

Modélisation des niveaux  
d'eau de l'estuaire de Seine



**Analyse par modélisation de  
l'impact de l'élévation du niveau  
marin sur les niveaux de pleine mer  
dans l'estuaire de la Seine**

*Version 2015*

Jean Philippe LEMOINE



GIP Seine-Aval  
Pôle Régional des Savoirs  
115 boulevard de l'Europe  
76100 Rouen

tel : 02 35 08 37 64  
fax : 02 35 98 03 93  
mail : [gipsa@seine-aval.fr](mailto:gipsa@seine-aval.fr)  
web : <http://www.seine-aval.fr>

*Ce rapport reprend et enrichit le contenu du rapport du même nom rédigé en 2014.*

<b>CONTEXTE GENERAL .....</b>	<b>4#</b>
<b>I/PRESENTATION DES SIMULATIONS REALISEES .....</b>	<b>5#</b>
<b>II/ ANALYSE DES RESULTATS : IMPACT DE L'ELEVATION DU NIVEAU MARIN SUR LES NIVEAUX DE PLEINE MER .....</b>	<b>8#</b>
<b>III/ SYNTHESE DES RESULTATS.....</b>	<b>12#</b>
A. PAR SITE .....	12#
B. A L'ECHELLE DE L'ESTUAIRE .....	13#
<b>IV/ CAS PARTICULIER DES SIMULATIONS "REALISTES" .....</b>	<b>16#</b>
<b>CONCLUSIONS.....</b>	<b>18</b>
<b>ANNEXE 1: DESCRIPTION DU MODELE HYDRAULIQUE TELEMAR 2D .....</b>	<b>19#</b>
A. GENERALITES .....	19#
B. DOMAINE DE VALIDITE ET LIMITE DU MODELE .....	22#
<b>ANNEXE 2: ABAQUES DES NIVEAUX DE PLEINES MERS EN FONCTION DE L'ELEVATION DU NIVEAU MARIN.....</b>	<b>23#</b>
A. ELBEUF .....	23#
B. ROUEN.....	23#
C. DUCLAIR.....	23#
D. HEURTEAUVILLE .....	24#
E. CAUDEBEC EN CAUX.....	24#
F. TANCARVILLE.....	24#
<b>ANNEXE 3 : NIVEAU DE PLEINE MER LE LONG DE L'ESTUAIRE DE LA SEINE POUR DIFFERENTES ELEVATIONS DU NIVEAU MARIN ET DIFFERENTS DEBITS .....</b>	<b>25#</b>
A. 400 M <sup>3</sup> .S <sup>-1</sup> .....	25#
B. 600 M <sup>3</sup> .S <sup>-1</sup> .....	26#
C. 800 M <sup>3</sup> .S <sup>-1</sup> .....	27#
D. 1000 M <sup>3</sup> .S <sup>-1</sup> .....	28#
E. 1200 M <sup>3</sup> .S <sup>-1</sup> .....	29#
F. 1400 M <sup>3</sup> .S <sup>-1</sup> .....	30#
G. 1600 M <sup>3</sup> .S <sup>-1</sup> .....	31#
H. 1800 M <sup>3</sup> .S <sup>-1</sup> .....	32#
I. 2000 M <sup>3</sup> .S <sup>-1</sup> .....	33#

## Contexte général

Les niveaux d'eau de l'estuaire de la Seine (i.e. portion de la Seine soumise à la marée, couvrant 160km entre le barrage de Poses en amont et la partie orientale de la baie de Seine à l'aval) sont sous l'influence de différents forçages continentaux, marins et atmosphériques. L'impact de l'élévation du niveau marin sur les niveaux d'eau en estuaire de Seine n'est actuellement connu que pour des conditions de crue, pour lesquelles l'hydrodynamisme est gouverné par le débit de la Seine. Or le débit moyen de la Seine est d'environ 400 m<sup>3</sup>/s, et n'est supérieur à 1000 m<sup>3</sup>/s qu'en moyenne 25 jours/an (statistiques sur la période 1941-2013).

Pour appréhender la variation des niveaux d'eau dans l'estuaire de la Seine, un modèle hydrodynamique de l'estuaire a été développé et permet de calculer l'évolution du niveau d'eau dans le lit mineur et d'identifier les zones de débordements potentiels. Ce modèle, exploitable en conditions de hautes eaux, permet de décrire les niveaux d'eau actuels en réponse à différents scénarios et mobilisent les données hydrologiques (débit de la Seine et de l'Eure), marines (marée en baie de Seine) et météorologiques (pression atmosphérique, vent).

Le présent rapport présente les simulations menées avec ce modèle pour quantifier l'effet de l'élévation du niveau marin sur les niveaux de pleine mer en estuaire de la Seine dans diverses conditions hydrodynamiques.

## I/Présentation des simulations réalisées

Pour évaluer l'impact de l'élévation du niveau marin sur les niveaux d'eau en estuaire de Seine, **6 valeurs différentes d'élévations du niveau marin** (de 0.2 à 1,2 m) et une condition de référence (niveau marin actuel) ont été simulées. Ces simulations ont été appliquées sur **9 débits constants de la Seine** à Poses (de  $400\text{m}^3.\text{s}^{-1}$  à  $2000\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ ) et deux **coefficients de marée 78 et 106** (Tableau I).

Tableau I: Présentation des conditions hydrodynamiques simulées

Coefficients de marée	Débit m <sup>3</sup> /s	Référence actuelle	Elevation du niveau marin (m)					
			+0.2	+0.4	+0.6	+0.8	+1	+1.2
<b>78</b> <b>&amp;</b> <b>106</b>	400							
	600							
	800							
	1000							
	1200							
	1400							
	1600							
	1800							
	2000							

Pour rappel, les conclusions du 5<sup>ème</sup> rapport du GIEC (2013) au sujet de l'évolution du niveau marin sur les côtes Manche-Atlantique indiquent une élévation dite pessimiste qui pourrait atteindre 1m, contre 0,2m pour le scénario optimiste, à l'horizon 2100. Les différents scénarios sont associés à des efforts plus ou moins importants de réduction des émissions de gaz à effet de serre au niveau mondial (Figure 1).

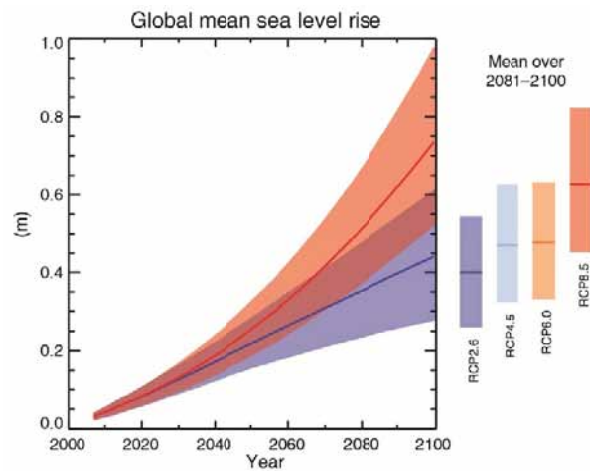


Figure 1: les différents scénarios d'élévation du niveau marin (Climate Change 2013: The Physical Science Basis IPCC (GIEC))

Dans la suite de ce document, le niveau marin désigne le niveau moyen de la mer au niveau de la frontière marine du modèle (cf. ANNEXE 1).

Les simulations sont forcées par des conditions de marées moyennes et fortes, de coefficient de marée 78 et 106. La Figure 2 montre que le coefficient 78 correspond aux marées les plus observées sur les côtes Manche-Atlantique, alors que le coefficient 106 est un coefficient de vive eau relativement fort observable plusieurs fois par an.



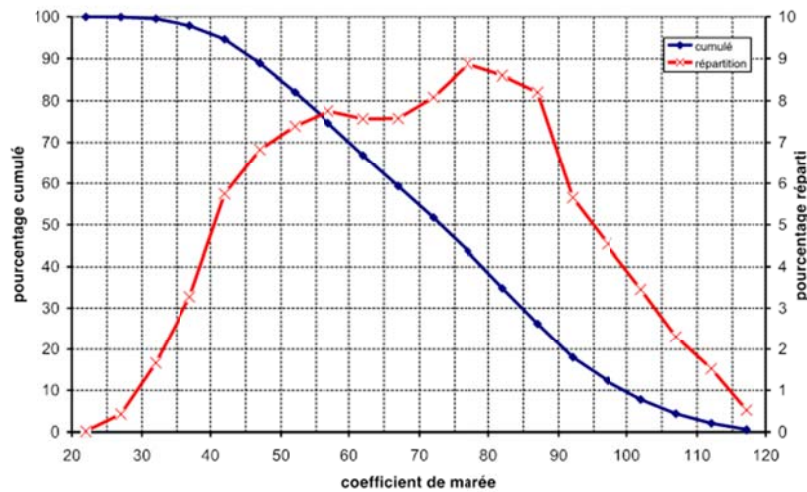


Figure 2: Répartition statistique des coefficients de marée

Les simulations ont été faites dans des conditions de débits de la Seine à Poses constants pendant la durée des scénarios (5 jours). La plage de débit simulée s'étend de  $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  à  $2000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  avec un pas de  $200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Ces débits sont représentatifs de la plage de variation des débits de la Seine à Poses (Figure 3).

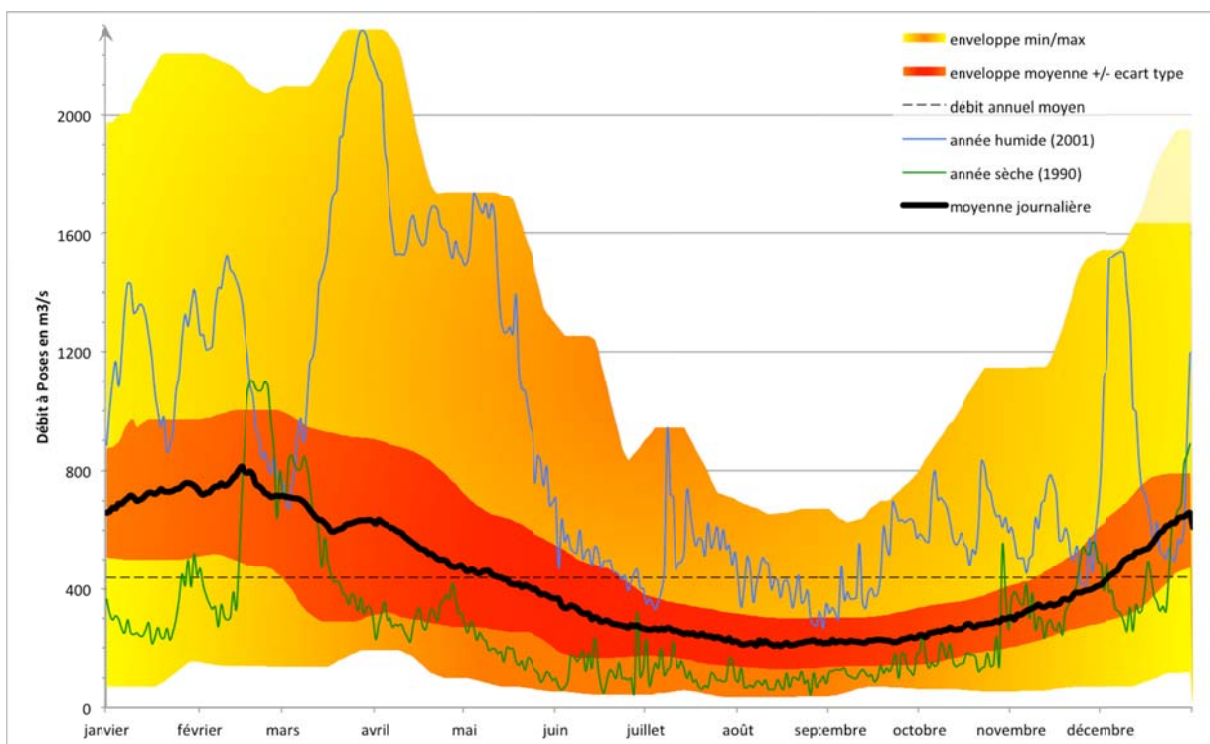


Figure 3: Statistiques journalières des débits de la Seine à Poses entre 1941 et 2013

Pour chaque débit et sur la base des conditions de marées citées précédemment, les simulations ont été faites en faisant varier le niveau marin moyen de son niveau actuel à  $+1,20\text{m}$  par pas de  $0,20\text{cm}$ .

D'autres simulations dites "réalistes" ont été faites sur la base des événements de probabilités moyennes retenus dans le TRI de Rouen-Louviers -Austreberthe ; c'est à dire dans les conditions de la crue de 1910 et de la tempête de 1999. Ces deux événements majeurs avaient déjà été modélisés par Artelia dans le

cadre de son étude pour le GIP Seine-Aval (Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine – Rapport d'objectif D , Artelia 2014).

Ces deux simulations ont été reprises avec 6 valeurs différentes d'élévations du niveau marin (de 0.2 à 1,2 m) et une condition de référence (niveau marin actuel).

Tableau II: Présentation des simulations réalistes réalisées

	Coefficient de marée	Débit m3/s	Référence actuelle	Elevation du niveau marin (m)					
				+0.2	+0.4	+0.6	+0.8	+1	+1.2
Réalistes crue 1910	78	3000							
tempete 1999	105 + surcote 0.7m	1400							

#### Remarques

- Certaines de ces simulations ont été réalisées en présence et en absence des murets anti-inondations. A l'échelle de l'estuaire, il s'avère que l'effet des murets sur le niveau de pleine mer dans le lit mineur est minime. Dans le cadre de cette note, seuls les résultats des simulations avec murets sont analysés.

## II/ Analyse des résultats : Impact de l'élévation du niveau marin sur les niveaux de pleine mer

Pour chacune des simulations réalisées, les niveaux de pleine mer dans le lit mineur de l'estuaire de la Seine (Poses – Le Havre) ont été extraits des fichiers de sorties des modèles. Ces niveaux seront analysés plus en détail en 6 points de l'estuaire (Figure 4).

