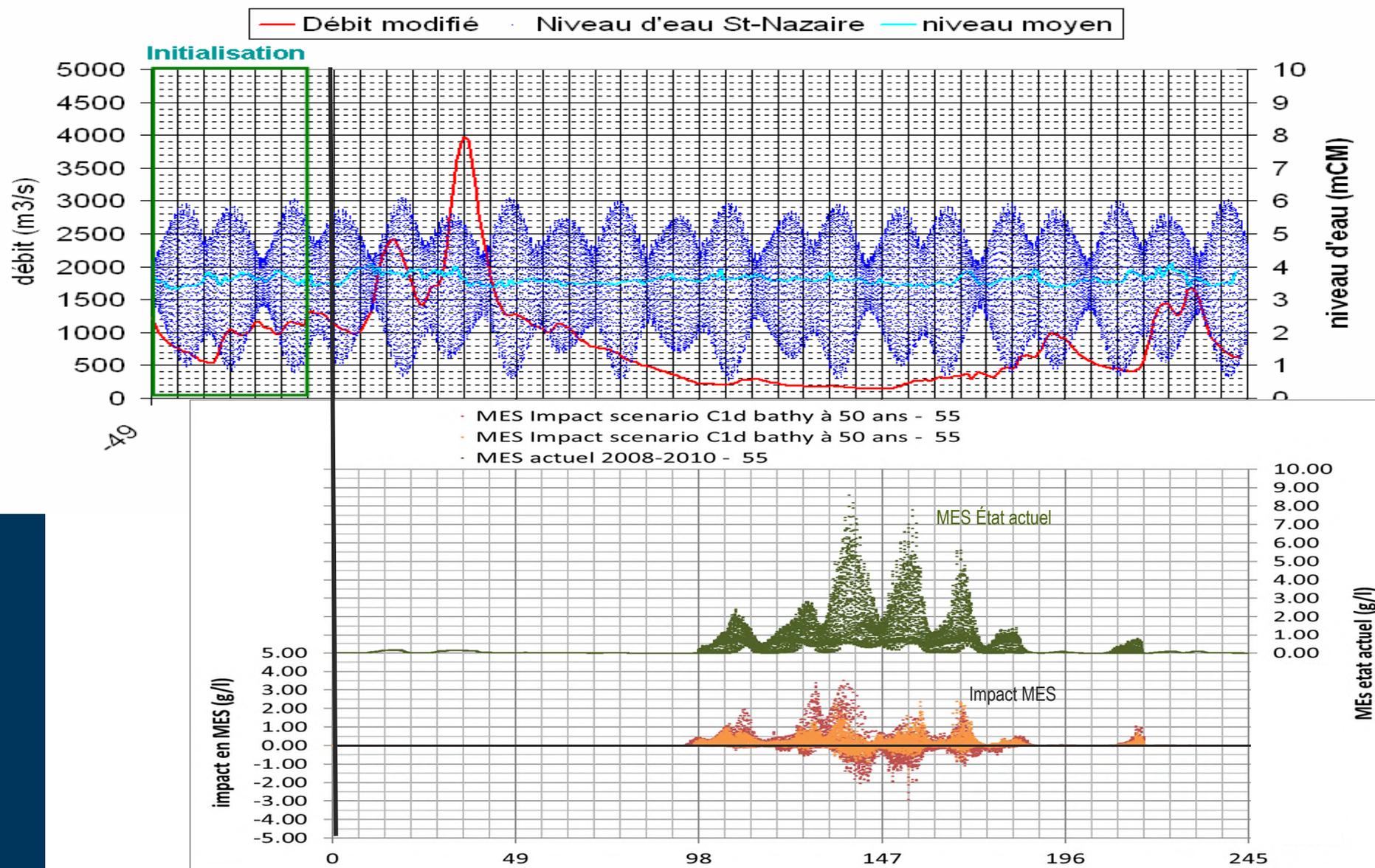


FIG 1.31 MES: Analyse temporelle sur 8 mois
 impact sur la MES au pk 60

débits, marée et niveau moyen

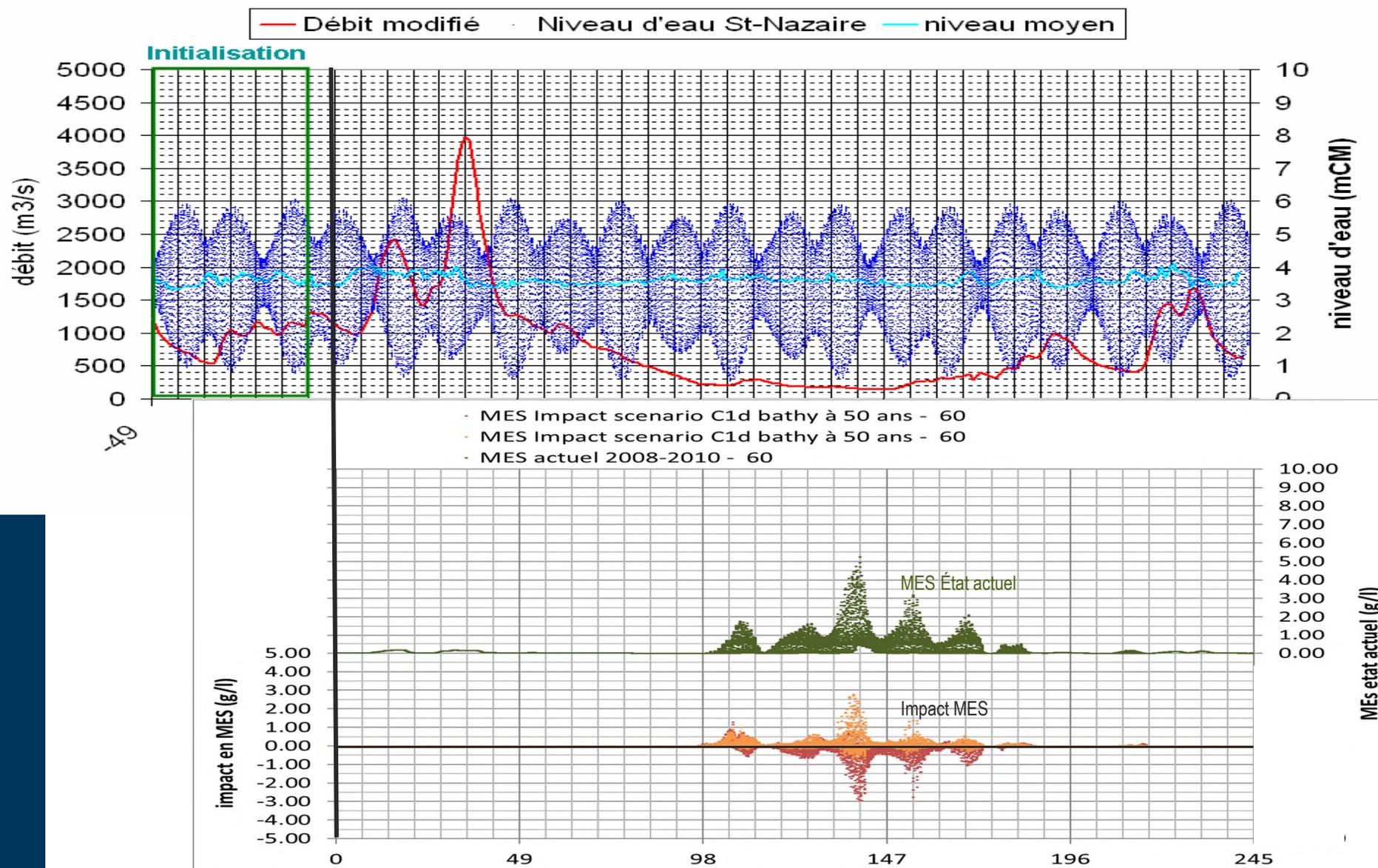


FIG 1.32 MES: Analyse temporelle sur 8 mois
