

LES NIVEAUX D'EAU EN ESTUAIRE DE SEINE: RISQUE INONDATION ET CHANGEMENT CLIMATIQUE





LES NIVEAUX D'EAU EN ESTUAIRE DE SEINE : RISQUE INONDATION ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

AUTEURS

C. Fisson¹ & J.P. Lemoine¹

CONTRIBUTEURS

A. Duflot², S. Piney³

FÉVRIER 2016

(1) GIP Seine-Aval

(2) DREAL Normandie - Service Risques - Bureau des Risques Naturels

(3) DREAL Normandie - Service Ressources Naturelles - Bureau de l'Hydrologie, de l'Hydrométrie et de la Prédiction des Crues

Sommaire

■ INTRODUCTION	5
I HISTORIQUE DES INONDATIONS ET TYPOLOGIE	6
A Connaissance des inondations historiques	6
Encart n° 1 Informations historiques: collecte et limites	
B Événements de type fluvial	10
C Événements de type maritime	11
D Événements de type fluvio-maritime	12
II DÉFINITION DES PÉRIODES DE RETOUR	14
A Périodes de retour associées aux niveaux d'eau	14
Encart n° 2 La prévision des crues de la Seine	
Encart n° 3 Les aménagements sur la Seine	
B Périodes de retour associés aux forçages	18
C Périodes de retour associées aux événements	20
III NIVEAUX D'EAU POUR LA GESTION DU RISQUE INONDATION	21
A Niveaux de référence pour l'application de la Directive Inondation	21
Encart n° 4 EPRI, TRI, SNGRI, PGRI, SLGRI : mise en œuvre de la Directive inondation.	
B Modélisation de scénarios de hautes-eaux	23
Encart n° 5 Le modèle des niveaux d'eau estuaire de Seine.	
C Dynamique des débordements	28
IV EFFETS PRÉVISIBLES LIÉS AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES	30
A Impact sur les forçages	30
Encart n° 6 SONEI : un suivi du niveau de la mer	
B Impact de l'élévation du niveau marin	32
Encart n° 7 Scénarios simulés pour évaluer l'impact de l'élévation du niveau marin	
Encart n° 8 Contribution du GIP Seine-Aval à la gestion du risque inondation	
■ CONCLUSION	37
■ ABRÉVIATIONS	39
■ GLOSSAIRE	40
■ BIBLIOGRAPHIE	41
■ TABLES DES ILLUSTRATIONS	43
Liste des figures	43
Liste des tableaux	44

INTRODUCTION

Le risque* inondation correspond à la rencontre, sur un même espace, d'un aléa* et d'enjeux* humains, économiques ou environnementaux. Dans l'estuaire de la Seine, les inondations* répondent à des causalités variées aux temporalités plus ou moins rapides : montée lente des eaux avec des inondations par débordement du cours d'eau suite à une crue* ou par remontée de nappe ; montée rapide des eaux avec des inondations par submersion marine liée à de violentes tempêtes ou par ruissellement lié à de très forts orages. De nombreuses communes riveraines de l'estuaire de la Seine sont ainsi soumises au risque inondation et l'histoire témoigne de leur récurrence. 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) sont en effet sous l'influence de différents facteurs naturels :

- i) l'hydrologie, notamment le débit de la Seine, de ses affluents et le niveau des nappes ;
- ii) l'astronomie, avec la marée et sa propagation ;
- iii) les surcotes* océaniques et estuariennes liées à des phénomènes météorologiques (vent, pression atmosphérique). 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. Leur combinaison déterminera la typologie des inondations, qui présentent une dynamique mixte marine/continentale [El Abida *et al.*, 2010].

La vulnérabilité* aux aléas 'débordement', 'ruissellement' et 'submersion marine', ainsi que la présence de forts enjeux (santé humaine, activité économique, patrimoine culturel et environnement) sur les unités urbaines de Rouen-Louviers-Barentin et du Havre ont guidé le choix du législateur pour les sélectionner comme Territoire à Risque Important d'inondation dans le cadre de l'application de la Directive Inondation [MEDTL, 2011]. En complément de la mise en

œuvre de cette Directive, de nombreux autres dispositifs réglementaires complètent l'action des acteurs de l'estuaire en prévention ou en réponse aux inondations : Plans de Prévention des Risques Inondations, Plans de Prévention des Risques Littoraux, études de dangers des barrages et des digues, dossiers 'Loi sur l'eau', etc. Pour aider à la mise en cohérence de l'ensemble de ces travaux et intégrer au mieux les spécificités estuariennes dans la gestion du risque inondation sur l'estuaire de la Seine, le GIP Seine-Aval a piloté une étude 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 (maîtrise d'œuvre : ARTELIA) [Fisson *et al.*, 2014].

Le présent fascicule regroupe les éléments de connaissance mobilisables par les acteurs concernés par la gestion des inondations en estuaire de Seine. Il s'articule autour de quatre axes déterminants pour une bonne appréhension de cette problématique, à savoir :

- 1) la description des inondations historiques et la définition d'une typologie des événements selon les paramètres déclencheurs ;
- 2) la mobilisation des observations hydro-météorologiques pour le calcul des périodes de retours*, que ce soit pour les niveaux d'eaux en différents points de l'estuaire, les principaux forçages* responsables des inondations (débits fluviaux, niveaux marins, surcotes océaniques, surcotes estuariennes) ou les événements (niveau d'eau atteint) ;
- 3) la définition de niveaux d'eau de référence pour la gestion des inondations, qu'ils soient associés à des événements historiques ou à la simulation de scénarios théoriques ;
- 4) la synthèse des connaissances sur les effets prévisibles liés aux changements climatiques, avec un focus sur l'impact lié à l'élévation du niveau marin.

I HISTORIQUE DES INONDATIONS ET TYPOLOGIE



La description des événements historiques (forçages, niveaux d'eau atteints, dégâts,...) est une source privilégiée pour caractériser et comprendre les phénomènes responsables de l'aléa inondation. En estuaire de Seine, une riche documentation est disponible et sa mobilisation permet, au-delà de la description des événements, de définir une typologie des inondations. Cette connaissance permet d'apporter un cadre robuste à la gestion du risque inondation sur ce territoire, via la caractérisation des différents événements de hautes-eaux pouvant déclencher des inondations.

A. CONNAISSANCE DES INONDATIONS HISTORIQUES

La première inondation désastreuse dans l'estuaire de la Seine est signalée dans des chroniques de février 584. Des inondations en bord de Seine sont ensuite régulièrement mentionnées dans les archives à partir du ^{xii}^e et surtout du ^{xiii}^e siècle. À l'embouchure de la Seine, le premier récit d'inondation par la mer est postérieur de 10 ans à la fondation de la ville du Havre en 1525 et de nombreuses archives témoignent également de cette récurrence. **Ces témoignages historiques montrent que les inondations et les submersions ne sont pas des événements exceptionnels**, d'autant que les chroniques anciennes retiennent essentiellement les événements marquants et que les enjeux étaient moins présents qu'aujourd'hui. Pendant plusieurs siècles, la vallée de la Seine et son embouchure ont été le théâtre d'événements hydrologiques et marins mettant les populations riveraines en grandes difficultés. Les dégâts engendrés par les inondations sont nombreux et causent souvent l'arrêt de l'activité économique, la destruction des éléments faisant obstacle au fleuve tels les ponts de bois et les maisons. Elles

peuvent provoquer la ruine de récoltes, amenant la famine [El Abida *et al.*, 2010]. En lien avec les tempêtes, le péril était grand pour les marins et de nombreux dommages, parfois irrémédiables, étaient provoqués sur les embarcations, les cargaisons et le matériel de pêche, ainsi que sur les ouvrages et aménagements portuaires [Gras & Garnier, 2013].

Si les grandes crues sont rares, l'importance des dégâts justifie leur documentation relativement précise (niveau d'eau, conditions de déclenchement, conséquences,...) [Encart n° 1 – Informations historiques: collecte et limites]. Le plus haut niveau atteint à Rouen consigné dans les archives date de février 1658, avec 11,88 m CMH* au repère de crue situé sur le pilier sud-ouest de la chapelle Sainte Catherine de Grammont à Rouen, en rive gauche [FIGURE 1]. Au ^{xviii}^e siècle, la crue de décembre 1740 a atteint 11,48 m CMH à Rouen. Au ^{xix}^e siècle, le « coup de mer » de novembre 1810 a entraîné une hauteur d'eau de 10,04 m CMH à Rouen. Puis au ^{xx}^e siècle, deux crues ont encore dépassé les 10 m CMH à Rouen : janvier 1910 et janvier 1920. Depuis 1920, la Seine

n'a plus connu de crue d'une telle ampleur, le bassin de la Seine n'ayant pas subi durant cette même période d'événements pluviométriques et hydrologiques d'intensité extrême. Sur cette période, des tempêtes ont cependant généré des niveaux d'eau importants à l'aval de Rouen, telle la tempête Lothar du 25 décembre 1999 (9,54 m CMH à Duclair, soit le niveau le plus élevé depuis 1876 sur ce secteur) [DREAL-HN, 2014].

L'embouchure de la Seine, et plus généralement les côtes normandes, présentent une vulnérabilité historique vis-à-vis des submersions marines. Plusieurs inventaires font état de ces événements et les relient aux conditions océaniques et météorologiques. Entre 1750 et 1938, ce sont

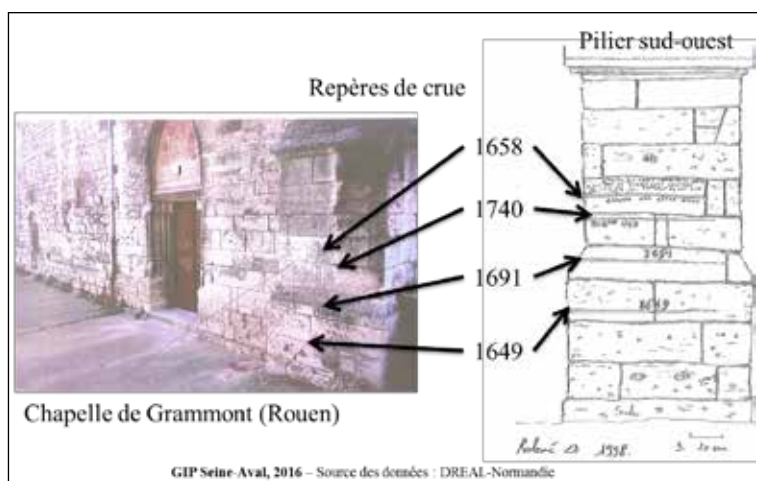


FIGURE 1 Repères de crue sur le pilier sud-ouest de la chapelle Ste Catherine de Grammont (Rouen).

ENCART N° 1

Informations historiques : collecte et limites

Se tourner vers le passé pour enrichir notre connaissance et notre compréhension des phénomènes récurrents, comme les inondations ou les tempêtes, est une source d'information irremplaçable. Pour y accéder et en disposer de manière pertinente, une large recherche des sources anciennes et une analyse critique des données récoltées doit être menée. Pour mener à bien une telle collecte d'information, la première question est celle de l'**unité géographique** à considérer. En effet, selon si l'on considère une ville, un linéaire côtier ou un bassin versant, la quantité de sources à explorer sera plus ou moins importante et diversifiée. La **période** à considérer (un événement précis, la dernière décennie, le dernier siècle, ou plus large encore) est un autre élément clé de la recherche et conditionnera les sources documentaires à explorer. Pour les événements les plus récents (quelques décennies), l'essentielle de la documentation est disponible dans les services administratifs en charge de l'observation hydrométéorologique, de la gestion des cours d'eau ou de la prévention du risque [FIGURE A]. Pour les événements plus anciens, les fonds d'archives publics ou privés, les articles de presse, les études scientifiques et techniques,... seront les sources à privilégier. Le caractère commun aux recherches documentaires qui peuvent être menées est le **grand nombre et la diversité des informations accessibles** (données, rapports, témoignages, études, cartographies, articles,...). Elles couvrent essentiellement les 200 ou 300 dernières années et les zones qui concentrent les enjeux humains et économiques. Enfin, selon l'information recherchée (conditions déclenchantes, intensité de l'inondation, dégâts occasionnés, gestion de l'événement,...) et le niveau de précision voulu (information qualitative ou quantitative), l'analyse critique des données sera plus ou moins poussée [Cœur, 2012].

Les politiques de gestion actuelle concernant les inondations et les submersions (Directive inondation, PPRI et PPRL,...) **donnent une place importante à la prise en compte des événements passés**, que ce soit pour i) documenter le champ des possibles ; ii) mieux comprendre le déclenchement et la dynamique des événements ou ; iii) tirer des enseignements par l'analyse des retours d'expérience. Un effort conséquent de compilation et d'analyse critique des données anciennes

a ainsi été mené ces dernières années [MEDDE-DGPR & IRSTEA, 2015 ; MEDTL, 2011]. Les informations compilées sur l'estuaire de la Seine sont ainsi nombreuses [GIP Seine-Aval et al., 2013 ; Gras & Garnier, 2013 ; Letortu, 2013] et sont reprises dans le présent fascicule.

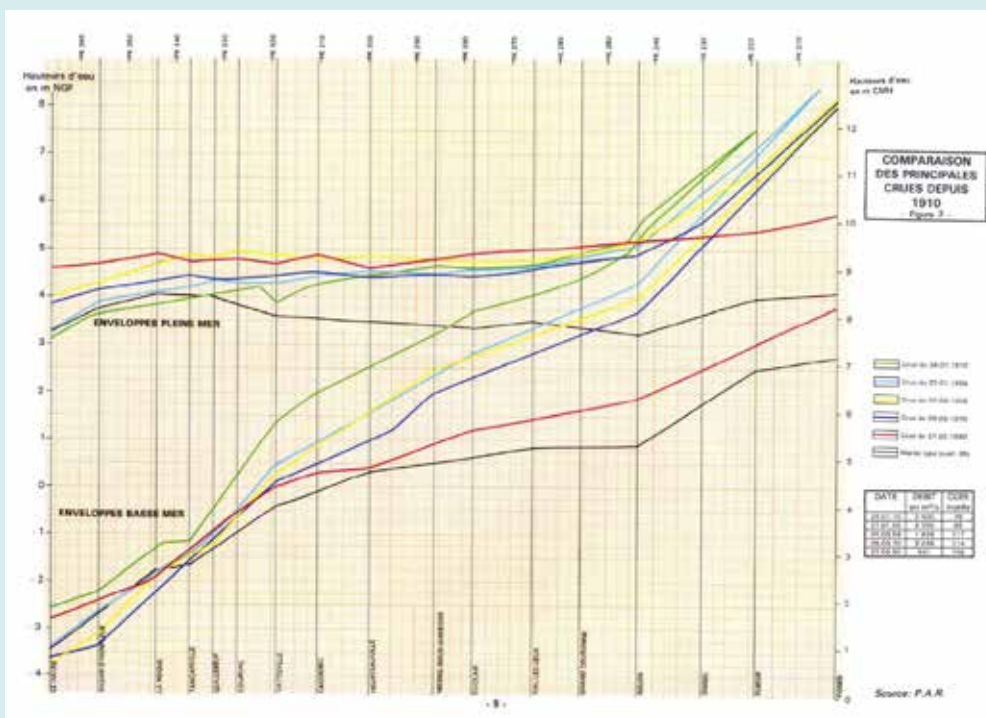


FIGURE A Comparaison des enveloppes de crues du xx^e siècle [DDE76, 1992].



FIGURE 2 Répartition du nombre de coups de vents (et parfois inondations consécutives) engendrant des dégâts (de 1750 à 1940).

75 coups de vents égaux ou supérieurs à 6 sur l'échelle de Beaufort qui ont été répertoriés et documentés dans l'estuaire de la Seine [FIGURE 2]. Des tempêtes parfois extrêmement violentes (force 11 ou 12) sont ainsi rapportées, comme en novembre 1810, décembre 1810, fin février/début mars 1869, septembre 1869, mars 1876, janvier 1899, octobre 1924, décembre 1929 ou janvier 1938. La prédominance des villes havraises et rouennaises dans les archives s'explique par la densité de population et d'activité plus importante qui, de fait, implique plus de dégâts que dans les autres communes de bord de Seine. Les mentions de tempêtes sont nombreuses sur le littoral et à l'embouchure de

la Seine et s'atténuent en remontant l'estuaire du fait i) de la réduction de l'activité fluviale et maritime vers l'amont et ii) d'une possible conjonction des tempêtes avec des marées de vives eaux [Gras & Garnier, 2013].

À l'échelle de la Manche orientale, 78 submersions marines sont recensées entre 1949 et 2010, dont 48 de gravité sévère (une submersion dite 'sévere' pousse les eaux à l'intérieur d'une commune et y provoque des dégâts relevant de l'état de catastrophe naturelle) [FIGURE 3]. Ces phénomènes sont récurrents et présentent une grande variabilité

interannuelle, même si la période 1967-1990 fut marquée par une multiplication d'événements parfois sévères et la période postérieure à 2000 par un nombre moindre de submersions. La façade seino-marine est ainsi particulièrement exposée à l'aléa submersion, avec certaines communes plus touchées: Mers-les-Bains, Dieppe, Criel-sur-Mer, Quiberville, Hautot-sur-Mer, Étretat, Fécamp et Le Tréport [Letortu et al., 2012 ; Letortu, 2013]. Au Havre, les plus hauts niveaux atteints répertoriés sont relativement récents: 9,30 m CMH (14 décembre 1981), 9,25 m CMH (24 novembre 1984), 9,33 m CMH (27 février 1990), 8,92 m CMH (3 janvier 1999), 9,13 m CMH (11 décembre 2004) [DDTM76, 2014].

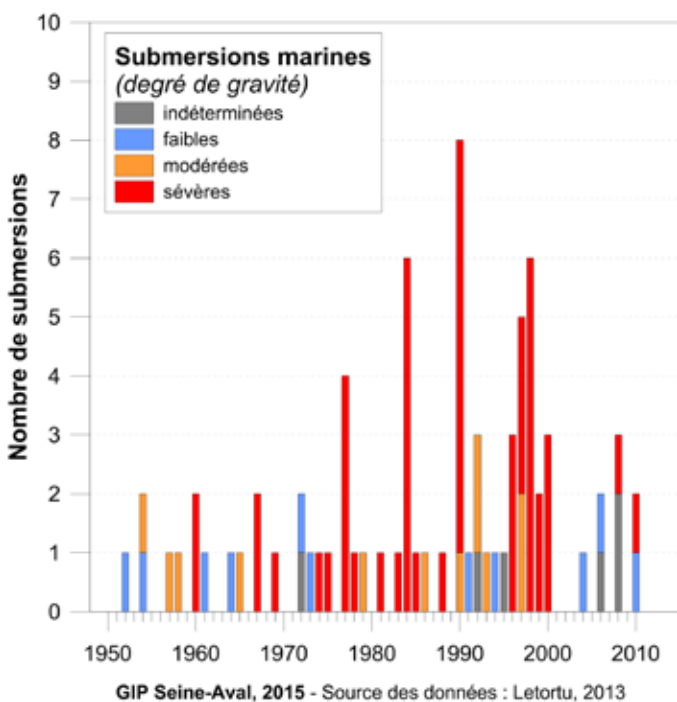


FIGURE 3 Submersions marines recensées entre Le Havre et la baie de Somme, de 1950 à 2010.

Pour alimenter la réflexion, les principales inondations historiques documentées dans l'estuaire de la Seine ont été bancarisées (32 événements) [GIP Seine-Aval et al., 2013]. Les informations compilées reprennent i) une description de l'événement (phénomènes générateurs des hauts niveaux d'eau observés, temps de retour associé à l'événement) ; ii) les caractéristiques hydrométéorologiques de déclenchement (débits de la Seine, de l'Eure et de la Risle ; coefficient de marée ; vitesse et direction du vent ; surcote) et iii) les niveaux d'eau atteints le long de l'estuaire [TABLEAU I]. L'analyse de ces données historiques (conditions de déclenchement et niveaux d'eau atteints le long de l'estuaire) fait apparaître une typologie des événements qui sera détaillée dans la suite du fascicule: événements de type fluvial, maritime et fluvio-maritime [FIGURE 4 ; ARTELIA & GIP Seine-Aval, 2013a]. Cette compilation de données a notamment contribué à améliorer la connaissance de l'aléa 'inondation' en estuaire de Seine et a apporté une aide pour fixer des niveaux de référence utiles pour la gestion de ce risque.

