

Les inondations en estuaire de Seine

Depuis le début du XX^{ème} siècle, plus de 25 inondations importantes ont été répertoriées dans l'estuaire de la Seine. Nous pouvons citer janvier 1910 comme la crue historique, décembre 1999 pour la tempête du siècle ou février-mars 2020 pour les inondations les plus récentes. Bien que récurrents, les débordements de la Seine présentent des causes, des intensités, des temporalités et des conséquences toujours différentes.

Agence de l'Eau Seine Normandie 2018
© Godier www.normandie-drone.com

Comment appréhender cette complexité des inondations/submersions estuariennes ? Comment aider à mieux anticiper et gérer les futures inondations ? A travers la réalisation d'études précises et rigoureuses, le GIP Seine-Aval et ses partenaires ont décrit, analysé et modélisé les inondations dans l'estuaire de la Seine.

Depuis 2010, les membres du GIP Seine-Aval se sont emparés de la problématique des inondations en estuaire de Seine (de Poses à la mer). Ils ont contribué à la réalisation de plusieurs études qui s'articulent autour de deux axes principaux : 1) l'analyse des événements observés par le passé et 2) la modélisation numérique des phénomènes d'inondation. Ces études **fédèrent les acteurs** en charge de la gestion du risque inondation. Les **connaissances acquises** dans ce cadre **sont partagées et font consensus** ; elles permettent, entre autres, à l'ensemble des acteurs de travailler avec des **hypothèses homogènes** . En estuaire, en lien avec l'influence de la marée jusqu'au barrage de Poses, les débordements de la Seine résultent des interactions entre les apports fluviaux et les conditions météo-marines. Globalement les inondations/submersions

sont donc induites par la **concomitance de débits élevés** de la Seine et de ses affluents et de **conditions marines intenses** . Les conditions marines sont définies comme la somme de la marée astronomique et des surcotes à la côte du niveau marin (générées par les conditions météorologiques, vents et pression

Une prise en compte collective du risque inondation

atmosphérique, à l'échelle du système Atlantique/Manche/Mer du Nord). Selon la prépondérance de l'un ou l'autre de ces forçages, les submersions affectent différents secteurs de l'estuaire :

- Lorsque les débits sont importants, une montée progressive

et durable des niveaux d'eau est observée à l'amont : il s'agit des **événements de type fluviaux** .

- Lorsque les conditions marines sont intenses, l'aval est exposé : nous parlons d' **événements de type marins** . Ils touchent de manière plus courte et soudaine la partie aval de l'estuaire.
- Lorsque les conditions marines et les débits sont intenses : il s'agit des **événements fluvio-maritimes** , ces événements affectent majoritairement le secteur entre Rives-en-Seine et Rouen.

Les conditions de vents et pressions à l'échelle de l'estuaire peuvent également jouer un rôle important : les vents d'Ouest en freinant les écoulements de la Seine vers la baie ont tendance à faire "gonfler" l'estuaire alors que les dépressions ont tendance à élever le niveau du plan d'eau.



➔ Crue de 2018 à l'aval de Rouen

Les inondations se produisent lors de concomitances de débits élevés et de conditions marines intenses

La figure 1 présente les niveaux maximaux observés en estuaire depuis le début du XX^e siècle, selon le type d'évènement. Cette illustration met notamment en avant le caractère fluvio-maritime et l'importance historique des deux événements de 2020 sur le secteur Duclair-Rouen.

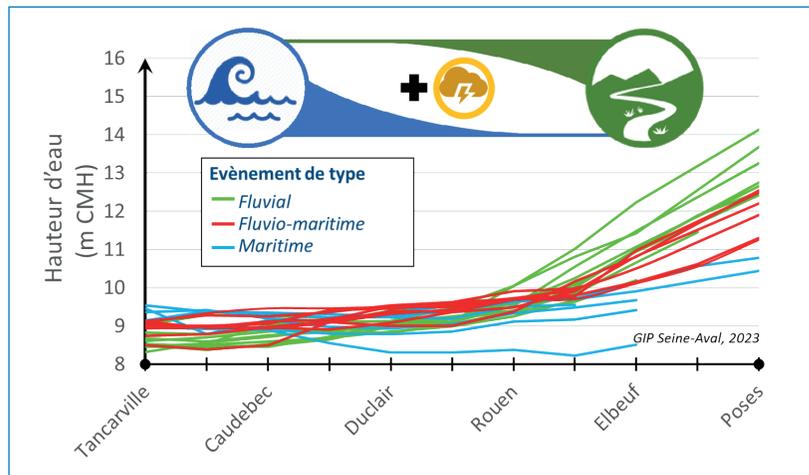


Figure 1 : Ligne d'eau maximale atteinte pour les principaux débordements de l'estuaire de Seine depuis 1900.

