

# Le Risque inondation

Conditions de déclenchement et perspectives

Fascicules  
Seine-Aval

Coordinateur  
Hamza El Abida





# Le Risque inondation

Conditions de déclenchement et perspectives

Coordinateur : Hamza El Abida(1)

Auteurs : Hamza El Abida(1), Cédric Fisson(1), Sophie Allain(2), Nicolas Bacq(1), Jérôme Chaïb(3), Karine Goncalves-Ladiray(4), Nicolas Fritier(5), Eloi Larchevêque(4), Olivier Macur(6), Jaques Tanguy

Contributeurs : Yann Labiste(7), Nicolas Massei(5), Aurélien Pons(1)

- (1) GIP Seine-Aval
- (2) Institut National de la Recherche Agronomique
- (3) Agence Régionale de l'Environnement de Haute-Normandie
- (4) Direction Départementale des Territoires et de la Mer de la Seine-Maritime
- (5) Université de Rouen, UMR CNRS 6143 M2C
- (6) Grand Port Maritime de Rouen
- (7) Conseil Général de Seine-Maritime

## Sommaire

<b>INTRODUCTION</b>	<b>4</b>	<b>CHAPITRE 3 : COMBINAISON DES FACTEURS INFLUENÇANT LES HAUTES EAUX</b>	<b>27</b>
<b>CHAPITRE 1 : TÉMOIGNAGES D'INONDATIONS</b>	<b>5</b>	Inondations de 1970, 1995 et 2001 : prédominance de la crue	27
La problématique inondation dans l'estuaire de la Seine	5	Inondation de mars 1970	27
L'agglomération de Rouen	5	Inondation de janvier/février 1995	28
L'agglomération du Havre	6	Inondation de mars 2001	28
Duclair	6	Inondations 1990 et 1999 : prédominance des facteurs marins	28
Les autres zones sensibles de la Vallée de Seine	6	Inondation de Février 1990	29
La zone littorale	6	Inondation de janvier 1999	29
Les vallées de la Dives, de la Touques et de l'Orne	6	Approche géographique	29
La seine, témoin du temps	7	<b>CHAPITRE 4 : LA GESTION DU RISQUE INONDATION</b>	<b>31</b>
<i>Rencontre avec les communes riveraines</i>	7	Evolution des principaux enjeux	31
<i>Quand les vitraux nous parlent d'inondations</i>	8	Démographie	31
1910 : la crue du siècle	10	Occupation du sol et plus hautes eaux connues	31
Description générale	10	Politiques de prévention	33
Chronique de la crue	10	<i>L'évolution de la vulnérabilité aux inondations à Tourville-la-Rivière</i>	33
Dégâts et perturbations	12	<i>Le Service de Prévision des Crues</i>	34
Les communications	14	<i>Seine Aval et fleuves Côtiers Normands</i>	36
L'attraction et la mémoire	14	<i>Problématique des PPRi de bord de Seine</i>	36
<i>Chroniques d'inondations</i>	15	Et demain ?	37
<b>CHAPITRE 2 : DESCRIPTION DES FACTEURS INFLUENÇANT LES HAUTES EAUX</b>	<b>16</b>	Conséquences possibles du changement climatique	37
Facteurs hydrologiques	16	<i>La modélisation du changement climatique</i>	38
Contexte climatique	16	Évolution de la vulnérabilité : une approche systémique ?	39
Période d'occurrence	16	<b>CONCLUSION</b>	<b>41</b>
Propagation de l'onde de crue dans le bassin versant de la Seine	16	<b>GLOSSAIRE</b>	<b>42</b>
Typologie des crues	16	<b>ABRÉVIATIONS</b>	<b>43</b>
Les apports latéraux	17	<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>44</b>
Contexte régional	17		
Contribution des apports latéraux	18		
Fluctuation des niveaux piézométriques	18		
Rive gauche, rive droite	18		
Facteur astronomique	20		
Facteurs météorologiques	20		
<i>Quantification de l'évolution spatio-temporelle de la contribution de la nappe de la Craie et des rivières au débit de la Seine aval</i>	21		
<i>Utilisation des marégraphes sur le territoire Seine Aval</i>	22		
Facteurs anthropiques	23		
Ouvrages d'Amfreville/Poses	23		
<i>Fonctionnement du barrage de Poses</i>	24		
Les lacs-réservoirs	24		



**Extrait de : «*La Seine extravagante*»**

par Marc - Antoine GIRARD de SAINT – AMANT (1594-1661), poète rouennais

Le poète apostrophe ainsi la Seine débordante en 1658 (inondation de plus grande ampleur encore que celle de 1910).

*La voilà grosse de cent ponts,  
Par elle réduits à non-estre,  
La voilà haute jusqu'aux monts,  
Qui veut passer par la fenêtre.*

*On ne voit plus d'arbres debout  
Dans toutes les plaines voisines,  
Ta rage a déraciné tout,  
Jusques aux îles, tes cousines.*

*Le temple du beau Quevilly,  
Comme l'église est assailli  
De ta fureur précipitée.*

*Il n'est pas jusques au Robec  
Qui ne veuille trancher du fleuve  
Quoique parfois le moindre bec  
A peine en son onde s'abreuve.*

## Introduction

Le fonctionnement hydrologique de l'estuaire de la Seine est sous l'influence de plusieurs facteurs : *i*) le débit de la Seine avec l'alternance étiage/crue, *ii*) la marée venant du large, *iii*) les apports latéraux provenant des affluents, des eaux souterraines et du ruissellement, *iv*) les paramètres météorologiques (précipitations, vent, pression atmosphérique). La combinaison de ces facteurs est à l'origine d'évènements hydrologiques particuliers (étiages sévères, inondations) dont l'histoire témoigne. Depuis le XIX<sup>ème</sup> siècle, l'aménagement de l'estuaire de la Seine a été essentiellement pensé pour améliorer sa navigabilité et favoriser le développement urbain et industriel dans sa plaine alluviale. La problématique inondation a également influencé l'évolution de l'estuaire et son fonctionnement hydrologique, en favorisant la mise en place d'ouvrages de protection contre les inondations ou de régulation du débit.

Ce fascicule permet d'analyser l'ensemble de ces facteurs naturels et anthropiques, afin de mieux comprendre le fonctionnement hydrologique de l'estuaire de la Seine. C'est également l'opportunité d'apporter une réflexion pour une prise de conscience du risque inondation sur ce territoire et d'en améliorer sa compréhension et sa gestion. En effet, la modification des conditions d'écoulement de l'eau (liée à la réduction des champs d'expansion de crues, à l'imperméabilisation des sols, à l'accélération des transferts d'eau, ...) a un impact sur l'aléa, et la présence d'activités humaines dans le lit majeur accroît les enjeux.

Les aménagements de protection tels les digues, les bassins de retenue ou les murets anti-inondation peuvent encourager l'occupation du lit majeur, car ces ouvrages offrent un sentiment de protection. Malheureusement, comme cela a été prouvé avec la tempête Xynthia qui s'est abattue sur les cotes atlantiques françaises en février 2010, le risque de submersion d'un ouvrage de protection ou sa rupture est toujours possible. Par ailleurs, la gestion du risque doit maintenant prendre en compte les effets possibles du changement climatique, dont certaines projections montrent des modifications importantes du régime hydrologique de l'estuaire.

Ce fascicule traite dans un premiers temps de la réalité du risque d'inondation dans l'estuaire de la Seine (par débordement, ruissellement et remontée de nappes), grâce aux témoignages recueillis auprès de riverains de la Seine ou de ses affluents. Les deuxième et troisième chapitres se focalisent sur le risque inondation par débordement de la Seine avec une rétrospective des inondations en estuaire et une typologie des conditions de déclenchement de ces évènements. La gestion du risque inondation est ensuite abordée, avec une spatialisation des enjeux sur le territoire estuarien et l'évolution de la prise en compte réglementaire du risque inondation. Une perspective du risque inondation en lien avec les changements climatiques est également proposée dans ce dernier chapitre.

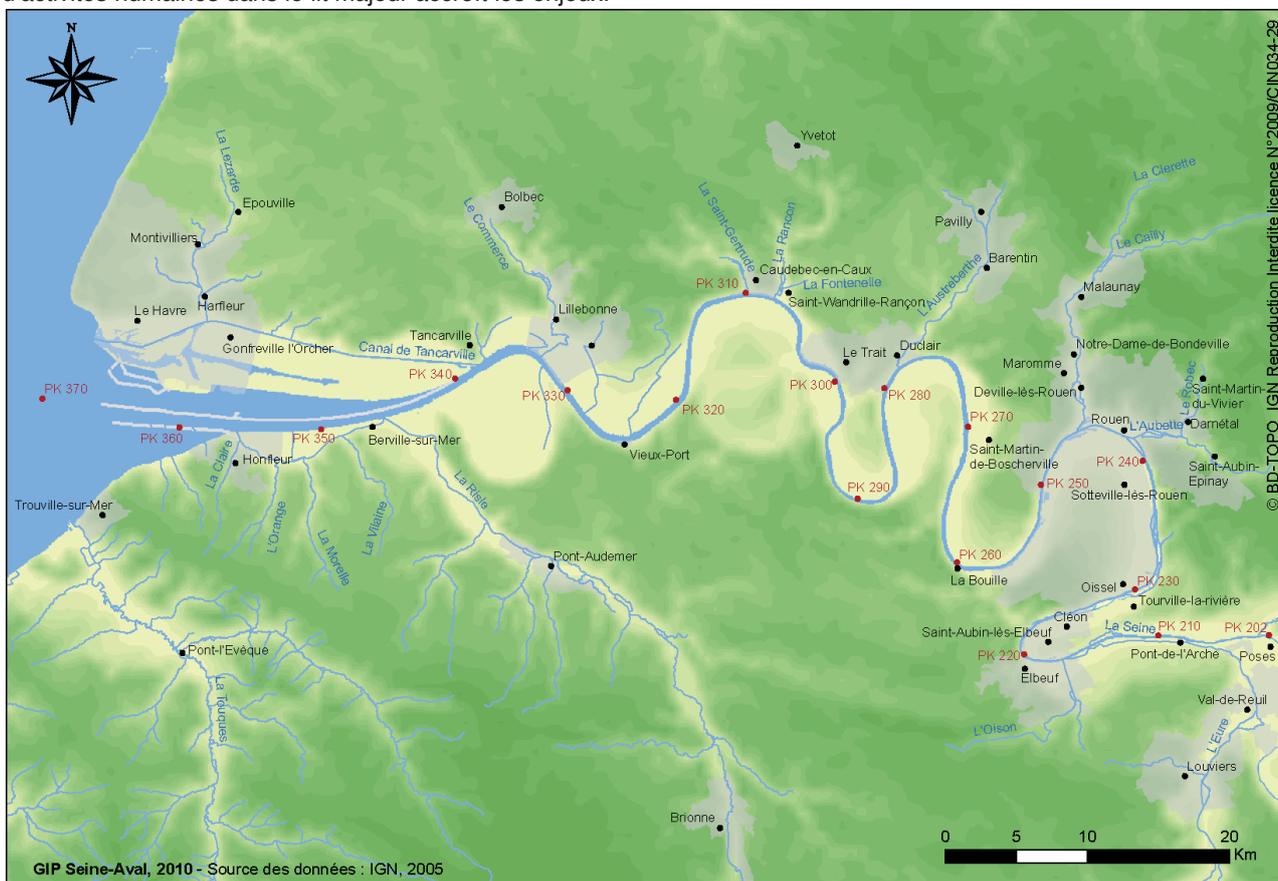


Figure 1 : L'estuaire de la Seine.

## Chapitre 1 : Témoignages d'inondations

### La problématique inondation dans l'estuaire de la Seine

Sur l'ensemble du territoire estuarien, les inondations récentes les plus marquantes sont celles de l'année 1999 et notamment celles qui se sont déroulées au moment de Noël (du 25 au 29 décembre). Elles ont été provoquées par une tempête extrêmement violente qui a frappé une grande partie de la France (un vent de 200km/heure a été enregistré au niveau du Pont de Normandie) et qui a causé d'importants dégâts du fait d'une forte houle. Les violents orages du 16 juin 1997 qui ont provoqué des inondations par ruissellement dans le Pays de Caux et la Vallée de Seine et qui ont causé à Saint-Martin de Boscherville la mort de 3 personnes, emportées par les eaux, sont aussi souvent cités. Il en est de même pour l'épisode du 7 au 11 mai 2000 qui a provoqué la mort d'une personne à Barentin, dans la Vallée de l'Austreberthe. Bien que la crue de la Seine de 1910 soit un événement présent dans l'inconscient collectif, ce sont les épisodes récents (moins de 10 ans), de grande ampleur ou qui ont causé des pertes humaines, qui sont spontanément cités et qui font référence pour les personnes touchées. Enfin, il importe de souligner que dans l'appréhension socio-politique du phénomène, les inondations par débordement de la Seine ne sont pas différenciées des autres types d'inondations (par ruissellement ou remontée de nappe).

Même si elles ne provoquent que très rarement des pertes humaines, les inondations causent des dégâts psychologiques importants qu'ont soulignés tous les acteurs qui, par leur activité, sont amenés à côtoyer des sinistrés. Des associations d'inondés se sont créées dans les secteurs particulièrement affectés par les inondations : le bassin versant de la Lézarde avec l'ADECI (Association D'Epouville Contre les Inondations) et celui de l'Austreberthe avec l'ASIVA (Association des Sinistré(e)s des Inondations de la Vallée de l'Austreberthe). Ces deux associations locales font partie de l'UNALCI (Union Nationale des Associations de Lutte Contre les Inondations) et jouent un rôle actif au plan national pour faire valoir leurs intérêts.

Les dégâts matériels causés par les inondations peuvent être considérables, en particulier lorsque les écoulements d'eau s'accompagnent de glissements de terrain ou charrient de grosses roches : voies de communication coupées (routes, voies ferrées...), routes et trottoirs défoncés ou éventrés, maisons et voitures partiellement ou totalement détruites. De manière moins exceptionnelle, des coulées boueuses peuvent envahir les rues, les caves et les sous-sols. Le maintien en eau des caves et des sous-sols durant plusieurs semaines peut également causer des dommages sur les fondations des habitations. La distribution d'eau peut être interrompue, ne serait-ce qu'en raison des risques de contamination de celle-ci. Par exemple, les coulées boueuses génèrent de forts problèmes de turbidité qui affectent les ressources en eau souterraine utilisées pour la production d'eau potable. Ceci se traduit par une augmentation des coûts de traitement, des risques bactériologiques à l'origine de

gastro-entérites et d'hépatites, des risques chimiques dus à la présence de pesticides, métaux lourds et résidus toxiques transportés par les eaux. Une forte turbidité peut aussi donner des saveurs et des odeurs à l'eau, soit directement, soit par réaction avec un désinfectant.

Si les inondations affectent fortement la vie des populations, les gestionnaires de milieux naturels font remarquer que les écosystèmes peuvent aussi souffrir des inondations lorsque les terrains restent inondés pendant un temps anormalement long (phénomènes d'anoxie par exemple).

A partir du recensement des communes classées en état de catastrophe naturelle depuis 1982 (CATNAT, 2010) et d'entretiens menés auprès de gestionnaires implantés sur l'estuaire de la Seine, trois zones principales apparaissent particulièrement affectées par les inondations dans la Vallée de la Seine : l'agglomération de Rouen, l'agglomération du Havre et Duclair. D'autres zones sont également soumises au risque inondations dans la Vallée de la Seine et il convient de ne pas oublier les communes du littoral (Allain, 2009).

### L'agglomération de Rouen

L'agglomération de Rouen peut être affectée par des inondations par débordement, remontée de nappe ou ruissellement.

Les inondations par débordement et par ruissellement sont souvent étroitement liées. En effet, en rive droite, l'agglomération de Rouen recouvre largement les bassins du Cailly, de l'Aubette et du Robec, dont les écoulements interfèrent avec ceux de la Seine. En particulier, le Cailly se jette dans la Seine à la hauteur de Déville-lès-Rouen après un busage de 500 mètres sous le Marché d'Intérêt National (MIN). L'importante urbanisation du bassin aval génère, en cas de pluie, des ruissellements qui s'écoulent de façon rapide et qui accroissent fortement le débit du cours d'eau. Ainsi, pour une pluie décennale, le débit de la rivière à la confluence avec la Seine est de 30m<sup>3</sup>/s alors qu'il n'est que de 10m<sup>3</sup>/s quelques kilomètres en amont, à Notre-Dame-de-Bondeville (SAGE des bassins du Cailly, de l'Aubette et du Robec). La capacité limitée de l'ouvrage qui permet au Cailly de se déverser dans la Seine, explique en partie la vulnérabilité de Déville-lès-Rouen aux inondations.

Le Robec et l'Aubette, qui se rejoignent au niveau de Darnétal, sont largement canalisés dans leur traversée de Rouen et ne soulèvent pas de problème au niveau de cette commune, mais en posent en amont. Les communes du bassin du Robec et de l'Aubette peuvent aussi être affectées par des inondations par remontée de nappe, notamment à Saint-Martin-du-Vivier et à Saint-Aubin-Epinay.

En rive gauche, une grande partie du territoire qui est soumis aux inondations concerne des zones d'activité industrielle et portuaire.

## L'agglomération du Havre

L'agglomération du Havre est concernée par plusieurs types d'inondations : des inondations par submersion marine et remontée de nappe dans la partie basse de la ville du Havre (quartier Saint-François, notamment) ; des inondations par ruissellement et par débordement de cours d'eau, dans la partie située dans le bassin versant de la Lézarde, qui débouche dans le canal de Tancarville à la hauteur de Harfleur / Gonfreville-l'Orcher.

L'inondation du 1er juin 2003 qui a fortement affecté la ville du Havre en provoquant le débordement des réseaux d'évacuation d'eau, s'explique à la lumière des phénomènes de ruissellement particulièrement importants qu'a connu le bassin de la Lézarde. A la suite d'une pluie d'orage de fréquence centennale, outre Le Havre, une grande partie des communes de ce bassin ont été classées en état de catastrophe naturelle (l'eau a atteint un mètre à Montivilliers).

L'inondation du 4 juillet 2000 a été provoquée par des pluies torrentielles (40mm d'eau tombés entre 10h30 et 13h30) conjuguées à une marée montante de coefficient 102.

Les inondations du 22 au 25 novembre 1984, période au cours de laquelle certains quartiers du port et le front de mer ont été envahis par la mer, sont également des événements marquants pour l'agglomération havraise.