 impact sur la MES au pk 65

débits, marée et niveau moyen

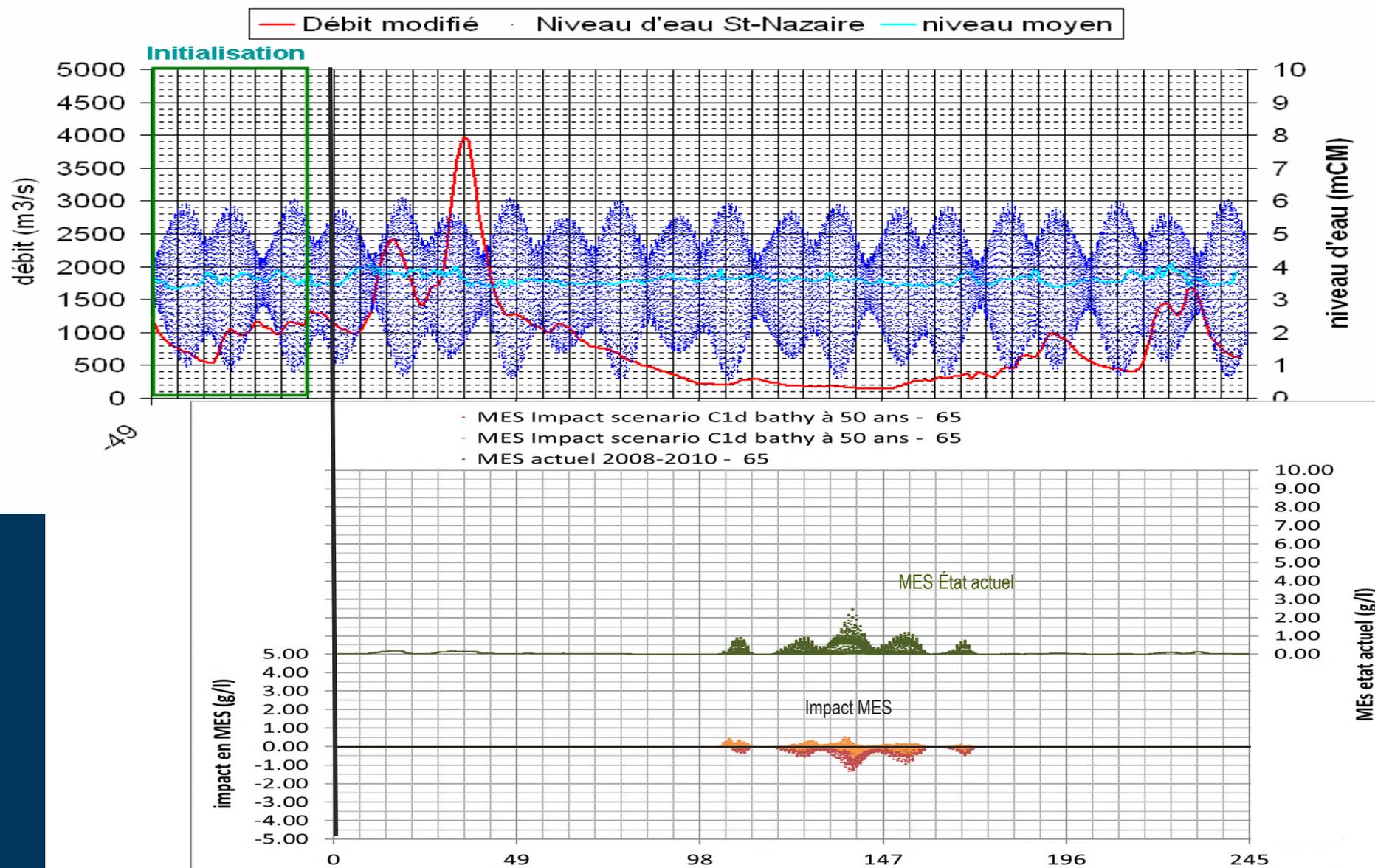


FIG 1.33 MES: Analyse temporelle sur 8 mois
 impact sur la MES au pk 70

débits, marée et niveau moyen

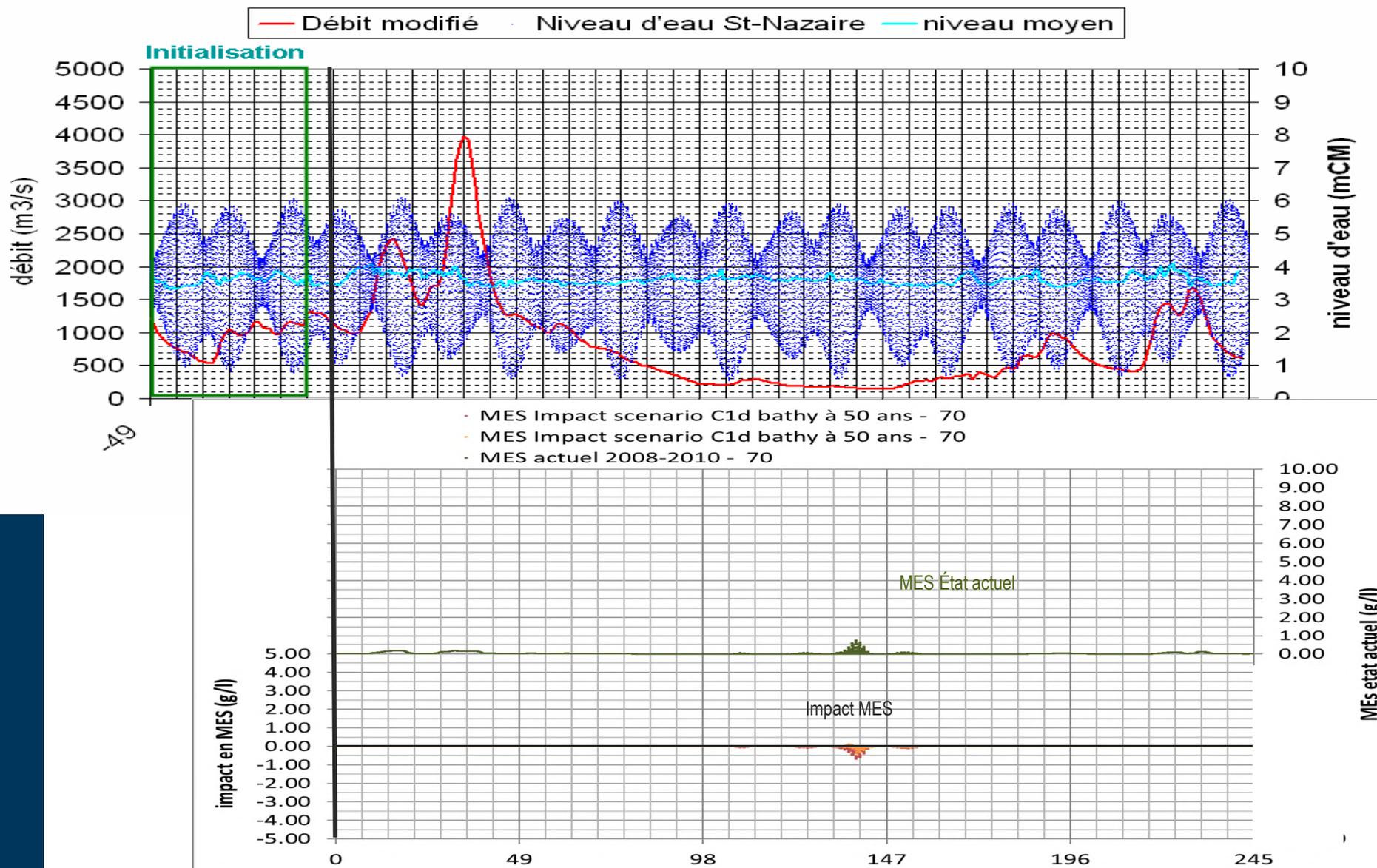


