

Référentiel ligne d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine : concertation, analyses statistiques et modélisation

Cédric FISSON¹, Jean-Philippe LEMOINE¹, Florence GANDILHON², Julien SCHAGUENE², Eric DAVID²

¹ GIP Seine-Aval – cfisson@seine-aval.fr

² ARTELIA Eau & Environnement – Florence.GANDILHON@arteliagroup.com

RÉSUMÉ. – La mise en œuvre des dispositifs réglementaires ayant trait aux inondations dans l'estuaire de la Seine mobilise différents organismes dont des partenaires du GIP Seine-Aval. Ces derniers ont émis la volonté commune de partager des hypothèses de travail (élaboration de scénarios d'inondation) et des résultats (niveaux d'eau, zones de débordement), afin de mettre en place une vision homogène des inondations à l'échelle de l'estuaire de la Seine (de Poses à la baie de Seine).

Dans ce cadre, le GIP Seine-Aval a piloté une étude sous maîtrise d'œuvre d'ARTELIA, qui vise à définir les niveaux d'eau et leur occurrence à prendre en compte pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine. Cette étude a nécessité le développement d'un modèle numérique hydrodynamique simulant les niveaux d'eau dans le lit mineur de l'estuaire de la Seine et les grandes zones de débordement dans le lit majeur en réponse à la variation des paramètres forçant (marée, débit, surcote océanique, météo), sur la base de la bathymétrie actuelle. Après concertation avec les acteurs intéressés par cette problématique, des scénarios à modéliser ont été définis : conditions hydro-climatiques de crues et de tempêtes historiques, effets du changement climatique (élévation du niveau marin), et conditions théoriques de débordements.

La démarche initiée permet de mieux connaître les conditions de déclenchement des inondations en Seine et d'intégrer au mieux les spécificités estuariennes dans la gestion de ce risque. Des applications opérationnelles de ces travaux sont d'ores et déjà en cours et différentes perspectives d'amélioration de la connaissance et de transfert des résultats sont en développement.

Mots-clés : estuaire Seine, modélisation, concertation, niveau d'eau

A waterlevel referencial for the flooding risk management of the Seine estuary: concertation, statistic analysis and numerical modeling

ABSTRACT. – Implementation of regulatory frameworks relating to flooding in the Seine estuary mobilises numerous organisations including some GIP Seine-Aval partners. Those organisations expressed the common desire to share working hypotheses (flood scenario) and results (water levels, flooding area) to set up a coherent overview of the Seine estuary flooding conditions (from Poses to the Seine bay).

To provide consistency to its partners flooding study, the GIP Seine-Aval has led a study, subcontracted with ARTELIA, which aims to define reference water levels and their occurrence which will then be considered for flooding risk management in the Seine estuary. To carry this study, an hydrodynamic numerical model has been developed on the basis of present bathymetry. It simulates water levels in low water channel and main flooding areas in the Seine estuary due to changes in forcing parameters (tide, Seine flow, maritime and meteorological set up). After consultation with stakeholders, different scenarios have been defined in order to be studied with the model: hydro-climatic conditions of historical floods and storms, climate change effects (sea level rise), theoretical flooding conditions.

This process has enhanced the knowledge of the Seine estuarine flooding hydrodynamics and its triggering conditions. These results will be used to improve flooding risk management. Operational applications of this work are already in progress and perspectives for improving the knowledge and transfer of results are in development.

Key-words: Seine estuary, flooding model, water level, consultation

I. INTRODUCTION

Les niveaux d'eau de l'estuaire de la Seine (i.e. portion de la Seine soumise à la marée, couvrant 160 km entre le barrage de Poses en amont et la partie orientale de la baie de Seine à l'aval [Figure 3]) sont sous l'influence de différents forçages continentaux, marins et atmosphériques. L'importance de chaque facteur dans la survenue d'une inondation sera plus ou moins forte selon son intensité et

le secteur de l'estuaire considéré. Les inondations font partie de l'histoire de l'estuaire et la combinaison des facteurs détermine la typologie de celles-ci (dynamique mixte marine/continentale) [El Abida *et al.*, 2010 ; Gras & Fournier, 2013].

Le GIP Seine-Aval est un organisme assurant la mise en œuvre du programme de recherche scientifique Seine-Aval et coordonnant des études communes aux acteurs de l'estuaire pour apporter des éléments de réponse aux questions sur l'estuaire en mobilisant des travaux de recherche et des

études en régie. Il est financé par les régions de Haute et Basse Normandie, les départements de l'Eure, du Calvados, de Seine Maritime, l'Agence de l'Eau Seine Normandie, les Grands Ports Maritimes de Rouen et du Havre, les communautés d'agglomération de Rouen, Elbeuf, Austreberthe et du Havre, et l'Union des Industriels de la Chimie.

La problématique inondation est aujourd'hui au cœur de nombreux dispositifs réglementaires (Directive Inondation, Plans de Prévention des Risques, Études de dangers des barrages et des digues, etc.) dont l'application sur l'estuaire de la Seine mobilise différents organismes partenaires du GIP Seine-Aval (État, GPM, CG, Agglomérations, etc.). Pour apporter une cohérence d'ensemble à ces travaux et intégrer au mieux les spécificités estuariennes dans la gestion du risque inondation, le GIP Seine-Aval a porté une étude (maîtrise d'œuvre : ARTELIA) visant à définir l'occurrence et les niveaux d'eau à prendre en compte pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine [ARTELIA & GIPSA, 2013a ; ARTELA & GIPSA, 2013b, ARTELIA & GIPSA, 2013c ; ARTELIA & GIPSA, 2014 ; Fisson *et al.*, 2014].

Cet article reprend les principaux résultats de cette étude, à savoir 1) la définition de scénarios déclenchant des débordements de la Seine ; 2) la construction d'un modèle hydrodynamique centré sur l'estuaire de la Seine ; 3) l'exploitation de ce modèle pour simuler les niveaux d'eau atteints par différents scénarios.

II. DÉFINITION DE SCÉNARIOS

L'objectif initial de cette première phase était d'aboutir au choix, par les acteurs en charge des inondations dans l'estuaire de la Seine, d'un ensemble de scénarios débouchant

sur des débordements de la Seine, en y associant une période de retour. Pour ce faire, ont été menées : 1) une analyse statistique des données existantes (hauteurs d'eau, débits, vents, etc.) pour leur associer une période de retour ; 2) une approche statistique combinant différents forçages permettant d'aboutir à une ligne d'eau théorique de période de retour définie ; 3) une concertation avec les acteurs pour discuter une proposition de scénarios à modéliser.

II.1. Analyse des données existantes

Une analyse statistique des **niveaux de pleine mer observés** ces trente dernières années a été réalisée à partir des enregistrements marégraphiques en cinq points le long de l'estuaire : Elbeuf, Rouen, Heurteauville, Tancarville et Balise A. Une loi de Gumbel a été appliquée à ces données et permet d'obtenir une distribution probabiliste des niveaux de pleines mers. L'application de cette distribution permet ainsi de définir une ligne d'eau théorique de période de retour donnée, issue de différentes combinaisons de forçages selon les secteurs de l'estuaire [Figure 1]. Une décroissance du niveau d'eau est observée de l'amont vers l'aval, avec cependant un gonflement à Tancarville lié à la position de ce site, qui est à la fois fortement soumis aux effets du débit et des conditions marines.