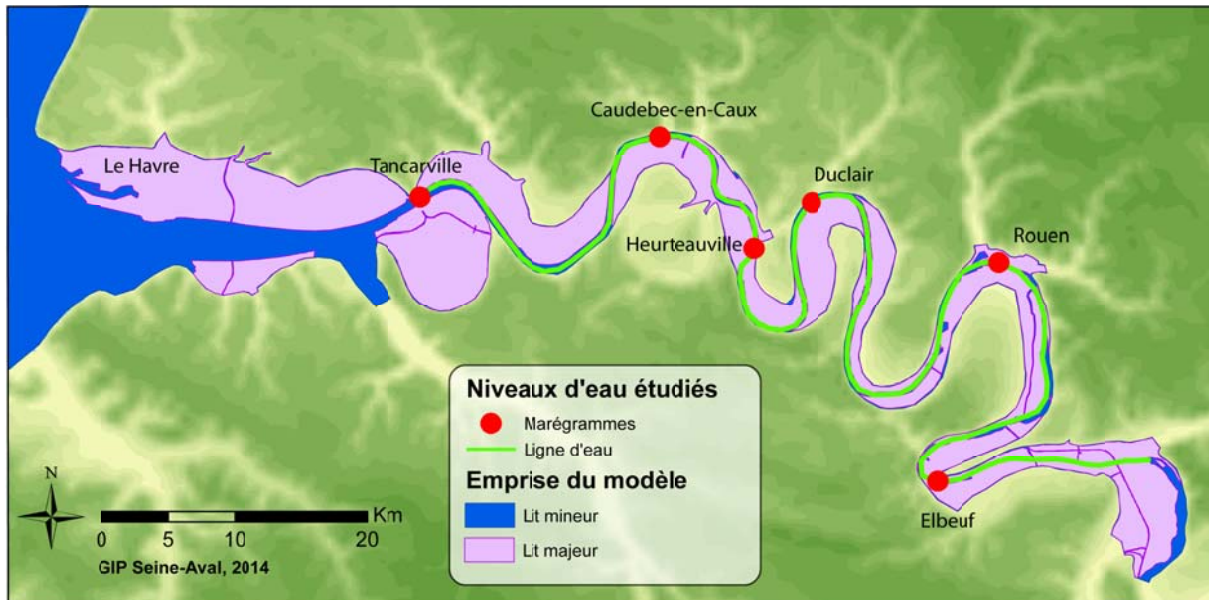


Figure 4: Localisation des résultats extraits du modèle

Les figures 5 et 6 représentent les niveaux de pleine mer simulés pour un débit de  $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  et de  $1200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  et un coefficient de marées de 78. Les graphiques correspondants aux autres débits et au coefficient de marée 106 sont en ANNEXE 3.



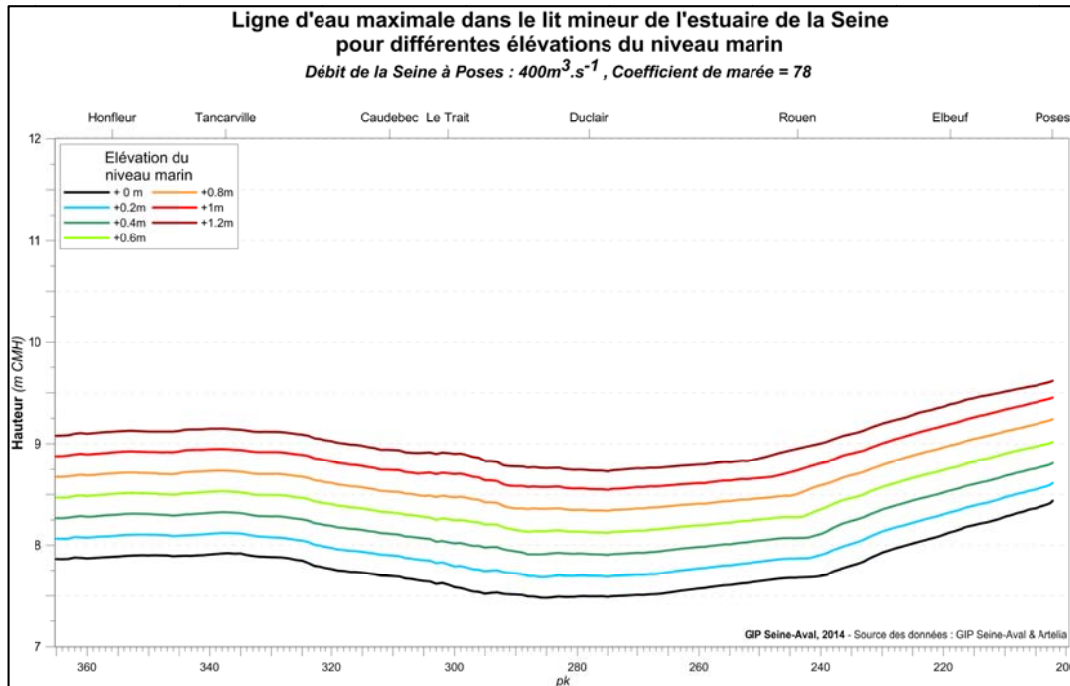


Figure 5: Niveau de pleine mer le long de l'estuaire de la Seine pour différentes élévations du niveau marin et pour un débit de la Seine à Poses de  $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  et un coefficient de marée de 78

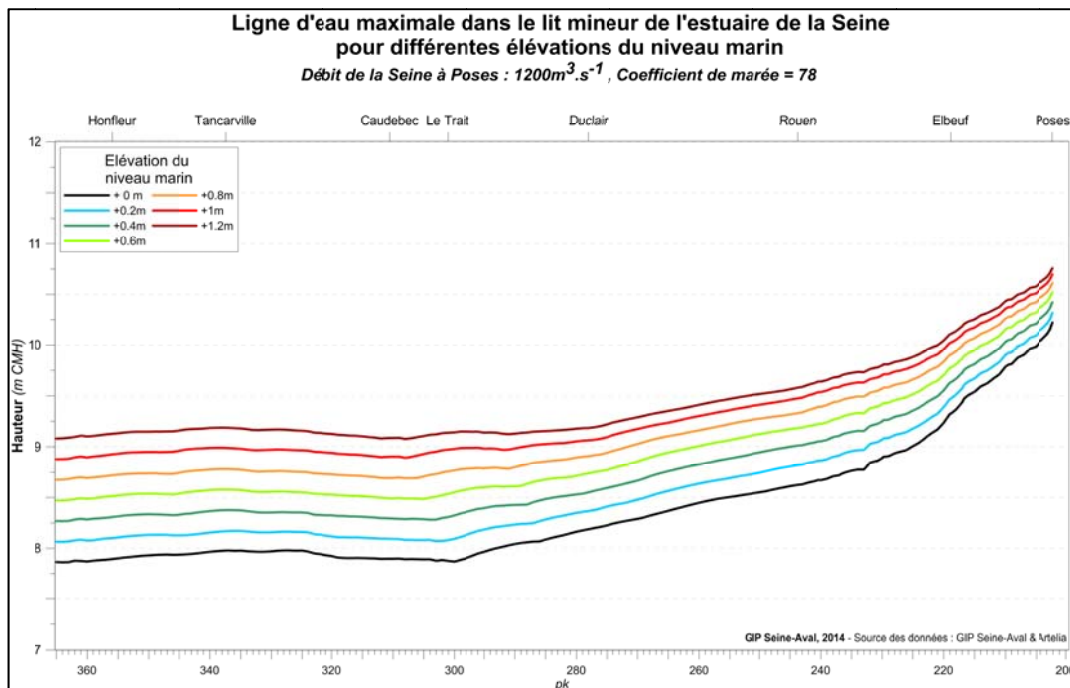


Figure 6: Niveau de pleine mer le long de l'estuaire de la Seine pour différentes élévations du niveau marin et pour un débit de la Seine à Poses de  $1200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  et un coefficient de marée de 78

La comparaison de ces différents résultats montre clairement l'importance du débit dans l'amortissement de la propagation de l'élévation du niveau marin. En condition de débit moyen ( $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), l'élévation du niveau marin est intégralement retranscrite sur l'ensemble du linéaire estuarien (Figure 5). Pour les fortes valeurs d'élévation du niveau marin et en condition de faibles débits, le modèle hydrodynamique de l'estuaire a même tendance à amplifier l'élévation du niveau marin le long de l'estuaire. En revanche, lorsque le coefficient de marée et les niveaux de pleine mer sont plus importants, nous observons un amortissement légèrement plus important de la propagation de l'élévation du niveau marin. Ceci est lié à

l'amortissement de l'énergie de l'onde de marée sur le haut des zones intertidales (non accessibles lors des marées de coefficients faibles et moyens). Malgré cette atténuation de l'élévation du niveau marin observée lors des vives-eaux, les niveaux observés avec de forts coefficients sont, pour des conditions de débit et d'élévation du niveau marin semblables, supérieurs aux niveaux obtenus pour des coefficients plus faibles (Figure 7).

### Ligne d'eau maximale dans le lit mineur de l'estuaire de la Seine pour différentes élévations du niveau marin

Débit de la Seine à Poses :  $1200\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ , Coefficient de marée = 106

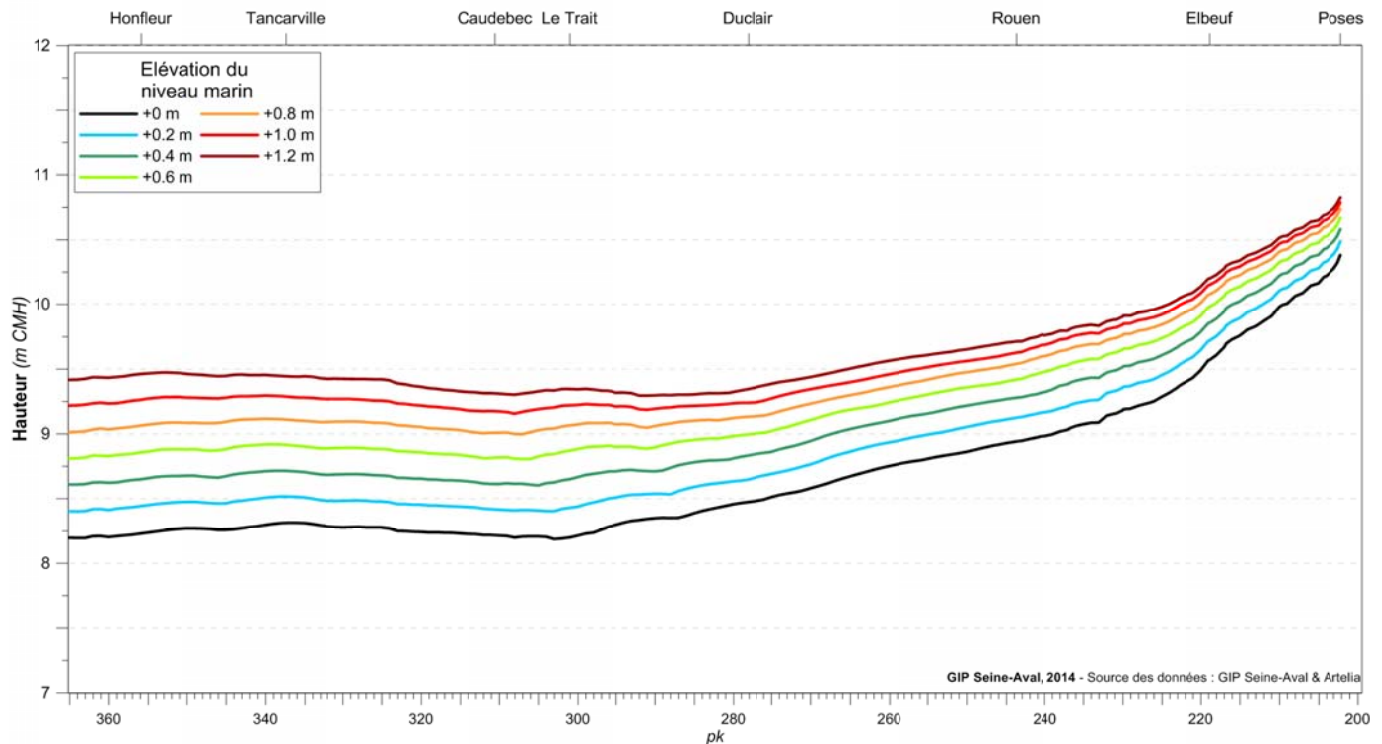


Figure 7: Niveau de pleine mer le long de l'estuaire de la Seine pour différentes élévations du niveau marin et pour un débit de la Seine à Poses de  $1200\text{m}^3.\text{s}^{-1}$  et un coefficient de marée de 106

Les valeurs de pleine mer obtenues pour les différentes simulations en 6 lieux (Elbeuf, Rouen, Duclair, Heurteville, Caudebec-en-Caux, Tancarville) ont été compilées dans des abaques (ANNEXE 2). Ils permettent de comparer les niveaux atteints (en valeur absolue) pour les différentes conditions, ainsi que les surélévations liés aux conditions d'élévation du niveau marin testées. Par exemple une élévation du niveau marin de 1m, générera une surélévation du niveau de pleine mer à Rouen proche de 1m pour des conditions de débits inférieures ou égales à  $800\text{m}^3.\text{s}^{-1}$  et un coefficient de marée de 78. Pour les forts débits et coefficients de marée, la surélévation du niveau de pleine mer s'atténue d'aval en amont ; par exemple pour un débit de  $2000\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ , 1m d'élévation du niveau marin génère une surélévation à Rouen de 0,6m pour un coefficient de 78 et de 0,5m pour un coefficient de 106 (Tableau II, Figure 8).

Tableau II: Abaque des niveaux de pleine mer à Rouen en m CMH

	Débit m <sup>3</sup> /s	Référence actuelle (m)		Elevation du niveau marin (m)											
				0.2		0.4		0.6		0.8		1		1.2	
Coefficient de marée	400	7.68	7.93	0.19	0.20	0.39	0.42	0.60	0.64	0.82	0.85	1.06	1.06	1.27	1.27
	600	7.96	8.24	0.19	0.20	0.39	0.39	0.59	0.60	0.79	0.81	1.01	0.99	1.19	1.17
	800	8.23	8.52	0.19	0.19	0.38	0.39	0.58	0.58	0.79	0.74	0.97	0.88	1.11	1.04
	1000	8.45	8.75	0.19	0.19	0.39	0.37	0.58	0.53	0.76	0.67	0.91	0.79	1.04	0.89
	1200	8.62	8.94	0.20	0.18	0.39	0.34	0.56	0.48	0.70	0.60	0.85	0.68	0.95	0.77
	1400	8.77	9.08	0.19	0.15	0.37	0.30	0.52	0.42	0.66	0.52	0.78	0.61	0.87	0.67
	1600	8.90	9.19	0.18	0.15	0.34	0.27	0.48	0.38	0.61	0.47	0.71	0.55	0.80	0.61
	1800	9.02	9.29	0.16	0.13	0.31	0.24	0.44	0.35	0.55	0.44	0.65	0.50	0.73	0.56
2000	9.12	9.37	0.15	0.13	0.29	0.24	0.42	0.33	0.51	0.40	0.59	0.47	0.66	0.51	
Crue 1910		9.54		0.11		0.20		0.29		0.36		0.45		0.54	
Tempête 1999		9.65		0.07		0.15		0.19		0.24		0.30		0.47	

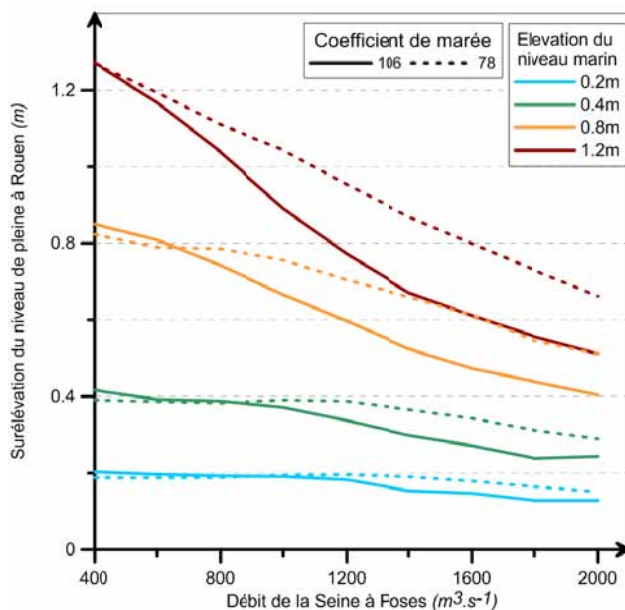


Figure 8 : Surélévation du niveau de pleine mer à Rouen en fonction du débit de la Seine à Poses pour différentes élévations du niveau marin

### III/ Synthèse des résultats

#### A. Par site

Les abaques générés pour les principaux marégraphes de l'estuaire (Tableau II et ANNEXE 2) permettent de tracer la surélévation du niveau de pleine mer observée sur chaque site en fonction de l'élévation du niveau marin pour des débits constants de la Seine (Figure 9).