L'analyse des événements passés

L'analyse statistique des événements passés permet de caractériser leurs probabilités d'occurrence et ainsi d'associer à chaque caractéristique des inondations une "période de retour" donnée (ex. débit de la Seine, surcote en baie, hauteur d'eau en un point). Cette notion définit la probabilité



Crue de 1910 à Rouen

de survenue d'un aléa, ici l'atteinte d'un niveau d'eau : un événement de période de retour 10 ans aura ainsi 1 chance sur 10 de se produire chaque année. Ces analyses statistiques, menées en partenariat avec le Service de Prédiction des Crues Seine-Aval et Côtiers Normands, ont été réalisées sur les données de chacun des 17 marégraphes mis en œuvre par HAROPA dans l'estuaire. Les résultats de cette étude permettent de définir à l'échelle de l'estuaire les lignes d'eau associées à ces différentes périodes de retour (Figure 2).

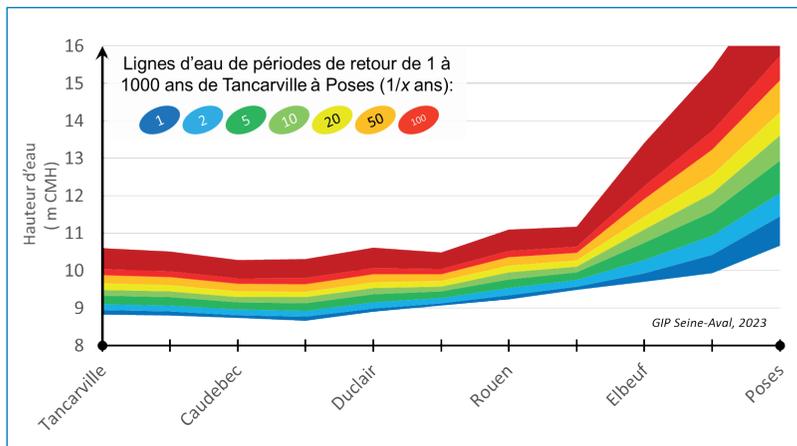


Figure 2 : Évolutions des lignes d'eau de périodes de retour de 1 à 1000 ans de Tancarville à Poses.

Dans un futur proche, les événements extrêmes seront plus fréquents en raison des effets du changement climatique

La comparaison de ces niveaux de l'aval vers l'amont de l'estuaire, à la topographie du lit majeur de

la Seine permet d'estimer la vulnérabilité du territoire (Figure 3). Cette comparaison met en avant les zones situées sous les différents niveaux. Cette représentation simplifiée ne tient pas compte de la dynamique des inondations (objet de la modélisation). Avec cette représentation le marais vernier apparaît principalement situé sous la cote de période de retour 20 ans qui présente une chance sur 20

chaque année d'être atteinte. Toutefois, il convient de souligner que ces analyses, basées uniquement sur l'analyse des événements passés, ne peuvent pas être utilisées en tant que telles pour l'étude des perspectives futures et effets du changement climatique (élévation du niveau marin et augmentation des débits des crues de la Seine).