De la même manière, et toujours sur la base des données existantes, des analyses statistiques ont été menées sur les **principaux paramètres forçant** les niveaux d'eau dans l'estuaire de la Seine - débits fluviaux, pression atmosphérique, vent, surcotes océaniques - afin d'en estimer les périodes de retour [Tableau I]. Compte tenu de leur prévisibilité, les **coefficients de marée** ne sont pas associés à une période de retour, mais à un niveau marin théorique au Havre.

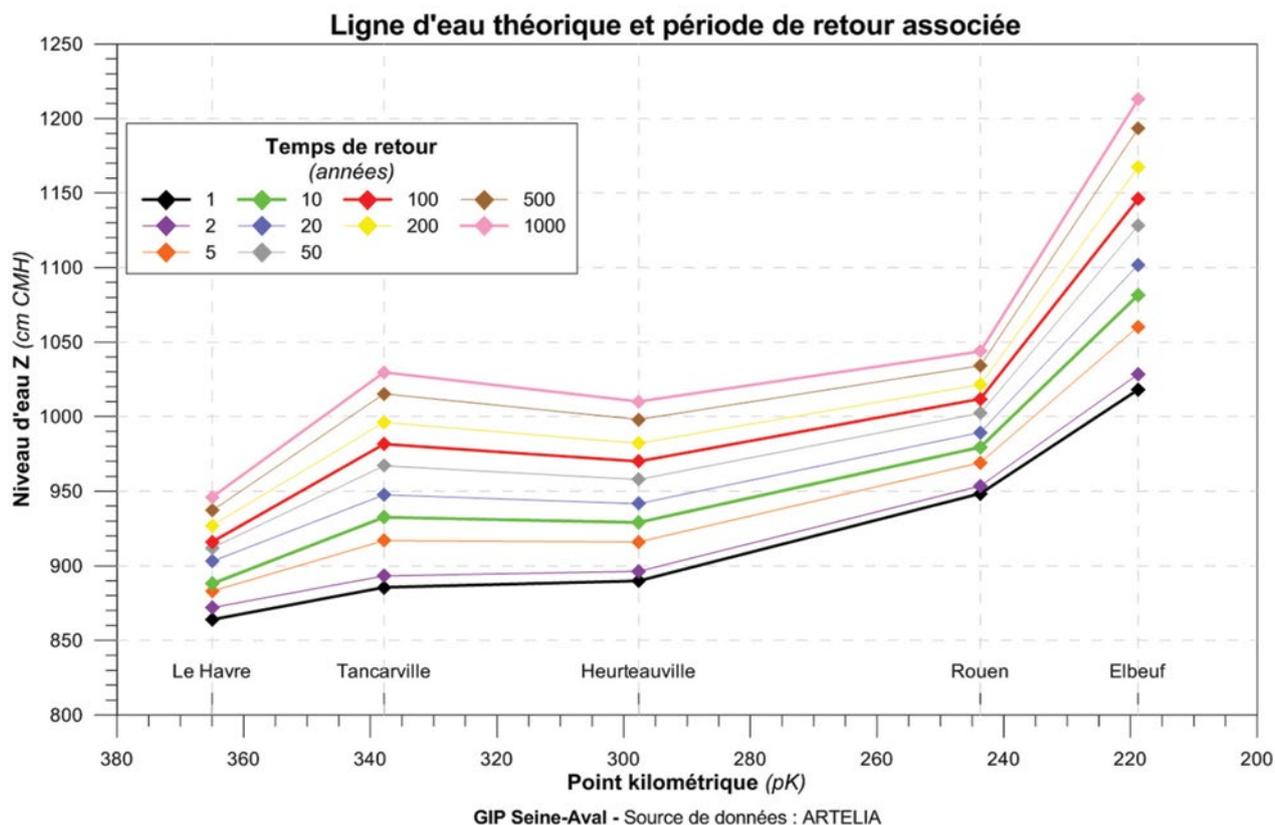


Figure 1 : Ligne d'eau théorique et période de retour associée.

Tableau I : Périodes de retour associées aux principaux forçages.

Temps de retour (années)	Débit de la Seine à Poses ¹ (m ³ /s)	Débit de l'Eure ² (m ³ /s)	Surcote océanique de pleine mer au Havre ³ (m CMH)	Dépression ⁴ (mb)	Vent au cap de la Hève ⁵ (m/s)
1	1450		75	34,22	11,9
2	1640	58			14
5	2105	77	95	43,43	16,7
10	2230	99	104	48,03	18,8
20	2350	120	112	52,45	20,8
50	2510	147	125	58,17	23,6
100	2625	167	132	62,45	25,6
500	2900	215		72,36	30,4
1000			161		32,4

¹ après la construction des grands lacs réservoirs² à la confluence avec la Seine⁴ variation autour de la moyenne (1013mb)³ d'après SHOM, 2012⁵ vent moyen sur 3h ramené à 10m

II.2. Approche théorique

Une fois l'ensemble des forçages gouvernant l'hydrodynamique de l'estuaire caractérisé, les hauteurs d'eau ont été ré-analysées afin de déterminer la **contribution moyenne de chacun des forçages**. La méthodologie retenue pour cette analyse repose sur le lien entre la marée et le débit pour expliquer les niveaux d'eau de base et sur une hypothèse d'indépendance entre les facteurs primaires générant les surcotes (pression atmosphérique, amplitude et direction du vent au cap de la Hève). Cette analyse a ainsi permis d'établir des lois donnant la hauteur d'eau (Z) en fonction de la marée (M), du débit (Q), de la pression atmosphérique (Pa), du vent (V) et d'un résidu statistique (Res) en différents points de l'estuaire [Tableau II].

L'application de ces relations permet alors de calculer la hauteur d'eau et la surcote générée par un ou plusieurs facteurs primaires de période de retour connue, et d'associer différentes **combinaisons de forçages** afin de déterminer la sensibilité de l'estuaire aux facteurs déterminant une surcote. Des lignes d'eaux théoriques pour des combinaisons centennales de forçages peuvent ainsi être construites en

fonction du niveau de base et de la surcote, en considérant 1) la combinaison 'Pression atmosphérique / Vent / Résidu' qui conduit à une surcote de fréquence donnée ; 2) La combinaison 'Marée / Débit' qui correspond à la fréquence complémentaire. Les lignes d'eau ainsi établies permettent de considérer trois zones homogènes qui ont permis de guider les propositions de scénarios soumis à la concertation :

— Au niveau du **Havre**, toutes les combinaisons surcotes/marées conduisent sensiblement aux mêmes niveaux observés en centennal, même si les surcotes centennales fournissent les niveaux les plus forts. Ce secteur est d'**influence maritime** ;

— De **Tancarville à Rouen**, les niveaux maximaux sont issus de la combinaison d'un niveau marin élevé avec un débit élevé et éventuellement de conditions atmosphériques favorisant les surcotes estuariennes. Ce secteur est dit **fluvio-maritime**.

— À l'**amont de Rouen**, les niveaux maximaux sont atteints par les surcotes les plus faibles, donc les débits les plus forts. Ce secteur est donc dans un **régime fluvial dominant**.

II.3. Concertation et choix des scénarios

Afin de partager un ensemble de scénarios cohérents à l'échelle de l'estuaire de la Seine, une **concertation des principaux acteurs** intervenant sur la zone d'étude et s'intéressant aux inondations (gestion des ouvrages de protection, prévision des crues, gestion de crise,...) a été menée. Ce processus avait pour objet de présenter le travail déjà effectué, de récolter les attentes de chacun par rapport à la problématique des inondations, ainsi que les avis sur des propositions de scénarios pour prioriser ceux à modéliser. Il a pris la forme d'un questionnaire et d'échanges bilatéraux et a concerné des collectivités, des établissements publics, des services de l'État et les Grands Ports Maritimes.