TABLEAU I Caractéristiques des principales inondations historiques dans l'estuaire de la Seine.

Événement	Date du maximum de la crue à Rouen	Coefficient de marée	Débit à Poses (m ³ /s)	Vent (km/h)	Pression atmosphérique (hPa)	Cote atteinte à Rouen (m CMH)	Cote atteinte au Havre (m CMH)	Surcote à l'embouchure (m)
Février 1658	xx/02/1658					11,92		
Décembre 1740	xx/12/1740					11,48		
Novembre 1810	10-11/11/1810			S-SW		10,04		
Février 1850	xx/02/1850					9,89		
Mars 1876	xx/03/1876					9,94		
Janvier 1883	xx/01/1883					9,70		
Janvier 1890	23/01/1890			W			9,15	
Jan/Fév 1910	1/29/1910	78	2670 - 3500*		1003	10,05	7,45	
Janvier 1920	1/9/1920	98	2280			10,05	8,50	
Janvier 1930	1/12/1930							
Janvier 1955	1/27/1955	92	2250			9,53	7,68	
Mars 1958	3/7/1958	117	1940			9,58	8,40	
Mars 1970	3/9/1970	114	2038			9,38	8,26	
Mars 1978	3/26/1978	101	1540			9,25	8,36	
Mars 1979	3/29/1979	113	1280			9,33	8,49	
Mars 1980	3/18/1980	118	790			9,16	8,43	
Décembre 1981	12/14/1981	99	1170			9,41	8,96	
Janvier 1982	1/11/1982	100	1760			9,38	8,27	
Janvier 1983	1/30/1983	105	680			9,30	9,05	
Novembre 1984	11/24/1984	100	760			9,55	9,25	1,40
Février 1988	2/19/1988	112	1712	NE - 25	1028	9,63	8,36	
Février 1990	2/27/1990	106	641	SO - 79	1004	9,64	9,33	
Janvier 1994	27-28/01/1994	99	1372			9,48	8,52	
Février 1995	01-02/02/1995	104	2080	SO - 47	1015	9,69	8,50	
Janvier 1999	1/3/1999	100	626	108		9,51	8,92	
Décembre 1999	12/25/1999	104	1379	SO - 79	993	9,91	8,84	
Mars 2001	3/28/2001	89	2280	S - 29	996	9,60	7,98	
Fév/mars 2002	2/28/2002	111	1563	SO - 43	1004	9,72		
Décembre 2004	12/17/2004	71	300	140	990	8,38	8,69	1,37
Mars 2008	10-11/03/2008	106	579		975	9,12	8,80	
Février 2010	2/28/2010	102	800	O - 100		9,33		0,87
Février 2013	2/11/2013	106	1600		995	9,38	8,39	

Événement fluvial

Événement fluvio-maritime

Événement maritime

* Bien que très étudiée, l'estimation de la valeur du débit de la Seine pour la crue de 1910 est très discutée et les différentes estimations proposées diffèrent nettement [Goutx & Lacaze, 2008 ; Lacaze et al., 2013 ; Nouailhac-Pioch M. & Mailler M., 1910]

GIP Seine-Aval, 2015 - Source des données :

ARTELIA & GIP Seine-Aval, 2013a

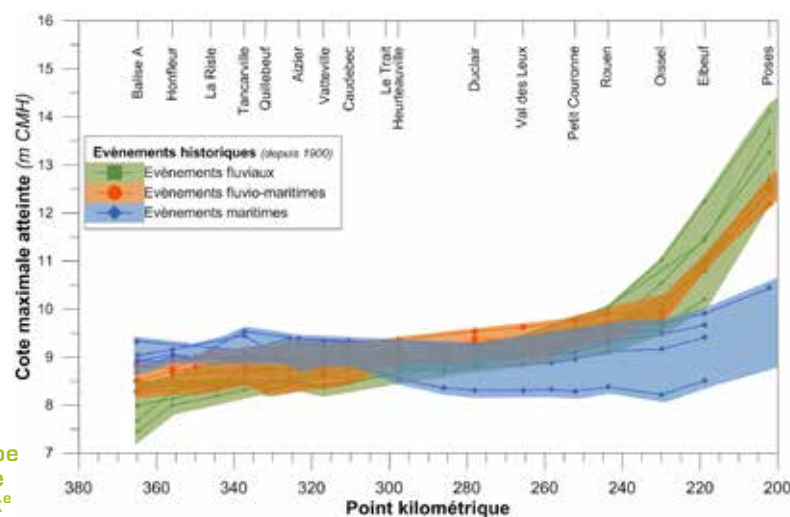


FIGURE 4 Enveloppe des événements de hautes-eaux des xx^e et xxi^e siècles.

GIP Seine-Aval, 2015 - Source des données : CODAH, DREAL-HN, GIP SEINE-AVAL, GPMH, GPMR, ORMES, SHOM

B. ÉVÉNEMENTS DE TYPE FLUVIAL

Les événements de type fluvial sont engendrés par une crue de la Seine faisant suite à des pluies longues, régulières et généralisées sur toute l'étendue du bassin versant amont de la Seine. Ils peuvent être renforcés par des conditions météorologiques défavorables et soutenus par des forts coefficients de marée. Les événements de type fluvial se produisent généralement en hiver et début de printemps, avec une occurrence plus marquée en janvier et février (respectivement 30 % et 24 % des crues). Ils impactent les niveaux d'eau à l'amont de l'estuaire, entre Poses et Val-des-Leux/Duclair, avec une durée de submersion pouvant atteindre plusieurs semaines. Les principaux événements rapportés sont liés aux crues de 1740, 1876, 1910, 1920, 1955, 1958, 1970, 1978, 1988, 2001 et 2013. Les niveaux atteints en Seine dépassent les 10 m CMH, voire 11 m CMH à Rouen, avec une ligne d'eau qui s'accroît fortement en amont de ce point. En aval de Rouen, la ligne d'eau maximale passe rapidement sous les 9 m CMH [ARTELIA & GIP Seine-Aval, 2013a].

L'inondation de mars 2001 est un bon exemple d'un événement fluvial, avec un fort débit de la Seine conjugué

à des conditions météorologiques et marines défavorables [FIGURE 5]. À partir du 23 mars 2001, de fortes dépressions conjuguées à de forts vents initialisent le débordement des berges à Rouen. Le 26 mars, alors que la marée de vives eaux augmente en intensité, la cote atteinte sur les berges à Rouen reste constante autour de 9,50 m CMH à pleine mer. Le 28 mars, le débit est à son maximum avec 2 280 m³/s et coïncide avec une dépression, de forts vents orientés sud et des marées de vives eaux. Ces conditions provoquent une augmentation supplémentaire des niveaux d'eau, avec un maximum atteint à Rouen de 9,60 m CMH, dont 1,80 m de surcote. Ce n'est que le 30 mars que le niveau d'eau à pleine mer se retrouve sous le niveau des berges de Rouen. Malgré un fort débit de la Seine durant cet événement, il n'y a pas eu d'inondation continue : à chaque cycle de marée la cote repassait sous les 9,20 m CMH et les débordements n'ont eu lieu que pour des coefficients de marée supérieurs à 75. Cet événement est mémorable du fait de sa persistance (28 jours de débordement à Rouen) et du grand nombre de communes touchées, notamment à cause des remontées de nappes de la rive gauche à l'amont de Rouen [El Abida et al., 2010].

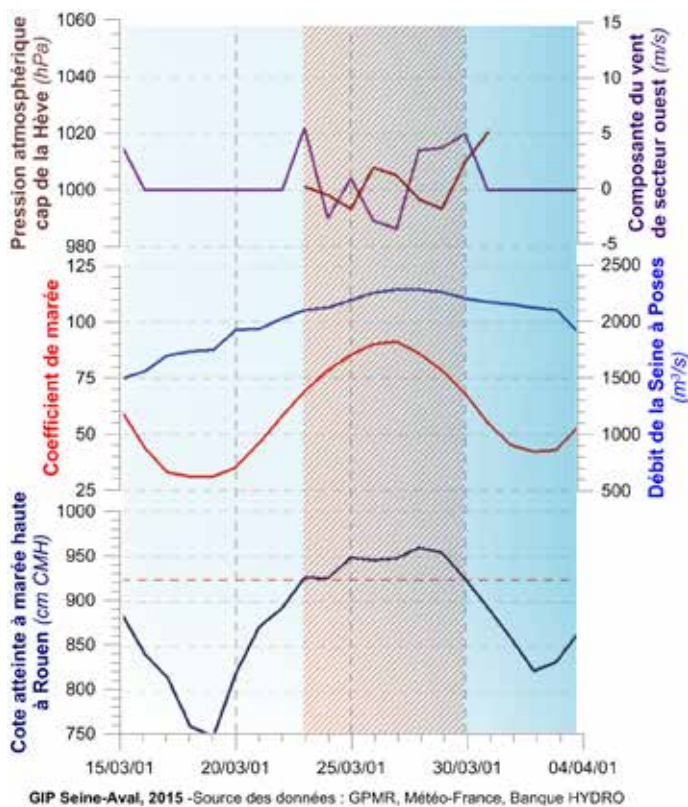


FIGURE 5 Chronique de l'inondation de mars 2001 à Rouen.

C. ÉVÉNEMENTS DE TYPE MARITIME

Les événements de type maritime sont assimilés à des tempêtes et engendrés par des phénomènes météorologiques de forte intensité (vent, pression atmosphérique). La force et la direction des vents peuvent engendrer des surcotes, mais ne sont cependant pas des facteurs suffisants pour déclencher une inondation ou une submersion marine. Le coefficient de marée et la conjonction de la tempête avec le moment de la marée sont les éléments déterminants les niveaux d'eau plus ou moins importants atteints. Le long de la Seine, ces événements impactent directement les niveaux d'eau jusqu'à Heurteville, même s'ils peuvent avoir une influence significative jusqu'à Rouen. À l'embouchure et sur le littoral, les événements de type maritime peuvent être responsables de submersions [FIGURE 4]. La zone havraise est documentée pour des événements de ce type, avec des niveaux d'eau atteint au Havre associés à des événements relativement récents : tempête de février 1990, janvier 1999 et février 2010 avec des niveaux atteints respectivement de 9,33 m, 8,92 m et 8,85 m CMH [FIGURE 6 ; ARTELIA & GIP Seine-Aval, 2013a].

La succession de tempêtes en février et mars 1990 est un bon exemple d'un événement maritime, avec des conditions météorologiques défavorables associées à des forts coefficients de marée, engendrant des submersions marines (11, 27, 27 et 28 février) et des inondations dans l'estuaire (26 février – 1^{er} mars). Le détail des conditions météorologiques associées à la submersion du 11 février met en évidence la présence d'un front froid, dit anafont*. La concomitance entre des dépressions (1004hPa), des vents violents de secteur sud-ouest (pointes supérieures à 130 km/h) et une marée de vives eaux (coefficient 106) engendre le niveau d'eau le plus élevé jamais enregistré au Havre : 9,33 m CMH, dont 1 m de surcote [Caspar *et al.*, 2007]. Bien que moindres qu'à l'embouchure, ces événements tempétueux ont des répercussions jusqu'à Rouen, où la Seine déborde le 25 février 1990, malgré une diminution du débit. Le 27 février, la météo ne s'améliore pas et les plus basses pressions atmosphériques coïncident avec une marée de vive-eau d'un coefficient 106, maintenant les débordements. C'est entre le 1^{er} et le 2 mars, que les conditions météorologiques permettent la diminution du niveau d'eau à Rouen [FIGURE 7 ; El Abida *et al.*, 2010].

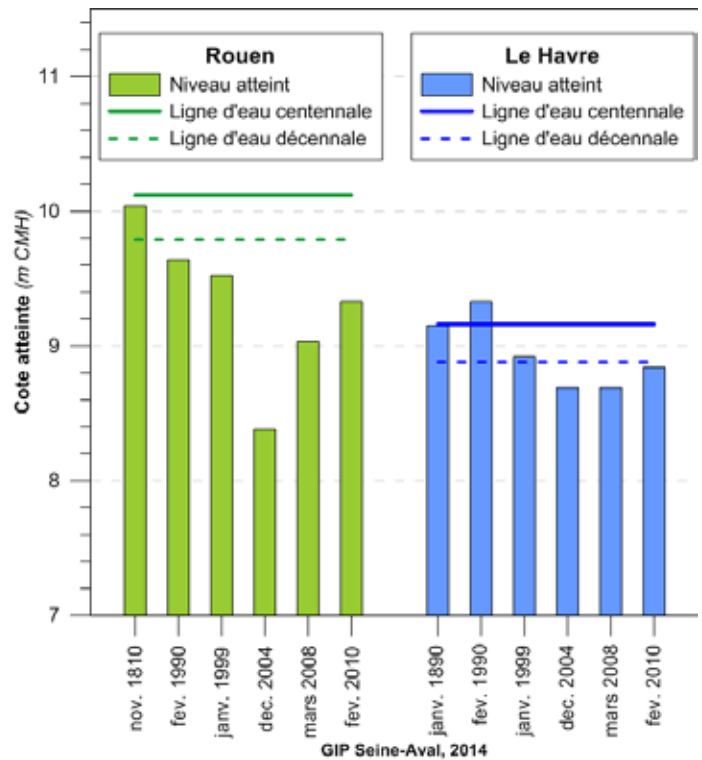


FIGURE 6 Niveau d'eau atteint à Rouen et au Havre pour les principaux événements maritimes.

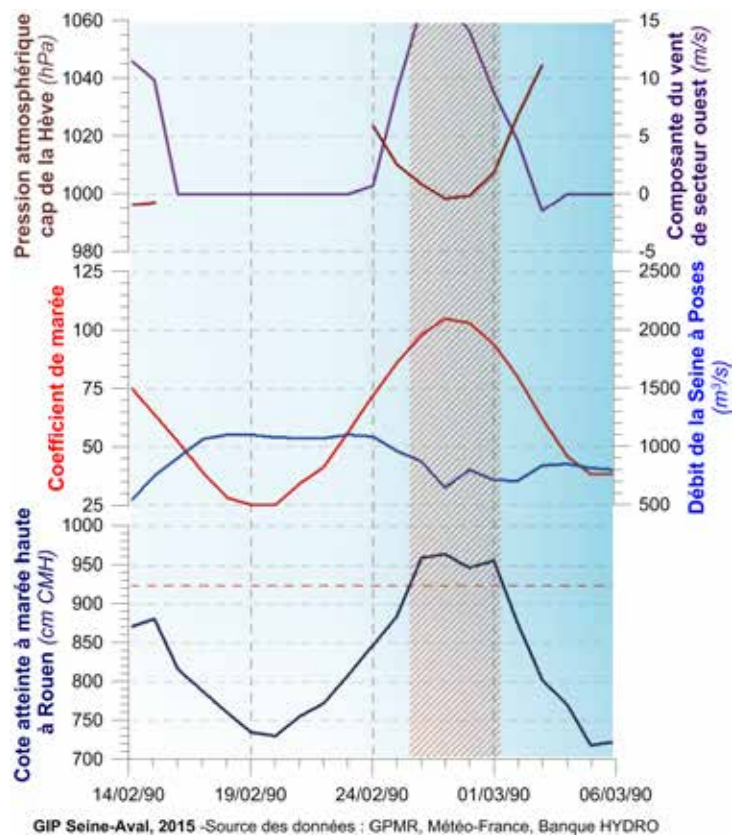


FIGURE 7 Chronique de l'inondation de février/mars 1990 à Rouen.

D. ÉVÉNEMENTS DE TYPE FLUVIO-MARITIME

Les événements fluvio-maritimes sont liés à la fois à un débit important de la Seine et à une tempête. Ils peuvent impacter tout l'estuaire de la Seine. Ces événements présentent des conditions de déclenchement qui ne sont pas marquées par un seul forçage (crue ou tempête), mais par une combinaison de conditions défavorables. Les niveaux d'eau atteints en Seine sont ainsi moins élevés à l'amont de Rouen comparativement à un événement de type fluvial ; et à l'aval de Heurteville comparativement à un événement de type maritime [FIGURE 4]. Ce sont des événements dont les conditions de déclenchement peuvent être qualifiées d'intermédiaires, à l'image des inondations rapportées en 1982, 1994, 1995, décembre 1999, 2002 [ARTELIA & GIP Seine-Aval, 2013a].

L'événement de janvier/février 1995 est un bon exemple d'événement fluvio-maritime, avec des débordements à Rouen que des conditions marines ou fluviales défavorables n'auraient pas pu déclencher seules. Le 23 janvier 1995, les rouennais échappent de justesse à une inondation provoquée par une dépression (1000hPa), accompagnée d'un vent fort d'orientation sud-ouest. Le débordement ne se produit pas du fait d'un faible coefficient de marée (65). Le 29 janvier, l'eau commence à déborder sur les quais de Rouen, pour atteindre le 1^{er} février la hauteur de 9,68 m CMH. Le débit maximum atteint est de 2074 m³/s, en synchronisation avec une marée de vives eaux de coefficient 106 [FIGURE 8 ; El Abida et al., 2010].