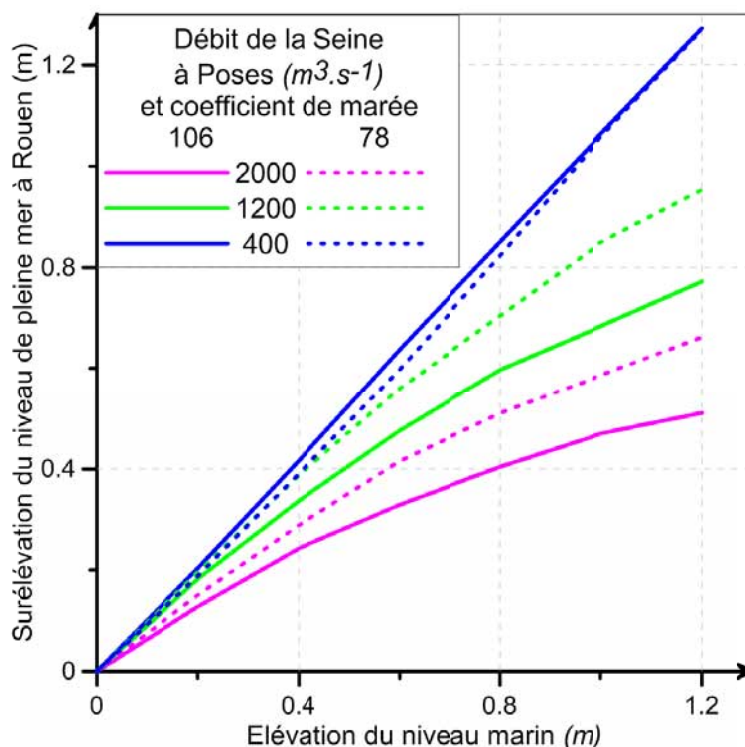


Figure 9 : Surélévation du niveau de pleine mer à Rouen en fonction de l'élévation du niveau marin pour différents débits et coefficients de marée

Le coefficient de la régression linéaire passant par 0 de chacune de ces courbes peut être interprété comme le coefficient d'atténuation/amplification de l'élévation du niveau marin jusqu'au site considéré, à pleine mer. Par exemple, pour le site de Rouen, avec un débit de  $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  la surélévation à pleine mer équivaut à environ 100% de l'élévation du niveau marin, ce coefficient vaut 1. En revanche pour un débit de  $2000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , le coefficient vaut 0,6 car la surélévation de pleine mer à Rouen équivaut à 60% de l'élévation du niveau marin (Figure 9).

L'incertitude générée par l'assimilation de ces courbes à des fonctions linéaire passant par 0 est acceptable, car comprise dans l'intervalle de confiance à 95%. Cette incertitude est quasi nulle pour les faibles débits (courbe, interpolation linéaire et intervalle de confiance à 95% confondus) et peut atteindre 17% pour les débits importants (Figure 10).

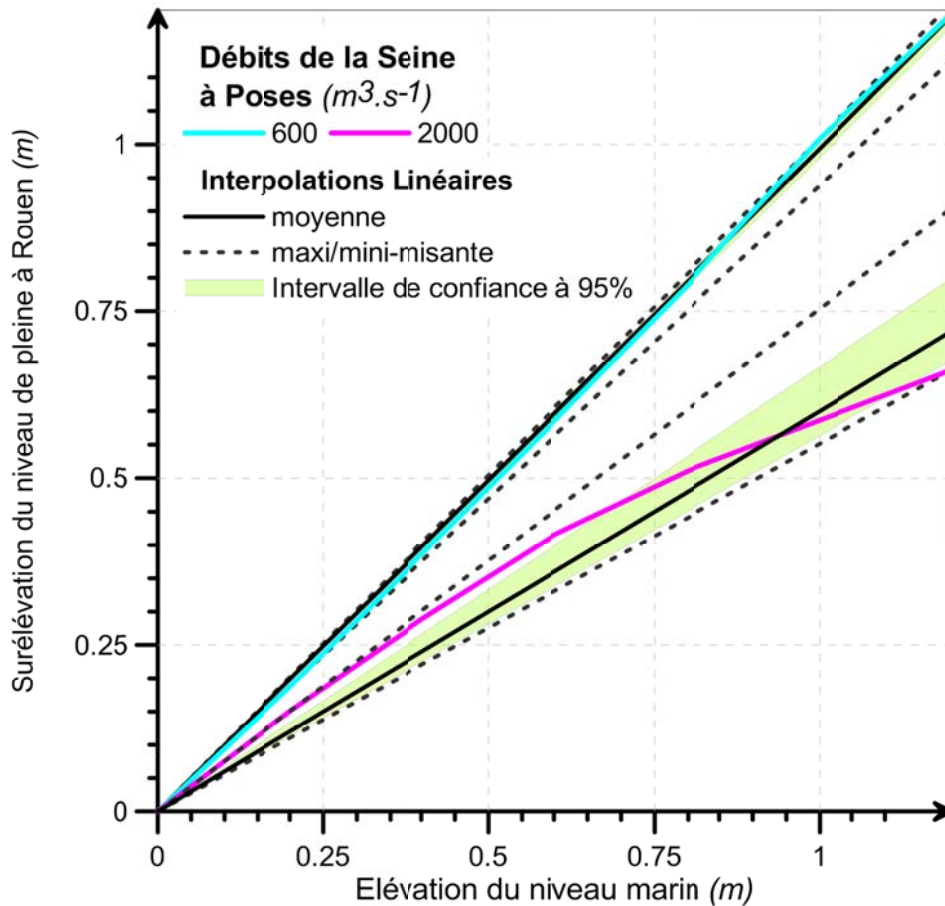


Figure 10 : Illustrations de l'erreur commise par interpolation linéaire des coefficients d'atténuation/amplification du site de Rouen pour deux débits de la Seine à Poses et pour un coefficient de marée de 78

## B. A l'échelle de l'estuaire

Etant donné l'importance du débit sur les relations propres à chaque site, la synthèse des résultats à l'échelle de l'estuaire n'apparaît possible qu'en individualisant les débits étudiés. En effet l'incertitude engendrée par l'interpolation linéaire pour les forts débits rend impossible l'agrégation des résultats obtenus à des débits différents.

La méthode d'interpolation linéaire présentée dans la partie III.A a été appliquée sur les sites de Tancarville, Caudebec-en-Caux, Heurteville, Duclair, Rouen et Elbeuf. Ainsi pour chaque débit, et chacun des sites précédemment cités, le coefficient d'amortissement/amplification de l'élévation du niveau marin est connu.



### Impact de l'élévation du niveau marin sur les niveaux de pleines mers pour un coefficient de marée de 78 et pour différents débits de la Seine à Poses

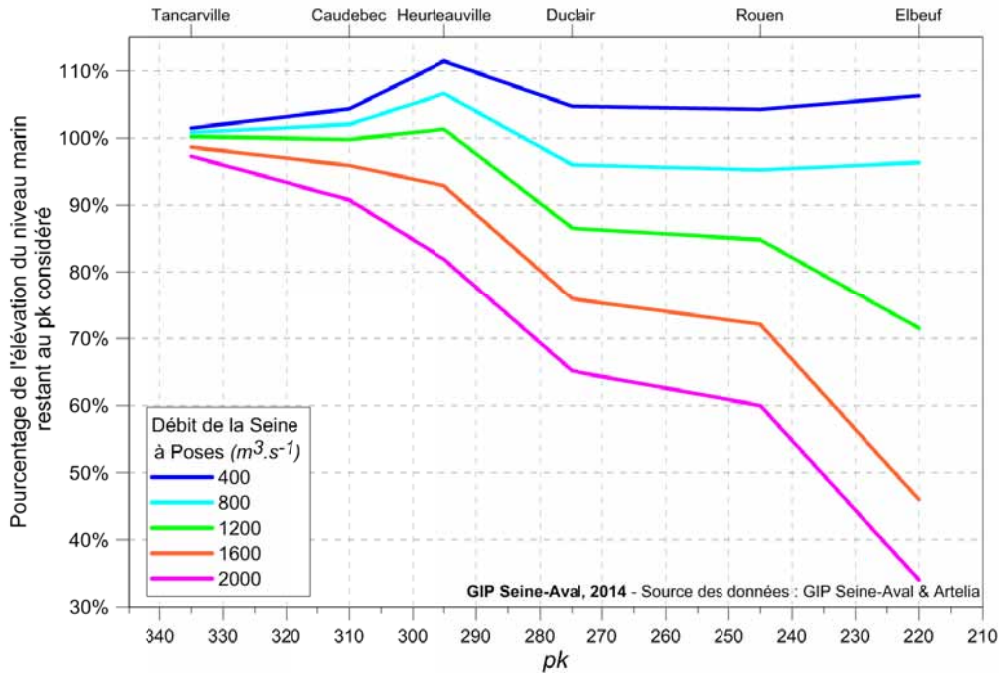


Figure 11: Evolution du coefficient d'amortissement/amplification de l'élévation du niveau marin dans l'estuaire de la Seine pour différents débits pour un coefficient de marée de 78

### Impact de l'élévation du niveau marin sur les niveaux de pleines mers pour un coefficient de marée de 106 et pour différents débits de la Seine à Poses

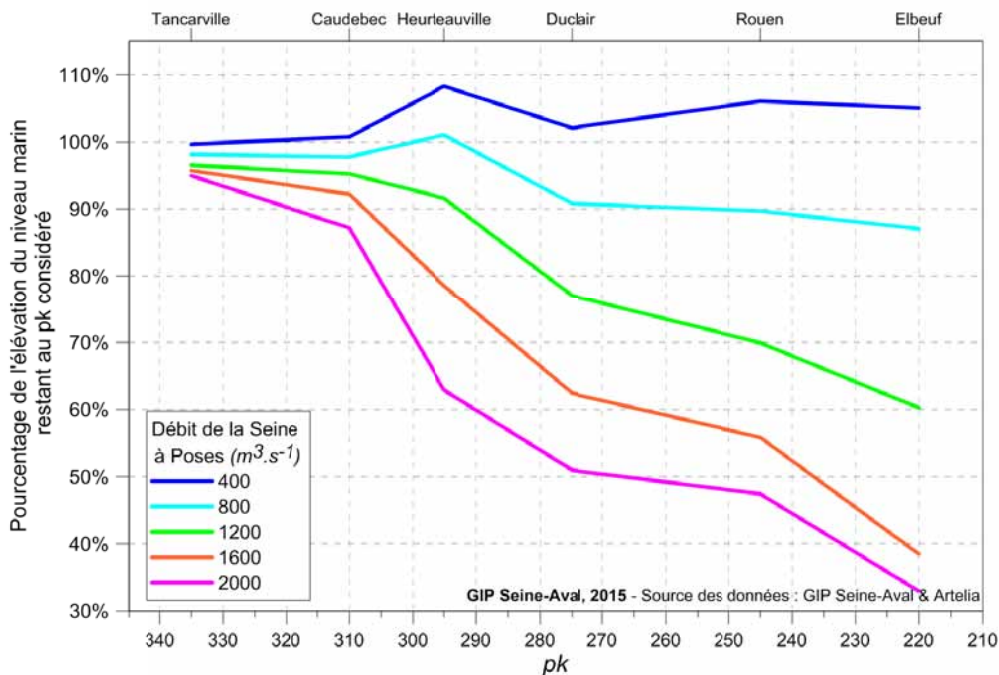


Figure 12: Evolution du coefficient d'amortissement/amplification de l'élévation du niveau marin dans l'estuaire de la Seine pour différents débits pour un coefficient de marée de 106

Les figures 11 et 12 présentent l'évolution du coefficient d'amortissement/amplification des niveaux de pleine mer par rapport à l'élévation du niveau marin le long du linéaire estuarien respectivement pour les coefficients de 78 et 106. Comme vu précédemment, on notera l'amortissement engendré par les forts débits comparé à la légère amplification observée pour les débits voisins du débit moyen de la Seine.

Cette légère amplification peut s'expliquer par les phénomènes régissant la propagation de la marée en estuaire : la dissipation d'énergie par frottement et l'amplification du marnage par la canalisation de l'onde de marée dans la forme convergente des estuaires. Les conditions hydrodynamiques actuelles de l'estuaire de la Seine en font un estuaire hypo synchrone, autrement dit un estuaire où l'amplitude de la marée décroît de l'aval vers l'amont. Dans sa configuration actuelle, l'estuaire de la Seine dissipe plus d'énergie par frottement que sa forme convergente en canalise ; il en résulte donc la diminution du marnage observée de l'aval vers l'amont. Dans notre cas, l'augmentation du niveau marin permet à l'onde de marée de transiter sur des profondeurs légèrement plus importantes, et donc de perdre moins d'énergie par frottement sur les fonds. Cette perte d'énergie moindre, liée à l'augmentation du niveau marin, peut expliquer l'amplification de l'élévation des niveaux de pleine mer constatée dans les simulations.

Pour les débits plus importants nous observons naturellement un amortissement de l'aval vers l'amont de l'élévation du niveau marin lié aux contraintes générées par les débits de la Seine sur l'onde de marée. La comparaison des courbes concernant les débits élevés sur les deux figures montre que malgré des niveaux plus élevés pour les marées de 106, l'amortissement est légèrement plus fort lors des vives eaux. On observe ainsi, pour un débit de  $2000\text{m}^3.\text{s}^{-1}$  une propagation de 60% de l'élévation du niveau marin jusqu'à Rouen lors des marées de 78 contre 50% lors des marées de 106. Cette atténuation légèrement plus forte est vraisemblablement due à une plus grande dissipation de l'énergie de l'onde de marée sur les hautes zones intertidales ainsi qu'à des débordements plus importants.

## IV/ Cas particulier des simulations “réalistes”

Pour les simulations basées sur les conditions hydro-climatiques passées (crue de 1910 et tempête de 1999), le même mode de fonctionnement est observé, avec un amortissement de la surélévation de l'aval vers l'amont, (Figure 13, Figure 14).

Dans le cas de la crue de 1910, pour laquelle le débit de pointe imposé au modèle est de  $3000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , l'amortissement est plus important que pour le scénario théorique de débit  $2000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . En cohérence avec les conclusions du chapitre III, on observe dans ce cas un amortissement de 45% de l'élévation du niveau marin à Rouen.