## Duclair

Situé à la confluence de la Seine et de l'Austreberthe, Duclair est fortement vulnérable au risque d'inondation par débordement de l'Austreberthe, lié au ruissellement en provenance des plateaux environnants.

Par exemple, l'inondation catastrophique du 7 au 11 mai 2000 s'explique à la lumière de ce qui s'est passé dans la vallée de l'Austreberthe, même si les violents orages qui se sont succédé ont aussi frappés une large partie du Pays de Caux.

## Les autres zones sensibles de la Vallée de Seine

Les communes riveraines de la Seine, entre Val-de-Reuil et Tourville-la-Rivière, sont susceptibles d'être affectées par des inondations par débordement, remontées de nappe, ou ruissellement (à Orival, notamment, qui est au pied d'une falaise). La situation de cette zone, à la confluence de deux rivières avec la Seine (l'Andelle en rive droite et l'Eure en rive gauche), explique sa vulnérabilité. Elle a été récemment affectée par des phénomènes de remontée de nappe qui ont débuté en mars 2000 et ont duré pendant des mois et par des inondations par débordement et ruissellement du 20 au 30 mars 2001.

Les communes riveraines de la Seine en aval de Rouen sont elles aussi vulnérables au risque inondation, même si les dégâts engendrés sont ici moins importants du fait du caractère plus rural de cette zone. La commune du Trait, peut être affectée par des inondations par ruissellement,

via notamment la cavée du Val, à l'est, ce qui peut menacer la route départementale 982. La zone d'activité de Malaquis, qui s'étend sur une centaine d'hectares entre la zone urbaine, la Seine et des espaces naturels, et qui compte aujourd'hui une quarantaine d'entreprises, s'est développée dans le lit majeur de la Seine en gagnant des terrains sur le marais par remblaiements successifs, est inondable. Caudebec-en-Caux, qui se situe à la confluence de la Seine et de la Sainte-Gertrude, et la commune voisine de Saint-Wandrille-Rançon, traversée par les rivières de la Rançon et de la Fontenelle, sont concernées par les problèmes de ruissellement qui affectent les bassins versants de ces affluents de la Seine.

Enfin, la plaine de Berville-sur-Mer peut être inondée par le débordement de la Seine et de la Risle.

## La zone littorale

Une partie du littoral est soumise au risque de submersion marine : c'est en particulier le cas des plages du littoral bas-normand et de Sainte-Adresse.

Cette zone est aussi confrontée à d'importants problèmes d'inondation par ruissellement. Dans le Calvados, sur les 23 communes affectées par les inondations et coulées de boue du 1<sup>er</sup> juin 2003, 14 se situent sur dans la bande littorale entre Honfleur et Ouistreham. La commune de Trouville-sur-Mer, en particulier, a été fortement inondée le 1<sup>er</sup> juin 2003 et le 29 septembre 2007, consécutivement à des épisodes orageux qui ont généré des coulées boueuses que n'ont pu gérer les réseaux urbains d'évacuation des eaux et qui ont envahi les rues et les caves. C'est en 2003 que la commune a été la plus touchée, la violence des pluies provoquant de surcroît un glissement de terrain. En 2007, c'est l'effet conjugué de fortes pluies et de la marée d'équinoxe qui a occasionné l'inondation ; selon le journal Ouest France du 29 septembre 2007, « *le quai Fernand-Moureaux a été recouvert par une vingtaine de centimètres d'eau, jusqu'à un mètre d'eau sur les points les plus bas de la ville, notamment au pied de la côte d'Aguesseau, qui mène à l'aéroport de Saint-Gatien. L'eau s'est évacuée doucement en fin de nuit avec la marée descendante laissant une pellicule de boue dans les rues et les commerces. De nombreuses caves sont inondées* ». Aucun blessé n'a cependant été à déplorer, contrairement à 2003 où une jeune femme et un enfant avaient été blessés.

## Les vallées de la Dives, de la Touques et de l'Orne

Enfin, les basses vallées de la Dives, de la Touques et de l'Orne sont inondables par débordement. Sur la Touques, c'est en particulier la ville de Pont-l'Évêque qui est la plus inondable, en raison de sa localisation à la confluence de cette rivière et de la Calonne.

## Rencontre avec les communes riveraines

La rencontre d'élus et d'employés des services techniques de quelques communes ou communautés d'agglomération riveraines de l'estuaire de la Seine a permis de mettre en avant la diversité des types d'inondation rencontrées. Le recueil de ces témoignages montre également la complexité de replacer le risque inondation dans une politique globale d'aménagement à l'échelle de l'estuaire. Chaque commune étant dans son propre contexte, elle perçoit et gère les inondations à son échelle.

### La connaissance du risque inondation

Pour l'ensemble des communes rencontrées, les facteurs dits naturels tels la marée, le débit et les conditions météorologiques sont clairement identifiés comme responsables des inondations. En revanche, les ouvrages tels le barrage de Poses et les Grands Lacs de Seine sont aussi ciblés par les communes. En amont de l'estuaire ils sont considérés comme étant responsables des inondations par débordement causées par des lâchers d'eau afin de préserver Paris ou, inversement, comme ayant un impact positif sur la réduction des inondations en estuaire de Seine.

La commune du Havre est principalement exposée aux risques d'inondation par résurgence du réseau pluvial et par ruissellement urbain. D'autres communes, comme Pîtres ou Sotteville-Lès-Rouen sont également soumises à plusieurs types d'inondation : les remontées de nappes, les débordements de Seine mais aussi le ruissellement. La ville de Caudebec-en-Caux, malgré sa proximité au fleuve ne subit pas d'inondation par débordement, mais reste sensible au ruissellement.

### Une certaine conscience du risque

A Sotteville-Lès-Rouen, la commune considère que la conscience de la population exposée est forte, une partie bénéficiant d'une culture du risque inondation partagée et transmise entre familles d'anciens marins. Malgré cela, les gens ont tendance à réinvestir les caves et les pilotis, alors que le risque n'est pas écarté. Au Mesnil-sous-Jumièges, le risque n'est pas considéré, car l'eau se retire rapidement n'engendrant pas de dégâts. Les personnes interrogées disent être conscientes et habituées ; elles se sentent plutôt menacées par les bateaux transportant des matières dangereuses. A Pîtres, les riverains sont habitués et possèdent du matériel en cas d'inondation tels des sacs, des parpaings et des bastings. Quelques habitations sont même équipées de pompes dans leurs caves régulièrement inondées par des remontées de nappes.

## La seine, témoin du temps

Le fleuve Seine doit son nom à la déesse romaine SEQUANA, qui était adorée à la source du fleuve il y a plus de 2000 ans (Figure 2). Ce nom romain vient d'un mot celtique plus ancien «SQUAN» qui signifie «semblable à un serpent» (*tortueux*), ce qui convient parfaitement au cours sinueux de la Seine (Sequana-Normandie).

De manière générale, les communes témoignent du fait que les industriels sont peu sensibilisés au risque inondation. La plupart de leur matériel et matériau sont encore au niveau du sol. Ils ne prennent conscience de leur présence en zone inondable que lors d'une demande de permis de construire.

### Une stratégie par territoire

La stratégie de l'utilisation des zones inondables est différente d'une commune à une autre en fonction des enjeux ciblés. Pour la commune de Sotteville-Lès-Rouen, la stratégie est de reconquérir la zone inondable constructible par la suppression du quartier d'habitation qui sera remplacé en zone d'activité de services afin d'appuyer la zone industrielle, et par la requalification des berges en espace naturel. Les zones les plus sensibles pourraient être remplacées par des activités sans enjeux, de type recyclage de béton et d'enrobé, qui demandent de la place, mais qui ne gênent pas l'installation de bâtiments. A Cléon, la stratégie est de préserver la zone inondable en tant qu'habitat naturel. Conservées pour leur cadre de vie, les maisons en bord de Seine voient par contre leurs extensions limitées. La commune du Havre, plutôt tournée vers la mer, se sent très peu concernée par le risque lié au débordement de la Seine. Elle a par contre engagé une importante réflexion sur le changement climatique qui peut avoir de forts impacts sur le niveau des eaux. Selon la commune, cela pourrait se répercuter sur l'urbanisme et plus particulièrement sur les réseaux d'assainissement de la ville.

### Un outil réglementaire

Pour les différents services d'urbanisme, le Plan de Prévention du Risque inondation (PPRI) est un bon outil qui permet de gérer l'urbanisation face aux risques inondation. Par contre, il existe toujours de grosses différences entre la réalité et le texte réglementaire. La commune de Mesnil-sous-Jumièges regrette que les contours des zones inondables soient trop imprécis et que d'un coup de crayon un terrain devienne inconstructible. Ils ne se sentent pas écoutés, malgré leur expérience du terrain. La commune a le sentiment que le règlement ne s'applique pas de la même manière d'une commune à l'autre, que les plus petites n'ont pas les moyens de décortiquer le règlement pour réduire les contraintes qui en résulteront dans leur Plan d'Urbanisme. La ville de Pîtres est gênée par l'application d'un zonage dont les intérêts politiques peuvent parfois être en contradiction avec les attentes de la population, notamment la possibilité de l'installation d'une zone trimodale en zone d'expansion de crues.

**Hamza El Abida, hydrologue**

Les débordements de la Seine font partie de l'histoire du fleuve. Les archives témoignent et dénombrent une soixantaine de crues majeures depuis le VI<sup>ème</sup> siècle. La première inondation désastreuse mentionnée dans les chroniques date de février 584. Pendant plusieurs siècles la Seine Inférieure a été le théâtre d'événements hydrologiques mettant les populations riveraines en grande difficulté. Les archives documentaires indiquent que les principales inondations ont lieu entre décembre



Figure 2 : Déesse Sequana

et mars et parfois en été, notamment à cause de forts orages. Les inondations hivernales sont causées par des pluies abondantes et continues, par le dégel des sols ou encore par la fonte de neige. Les dégâts engendrés par

les inondations sont nombreux et causent souvent l'arrêt du travail, la destruction des éléments faisant obstacle à la rivière tels les ponts de bois, maisons, et peuvent provoquer la ruine de certaines récoltes amenant la famine.

La Figure 3 regroupe les débits de pointe annuels de la Seine à Poses, ainsi que les principales inondations par débordement de la Seine ayant impacté l'estuaire depuis le début du XXème siècle. Le régime hydrologique de la Seine est marqué par une importante variabilité interannuelle qui se traduit par la variation des débits de pointe. Tous les 25 à 30 ans, une alternance entre périodes sèche et humide joue un rôle primordial : lors des périodes sèches (précipitations moyennes annuelles inférieures à 600mm) le débit de pointe ne dépasse 1500m<sup>3</sup>/s que trois années sur dix ; lors des périodes humides ce seuil est dépassé six années sur dix (Delsinne, 2005).

### Quand les vitraux nous parlent d'inondations

La ville de Rouen a subi un grand nombre d'inondations. La liste serait longue depuis le moyen âge jusqu'à nos jours. Les vitraux ont retenu celles de l'époque de Saint-Romain, le Saint patron de Rouen. Deux fenêtres d'églises rouennaises illustrent des débordements du fleuve. Elles sont toutes deux liées à l'une des légendes qui entourent l'histoire de Saint-Romain.

Un jour, le fleuve sortit de son lit. Il rentra dans la ville, perturbant les relations entre les deux rives. La population se désolait et rien ne semblait pouvoir l'arrêter. Les navires qui attendaient dans le port virent leurs amarres casser et partirent au fil du violent courant. Les marchandises entassées sur les quais furent emportées.

Un vitrail de la cathédrale de Rouen, offert par la confrérie de Saint-Romain vers 1525, nous montre cette désolation (Figure A). En haut, la ville dominée par la côte Sainte-Catherine. À droite, le pont de pierre, le fameux pont

Mathilde, d'où des Rouennais regardent l'inondation. Sur le fleuve deux navires semblent en perdition. Au centre, Saint-Romain, dans les riches habits des prélats du XVIe siècle, bénit le fleuve. D'après la légende, celui-ci regagna sagement son lit.

Le vitrail de l'église Saint-Godard (Figure A), de la même époque (vers 1540), représente la même scène. Au centre des bateliers luttent désespérément contre les flots. Les bateaux ont déjà été endommagés comme on le voit avec le gouvernail qui git en bas de l'image. À droite, le pont Mathilde avec un cavalier, et à gauche, Saint-Romain bénissant les eaux pour les apaiser.

Cette légende et son illustration dans deux édifices de la ville attestent l'importance des inondations dans le passé.

Jacques Tanguy, Historien



Figure A : Vitraux de la Cathédrale de Rouen (A) et de l'Eglise Saint-Godart (B)

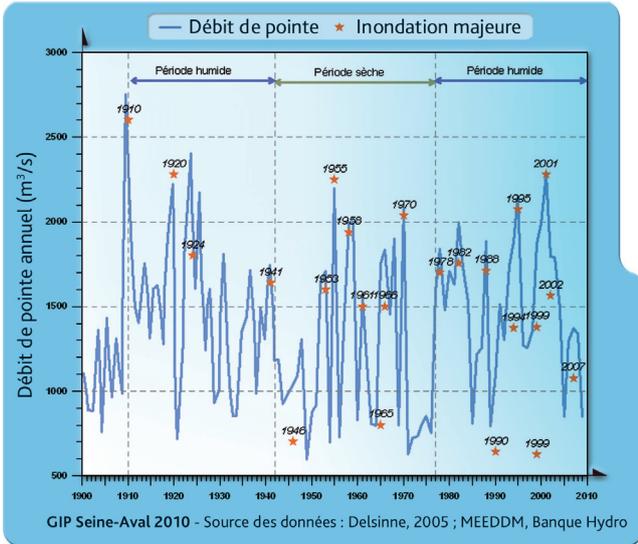


Figure 3 : Débits de pointe annuels de la Seine à Poses et inondations majeures dans l'estuaire de la Seine.

En considérant un débordement de la Seine lorsque la hauteur d'eau mesurée au marégraphe de Rouen dépasse 9,24m (/0 CMH), un comptage du nombre de marées, dont le niveau d'eau maximum est au-delà de ce seuil, a été réalisé entre 1985 et 2009 (Figure 4). Il permet de caractériser la durée annuelle des débordements de la Seine à Rouen, avec une moyenne proche de 6 marées par an. Sur cette période récente, 2001 présente le plus grand nombre de débordements avec 33 marées. La hauteur d'eau la plus élevée enregistrée à Rouen est de 10.05m (CMH) le 29 janvier 1910. Plus récemment, 9.91m (CMH) ont été atteints le 25 décembre 1999.

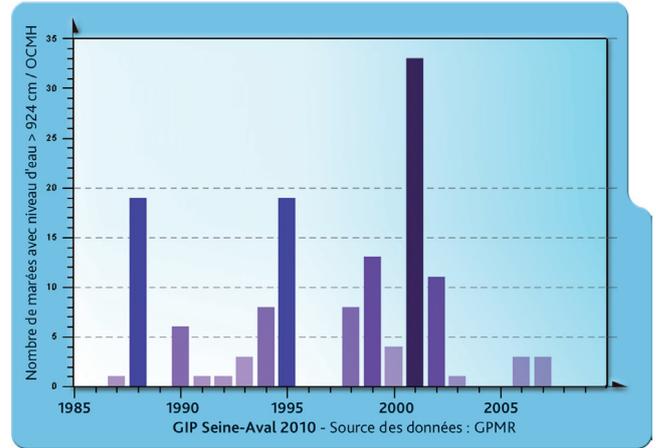


Figure 4 : Débordement de la Seine à Rouen.

A partir de la description hydro-météorologique des événements de hautes eaux observés dans l'estuaire de la Seine (niveau supérieur à 9,50m CMH à Rouen), une première typologie des inondations par débordement de la Seine est possible (Tableau I). Les plus hautes eaux sont liées à un fort débit de la Seine (>1000m³/s), bien que ce ne soit pas systématique. La marée est également un facteur important, avec des coefficients compris entre 86 et 111 lors de ces événements synchronisés avec la pleine mer. Des basses pressions atmosphériques (<1015hPa) et de forts vents de secteur sud-ouest accompagnent souvent ces événements.

Les événements caractérisés par de forts débits présentent une inertie longue avec des débordements répétés lorsque les coefficients de marée sont importants ou que les conditions météorologiques impliquent une surcote significative. Par exemple, entre novembre 2000

Tableau I : Description des événements avec une hauteur d'eau supérieure à 9.50m (CMH) à Rouen (1985-2009).

Hauteur d'eau atteinte à Rouen	Jour	29 janvier 1910	25 décembre 1999	1 <sup>er</sup> mars 2002	1 février 1995	27 février 1990	19 février 1988	8 février 2001	28 mars 2001
	heure			5:02	4:54	16:33	16:59	16:54	15:37
Niveau (m /OCMH)		10,05	9,91	9,71	9,68	9,64	9,62	9,6	9,6
Débit de la Seine à Poses (m³/s)		2600	1407	1588	2074	641	1712	1414	2280
Vent à Rouen (données issues de mesures tri-horaires)	Vitesse (km/h)		40	14	36	61	18	25	18
	Direction		SO	S	SO	O	N	O	S
Vent au Cap de la Hève (données issues de mesures tri-horaires)	Vitesse (km/h)		79	43	47	79	25	11	29
	Direction		SO	SO	SO	SO	NE	N	S
Pression atmosphérique		1003	993	1007	1015	1004	1030	1000	996
Coefficient de marée au Havre		78	104	111	105	107	113	100	89
Débit supérieur à 750m³/s	Période		du 13/12/99 au 28/01/00	du 09/02/02 au 04/04/02	du 12/01/95 au 14/04/95	28/02/90	du 07/01/88 au 27/02/88	du 07/11/00 au 01/03/01	du 05/03/01 au 27/05/01
	Nombre de jours		47	55	93	1	52	115	84
Débordement à Rouen (hauteur d'eau ≥924cm)	Jours pendant la période de débit supérieur à 750 m³/s		du 23/12/99 au 27/12/99	du 26/02/02 au 03/03/02	du 30/01/95 au 03/02/95 ; 17-18/02/95 ; 20/02/95 ; 01-03/03/95 ; 18/03/95	du 26/02/90 au 01/03/90	22/01/88 ; 04/02/88 ; 06/02/88 ; 08/02/88 ; du 17/02/88 au 21/02/88	13/12/00 ; 08/02/01 ; 10-12/02/01	10-13/03/01 ; 23-30/03/01 ; 07-10/04/01
	Nombre de jours		26	5	6	10	4	9	6

et mai 2001, le débit de la Seine dépassa 750m<sup>3</sup>/s durant 199 jours, avec 22 jours de débordement à Rouen (en décembre, février, mars et avril). En 1995 et 1988, le même phénomène fut observé avec respectivement 93 et 52 jours de débit supérieur à 750m<sup>3</sup>/s et 10 et 9 jours de débordement.