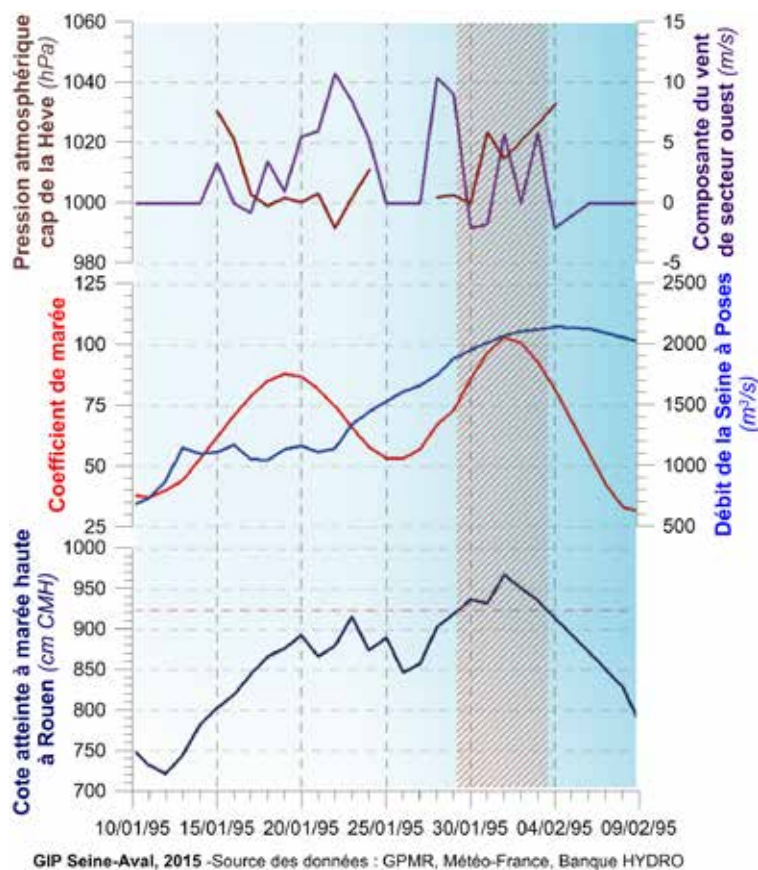
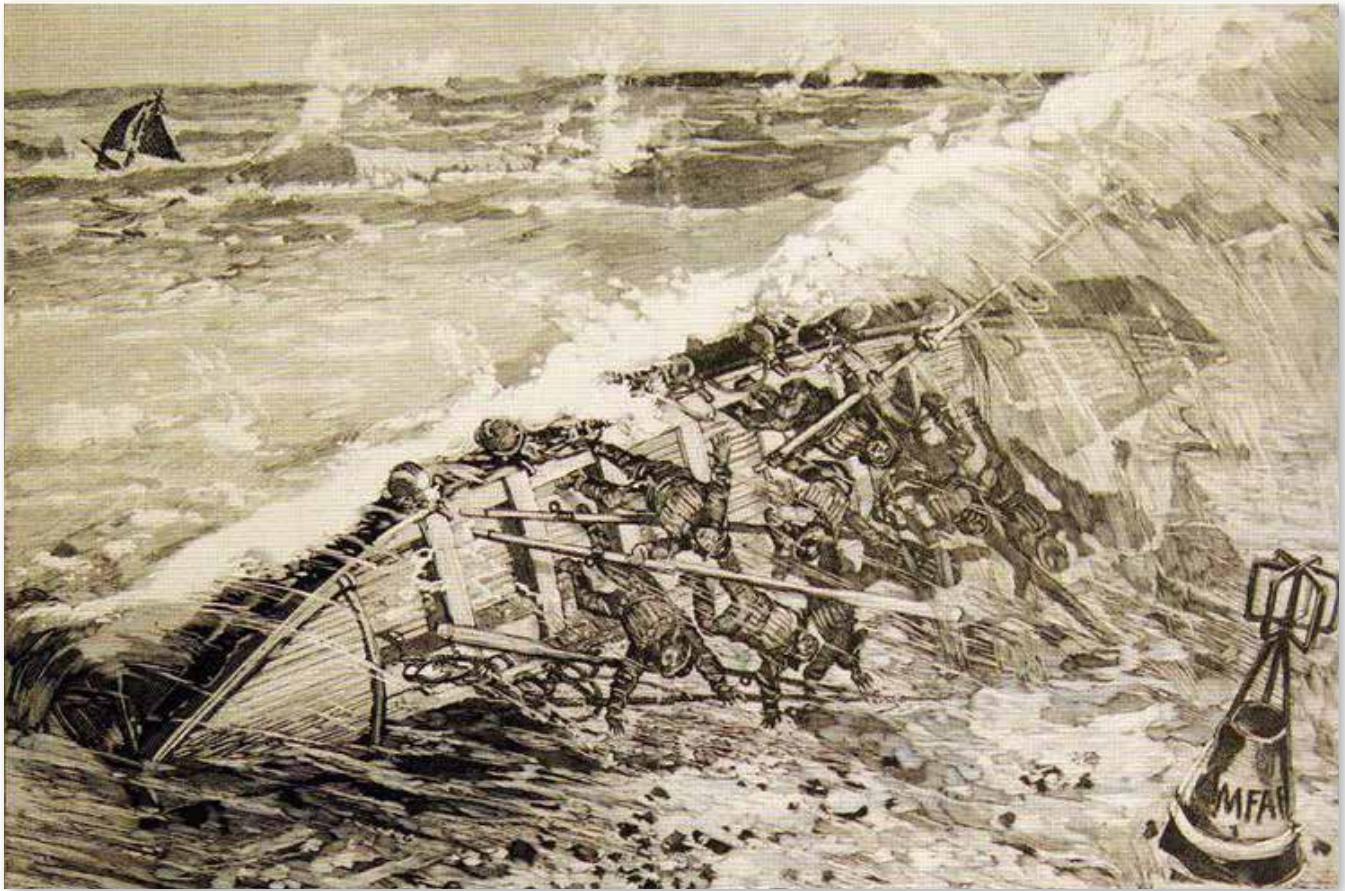


FIGURE 8 Chronique de l'inondation de janvier/février 1995 à Rouen.



Source : DDTM76



Le drame du banc d'Amfard - source : *Le monde illustré*, 8 avril 1882.

Le 26 mars 1882, les 11 lamaneurs sortis secourir un navire en détresse ont péri emportés par la mer.

II DÉFINITION DES PÉRIODES DE RETOUR



Utilisées pour caractériser les risques naturels, les périodes de retour* servent à quantifier de manière statistique le temps entre deux occurrences d'un événement naturel d'une intensité donnée. Dans le cadre de la gestion du risque inondation, elles servent de base de connaissance pour caractériser et quantifier l'aléa. Pour l'estuaire de la Seine, cela concerne à la fois les occurrences des niveaux d'eau atteints en Seine et les forçages hydro-météorologiques qui déterminent ces niveaux (débit de la Seine et de ses affluents, coefficient de marée, vent et pression atmosphérique).

A. PÉRIODES DE RETOUR ASSOCIÉES AUX NIVEAUX D'EAU

Le long de l'estuaire de la Seine, les niveaux d'eau sont suivis en continu par un réseau de 21 marégraphes de Poses à l'embouchure [FIGURE 9]. Les données issues des mesures à ces différents marégraphes ont un intérêt à la fois opérationnel et scientifique. Elles apportent une aide à la navigation, à la gestion des crues et des inondations [Encart n° 2 – La prévision des crues de la Seine.], ainsi qu'à la compréhension des variations des niveaux d'eau à différentes échelles temporelles (de la marée aux variations climatiques).

Pour calculer les périodes de retour des niveaux de pleine mer observés dans l'estuaire de la Seine, cinq stations réparties le

long de l'estuaire ont été choisies : Elbeuf (pk 218.8), Rouen (pk 243.7), Heurteville (pk 297.6), Tancarville (pk 337.8) et Balise A (pk 364.8) [FIGURE 9]. Un ajustement statistique a été réalisé sur les enregistrements marégraphiques des niveaux de pleine mer observés ces trente dernières années. Il permet d'obtenir une distribution probabiliste des niveaux de pleines mers [FIGURE 10]. Par exemple, le niveau d'eau de période de retour 10 ans est de 9,79 m CMH à Rouen, le niveau centennal au Havre de 9,16 m CMH et le niveau millénaire à Tancarville 10,30 m CMH.



FIGURE 9 Mesure des niveaux d'eau dans l'estuaire de la Seine.

ENCART N° 2

La prévision des crues de la Seine

La prévision des crues de la partie estuarienne de la Seine est assurée par le Service de Prévision des Crues Seine Aval et Côtiers Normands (SPC SACN), basé à la DREAL de Normandie. Ce service remplace depuis juillet 2006 les anciens Services d'Annonces de Crues. Au-delà de cette mission i) de vigilance et de prévisions relative aux crues pour 13 cours d'eau normands, ce service propose ii) une assistance aux collectivités dans le domaine de la prévision et de l'information sur les crues (mise en place de systèmes d'annonces de crues, de repères de crues) et iii) capitalise la connaissance sur les risques inondations relative aux cours d'eau de sa zone d'action.

Pour élaborer la prévision des crues de la Seine, de nombreuses données sont mobilisées : les cotes marines mesurées au droit de l'ensemble des 16 marégraphes de Seine (propriétés du GPMR), le débit mesuré et prévu sur la Seine (à Vernon) et sur l'Eure (à Louviers), les marées et les surcotes de pleine mer prévues, le vent (direction et force) et la pression prévus. Ces différentes informations permettent d'établir, via l'utilisation d'un modèle hydraulique développé au sein du SPC, des prévisions chiffrées pour les 3 prochains pics de pleine mer au droit des 16 marégraphes de Seine de Poses à Tancarville (bulletin publié sous Vigicrues dès le passage en vigilance). Elles permettent de définir un **niveau de vigilance** :

- **Rouge** à Risque de « crue » majeure. Menace directe et généralisée sur la sécurité des personnes et des biens
- **Orange** à Risque de « crue » génératrice de débordements importants susceptibles d'avoir un impact significatif sur la vie collective et la sécurité des biens et des personnes.
- **Jaune** à Risque de « crue » ou de montée rapide des eaux n'entraînant pas de dommages significatifs, mais nécessitant une vigilance particulière dans le cas d'activités saisonnières et/ou exposées.
- **Vert** à Pas de vigilance particulière requise

Ce niveau de vigilance est repris dans les bulletins de vigilance publiés deux fois par jour et diffusés simultanément aux acteurs de la sécurité civile par messagerie sécurisée, et aux médias et à la population via le site www.vigicrues.gouv.fr [FIGURE B]. Ce site permet également d'accéder aux données temps réel sur les stations de mesure existantes sur les cours d'eau et donc sur les marégraphes présents le long de l'estuaire de la Seine.

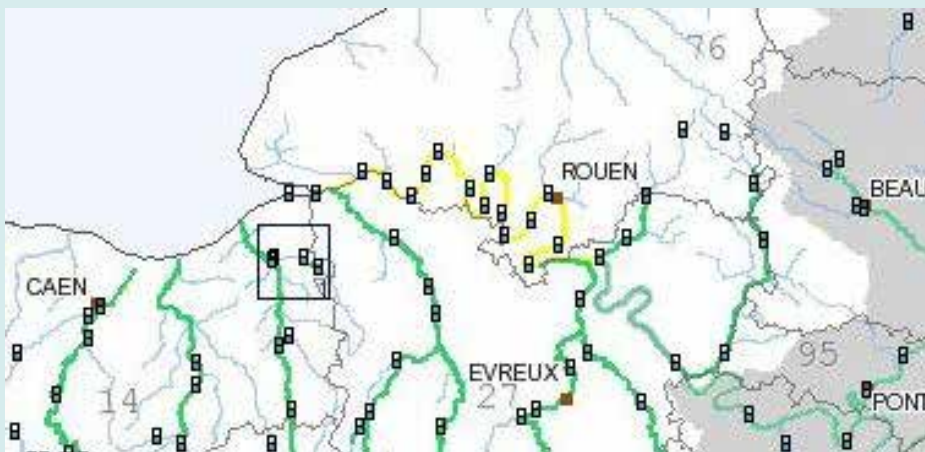
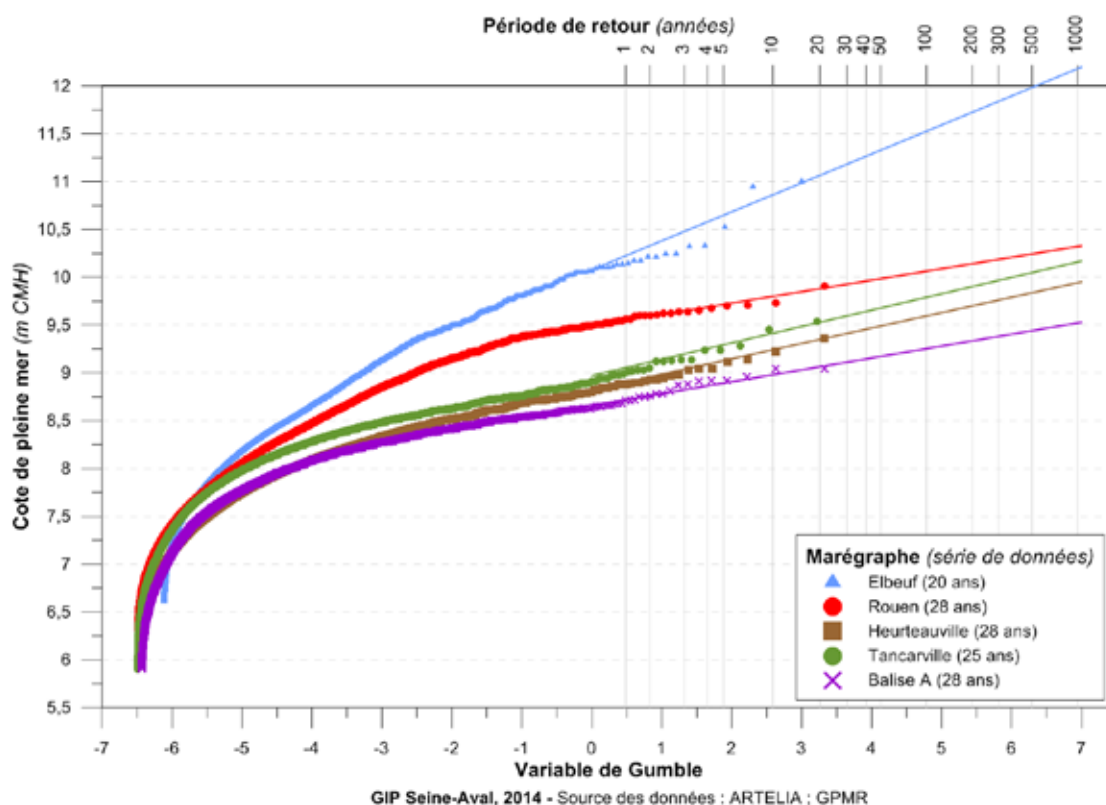


FIGURE B Carte de vigilance du 21 février 2015 à 16h00.

Les niveaux d'eau associés aux périodes de retour élevées sont cependant à considérer avec précaution, du fait d'une forte incertitude liée à la courte durée couverte par la série de données (30 ans) et de l'évolution du milieu depuis 250 ans [Foussard *et al.*, 2010]. En effet, la réponse de ce système à des mêmes conditions hydro-météorologiques évolue de manière concomitante i) aux modifications morphologiques subies par l'estuaire, ii) à l'aménagement de ses zones riveraines et iii) à l'évolution de la gestion des débits [Encart n° 3 - Les aménagements sur la Seine].



Période de retour (années)	Niveau d'eau* (cm CMH)				
	Le Havre	Tancarville	Heurteauville	Rouen	Elbeuf
1	864	886	890	948	1018
2	872	893	896	953	1028
5	883	917	916	969	1060
10	888	933	929	979	1081
20	903	948	942	989	1102
50	912	967	958	1002	1128
100	916	982	970	1012	1146
200	927	996	982	1021	1167
500	937	1015	998	1034	1193
1000	946	1030	1010	1044	1213

* ajustement statistique à une loi de Gumbel

FIGURE 10 Distribution probabiliste et période de retour des niveaux d'eau observés dans l'estuaire de la Seine à pleine mer.

ENCART N° 3

Les aménagements sur la Seine

Sur le bassin versant de la Seine, quatre grands **lacs réservoirs** ont été créés en amont de Paris entre 1949 et 1990 [FIGURE C]. Gérés par l'Établissement Public Territorial de Bassin « Seine Grands Lacs », ils ont une capacité cumulée de 810 millions de m³. Cette capacité de stockage leur confère une fonction d'écrtage des crues et permet de ralentir ponctuellement la propagation des écoulements réduisant ainsi les risques inondations à l'aval, et notamment dans la région parisienne.

Leurs actions combinées diminueraient de 70 cm la hauteur d'eau à Paris dans le cas d'une crue dont le débit serait équivalent à celui de 1910 [Seine Grands Lacs, 2015]. Cet ensemble de lacs réservoirs assure également un soutien du débit du fleuve et de ses affluents pendant la saison sèche, permettant de garantir les usages communs de l'eau pour l'agriculture, l'activité industrielle et l'alimentation en eau potable.

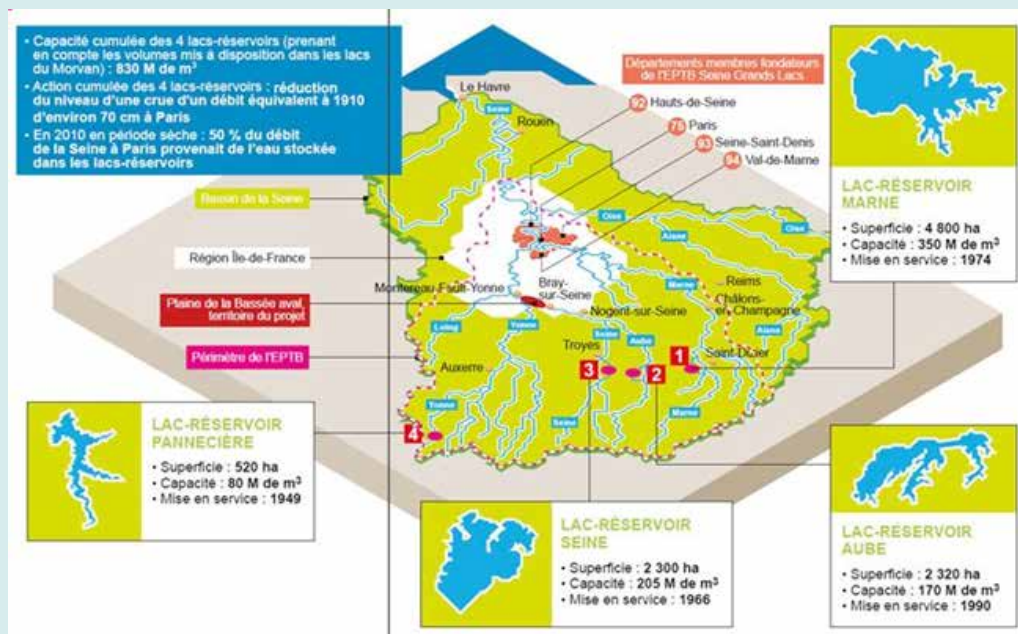


FIGURE C Aménagements des Grands Lacs de Seine.

Pour assurer la navigabilité de la Seine, **25 ouvrages de navigation** (écluses et barrages) se succèdent entre Conflans-sur-Seine (Marne) en amont et Poses-Amfreville (Eure) en aval. En stoppant la marée dynamique, ce dernier ouvrage délimite l'amont de l'estuaire de la Seine. Il se décompose en plusieurs entités : deux écluses, un barrage, une centrale hydroélectrique et deux passes à Poisson. Le barrage et ses écluses ont été construits de 1878 à 1881. Le barrage est de type déversoir mobile, l'eau passant au-dessus d'une structure mobile. Il permet d'assurer la navigabilité du bief amont en maintenant un niveau d'eau suffisant pour la navigation (8 m). Les deux écluses permettent le passage des bateaux. Représentatif des autres ouvrages présents sur la Seine, cet ensemble n'est pas conçu pour retenir et stocker de grands volumes d'eau et une surverse « efface » l'ouvrage (ouverture des vannes) lorsque le débit (et donc le niveau d'eau) est élevé. En période de crue, ces ouvrages ne jouent donc aucun rôle de retenue d'eau et leur fonctionnement ne permet pas de « lâché d'eau » en période d'étiage.

B. PÉRIODES DE RETOUR ASSOCIÉES AUX FORÇAGES

1. Débits fluviaux

À son arrivée dans l'estuaire au niveau du barrage de Poses, la Seine draine un bassin versant de 67 000 km². Ce dernier étant soumis à un climat de type pluvial océanique, les débits les plus importants sont observés entre les mois de janvier et avril avec des pics de crue moyens aux alentours de 1 400 m³/s soit plus de 3,5 fois le débit moyen annuel de 400 m³.s⁻¹ [FIGURE 11].

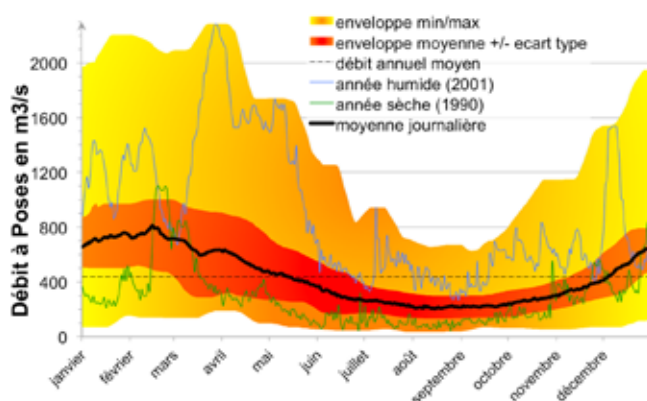


FIGURE 11 Statistiques journalières des débits de la Seine à Poses entre 1941 et 2013.

Pour estimer les périodes de retour des débits, un ajustement statistique a été appliqué aux débits maximaux annuels des principales stations hydrométriques de la Seine et de ses affluents [Tableau II ; ARTELIA & GIP Seine-Aval, 2013a]. Ce calcul a été réalisé pour les périodes antérieure et postérieure à la construction des grands lacs de Seine, du fait de leur impact sur l'hydrologie du cours d'eau.