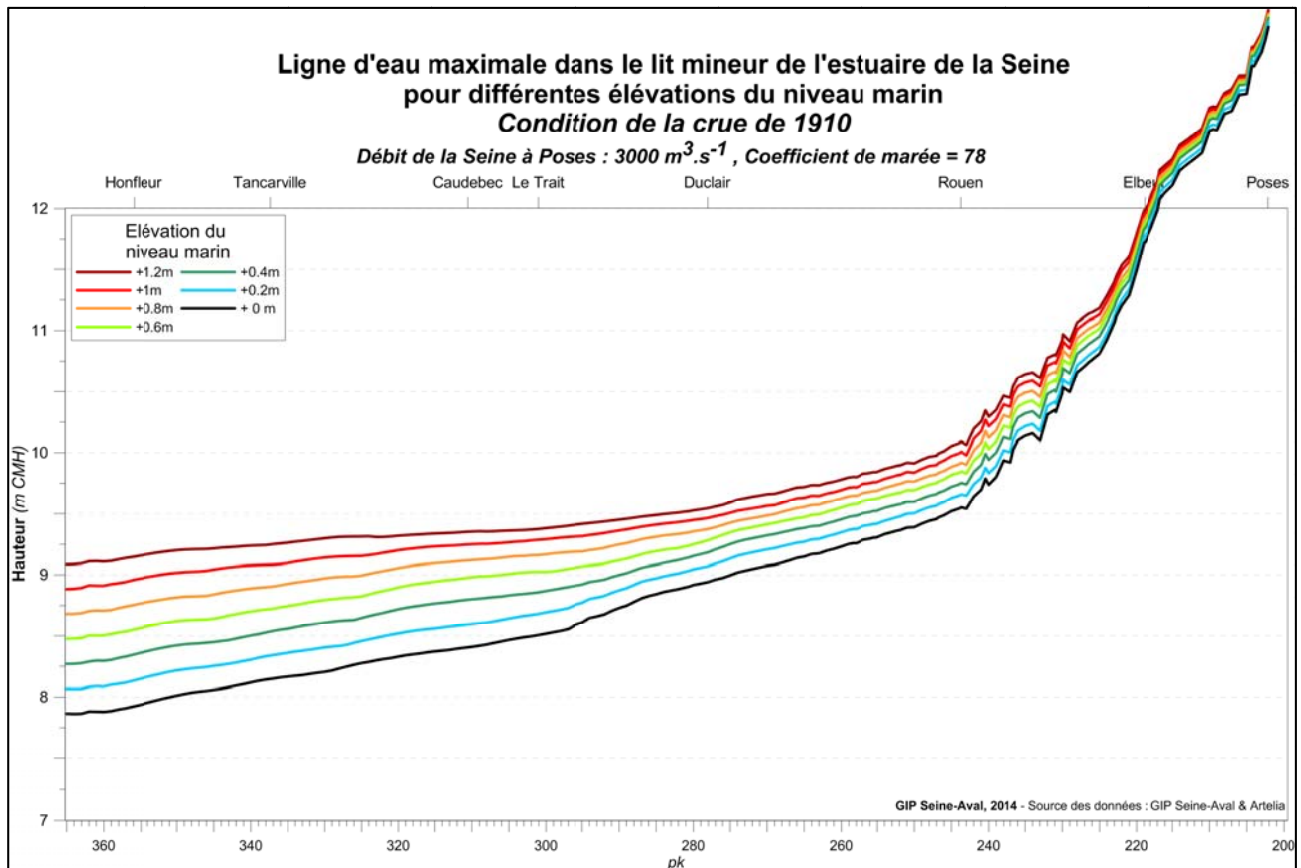


Figure 83 : Niveau de pleine mer le long de l'estuaire de la Seine pour différentes élévations du niveau marin et pour un forçage réaliste type crue de 1910

Pour le scénario “tempête de 1999”, les niveaux observés, en particulier à l'aval, sont déjà très élevés sans élévation du niveau marin. En simulant des élévations du niveau marin importantes (entre 1 et 1.2m), on observe une saturation des zones submergées à l'aval. Il en résulte une large diminution de l'atténuation de la surélévation à partir du pk 290 (Figure 11).

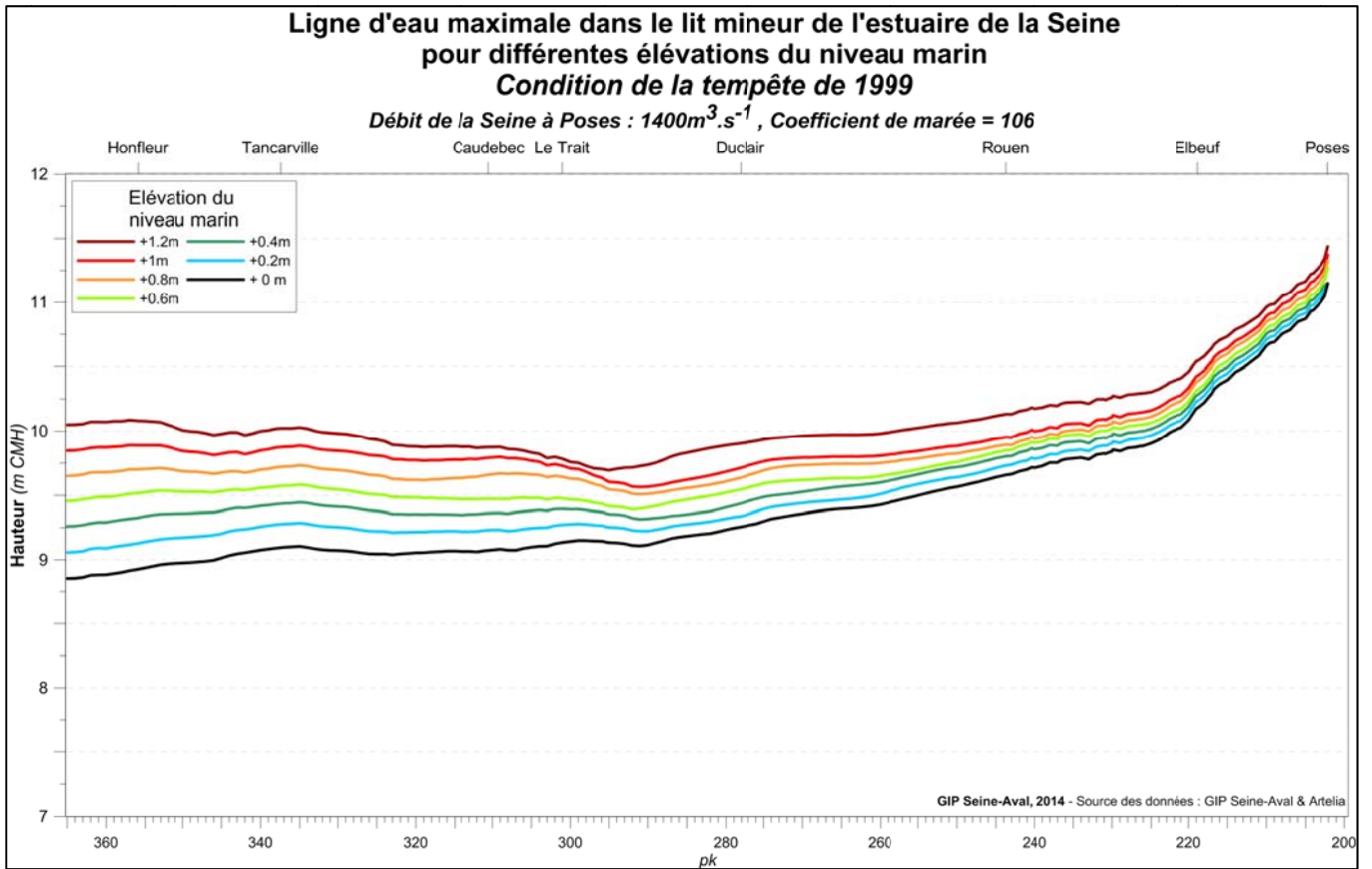


Figure 9 : Niveau de pleine mer le long de l'estuaire de la Seine pour différentes élévations du niveau marin et pour un forçage réaliste type tempête 1999

## Conclusions

L'exploitation du modèle TELEMAC pour simuler l'impact de l'élévation du niveau marin sur les niveaux de pleine mer en estuaire de Seine a produit des résultats pour des gammes de variations (de débit et d'élévation du niveau marin) encore jamais testées. Jusqu'alors nous ne connaissions l'impact de l'élévation du niveau marin qu'à travers des simulations faites avec des forts débits de Seine et des élévations du niveau marin de 0.6 et 1m. Ce travail permet donc de compléter les connaissances pour des débits compris entre 400 et 2000 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> et des élévations du niveau marin de 0.2 à 1.2m dans le cas d'un coefficient de marée moyen (78) et fort (106).

Les principaux résultats issus des simulations faites dans le cadre de cette étude montrent que :

- L'amortissement de la propagation de l'élévation du niveau marin en estuaire est principalement régi par le débit de la Seine : plus le débit de la Seine est important, moins l'élévation du niveau marin se propage dans l'estuaire de la Seine ,
- Pour les débits proche du débit moyen de la Seine (400m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>), l'élévation du niveau marin est retranscrite intégralement, voir amplifiée, sur l'ensemble du linéaire de l'estuaire,
- L'amortissement de la propagation de l'élévation du niveau marin en estuaire est légèrement plus important pour un coefficient de marée élevé,
- La prise en compte des murets anti-inondation ne modifie pas, à l'échelle de l'estuaire, les niveaux de pleine mer obtenus dans le lit mineur de l'estuaire.



## ANNEXE 1: Description du modèle hydraulique Telemac 2D

### A. Généralités

Ce chapitre présente le modèle hydraulique utilisé pour définir et modéliser un scénario permettant l'atteinte de la cote millénaire à Tancarville et au Havre. La présentation du logiciel de calcul, les hypothèses de construction et les résultats complets de calage sont présentés dans le rapport d'objectif C [ARTELIA & GIPSA, 2013c].

Le modèle développé représente les **niveaux d'eau dans le lit mineur de la Seine** à l'aval de Poses et 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 TELEMAR-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 [ARTELIA] développé pour la prise en compte des digues et des infrastructures en remblai. Ce dernier permet de prendre en compte de manière très opérationnelle et avec grande précision les digues et remblais, séparant entre autre 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, mobilise les données de topographie et bathymétrie les plus récentes [Tableau III] et intègre les murets de type 'anti-inondation' dont la localisation et l'altimétrie ont fait l'objet d'un inventaire spécifique [Figure 10 ; GIPSA, 2013]. En lit mineur, le maillage a été optimisé en définissant des sections équivalentes, afin de réduire les temps de calculs. 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 : *i*) respect de la cote du thalweg ; *ii*) respect des sections moyennes sous la cote du niveau de mi-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 de notre modèle). Le modèle n'ayant pas vocation à calculer des écoulements dans le lit majeur, les mailles y sont plus larges (entre 150m et 500m) [Figure 11].

Tableau III : Données mobilisées pour la construction du modèle.

Paramètre	Lieu	Acquisition	Source
Bathymétrie	Embouchure Seine	2011	GPMR
	Rouen – Tancarville	2008	GPMR
	Poses – Rouen (chenal)	2005	GIPSA & GPMR
	Poses – Rouen (bras secondaires)	2011	DREAL
Topographie	Lit majeur (aval de Poses)	2010-2011	GIPSA
	Lit majeur (amont de Poses)	2011	DREAL
Murets anti-inondation	Poses - Tancarville	2010	GIPSA

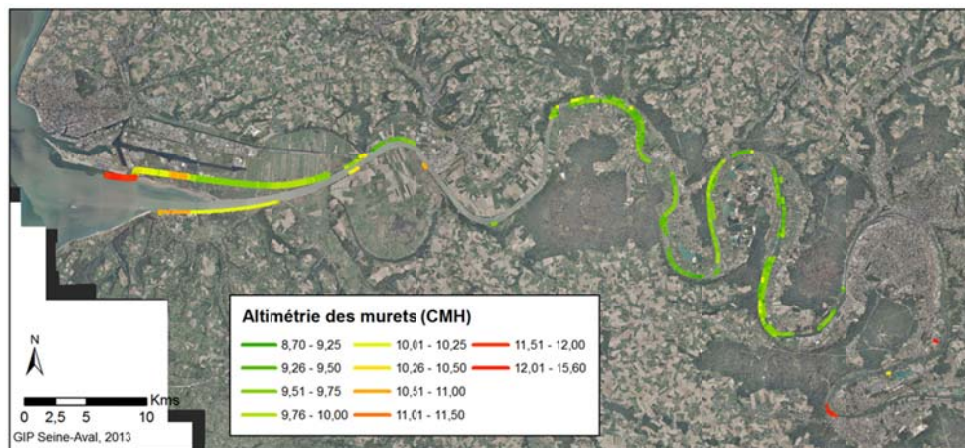


Figure 10 : Localisation et altimétrie des murets anti-inondation identifiés le long de l'estuaire de la Seine.

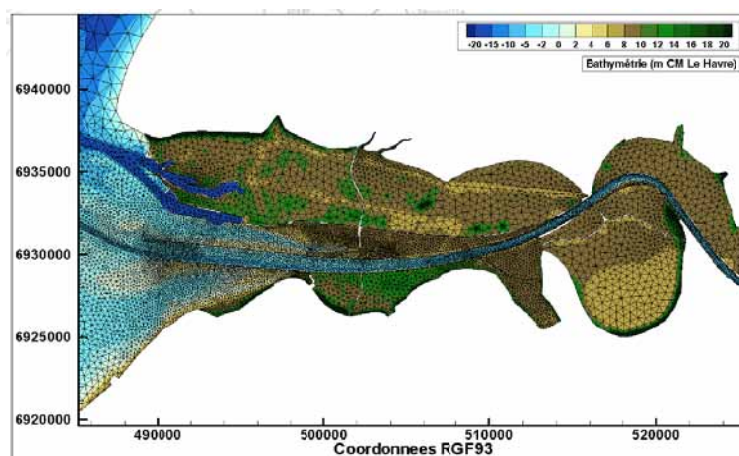


Figure 11 : Bathy-topographie et maillage du modèle à l'embouchure de la Seine.

À l'amont, le modèle est **forcé par le débit** de la Seine à Poses et par celui de l'Eure à Louviers. Les forçages météorologiques sont le **vent** évoluant le long de l'estuaire, basé sur la station du cap de la Hève (intensité et direction) et un **gradient de pression atmosphérique** entre Le Havre et Rouen. À l'aval, le modèle est forcé en chaque maille par le **signal de marée** issu d'un modèle de grande emprise de la Manche [ARTELIA].

Le **modèle a été calé sur 6 évènements récents** [Tableau IV], 3 évènements de type 'crue' : 01/02/1995, 28/03/2001 ; 11/02/2013 ; et 3 évènements de type 'tempête' : 10/03/2008, 21/03/2008, 11/02/2013. Pour ces 6 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 sont également présentés, permettant d'affiner l'analyse [Figure 12 ; Figure 13]. Pour ces 6 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 (<10 cm sur les 19 marégraphes) sur les 160 Km séparant le barrage de Poses de l'embouchure de la Seine.

Tableau IV : Caractéristiques des évènements de calage.

Paramètre	Evènement de calage					
	Crue			Tempête		
	1 <sup>er</sup> 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 12 : Exemple de calage pour la crue de février 2013.