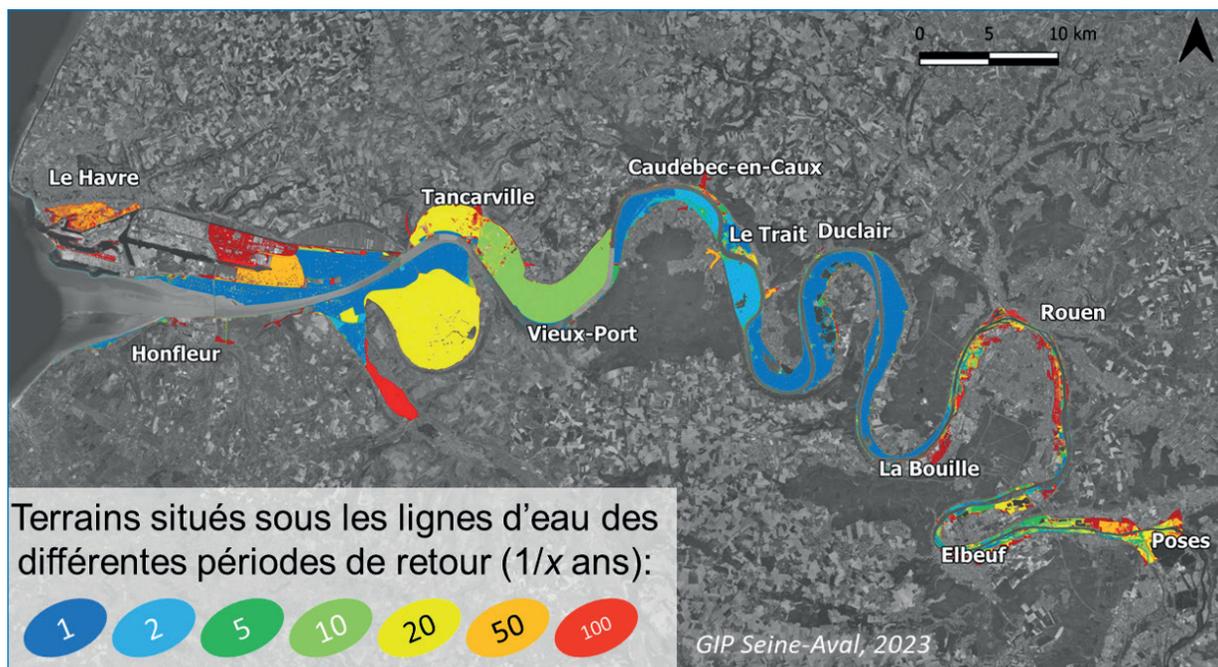


Figure 3 : Terrains situés sous les cotes topographiques des périodes de retour de 1 à 1000 ans et connectés à la Seine.

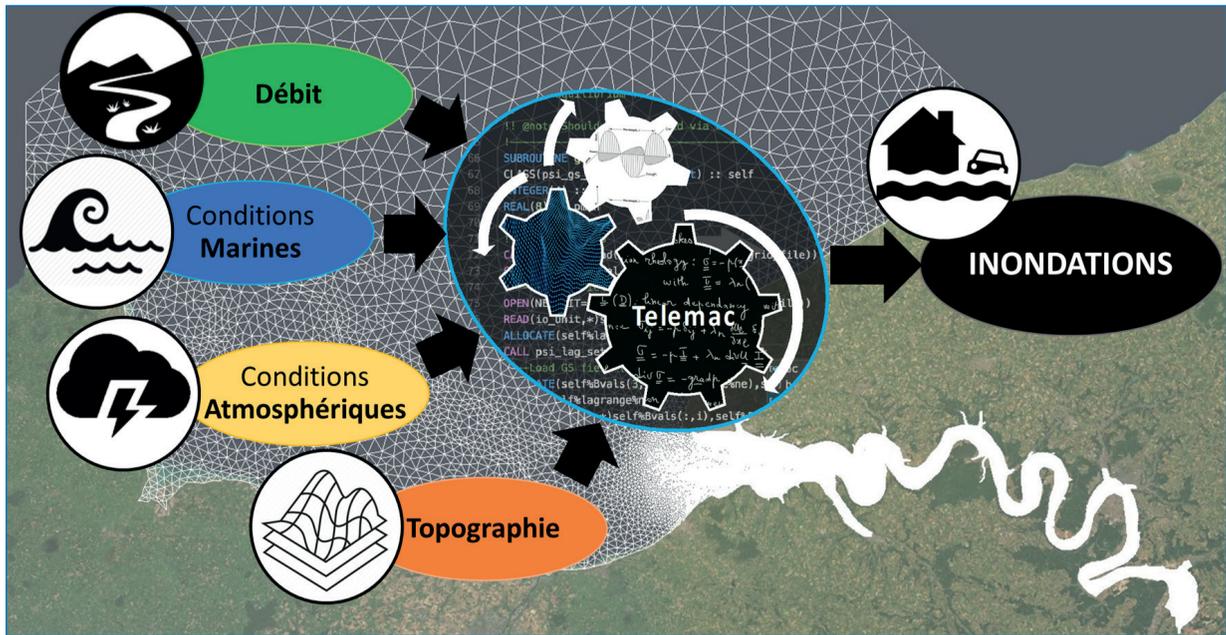


Figure 4 : Principe de la modélisation des inondations dans la vallée de la Seine