Pour la Seine, les deux relations obtenues avant et après la création des grands lacs divergent pour des périodes de retour supérieures à 3 ans. Les grands lacs auraient ainsi permis de diminuer le débit centennal de 10 %. Dans sa morphologie actuelle et en considérant l'action des lacs réservoirs, le débit centennal de la Seine est de 2625 m³/s à Poses. Pour les affluents de l'estuaire, l'Eure et la Risle présentent respectivement des débits centennaux de 167 et 145 m³/s. Pour les périodes de retour les plus élevées (Q100 et Q500), les résultats sont là encore à considérer avec précaution, du fait de l'incertitude liée à la durée des séries de données considérées.



TABLEAU II Périodes de retour associées au débit de la Seine et de ses affluents (m³/s).

Temps de retour (années)	Débit de la Seine* (m ³ /s)				Débit à la confluence avec la Seine* (m ³ /s)				
	à Austerlitz		à Poses		Eure	Risle	Andelle	Cailly	Austreberthe
	avant les grands lacs	après les grands lacs	avant les grands lacs	après les grands lacs					
1				1450					
2	1094	1091	1650	1640	58	36	18	6.5	6
5	1576	1385	2225	2105	77	64	23	8.5	7.5
10	1831	1526	2400	2230	99	83	29	12	11
20	2037	1662	2565	2350	120	102	39	17	15
30	2155	1740	2660	2420	132	113	46	20	18
50	2300	1837	2775	2510	147	127	53	23	21
100	2500	1969	2930	2625	167	145	63	27	25
500	2962	2273	3290	2900	215	188	87	38	34

* Ajustement statistique à une loi de Gumbel

2. Coefficients de marée et niveau marin

La limite de propagation de la marée en Seine délimite la frontière entre le fleuve et l'estuaire. L'estuaire de la Seine s'étend ainsi sur les 170 km séparant l'embouchure du barrage de Poses. Bien que l'amplitude de l'onde de marée s'atténue lors de sa propagation vers l'amont, la marée constitue avec le débit l'un des deux forçages principaux de l'hydrodynamisme de l'estuaire. En effet, lorsque le marnage est maximal à l'embouchure, soit proche des 8 m, l'amplitude de la marée à Rouen est alors voisine des 4 m. **La marée joue un rôle prépondérant dans la survenue des inondations estuariennes.** Le TABLEAU III présente pour quelques coefficients de marée, leur probabilité d'être atteint ou dépassé et le niveau d'eau théorique au Havre [GPMR, 2015].

TABLEAU III Niveau de marée théorique au Havre.

Coefficient de marée	Probabilité de dépasser le coefficient donné (%)	Niveau marin au Havre (cm CMH)
35	99	618
45	91	653
65	63	707
80	38	747
95	14	784
115	1	825

3. Surcotes océaniques

En fonction des conditions météo-océaniques présentes en Manche, le niveau moyen du plan d'eau en baie de Seine peut varier de +/- 1 m [SHOM, 2012]. On parle de surcote ou décote* océanique. Pour l'étude des inondations en estuaire, seul le phénomène de surcote, et en particulier à celui des surcotes survenant à pleine mer, est intéressant. Plusieurs études récentes ont proposé des périodes de retour pour la surcote océanique au Havre, après dépouillement statistique des niveaux marins observés et identifications des surcotes de pleine mer [TABLEAU IV].

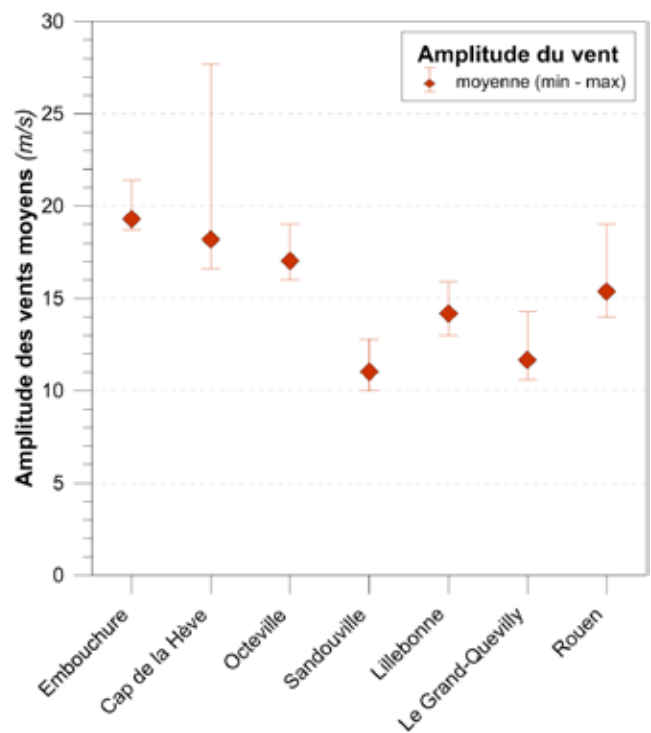
TABLEAU IV Périodes de retour de la surcote océanique de pleine mer au Havre.

Temps de retour (années)	Surcote (cm) [SHOM, 2012]	Surcote et IC à 70% (cm) - loi exponentielle - [CETMEF, 2013]	Surcote et IC à 70% (cm) - loi GPD - [CETMEF, 2013]
1	75		
5	95		
10	104	103 (96-110)	104 (94-113)
20	112	115 (106-123)	120 (105-136)
50	125	130 (119-141)	147 (118-176)
100	132	142 (129-155)	172 (127-216)
1000	161	181 (162-200)	291 (143-439)

4. Surcotes estuariennes

À une échelle plus localisée, les conditions météorologiques peuvent générer une surcote dite estuarienne. Le principal facteur moteur de ce processus est le vent. Lorsque ce dernier est dirigé vers l'est, il génère une surcote estuarienne pouvant atteindre 1 m à Rouen dans les conditions les plus défavorables.

L'analyse des amplitudes des vents moyens des 30 événements les plus importants observés sur la série de données montre une décroissance de ce paramètre de l'embouchure de la Seine vers l'amont de l'estuaire [FIGURE 12]. Cet amortissement des coups de vent d'ouest lors de leur entrée dans les terres peut être traduit par une loi de puissance décroissante d'ouest en est. Concernant les directions des vents, l'analyse sur les mêmes données montre une bonne cohérence entre les stations, avec une prépondérance des vents de secteur sud à ouest.



GIP Seine-Aval, 2015 - Source des données : AirNormand ; Météo-France ; Globocéan

FIGURE 12 Profils en long des amplitudes des vents moyens (m/s).

Un ajustement statistique a été appliqué sur les 27 ans de données de vent recueillies au Cap de la Hève (ramenées à 10 m), auxquelles ont été ajoutés les vents historiques recueillis par analyse de la bibliographie [TABLEAU V].

TABLEAU V Périodes de retour du vent moyen (sur 3h et ramené à 10 m) à l'embouchure de la Seine.

Temps de retour (années)	Vent moyen sur 3h à 10m* (m/s)
1	11.9
2	14
5	16.7
10	18.8
20	20.8
50	23.6
100	25.6
200	27.6
500	30.4
1000	32.4

* ajustement statistique à une loi de Gumbel

La surcote générée par le vent au sein de l'estuaire a été déterminée par modélisation [ARTELIA & GIP Seine-Aval, 2013a]. Différents scénarios de vents ont ainsi pu être testés ; l'objectif étant de déterminer les effets de vents d'am-

plitudes et de directions différentes sur le gonflement de l'estuaire. Les 22 scénarios modélisés ont confirmé que la direction 260° (vent de secteur ouest) génère les surcotes maximales. Ainsi, indépendamment de la surcote océanique à l'embouchure, **un vent de direction 260° et d'une vitesse de 17 m/s (période de retour 5 ans) peut générer à l'intérieur de l'estuaire une surcote d'environ 50 cm au niveau de Rouen** [TABLEAU VI].

TABLEAU VI Effet du vent sur le gonflement de l'estuaire à Rouen (en cm).

Rouen pk 243		Amplitude du vent (m/s)					Surcote (cm)
		13	17	20,7	24	27,7	
Direction du vent (° Nord)	160	- 27					
	180				- 4		
	200	10	16	24	30		
	230	23	38	58	72	91	
	260	30	50	76	95		
	300		45	69	87		

C. PÉRIODES DE RETOUR ASSOCIÉES AUX ÉVÉNEMENTS

En complément de la caractérisation de la période de retour associée à un forçage (débit, marée, surcote) ou à une hauteur d'eau, il convient de s'intéresser également à l'occurrence d'un événement. Si cette approche est relativement simple pour un milieu sous l'influence d'un seul forçage majeur (cas d'une crue pour une rivière ou d'une tempête sur une façade littorale), elle est beaucoup moins évidente dans le cas d'un estuaire. En effet, selon le secteur considéré dans l'estuaire, le poids de chacun des forçages sera différent. Ainsi, **une combinaison de forçage ayant une période de retour donnée** (débit et surcote d'occurrence centennale par exemple) **n'engendrera pas des niveaux ayant cette même période de retour sur tout le linéaire estuarien.**

D'une manière générale, chaque combinaison de forçage, générera en fonction de sa principale composante, maritime ou fluviale, des niveaux d'eau importants respectivement à l'aval ou à l'amont. Par exemple, si un débit de période de retour centennal engendre potentiellement des niveaux centennaux à l'amont de Rouen, il n'en est pas de même à l'aval de Tancarville où les niveaux sont principalement gouvernés par les conditions marines. Autrement dit, il n'est pas possible d'associer une période de retour à un événement donné pour l'ensemble de l'estuaire. Elle ne pourra être considérée que pour un secteur donné et approchée via le niveau d'eau atteint.

III NIVEAUX D'EAU POUR LA GESTION DU RISQUE INONDATION



La gestion du risque inondation repose sur le croisement entre un niveau d'eau (l'aléa) et les enjeux présents sur un territoire. La définition de niveaux d'eau de référence et leur partage entre les acteurs concernés par la problématique 'inondation' présentent de ce fait une importance particulière. La définition de scénarios de référence à une large échelle est également primordiale pour assurer une cohérence dans la mise en place de cette gestion à l'échelle de l'ensemble l'estuaire de la Seine.

A. NIVEAUX DE RÉFÉRENCE POUR L'APPLICATION DE LA DIRECTIVE INONDATION

L'application de la Directive Inondation [Encart n° 4 – EPRI, TRI, SNGRI, PGRI, SLGRI : mise en œuvre de la Directive inondation] nécessite notamment l'établissement d'une cartographie des surfaces inondables et des risques inondations sur les Territoires à Risque Important d'inondation (TRI). Ces cartographies (au 1/25000^e) visent à apporter des éléments quantitatifs permettant d'évaluer plus finement la vulnérabilité d'un territoire pour trois niveaux de probabilité d'inondation :

- **événements de forte probabilité ou scénarios fréquents, d'une période de retour entre 10 et 30 ans** : ils correspondent aux premiers dommages consécutifs sur le territoire ;
- **événements de probabilité moyenne ou scénarios moyens, généralement d'une période de retour comprise entre 100 et 300 ans** : ils correspondent à l'aléa de référence du PPRI, si existant. Les impacts des changements climatiques y sont adjoints pour les risques de **submersion marine** ;
- **événements de faible probabilité ou scénarios extrêmes, d'une période de retour de l'ordre de la millénaire ou supérieure** : ils correspondent à un phénomène d'inondation exceptionnel pouvant être estimé comme un maximum à prendre en compte pour la préparation et la gestion des crises d'inondation en vue d'assurer, dans la mesure du possible, la continuité du fonctionnement du territoire, et pour lequel les éventuels systèmes de protection mis en place ne sont plus efficaces.

La méthodologie retenue pour l'élaboration de ces cartes est la projection topographique d'un niveau de référence associé à chaque scénario, afin d'établir un jeu de cartes d'aléas (classes de hauteur d'eau) qui sera croisé avec les enjeux connus sur chaque territoire (bâti, activités économiques, installations susceptibles de provoquer des pollutions en cas d'inondation, établissements, infrastructures utiles à

la gestion de crise, établissements, installations sensibles dont l'inondation peut aggraver ou compliquer la gestion de crise). À noter que pour le TRI du Havre, une étude spécifique prenant en compte la dynamique des marées précisera le périmètre de vulnérabilité et viendra amender les éléments existants à ce jour.

Pour le TRI du Havre, le niveau de référence considéré pour l'aléa 'submersion marine' de probabilité moyenne est de 9,73 m CMH au Havre (10,13 m CMH avec prise en compte du changement climatique) ; celui de probabilité extrême est de 11,47 m CMH au Havre [DDTM76, 2014].

Pour le TRI de Rouen-Louviers-Austreberthe, les événements et les niveaux de référence considérés pour l'aléa 'débordement de la Seine' sont repris sur la Figure 14. Un exemple de cartographie des surfaces inondables pour les différents scénarios est présenté pour la boucle de Rouen [FIGURE 13 ; DREAL-HN, 2014].

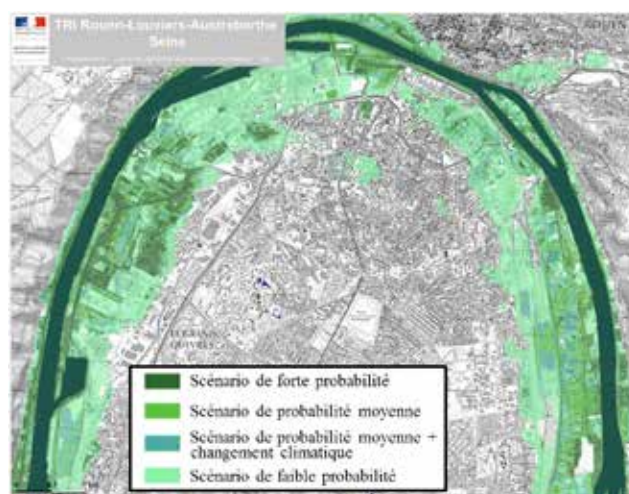


FIGURE 13 Niveaux de référence considérés pour l'aléa 'submersion marine' du TRI Rouen-Louviers-Austreberthe.

ENCART N° 4



PLAN
DE GESTION
DES RISQUES
D'INONDATION

2016-2021

BASSIN SEINE-NORMANDIE

EPRI, TRI, SNGRI, PGRI, SLGRI : mise en œuvre de la Directive inondation

La directive européenne 2007/60/CE du 23 octobre 2007, dite directive inondation, a été transposée dans le droit français par la loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010. Elle a induit une rénovation de la politique française sur la gestion du risque inondation à travers un triple objectif :

- Initier un processus de reconnaissance du risque partagé ;
- Introduire la notion d'événements extrêmes (ou de faible probabilité), de l'ordre du millénaire ;
- Permettre une appréciation préliminaire du risque, ainsi qu'une capitalisation de la connaissance avec un objectif d'amélioration continue.

Son application suit un cycle de révision de 6 ans et s'appuie sur différents outils. **L'évaluation préliminaire des risques inondation (EPRI)** est une première approche simplifiée des risques. Elle est fondée sur une méthodologie homogène systématisée au niveau national et la prise en compte d'informations locales. Elle s'appuie sur des indicateurs d'impact (enjeux compris dans l'emprise des événements extrêmes) et une analyse des événements passés [MEDTL, 2011]. La délimitation de **territoires à risque important d'inondation (TRI)** permet la sélection des territoires où les enjeux de population et d'emplois potentiellement exposés sont les plus importants, avec une prise en compte éventuelle de la sinistralité. Ces territoires seront prioritaires pour concentrer les efforts portés par les pouvoirs publics. Le long de l'estuaire de la Seine, deux TRI ont été retenus : le TRI du Havre (aléa 'submersion marine' et aléa 'débordement et ruissellement') et le TRI de Rouen-Louviers-Austreberthe (aléa 'débordement' et aléa 'ruissellement') [FIGURE D].

Une **cartographie des surfaces inondables et des risques d'inondation** est réalisée sur chaque TRI. Elle vise à apporter des éléments quantitatifs permettant d'évaluer plus finement la vulnérabilité d'un territoire pour trois niveaux de probabilité d'inondation (forte, moyenne, faible). La **Stratégie nationale de gestion des risques d'inondation (SNGRI)** fixe un cadre national à la démarche. Elle affiche trois grands objectifs prioritaires : **1)** augmenter la sécurité des populations exposées ; **2)** stabiliser à court terme et réduire à moyen terme, le coût des dommages liés à l'inondation ; **3)** raccourcir fortement le délai de retour à la normale des territoires sinistrés ; ainsi que quatre orientations stratégiques : **1)** développer la gouvernance et les maîtrises d'ouvrage ; **2)** aménager durablement les territoires ; **3)** mieux savoir pour mieux agir ; **4)** apprendre à vivre avec les inondations [MEDDE, 2014]. En cohérence avec le SNGRI, un **plan de gestion des risques inondation (PGRI)** est réalisé à l'échelle de chaque grand bassin hydrographique. Sur le bassin Seine-Normandie, le PGRI propose des dispositions génériques, ainsi que des dispositions spécifiques aux TRI selon quatre objectifs : **1)** réduire la vulnérabilité des territoires ; **2)** agir sur l'aléa pour réduire le coût des dommages ; **3)** raccourcir fortement le délai de retour à la normale des territoires sinistrés ; **4)** mobiliser tous les acteurs via le maintien et le développement de la culture du risque [DRIEE-IDF, 2014]. La **stratégie locale de gestion des risques inondation (SLGRI)** est la déclinaison à l'échelle du TRI des objectifs fixés par le PGRI. Elle identifie des mesures pour réduire les conséquences négatives des inondations à l'échelle de son périmètre. Ces mesures concourent à la réalisation des objectifs fixés par le PGRI, notamment des mesures de prévention, de protection et de sauvegarde adaptées aux territoires concernés. L'approbation de ces stratégies locales est prévue fin 2016.

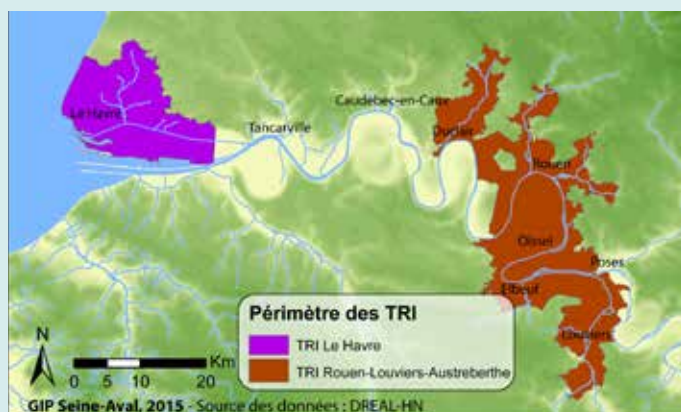


FIGURE D Périmètres des TRI et des stratégies locales à mettre en place le long de l'estuaire de la Seine.

Elément central de la mise en œuvre de la Directive inondation, le PGRI est compatible avec les objectifs d'autres réglementations à portée environnementale (SDAGE, PAMM). Il a une portée juridique directe sur les plans de prévention des risques (inondation et littoraux), ainsi que sur les différents documents d'urbanisme (SCOT, PLU) qui doivent être compatibles ou rendus compatibles avec le PGRI. Les programmes et les décisions administratives dans le domaine de l'eau (autorisation et déclarations « loi sur l'eau », PAPI) doivent également être compatibles ou rendus compatibles avec le PGRI.