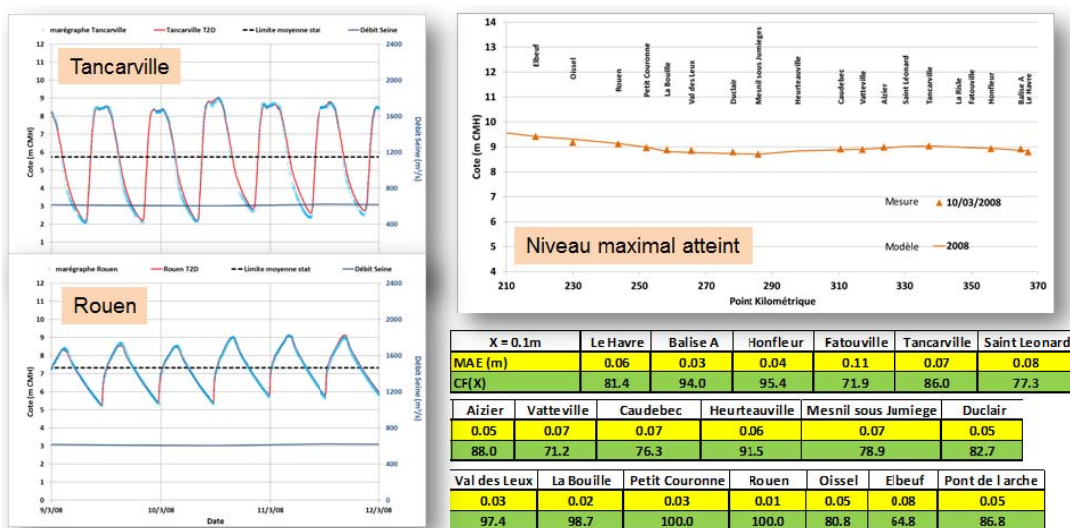


Figure 13 : Exemple de calage pour la tempête du 10 mars 2008

Au vu des résultats et pour les conditions testées, **le modèle est considéré comme calé et validé sur l'ensemble de l'estuaire**. La représentativité des écoulements est bonne pour des événements extrêmes

(crues, 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 de conditions d'utilisation :** 1) le modèle n'est pas adapté pour l'étude des lignes d'étiages ; 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 pris en compte.

## B. Domaine de validité et limite du modèle

Les simulations réalisées pour cette étude ainsi que les résultats du calage effectué par Artelia montrent que le modèle n'a pas le même niveau de performance pour l'ensemble des variables considérés et sur l'ensemble de son domaine. En particulier, l'effet des vents d'Ouest sur les surcotes à l'embouchure de l'estuaire semble être sous-estimé. Dans le cadre des simulations de calage, il a été compensé par l'ajout d'une surcote à la frontière marine. Les résultats issus du modèle pour des scénarios comportant des vents d'ouest sont donc à analyser en tenant compte de cette limite.

## ANNEXE 2: Abaquages des niveaux de pleines mers en fonction de l'élévation du niveau marin

### A. ELBEUF

	Débit m <sup>3</sup> /s	Référence actuelle (m)		Elevation du niveau marin (m)											
				0.2		0.4		0.6		0.8		1		1.2	
<i>Coefficient de marée</i>	400	8.10	8.37	0.20	0.22	0.42	0.44	0.64	0.67	0.86	0.87	1.07	1.05	1.26	1.21
	600	8.38	8.70	0.21	0.22	0.42	0.43	0.64	0.63	0.85	0.82	1.05	0.96	1.20	1.07
	800	8.67	8.97	0.20	0.21	0.40	0.41	0.61	0.59	0.80	0.75	0.98	0.86	1.10	0.95
	1000	8.95	9.24	0.18	0.18	0.36	0.35	0.55	0.51	0.71	0.64	0.85	0.73	0.97	0.80
	1200	9.24	9.49	0.15	0.16	0.32	0.30	0.47	0.42	0.60	0.52	0.72	0.60	0.81	0.65
	1400	9.52	9.75	0.14	0.12	0.27	0.23	0.39	0.33	0.50	0.40	0.59	0.47	0.65	0.52
	1600	9.79	9.97	0.11	0.10	0.21	0.18	0.30	0.25	0.38	0.33	0.45	0.39	0.52	0.43
1800	10.04	10.18	0.08	0.08	0.16	0.14	0.23	0.22	0.31	0.29	0.38	0.34	0.44	0.40	
2000	10.27	10.39	0.07	0.07	0.13	0.15	0.21	0.21	0.28	0.27	0.34	0.32	0.39	0.39	
Crue 1910		9.54		0.05		0.12		0.17		0.21		0.26		0.30	
Tempête 1999		9.65		0.05		0.10		0.14		0.21		0.25		0.38	

### B. ROUEN

	Débit m <sup>3</sup> /s	Référence actuelle (m)		Elevation du niveau marin (m)											
				0.2		0.4		0.6		0.8		1		1.2	
<i>Coefficient de marée</i>	400	7.68	7.93	0.19	0.20	0.39	0.42	0.60	0.64	0.82	0.85	1.06	1.06	1.27	1.27
	600	7.96	8.24	0.19	0.20	0.39	0.39	0.59	0.60	0.79	0.81	1.01	0.99	1.19	1.17
	800	8.23	8.52	0.19	0.19	0.38	0.39	0.58	0.58	0.79	0.74	0.97	0.88	1.11	1.04
	1000	8.45	8.75	0.19	0.19	0.39	0.37	0.58	0.53	0.76	0.67	0.91	0.79	1.04	0.89
	1200	8.62	8.94	0.20	0.18	0.39	0.34	0.56	0.48	0.70	0.60	0.85	0.68	0.95	0.77
	1400	8.77	9.08	0.19	0.15	0.37	0.30	0.52	0.42	0.66	0.52	0.78	0.61	0.87	0.67
	1600	8.90	9.19	0.18	0.15	0.34	0.27	0.48	0.38	0.61	0.47	0.71	0.55	0.80	0.61
1800	9.02	9.29	0.16	0.13	0.31	0.24	0.44	0.35	0.55	0.44	0.65	0.50	0.73	0.56	
2000	9.12	9.37	0.15	0.13	0.29	0.24	0.42	0.33	0.51	0.40	0.59	0.47	0.66	0.51	
Crue 1910		9.54		0.11		0.20		0.29		0.36		0.45		0.54	
Tempête 1999		9.65		0.07		0.15		0.19		0.24		0.30		0.47	

### C. DUCLAIR

	Débit m <sup>3</sup> /s	Référence actuelle (m)		Elevation du niveau marin (m)											
				0.2		0.4		0.6		0.8		1		1.2	
<i>Coefficient de marée</i>	400	7.49	7.76	0.20	0.21	0.41	0.43	0.63	0.65	0.85	0.85	1.06	1.02	1.24	1.18
	600	7.67	7.95	0.19	0.21	0.40	0.42	0.61	0.62	0.82	0.81	1.02	0.96	1.19	1.10
	800	7.85	8.13	0.19	0.20	0.39	0.40	0.59	0.59	0.79	0.76	0.97	0.89	1.12	1.04
	1000	8.04	8.32	0.19	0.19	0.38	0.38	0.57	0.56	0.76	0.70	0.92	0.83	1.06	0.96
	1200	8.23	8.51	0.19	0.18	0.37	0.35	0.55	0.51	0.72	0.64	0.87	0.76	1.00	0.87
	1400	8.40	8.69	0.18	0.16	0.36	0.32	0.52	0.47	0.68	0.58	0.82	0.68	0.92	0.77
	1600	8.55	8.84	0.17	0.16	0.35	0.30	0.50	0.43	0.64	0.53	0.76	0.61	0.85	0.70
1800	8.67	8.96	0.17	0.14	0.33	0.27	0.47	0.39	0.60	0.47	0.70	0.55	0.78	0.62	
2000	8.77	9.04	0.16	0.13	0.31	0.25	0.44	0.35	0.55	0.43	0.65	0.49	0.72	0.57	
Crue 1910		9.54		0.14		0.25		0.35		0.43		0.51		0.60	
Tempête 1999		9.65		0.10		0.19		0.29		0.39		0.47		0.64	



## D. HEURTEAUVILLE

	Débit m3/s	Référence actuelle (m)		Elevation du niveau marin (m)											
				0.2		0.4		0.6		0.8		1		1.2	
<i>Coefficient de marée</i>	400	7.52	7.83	0.22	0.24	0.46	0.47	0.68	0.69	0.90	0.90	1.12	1.08	1.31	1.23
	600	7.63	7.94	0.22	0.24	0.46	0.46	0.69	0.68	0.91	0.88	1.12	1.05	1.30	1.19
	800	7.74	8.05	0.22	0.23	0.44	0.45	0.66	0.66	0.87	0.85	1.07	1.01	1.24	1.14
	1000	7.85	8.17	0.22	0.22	0.44	0.43	0.65	0.64	0.85	0.81	1.05	0.96	1.21	1.09
	1200	7.96	8.30	0.22	0.21	0.43	0.42	0.64	0.60	0.82	0.78	1.02	0.92	1.18	1.02
	1400	8.09	8.42	0.21	0.20	0.42	0.40	0.62	0.57	0.80	0.73	0.98	0.85	1.12	0.94
	1600	8.21	8.54	0.21	0.20	0.41	0.37	0.59	0.54	0.77	0.68	0.93	0.78	1.05	0.85
	1800	8.32	8.66	0.20	0.19	0.40	0.35	0.58	0.50	0.74	0.62	0.88	0.70	0.98	0.77
2000	8.43	8.77	0.20	0.16	0.38	0.32	0.55	0.44	0.69	0.54	0.82	0.61	0.91	0.69	
Crue 1910		9.54		0.16		0.31		0.46		0.58		0.71		0.81	
Tempête 1999		9.65		0.12		0.22		0.28		0.41		0.47		0.56	

## E. CAUDEBEC EN CAUX

	Débit m3/s	Référence actuelle (m)		Elevation du niveau marin (m)											
				0.2		0.4		0.6		0.8		1		1.2	
<i>Coefficient de marée</i>	400	7.69	8.02	0.20	0.21	0.42	0.42	0.63	0.63	0.83	0.84	1.05	1.01	1.25	1.17
	600	7.75	8.07	0.20	0.21	0.41	0.42	0.62	0.62	0.83	0.83	1.04	1.00	1.23	1.14
	800	7.79	8.12	0.20	0.21	0.41	0.41	0.61	0.62	0.82	0.82	1.03	0.98	1.21	1.13
	1000	7.84	8.17	0.20	0.20	0.40	0.40	0.60	0.61	0.81	0.80	1.02	0.97	1.20	1.11
	1200	7.90	8.22	0.20	0.20	0.40	0.40	0.60	0.60	0.80	0.79	1.01	0.96	1.19	1.09
	1400	7.96	8.27	0.19	0.19	0.39	0.40	0.58	0.60	0.79	0.79	1.00	0.94	1.17	1.07
	1600	8.02	8.32	0.18	0.19	0.37	0.40	0.57	0.60	0.78	0.78	0.98	0.92	1.14	1.05
	1800	8.08	8.37	0.18	0.20	0.36	0.40	0.57	0.60	0.77	0.76	0.95	0.89	1.10	1.02
2000	8.14	8.43	0.17	0.20	0.36	0.40	0.56	0.58	0.74	0.73	0.92	0.86	1.06	0.99	
Crue 1910		9.54		0.19		0.39		0.57		0.71		0.84		0.94	
Tempête 1999		9.65		0.15		0.28		0.40		0.59		0.72		0.80	

## F. TANCARVILLE

	Débit m3/s	Référence actuelle (m)		Elevation du niveau marin (m)											
				0.2		0.4		0.6		0.8		1		1.2	
<i>Coefficient de marée</i>	400	7.92	8.25	0.20	0.20	0.40	0.41	0.60	0.61	0.81	0.82	1.02	1.00	1.22	1.17
	600	7.93	8.27	0.20	0.20	0.40	0.40	0.61	0.61	0.81	0.81	1.02	0.99	1.22	1.16
	800	7.95	8.28	0.20	0.20	0.40	0.40	0.60	0.60	0.81	0.80	1.01	0.98	1.21	1.15
	1000	7.96	8.30	0.19	0.20	0.40	0.40	0.60	0.60	0.80	0.80	1.01	0.98	1.21	1.14
	1200	7.98	8.31	0.19	0.20	0.40	0.39	0.60	0.59	0.80	0.79	1.01	0.97	1.20	1.13
	1400	8.00	8.33	0.19	0.20	0.39	0.39	0.59	0.59	0.79	0.79	1.00	0.96	1.20	1.13
	1600	8.02	8.34	0.19	0.19	0.39	0.39	0.58	0.59	0.79	0.78	0.99	0.96	1.19	1.13
	1800	8.04	8.36	0.19	0.19	0.38	0.39	0.58	0.59	0.79	0.78	0.99	0.96	1.18	1.13
2000	8.06	8.38	0.19	0.19	0.38	0.39	0.58	0.58	0.78	0.77	0.98	0.95	1.16	1.12	
Crue 1910		9.54		0.19		0.39		0.58		0.76		0.93		1.10	
Tempête 1999		9.65		0.18		0.34		0.48		0.63		0.78		0.92	

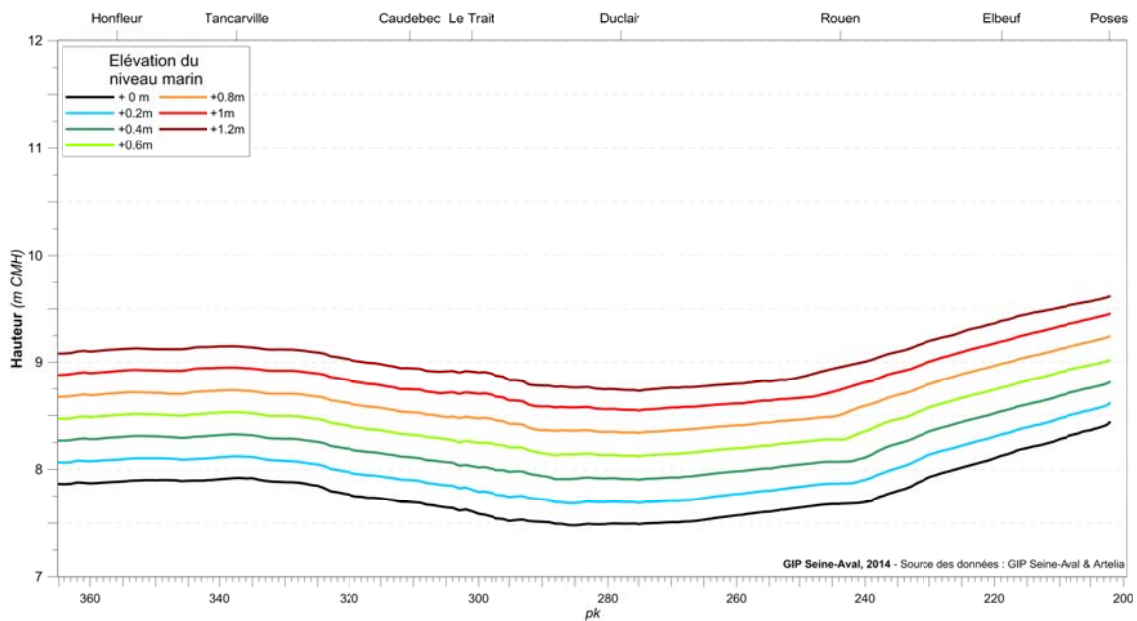
# ANNEXE 3 : Niveau de pleine mer le long de l'estuaire de la Seine pour différentes élévations du niveau marin et différents débits