A l'inverse, des évènements de hautes eaux beaucoup plus ponctuels sont observés pour de faibles débits et des conditions météorologiques particulières (tempêtes, pluie,...). La durée des débordements est alors très courte, de l'ordre de 1 à 3 jours.

## 1910 : la crue du siècle

### Description générale

Il y a cent ans, en janvier et février 1910, la Seine débordait largement de son lit. L'événement a profondément marqué les riverains de la Seine comme en témoignent les nombreux articles de journaux qui l'ont relaté, ainsi que les cartes postales et les photos qui sont encore disponibles de nos jours. La crue de 1910 est un événement majeur, de par son intensité inégalée et les dégâts engendrés. Cet événement a remis en question la marche en avant de la révolution industrielle, où l'homme commençait à

rationaliser son mode de vie grâce aux machines et à organiser l'espace conquis sur la nature. La crue de 1910 est également la référence de crue centennale dans le cadre des dispositifs de prévention du risque inondation par débordement de la Seine.

### Chronique de la crue

La crue de 1910 a été générée par deux épisodes pluvieux successifs, se produisant à intervalle rapproché avec une synchronisation des ondes de crues des bassins amont (crue double). Le dernier trimestre de l'année 1909, les vallées de la Haute-Seine, de la Marne et de l'Yonne ont enregistré un cumul des hauteurs totales de précipitations de l'ordre de 450mm, soit deux fois supérieures aux normales saisonnières. Ces pluies abondantes et généralisées sur l'ensemble du bassin versant ont ainsi maintenu un niveau élevé des cours d'eau et favorisé la saturation des sols, propice au déclenchement d'une crue. Le mois de janvier 1910 est caractérisé par des précipitations de pluies et de neiges abondantes sur l'ensemble du bassin de la Seine (Figure 5) : un cumul des précipitations de l'ordre de 300mm dans la partie haute du bassin versant amont (Morvan), le bassin versant moyen enregistre des précipitations de l'ordre de 110mm et le bassin versant Seine aval enregistre un cumul de l'ordre de 280mm.

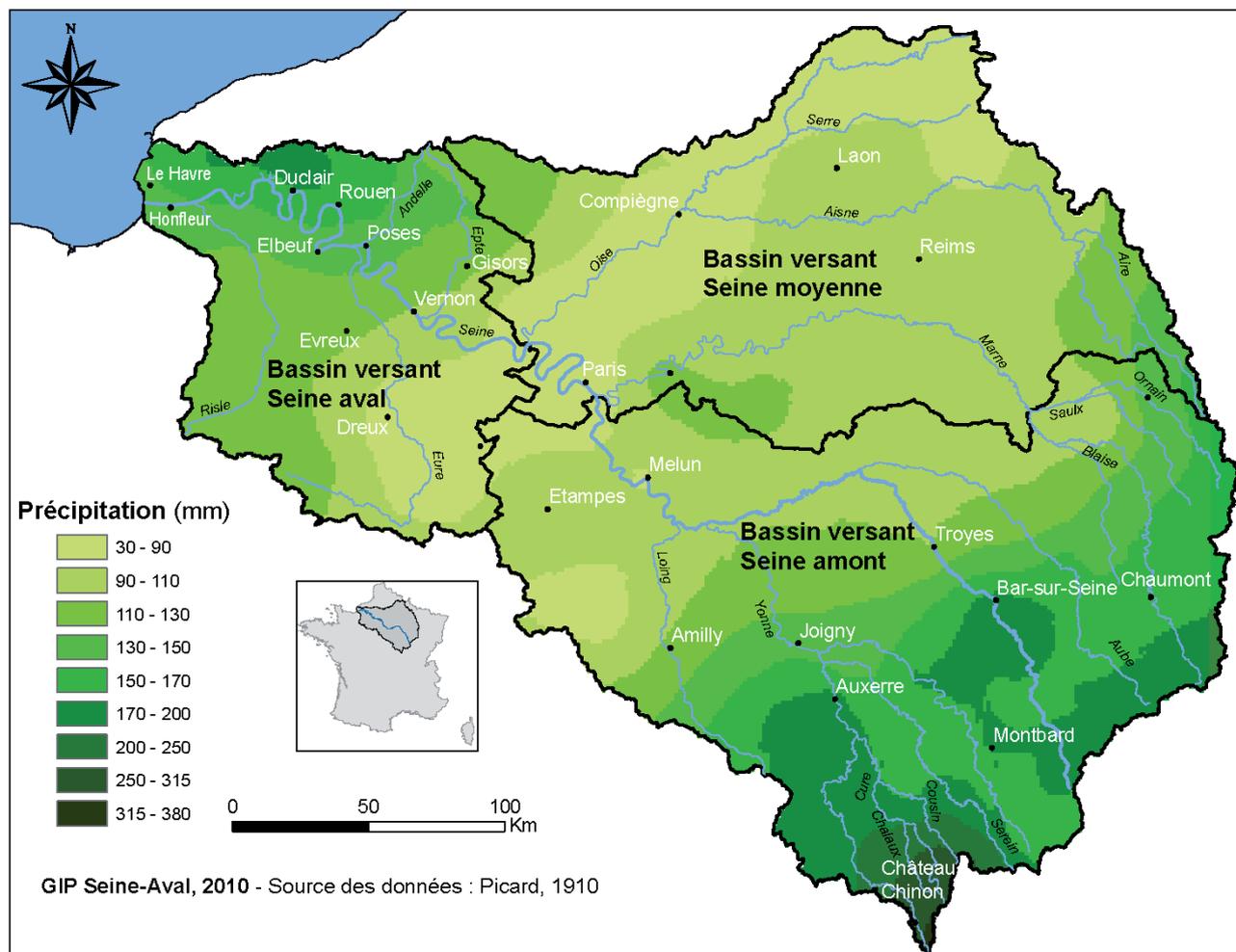


Figure 5: Précipitations en Janvier 1910 sur le bassin versant de la Seine.

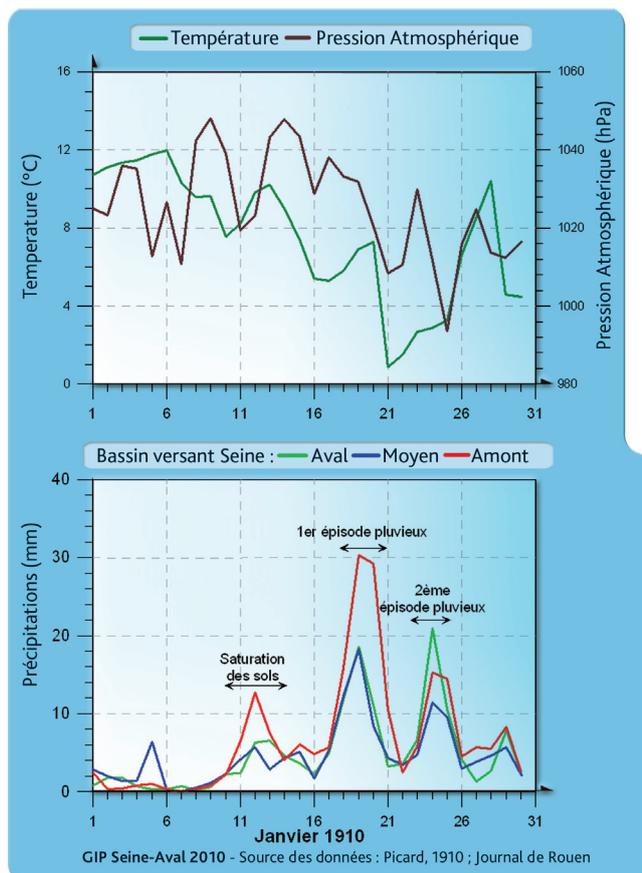


Figure 6 : Conditions météorologiques janvier 1910

Entre le 9 et le 13 janvier 1910, de fortes précipitations s'abattent sur l'ensemble du bassin versant de la Seine entretenant la saturation des sols liée aux précipitations de fin 1909. Les fortes pluies continues entre le 17 et 20 janvier provoquent la crue subite de l'Yonne, du Loing et du Grand-Morin. 120mm de pluie sont enregistrés à Château-Chinon, 94mm à Montbard et 78mm à Joigny avec un temps de retour de crue, respectivement, de 20 ans, 100 ans et plus de 150 ans. Au même moment, le bassin versant de la Haute-Seine et celui de la Marne entrent en crue extraordinaire avec 82mm de précipitations à Bar-sur-Seine, 79mm à Chaumont avec un temps de retour équivalent respectivement à 100 ans et 50 ans. Entre le 23 et le 25 janvier 1910, les conditions météorologiques se dégradent avec une nouvelle vague de dépression qui engendre un deuxième épisode pluvio-neigeux sur l'ensemble du bassin versant de la Seine. En deux jours, les précipitations sont de 46mm à Rouen, 19mm à Paris et 23mm à Auxerre. Une importante chute des températures et des pressions atmosphériques accompagne les pluies diluviennes (Figure 6 ; Picard, 1910 ; Nouailliac-Pioch M & Mailler M, 1910).

A cet aléa météorologique, s'ajoute la vulnérabilité du milieu récepteur occasionnée notamment par un déboisement massif du bassin supérieur de la Seine. L'eau ne s'infiltre plus dans les sols, le ruissellement ne se trouve plus ralenti et vient grossir anormalement le débit du fleuve et de l'ensemble de ses affluents. Ce flot dépasse la capacité du lit mineur et déborde dans le lit majeur du fleuve en de nombreux endroits. L'Epte, la Morette et l'Anchy sont sorties de leurs lits pour envahir

les prairies et plusieurs quartiers sont inondés à Gisors. Le 22 janvier, la Seine a déjà causé quelques dégâts à Paris et elle commence à border les berges de Rouen. Le 24 janvier, des pluies torrentielles ainsi qu'une importante chute de neige tombent en amont de l'estuaire de la Seine, l'eau déborde sur les quais de Rouen.



Figure 7 : Rouen sous la neige - 27 Janvier 1910.

« On évoque souvent Paris et sa banlieue pour la crue de 1910. Pourtant, du 23 janvier au 8 février, la basse vallée de Seine était envahie par la crue la plus dévastatrice que l'histoire ait retenue. Déjà on remarquait que les transformations liées à l'aménagement du cours du fleuve, le développement de l'urbanisation, des activités industrielles et portuaires avaient fortement aggravé les facteurs de risque d'atteinte aux biens et aux personnes. Toutes les communes riveraines de la Seine, de Giverny à la boucle d'Anneville-Ambourville, furent atteintes par la crue à des degrés divers. Les villes de Vernon, des Andelys, d'Elbeuf et celles de l'agglomération rouennaise, comme les campagnes environnantes furent durement touchées. La Seine, en sortant de son lit offre partout un spectacle tout à fait inhabituel notamment au niveau de la boucle de Poses où la Seine s'étale sur 8km ».

Jérôme Chaïb, directeur AREHN

Le service des Ponts et Chaussées prévoit pour le 27 janvier 1910 une hauteur d'eau de 70cm au dessus du seuil de débordement des quais de Rouen avec un étalement latéral de l'eau allant jusqu'à 30 mètres. Pendant ce temps, plusieurs communes proches de Rouen se trouvent sinistrées : Sotteville-Lès-Rouen, Saint-Aubin-Lès-Elbeuf, Cléon et Elbeuf (Figure 8).

A partir du 26 janvier, les conditions météorologiques s'améliorent avec des vents de secteur nord et une hausse des températures et de la pression atmosphérique. Cela engendre le dégel et la fonte des neiges, entraînant le grossissement d'affluents attendant à la Seine, telle l'Andelle. Le fort débit de la Seine est également accentué par la concomitance des débits de pointes de différents bassins affluents en amont du barrage de Poses. Les phénomènes de marée s'ajoutent à ces mauvaises conditions, avec un coefficient de 78. A Rouen, l'eau atteint sa hauteur maximale de 10.04m CMH le 29 janvier et le débit enregistré à Poses est de 2600m<sup>3</sup>/s. Ce n'est qu'à partir du 5 février que la décrue est amorcée avec un niveau d'eau de 9.85m CMH à Rouen. Alors que les

niveaux d'eau sont passés sous la hauteur des berges à Rouen, un troisième épisode pluvieux du 5 au 10 février 1910 provoque une nouvelle pointe de crue, suivie d'un quatrième épisode du 20 au 28 février. Ce n'est qu'après ce quatrième épisode que la Seine retournera dans son lit (Figure 6).

### Dégâts et perturbations

L'élévation du niveau de la Seine entraîne de fortes perturbations pour la navigation fluviale avec l'impossibilité pour les péniches de passer sous les ponts (Figure 9A). Beaucoup de routes sont coupées, le trafic ferroviaire entre

Rouen et Paris est perturbé jusqu'au point d'envisager de le détourner. L'eau, en envahissant progressivement les quais de Seine, compromet la vie économique du port de Rouen (Figure 9B). Dès Janvier, l'engorgement du fleuve entre Paris et Rouen ralentit puis arrête l'activité de la batellerie. Le port s'est rapidement engorgé, le chemin de fer, déjà à la limite de saturation, n'a pas pu prendre le relais des transports pour l'acheminement des marchandises. Par chance, une grève des dockers anglais avait limité l'apport de marchandises et le mauvais temps sur la Manche restreignait la navigation. Les navires ne pouvant plus s'amarrer, il était fort difficile de les décharger, car les grues hydrauliques de la Chambre de Commerce ne pouvaient fonctionner du fait d'une coupure d'électricité

Elbeuf, le 22 février 1910

Objet : Crue de la Seine – Etablissement d'un plan indiquant la limite des débordements  
Le Maire d'Elbeuf à Monsieur le Préfet de Seine-inférieure (2ème Division 1er Bureau)

En réponse à vos lettres du 1er février et 19 février, j'ai l'honneur de vous faire connaître que pendant la période où l'eau débordée de la Seine ont atteint, à Elbeuf, leur niveau le plus élevé, des repères ont été tracés à la peinture sous la direction de l'Architecte municipal sur un grand nombre de murs et de façades.  
De plus, dès le 9 courant, la zone de débordement a été figurée sur un exemplaire du plan général de la ville.

Le Maire d'Elbeuf  
Charles-Antoine Mouchel

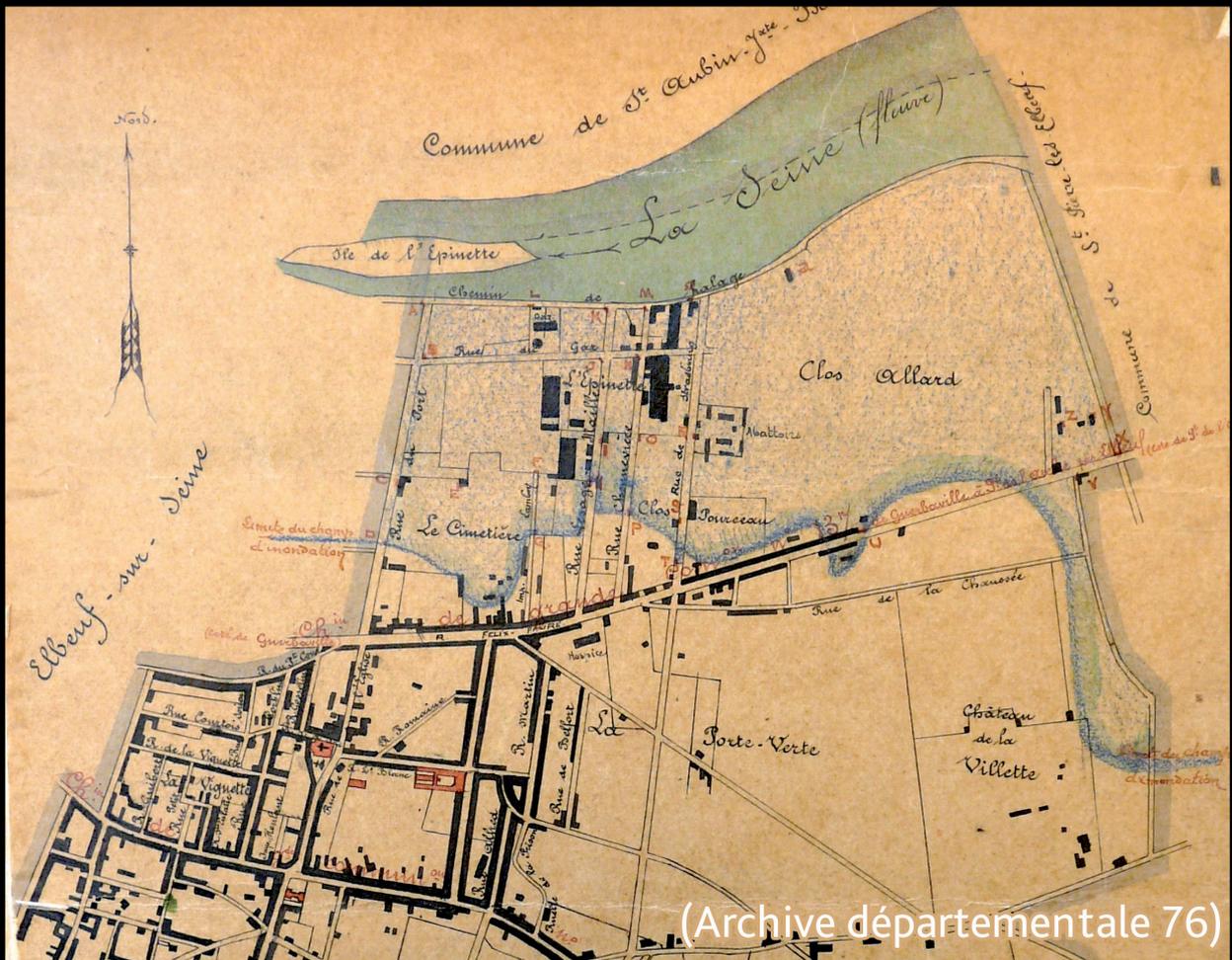


Figure 8: Zone de débordement de la Seine à Elbeuf lors de la crue de 1910.

provoquée par l'inondation de l'usine fournissant l'énergie. Seuls des déchargements de bateaux à chaland étaient possibles. Ce n'est pas avant le 5 février que la situation s'est améliorée.