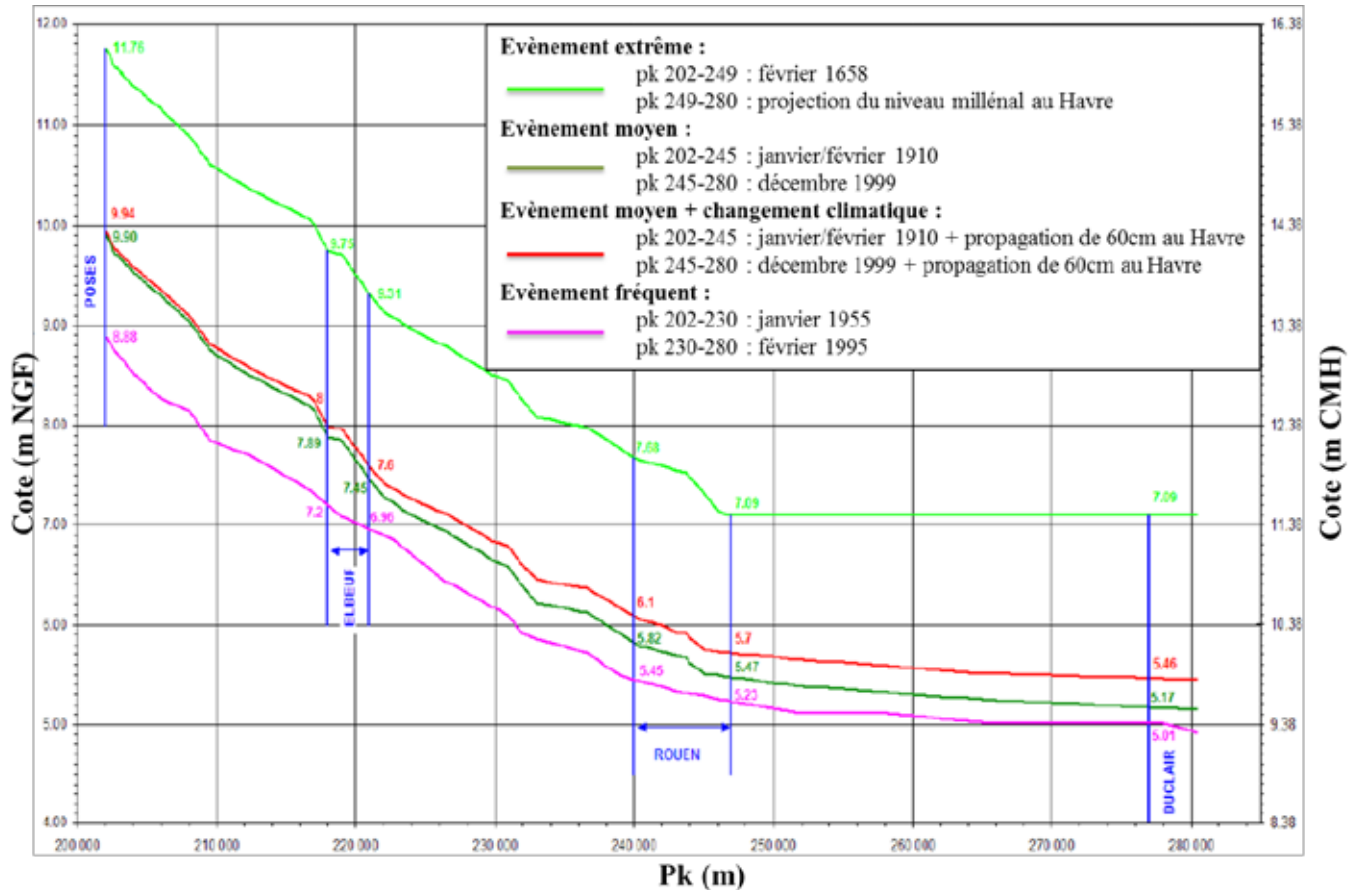


FIGURE 14 Niveaux de référence considérés pour l'aléa 'submersion marine' du TRI Rouen-Louviers-Austreberthe.

B. MODÉLISATION DE SCÉNARIOS DE HAUTES-EAUX

Afin de compléter la connaissance des mécanismes responsables des inondations, les outils de modélisations peuvent être mobilisés. Grâce à l'analyse et à la compréhension d'événements passés, ils permettent de simuler des événements théoriques et de se projeter sur des combinaisons de forçages jamais observés. Pour ce faire, un modèle* décrivant le fonctionnement hydrodynamique de l'estuaire de la Seine en condition de hautes eaux a été construit [Encart n° 5 - Le modèle des niveaux d'eau en estuaire de Seine]. Il a notamment été mobilisé pour alimenter la réflexion sur la définition de niveaux de référence en estuaire de Seine.

Le modèle permettant de simuler des événements passés ou jamais observés, l'étape préalable à sa mobilisation est la définition de scénarios. Ils peuvent être de deux types :

- Scénarios réalistes : il s'agit de simulations pour lesquelles les combinaisons de forçages ont déjà été observés.
- Scénarios théoriques : il s'agit de simulations permettant de déterminer les lignes d'eau atteintes dans des conditions jamais observées auparavant.

Pour l'estuaire de la Seine, six principaux scénarios ont été définis en concertation avec les acteurs de l'estuaire s'intéressant aux inondations (collectivités, établissements publics, services de l'Etat, Grands Ports Maritimes, etc.). Chacun de ces scénarios est défini par les caractéristiques et les phasages des forçages pris en compte dans le modèle : débit, marée, surcote, élévation du niveau marin, présence ou absence des murets anti-inondations.

Les scénarios réalistes se basent sur les combinaisons de forçages observés lors d'événements de référence : crue de 1910 et tempête de décembre 1999. Ces simulations permettent de déterminer les lignes d'eau générées sur la topographie/bathymétrie actuelle de l'estuaire. La définition des scénarios théoriques est issue de discussions entre les acteurs ayant en charge la gestion de la problématique inondation. Ils permettent d'appréhender la vulnérabilité d'un territoire pour des combinaisons de forçages jamais observés [TABLEAU VIII; ARTELIA & GIP Seine-Aval, 2013b].

ENCART N° 5

Le modèle des niveaux d'eau en estuaire de Seine

Dans le cadre de l'étude « Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation en estuaire de Seine » menée par le GIP Seine-Aval, un modèle décrivant le fonctionnement hydrodynamique de l'estuaire de la Seine en condition de hautes eaux a été développé [ARTELIA & GIP Seine-Aval, 2013]. Ce modèle 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 les zones inondables du lit majeur.

Le système de modélisation utilisé est le logiciel TELEMAC-2D, apte à simuler et à étudier de manière détaillée les courants et les niveaux induits par la marée, les débits des rivières, les vents,.... Cet outil intègre un paramétrage spécifique pour la prise en compte des digues et autres remblais. Ce dernier permet de prendre en compte les digues et remblais, séparant 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 au moment de l'étude [TABLEAU A]. Il intègre les murets de type 'anti-inondation' dont la localisation et l'altimétrie ont fait l'objet d'un inventaire spécifique [FIGURE E ; GIP Seine-Aval, 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 du 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 F].

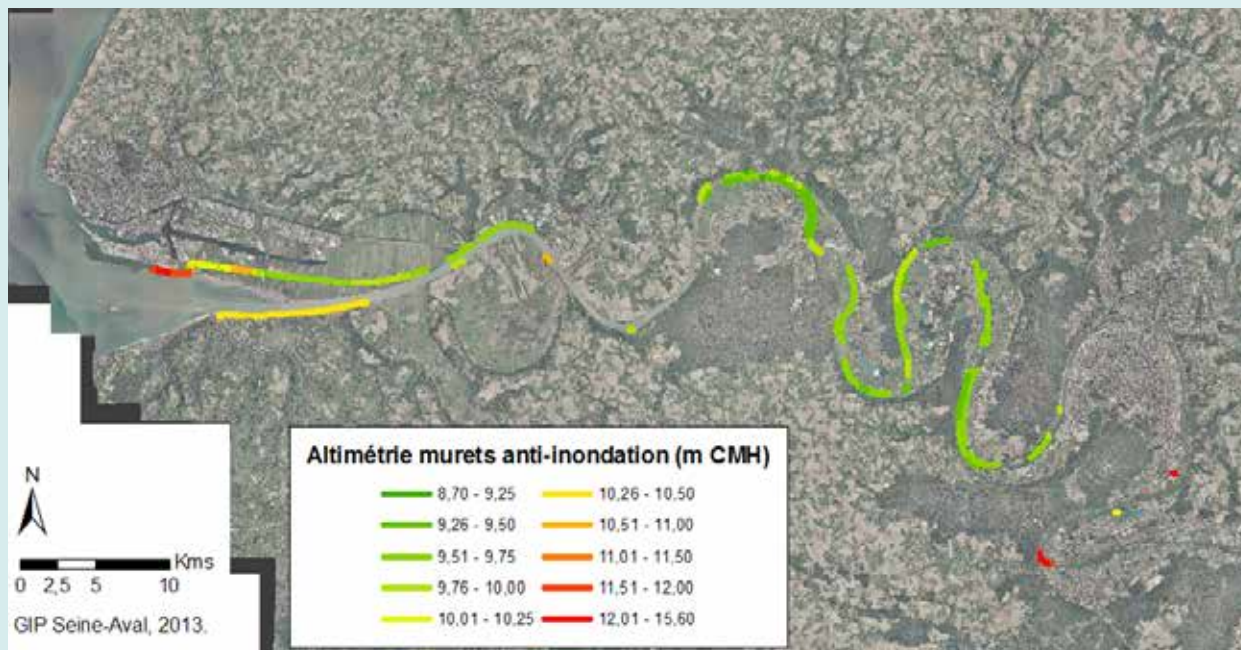


FIGURE E Localisation et altimétrie des murets anti-inondation identifiés le long de l'estuaire de la Seine.

TABLEAU A 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

À l'amont de l'estuaire, 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 et 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 de la frontière marine par le signal de marée issu d'un modèle de grande emprise de la Manche.

Le modèle a été calé sur six événements récents, trois événements de type 'crue' et trois événements de type 'tempête'. Pour ces six événements de calage, les résultats du modèle sont comparés aux données des marégraphes pour la courbe de marée et le niveau maximal atteint. Pour ces six événements, le modèle reproduit de façon très satisfaisante la propagation de la marée de l'aval 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 19 marégraphes) sur les 160 km séparant le barrage de Poses de l'embouchure de la Seine. 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. Ce modèle peut donc être mobilisé pour alimenter des réflexions des acteurs de l'estuaire sur l'aléa 'débordement de la Seine' [ARTELIA & GIP Seine-Aval, 2013c].

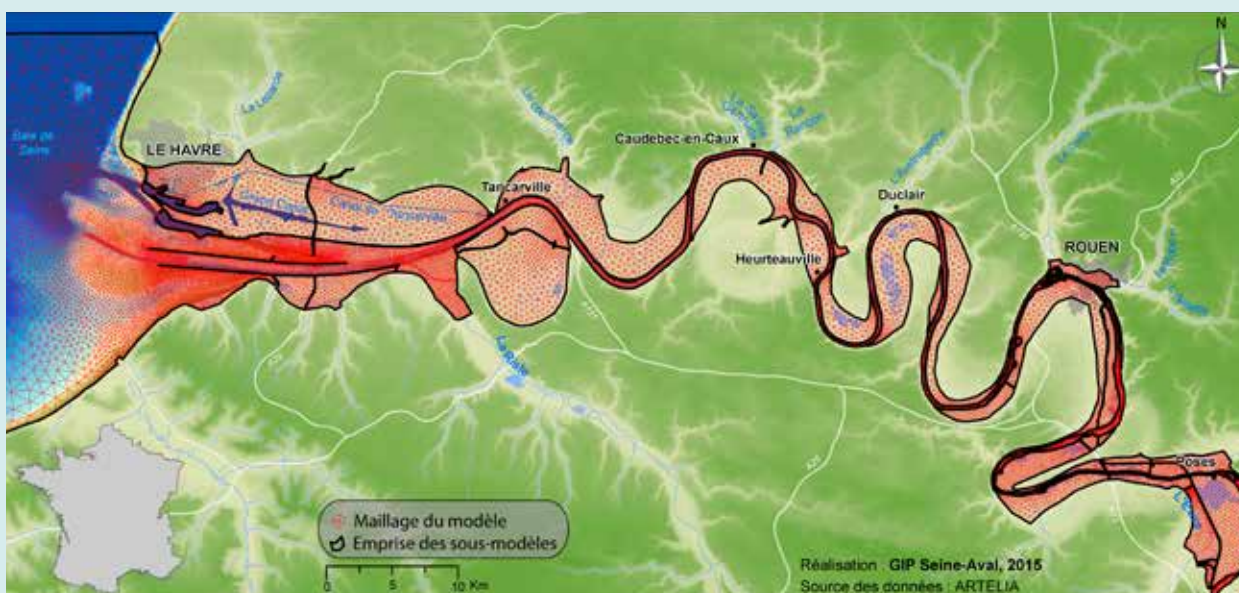
**FIGURE F** Bathy-topographie et maillage du modèle de l'estuaire de la Seine.

TABLEAU VII Caractéristiques des scénarios modélisés et estimation de la cote atteinte.

	Scénario		Forçages					Estimation de la cote atteinte (m CMH)				
	Nom	Type	Débit (Tps de retour)	Marée (Coeff.)	Surcote (Tps de retour)	Niveau marin (Élévation)	Murets (Présence)	Balise A	Tancarville	Heurteauville	Rouen	Elbeuf
SC1	Maritime	Théorique	1 (1 450 m ³ /s à Poses)	fort (coeff. 106 : 8,12 m)	100 (1,32 m)	0	oui	9,50	9,76	9,48	9,93	10,30
SC2	Fluvio-maritime	Théorique	10 (2 230 m ³ /s à Poses)	moyen/fort (coeff. 95 : 7,81 m)	10 (1,04 m)	0	oui	8,19	8,57	8,96	9,70	10,89
SC3	Fluvio-maritime extrême	Théorique	100 (2 623 m ³ /s à Poses)	fort (coeff. 116 : 8,18 m)	100 (1,32 m)	0	oui	9,52	9,56	9,49	10,04	11,58
SC4	Fluvio-maritime extrême 2	Théorique	100 (2 623 m ³ /s à Poses)	fort (coeff. 116 : 8,18 m)	20 (1,12 m)	0	non	9,32	9,48	9,40	9,98	11,41
	Fluvio-maritime extrême 2 + élévation niveau marin	Théorique	100 (2 623 m ³ /s à Poses)	fort (coeff. 116 : 8,18 m)	20 (1,12 m)	+ 60 cm	non	9,91	9,90	9,68	10,20	11,54
SC5	Tempête de 1999	Réaliste	1 (1 407 m ³ /s à Poses)	fort (coeff. 106 : 8,12 m)	2 (0,72 m)	0	non	8,86	9,09	9,12	9,59	10,13
	Tempête de 1999 + élévation niveau marin	Réaliste	1 (1 407 m ³ /s à Poses)	fort (coeff. 106 : 8,12 m)	2 (0,72 m)	+ 60 cm	non	9,46	9,56	9,36	9,77	10,29
SC6	Crue 1910	Réaliste	> 100 (3 000 m ³ /s à Poses)	moyen (coeff. 78 : 7,55 m)	(0 m)	0	non	7,72	8,05	8,48	9,52	11,73
	Crue 1910 + élévation niveau marin	Réaliste	> 100 (3 000 m ³ /s à Poses)	moyen (coeff. 78 : 7,55 m)	(0 m)	+ 60 cm	non	8,34	8,61	8,99	9,77	11,84

L'analyse des lignes d'eau maximales pour chaque scénario [FIGURE 15 ; FIGURE 16] permet d'explicitier les caractéristiques de chaque type d'événement, à savoir :

- **L'événement fluvial avec une ligne d'eau qui impacte les niveaux amont et qui décroît de l'amont vers l'aval avec une pente très marquée à l'amont.** Ce type d'événement est engendré par une crue provenant de l'amont du bassin versant (scénario SC6 « Crue de 1910 ») ;
- **L'événement de type maritime engendré par le vent et une forte marée impacte plutôt les niveaux à l'aval de l'estuaire** (point d'inflexion entre Mesnil-sous-Jumièges et Heurteauville) avec un gonflement de la ligne d'eau aux alentours de Tancarville (scénario SC1) ;
- **Des événements de type fluvio-maritime liés à un débit important de la Seine et à une tempête** (vent, forte marée), **qui impactent tout l'estuaire** avec des niveaux plus faibles à l'amont de Rouen qu'un événement fluvial et des niveaux globalement plus faibles à l'aval qu'un événement maritime (scénarios SC2-3-4-5). Selon l'occurrence d'apparition des forçages 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 anti-inondations modifie également la dynamique des écoulements et donc la ligne d'eau (scénario 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 deux scénarios (avec et sans élévation du niveau marin) devient faible. La dynamique des écoulements est également modifiée (scénarios SC4-5).

Cette analyse des lignes d'eau permet également d'identifier les zones préférentielles de débordement, selon le type d'inondation. Situées dans la zone intermédiaire de l'estuaire, les boucles de Sahurs et du Trait sont impactées pour tous les scénarios, quelle que soit la typologie de l'inondation. L'amont de l'estuaire (boucle d'Igenville, de Saint Aubin-les-Elbeuf, de Criquebeuf-sur-Seine, d'Oissel et de Saint Etienne-du-Rouvray) est impacté pour tous les scénarios où le débit est d'occurrence décennale et centennale, avec des volumes de débordement qui augmentent avec le débit.

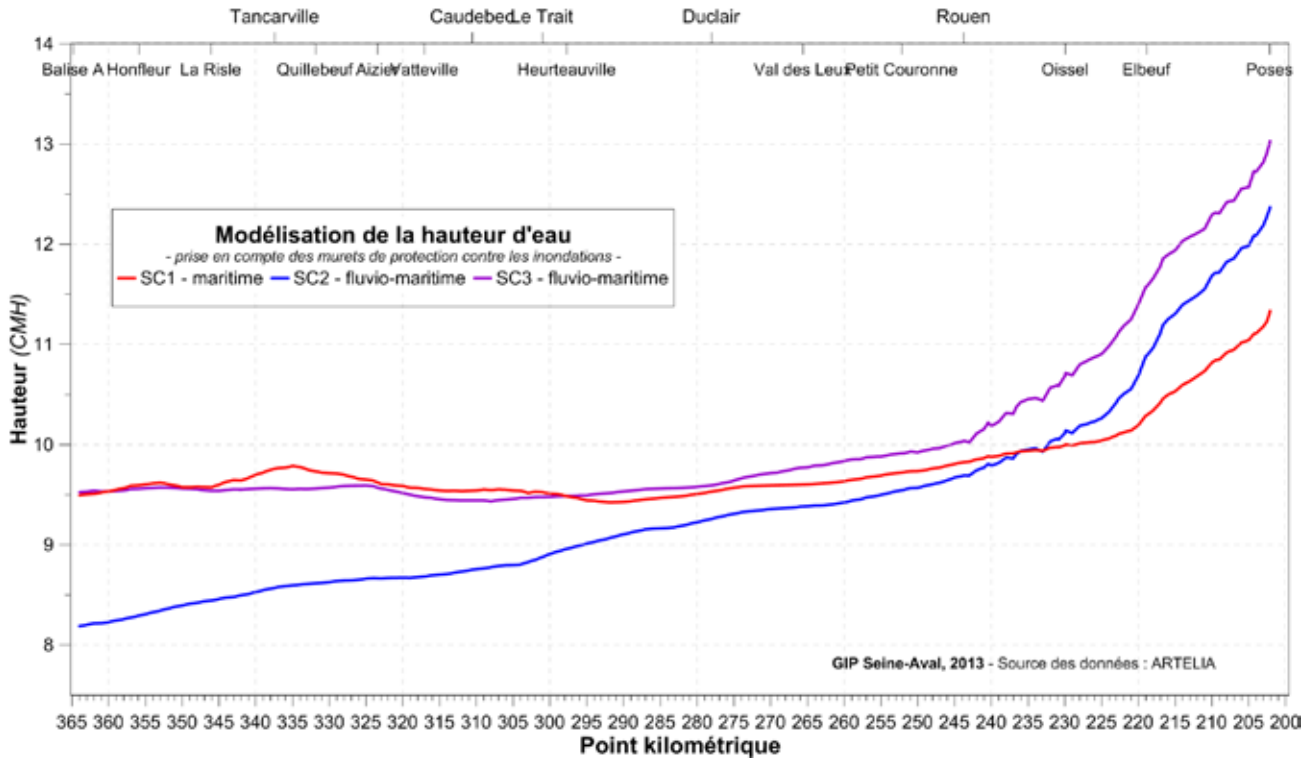


FIGURE 15 Ligne d'eau maximale pour les scénarios SC1, 2 et 3.