FIG 1.34 Différentiel d'épaisseur de crème de vase (stricto-sensu)

Calcul sur 8 mois

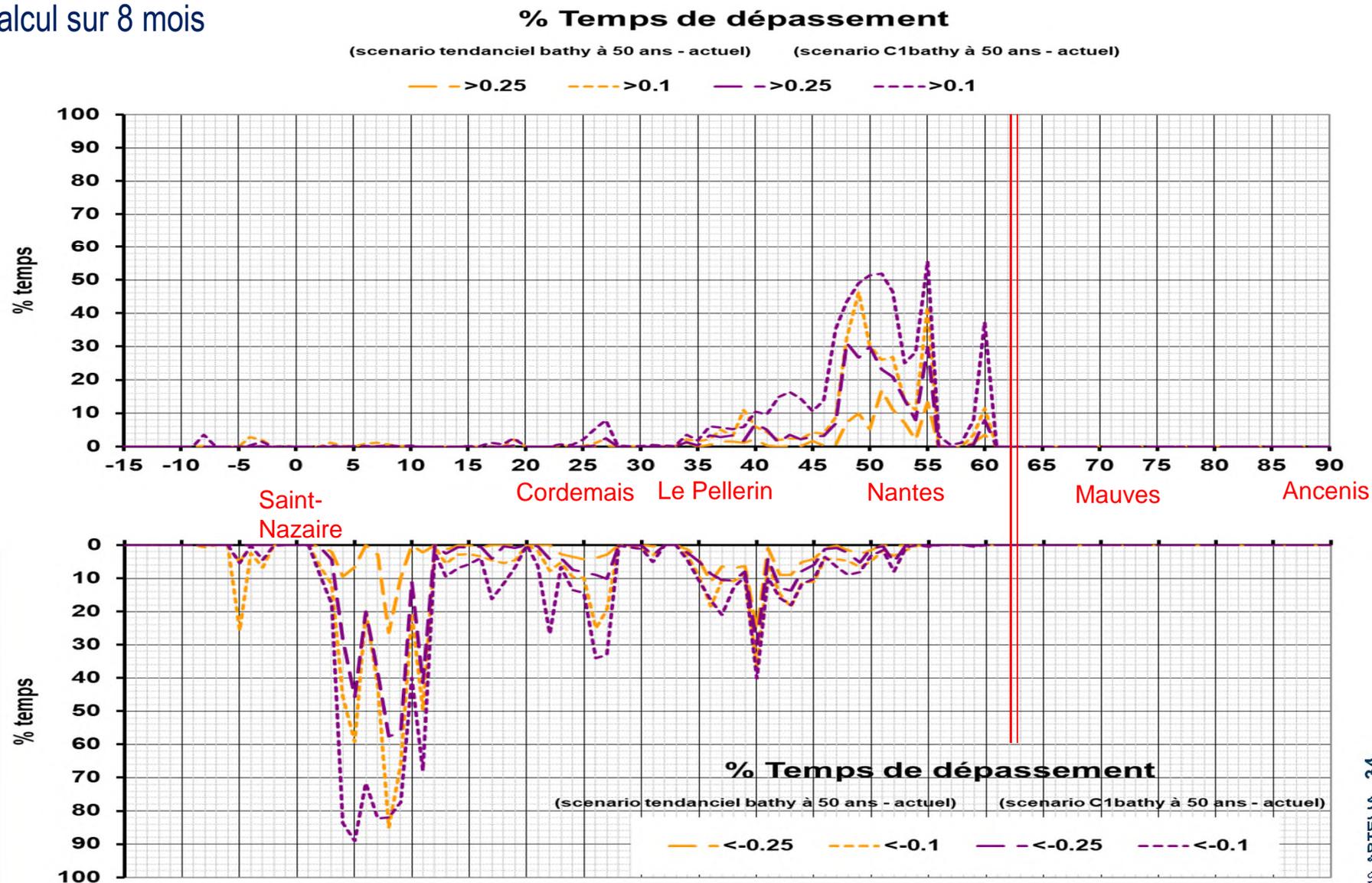


FIG 1.35 Etendue de la crème de vase (stricto-sensu) en vive eau à l'étiage et impact