Les conséquences des inondations se firent largement sentir dans la ville et les alentours. Les caves des immeubles riverains se remplirent d'eau. A l'hôtel d'Angleterre, la cuisine fut déménagée. Des maisons d'Eauplet, de Sotteville-lès-Rouen, du Cours la Reine (Figure 9C), de certains quartiers de la rive gauche, de Croisset et au-delà se retrouvent cernées par les eaux qui, continuant à monter, envahirent les rez-de-chaussée. Là où l'eau déborde, les rues ne tardent pas à être inondées et la circulation coupée. Des passerelles sont édifiées pour que les piétons puissent se déplacer,

parfois de façon acrobatique. Avec l'élévation de la crue, les habitants doivent quitter les rez-de-chaussée pour les étages (Figure 9D). Parfois, ils sont obligés d'évacuer leur logis souvent dans le dénuement le plus complet. Certains des habitants durent se résoudre à quitter leur demeure. D'autres restèrent et durent être ravitaillés par des barques, comme dans les prairies de Sotteville-Lès-Rouen.

Les habitants de certains quartiers pensaient être protégés par des remblais de chemin de fer, comme à la Poudrière, mais l'eau les a surpris en remontant à travers les égouts. Au bas de l'avenue Pasteur, une grande mare s'est formée obligeant les commerçants à fermer boutique malgré les passerelles mises en place. L'île Lacroix s'est retrouvée pratiquement recouverte par le fleuve, obligeant



**A- Pont Boieldieu à Rouen**



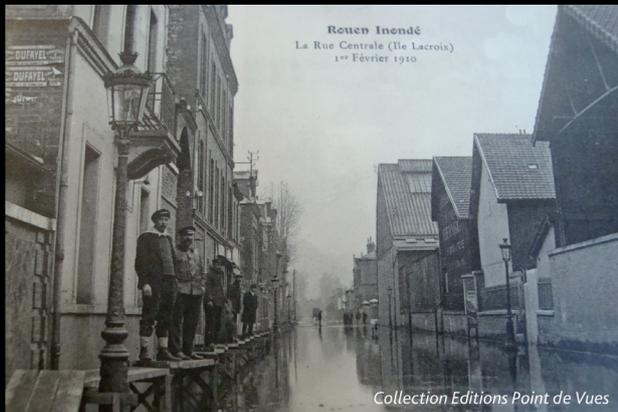
**B- Quai du Havre à Rouen**



**C- Cours de la Reine à Rouen**



**D- Avenue Pasteur et Quai Gaston à Rouen**



**E- Rue centrale sur l'île Lacroix**



**F- Rue principale à Poses**

Figure 9 : Crue de 1910

la population à se déplacer en barques dans les rues centrales (Figure 9E). Les établissements de loisirs tels les Folies Bergères et le Château de Beaubet, se sont trouvés gênés et empêchés de fonctionner. Événement surprenant, la Seine vient même perturber l'hivernage des lions du cirque Fortunio qui durent être évacués.

Depuis le XIX<sup>ème</sup> siècle, la majorité des usines s'est installée sur la rive gauche du fleuve – la rive basse - que ce soit à Rouen ou dans l'agglomération elbeuvienne. Ceci les rend particulièrement vulnérables aux débordements des eaux car leurs œuvres vives, les systèmes de production d'énergie motrice, sont la plupart du temps installés dans les parties basses des usines. Ce fut en particulier le cas du tissage Malouet, rue de la ferme, qui a dû mettre ses employés au chômage pendant plusieurs jours. Ce n'était pas le seul établissement concerné et le chômage accrut la misère populaire malgré les gestes de générosité. En face d'un tel drame, seule la solidarité qui s'organise individuellement ou collectivement permet à la population de mieux en supporter les conséquences douloureuses (Figure 9F), comme celui d'un restaurateur de Saint-Sever, M. Montier qui offrait tous les matins une soupe aux indigents.

Les dégâts liés à la crue touchent sans distinction tous les riverains du fleuve, mais les quartiers ouvriers de l'agglomération de Rouen ou d'Elbeuf s'en trouvent les plus impactés. Les personnes les plus indigentes, les plus âgées ou atteintes par la maladie disposent rarement des moyens pour sauver le peu de biens qu'elles possèdent. A la campagne, les troupeaux qui sont souvent la seule richesse des paysans sont menacés par la noyade et les récoltes de l'année sont perdues.

### Les communications

L'invasion de la cave de l'hôtel des Postes de la Bourse, centre téléphonique et télégraphique de la ville de Rouen, menaçait de couper les télécommunications. Le réseau de tramways était également menacé dans son fonctionnement, car l'usine, située rue de Blosserville, qui fournissait le courant était sous les eaux. L'utilisation de puissantes motopompes n'a pas été suffisante, la centrale de la rue de Lessard dut pallier à son arrêt provoquant, en outre, l'immobilisation du Pont-Transbordeur qui ne pouvait mouvoir sa nacelle (Figure 10). D'abord arrêté pendant les heures de marée haute, il a été complètement immobilisé à partir du 29 janvier. Cet arrêt va se prolonger jusqu'au 13 février, malgré la décrue amorcée quelques jours plus tôt.

### L'attraction et la mémoire

La crue de 1910 a largement retenu l'attention de la population et reste aujourd'hui encore l'événement hydrologique de référence de la Seine. La crue a fortement marqué les esprits de par la forte médiatisation, les journaux en ont largement parlé avec des articles quotidiens dans le Journal de Rouen et dans la Dépêche. L'événement coïncide également avec la démocratisation de l'appareil photo, les amateurs et les professionnels ont sorti leurs appareils à la « joie » des sinistrés qui posaient volontiers devant l'objectif. Les clichés ont été diffusés en grand nombre sous forme de cartes postales, aujourd'hui encore retrouvées. La population était contemplative face au fleuve qui avait freiné l'avancée industrielle du début du siècle et ses nouvelles machines. De grandes foules se sont déplacées pour voir la crue, tous les ouvrages

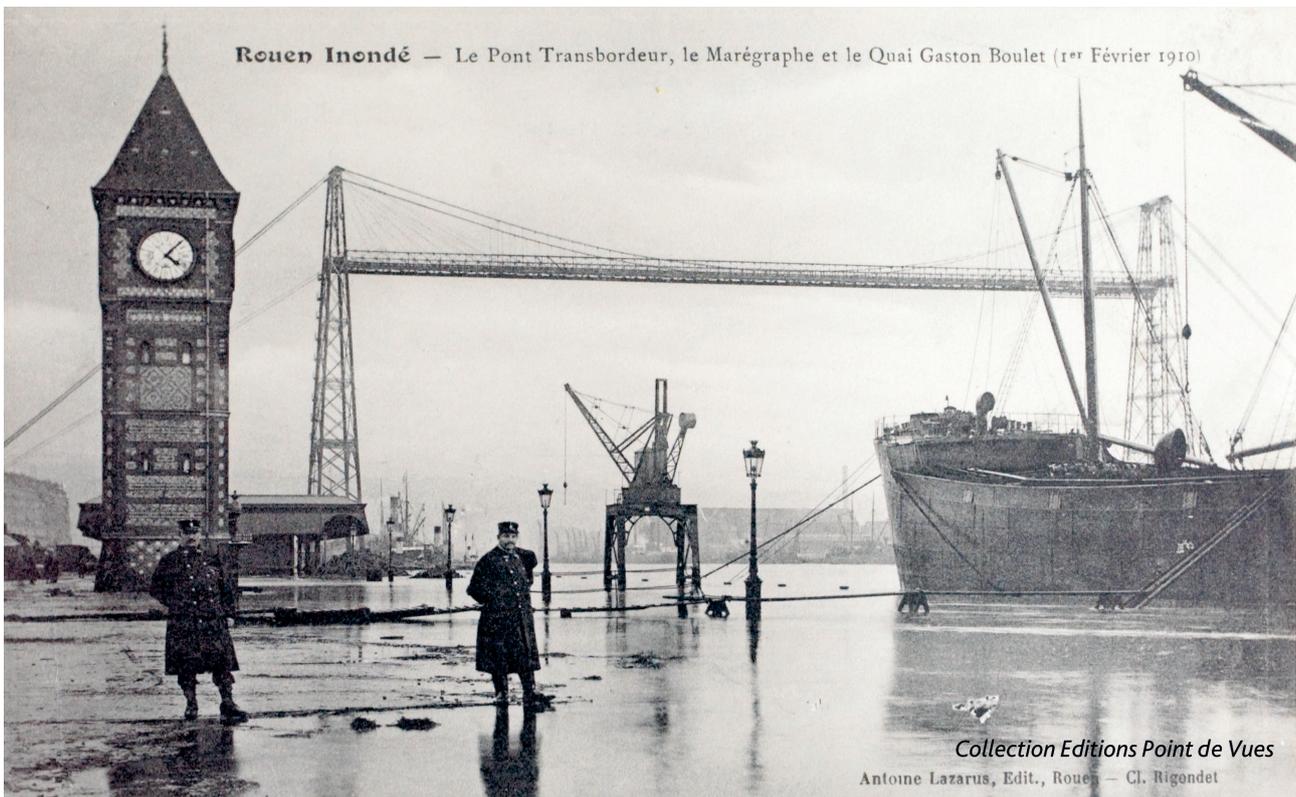


Figure 10 : Crue de 1910 - Le pont Transbordeur et le marégraphe à Rouen.

encore au sec avaient été sollicités, certains quais qui n'étaient pas inondés, ont souvent été noirs de monde. Le tablier du transbordeur a été très utilisé, car il était possible, moyennant une petite rétribution, de monter en haut de ses soixante mètres. Il a même fallu contingenter ces visiteurs, car ils étaient trop nombreux dans les files d'attente. Lorsque les tramways ne suffisaient pas, les badauds utilisaient le funiculaire et le panorama de Canteleu a été aussi très fréquenté par les promeneurs et même les peintres.

## Chroniques d'inondations

### L'inondation du 4 juillet 2000 dans l'agglomération du Havre

« Les égouts étaient incapables d'évacuer ce flot qui est ressorti en surface. On a pu observer des geysers de 1,60m au dessus des plaques d'égouts. Toute la ville basse a été recouverte de 40cm à 1m d'eau. Deux personnes ont été emportées par les flots dans le tunnel Jenner (30cm d'eau pendant 50 minutes) et récupérées de justesse, tandis qu'une vingtaine d'autres étaient mises en sécurité par les pompiers. Six personnes ont été blessées dont quatre par des éclats de verre. Des centaines de caves, parkings, garages, magasins, grande surface, équipements municipaux (dont l'Hôtel de Ville) ont été inondées. Des milliers d'usagers ont été privés d'électricité pendant plus de dix heures (dont certaines grandes surfaces et l'Hôtel de Ville). Un bouchon de près de 10km s'est formé entre la Brèque et la mer. Au total, 22 communes de l'agglomération havraise ont été touchées par ces pluies ; 24 centres de secours ont été mobilisés, soit 120 pompiers ».

### L'inondation du 7 au 11 mai 2000 dans la région de Barentin (Vallée de l'Austreberthe)

« Le mercredi 10 mai au soir et dans la nuit du 10 au 11, la région de Barentin a subi un véritable déluge. Dévalant des plateaux gorgés d'eau, des torrents de boue et de débris se sont engouffrés dans la cuvette de la ville, et ont dévasté les rues. Une personne est décédée dans sa voiture, emportée par un torrent de boue, alors qu'elle tentait de regagner son domicile. Toute la vallée de l'Austreberthe, entre Barentin et Duclair, a été sinistrée : ponts éventrés, routes ravinées, troupeaux emportés, lotissements inondés. A Duclair, la rivière en crue s'est déversée dans la Seine, heureusement à un niveau assez bas à ce moment. Des automobilistes réfugiés sur le toit de leur voiture ont pu être secourus in extremis. Une famille, réfugiée sur le toit de sa maison, a été sauvée par les voisins au moyen d'une piscine gonflable faisant office de radeau de fortune. Un homme, happé par un torrent de boue à Saint-Paër, et traîné sur deux kilomètres, a été sauvé par des riverains [...] Dans le secteur de Duclair et Barentin-Pavilly, les établissements scolaires sont restés fermés jusqu'au week-end ».

*Source : équipe Risques Majeurs et Environnement de l'Académie de Rouen*

**Sophie Allain, Sociologue INRA**

## Chapitre 2 : Description des facteurs influençant les hautes eaux

Dans la partie estuarienne de la Seine, la variation des hauteurs d'eau est sous l'influence de plusieurs facteurs : le débit de la Seine, les apports latéraux (eaux de surface et souterraines), les marées ainsi que les conditions météorologiques. Ces différents facteurs peuvent se synchroniser à la fois à une échelle hydrologique annuelle, à l'échelle journalière lors d'un événement météorologique ponctuel, ou encore à des échelles interannuelles qui caractérisent des hauts ou bas niveaux hydroclimatiques en accord avec les fluctuations du régime climatique (Massei *et al.*, 2009). Ce chapitre discute l'influence individuelle de ces facteurs sur la variation des hauteurs d'eau de la Seine sur le territoire estuarien.

### Facteurs hydrologiques

#### Contexte climatique

Le climat de l'estuaire de la Seine est de type tempéré océanique sous influence de l'oscillation nord-atlantique. Le débit moyen annuel de la Seine est de  $435\text{m}^3/\text{s}$  à Poses (GIPSA, 2009). Le régime hydrologique du fleuve Seine est un régime simple de type pluvial (ou océanique), globalement caractérisé, d'une part par des hautes eaux dont l'amplitude et, dans une moindre mesure l'apparition dans l'année, sont variables d'une année sur l'autre (i.e., variabilité interannuelle) et d'autre part par une période d'étiage plus stable d'une année sur l'autre (Figure 11). La première phase correspond à la période de crue qui s'étend de décembre jusqu' à la fin avril. Lors de cette période, résultant des précipitations d'automne-hiver associées à une évapotranspiration limitée, le débit augmente jusqu'à atteindre des valeurs maximum en février comprises entre  $1200$  et  $2500\text{m}^3/\text{s}$ . La deuxième phase, la période d'étiage, correspond aux niveaux les plus bas atteints par le fleuve pendant les saisons de printemps-été avec des débits de l'ordre de  $250\text{m}^3/\text{s}$  et résulte de cumuls mensuels de précipitation généralement moindres (quoique la différence entre les saisons « humide » et « sèche » ne soit pas significativement marquée dans ce type de contexte) et surtout d'une évapotranspiration beaucoup plus importante durant cette période.

#### Période d'occurrence

Les crues se produisent au cours de la saison froide, lorsque les précipitations sont abondantes, les phénomènes d'évapotranspiration de moindre amplitude et les sols saturés (Guilcher, 1965). La période d'occurrence des crues en Seine, au niveau de Rouen, est de 30% en Janvier, 24% en février, 21% en mars et 6% entre novembre et décembre. La durée moyenne d'une crue décennale est approximativement de 50 jours, dont 26 jours avec un débit supérieur à  $1000\text{m}^3/\text{s}$  et 7 jours avec un débit de l'ordre de  $1500\text{m}^3/\text{s}$ .

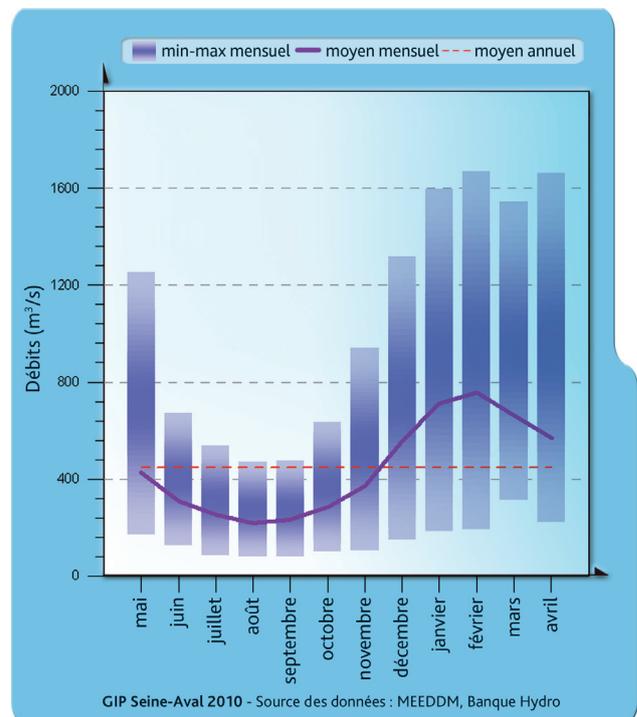


Figure 11 : Variations saisonnières du débit de la Seine pour la période de 1941-2009.

#### Propagation de l'onde de crue dans le bassin versant de la Seine

Le bassin versant de la Seine apparaît comme ayant une importante inertie en rapport avec la propagation de l'onde des crues, le rendant favorable aux lissages des épisodes pluvieux (Delsinne, 2005). Toutefois, les vitesses de propagation sont plus rapides en amont du bassin versant de la Seine (Ardennes, Haute-Marne, Haute-Seine et Morvan), ce qui s'explique par le caractère imperméable des couches géologiques dans une topographie à relief plus important (Chery, 2000).

Les ondes de crues, générées par les bassins versant attenants des affluents, se propagent pour parvenir sur la région Ile-de-France, lieu de nombreuses confluences : l'Yonne se jetant dans la Seine à Montereau, la Marne trouvant la Seine à l'amont de Paris, et l'Oise à Conflans-Ste-Honorine (Figure 12). En prenant Rouen comme référence, une onde de crue générée sur le bassin de l'Yonne dans le Morvan arrive en moyenne en 8 à 9 jours, contre 11 jours pour une onde de crue générée sur la Haute-Marne et 12-13 jours pour une onde de crue générée sur la Haute-Seine et la Haute-Aube (Figure 12).

#### Typologie des crues

La Figure 12 montre que les principaux bassins versants de la Seine ont des temps de concentration différents, donnant ainsi un caractère exceptionnel aux débordements de la Seine. Le fort débit de la Seine

est gonflé par la concomitance des ondes de crue des bassins versant attenants. Pour que cette synchronisation s'opère, il faut que les précipitations exceptionnelles soient « correctement » réparties. Il en ressort une typologie des crues qui permet d'expliquer les principes généraux des mécanismes de crue du bassin de la Seine (CATNAT).