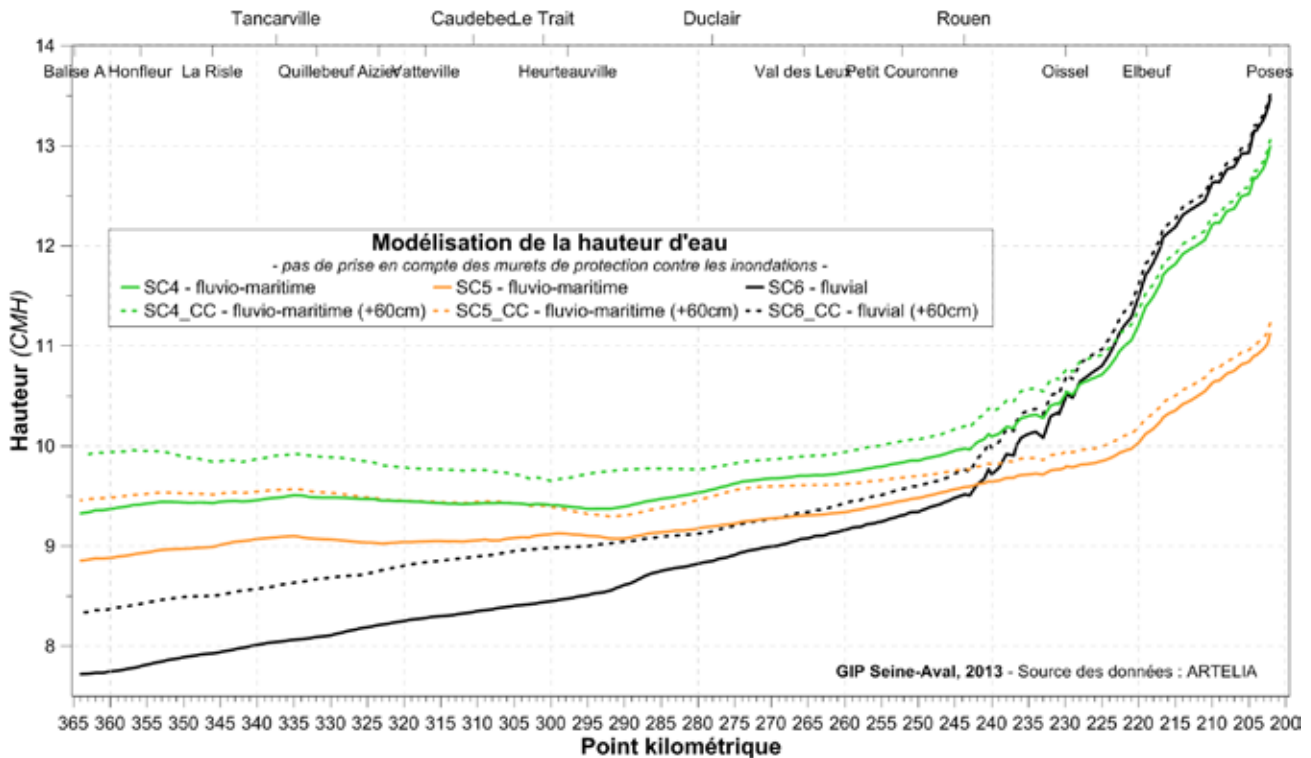


FIGURE 16 Ligne d'eau maximale pour les scénarios SC4, 5 et 6.

À l'exception des scénarios SC2 « fluvio-maritime » (surcote décennale, marée moyenne) et SC6 « crue de 1910 » (fluvial), la boucle de Notre-Dame-de-Gravenchon et la zone du Marais Vernier sont touchées par des débordements engendrant de moindres volumes. Le scénario SC4 « fluvio-maritime extrême 2 » génère des zones de débordements sur la

plupart du linéaire de la Seine, avec des volumes non négligeables. Le scénario SC6 « crue de 1910 » est le plus impactant sur la partie amont de l'estuaire (amont du pk 230 avec des volumes transitant importants) [FIGURE 17 ; ARTELIA & GIP Seine-Aval, 2014].

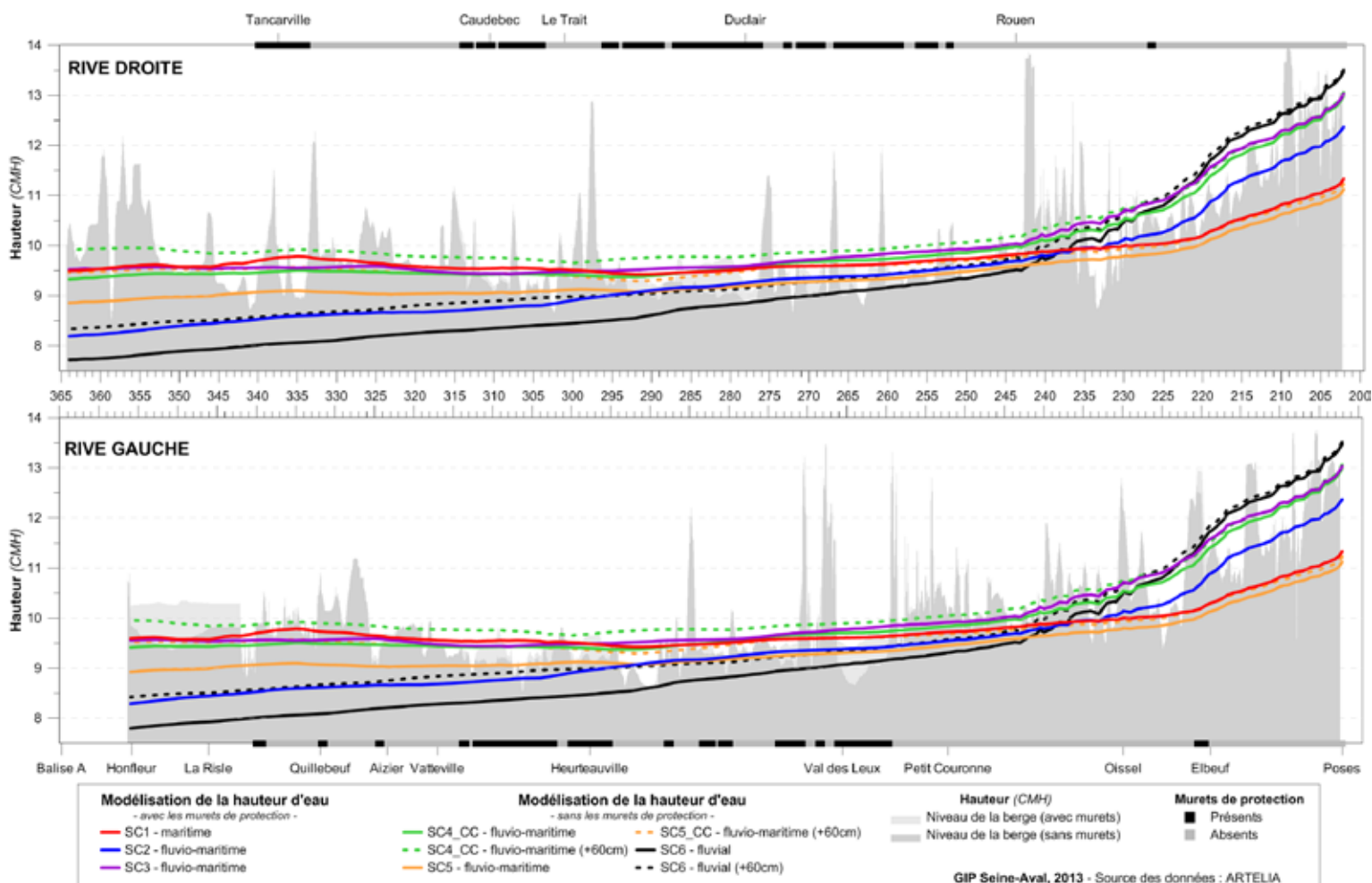


FIGURE 17 Ligne d'eau maximale et niveau des berges.

C. DYNAMIQUE DES DÉBOREMENTS

La simple comparaison du niveau d'eau maximum atteint ou simulé et du niveau des berges en un point n'apporte qu'une information partielle pour caractériser une inondation et n'est pas suffisante. En effet, **l'aspect temporel de l'aléa 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 18 ; ARTELIA & GIP Seine-Aval, 2014]. 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 (Scénario SC6 « crue de 1910 » à Elbeuf par exemple). Les débordements liés à une tempête (surcote) et un fort coefficient de marée sont plus importants dans le secteur aval de l'estuaire. Ils seront plus brefs et liés à la durée de tenue du plein (Scénario SC3 « fluvio-maritime extrême » à la Balise A par exemple).

Pour mieux caractériser les inondations, il faudrait associer à cette information de niveau et de durée de débordement, les volumes d'eau échangés entre le lit mineur et le lit majeur. En effet, une faible durée de débordement sera moins susceptible de générer des volumes suffisants pour inonder l'ensemble du lit majeur situé sous la cote atteinte. Dans des conditions de débordements plus longs, une partie plus importante du lit majeur pourra être concernée par l'inondation du fait de volumes mis en jeu plus importants. Les conditions de ressuyage des terrains inondés et les connexions des zones basses avec le lit mineur sont également des éléments importants à considérer pour caractériser les inondations : si l'ensemble des volumes débordés n'a pas le temps de se ressuyer vers la Seine lors de la basse mer suivant le premier débordement, les volumes débordants lors de la pleine mer suivante se cumuleront avec ceux déjà présents [Hébrard & Piney, 2015].

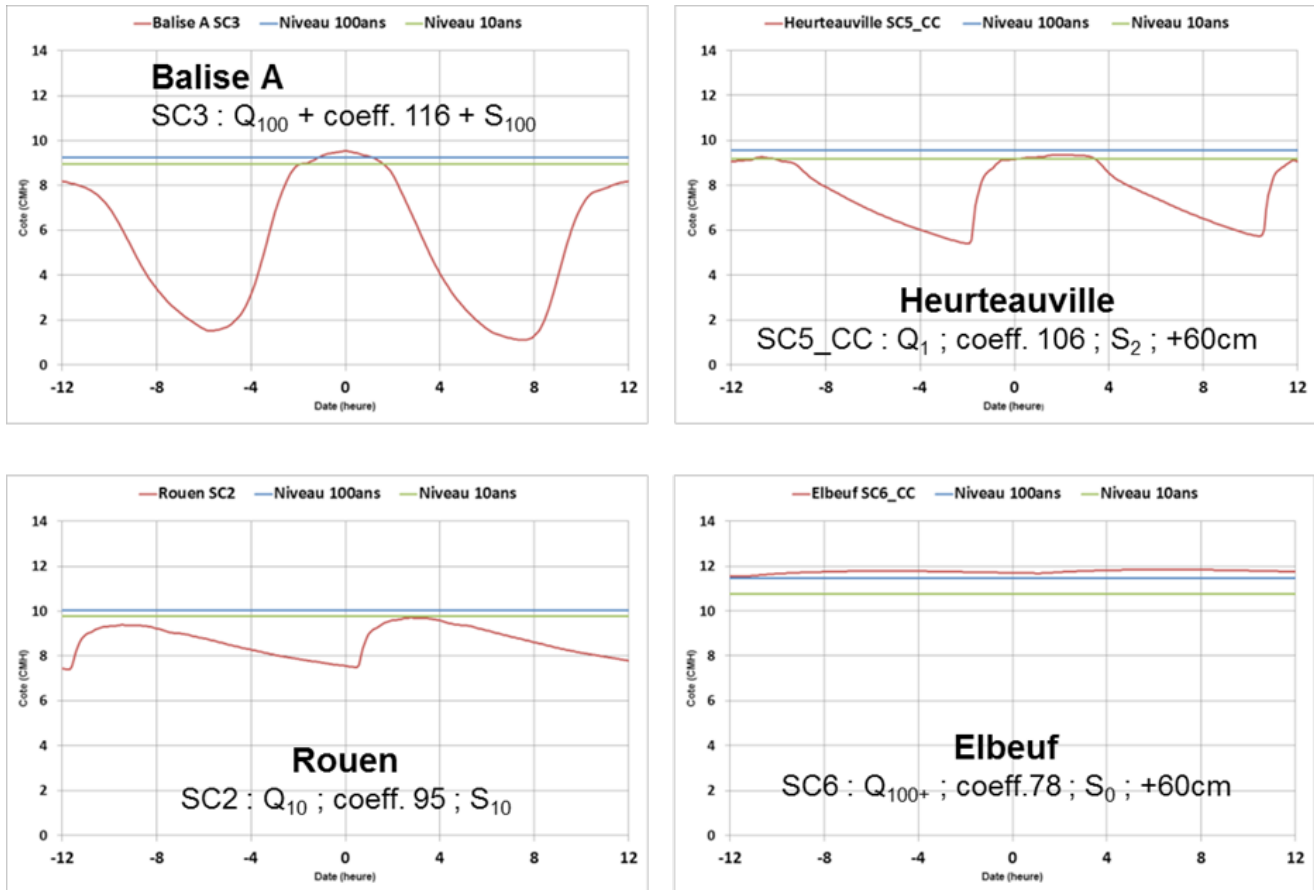


FIGURE 18 Exemples de marégrammes modélisés et comparaison à la ligne d'eau décennale et centennale.



IV EFFETS PRÉVISIBLES LIÉS AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES



L'hydrodynamisme, et en particulier les niveaux d'eau en estuaire de Seine, sont régis par l'interaction entre l'hydrologie du bassin versant, les conditions marines et les conditions météorologiques. Dans le contexte actuel de changement climatique, l'évolution de chacun de ces forçages va modifier l'ensemble du fonctionnement de l'estuaire et notamment les aléas 'débordement' et 'submersion'. Les résultats de modélisation des effets du changement climatique sur l'hydrodynamisme de l'estuaire constituent des éléments utilisables par les gestionnaires, pour aider à la caractérisation de l'évolution à moyen-long terme de ces aléas.

A. IMPACT SUR LES FORÇAGES

Plusieurs projets de recherche ont été menés sur le bassin afin d'identifier les effets du changement climatique. **Malgré leurs différentes hypothèses de base, ces études montrent une tendance globale à l'élévation des températures, du niveau marin et à la diminution du débit des rivières.**

La hausse des températures conduirait, par l'expansion thermique et la fonte glaciaire, à une montée du niveau marin. La modélisation des différents scénarios retenus dans le cadre des travaux du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat montre une hausse du niveau marin comprise entre + 0,3 m et + 1 m à l'horizon 2100 [FIGURE 19; GIEC, 2013].

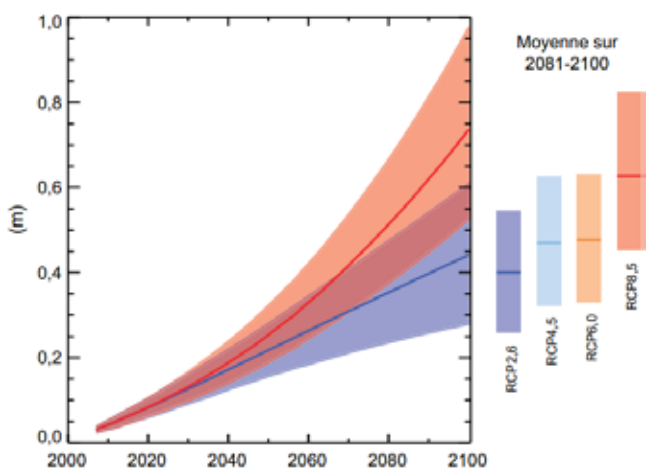


FIGURE 19 Projection de l'élévation du niveau moyen des mers à l'échelle du globe, pour différents scénarios.

En ce qui concerne l'évolution des températures sur le bassin de la Seine, les projections climatiques régionales indiquent une augmentation des températures atmosphériques moyennes annuelles de l'ordre de + 1,5 à + 3 °C d'ici 2050

et de + 2 à + 4 °C d'ici 2100 dans le bassin de la Seine. En conséquence, l'évapotranspiration devrait également augmenter sur le bassin, de + 16 % d'ici le milieu du siècle et de + 23 % d'ici la fin du siècle, d'après une moyenne réalisée sur 18 scénarios simulés. Les précipitations pourraient diminuer de 6 % d'ici le milieu du siècle et de 12 % d'ici la fin du siècle d'après une moyenne réalisée sur 18 scénarios simulés. Les répercussions de ces changements climatiques sur les nappes sont importantes, la recharge des nappes pourrait ainsi diminuer de 30 % au cours du XXI^e siècle. Ces évolutions du contexte climatique impacteront également les débits des cours d'eau. Les résultats des modélisations basées sur des scénarios tendanciels font état d'une baisse des débits tout au long de l'année (- 10 à - 30 % sur le bassin de la Seine à l'horizon 2070/2100). En lien avec la baisse du niveau des nappes, une aggravation significative des étiages sévères serait observée [FIGURE 20]. Concernant les crues, les changements semblent plutôt modérés et incertains [Ducharne, 2009].

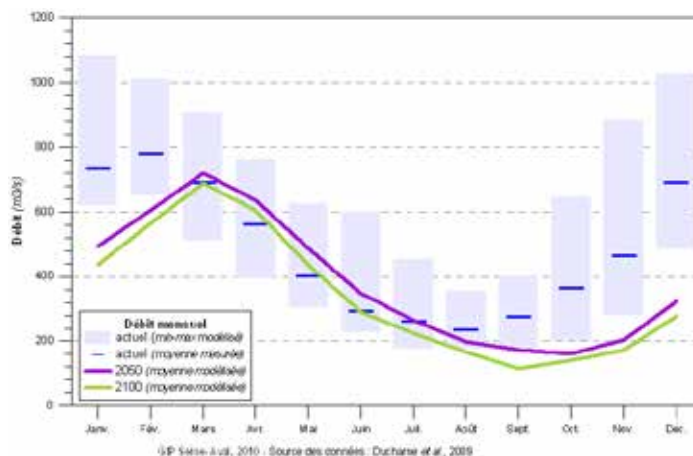


FIGURE 20 Evolution des débits mensuels simulés pour la Seine à Poses.

Les différentes simulations météorologiques, réalisées notamment dans le cadre du projet ANR SCAMPEI, ne montrent pas de tendances claires concernant le nombre et la violence des tempêtes au cours du ^{xxi} siècle [Degué,

2012]. Les analyses de scénarios climatiques confirment le caractère très variable des résultats d'un modèle à un autre et surtout la faible amplitude de variations des vents les plus forts [Jouzel *et al.*, 2014].



ENCART N° 6

SONEL : un suivi du niveau de la mer

Le Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales (SONEL) est une plateforme qui vise à fournir des données du niveau de la mer, qu'elles soient issues de mesures marégraphiques (niveau relatif de la mer) ou géodésiques (déplacements verticaux et niveaux absolus de la mer). L'objectif de SONEL est de rassembler et diffuser ces observations, notamment pour apporter des éléments de réponse aux questions sur les changements affectant les différentes composantes du niveau marin.

Cette démarche regroupe des partenaires issus d'organismes nationaux (SHOM, IGN), de laboratoires scientifiques (LEGOS, équipe 'Dynamique Physique du Littoral' de l'UMR 7266 LIENSS) ou d'organismes producteurs de données (Grands Ports Maritimes, Services Maritimes,...).

L'une des activités de SONEL est d'élaborer des produits spécifiques à partir des observations, en particulier des niveaux moyens mensuels et annuels en différents points du littoral. Les **moyennes annuelles** correspondent à la moyenne arithmétique des moyennes mensuelles, préalablement pondérée par le nombre de jours d'observation. Pour être valide, un minimum de 11 mois doit être renseigné. Les **moyennes mensuelles** correspondent à la moyenne arithmétique des moyennes journalières. Pour être valide, un minimum de 15 jours doit être renseigné. Les **moyennes journalières** ne peuvent pas être simplement calculées sur 24h00, du fait de la durée d'un cycle de marée (12h25). Des filtres (Demerliac, Doodson) ont ainsi été développés et sont utilisés pour calculer un niveau moyen quotidien [SONEL, 2015].