## A. $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

### a) Coefficient 78

Ligne d'eau maximale dans le lit mineur de l'estuaire de la Seine pour différentes élévations du niveau marin

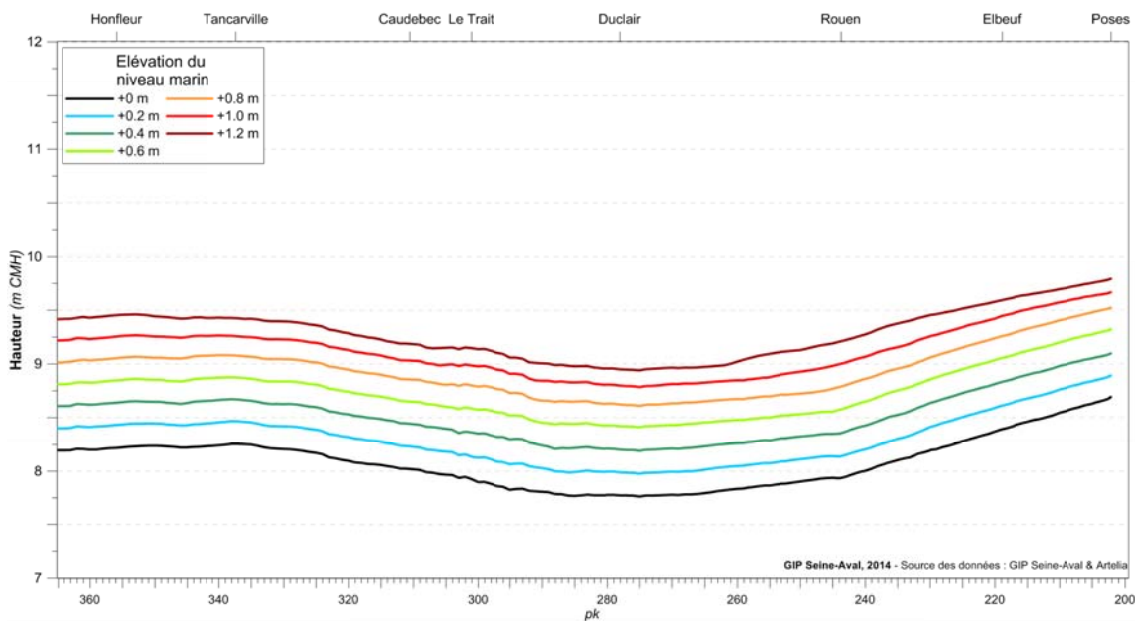
Débit de la Seine à Poses :  $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , Coefficient de marée = 78



### b) Coefficient 106

Ligne d'eau maximale dans le lit mineur de l'estuaire de la Seine pour différentes élévations du niveau marin

Débit de la Seine à Poses :  $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , Coefficient de marée = 106

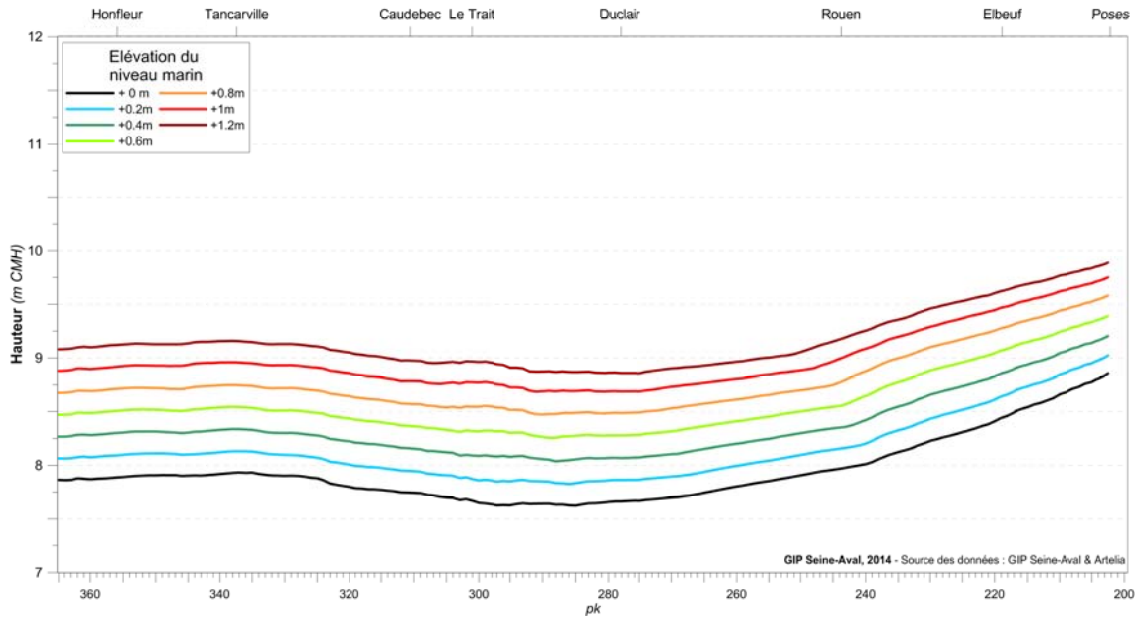


## B. $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

### a) Coefficient 78

#### Ligne d'eau maximale dans le lit mineur de l'estuaire de la Seine pour différentes élévations du niveau marin

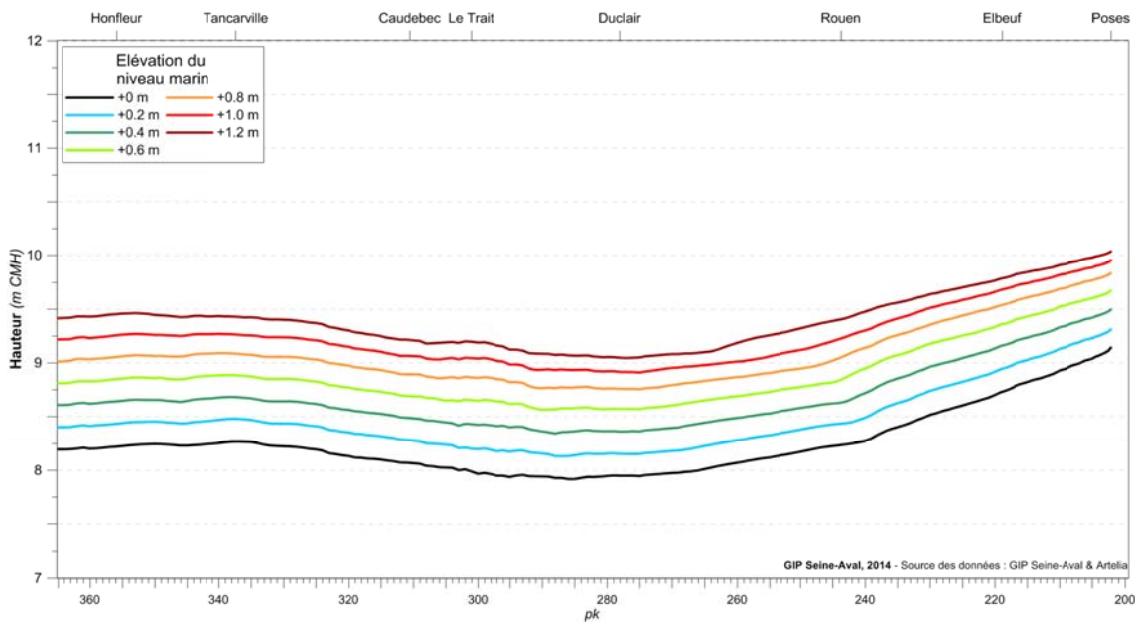
Débit de la Seine à Poses :  $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , Coefficient de marée = 78



### b) Coefficient 106

#### Ligne d'eau maximale dans le lit mineur de l'estuaire de la Seine pour différentes élévations du niveau marin

Débit de la Seine à Poses :  $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , Coefficient de marée = 106

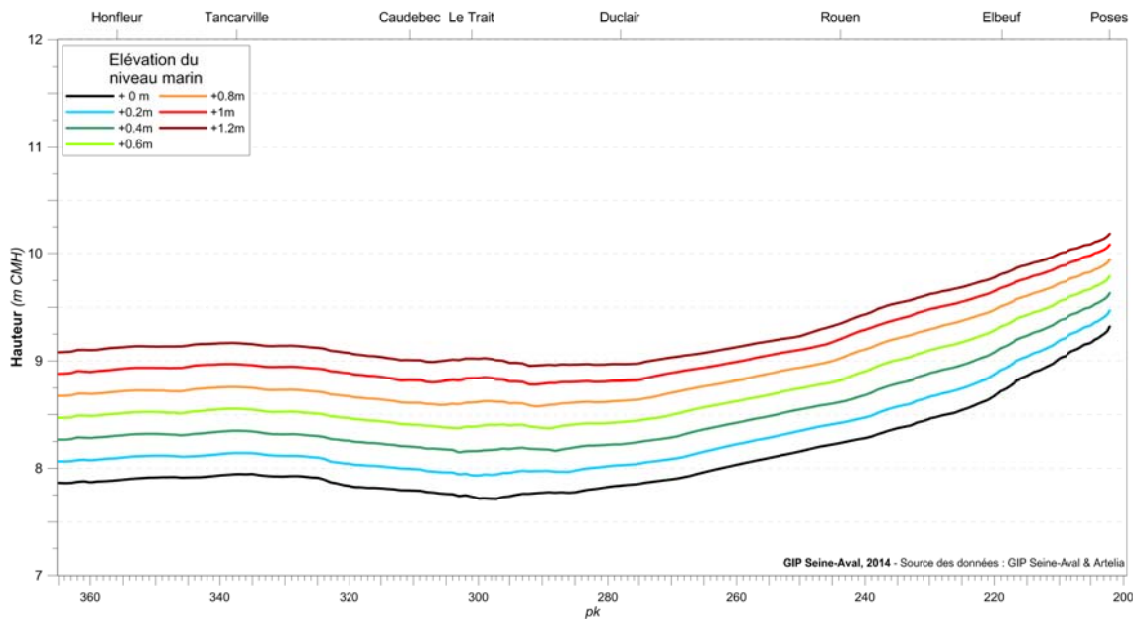


## C. $800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

### a) Coefficient 78

#### Ligne d'eau maximale dans le lit mineur de l'estuaire de la Seine pour différentes élévations du niveau marin

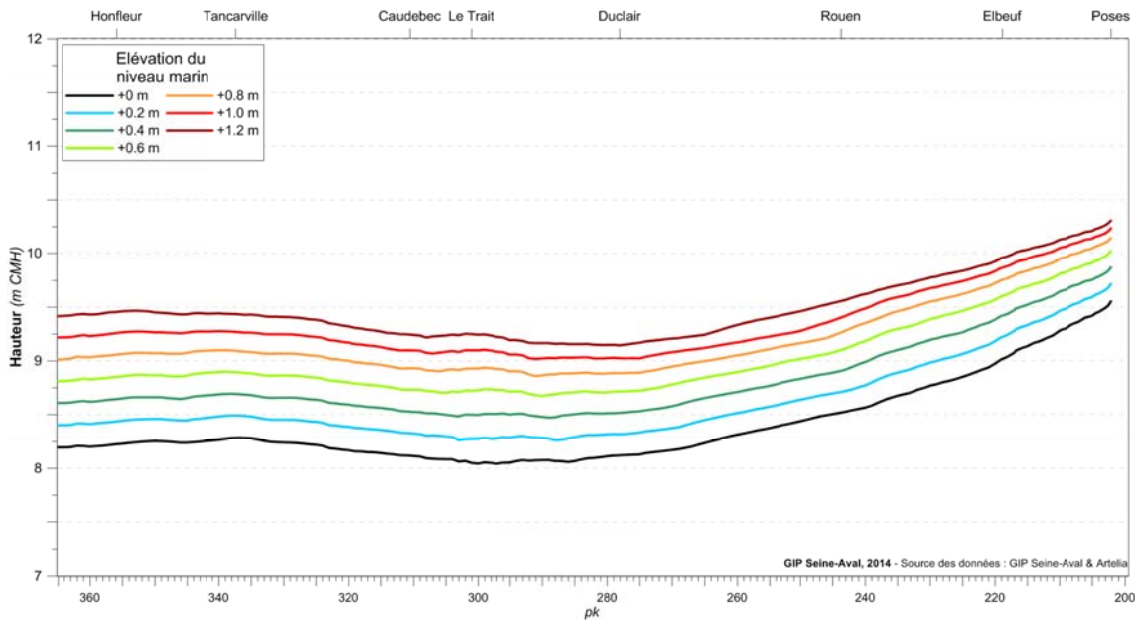
Débit de la Seine à Poses :  $800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , Coefficient de marée = 78



### b) Coefficient 106

#### Ligne d'eau maximale dans le lit mineur de l'estuaire de la Seine pour différentes élévations du niveau marin

Débit de la Seine à Poses :  $800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , Coefficient de marée = 106