Les crues simples sont générées par un seul épisode pluvieux de forte intensité généralisé sur l'ensemble du bassin versant. Lorsque chacune des crues ainsi formée sur le bassin de l'Yonne, de la Marne et de la petite Seine revêt une importance exceptionnelle, comme cela fut le cas en 1955, leur combinaison peut engendrer des crues importantes sur la Seine.

Les crues doubles sont générées par deux épisodes pluvieux se produisant à intervalle rapproché. Le temps séparant ces deux épisodes peut être très variable. La situation la plus critique se produit dans le cas d'un premier épisode intense, généralisé sur l'ensemble du bassin, et d'un second épisode pluvieux, pouvant être moins important, mais se produisant environ trois jours après le précédent. Une telle situation provoque une onde de crue unique sur la vallée de la Seine et de la Marne, mais deux ondes distinctes sur l'Yonne ; la seconde pointe étant concomitante avec celle en provenance de la Marne et de la Petite Seine. La crue de 1910 entre dans cette catégorie de crue double.

Les crues multiples correspondent à une succession de petites crues générées par des pluies répétées pendant

plusieurs semaines, suivies par un événement pluvieux intense touchant particulièrement la vallée de l'Yonne comme cela fut le cas en 1982. Ceci engendre une montée régulière du niveau de la Seine et de la Marne sans pointe véritablement marquée, les petites crues de l'Yonne se succédant les unes après les autres. L'événement pluvieux génère alors une onde de crue marquée sur l'Yonne qui se superpose aux eaux déjà hautes de la Petite Seine et de la Marne et engendre ainsi une crue importante de la Seine.

## Les apports latéraux

### Contexte régional

La dynamique de la Seine après les ouvrages d'Amfreville/Poses est fortement influencée par les apports latéraux définis par la contribution des affluents et de l'aquifère de la Craie à la Seine. Le découpage hydrographique de l'estuaire se décompose en deux entités distinctes : la rive droite, constituée par de nombreux affluents de la Seine (d'ouest en est : Lézarde<sup>1</sup>, Commerce, Sainte-Gertrude, Rançon, Austreberthe, Cailly, Robec/Aubette, Andelle) et la rive gauche, avec deux rivières principales (la Risle et l'Eure). La répartition des cours d'eau, de même que les surfaces drainées, sont très inégales entre ces deux rives.

1 La Lézarde ne se jette plus dans la Seine, mais fait partie du système hydrogéologique de l'estuaire.

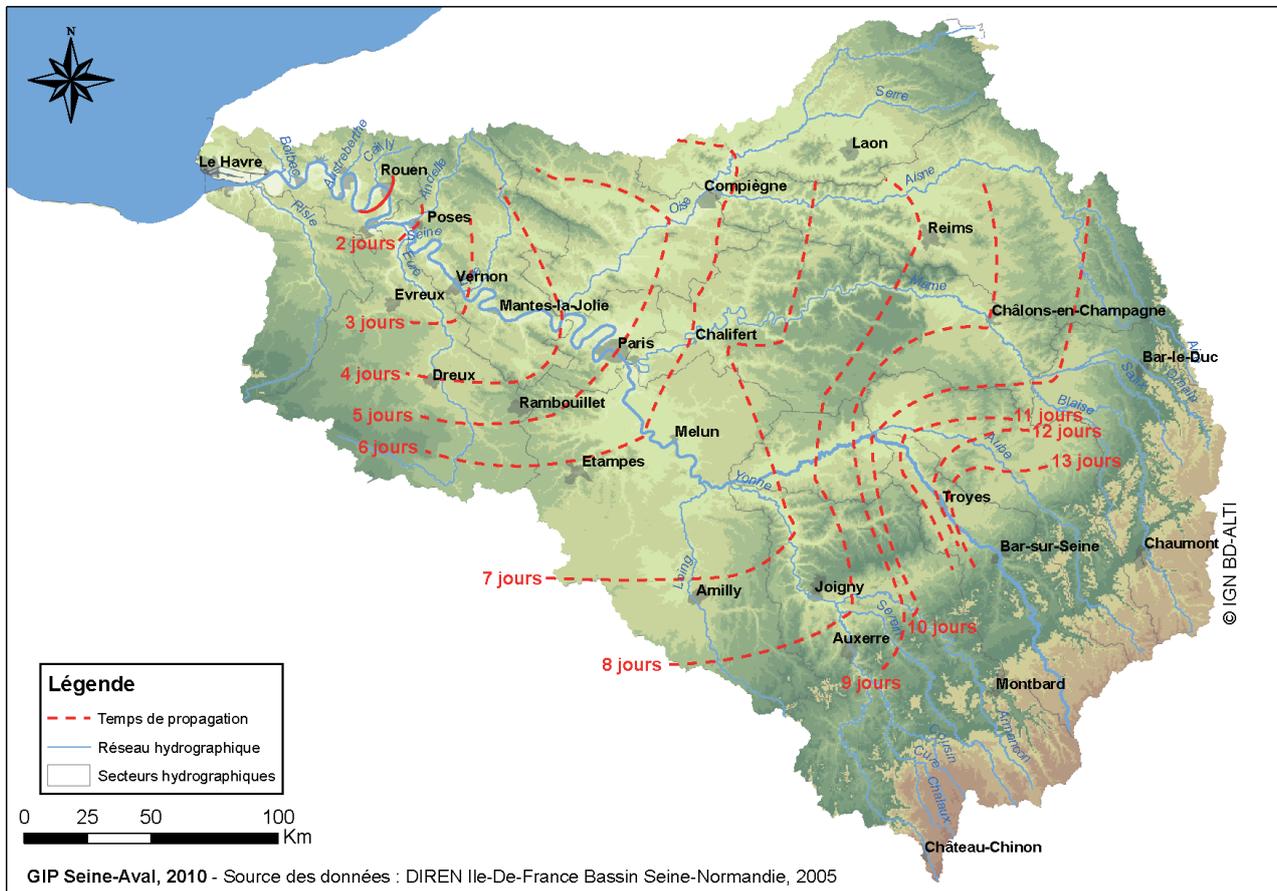
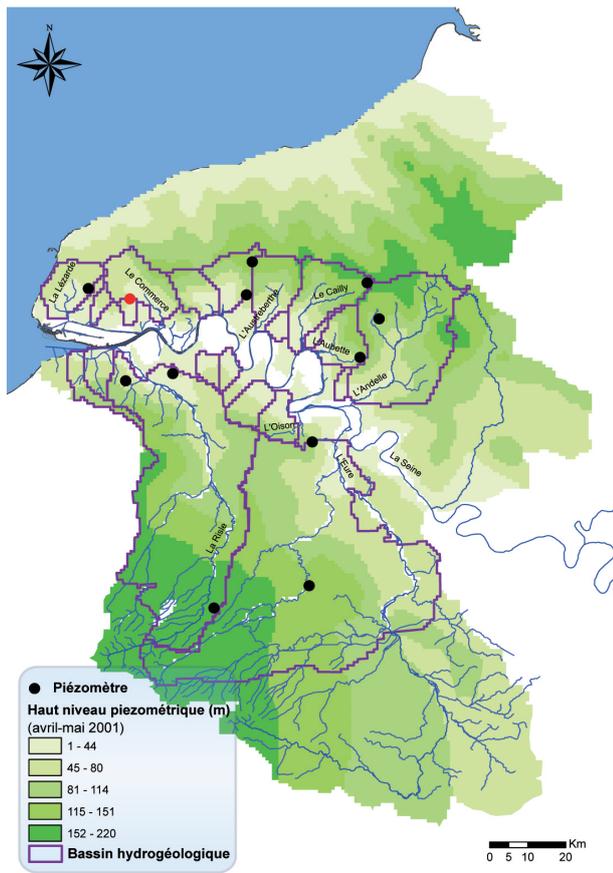


Figure 12 : Temps de propagation de l'onde de crue de la Seine et des cours d'eau attenants par rapport à la ville de Rouen.



GIP Seine-Aval, 2010 - Source des données : Massei & Fritier, 2010 ; Equilbey & Lebre, 2001

Figure 13 : Bassins hydrogéologiques et haut niveau piézométrique dans l'estuaire de la Seine.

Dans la partie aval de la Seine, le substrat crayeux et les phénomènes karstiques jouent un rôle fondamental dans le transfert des eaux météoriques depuis la surface jusqu'aux exutoires. L'aquifère de la Craie est un aquifère à nappe libre dont la surface piézométrique épouse relativement bien le relief, en formant des dômes sous les plateaux et des dépressions dans les vallées. Cet aquifère est drainé vers la Seine et vers la Manche, ce qui implique globalement un écoulement du sud vers le nord en rive gauche et du nord vers le sud en rive droite. Cependant, la nappe est aussi drainée par les cours d'eau affluents : l'existence en des endroits précis de ces rivières traduit la distribution au sein de l'aquifère des bassins versants souterrains (ou bassins hydrogéologiques), selon l'organisation spatiale du gradient hydraulique (i.e., la surface piézométrique) (Figure 13 ; Calba, 1980 ; Fournier *et al.*, 2006 ; Massei & Fritier, 2010 ; Valdes, 2005 ).

### Contribution des apports latéraux

Les apports latéraux de la Seine sont définis par la décharge de l'aquifère de la Craie et par les cours d'eau, ces derniers étant eux-mêmes, très largement pour l'essentiel de leur débit, des points de drainage de parties de cet aquifère. Dans la zone estuarienne, ces hydrosystèmes sont susceptibles de jouer un rôle important en période de crue et un rôle primordial lors des périodes d'étiages en termes de soutien du débit de la Seine. Par exemple, durant la période 1999-2009,

l'importance de cette contribution a pu être estimée entre 20% et 70 % pendant les périodes de crues (de octobre à avril avec une moyenne de 36%) et entre 30% et 144% pendant les périodes d'étiage (de août à septembre avec une moyenne de 56%) (Figure 14 ; Massei & Fritier, 2010).

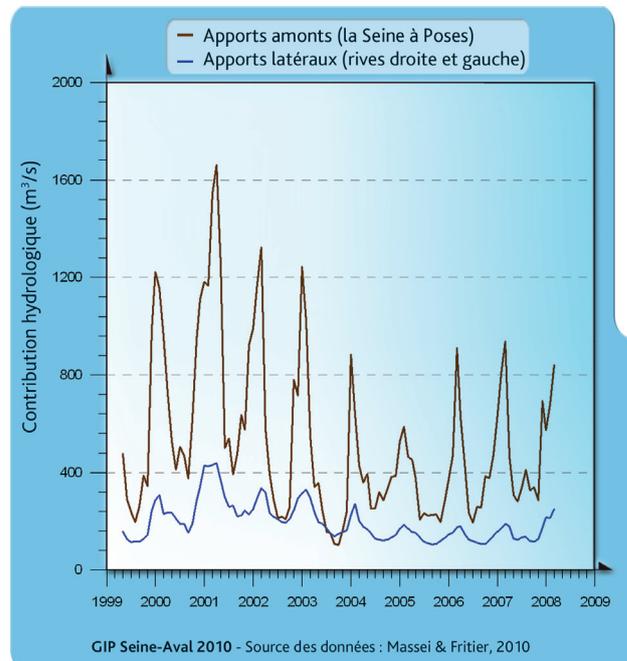


Figure 14 : Apports latéraux totaux et débit de la Seine à Poses de 1999 à 2008.

### Fluctuation des niveaux piézométriques

La contribution des apports latéraux à l'estuaire de la Seine par rapport au débit de la Seine mesuré à Poses est sujette aux variations des niveaux piézométriques, reflets physiques du niveau de recharge des nappes souterraines. La Figure 15 présente la contribution des apports latéraux à la Seine lors de période de bas, moyen et de haut niveau piézométrique. Il en ressort que quel que soit le niveau de recharge des nappes, le bassin hydrogéologique de l'Eure reste le principal contributeur pouvant fournir, en période de bas, moyen et de haut niveau piézométrique, respectivement, des débits de l'ordre de 75m<sup>3</sup>/s, 90m<sup>3</sup>/s et 190m<sup>3</sup>/s. Les bassins hydrologiques fournissant les plus faibles débits sont localisés majoritairement en rive droite avec de faibles valeurs de l'ordre de 0.1m<sup>3</sup>/s à 6m<sup>3</sup>/s en période de bas niveau piézométrique, et des débits de l'ordre de 11m<sup>3</sup>/s en période de haut niveau piézométrique (Massei & Fritier, 2010).

### Rive gauche, rive droite

La distinction des apports latéraux entre rive gauche et rive droite permet de conforter les observations précédentes (Figure 16). Les apports latéraux totaux sont majoritairement alimentés par la rive gauche avec des valeurs de l'ordre de 85-95% contre 5-15% pour la

rive droite. Le principal contributeur de la rive gauche est le bassin hydrogéologique de l'Eure, qui représente de 27 à 52% des apports latéraux totaux (souterrain et surface) de la rive gauche, contre 6 à 16% pour celui de la Risle. Les autres bassins hydrogéologiques de la rive gauche sont indépendamment assez faibles, mais leur contribution cumulée est de l'ordre de 27 à 52% (Massei & Fritier, 2010). Cette différence se justifie par la différence de taille entre les bassins hydrogéologiques, ceux de la rive gauche étant supérieurs à ceux de rive droite (Figure 13).

La décomposition entre les apports souterrains et de surface permet d'affiner la compréhension du système. Les apports latéraux de la rive droite peuvent être assimilés aux débits des rivières, puisqu'elles drainent entre 95-100% des écoulements hydrogéologiques de la rive droite. La part des écoulements souterrains dans les apports latéraux de la rive gauche est plus importante. Pour le bassin hydrogéologique de l'Eure, elle est estimée à 65% et son importance relative est maximale lors des périodes de haut niveau piézométrique. Pour le bassin hydrogéologique de la Risle, elle est estimée à 17% (Figure 17 ; Massei & Fritier, 2010).

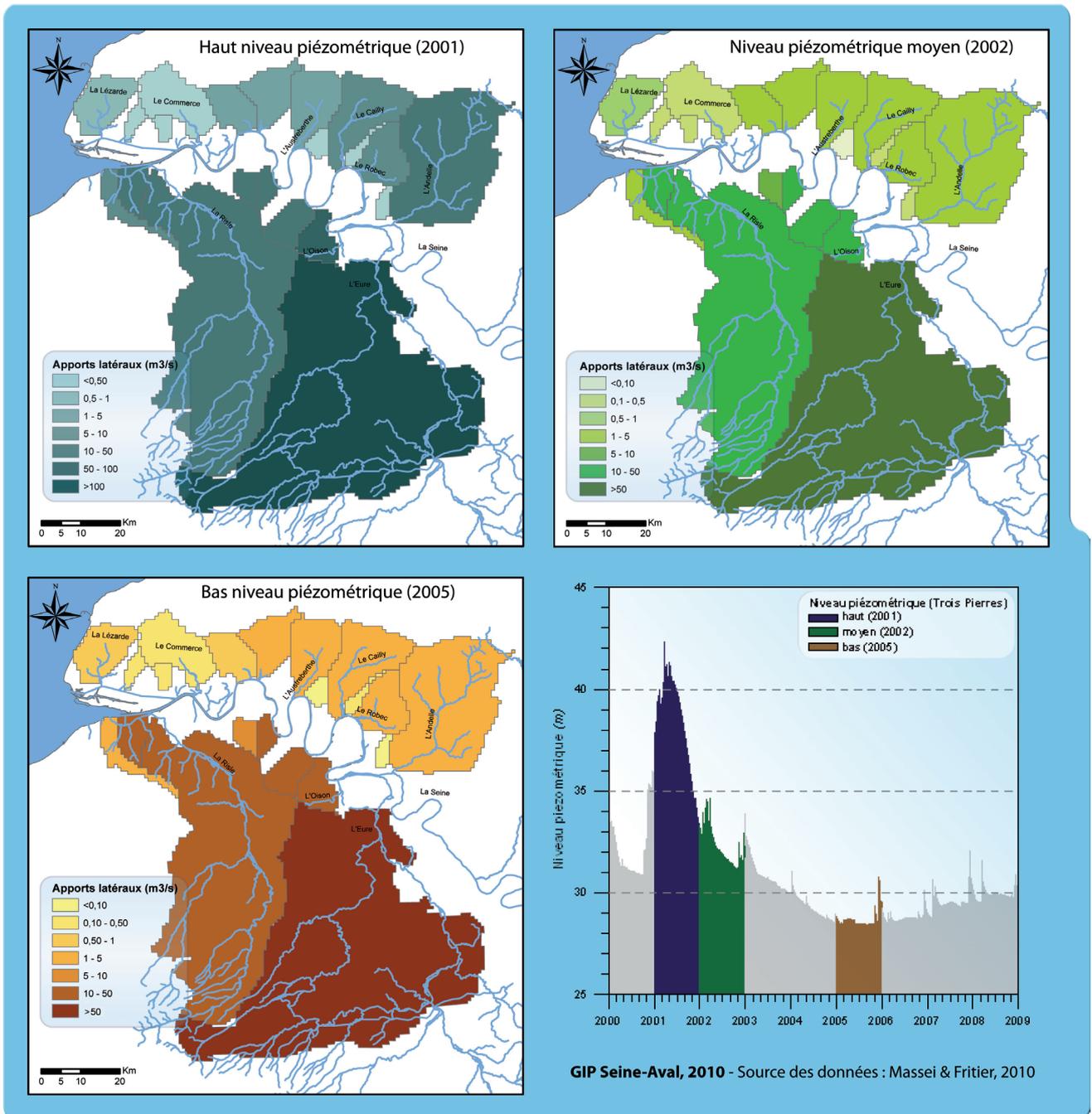


Figure 15: Apports latéraux des bassins hydrogéologiques selon le niveau piézométrique.