Epaisseur de crème de vase - jour n°135: Vive-eau étiage

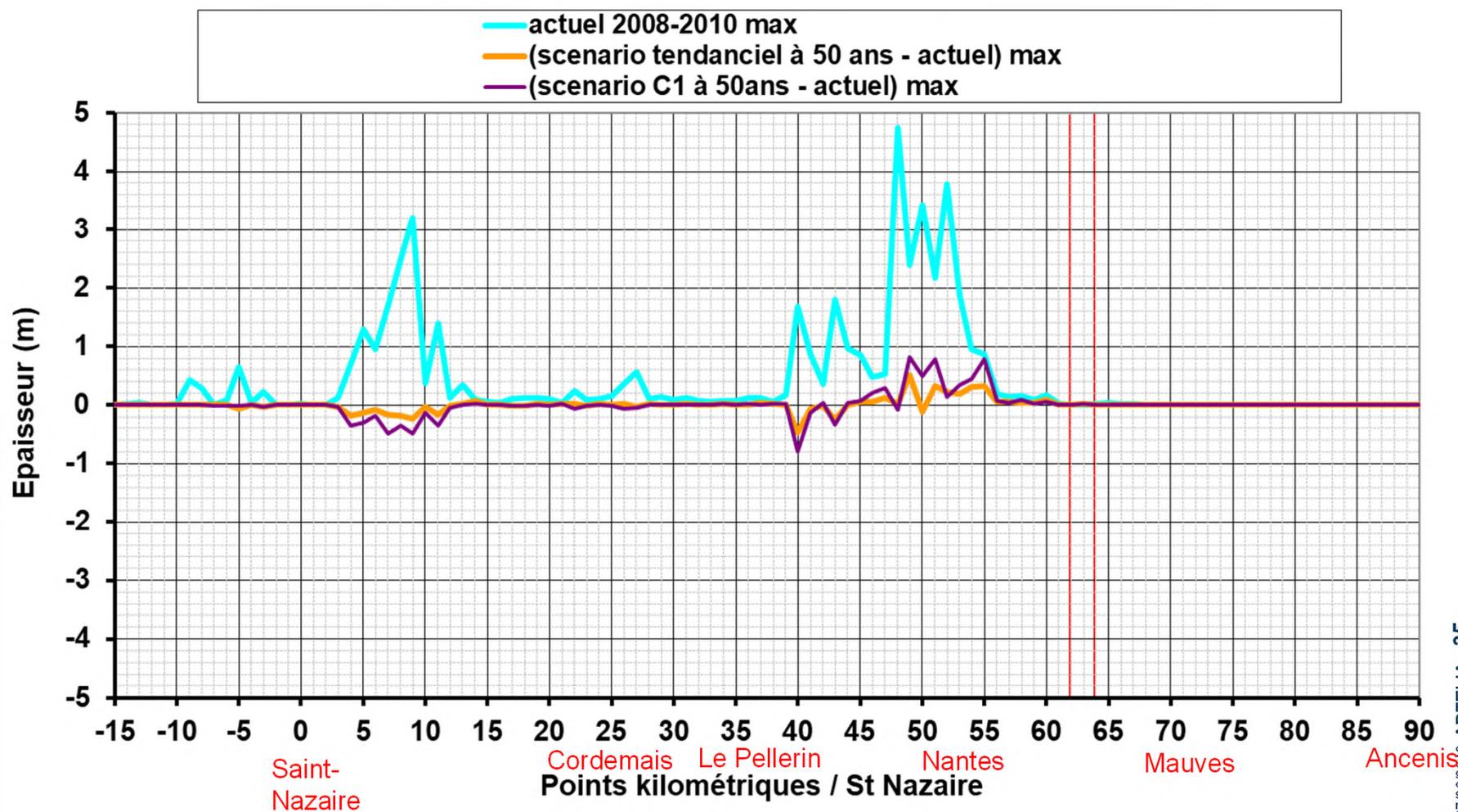


FIG 1.36 Etendue de la crème de vase (stricto-sensu) en vive eau à débit moyen après une période de crue et impact