Cette concertation a permis d'établir les problématiques par rapport aux inondations et les attentes de chaque partenaire ; ces dernières étant différentes selon le rôle de la structure (gestion de crise, gestion des ouvrages de protection, prévision,...) et propres à la zone d'intervention de chacun et aux zones à enjeux. Cependant, des axes

Tableau II : Lors donnant la hauteur d'eau en fonction des forçages en 4 points de l'estuaire.

Elbeuf : $Z = Z_{MQ} + Z_{Pa} + Z_V + Res$
- Z_{MQ} : fourni par une analyse des valeurs moyennes par tronçon
- Z_{Pa} : -0.85136Pa + 8.2519
- $Z_V = 0.08Va^2 + 0.20Va + 0$ (relation issue de la modélisation du vent)
Rouen : $Z = Z_{MQ} + Z_{Pa} + Z_V + Res$
- Z_{MQ} : fourni par une analyse des valeurs moyennes par tronçon
- Z_{Pa} : -0.85476Pa + 8.71854
- $Z_V = 0.118Va^2 + 0.34Va + 0$ (relation issue de la mesure du vent)
Heurteville : $Z = Z_{MQ} + Z_{Pa} + Z_V + Res$
- Z_{MQ} : fourni par une analyse des valeurs moyennes par tronçon
- Z_{Pa} : -1.066Pa + 5.028
- $Z_V = 0.062Va^2 + 0.9Va + 0$ (relation issue de la mesure du vent)
Tancarville : $Z = Z_{MQ} + Z_{maritime} + Z_{V_{estuarien}} + Res$
- Z_{MQ} : fourni par une analyse des valeurs moyennes par tronçon
- $Z_{maritime} = 1.05Z_{Havre} + 12$
- $Z_{V_{estuarien}} = 0.026Va^2 + 0.654Va + 0$

communs de réflexion ressortent tout de même de l’analyse des questionnaires :

- Posséder un **référentiel commun** en terme d’inondation apparaît comme un élément essentiel pour la plupart des acteurs de l’estuaire de la Seine, avec une attente forte pour obtenir des **niveaux d’eau de référence** avec leur période de retour associée ;
- Établir les **zones de débordement** pour des événements précis apparaît également comme un point important ;
- Enfin des besoins propres à chaque partenaire ont été précisés (études de danger inondation, études de vulnérabilité et niveaux de protection, prévisions à court terme, aménagements, etc.).

Les **scénarios soumis à la concertation** se basaient sur la prise en compte et le croisement des éléments suivants :
 1) combinaison de forçages définissant le statut de l’évènement selon sa zone d’influence (maritime, fluvio-maritime, fluviale) et sa période de retour (fréquente, rare, extrême) ;
 2) prise en compte d’une élévation du niveau marin pour évaluer les effets du changement climatique ;
 3) prise en compte des aménagements de protection contre les inondations.

À l’issue de la concertation, **un ensemble de scénarios a été retenu** [Tableau III]. Les quatre premiers scénarios sont théoriques et se basent sur des périodes de retour associées aux forçages (débit, marée, surcote) permettant la construction d’un scénario maritime (SC1), d’un scénario fluvio-maritime (SC2) et de deux scénarios combinant une typologie fluviale et maritime (SC3 et SC4). Pour les trois premiers scénarios, l’élévation du niveau marin n’est pas considérée et les murets de protection contre les inondations sont conservés. Pour le quatrième scénario, une élévation du niveau marin de +60 cm est considérée et les murets de protection contre les inondations sont « effacés » (SC4_CC), comme préconisé pour la mise en œuvre de la Directive Inondation. Les deux derniers scénarios se basent sur les conditions hydro-climatiques d’inondations historiques (tempête de décembre 1999 pour le SC5 et crue de janvier 1910 pour le SC6) et considèrent une élévation du niveau marin de +60 cm et un « effacement » des murets de protection contre les inondations (SC5_CC et SC6_CC).

III. DEVELOPPEMENT D’UN MODELE HYDRODYNAMIQUE

III.1. Présentation du modèle

Le modèle développé représente les niveaux d’eau dans le lit mineur de la Seine à l’aval de Poses ainsi que les échanges en débit et en volume entre lit mineur et lit majeur. En revanche, ce modèle, en l’état, n’est pas conçu pour cartographier précisément les zones inondables du lit majeur.

Le système de modélisation utilisé est le logiciel TELEMAC-2D [EDF R&D], apte à simuler et à étudier de manière détaillée les courants et les niveaux induits par la marée, les débits des rivières, les vents,... ; auquel s’ajoute un outil-modèle spécifique développé pour la prise en compte des digues et des infrastructures en remblai [SOGREAH, 2008]. Ce dernier permet de prendre en compte de manière très opérationnelle et avec grande précision les digues et remblais, séparant entre autres lit mineur/lit majeur, indépendamment de la résolution du maillage avoisinant. L’emprise globale du modèle reprend le lit mineur et le lit majeur de l’estuaire de la Seine [Figure 3], mobilise les données de topographie et bathymétrie les plus récentes et intègre les murets de type ‘anti-inondation’ dont la localisation et l’altimétrie ont fait l’objet d’un inventaire spécifique [GIPSA, 2013]. En lit mineur, le maillage a été optimisé en définissant des sections équivalentes, afin de réduire les temps de calcul. Avec cette méthode, la bathymétrie réelle n’est pas projetée directement sur le maillage. Les sections de la Seine ont pour cela été simplifiées selon deux critères : 1) respect de la cote du thalweg ; 2) respect des sections moyennes sous la cote du niveau de m-marée. Ces simplifications permettent de réduire le nombre de mailles nécessaires pour représenter le lit mineur car les sections obtenues sont hydrauliquement comparables à la réalité (à l’échelle du modèle). Le modèle n’ayant pas vocation à calculer des écoulements dans le lit majeur, la discrétisation spatiale y est plus large (entre 150m et 500m), [Figure 2].

Tableau III : Scénarios retenus suite au processus de concertation.

Scénario			Conditions				
N°	Typologie	Evenement	Débit (Tps de retour)	Marée (Coeff.)	Surcote (Tps de retour)	Niveau marin (Elévation)	Murets (Présence)
SC1	Maritime	Théorique	1 (1450 m3/s à Poses)	fort (coeff. 106 : 8,12m)	100 (1,32m)	0	oui
SC2	Fluvio-maritime	Théorique	10 (2230 m3/s à Poses)	moyen/fort (coeff. 95 : 7,81m)	10 (1,04m)	0	oui
SC3	Fluviale + Maritime	Théorique	100 (2623 m3/s à Poses)	fort (coeff. 116 : 8,18m)	100 (1,32m)	0	oui
SC4	Fluviale + Maritime	Théorique	100 (2623 m3/s à Poses)	fort (coeff. 116 : 8,18m)	20 (1,12m)	0	non
SC4_CC	Fluviale + Maritime	Théorique	100 (2623 m3/s à Poses)	fort (coeff. 116 : 8,18m)	20 (1,12m)	+60cm	non
SC5	Fluvio-maritime	Conditions tempête 25/12/1999	1 (1407 m3/s à Poses)	fort (coeff. 106 : 8,12m)	2 (0,72m)	0	non
SC5_CC	Fluvio-maritime	Conditions tempête 25/12/1999	1 (1407 m3/s à Poses)	fort (coeff. 106 : 8,12m)	2 (0,72m)	+60cm	non
SC6	Fluviale	Conditions crue 29/01/1910	>100 (3000m3/s à Poses)	moyen (coeff. 78 : 7,55m)	(0m)	0	non
SC6_CC	Fluviale	Conditions crue 29/01/1910	>100 (3000m3/s à Poses)	moyen (coeff. 78 : 7,55m)	(0m)	+60cm	non