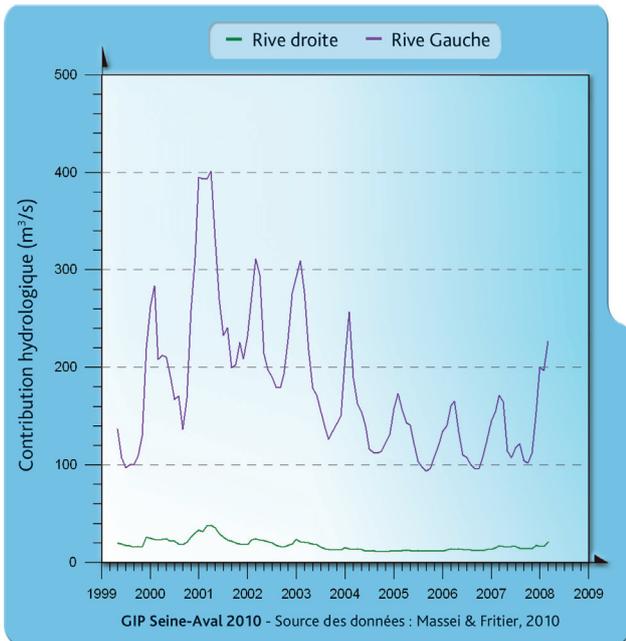


Figure 16: Apports hydrologiques des rives droite et gauche à l'estuaire de la Seine.

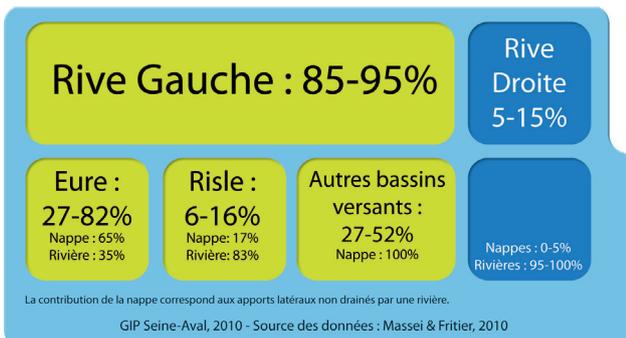


Figure 17: Contributions des apports latéraux au débit de la Seine.

### Facteur astronomique

Tableau II : Classification de l'amplitude des marées.

<b>Vive eau</b>	120 = vive eau exceptionnelle
	95 = vive eau moyenne
	70 = marée moyenne
<b>Morte eau</b>	45 = Morte eau moyenne
	20 = Morte eau exceptionnelle

La marée est la variation du niveau de la mer due à l'action gravitationnelle de la Lune et du Soleil, astres dont les mouvements peuvent être calculés avec précision sur des périodes de plusieurs centaines, voire de plusieurs milliers d'années (SHOM, 2010). Dans les régions du nord de l'Europe, les interactions Lune/Soleil/Terre donnent à la marée son caractère semi-diurne à irrégularité mensuelle. L'amplitude de la marée est modulée avec une périodicité de 14,5 jours correspondant à une demi-lunaison.

À l'échelle de la journée, la marée rythme le niveau de l'eau en quatre temps avec deux pleines mers et deux basses mers. C'est pourquoi lors d'inondations par débordement, le retrait ponctuel de l'eau peut s'effectuer pendant les basses mers. À l'échelle mensuelle, un second rythme influe sur l'évolution du niveau de l'eau, avec les vives-eaux et les mortes-eaux. À l'échelle annuelle, les vives-eaux exceptionnelles correspondent aux situations d'équinoxes, lorsque l'attraction du soleil est maximale à son passage dans le plan de l'équateur. Le coefficient de marée permet de repérer l'amplitude d'une marée. Il s'échelonne entre 20 et 120 (Tableau II ; Guérin, 2004).

La Figure 18 présente la fréquence des coefficients de marée sur la période 1985-2010 pour l'estuaire de la Seine (55 702 données). Le coefficient de marée le plus fréquent est de 74. 97% des événements de débordement se produisent en période de vives-eaux, et 50% de ces événements avec un coefficient supérieur ou égal à 97. Pour les 10% des marées présentant les plus forts coefficients ( $\geq 94$ ), des débordements sont notés une fois sur dix (Figure 18).

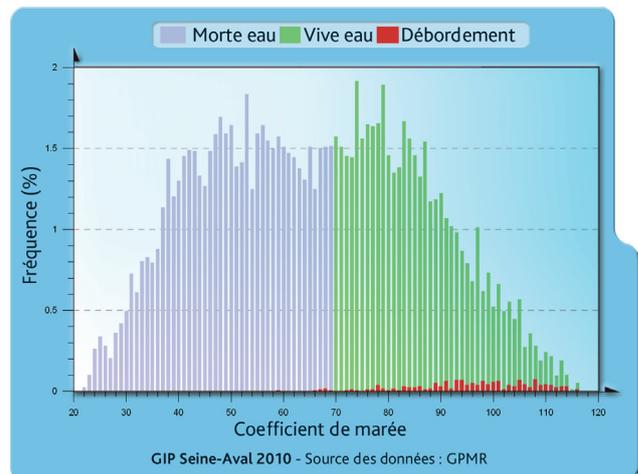


Figure 18: Fréquence des coefficients de marée et des inondations en estuaire de Seine, 1985-2010.

### Facteurs météorologiques

Les facteurs météorologiques les plus influents sur la variation des hauteurs d'eau dans l'estuaire de la Seine sont le vent et la pression atmosphérique. A l'inverse des oscillations astronomiques qui sont prédictibles, les conditions météorologiques sont des facteurs avec un caractère plus aléatoire dans le temps et dans leur intensité. Ces facteurs peuvent fortement modifier l'allure de la courbe des marées avec un impact d'une amplitude variant du centimètre au mètre.

Le vent et la pression atmosphérique sont liés et possèdent un caractère saisonnier prononcé à l'embouchure de l'estuaire. Le régime des vents au large du Havre est lié au régime des dépressions circulant d'ouest en est entre les parallèles 50°N et 60°N, ainsi qu'à l'anticyclone Atlantique stationnant au-dessus des Açores. La distribution des événements de vents forts au cours de l'année est typique d'un climat océanique tempéré (Delsinne, 2005).

Les valeurs de très faibles brises ou faibles brises (force 1 à 4 Beaufort) sont majoritairement représentées par les vents de provenance nord et nord-est. En revanche, pour les vents plus forts compris entre force 5 Beaufort (bonne brise) et force 7 (grand frais), la probabilité d'occurrence est nettement plus importante pour les vents de provenance sud-ouest. Pour les forces supérieures à 8 Beaufort, la provenance du vent est comprise entre les secteurs sud et ouest. Le fascicule Seine-Aval « Courant, vagues et marée » propose l'information complète sur les régimes des vents dans l'estuaire de la Seine et la proche Baie de Seine (Le Hir, 2001).

Les phases d'agitation importante se concentrent entre novembre et avril, coïncidant ainsi avec la période de crue

de la Seine. 67% des inondations par débordement (7883 données sur la période de 1985-2009) se sont produites lors de basses pressions (<1015hPa) et avec des vents forts (2-3 sur l'échelle Beaufort, soit 6 à 19m/s) de secteur sud-ouest (Figure 19).

Les forts vents d'ouest poussent les masses d'eau vers l'intérieur de l'estuaire et engendrent des surcotes caractérisées par un niveau d'eau plus élevé qu'en absence de vent. A l'inverse, des forts vents de secteur est poussent l'eau vers la mer et engendrent des décotes caractérisées par un niveau d'eau plus faible qu'en absence de vent. Ces mêmes phénomènes sont engendrés par les variations de la pression atmosphérique.

### Quantification de l'évolution spatio-temporelle de la contribution de la nappe de la Craie et des rivières au débit de la Seine aval

Le bassin intra-estuarien de la Seine, entre Poses et le Havre, est une zone d'interface continent/mer d'intérêts écologique, économique et social majeurs. De par son positionnement d'interface, c'est également une zone dont la dynamique naturelle est complexe. D'un point de vue hydrologique, les relations entre les différentes masses d'eau en présence (eaux marines, eaux continentales provenant des rivières latérales, de la nappe de la Craie, eaux de la Seine amont) y sont encore mal connues. En particulier, les apports latéraux en aval de Poses, comprenant les apports des rivières affluentes et de la nappe de la Craie, ne sont pas connus de façon suffisamment précise sur le plan quantitatif, de même que leur variabilité sur le moyen ou le long terme. De plus, les résultats apportés par le projet RexHySS, dont le but était d'évaluer les impacts du changement climatique sur les ressources en eau et les extrêmes hydrologiques dans les bassins versants de la Seine et de la Somme par modélisation à l'horizon 2100, émettent l'hypothèse d'une réduction du débit de la Seine de l'ordre de 50% des débits d'étiage et de 20% des débits de crue d'ici 2100. Ils mettent encore davantage en exergue la nécessité de connaître le plus précisément possible l'état quantitatif actuel des apports continentaux « aval » ainsi que leur évolution sur la dernière décennie.

Dans ce but, une première évaluation de ces apports a été réalisée pour les bassins hydrologiques et hydrogéologiques affluents à la Seine en aval du barrage de Poses. La méthodologie est basée sur l'analyse géomorphométrique par cartographie numérique du modèle numérique de terrain et de la carte piézométrique numérisée de la zone d'étude. Cette zone est décomposée par analyse géomorphométrique en différents bassins et sous-bassins hydrogéologiques auxquels la loi de Darcy est ensuite appliquée pour le calcul des flux de nappe. Dans un second temps, l'utilisation de toutes les chroniques piézométriques disponibles dans la région d'étude permet une estimation de la variabilité temporelle des flux calculés, et de discuter de l'impact de conditions hydrologiques exceptionnellement excédentaires ou déficitaires rencontrées durant la dernière décennie. Les données sont fournies par la DREAL et par le BRGM.

D'un point de vue technique, l'aquifère de la craie, pour cette étude, est considéré régionalement comme un mi-

lieu poreux équivalent. De nombreux travaux antérieurs ou en cours menés au laboratoire M2C de l'Université de Rouen et l'expertise qui en découle, notamment sur le fonctionnement karstique de cet aquifère, permettent de fixer les limites de validité de cette approche. Une valeur de conductivité hydraulique est ainsi assignée à chaque bassin hydrogéologique identifié, mais cette valeur reste fonction du temps, précisément en raison du caractère karstique de la Craie (variabilité du drainage de la nappe par la double perméabilité karstique de l'aquifère).

Les paramètres physiques utilisés pour l'application de la loi de Darcy (longueur et section moyenne d'écoulement) sont déterminés par l'analyse de la carte des niveaux piézométriques. Le gradient hydraulique appliqué, variable dans le temps, utilise pour chaque bassin la longueur d'écoulement, le niveau piézométrique le plus aval du bassin, et le niveau piézométrique le plus amont, ce dernier étant calé sur la fluctuation piézométrique observée au moyen des chroniques disponibles. Le niveau piézométrique amont doit être situé dans le même compartiment hydrogéologique et structural que le bassin hydrogéologique correspondant. Les valeurs de conductivité hydraulique sont calculées par la loi de Darcy en tous points de résurgence de nappe ou à partir de chroniques de débit de base estimées des rivières (filtrage par traitement du signal hydrologique des composantes rapides liées au ruissellement). La validité des valeurs de conductivité hydraulique calculées est contrôlée par application de la loi de Darcy en d'autres points où des séries de débit sont disponibles, pour lesquels les débits sont correctement reproduits.

Les résultats obtenus montrent que les écoulements hydrogéologiques de la rive droite sont essentiellement drainés par les rivières. Il est donc raisonnable d'évaluer l'évolution des apports latéraux de la rive droite en ne prenant en compte que le débit des rivières, même si cela revient à effectuer une approximation avec une erreur de 5% environ. En revanche, les écoulements hydrogéologiques de la rive gauche sont plus complexes: les écoulements souterrains comme le débit des rivières contribuent de manière importante au bilan hydrogéologique total.

Nicolas Fritier, Doctorant en Hydrogéologie

Les périodes dépressionnaires se caractérisent par une pression de l'air plus faible (<1015hPa) avec une augmentation de la hauteur du niveau d'eau (surcote).

Le phénomène inverse se produit lors des périodes anticycloniques avec une pression de l'air plus forte (>1015hPa) (GPMR) et un niveau d'eau plus faible (décote).

## Utilisation des marégraphes sur le territoire Seine Aval

L'intérêt de l'observation des marées en Seine a toujours été intimement lié à la navigation. Jusqu'au milieu du XIXe siècle, la navigation en Seine était très hasardeuse. Elle ne pouvait se faire que par marées hautes de vives-eaux. Autrement, l'échouage sur un banc de sable était probable. C'est pour éviter ces écueils qu'aujourd'hui comme hier, le commerce maritime sécurise son activité en s'appuyant sur un réseau de mesure de marée en Seine.

### Etat des lieux du réseau marégraphique actuel

Aujourd'hui, le réseau marégraphique de la Seine est composé de 17 marégraphes. Ils sont répartis sur 146km entre l'embouchure de la Seine et Elbeuf. Leur espacement varie entre 6 et 12 kilomètres (Figure B).

Le réseau marégraphique de la Seine est sensiblement le même depuis plus d'un siècle. En effet, la localisation des marégraphes et le type de mesures réalisés n'ont guère varié. Ceci vient du fait qu'un bon nombre de marégraphes a une fonction spécifique. Tout au long de la Seine, il existe aussi en parallèle un réseau d'échelles de marée qui permet de pallier une panne ou une absence de marégraphe (notamment entre Elbeuf et Poses).



Figure B : Réseau marégraphique du Grand Port Maritime de Rouen

### Un réseau aux usages multiples : usage nautique et commercial.

#### Définition des capacités nautiques du chenal

La mesure de la marée permet sur le long terme de réaliser des abaques de prévisions de hauteur d'eau pour une configuration donnée (débit et coefficient de marée). Ces prévisions constituent les courbes type de marée, restituées dans l'annuaire de marée du Port de Rouen. Associées à des prédictions de coefficient de marée, elles permettent de prévoir les hauteurs d'eau pour une date future. Ces informations servent de base pour déterminer si l'accueil d'un navire est possible ou non à une date donnée.

### Optimisation du chenal

Au-delà de la connaissance théorique de la marée en un lieu, les marégraphes permettent d'affiner, par exemple, le tirant d'eau d'un navire ou son transit. En effet, au jour le jour, au gré des fluctuations du débit de la Seine et des perturbations atmosphériques, des surcotes ou décotes viennent s'ajouter à la marée théorique prédite. Le réseau marégraphique donne une description fine (à 5cm près) de la marée tout au long de la Seine, ce qui permet d'optimiser le chenal pour la navigation. Une moins bonne connaissance de la propagation de la marée conduirait à augmenter la marge de sécurité entre la coque du navire et le fond (le « pied de pilote »), ce qui, à fond constant, diminuerait les tirants d'eau.

### Exploitation portuaire

Les marégraphes du port situés sur les communes de La Bouille, Petit-Couronne et Rouen sont très utiles pour déterminer la fenêtre horaire de départ des navires de leur poste à quai et l'arrivée du mascaret en vives eaux extrêmes (afin de soulager les amarres pour ne pas les casser). Plus généralement, tous les marégraphes en Seine à proximité d'installations portuaires jouent ce rôle : Tancarville pour Radicatel, Saint-Léonard pour Port-Jérôme...

### Sécurité des transits

Le transit des navires à la descente a pour particularité de rencontrer une basse mer locale entre Villequier et Vatteville. Les fonds en aval remontant, les navires doivent attendre que le niveau d'eau remonte lui aussi pour pouvoir transiter plus aval. Le marégraphe de Vatteville joue donc un rôle particulier pour les navires descendants. Pour que les navigants puissent avoir cette information, un peu plus en aval, un feu dit de « flot » a été installé. Il signale aux pilotes de Seine que le plan d'eau remonte. Ceci est d'autant plus important que quelques kilomètres en aval, à Courval, il existe un haut-fond constitué de roches.

### Études et ingénierie :

La connaissance de la marée est déterminante pour le dimensionnement et la réalisation de projets comme la réalisation de quais, de points de rejet ou de pompage ou pour des études de génie écologique (temps de submersion),...

### Prévision et suivi des crues

Le réseau de marégraphes permet de suivre en temps réel l'évolution des crues et d'élaborer la prévision des niveaux de pleine mer et les débordements de la Seine (prévisions élaborées par le SPC).

Olivier Macur, GPMR

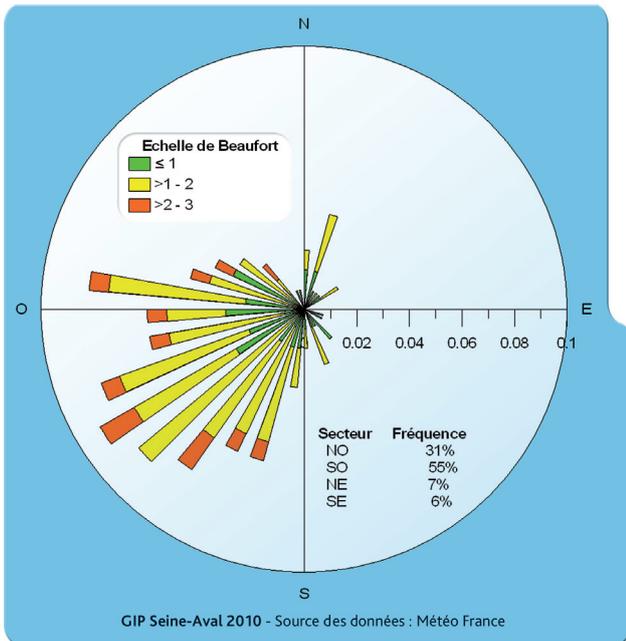


Figure 19 : Rose des vents lors des débordements de la Seine à Rouen entre 1986 et 2007.



Figure 20 : Enregistrement de la surcote du 16/10/1987 au marégraphe du Havre.

## Facteurs anthropiques

### Ouvrages d'Amfreville/Poses

Les ouvrages d'Amfreville/Poses caractérisent la limite amont de l'estuaire de la Seine, la marée étant ressentie jusqu'à ce point. Cet ensemble se décompose en plusieurs entités : deux écluses, un barrage, une centrale hydroélectrique et une passe à Poisson (Base de Léry-Poses, 2004a ; 2004b).

Le barrage permet d'assurer la navigabilité du bief amont en maintenant un niveau d'eau suffisant pour la navigation

(8m). Deux écluses permettent le passage des bateaux. Cet ouvrage 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, cet ouvrage ne joue donc aucun rôle de retenue d'eau et son fonctionnement ne permet pas de « lâché d'eau » en période d'étiage.

A l'extrémité du barrage, une centrale hydroélectrique permet une production électrique. Mise en service en janvier 1992, elle est gérée par la société Hydrowatt. Sa capacité est de 8 MWatt et son fonctionnement est assuré par 4 turbines verticales activées par la chute d'eau. C'est donc pendant les périodes d'étiage, où la différence de hauteur entre le bief amont et aval est la plus grande, que sa production est au maximum. La centrale électrique est moins active en période de crue.