Epaisseur de crème de vase - jour n°84: Vive-eau débit moyen

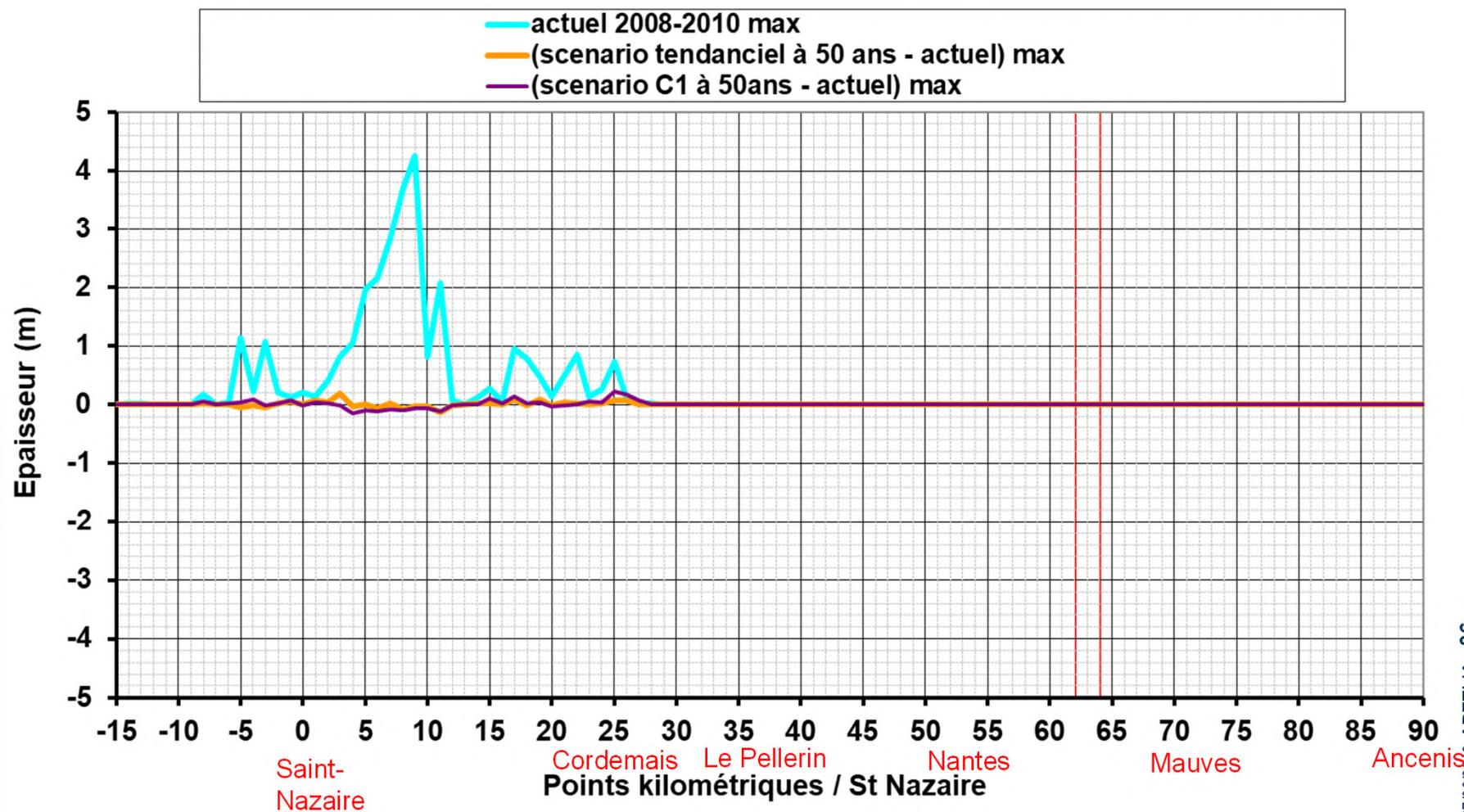


FIG 1.37 Etendue de la crème de vase (stricto-sensu) en marée moy. à débit moyen après une période d'étiage et impact