La modélisation des inondations

Pour compléter la compréhension des débordements de la Seine et notamment appréhender et anticiper les effets d'événements jamais observés, un modèle numérique a été développé. Cet outil permet de simuler des scénarios rétrospectifs (type crue de 1910) et prospectifs, notamment avec la prise en compte des effets du changement climatique. Il schématise les 175 derniers kilomètres de la Seine de Poses jusqu'à la mer, et couvre une superficie de 1000 km² de plaine potentiellement inondable. Le modèle prend en compte la baie de Seine afin d'y simuler les processus de surcote, mais il n'est pertinent et valide qu'en estuaire. Les écoulements dans l'estuaire sont simulés en respectant la physique et l'hydrodynamisme estuarien. En effet, le modèle intègre l'ensemble des informations topographiques disponibles à cette échelle : fossés, remblais, murets, etc. Il considère les principaux forçages* à l'origine

des débordements, à savoir ceux relatifs 1) au débit de la Seine et de ses principaux affluents ; et 2) aux paramètres météo-océaniques (vent, pression atmosphérique et *surcote marine**). L'hydrodynamisme simulé par le modèle a été confronté avec les observations récentes pour 6 événements représentatifs des différentes inondations observées en estuaire. Cette confrontation a en particulier porté sur la mise en regard des hauteurs d'eau et des surfaces inondées, observées et simulées. Le niveau de validité de l'outil est satisfaisant avec une incertitude sur les hauteurs d'eau simulées inférieure à 10 cm (à comparer aux incertitudes sur la topographie LIDAR* estimée à 6 cm).

Dans un premier temps le modèle a permis de rejouer des conditions similaires à celle de la **crue de janvier 1910 et de la tempête de décembre 1999, avec et sans prise en compte d'une élévation du niveau marin de 1 m**. Le modèle a ensuite été utilisé pour simuler des scénarios fictifs de *périodes de retour** 30 ans et 100 ans sur quatre secteurs de l'estuaire, respectivement qualifiés de fluvial (Elbeuf), fluvio-maritime amont (Rouen), fluvio-maritime aval (Heurteauville) et maritime (Tancarville). L'objectif de ces simulations est de **quantifier**

la **vulnérabilité du territoire face à des événements plausibles, mais jamais observés de débordements**. Les simulations de période de retour 30 ans ont par ailleurs servi de base à l'étude du rôle des murets anti-inondations et ceux de période de retour 100 ans à l'étude de l'impact potentiel d'une élévation du niveau marin de 60 cm et 1 m. Concernant, les scénarios plus extrêmes de périodes de retour 100 ans, il est important de noter que ces scénarios sont plausibles et réalistes. En effet, ils sont associés à des conditions de forçages des débits et de la météo marine du même ordre de grandeur que celles des niveaux maximaux observés.

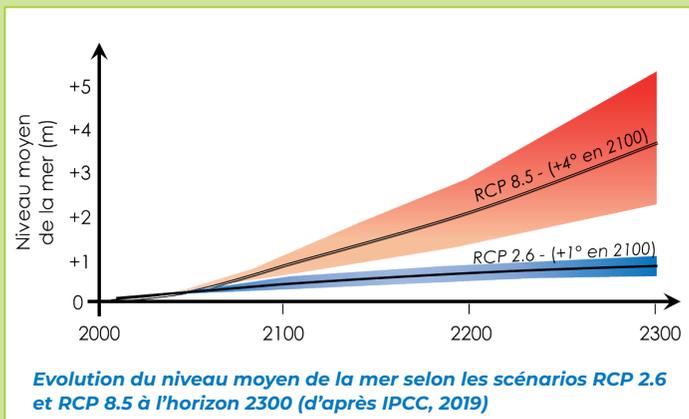
Le changement climatique va accroître la vulnérabilité du territoire :
Tempête de 1999 :
+ 8000 ha inondés
avec une élévation du niveau marin de 1 m

Les effets du changement climatique

Les derniers rapports du GIEC sont catégoriques, à l'échelle mondiale, les risques d'inondation/submersion vont augmenter. Cette augmentation est liée à i/ l'élévation du niveau marin et à ii/ l'augmentation en intensité et fréquence des événements météorologiques extrêmes.