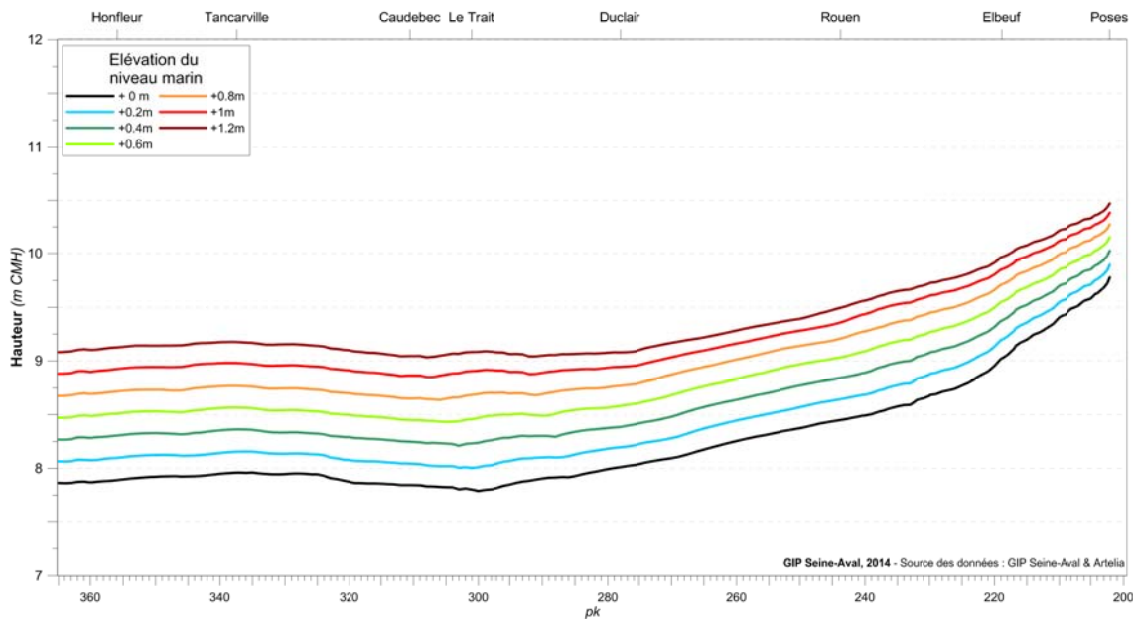


## D. $1000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

### a) Coefficient 78

#### Ligne d'eau maximale dans le lit mineur de l'estuaire de la Seine pour différentes élévations du niveau marin

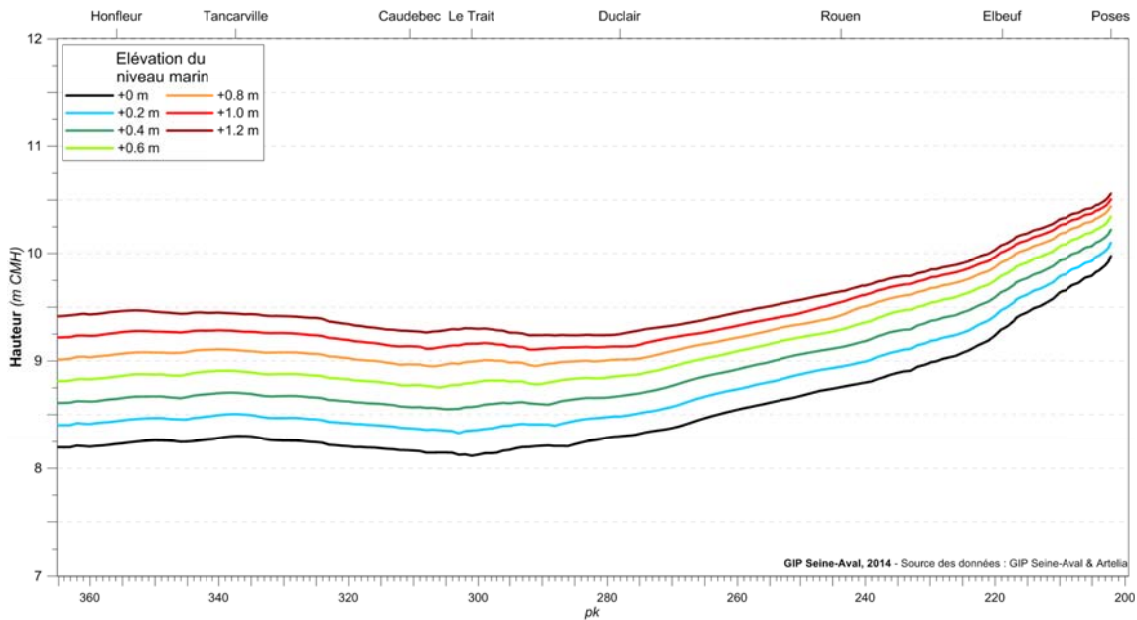
Débit de la Seine à Pcses :  $1000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , Coefficient de marée = 78



### b) Coefficient 106

#### Ligne d'eau maximale dans le lit mineur de l'estuaire de la Seine pour différentes élévations du niveau marin

Débit de la Seine à Poses :  $1000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , Coefficient de marée = 106



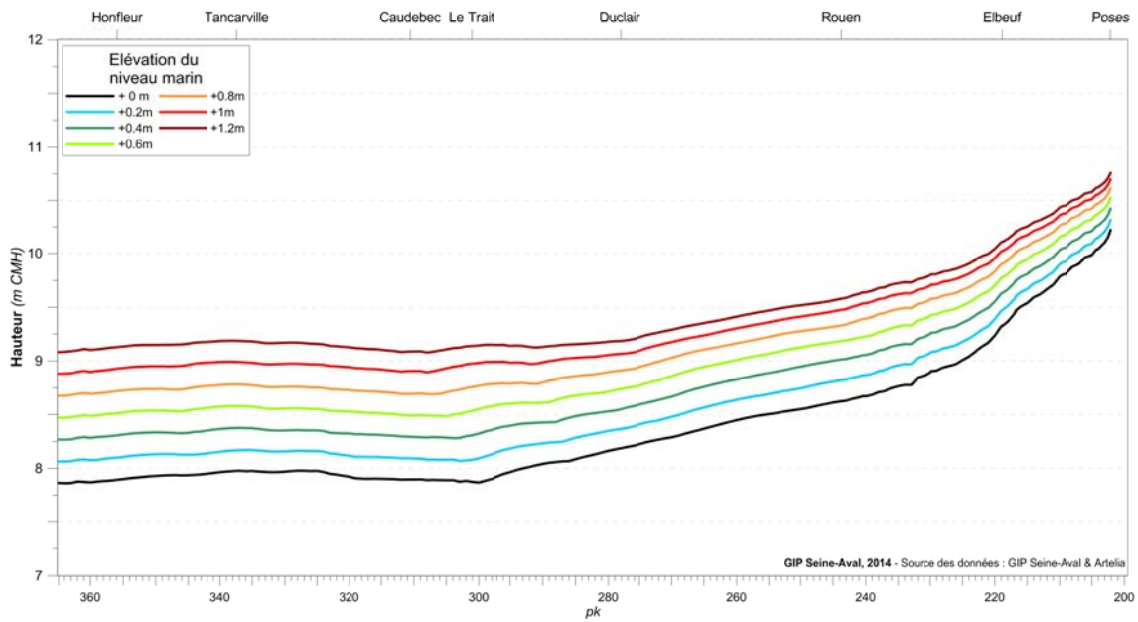


## E. $1200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

### a) Coefficient 78

#### Ligne d'eau maximale dans le lit mineur de l'estuaire de la Seine pour différentes élévations du niveau marin

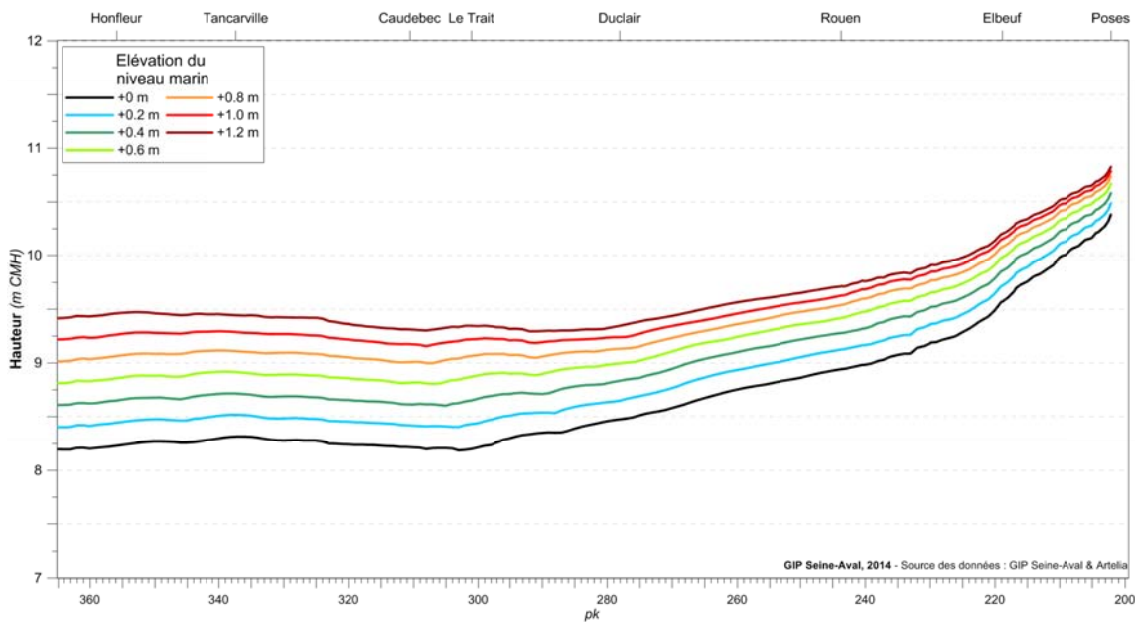
Débit de la Seine à Poses :  $1200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , Coefficient de marée = 78



### b) Coefficient 106

#### Ligne d'eau maximale dans le lit mineur de l'estuaire de la Seine pour différentes élévations du niveau marin

Débit de la Seine à Poses :  $1200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , Coefficient de marée = 106

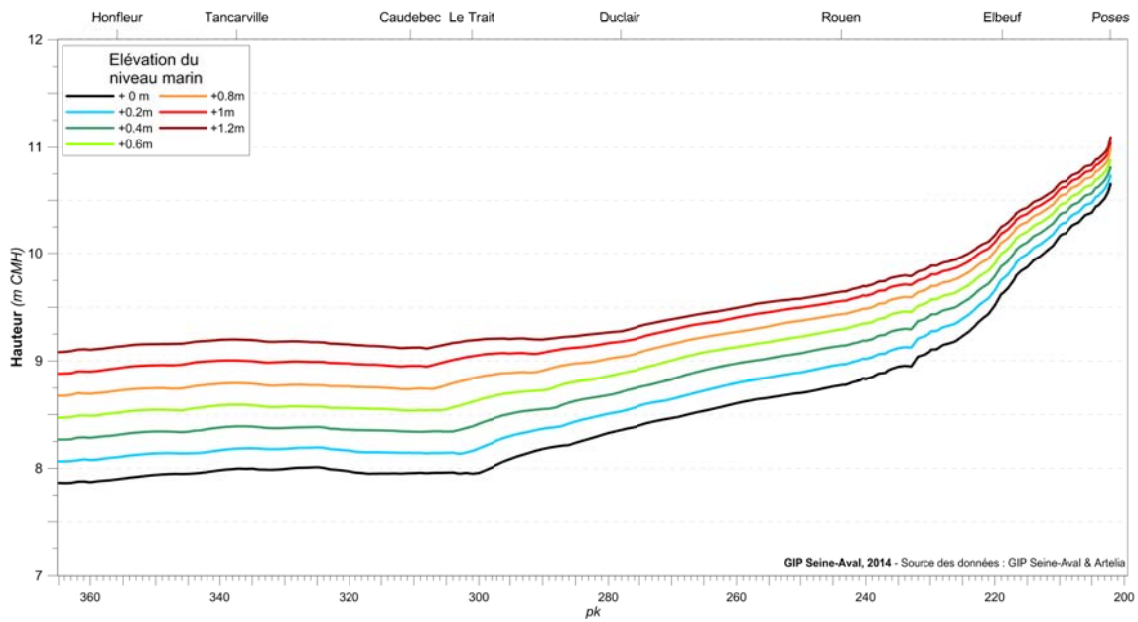


## F. $1400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

### a) Coefficient 78

#### Ligne d'eau maximale dans le lit mineur de l'estuaire de la Seine pour différentes élévations du niveau marin

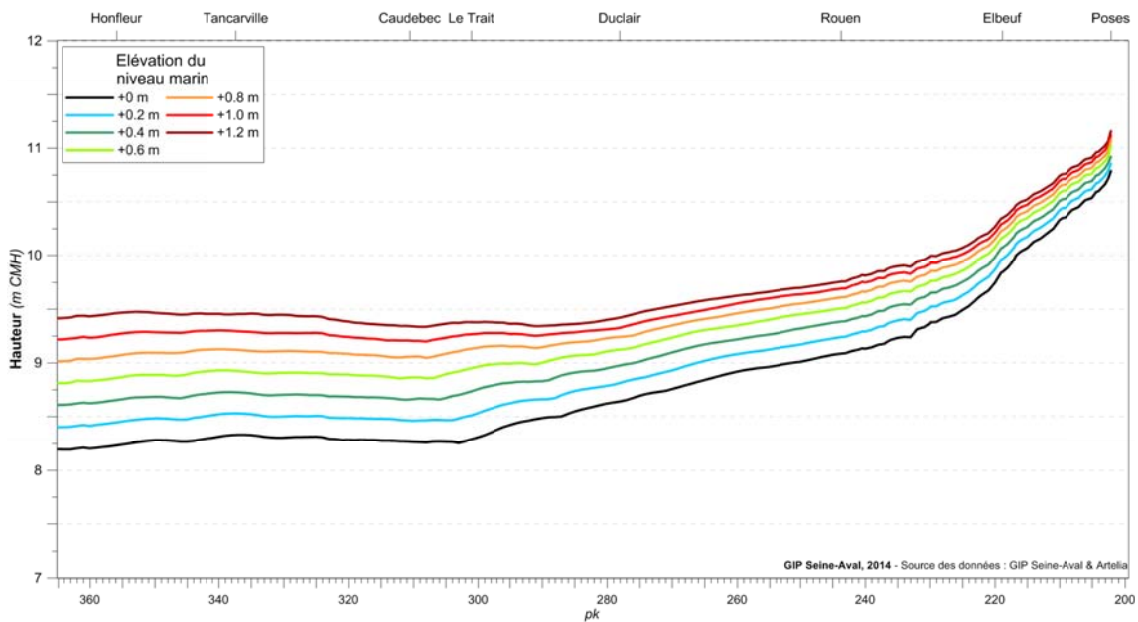
Débit de la Seine à Poses :  $1400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , Coefficient de marée = 78



### b) Coefficient 106

#### Ligne d'eau maximale dans le lit mineur de l'estuaire de la Seine pour différentes élévations du niveau marin

Débit de la Seine à Poses :  $1400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , Coefficient de marée = 106