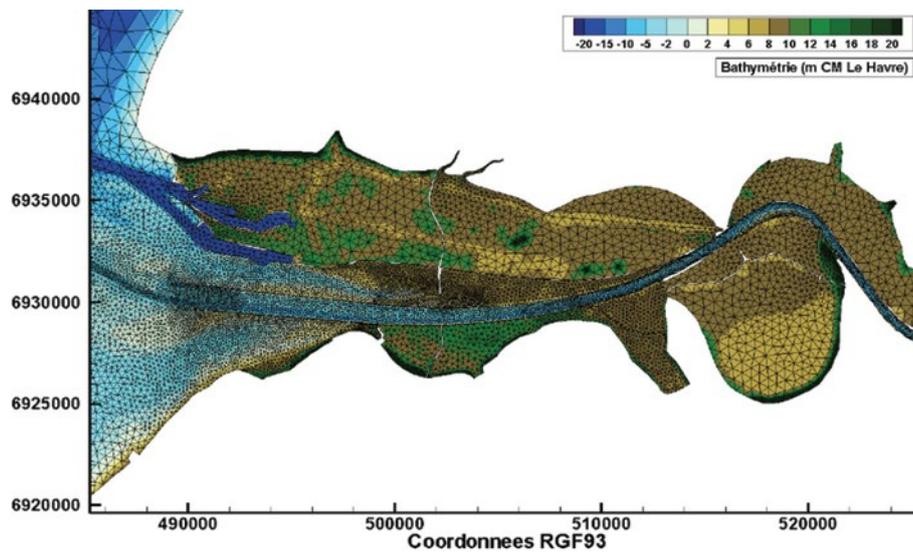


Figure 2 : Bathy-topographie et maillage du modèle à l'embouchure de la Seine.

III.2. Données d'entrée et de sortie

Pour un scénario donné, les **données d'entrée** alimentant le modèle sont les suivantes :

- Une chronique de débit de la Seine imposée à la frontière amont (Saint Pierre-du-Vauvray) ainsi que la chronique de débit correspondante pour l'Eure ;
- La prédiction de marée, issue du modèle de grande emprise de la Manche [ARTELIA], imposée le long de la frontière maritime ;
- Une chronique de vent imposée sur l'ensemble du modèle. Le vent est propagé de façon décroissante depuis l'aval jusqu'à l'amont de l'estuaire pendant toute la simulation, selon une loi établie lors de l'approche théorique ;

- L'ajout éventuel d'un « résidu maritime » aux nœuds de la frontière aval uniquement sur la marée étudiée, en vue d'obtenir une surcote donnée au Havre (si le vent imposé n'est pas suffisant).
- Pour les scénarios avec changement climatique (SCi_CC), une élévation du niveau marin (+ 60cm) imposée à la condition aval du modèle pour tous les pas de temps ;
- La prise en compte (ou non) des murets de protection contre les inondations.

Pour chaque scénario, quatre types de **résultats** sont extraits des fichiers de sorties [Figure 3] :

- L'évolution temporelle du niveau d'eau (i.e. marégramme) en 23 'points sonde' répartis tout au long de l'estuaire ;

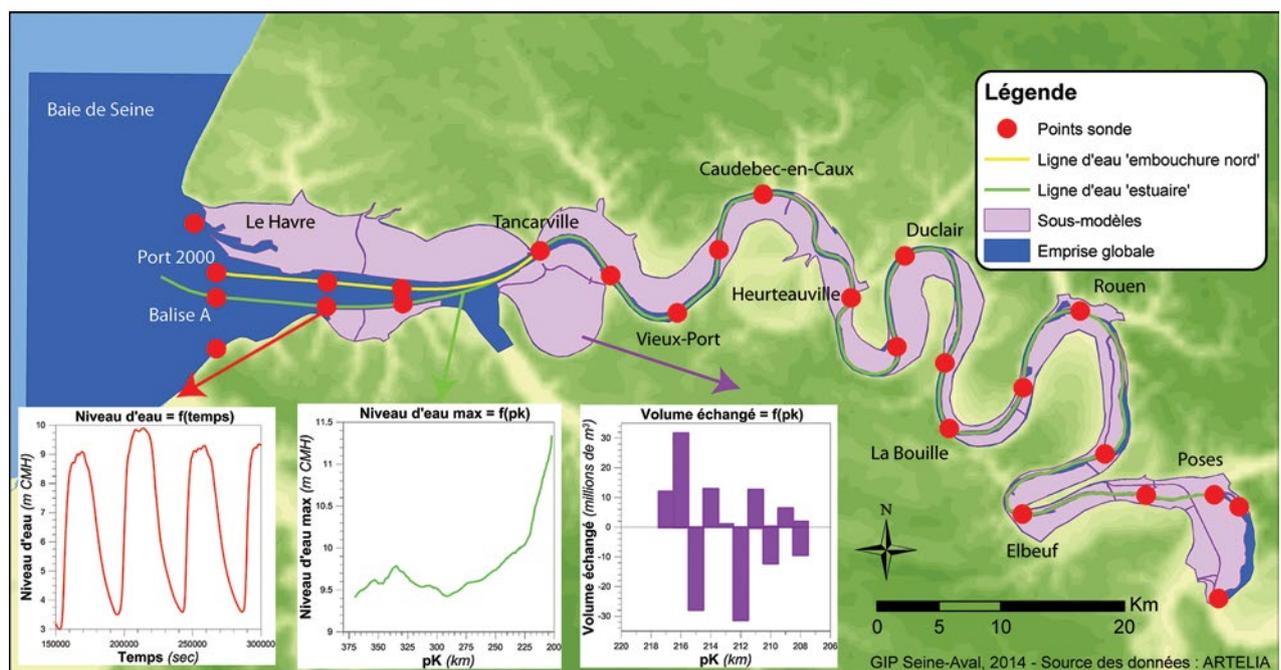


Figure 3 : Emprise du modèle et sorties des résultats.

- Deux lignes d'eau présentant les niveaux maximaux sur l'évènement simulé ; l'une le long de l'estuaire (de Poses à la balise A ; ligne d'eau 'estuaire') et l'autre entre Tancarville et Port 2000 (ligne d'eau 'embouchure nord') ;
- Les volumes échangés entre le lit mineur et le lit majeur (entrée et sortie) durant l'évènement, à l'échelle du kilomètre ;
- Une identification des zones de débordement à l'échelle du sous modèle.

III.3. Calage du modèle

Le modèle a été calé sur **six évènements récents** [Tableau IV], trois évènements de type 'cru' (01/02/1995, 28/03/2001, 11/02/2013) et trois évènements de type 'tempête' (10/03/2008, 21/03/2008, 11/02/2013). Pour ces six évènements de calage, les résultats du modèle sont comparés aux données des marégraphes pour la courbe de marée et

le niveau maximal atteint. Des indices de calage sont également présentés, permettant d'affiner l'analyse [Figure 4 ; Figure 5].