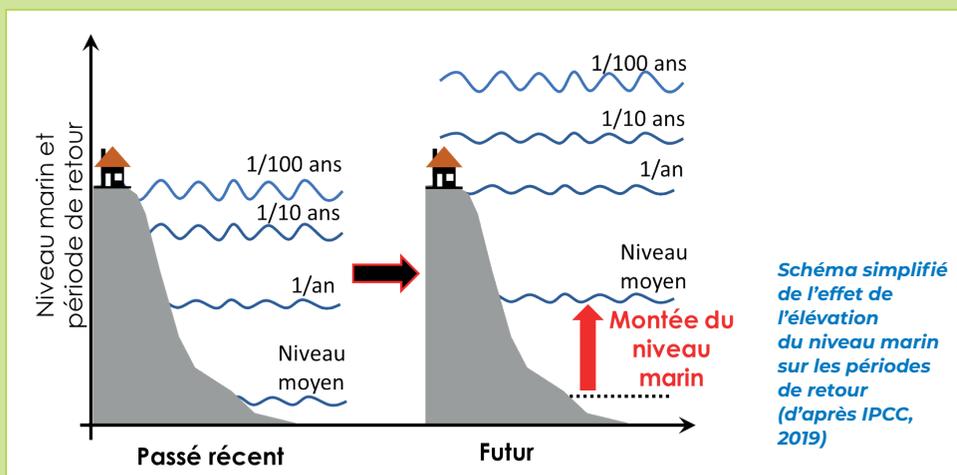
L'augmentation du niveau marin devrait être, selon les scénarios de réduction des émissions de gaz à effet de serre et selon les différentes modélisations, comprise entre +0,3 et +1 m à l'horizon 2100. Les évolutions des pratiques et les observations récentes tendent cependant à montrer que nous nous situons sur la trajectoire pessimiste et que l'élévation du niveau marin devrait être comprise entre 0,8 et 1 m d'ici la fin du siècle.

Il est important de noter que des scénarios extrêmes, peu probables (selon IPCC, 2021), impliquant une déstabilisation de la calotte glaciaire, sont associés à une élévation du niveau marin pouvant dépasser 1,5 m à l'horizon 2100. Ceci étant, il est important de garder à l'esprit que les effets du changement climatique se poursuivront pendant plusieurs siècles, en 2300 le niveau marin pourrait ainsi être 5 m plus élevé qu'à l'heure actuelle. "Une élévation du niveau de la mer supérieure à 15 m ne peut pas être exclue en cas d'émissions de gaz à effet de serre élevées" (IPCC, 2021).



Avec le changement climatique, l'exposition à l'aléa inondation/submersion de l'estuaire de la Seine va augmenter tant en fréquence qu'en intensité !

L'augmentation du niveau marin combinée à la survenue plus fréquente d'événements hydro-météorologiques extrêmes (ex. crues, tempêtes dans IPCC 2019) va fortement accroître le risque inondation sur le territoire. Les résultats présentés dans IPCC 2021 montrent qu'au niveau de l'Europe occidentale les niveaux de périodes de retour centennale actuelle seront observés chaque année aux alentours des années 2050-60.





Muret anti-inondation en bord de Seine

La vulnérabilité du territoire confirmée par le modèle

Les simulations confirment que la majeure partie de l'estuaire, de Poses à la mer, est exposée aux inondations. Selon les secteurs, les forçages atmosphériques, maritimes ou fluviaux ont des effets différents. Les simulations confirment en particulier le rôle important des forçages maritimes et atmosphériques sur une grande partie de l'estuaire. De Rouen à la mer, les débordements sont ainsi largement dépendants de la météo marine rencontrée en baie de Seine. A l'amont de Rouen, ce sont les conditions de débits qui déterminent l'intensité des inondations.

Comme attendu, les murets anti-inondations présents au sommet des berges de la Seine réduisent les débordements localement (Figure 5). Cependant, en limitant l'étalement des eaux dans le lit majeur, ils accentuent globalement les niveaux d'eau pendant les périodes à risque d'inondation. La modéli-

sation de la suppression de l'ensemble des murets montre ainsi logiquement une augmentation des surfaces inondées au droit des zones protégées par les murets, mais également une diminution du niveau d'eau atteint à Rouen d'environ 20 cm pour un événement de période de retour 30 ans.