Depuis leur création en 1885, ces ouvrages ont constitué un obstacle quasi infranchissable (passage uniquement possible par les écluses) pour les poissons migrateurs. En 1984, la loi sur la pêche oblige tous les propriétaires de barrages installés sur les cours d'eau à poissons migrateurs à aménager leurs ouvrages pour permettre aux poissons de circuler librement. Ainsi, une passe à poisson fut construite à la demande du Conseil Supérieur de la Pêche. Son principe est simple : il s'agit d'attirer les poissons en aval du barrage et de les inciter à passer par une voie d'eau artificielle contournant ce barrage. Une échelle à poissons permet de diviser le dénivelé (entre le bas et le haut du barrage, les poissons remontant le courant) en petits créneaux de 25 à 30cm, rendant le passage du barrage possible à de nombreuses espèces. Cette passe à poisson, ouverte au public, est équipée



Figure 21: Passe à poisson du barrage de Poses

d'une chambre d'observation avec un système de vidéo-comptage permettant de comptabiliser les passages des poissons. Parmi les espèces sédentaires, sont retrouvés des cyprinidés (brème, gardon, tanche, carpe, rotengle,...) et des carnassiers (perche) et d'autres poissons comme le barbeau fluviatile. Des espèces non indigènes (introduites directement par l'homme ou qui ont colonisé le bassin de la Seine suite aux créations des voies de navigation depuis 250 ans) comme le silure ou l'amour blanc sont également observées. Des espèces migratrices sont enfin comptabilisées (mulet, lamproie marine, alose, truite, anguille, saumon,...). Une trentaine



Figure 22 : Passage d'un saumon à la passe à poissons.

d'espèces est ainsi régulièrement observée (Ciolfi & Paporey, 2009 ; Base de Léry-Poses, 2004b).

### Les lacs-réservoirs

Les grandes inondations de 1910, 1924 et la sécheresse de 1921 ont motivé la construction d'ouvrages de retenue d'eau en tête de bassins de la Seine. L'objectif était de régulariser le débit des principales rivières, pour limiter les crues et soutenir le débit d'étiage de la Seine. Actuellement, six ouvrages d'une capacité totale de 832 millions de m<sup>3</sup> d'eau permettent cette régularisation (Figure 23). Les principaux sont gérés par l'Institution Interdépartementale des Barrages-Réservoirs du Bassin de la Seine (IIBRBS), aussi appelée «Les Grands lacs de Seine ». Cette institution est un établissement public dirigé par un conseil d'administration composé de 24 conseillers généraux issus des départements de Paris, des Hauts-de-Seine, de Seine-Saint-Denis et du Val-de-Marne. La gestion des ouvrages s'effectue par application de règlements d'eau pris par arrêtés préfectoraux. Les objectifs de remplissage et de vidange de l'année sont approuvés par le Comité Technique de COordination de l'Institution (COTECO) qui regroupe les représentants institutionnels du bassin, les représentants des régions amonts et de la région Ile-de-France et les principaux usagers (IIBRBS, 2010).

### Fonctionnement du barrage de Poses

Construit à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, le barrage de Poses était initialement réalisé pour une chute d'eau de 4 mètres qui devint rapidement difficile à manœuvrer. Lorsque le barrage de Martot, situé à 15km à l'aval de Poses, fut détruit en 1943, la chute d'eau passa de 4m à 8m en étiage avec un système classique de vannes et clapet. L'ouvrage comporte deux écluses avec deux sas de 200m x 17m et 141m x 12m. Le barrage est composé de sept passes dont deux sont hors service. Les cinq passes encore en service mesurent 30.16m. Quatre sont équipés de vannes tenantes à clapets mobiles délassants et une passe est équipée d'une vanne tenante monobloc. Les clapets sont équipés de deux vérins hydrauliques activés en deux temps pour l'ouverture complète (Figure C). Le régime hydraulique du barrage est dimensionné par rapport à la crue de 1910 et aux régimes hydrologiques de la Seine. La retenue normale amont atteint la cote de 8m, contre 2.58m pour la retenue normal aval.

Les manœuvres sont réalisées en automatique sur les vannes et les clapets. L'automate commande l'ouverture et la fermeture des vannes et des clapets, de manière à garantir un mouillage de 8m pour le bief amont. Les ordres d'ouverture sont donnés de la rive gauche vers la rive droite de la passe P2 vers la passe P5 en débutant par les clapets. La passe P6 est manœuvrée manuellement afin de prévenir tous dysfonctionnements du système et éviter un assèchement brutal du bief. Les ordres de fermeture sont donnés de la rive droite vers la rive gauche de la passe P5 vers la passe P2. Pour les passes automatisées, aucune manœuvre n'est autorisée sur les clapets tant que toutes les vannes n'ont pas atteint leurs fins de courses fermeture. Lorsque le barrage est

en position totalement fermé (vannes et clapets ayant atteints leurs fins de courses fermeture) une information est envoyée à l'automate de la centrale hydroélectrique qui prend le relais pour le maintien du niveau de référence 8m (NGF Orthométrique Lallemand) en diminuant la production des turbines. La cote est mesurée à l'amont des écluses par deux sondes à ultrasons (Gibert & Boillon, 2007a ; 2007b)

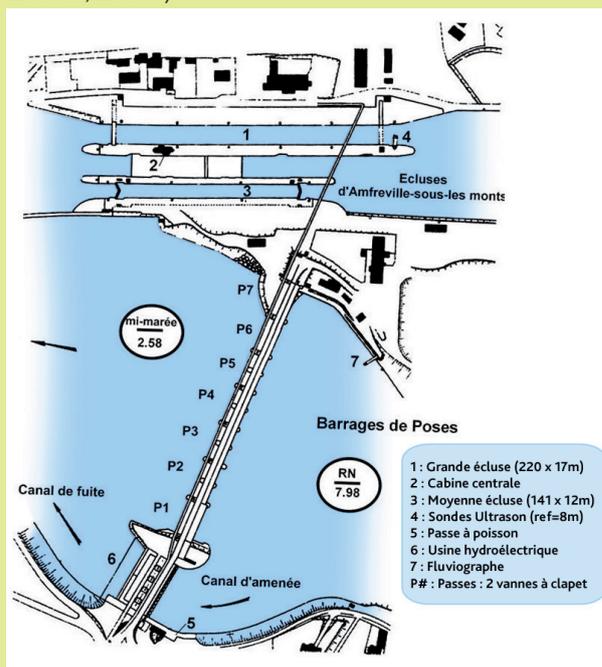


Figure C : Plan des ouvrages d'Amfreville / Poses

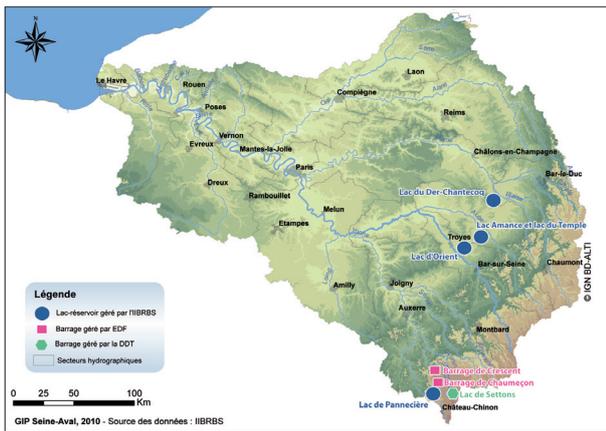


Figure 23 : Ouvrages associés à la régularisation du débit de la Seine.

Pour répondre à l'objectif des deux missions de l'institution, le soutien des débits d'étiage et la réduction des inondations pour la région parisienne, les lacs-réservoirs sont progressivement remplis suivant une courbe d'objectif du 1er novembre au 30 juin en fonction du débit du cours d'eau amont (Figure 25). En cas de crue, des prélèvements supplémentaires sont effectués. La capacité de stockage disponible au cours de l'hiver et du printemps est adaptée à l'importance des crues pouvant intervenir à ces périodes et a été défini par simulation des grandes crues observées sur le bassin (1910, 1924, 1955,...). En cas de crues successives et rapprochées, le contrôle du débit est plus difficile et un risque de saturation des ouvrages subsiste en cas de pluies diluviennes en avril ou en mai, moment où les réservoirs sont proches de leur côte maximale (Bravard, 2000). De plus, l'Yonne assurant au minimum 40% du volume d'écoulement d'une crue à Paris, les barrages-réservoirs de la Pannecière, Crescent et Chaumeçon, localisés dans le Morvan, sont trop en amont pour contrôler et réduire suffisamment les volumes d'eau. Depuis 2008, le barrage des Settons géré par la DDT de la Nièvre est également associé à l'écrêtement des crues et au soutien des débits d'étiage par les dispositions de son nouveau règlement d'eau. Les Grands lacs de Seine conduisent actuellement un projet complémentaire d'écrêtement des

crues par un stockage des eaux de la Seine dans la zone humide de la Bassée (confluence Seine–Yonne) lors des crues de l'Yonne afin de limiter le débit de crue en aval de cette confluence. Dans cette stratégie de lutte contre les inondations, le dimensionnement des infrastructures est optimisé pour la protection de la région parisienne et ces ouvrages contrôlent 17% du bassin versant de la Seine à la confluence avec la Marne. Ainsi pour une crue semblable à celle de 1910, l'impact estimé des-lacs réservoirs serait un abaissement de 70 cm sur la ligne d'eau à Paris (Figure 24). Ces ouvrages ne sont donc pas dimensionnés pour empêcher les grandes inondations, mais permettent de réduire les dégâts occasionnés et leur coût (IIRBSB, 2010 ; Rizzoli).

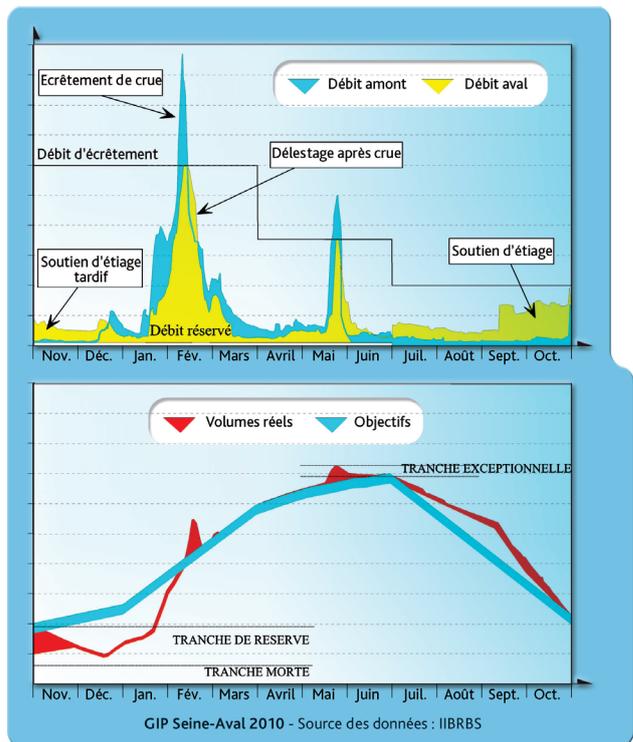


Figure 24 : Influence des lacs réservoirs sur le débit de la Seine à Paris-Austerlitz (crue de 1910 et année 1995).

Tableau III : Lacs-réservoirs du bassin de la Seine gérés par l'IIRBSB.

	Lac de Pannecière	Lac d'Orient	Lac du Der-Chantecoq	Lac Amance et lac du Temple
Rivière en dérivation(*)	Yonne	Seine	Marne & Blaise	Aube
Année de mise en service	1949	1966	1974	1989/1990
Surface du bassin versant contrôlé (km <sup>2</sup> )	220	2400	2950	1650
Superficie de l'ouvrage (km <sup>2</sup> )	5,2	23	48	23
Capacité normale de remplissage (millions de m <sup>3</sup> )	80	207,8	350	170
Capacité exceptionnelle de remplissage (millions de m <sup>3</sup> )	82,5	219,5	364,5	185
Débit maximal de prélèvement (m <sup>3</sup> /s)	82(**)	180	408	135
Débit maximal de soutien d'étiage (m <sup>3</sup> /s)	14	35	50	35

(\*) hors Yonne

(\*\*) totalité du débit - maximum connu lors de la crue de 1999

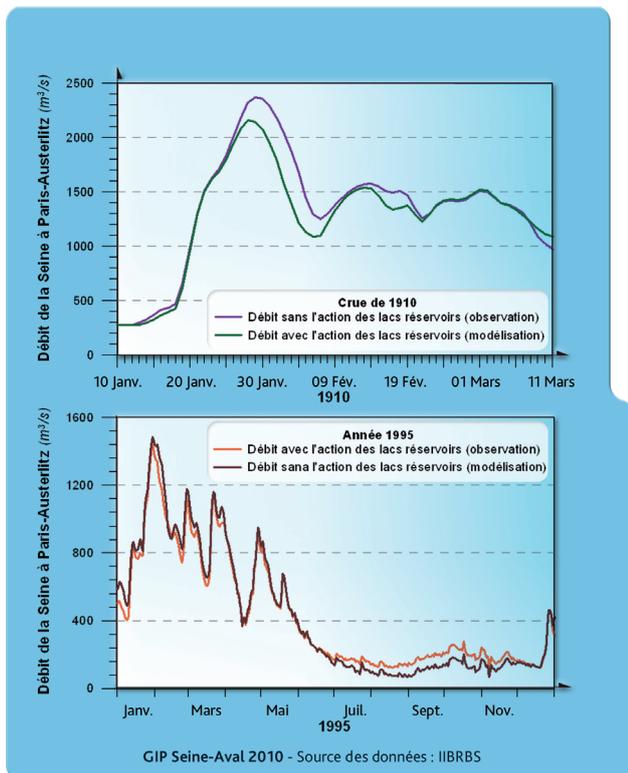


Figure 25: Principe général de fonctionnement hydrologique des Grands Lacs (Source des données : IIBRBS).

Pour répondre aux objectifs de soutien des débits d'étiage, de navigation, de prélèvement d'eau pour la consommation et l'utilisation industrielle, ainsi que de maintien de la vie écologique dans les cours d'eau, les volumes d'eau stockés dans les ouvrages sont restitués du 1er juillet au 31 octobre selon des objectifs annuels de vidange adaptés aux besoins des usages et au stock disponible au 1er juillet (Figure 25). La restitution des stocks d'eau se fait de manière progressive, afin de compenser l'affaiblissement du débit naturel des cours d'eau. Les lâchures cumulées des ouvrages représentent un apport moyen maximal de 70m<sup>3</sup>/s en période d'étiage (de juillet à octobre), pour une année de remplissage complet. En période de sécheresse, les lacs-réservoirs apportent ainsi 75% du débit de la Seine à Paris. La vidange peut être prolongée en novembre et décembre en cas d'étiage sévère. Au 1<sup>er</sup> novembre, il ne subsiste dans les réservoirs que la tranche morte, définie comme étant le volume minimal nécessaire à la survie de la faune piscicole présente dans les réservoirs (30 millions de m<sup>3</sup> pour les 4 lacs) et la tranche de réserve, permettant un éventuel soutien d'étiage en novembre et décembre (51 millions de m<sup>3</sup> pour les lacs), cette dernière pouvant être majorée en année sèche lors des réunions du COTECO.

Actuellement, il n'existe aucune étude sur l'influence des Grands lacs de Seine sur le débit mesuré à Poses et sur les niveaux d'eau dans l'estuaire de la Seine. La gestion de ces ouvrages est optimisée pour protéger la région parisienne et ne permet pas une prévention du risque inondation par débordement de la Seine dans l'estuaire. En effet, l'inertie du bassin versant est telle qu'il est impossible de palier les phénomènes hydrologiques ayant cours dans l'estuaire, à partir de l'amont du bassin versant de la Seine.

## Chapitre 3 : Combinaison des facteurs influençant les hautes eaux

Pris individuellement, chaque facteur décrit dans le chapitre précédent influe sur la hauteur de la Seine. Les événements extrêmes (crues ou étiages) sont par contre souvent la résultante de la combinaison de conditions particulières atteintes pour chacun de ces facteurs. Le présent chapitre s'appuie sur la description de quelques inondations pour aborder comment ces facteurs peuvent se combiner pour déclencher une inondation.

### Inondations de 1970, 1995 et 2001 : prédominance de la crue

Les inondations de 1970, 1995 et 2001 sont essentiellement liées à de forts débits (>2000m<sup>3</sup>/s) liés à de fortes précipitations sur l'ensemble du bassin versant de la Seine pendant la période automnale et hivernale. La comparaison de ces trois événements permet de comprendre que des crues ayant une intensité similaire en termes de débit maximum atteint n'ont pas la même dynamique pendant une année hydrologique. Ainsi, les différences de hauteur d'eau atteinte pendant les événements s'expliquent souvent à l'échelle journalière en fonction de la synchronisation entre les débits et les conditions météorologiques.

La montée de la crue de 1995 est subite et soutenue durant 5 mois de janvier à mai. La Seine déborde à Rouen durant 10 jours. La crue de 2001 est plus progressive, commence 3 mois plus tôt et se termine en mai. La Seine déborde à Rouen durant 16 jours. Cette crue fait suite à 3 années humides consécutives et les niveaux piézométriques enregistrés dans les nappes souterraines sont les plus hauts depuis presque 40 ans. Les apports souterrains ont joué un rôle important dans le soutien du débit et dans l'importante durée de l'inondation. La montée de la crue de 1970 ressemble à celle de 1995. Elle est également subite, mais commence plus tard et les débits restent élevés sur une période plus courte, avec des débordements à Rouen pendant 4 jours (Figure 26 ; Tableau IV).

#### Inondation de mars 1970

La crue de 1970 débute dès février et la Seine déborde un mois plus tard, et ce pendant 6 jours (Figure 27). À partir du 6 mars, la Seine atteint son débit maximum de 2089m<sup>3</sup>/s. Entre le 8 et le 9 mars, le fleuve atteint sa hauteur maximum de 9.38m CMH à Rouen. La marée de vives-eaux (coefficient de 114) est accompagnée de basses pressions (985hPa) et d'un vent de 60km/h orienté sud-ouest. Cette inondation reste exceptionnelle du fait de son impact sur l'ensemble de l'estuaire de la

Tableau IV: Intensités de débit par année hydrologique.