Pour ces six évènements, le modèle reproduit de façon très satisfaisante la propagation de la marée de l'aval et vers l'amont (déformation du signal de marée), le phasage de la marée (instants de pleine mer et basse mer) et les niveaux d'eau atteints (erreur <10cm sur 19 marégraphes) sur les 160 km séparant le barrage de Poses de l'embouchure de la Seine.

Au vu des résultats et de la diversité des conditions testées, **le modèle est considéré comme calé et validé sur l'ensemble de l'estuaire**. La représentativité des écoulements est bonne pour des évènements extrêmes (cru, tempêtes...) et prend en compte les échanges entre le lit mineur et le lit majeur. Le modèle est apte à simuler différentes conditions d'exploitation dans les limites des conditions d'utilisation : 1) le modèle n'est pas adapté pour l'étude des

Tableau IV : Caractéristiques des évènements de calage.

	Évènement de calage					
	Cru			Tempête		
	1 ^{er} février 1995	28 mars 2001	11 février 2013	10 mars 2008	21 mars 2008	11 février 2013
Débit à Poses (m ³ /s)	2080	2280	1600	579	929	800
Coeff. de marée	104	89	106	106	105	102
Vent max au cap de la Hève (km/h)	65	54	20	95	72	50
Direction du vent au cap de la Hève	Sud-ouest	Sud-sud-ouest	Nord-nord-ouest	Sud-ouest	Ouest	Ouest-nord-ouest
Niveau d'eau maximal à Rouen (m CMH)	9.69	9.60	9.38	9.12	9.17	9.33
Niveau d'eau maximal au Havre (m CMH)	8.50	7.98	8.39	8.80	8.35	ND

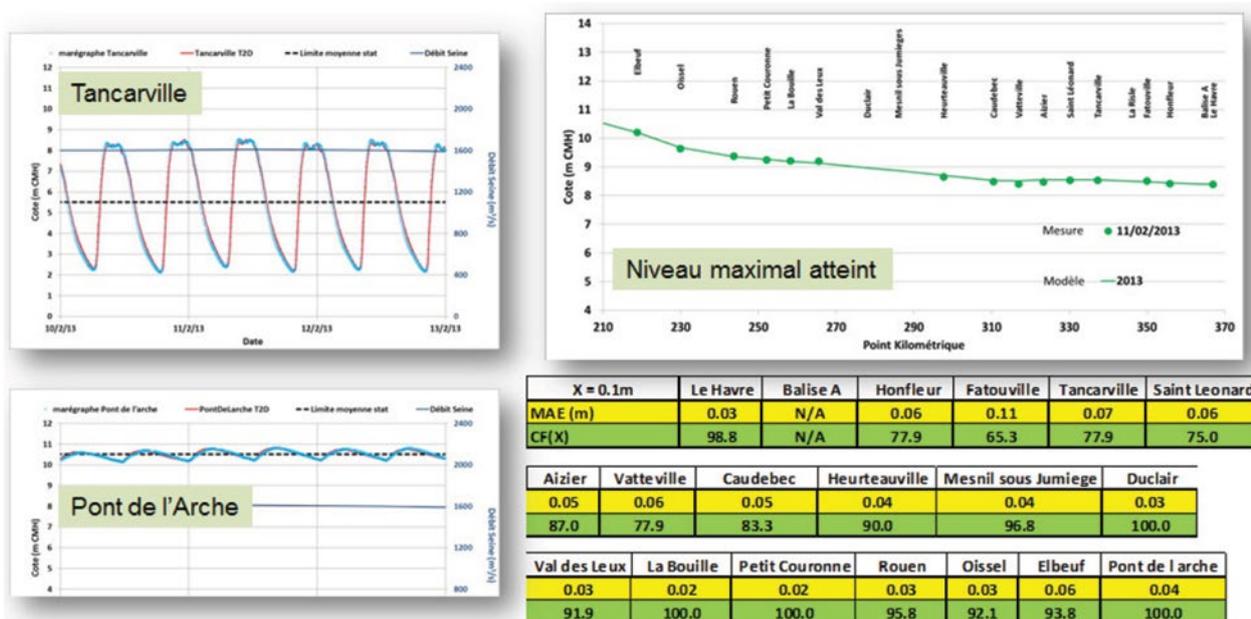


Figure 4 : Exemple de calage pour la crue de février 2013.

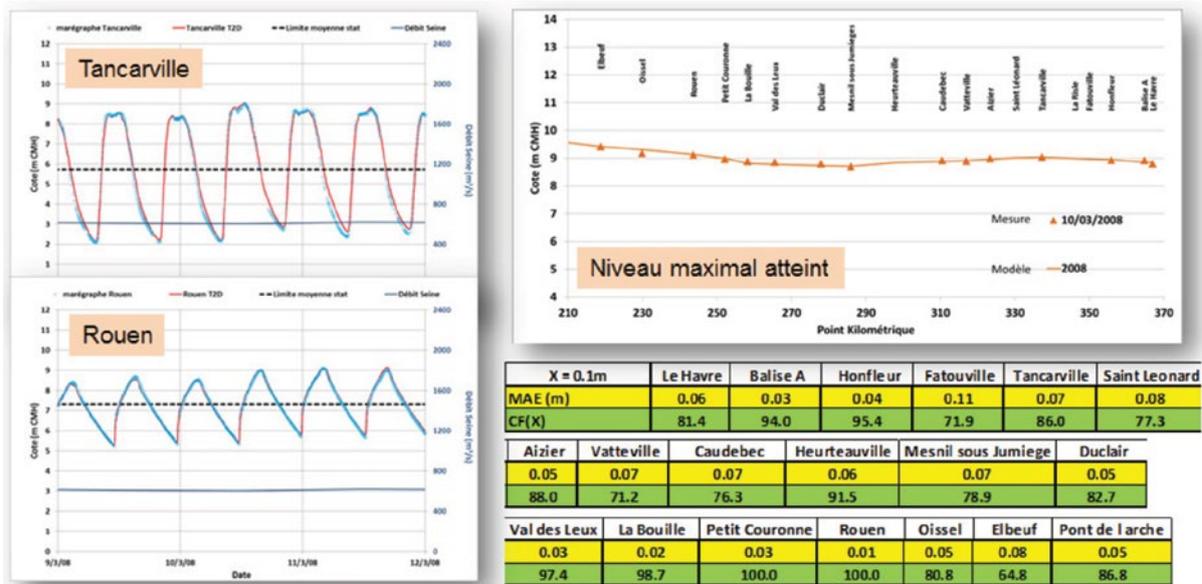


Figure 5 : Exemple de calage pour la tempête du 10 mars 2008.

lignes d'eau en étiage ; 2) le modèle n'est pas développé pour simuler les écoulements dans le lit majeur et les résultats ne peuvent pas être utilisés tels quels pour cartographier l'emprise des zones inondables ; 3) la méthode d'imposition du vent est telle que, lors d'épisodes de vent d'ouest importants couplés à une forte surcote maritime, les niveaux d'eau en amont peuvent être légèrement surestimés ; 4) la modélisation mise en œuvre considère que le fond du lit est fixe (pas de modifications morphologiques liées à un transport de matériaux par les courants) ; 5) les écoulements sont considérés libres et les mises en charge au droit d'un ouvrage ne sont pas prises en compte.