Ce résultat met en avant **l'intérêt de réfléchir à la création de zones d'expansion qui permettraient**

de laisser l'inondation de la Seine s'étendre latéralement en lit majeur sur des sites identifiés à faibles enjeux. Ceci permettrait par conséquent de réduire les niveaux atteints et les surfaces inondées dans les zones à plus forts enjeux. Ce type de solution pourrait contribuer, par exemple, à limiter l'impact des inondations sur la Métropole rouennaise et sa zone industrialo-portuaire.

Les simulations démontrent l'intérêt de créer des zones d'expansion des submersions afin de s'adapter au changement climatique.

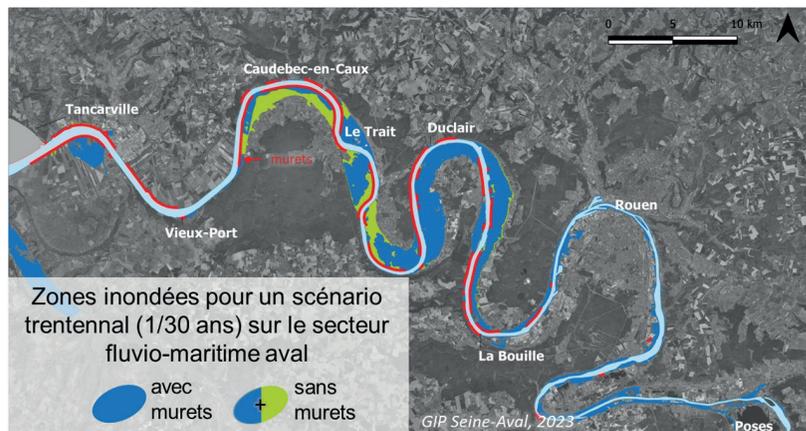


Figure 5 :
Modélisation des zones inondées pour un scénario de période de retour 30 ans sur le secteur fluvio-maritime (Heurteville) avec et sans murets.

Les simulations avec une élévation de 1 mètre du niveau marin (contexte de changement climatique) révèlent l'aggravation à venir de la vulnérabilité du territoire face au risque d'inondations par débordement de la Seine sur de nombreux secteurs (Figure 6). Elles montrent que cette augmentation du niveau marin se répercute sur les niveaux de pleine mer dans l'ensemble de l'estuaire, avec cependant une tendance à l'amortissement de ces impacts vers l'amont pour les scénarios avec des débits élevés. Par exemple, la simulation de la tempête de décembre 1999 avec 1 m d'élévation du niveau de la mer conduit à des inondations plus importantes en termes de surfaces inondées : 11 000 ha avec le niveau marin actuel contre 19 000 ha avec 1 m d'élévation du niveau marin.

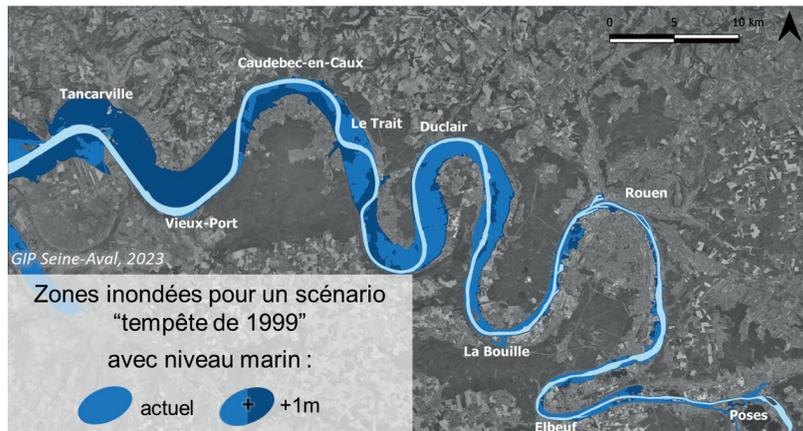


Figure 6 : Modélisation des zones inondées lors de la tempête de 1999 avec et sans élévation du niveau marin de +1m.

L'élévation du niveau marin impactera l'ensemble de l'estuaire de Poses à la mer



Inondation à l'aval de Rouen en janvier 2018

Glossaire

La **période de retour** est la durée (au sens statistique) entre deux occurrences de même intensité pour un événement. Par exemple, une crue de période de retour 30 ans a chaque année 1 chance sur 30 de se produire.

Les **forçages** correspondent aux processus, essentiellement physiques, qui agissent sur le milieu en provoquant des mouvements ou des changements d'état.