Epaisseur de crème de vase - jour n°197: Maree moy. débit moyen

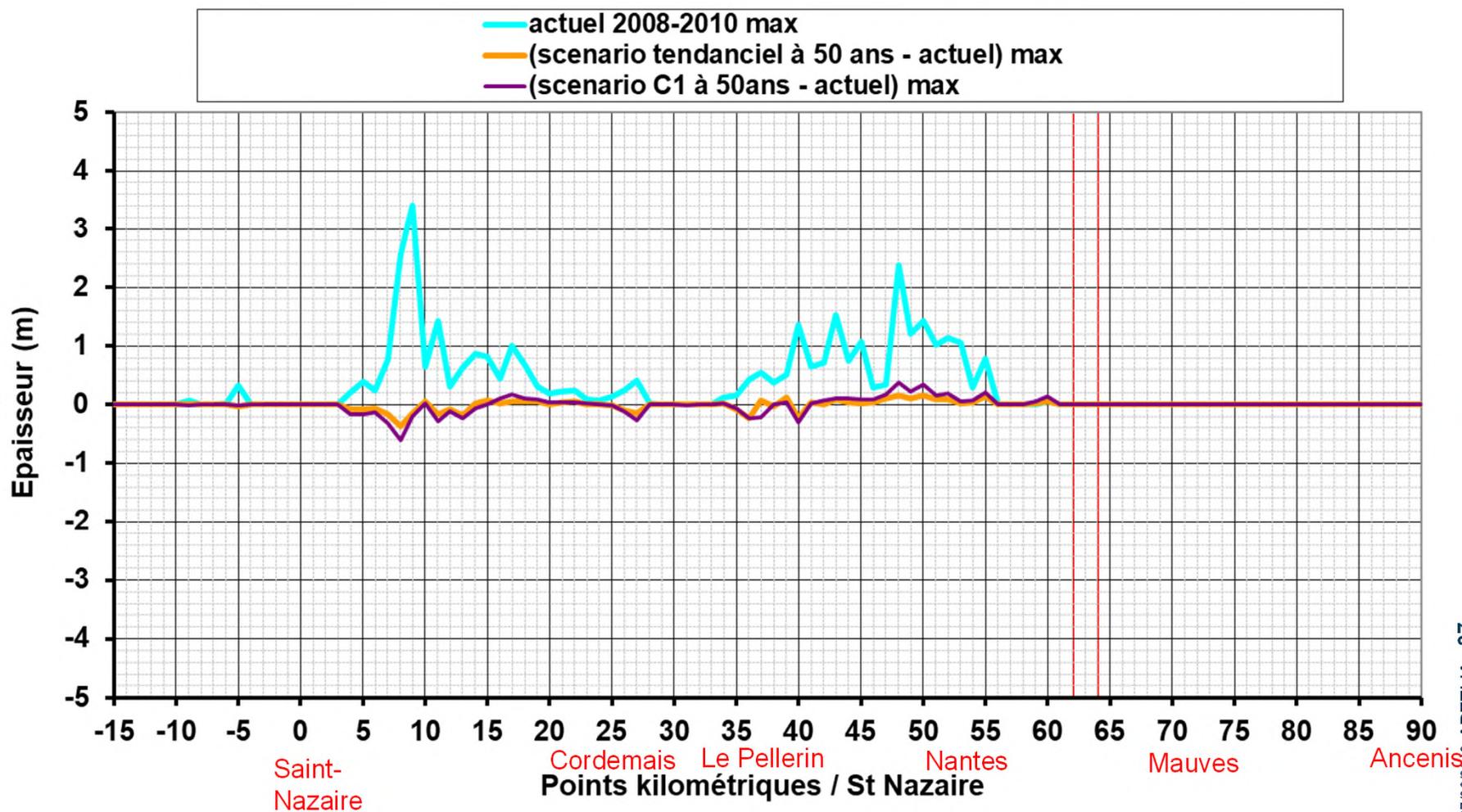


FIG 1.38 Cubatures dépôt + suspension pour les zones < 4,86mCM

Scenario actuel

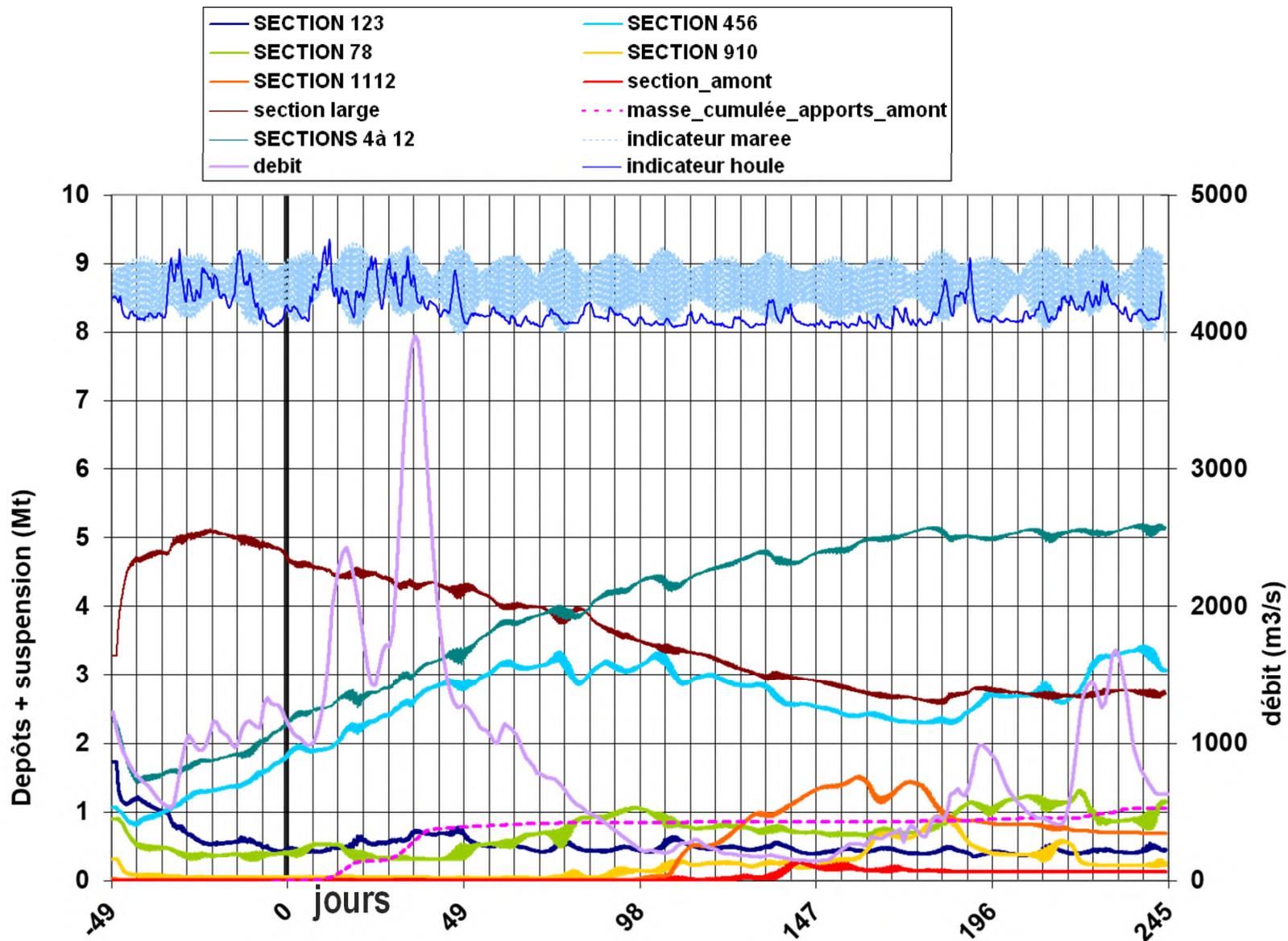


FIG 1.39 Cubatures dépôt + suspension pour les zones < 4,86mCM