IV. RESULTATS

L'analyse des **lignes d'eau maximales** pour chaque scénario [Figure 6 ; Figure 7] permet de retrouver les caractéristiques de chaque type d'évènement, à savoir :

- Un **évènement de type fluvial** engendré par une crue (SC6) est caractérisé par une ligne d'eau qui décroît de l'amont vers l'aval avec une pente très marquée à l'amont, qui impacte les niveaux amont;
- Un **évènement de type maritime** (SC1) engendré par le vent et une forte marée est caractérisé par un impact plutôt sur les niveaux à l'aval de l'estuaire (point d'inflexion entre

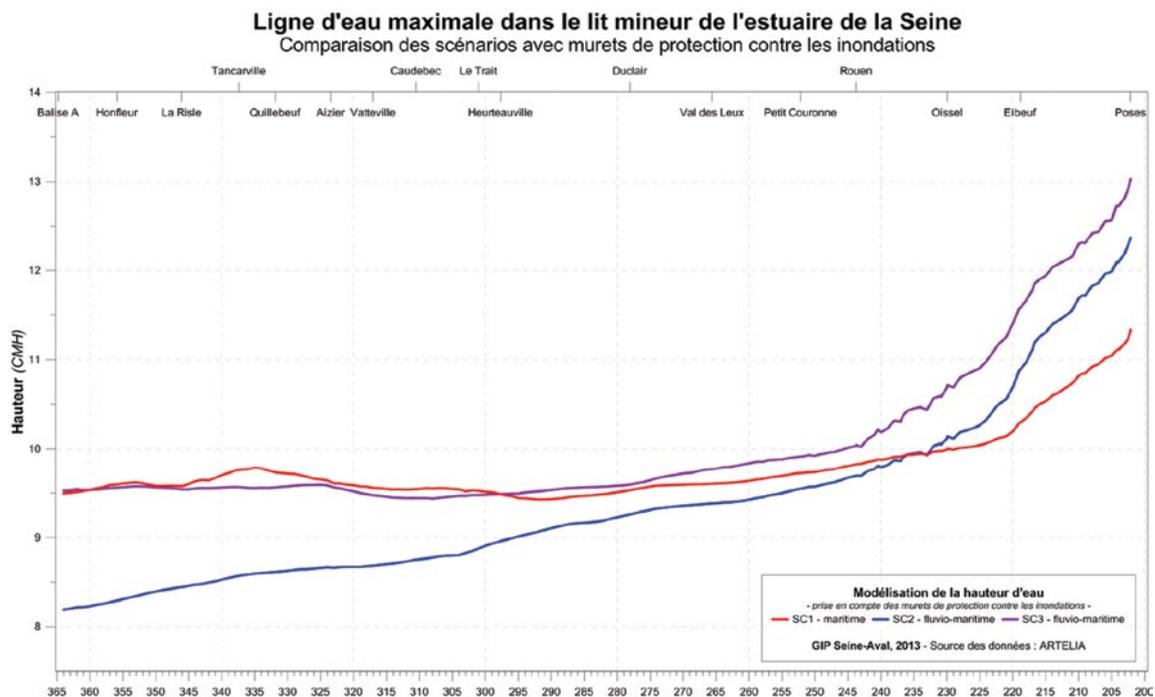


Figure 6 : Ligne d'eau maximale pour les scénarios SC1, SC2 et SC3.

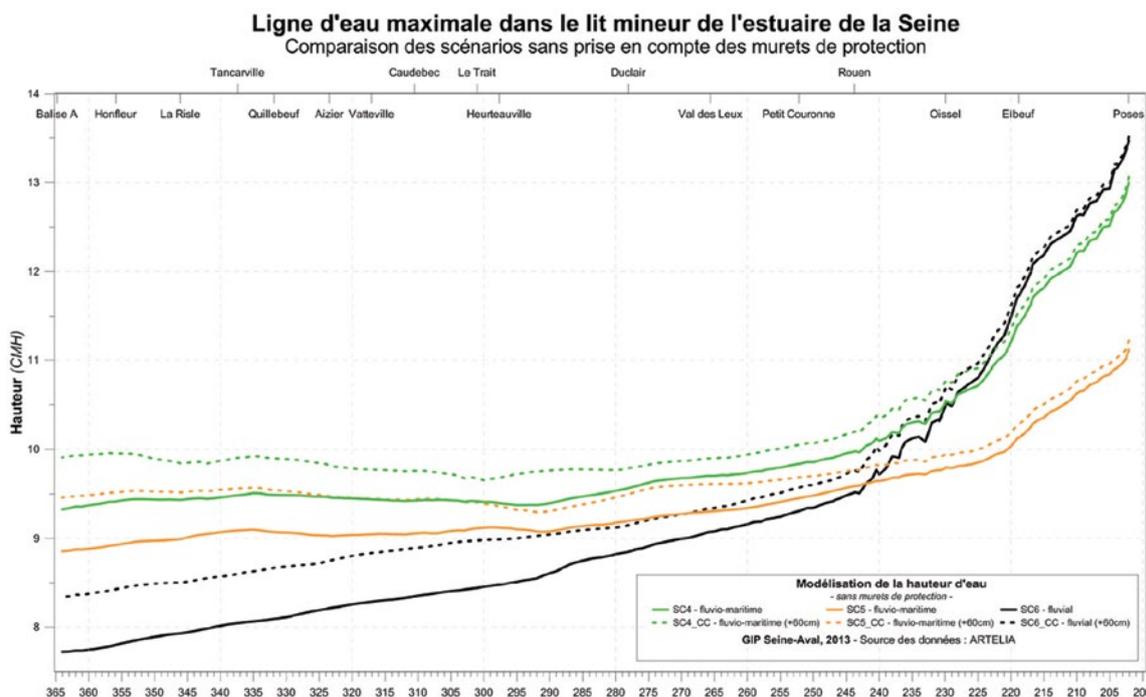


Figure 7 : Ligne d'eau maximale pour les scénarios SC4, SC5 et SC6.

Mesnil-sous-Jumièges et Heurteauville) avec gonflement de la ligne d'eau aux alentours de Tancarville ;

— Des événements de type fluvio-maritime (SC2, 3, 4 et 5), liés à un débit important et à une tempête (vent, forte marée), sont caractérisés par un impact sur l'ensemble de l'estuaire, avec des niveaux plus faibles à l'amont de Rouen qu'un événement fluvial et des niveaux plus faibles à l'aval globalement qu'un événement maritime. Selon l'occurrence d'apparition des forçages en entrée et donc leur intensité (débit centennal, décennal, annuel – forte ou faible marée – surcote annuelle, décennale, centennale), le point d'inflexion de la ligne d'eau évolue spatialement (entre Mesnil-sous-Jumièges et Caudebec-en-Caux). La non-prise en compte des murets modifie également la dynamique des écoulements et donc la ligne d'eau (SC5). De même, l'élévation du niveau marin de +60 cm à l'entrée de l'estuaire induit une augmentation des niveaux d'eau qui décroît de

l'aval vers l'amont, où la différence entre les 2 scénarios (avec et sans élévation du niveau marin) devient faible. La dynamique des écoulements est également modifiée.