B. IMPACT DE L'ÉLEVATION DU NIVEAU MARIN

L'élévation du niveau marin à l'embouchure de la Seine est documentée grâce aux mesures du niveau d'eau au marégraphe du Havre [Encart n° 6 – SONEL, un suivi du niveau de la mer]. Le niveau moyen de la mer peut ainsi être calculé à différents pas de temps [TABLEAU VIII ; SONEL, 2015]. Depuis les premières mesures disponibles en 1938, le niveau moyen annuel oscille entre 4,80 m et 5,00 m CMH, pour une moyenne à 4,91 m CMH. Pour les pas de temps mensuel et journalier, la moyenne calculée est identique, mais les extrêmes plus élevés.

TABEAU VIII Statistiques sur le niveau moyen de la mer au marégraphe du Havre (en m CMH)

Pas de temps	min	P05	Moyenne	P95	Max	n
Journalier	4,34	4,69	4,91	5,16	5,65	16157
Mensuel	4,64	4,76	4,91	5,07	5,17	543
Annuel	4,80	4,83	4,91	4,97	5,00	41

Ces valeurs ne se répartissent cependant pas de manière uniforme au cours du temps et **une tendance à l'élévation**

du niveau marin ressort clairement de l'analyse des données. Cette augmentation est de + 1,69 mm/an depuis 1938 et + 2,19 mm/an depuis 1973 [FIGURE 21].

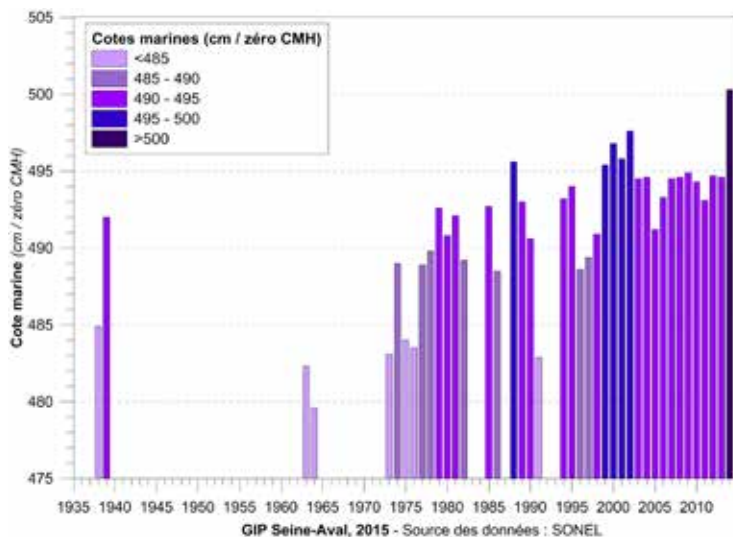


FIGURE 21 Niveau moyen annuel de la mer au Havre

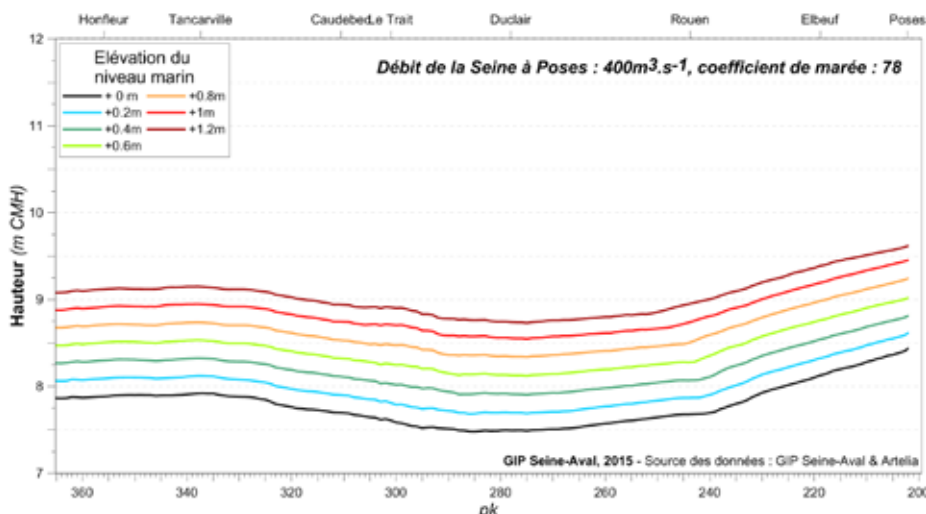


FIGURE 22 Niveau de pleine mer le long de l'estuaire de la Seine pour différentes élévations du niveau marin et pour un débit de la Seine à Poses de 400 m³.s⁻¹ et un coefficient de marée de 78

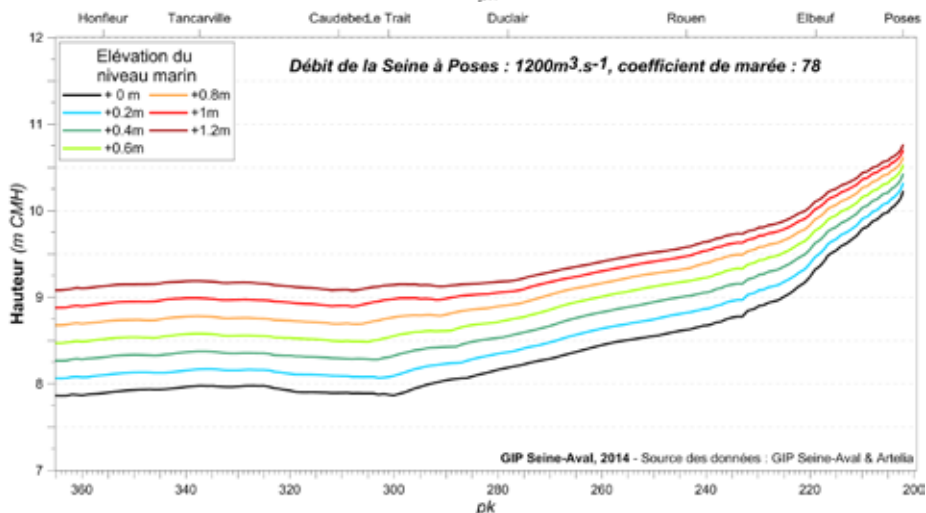


FIGURE 23 Niveau de pleine mer le long de l'estuaire de la Seine pour différentes élévations du niveau marin et pour un débit de la Seine à Poses de 1 200 m³.s⁻¹ et un coefficient de marée de 78.

À terme, l'évolution du niveau marin modifiera les niveaux d'eau en estuaire. Pour caractériser l'impact de cette évolution, le modèle des niveaux d'eau en estuaire de Seine a été mobilisé [Encart n° 7 – Scénarios simulés pour évaluer l'impact de l'élévation du niveau marin]. Les résultats des simu-

lations permettent d'obtenir les niveaux de pleine mer dans le lit mineur de l'estuaire de la Seine (Poses – Le Havre) pour les différents débits (de 400 à 2 000 m³/s) et coefficients de marées (78 et 106) testés [FIGURE 22 ; FIGURE 23].

ENCART N° 7

Scénarios simulés pour évaluer l'impact de l'élévation du niveau marin

Dans le cadre de la modélisation de scénarios théoriques, le modèle des niveaux d'eau en estuaire de Seine a été mobilisé pour évaluer l'impact de l'élévation du niveau marin au Havre sur les niveaux d'eau en estuaire de Seine. Pour cela, 126 scénarios théoriques ont été définis et modélisés pour [Lemoine, 2015].

Ces simulations ont été faites en faisant varier le niveau marin de son niveau actuel à + 1,2 m. Pour rappel, les conclusions du 5^e 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 1 m, contre 0,2 m 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.

Les simulations ont été réalisées 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 m³.s⁻¹ à 2 000 m³.s⁻¹ avec un pas de 200 m³.s⁻¹. Ces débits sont représentatifs de la plage de variation des débits de la Seine à Poses.

Au final, sept valeurs d'élévation du niveau marin ont été testées pour neuf débits constants de la Seine à Poses pour deux coefficients de marée 78 et 106 [TABLEAU B ; Lemoine, 2015].

TABLEAU B Présentation des conditions hydrodynamiques simulées.

Coefficients de marée	Débit de la Seine (m ³ /s)	Référence actuelle (m)	Elevation du niveau marin (m)					
			+0,2	+0,4	+0,6	+0,8	+1,0	+1,2
78 & 106	400							
	600							
	800							
	1000							
	1200							
	1400							
	1600							
	1800							
	2000							

La comparaison des niveaux de pleines mers en différents points de l'estuaire avec l'élévation du niveau marin permet de calculer un coefficient d'amortissement/amplification. Ce coefficient, calculé pour différentes conditions de débits et de marées, caractérise l'élévation des niveaux de pleines mers en estuaire en réponse à l'élévation du niveau de la Manche [FIGURE 24]. Trois grandes tendances d'évolutions ressortent de l'analyse des variations de ce coefficient [Lemoine, 2015].

exemple, pour un débit de $2000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, la propagation de l'élévation du niveau marin jusqu'à Rouen est de 60 % pour une marée de coefficient 78 contre 50 % lors des marées de coefficient 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. Malgré cette atténuation plus importante observée, les niveaux observés en vives eaux sont, pour des conditions de débit et d'élé-

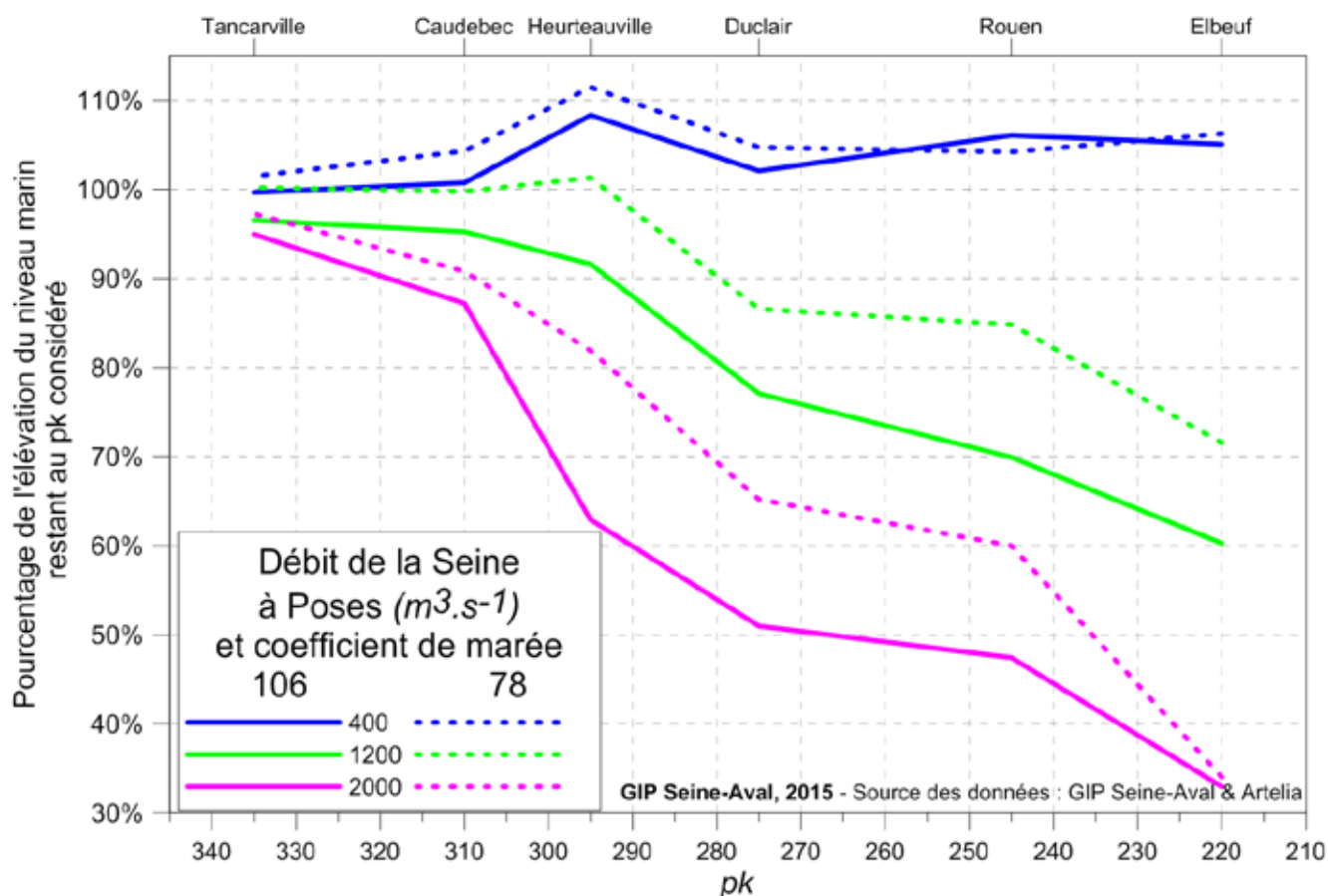


FIGURE 24 Impact de l'élévation du niveau marin sur les niveaux de pleine mer dans l'estuaire de la Seine.

L'amortissement de la propagation de l'élévation du niveau marin en estuaire est principalement régi par le débit de la Seine : pour les débits les plus importants, nous observons naturellement un amortissement de l'aval vers l'amont de l'élévation du niveau marin. Cet amortissement est lié aux contraintes générées par les débits de la Seine sur la propagation de l'onde de marée vers l'amont 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. En effet, la comparaison des courbes associées aux coefficients 106 et 78, pour des débits identiques, montre que pour les marées de coefficient 106 l'amortissement est légèrement plus fort. Par

variation du niveau marin semblables, supérieurs aux niveaux obtenus pour des coefficients plus faibles.

Pour les débits proches du débit moyen de la Seine ($400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), l'élévation du niveau marin est retranscrite intégralement, voir amplifiée, sur l'ensemble du linéaire de l'estuaire. 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 liée à la forme convergente des estuaires. Les conditions hydrodynamiques actuelles de l'estuaire de la Seine en fond un estuaire hyposynchrone, 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. Ainsi, l'augmentation du niveau marin permet à l'onde de marée de transiter sur des profon-

deurs 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.

ENCART N° 8

Contributions du GIP Seine-Aval à la gestion du risque inondation

Le référentiel topographique « LIDAR »

Le GIP Seine-Aval a initié en 2010 le projet « LIDAR Estuaire de la Seine » afin de constituer un référentiel topographique haute-résolution sur l'ensemble de la vallée de la Seine en aval du barrage de Poses [FIGURE G]. L'enjeu pour le GIP était de disposer d'une information suffisamment précise pour mieux appréhender certaines problématiques estuariennes: dont le risque lié aux inondations. Le LIDAR aéroporté est un système laser qui permet de balayer à grande vitesse un territoire pour en produire un modèle en 3 dimensions composé de points. Sur l'estuaire de la Seine, les données acquises par le GIP Seine-Aval couvrent 1 100 km², avec une densité de 3 à 15 points par m² ce qui représente un nuage de plus de 11 milliards de points mesurés.

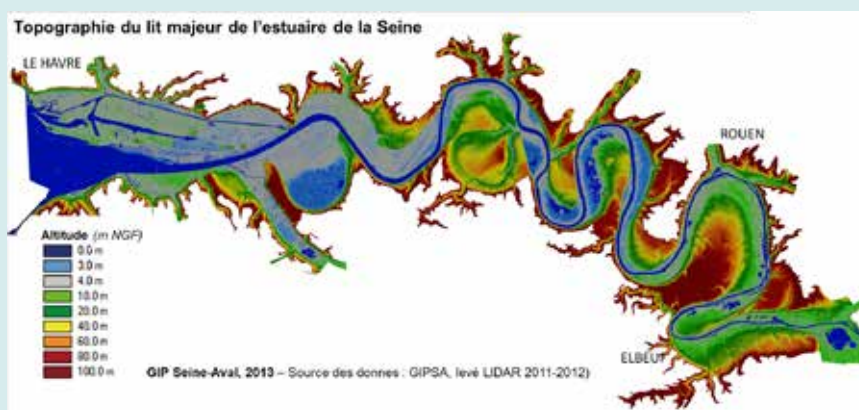


FIGURE G Topographie du lit majeur de la Seine (levé LIDAR).

Dans le contexte de plaine alluviale d'un grand fleuve soumis à marée comme la Seine, le risque inondation est lié au débordement du fleuve vers le lit majeur. Grâce aux données du projet « LIDAR estuaire de la Seine », les acteurs du territoire disposent maintenant d'une information précise sur la topographie, permettant de mener les études destinées à prendre en compte ces risques dans leurs stratégies d'aménagement. Ces données ont notamment été utilisées par le GPMR pour l'étude de classement de ses digues et par la Métropole Rouen Normandie dans le cadre des études réalisées pour l'aménagement de l'éco-quartier Flaubert.

Analyse statistique et modélisation des niveaux d'eau

L'étude « définition de scénario et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation en Estuaire de Seine » a débuté en 2012. Cette étude avait pour objectif de mettre en place un référentiel de connaissance et de données faisant consensus auprès des acteurs de l'estuaire de la Seine. En fonction de leurs natures, ces données sont utilisées à différents niveaux dans les études des acteurs de l'estuaire. Les données statistiques sont par exemple utilisées pour dimensionner les scénarios à étudier alors que les données issues du modèle peuvent quant à elle être utilisées pour forcer des modèles locaux. Dans le cadre de l'étude de dangers inondation des ouvrages du Grand Port Maritime du Havre concernant la digue de protection de la zone estuaire nord, les données LIDAR, les données statistiques ainsi que des sorties du modèle TELEMAC ont été utilisées pour définir l'emprise des inondations sur la réserve naturelle en cas de défaillance de la digue [FIGURE H ; ANTEA, 2015]. La communauté de commune Caux Vallée de Seine, la communauté de l'Agglomération Havraise ont également eu recours à ces données dans le cadre d'étude du risque inondation.

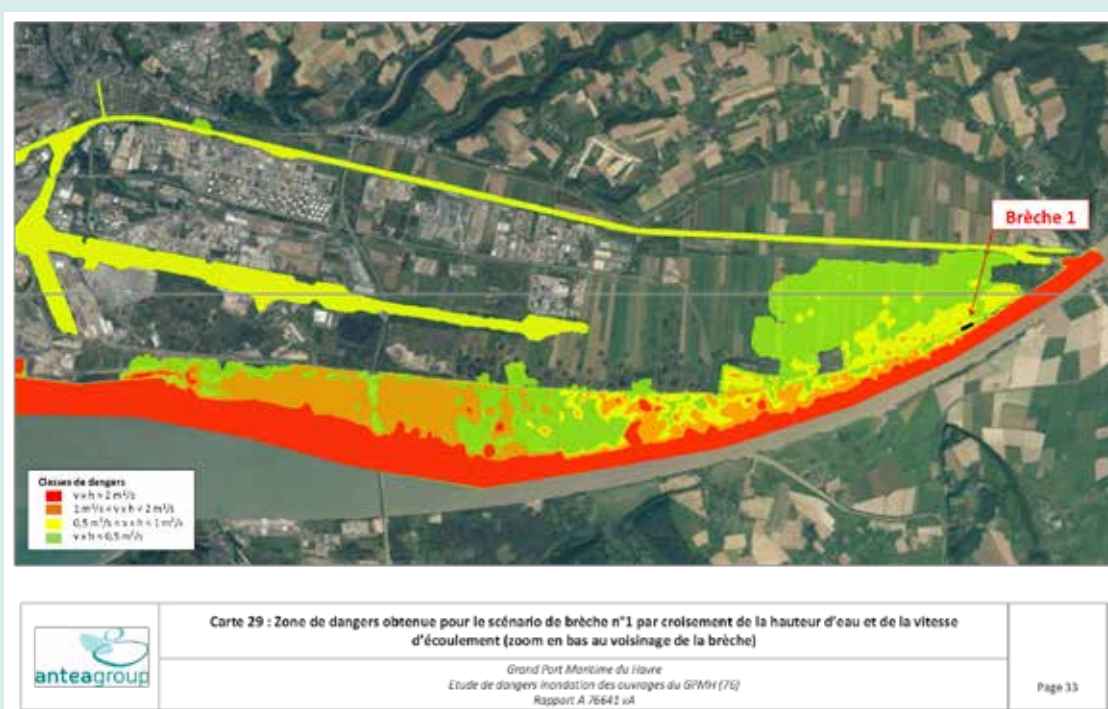


FIGURE H Exemple d'utilisation de sorties du modèle pour une étude de danger.