Scenario C1 bathymétrie à 50 ans

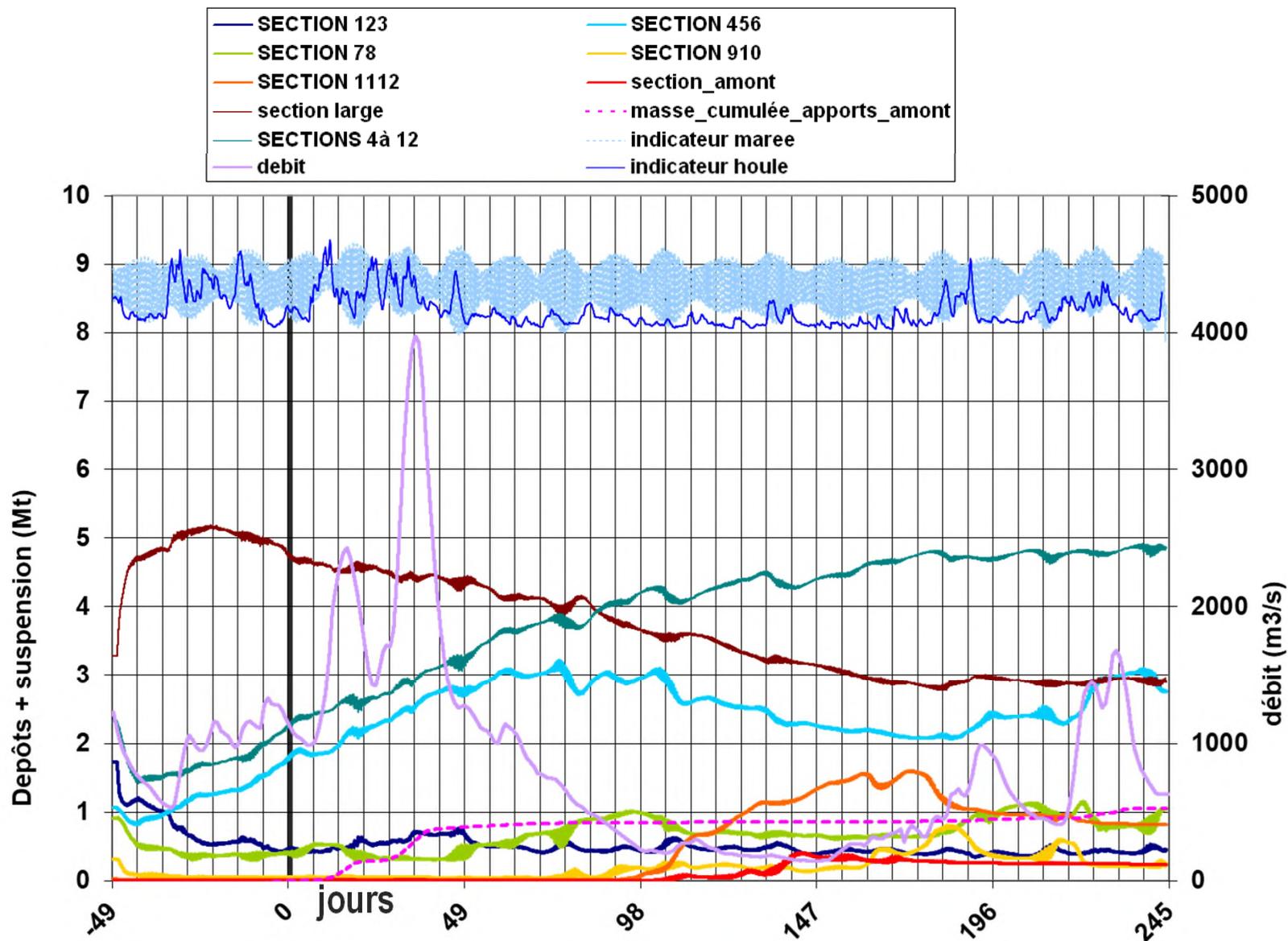


FIG 1.40 Cubatures dépôt + suspension pour les zones < 4,86mCM

Scenario tendanciel bathymétrie à 50 ans

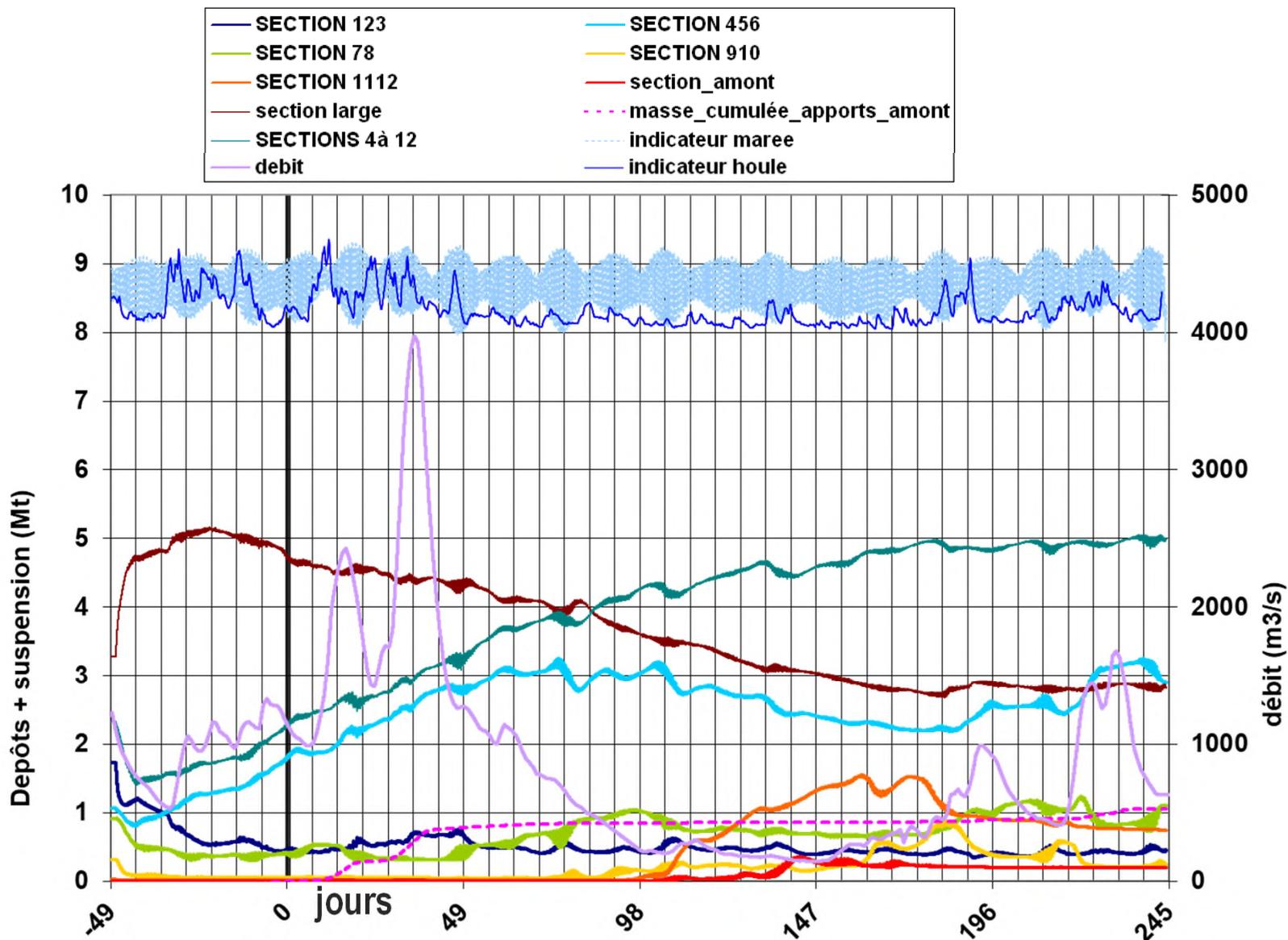


FIG 1.41 Cubatures suspension pour les zones < 4,86mCM

Scénario actuel