Il est intéressant de noter qu'une combinaison de forçage ayant une période de retour élevée (débit et surcote d'occurrence centennale) n'engendre pas des niveaux extrêmes de période de retour millénaire mais des niveaux compris entre les niveaux décennaux et centennaux suivant la zone de l'estuaire (amont, aval ou milieu de l'estuaire). De même, une combinaison de forçages décennaux (débit et surcote) engendre des niveaux inférieurs aux niveaux d'eau centennaux. Une surcote centennale associée à un débit annuel (scénario maritime) induit des niveaux centennaux uniquement à l'aval de l'estuaire alors qu'un scénario fluvial (pas de surcote et débit > 100ans) engendre des niveaux supérieurs au niveau centennal uniquement à l'amont de l'estuaire (amont de Rouen) [Tableau V].

Tableau V : Niveaux d'eau maximums (m CMH) associés aux scénarios.

Scénario	Débit (tps de retour)	Coeff. de marée	Surcote (tps de retour)	Élévation niveau marin (cm)	Murets (présence)	Niveau d'eau (m CMH)				
						Balise A	Tancarville	Heurteauville	Rouen	Elbeuf
SC1 maritime	1	106	100	0	Oui	9.50	9.76	9.48	9.93	10.30
SC2 fluvio-maritime	10	95	10	0	Oui	8.19	8.57	8.96	9.70	10.89
SC3 fluvial + maritime	100	116	100	0	Oui	9.52	9.56	9.49	10.04	11.58
SC4 fluvial + maritime	100	116	20	0	Non	9.32	9.48	9.40	9.98	11.41
SC4_CC fluvial + maritime	100	116	20	+60	Non	9.91	9.90	9.68	10.20	11.54
SC5 fluvio-maritime	1	106	2	0	Non	8.86	9.09	9.12	9.59	10.13
SC5_CC fluvio-maritime	1	106	2	+60	Non	9.46	9.56	9.36	9.77	10.29
SC6 fluvial	>100	78	/	0	Non	7.72	8.05	8.48	9.52	11.73
SC6_CC fluvial	>100	78	/	+60	Non	8.34	8.61	8.99	9.77	11.84

Concernant les **zones de débordement** [Figure 8], la boucle de Sahurs (PK260, rive droite) est impactée pour tous les scénarios. L'amont de l'estuaire (boucle d'Igouville, de Saint Aubin-les-Elbeuf, de Criquebeuf-sur-Seine, d'Oissel et de Saint Etienne-du-Rouvray – PK205 à PK235) est impacté pour tous les scénarios dont le débit est d'occurrence décennale et centennale (SC 2, 3, 4, 6) avec des volumes de débordement qui augmentent avec le débit. Des zones de débordement apparaissent également dans la boucle du Trait (PK300) pour tous les scénarios. À l'exception des scénarios SC2 (surcote décennale, marée moyenne) et SC6 (fluvial), la boucle de Notre-Dame-de-Gravenchon et la zone du Marais Vernier (PK335 à PK345) sont touchées par des débordements mais de moindres volumes. Le scénario SC4 génère le plus de zones de débordements ; elles sont présentes sur la plupart du linéaire de la Seine avec des volumes non négligeables. Le scénario SC6 est le plus impactant sur la partie amont de l'estuaire (amont du PK230 avec des volumes transitant importants).

L'analyse d'un scénario par la simple comparaison du niveau d'eau maximum atteint et du niveau des berges n'apporte cependant qu'une information partielle et n'est pas suffisante pour caractériser une inondation. En effet, l'**aspect temporel** de l'inondation est un facteur primordial à considérer, avec un temps de débordement (et donc un volume d'eau) pouvant être plus ou moins important selon les forçages à l'œuvre et le secteur de l'estuaire considéré [Figure 9].

Globalement, le niveau d'eau est d'autant plus stable que l'on se trouve à l'amont de l'estuaire et que le débit de la

Seine est fort, engendrant des débordements pouvant durer dans le temps (SC6 à Elbeuf par exemple). Les débordements liés à une tempête (surcote) et un fort coefficient de marée (secteur aval de l'estuaire) seront plus brefs et liés à la durée de tenue du plein (SC3 à la Balise A par exemple). Associée à cette information de niveau et de durée de débordement, les volumes d'eau échangés entre le lit mineur et le lit majeur peuvent être ainsi mobilisés par la suite pour caractériser le plus finement possible les différents scénarios.

V. CONCLUSIONS

Cette étude a permis d'atteindre les objectifs visés, à savoir : 1) calcul des temps de retour associés aux niveaux d'eau dans l'estuaire de la Seine et aux forçages les gouvernant ; 2) concertation pour définir des scénarios pouvant déclencher des inondations ; 3) construction d'un modèle hydraulique permettant de simuler les niveaux d'eau dans le lit mineur de la Seine et d'identifier les grandes zones de débordement ; 4) exploitation du modèle pour les scénarios définis. Diverses **applications opérationnelles** de ces résultats sont également ciblées par des partenaires du GIP Seine-Aval :

- Réflexion sur les périodes de retour des événements à considérer pour la gestion du risque inondation à l'échelle de l'estuaire ;
- Modélisation de la propagation de l'élévation du niveau marin dans l'estuaire pour la cartographie des zones inondables pour les événements dits de probabilité