CONCLUSION

Les travaux entrepris par le GIP Seine-Aval sur la problématique inondation s'appuient sur la connaissance des événements historiques, le traitement statistique des données de forçages et la modélisation de scénarios de hautes-eaux, notamment dans le contexte de changement climatique. Le croisement et la synthèse de ces divers éléments permettent d'apporter un éclairage aux acteurs concernés par la gestion des inondations en estuaire de la Seine, qu'elles soient liées au débordement de la Seine ou à une submersion marine.

La documentation des inondations historiques a permis la définition d'une **typologie des inondations**: événements fluviaux, maritimes et fluvio-maritimes. Cette typologie met en avant le rôle prépondérant de la marée dans la survenue et la gravité des inondations estuariennes. En effet, ce forçage détermine le niveau d'eau maximal atteint, ainsi que la dynamique de l'inondation (durée et récurrence des débordements). Son influence sera cependant moindre à l'amont de Rouen pour les événements fluviaux caractérisés par un très fort débit de la Seine. Dans ce cadre, des **zones de débordements préférentielles** ont été identifiées et associées à la typologie des inondations. La sensibilité de l'amont aux événements fluviaux est forte, alors que les débordements à l'aval sont conditionnés par les conditions marines et météorologiques. Les secteurs intermédiaires sont touchés par les trois types d'inondations.

Les **périodes de retours** associées aux forçages et aux niveaux d'eau sont des paramètres statistiques mobilisés par les gestionnaires pour caractériser l'aléa. Dans le cas de l'estuaire de la Seine, un consensus autour de la définition de ces valeurs est difficile à obtenir. Pour les forçages, la définition d'une période de retour nécessite de bien prendre en compte les évolutions du milieu. Par exemple, le calcul des périodes de retour des débits de la Seine doit prendre en compte la mise en place des ouvrages de régulation du débit au cours du xx^e siècle. En ce qui concerne les hauteurs d'eau, l'évolution de l'influence de chacun des forçages au sein l'estuaire ne permet pas l'association d'une période de retour à un événement donné pour l'ensemble de l'estuaire, mais seulement à l'échelle d'une boucle.

La définition des **niveaux de référence** permet aux gestionnaires de caractériser un aléa et les enjeux associés. Le choix de ces niveaux étant un élément central des politiques de gestion du risque, il doit s'appuyer sur une compréhension fine des spécificités de la zone d'étude. Ce choix peut s'appuyer

sur des niveaux d'eau historiques caractérisés par leur période de retour ou **ii)** sur les niveaux obtenus par simulation d'événements théoriques définis par une combinaison de forçages de période de retour donnée. Dans le cas de l'estuaire de la Seine et pour un événement de référence comme celui de la crue de 1910, ce choix méthodologique est déterminant. En effet, les résultats des simulations pour les conditions hydrologiques de la crue de 1910¹ sur la morphologie actuelle montrent des niveaux d'eau bien inférieurs à ceux observés à l'époque (différence de l'ordre de 50 cm à Rouen). Ceci s'explique par des écoulements amont-aval facilités par l'aménagement de l'estuaire au cours du xx^e siècle.



Le **changement climatique** est actuellement pris en compte dans les politiques de gestion du risque inondation par ses effets sur les niveaux d'eau et sur les forçages. En l'état des connaissances, l'intensité et la fréquence des événements extrêmes (tempêtes, crues) ne semblent pas évoluer. En revanche, **la hausse du niveau marin** observée au Havre au cours du xx^e siècle s'accroîtra dans les décennies à venir. L'impact de cette élévation aura des répercussions sur l'ensemble de l'estuaire, avec des modifications des niveaux de pleine mer. Pour les débits faibles et moyens, l'élévation du niveau marin serait intégralement retranscrite tout au long de l'estuaire. Pour des débits de crue, malgré des niveaux de pleine mer plus élevés, l'impact de l'élévation du niveau marin vers l'amont de l'estuaire serait moindre, mais non négligeable (50-60 % à Rouen pour un débit de $2\,000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ contre 100 % pour un débit de $400\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$).

1. Pour un débit de la Seine à Poses considéré à $3\,000\text{ m}^3/\text{s}$, sachant que cette valeur est discutée.

Les différents éléments présentés dans ce fascicule ont déjà été mobilisés pour la gestion de la problématique inondation dans l'estuaire de la Seine, essentiellement pour la définition de l'aléa dans un cadre réglementaire (TRI, PPRL, études de danger,...) [Encart n° 8 - La valorisation des connaissances et des données du GIP Seine-Aval pour la gestion du

risque inondation en estuaire de Seine]. Associés aux enjeux humains, économiques ou environnementaux présents tout au long l'estuaire de la Seine, cette connaissance fine de l'aléa est déterminante pour une bonne gestion du risque inondation.



ABRÉVIATIONS

ANR : Agence Nationale pour la Recherche

CETMEF : Centre d'Etudes Techniques Maritimes Et Fluviales

CMH : Cote Marine du Havre

DDTM : Direction Départementale des Territoires et de la Mer

DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

EPRI : Évaluation Préliminaire des Risques d'Inondation

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

GIP : Groupement d'Intérêt Public

GPMH : Grand Port Maritime du Havre

GPMR : Grand Port Maritime de Rouen

IGN : Institut National de l'information Géographique et forestière français

LEGOS : Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales

LIDAR : Light Detection And Ranging

LIENSS : Littoral ENvironnement et Sociétés

PAMM : Plan d'Action pour le Milieu Marin

PAPI : Programme d'Actions de Prévention des Inondations

PGRI : Plan de Gestion des Risques d'Inondation

PLU : Plan Local d'Urbanisme

PPRI : Plan de Prévention du Risque Inondation

PPRL : Plan de Prévention des Risques Littoraux

SCAMPEI : Scénarios Climatiques Adaptés aux zones de Montagnes : Phénomènes extrêmes, Enneigement et Incertitudes

SCOT : Schéma de COhérence Territorial

SDAGE : Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux

SHOM : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

SLGRI : Stratégie Locale de Gestion des Risques Inondation

SNGRI : Stratégie Nationale de Gestion des Risques d'Inondation

SONEL : Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales

SPCSACN : Service de Prévision des Crues Seine Aval et fleuves Côtiers Normands

TRI : Territoire à Risque important d'Inondation

UMR : Unité Mixte de Recherche

VNF : Voies Navigables de France

GLOSSAIRE

Aléa : Événement (naturel ou humain) potentiellement dangereux.

Anafont : Courant chaud ascendant incliné vers l'arrière par rapport au front, dont le passage génère des pluies intenses et une brusque rotation du vent et des rafales.

Cote Marine du Havre (CMH) : Plan de référence des cartes marines se situant à $-4,38$ m par rapport au zéro NGF (1969).

Crue : Augmentation du débit d'un cours d'eau dépassant plusieurs fois son débit moyen. (vs Étiage*).

Décote : Diminution du niveau de la surface de l'eau du fait de phénomènes météorologiques. (vs Surcote).

Enjeu : Ensemble de personnes et de biens pouvant être affectés par un aléa.

Étiage : Qualifie la période de l'année où un cours d'eau atteint son débit le plus bas. (vs Crue).

Forçage : Processus (en général physique) agissant sur le milieu et provoquant des mouvements ou des changements d'état.

Hydrodynamique : Science qui étudie le mouvement des eaux.

Inondation : Submersion de terrains par débordement d'un cours d'eau, ruissellement ou submersion marine.

Lit majeur : Espace correspondant à la plaine inondable d'un cours d'eau sans les aménagements. Il est limité par l'emprise des crues exceptionnelles.

Lit mineur : Espace occupé par l'écoulement d'un cours d'eau, hors événements hydrologiques exceptionnels. Il est séparé du lit majeur par des berges et dans le contexte estuarien, il inclut la zone intertidale.

Maillage : Discrétisation spatiale d'un milieu continu, permettant de le simplifier.

Modèle : Ensemble d'équations permettant de reproduire analytiquement le fonctionnement d'un système.

Période de retour : Durée (au sens statistique) entre deux occurrences de même intensité pour un événement. Par exemple, une crue décennale a chaque année 10 % de chance de se produire.

Risque : Confrontation d'un aléa et d'une zone géographique présentant des enjeux.

Surcote : Augmentation du niveau de la surface de l'eau du fait de phénomènes météorologiques. (vs Décote).

Thalweg : Ligne reliant les points les plus bas d'un cours d'eau ou d'une vallée.

Vulnérabilité : Niveau de conséquence prévisible d'un aléa sur des enjeux. Différentes actions peuvent la réduire en atténuant l'intensité de certains aléas ou en limitant l'exposition des enjeux.

BIBLIOGRAPHIE

- ANTEA, 2015. **Etudes de dangers inondation des ouvrages du Grand Port Maritime du Havre – Digue de protection de la zone estuaire nord.** Rapport réalisé pour le Grand Port Maritime du Havre, 48p.
- 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, 2013a. **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, 2013b. **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, 2013c. **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.
- Caspar R., Costa S., Jakob E., 2007. **Fronts froids et submersions de tempête dans le nord-ouest de la France: Le cas des inondations par la mer entre l'estuaire de la Seine et la baie de Somme.** La Météorologie n° 57, 37-47pp
- CETMEF, 2013. **Analyse des surcotes extrêmes le long des côtes métropolitaines.** 128p.
- Cœur D., 2012. **Guide méthodologique pour la collecte des informations historiques sur les inondations.** Rapport du MEDDTL/DGPR/SRNH, 40p.
- Degué M. 2012. **Compte Rendu de fin de projet, Projet ANR-08-VULN-0009-01 SCAMPEI.** 20p.
- DDE76, 1992. **Etude des inondations en basse vallée de Seine (Seine-Maritime).** 73p.
- DDTM76, 2014. **Cartographie des surfaces inondables et des risques – rapport de présentation.** Directive inondation – Bassin Seine-Normandie – Territoire à Risque Important d'Inondation du Havre, 23p. et annexes cartographiques
- DREAL-HN, 2014. **Cartographie des surfaces inondables et des risques inondations – rapport explicatif.** Directive inondation – Bassin Seine-Normandie – Territoire à Risque Important d'Inondation Rouen-Louviers-Austreberthe, 48p. et annexes cartographiques
- DRIEE-IDF, 2014. **Plan de gestion des risques inondations 2016-2021 – bassin Seine-Normandie.** Document de consultation du public, 153p.
- Ducharne A. 2009. **Programme GICC, Rapport de fin de contrat du Projet RExHySS.** 297p.
- El Abida H., Allain S., Bacq N., Chaïb J., Fisson C., Gonçalves-Ladiray K., Fritier N., Larchevêque E., Macur O., Tanguy J., 2010. **Le risque inondation: conditions de déclenchement et perspectives.** Fascicule Seine-Aval n° 2.3, 48p.
- Fisson C., Lemoine J.P., Gandilhon F., 2014. **Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine – Synthèse.** Etude réalisée par ARTELIA pour le compte du GIP Seine-Aval, 31p.
- Foussard V. (coord.), Cuvilliez A., Fajon P., Fisson C., Lesueur P., Macur O., 2010. **Évolution morphologique d'un estuaire anthropisé de 1800 à nos jours.** Fascicule Seine-Aval n° 2.3, 43p.
- GIEC, 2013. **Résumé à l'intention des décideurs, Changements climatiques 2013: Les éléments scientifiques.** Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [sous la direction de Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York (État de New York), États-Unis d'Amérique. 34p.

Publication Seine-Aval

Article scientifique, thèse

Autre publication

Site web

- GIP Seine-Aval, CODAH, DREAL-HN, GPMH, GPMR, ORMES, SHOM, 2013. **Niveaux d'eau historiques pour les crues et les tempêtes dans l'estuaire de la Seine.** Base de données, mise à jour juillet 2013.
- GIP Seine-Aval, 2013. **Localisation et altimétrie des murets anti-inondation le long de l'estuaire de la Seine.** Note + base de données.
- Goutx D. & Lacaze Y., 2008. **Relire les jaugeages de la crue de la Seine en 1910 à la lumière des mesures récentes à l'ADCP.** Actes du congrès SHF-MEDAD « Mesures hydrologiques et incertitudes » d'avril 2008, 8p.
- GPMR, 2015. **Annuaire des marées 2015.** 248p.
- Gras M.C. & Garnier E., 2013. **Contre vents & marées : les tempêtes dans l'aval de la Seine entre 1750 et 1930.** Fascicule Seine-Aval n° 2.9, 36p.
- Hébrard A. & Piney S., 2015. **Chantier d'intérêt commun : prévision des inondations en zone estuarienne, l'exemple du tronçon Seine aval.** Note méthodologie, 10p.
- Jouzel (direction), Ouzeau G., Déqué M., Jouini M., Planton S., Vautard R., 2014. **Le climat de la France au XXI^e siècle, volume 4, scénario régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer.** Rapports, Direction générale de l'Énergie et du Climat, Ministère de l'Écologie, du développement durable et de l'énergie. 62 p.
- Lacaze Y., Raimbault E., Chesneau S., Silva J.P., Chaelon C., 2013. **Analyse de la cohérence des données hydro-métriques pour la validation des débits de la crue de 1910 à Paris ou de la valeur du jaugeage.** Actes du congrès SHF « Hydrométrie » du 15-16 mai 2013, 10p.
- 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.
- Letortu P., 2013. **Le recul des falaises crayeuses haut-normandes et les inondations par la mer en Manche centrale et orientale : de la quantification de l'aléa à la caractérisation des risques induits.** Doctorat de l'Université de Caen Basse-Normandie, 408p.
- Letortu P., Costa S., Cantat O., Planchon O., 2012. **Conditions météo-marines responsables des inondations par la mer en Manche orientale française.** Congrès SHF « Événements extrêmes fluviaux et maritimes » Paris, 1-2 février 2012, 8p.
- MEDDE-DGPR & IRSTEA, 2015. **Base de données historiques sur les inondations (BDHI).** [en ligne] <http://bdhi.fr>
- MEDDE, 2014. **Stratégie nationale de gestion des risques d'inondation.** 22p.
- MEDTL, 2011. **L'évaluation préliminaire des risques d'inondation 2011 – bassin Seine-Normandie.** 544p.
- Nouailhac-Pioch M. & Maillet M., 1910. **Monographie de la crue de janvier-février-mars 1910.** Commission des inondations, 62p.
- Seine Grands Lacs, 2015. **Limiter la montée des eaux.** [en ligne] <http://www.seinegrandslacs.fr/centenaire-de-la-crue-191084/limiter-montee-eaux>
- SHOM, 2012. **Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique).** 160p.
- SONEL, 2015. **Station 'Le Havre'.** [en ligne] <http://www.sonel.org/>

TABLES DES ILLUSTRATIONS

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Repères de crue sur le pilier sud-ouest de la chapelle Ste Catherine de Grammont (Rouen)	6
Figure 2: Répartition du nombre de coups de vents (et parfois inondations consécutives) engendrant des dégâts (de 1750 à 1940)	8
Figure 3: Submersions marines recensées entre Le Havre et la baie de Somme, de 1950 à 2010	8
Figure 4: Enveloppe des événements de hautes-eaux des xx et xxi ^e siècles	9
Figure 5: Chronique de l'inondation de mars 2001 à Rouen	10
Figure 6: Niveau d'eau atteint à Rouen et au Havre pour les principaux événements maritimes	11
Figure 7: Chronique de l'inondation de février/mars 1990 à Rouen	11
Figure 8: Chronique de l'inondation de janvier/février 1995 à Rouen	12
Figure 9: Mesure des niveaux d'eau dans l'estuaire de la Seine	14
Figure 10: Distribution probabiliste et période de retour des niveaux d'eau observés dans l'estuaire de la Seine à pleine mer	16
Figure 11: Statistiques journalières des débits de la Seine à Poses entre 1941 et 2013	18
Figure 12: Profils en long des amplitudes des vents moyens (m/s)	19
Figure 13: Niveaux de référence considérés pour l'aléa 'submersion marine' du TRI Rouen-Louviers-Austreberthe	21
Figure 14: Niveaux de référence considérés pour l'aléa 'submersion marine' du TRI Rouen-Louviers-Austreberthe	23
Figure 15: Ligne d'eau maximale pour les scénarios SC1, 2 et 3	27
Figure 16: Ligne d'eau maximale pour les scénarios SC4, 5 et 6	27
Figure 17: Ligne d'eau maximale et niveau des berges	28
Figure 18: Exemples de marégrammes modélisés et comparaison à la ligne d'eau décennale et centennale	29
Figure 19: Projection de l'élévation du niveau moyen des mers à l'échelle du globe, pour différents scénarios	30
Figure 20: Evolution des débits mensuels simulés pour la Seine à Poses	30
Figure 21: Niveau moyen annuel de la mer au Havre	32
Figure 22: 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 m ³ .s ⁻¹ et un coefficient de marée de 78	32
Figure 23: 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 1 200 m ³ .s ⁻¹ et un coefficient de marée de 78	32
Figure 24: Impact de l'élévation du niveau marin sur les niveaux de pleine mer dans l'estuaire de la Seine	34

Figure A : Comparaison des enveloppes de crues du xx ^e siècle [DDE76, 1992]	7
Figure B : Carte de vigilance du 21 février 2015 à 16h00	15
Figure C : Aménagements des Grands Lacs de Seine	17
Figure D : Périmètres des TRI et des stratégies locales à mettre en place le long de l'estuaire de la Seine	22
Figure E : Localisation et altimétrie des murets anti-inondation identifiés le long de l'estuaire de la Seine	24
Figure F : Bathy-topographie et maillage du modèle de l'estuaire de la Seine	25
Figure G : Topographie du lit majeur de la Seine (levé LIDAR)	35
Figure H : Exemple d'utilisation de sorties du modèle pour une étude de danger	36

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Caractéristiques des principales inondations historiques dans l'estuaire de la Seine	9
Tableau II : Périodes de retour associées au débit de la Seine et de ses affluents (m ³ /s)	18
Tableau III : Niveau de marée théorique au Havre	19
Tableau IV : Périodes de retour de la surcote océanique de pleine mer au Havre	19
Tableau V : Périodes de retour du vent moyen (sur 3h et ramené à 10 m) à l'embouchure de la Seine	20
Tableau VI : Effet du vent sur le gonflement de l'estuaire à Rouen (en cm)	20
Tableau VII : Caractéristiques des scénarios modélisés et estimation de la cote atteinte	26
Tableau VIII : Statistiques sur le niveau moyen de la mer au marégraphe du Havre (en m CMH)	32
Tableau A : Données mobilisées pour la construction du modèle	25
Tableau B : Présentation des conditions hydrodynamiques simulées	33

Crédit photo :
sauf mention contraire : GIP Seine-Aval

Conception/réalisation :
www.partenairesdavenir.com

FASCICULES SEINE-AVAL

FASCICULES SERIE 3

- 3.1 L'estuaire de la Seine : état de santé et évolution
- 3.2 Qualité des eaux de l'estuaire de la Seine
- 3.3 Fonctionnement hydro-sédimentaire de l'estuaire de la Seine
- 3.4 Usages et perceptions de l'estuaire de la Seine par le citoyen : aménager, valoriser, restaurer

FASCICULES À TÉLÉCHARGER SUR : <http://fascicules.seine-aval.fr>

En cas d'utilisation de données ou d'éléments de ce rapport, il doit être cité sous la forme suivante : Fisson C. & Lemoine J.P., 2016.

Les niveaux d'eau en estuaire de Seine : risque inondation et changement climatique. Fascicule Seine-Aval 3.5, 46 p.

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

Le GIP Seine-Aval est financé par :