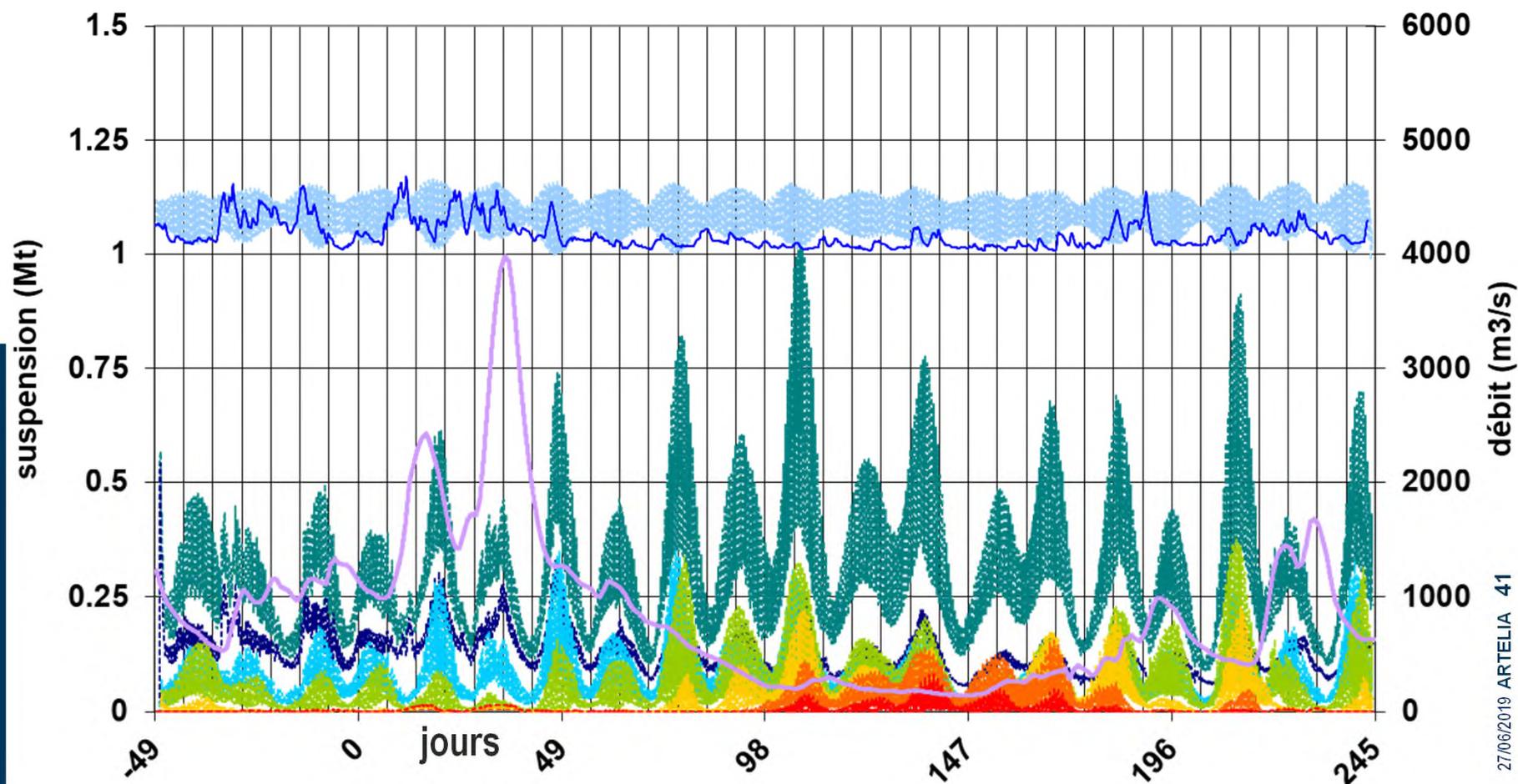
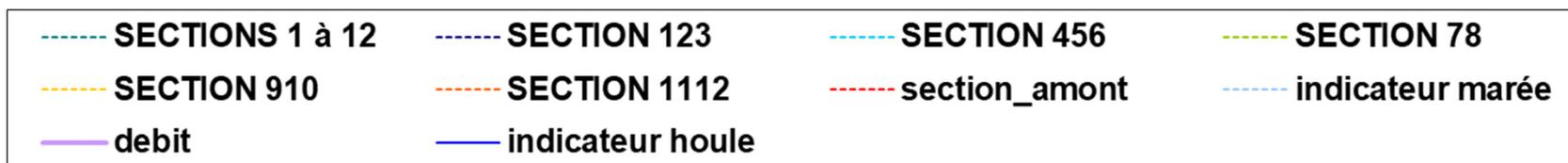


FIG 1.42 Cubatures suspension pour les zones < 4,86mCM

Scenario C1 bathymétrie à 50 ans

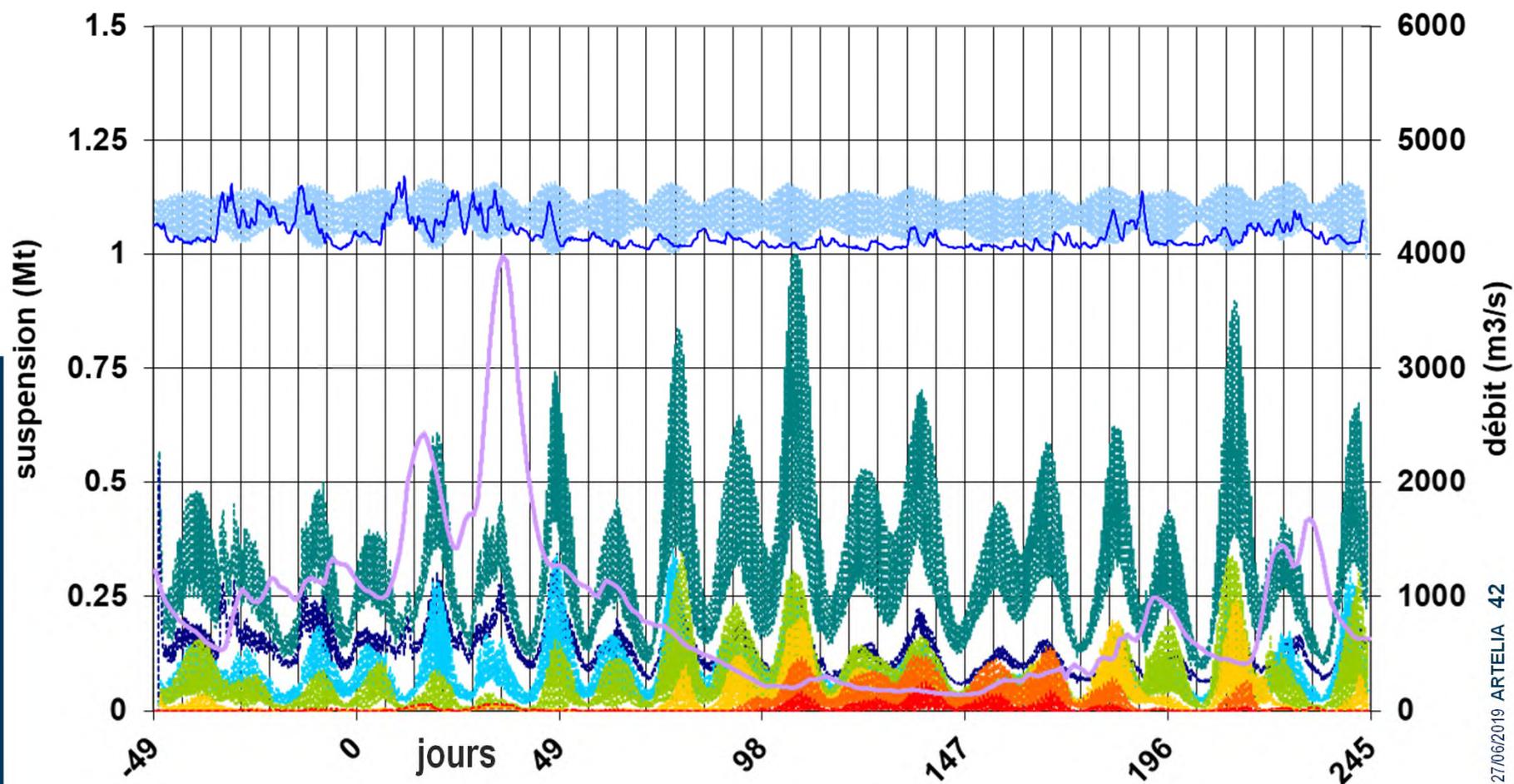


FIG 1.43 Cubatures suspension pour les zones < 4,86mCM

Scenario tendanciel bathymétrie à 50 ans