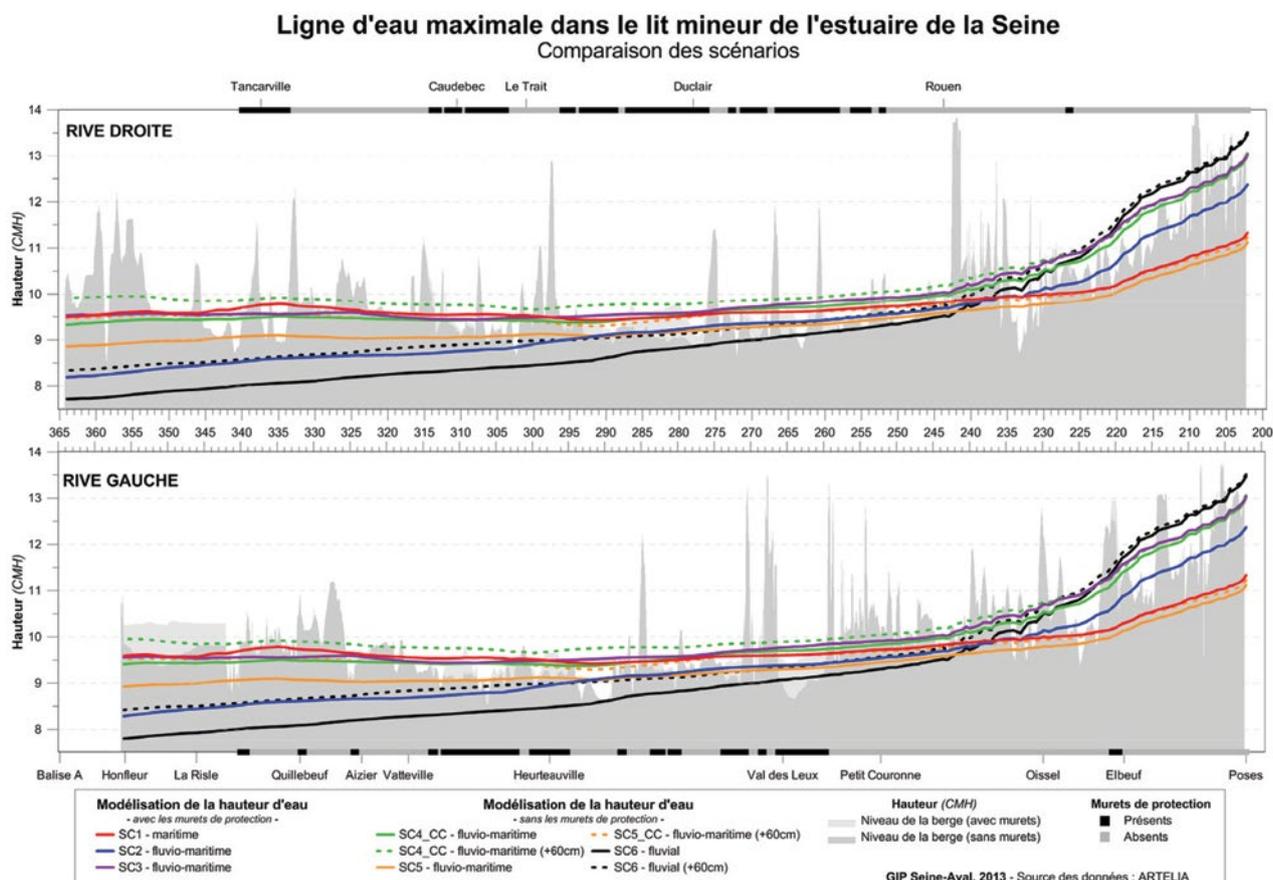


Figure 8 : Ligne d'eau maximale et niveau des berges.

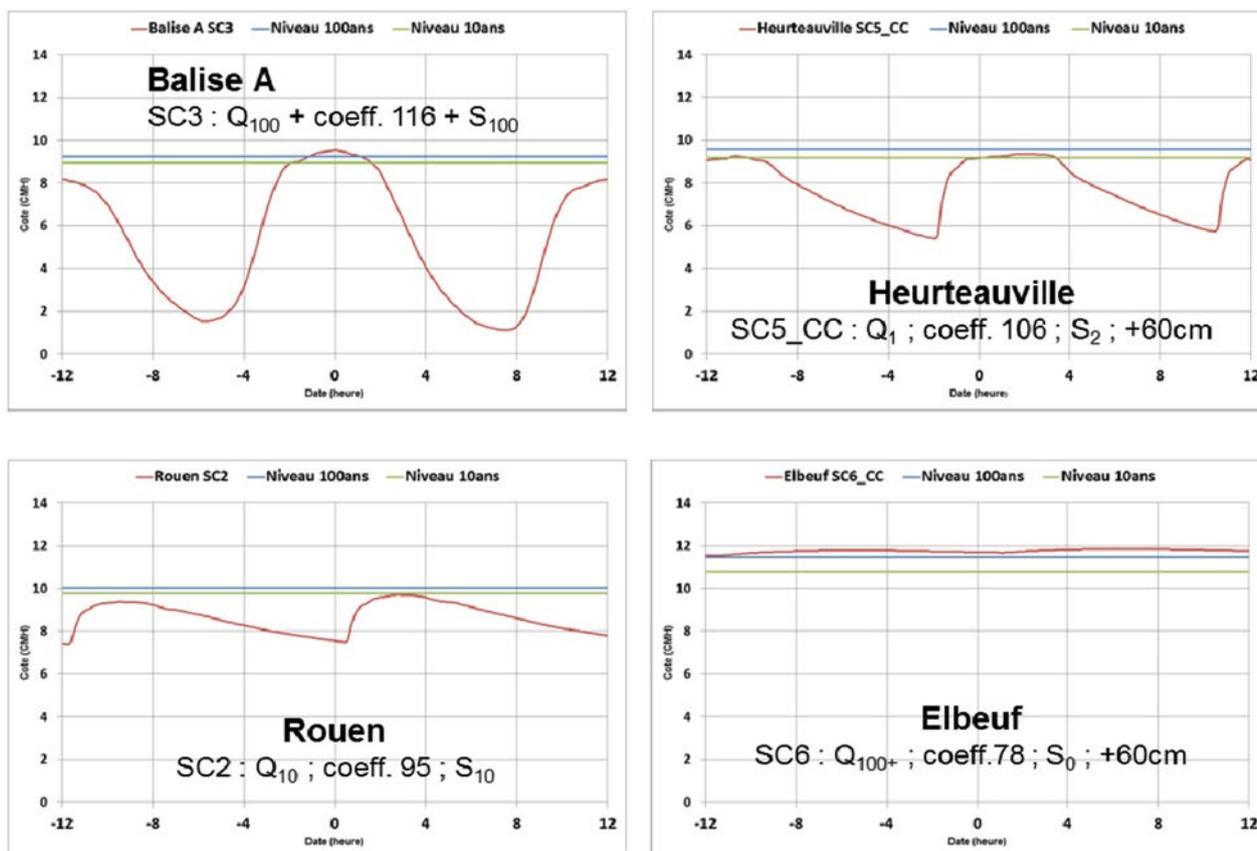


Figure 9 : Exemples de marégrammes modélisés et comparaison à la ligne d'eau décennale et centennale.

moyenne, en application de la Directive Inondation sur le territoire à risque important d'inondation (TRI) de Rouen-Louviers-Austreberthe ;

- Utilisation des marégrammes des scénarios maritimes à l'embouchure de la Seine comme donnée d'entrée dans le cadre d'une modélisation menée dans l'étude de danger inondation sur la digue de protection de la zone 'estuaire nord' ;
- Identification des enjeux soumis à un aléa centennal sur les territoires de compétences des divers acteurs.

Les **perspectives** de poursuite de ce travail concernent des tests de sensibilité du modèle aux variations des paramètres forçant, une réflexion sur la restitution des résultats (temps de débordement, volumes échangés entre lit mineur et lit majeur,...) et une modélisation de nouveaux scénarios.

VI. REFERENCES

- ARTELIA & GIP SEINE-AVAL (2014) — Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine. *Rapport de l'objectif D : Modélisation de la ligne d'eau pour différents scénarios*. 35p. et annexes
- ARTELIA & GIP SEINE-AVAL (2013) — Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine. *Rapport de l'objectif A : Définition des périodes de retour des événements jouant un rôle dans les inondations*. 131p. et annexes
- ARTELIA & GIP SEINE-AVAL (2013) — Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine. *Rapport de l'objectif B : Élaboration des scénarios pouvant déclencher les inondations, en combinant différents événements selon leur occurrence*. 22p. et annexes
- ARTELIA & GIP SEINE-AVAL (2013) — Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine. *Rapport de l'objectif C : Développement et transfert d'un modèle hydraulique à l'échelle de l'estuaire de la Seine*. 30p. et annexes
- EDF R&D. — *Présentation de TELEMAC [en ligne]* www.opentelemac.org
- EL ABIDA H., ALLAIN S., BACQ N., CHAÏB J., FISSON C., GONCALVES-LADIRAY K., FRITIER N., LARCHEVEQUE E., MACUR O., TANGUY J. (2010) — Le risque inondation : conditions de déclenchement et perspectives. *Fascicule Seine-Aval*. **2.3** 48p
- GIP SEINE-AVAL (2013) — *Localisation et altimétrie des murets anti-inondation le long de l'estuaire de la Seine*
- GRAS M.C. & GARNIER E. (2013) — Contre vents & marées : les tempêtes dans l'aval de la Seine entre 1750 et 1930. *Fascicule Seine-Aval*. **2.9** 36p
- NOAA (2003) — NOS standards for evaluating operational nowcast and forecast hydrodynamics model. *NOAA Technical Report NOS CS 17*. 48p
- SOGREAH (2008) — Elaboration d'un référentiel de protection contre les inondations sur l'estuaire de la Gironde. *Rapport R5, Etude menée pour le SMIDDEST*