Une **surcote marine** est un dépassement « anormal » du niveau de la mer en marée haute ou de son recul en marée basse. Ce dépassement est induit par des conditions météorologiques inhabituelles combinant leurs effets à ceux des marées.

L'acronyme **LiDAR** signifie Light Detection And Ranging. Il s'agit d'une technique de mesure de distance utilisant un laser. Cette technologie a été utilisée depuis un avion afin de mesurer la topographie de l'estuaire de la Seine avec une grande précision.

Vers une gestion conjointe des inondations et des milieux aquatiques dans l'actuel contexte de changement climatique

En quantifiant la vulnérabilité des différents secteurs de l'estuaire aux débordements de la Seine, ces résultats fournissent des éléments de connaissance essentiels pour les collectivités riveraines de la Seine. Ces connaissances permettent également de se projeter dans le futur en contexte de changement climatique (Figure 7) et d'étudier de nouvelles pistes de gestion. Cet exercice est particulièrement utile pour les gestionnaires. En effet, les projections des effets du changement climatique tendent à montrer que les inondations/submersions seront à la fois plus fréquentes mais aussi globalement plus intenses. L'exposition à l'aléa inondation/submersion de l'estu-

aire de la Seine va augmenter tant en fréquence qu'en intensité ! Le modèle sera prochainement mobilisé pour tester l'efficacité de l'ouverture de champs d'expansion des crues sur une baisse de la ligne d'eau en contexte d'inondation. Explorer ce type de solutions fondées sur la nature est d'autant plus intéressant qu'elles permettent également d'améliorer le fonctionnement de l'estuaire et d'accompagner sa restauration écologique. En effet, le développement de zones humides est primordial pour de nombreux organismes aquatiques et participe à l'épuration des eaux. Concilier la prévention des inondations et la gestion des milieux aquatiques et

humides, c'est justement le cœur de la compétence dite GEMAPI, qui a été confiée aux intercommunalités depuis 2018.

Les connaissances sur le risque inondation/submersion développées par le GIP Seine-Aval font consensus et sont utilisées par l'ensemble des acteurs. Néanmoins, comme souvent dans les sciences environnementales, cette connaissance n'est pas figée : elle s'améliore continuellement en réponse aux progrès des observations et des moyens de simulation toujours plus précis et performants. Dans ce cadre, le GIP Seine-Aval initiera de nouveaux projets de recherche sur ce sujet dès 2023.

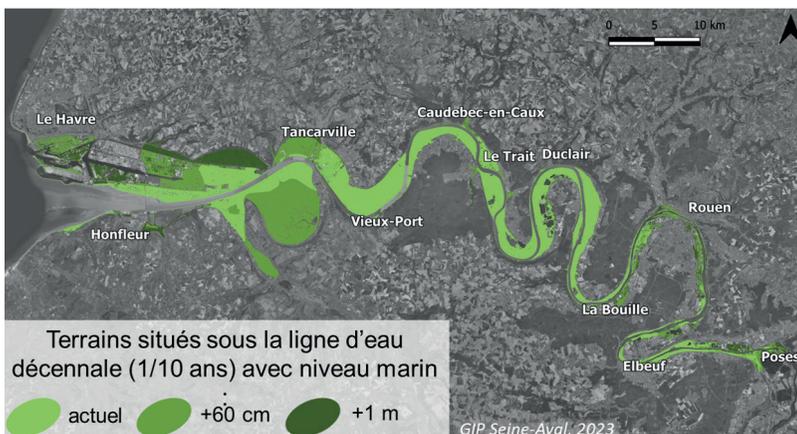


Figure 7 : Illustration des effets potentiels d'une élévation du niveau marin. Surface du lit majeur sous les hauteurs d'eau de période de retour 10 ans, 10 ans + 60 cm et 10 ans + 1 m (ces zones sont rares, souvent confondues avec celles situées sous 10 ans + 60 cm).

Plus d'infos

Ces différents résultats peuvent être délicats à utiliser en raison de la forte technicité des analyses ayant conduit à leurs productions. Afin d'éviter les mauvaises interprétations et utilisations de ces derniers, nous invitons toutes les personnes souhaitant exploiter ces résultats à prendre contact avec le chargé de mission en charge de ces problématiques au GIP Seine-Aval.

Contact :
Jean-Philippe Lemoine
07 45 07 46 66
jplemoine@seine-aval.fr



www.seine-aval.fr/inondations

Ces études sont cofinancées par les acteurs locaux et le fond européen de développement régional