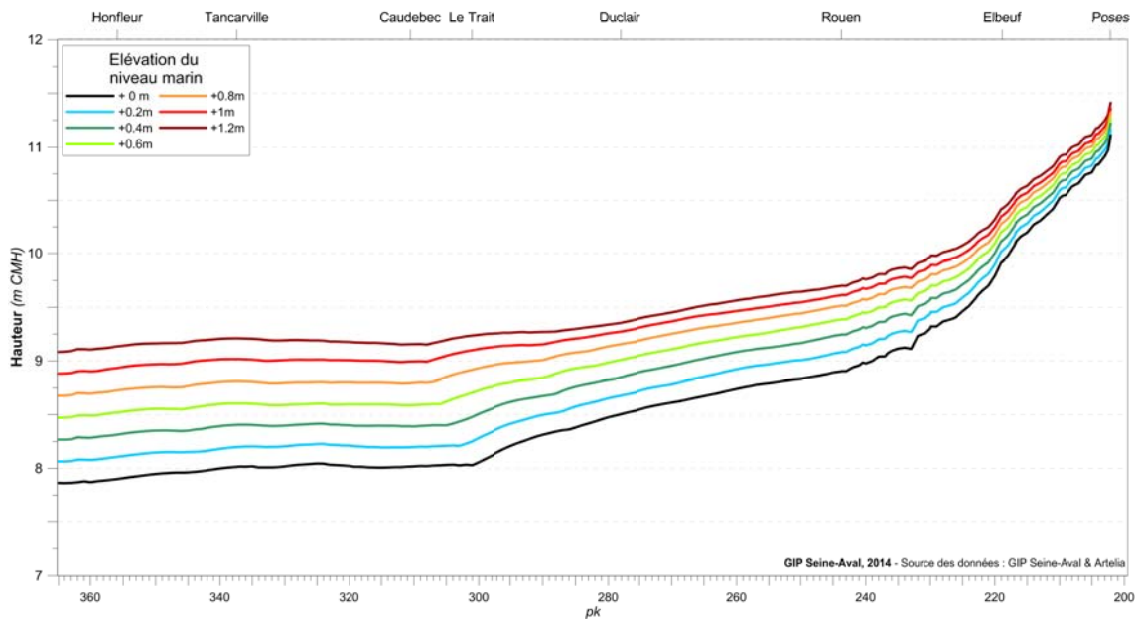


## G. 1600 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>

### a) Coefficient 78

#### Ligne d'eau maximale dans le lit mineur de l'estuaire de la Seine pour différentes élévations du niveau marin

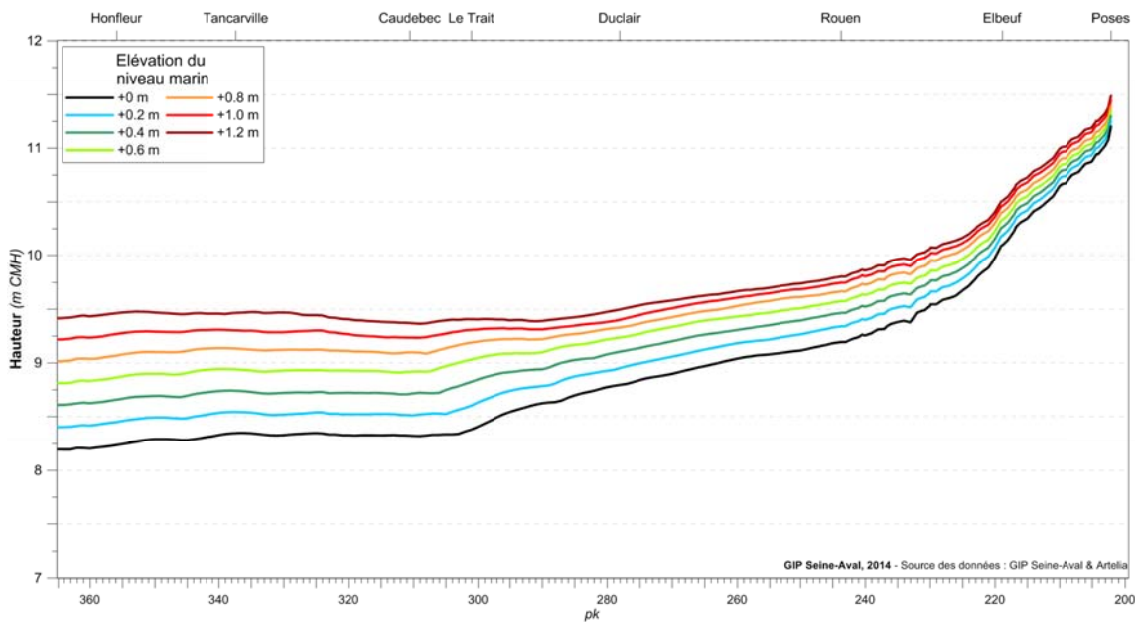
Débit de la Seine à Poses : 1600m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, Coefficient de marée = 78



### b) Coefficient 106

#### Ligne d'eau maximale dans le lit mineur de l'estuaire de la Seine pour différentes élévations du niveau marin

Débit de la Seine à Poses : 1600m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, Coefficient de marée = 106

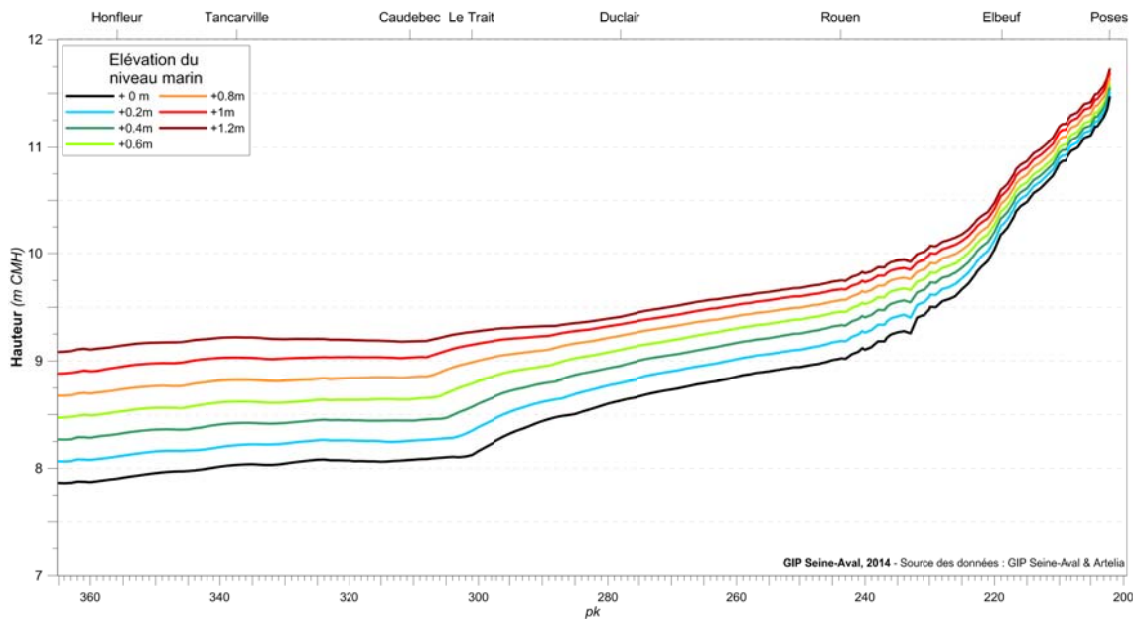


## H. 1800 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>

### a) Coefficient 78

#### Ligne d'eau maximale dans le lit mineur de l'estuaire de la Seine pour différentes élévations du niveau marin

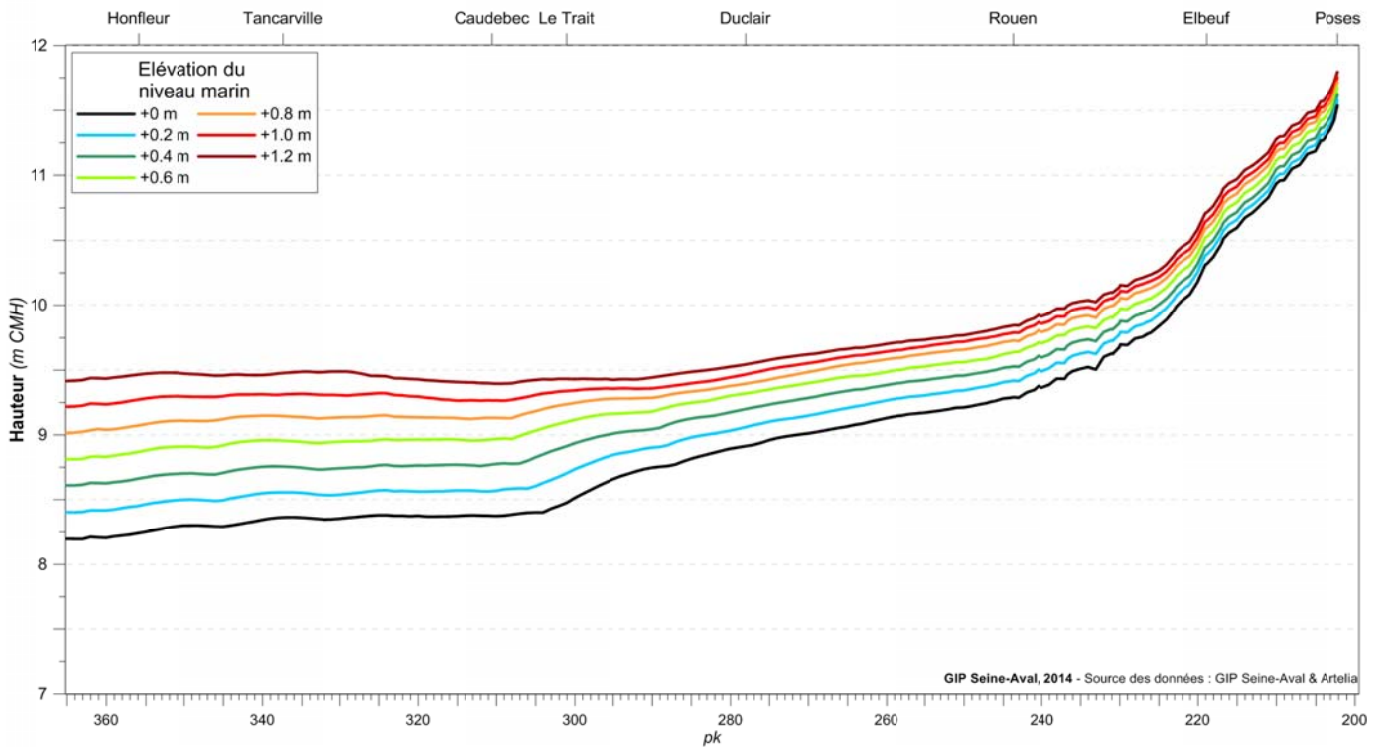
Débit de la Seine à Pcses : 1800m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, Coefficient de marée = 78



### b) Coefficient 106

#### Ligne d'eau maximale dans le lit mineur de l'estuaire de la Seine pour différentes élévations du niveau marin

Débit de la Seine à Poses : 1800m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, Coefficient de marée = 106

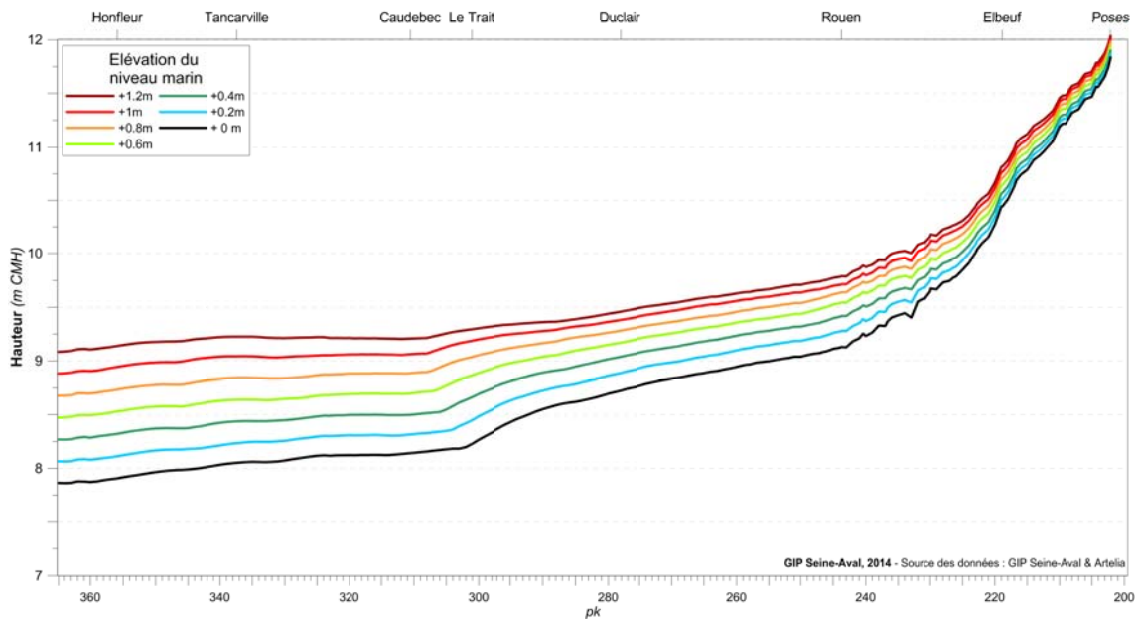


## I. 2000 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>

### a) Coefficient 78

#### Ligne d'eau maximale dans le lit mineur de l'estuaire de la Seine pour différentes élévations du niveau marin

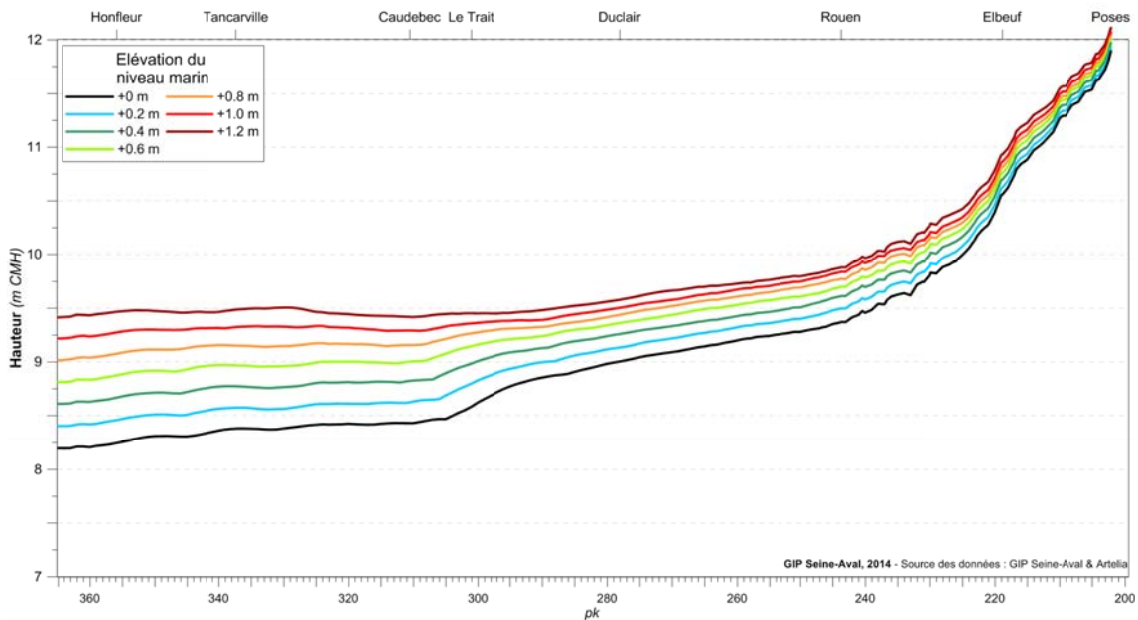
Débit de la Seine à Poses : 2000m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, Coefficient de marée = 78



### b) Coefficient 106

#### Ligne d'eau maximale dans le lit mineur de l'estuaire de la Seine pour différentes élévations du niveau marin

Débit de la Seine à Poses : 2000m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, Coefficient de marée = 106





En cas d'utilisation de données ou d'éléments de ce rapport, il doit être cité sous la forme suivante :  
**Lemoine J.P, 2015.** Analyse par modélisation de l'impact de l'élévation du niveau marin sur les niveaux de pleine mer dans l'estuaire de la Seine. 34p.

Le GIP Seine-Aval ne saurait être tenu responsable d'évènements pouvant résulter de l'utilisation et de l'interprétation des informations mises à disposition.

Pour tout renseignement, veuillez contacter le GIP Seine-Aval : [gipsa@seine-aval.fr](mailto:gipsa@seine-aval.fr)

Le GIP Seine-Aval est financé par :