	Hauteur d'eau atteinte à Rouen (/0CMH)	Débit de la Seine à Poses (m <sup>3</sup> /s)	Nombre de jours avec un débit supérieur à			Nombre de jour avec un débordement à Rouen
			1000 m <sup>3</sup> /s	1500 m <sup>3</sup> /s	2000 m <sup>3</sup> /s	
1 février 1995	9,69	2073	77	11	10	16
28 mars 2001	9,6	2280	79	34	13	28
9 mars 1970	9,38	2038	20	19	6	4

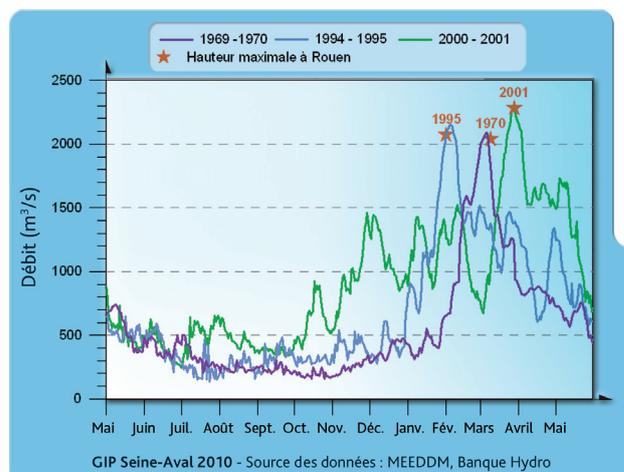


Figure 26 : Débit des années hydrologiques 1970, 1995 et 2001.

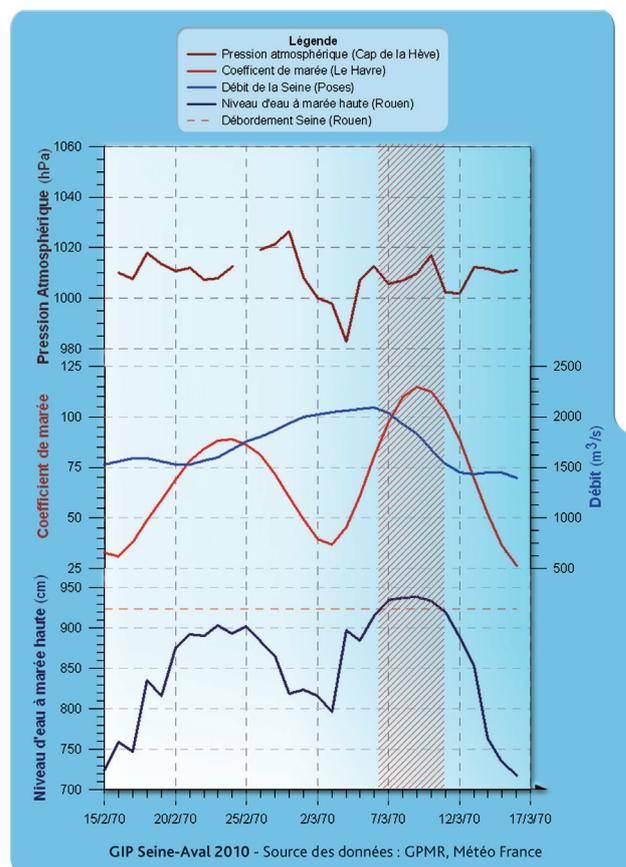


Figure 27 : Chronique de l'inondation de mars 1970.

Seine (dépassement de la limite atteinte par la crue de 1910 à l'aval de l'estuaire), mais aussi compte tenu des travaux d'aménagement déjà effectués avant 1970 pour réduire les inondations (Foussard *et al.*, 2010).

### Inondation de janvier/février 1995

Le 23 janvier 1995, les rouennais échappent de justesse à une inondation provoquée par une forte dépression à 1000hPa, accompagnée d'un vent fort d'orientation sud-ouest (Figure 28). Le débordement ne se produit pas du fait d'un faible coefficient de marée de 65. Toutefois, le 29 janvier, les riverains ne seront pas épargnés, l'eau commence à déborder sur les quais de Rouen, pour atteindre le 1<sup>er</sup> février la hauteur de 9.68m (CMH). Le débit maximum atteint est de 2074m<sup>3</sup>/s, en synchronisation avec une marée de vives-eaux d'un coefficient de marée de 106.

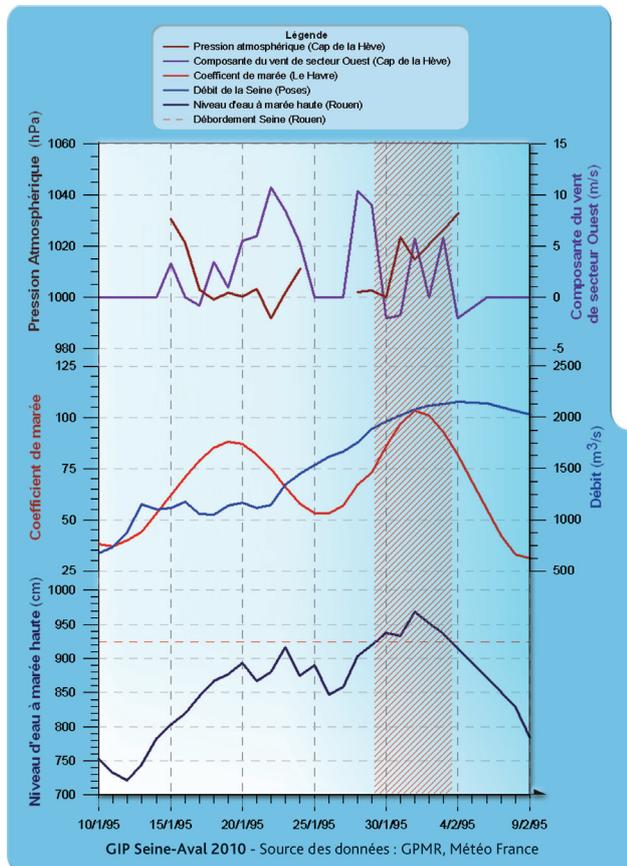


Figure 28 : Chronique de l'inondation de janvier/février 1995.

### Inondation de mars 2001

A partir du 23 mars 2001, de fortes dépressions conjuguées à de forts vents initialisent le débordement des berges à Rouen (Figure 29). Le 26 mars, alors que la marée de vives eaux augmente en intensité, la cote aux berges de Rouen reste constante. Le 28 mars, le débit est à son maximum avec 2280m<sup>3</sup>/s et coïncide avec une dépression et de forts vents orientés sud-ouest, le coefficient de marée de vives eaux est de 89. Ces conditions provoquent l'augmentation des niveaux

d'eau. Ce n'est que le 30 mars que le niveau des cotes se retrouve sous le niveau des berges de Rouen. La crue de 2001 est assez mémorable du fait de sa persistance et du grand nombre de communes touchées, notamment à cause des remontées de nappes de la rive gauche (BRGM, 2001).

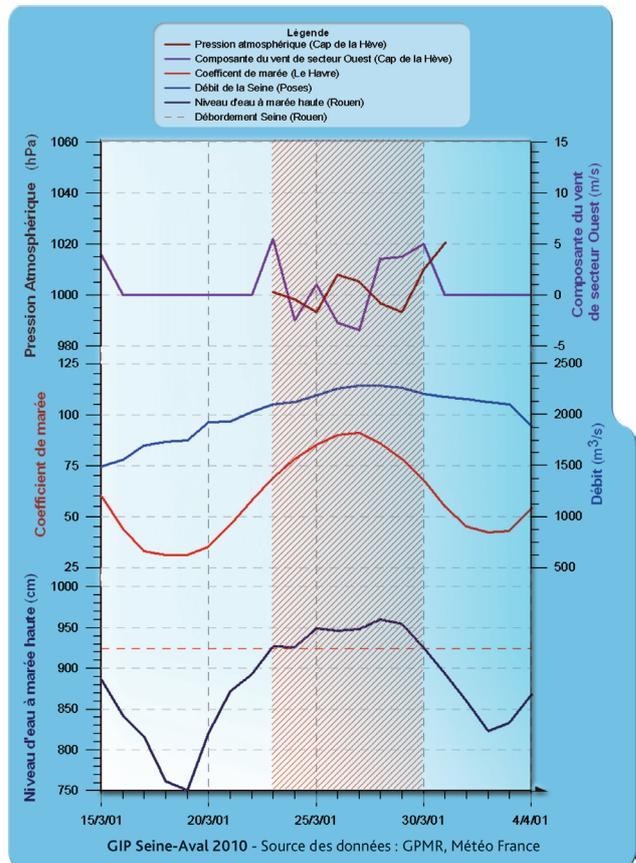


Figure 29 : Chronique de l'inondation de mars 2001.

### Inondations 1990 et 1999 : prédominance des facteurs marins

Les événements hydrologiques de 1990 et de 1999, avec respectivement 641m<sup>3</sup>/s et 626m<sup>3</sup>/s de débit maximum, ne sont pas la conséquence d'une activité hydrologique intense, mais sont liés à des événements météorologiques

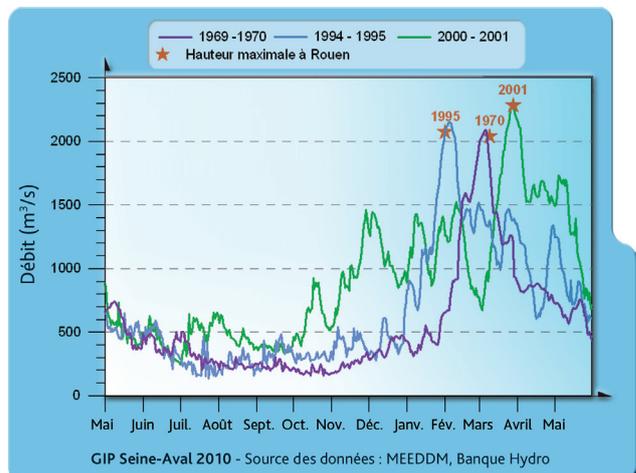


Figure 30 : Débit des années hydrologiques 1990 et 1999.

exceptionnels. Ce sont des violentes tempêtes qui ont provoqué des inondations, de courte durée, de l'ordre de 1 à 3 jours. L'activité hydrologique annuelle en 1990 n'est pas fortement soutenue, avec seulement 8 jours avec un débit supérieur à 1000m<sup>3</sup>/s. L'activité hydrologique de 1999 est à peine en dessous des valeurs moyennes observées en Seine, avec un débit supérieur à 1000m<sup>3</sup>/s sur une durée de 45 jours (Figure 30 ; Tableau V).

### Inondation de Février 1990

En 1990, ce n'est que tardivement (à partir de la mi-février) que la Seine entre dans sa période de crue. Le 25 février, malgré une diminution du débit, la Seine déborde à Rouen (Figure 31). Les conditions climatiques sont défavorables, avec de nouvelles dépressions et de forts vents orientés sud-ouest et évalués à 100km/h. Le 27 février, la météo ne s'améliore pas et les plus basses pressions atmosphériques coïncident avec la marée de vives-eaux d'un coefficient de marée de 106. C'est entre le 1<sup>er</sup> et le 2 mars, que les conditions météorologiques permettent la diminution du niveau d'eau à Rouen.

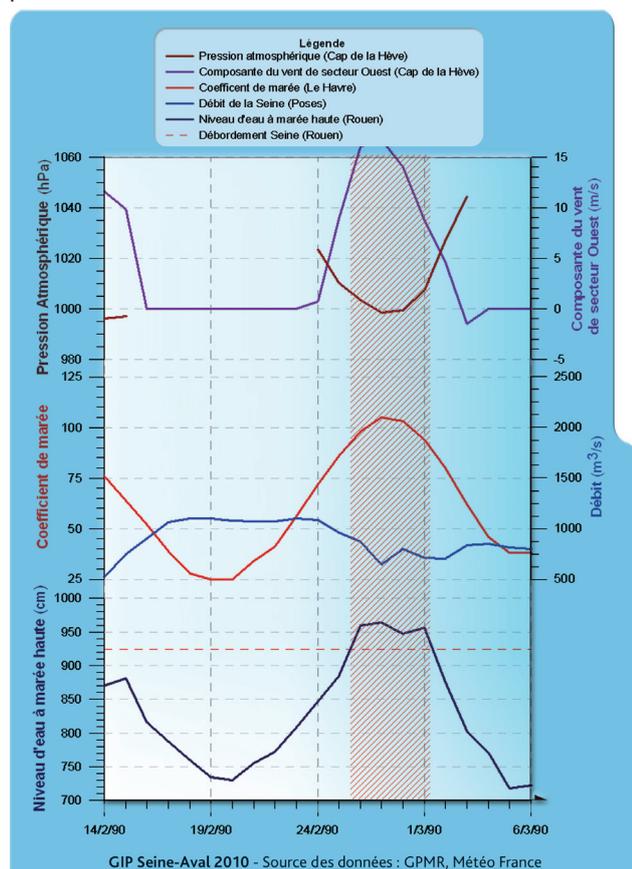


Figure 31 : Chronique de l'inondation de février 1990.

Tableau V : Intensités de débit par année hydrologique.

	Hauteur d'eau atteinte à Rouen (/0CMH)	Débit de la Seine à Poses (m <sup>3</sup> /s)	Nombre de jours avec un débit supérieur à			Nombre de jour avec un débordement à Rouen
			1000 m <sup>3</sup> /s	1500 m <sup>3</sup> /s	2000 m <sup>3</sup> /s	
27 février 1990	9,64	641	8	0	0	3
3 janvier 1999	9,52	626	45	14	0	1

### Inondation de janvier 1999

A la fin du mois d'octobre 1998, le débit de la Seine entre en période de crue avec un débit moyen de l'ordre de 700m<sup>3</sup>/s (Figure 32). Le 1<sup>er</sup> janvier, le débit, qui n'est que de 800m<sup>3</sup>/s, commence à décroître pour atteindre la valeur de 630m<sup>3</sup>/s le 2 janvier. Cela fait déjà quelques jours que les pressions atmosphériques sont basses et que le vent du sud-ouest persiste. Le 3 janvier, la cote au marégraphe de Rouen augmente d'environ 1m entre deux pleines mers, provoquant ainsi le débordement de la Seine. Cette inondation est causée par la synchronisation d'une forte marée de vives eaux d'un coefficient de 99 avec de basses pressions accompagnées d'un vent atteignant les 108km/h. Les inondations n'ont duré qu'une journée et le 4 janvier, la Seine ne déborde plus à Rouen.

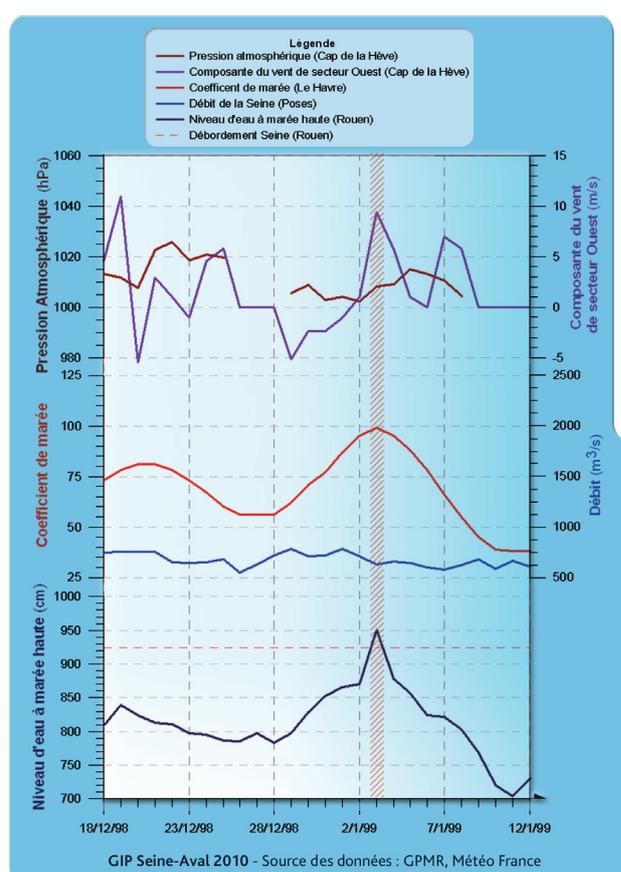


Figure 32 : Chronique de l'inondation de janvier 1999.

### Approche géographique

Une inondation par débordement est caractérisée par l'intensité des facteurs hydrologique et météorologique qui la composent. Les conséquences d'un même événement seront différentes selon le secteur de l'estuaire, car le degré

d'influence de chaque facteur varie géographiquement. Cette influence est visible en comparant l'étendue des plus hautes eaux connues des inondations de 1955 et de 1958, dates auxquelles l'aménagement de l'estuaire était comparable (Foussard *et al.*, 2009). L'événement de 1955 n'a eu de conséquences qu'en amont de Duclair, alors que celui de 1958 n'a eu de conséquence qu'en aval, où les laisses de crues ont même dépassé celles de la crue historique de 1910 (Figure 33). Ces deux exemples illustrent parfaitement la relation entre les différents facteurs et la localisation des inondations en estuaire de Seine. L'aval de l'estuaire est plus sensible à la marée et aux conditions météorologiques (en 1958 les inondations se sont déclenchées par une forte vive eau - coefficient de marée de 116 - et de faibles pressions atmosphériques synchronisées avec un fort débit de 1988m<sup>3</sup>/s) ; alors que l'amont est plus sensible au débit (en 1955 les inondations se sont déclenchées avec un débit de 2250m<sup>3</sup>/s synchronisé avec une vive eau moyenne d'un coefficient de 92).

Cette observation cartographique peut être vérifiée par l'analyse de la corrélation des hauteurs d'eau à marée haute mesurées à différents marégraphes, avec les paramètres ayant un rôle majeur dans la variation des niveaux d'eau : le coefficient de marée, le débit, la pression atmosphérique ainsi qu'une composante exprimant la vitesse du vent selon son orientation ouest (Figure 34). De manière générale, les paramètres sont corrélés différemment d'amont en aval. En aval, la variation du niveau d'eau est plus liée au coefficient de marée et à la pression atmosphérique alors qu'en amont

le débit restera le facteur le plus influent. Le coefficient de marée est fortement corrélé au niveau d'eau à marée haute sur l'ensemble de l'estuaire Seine, même si l'amplitude de la marée reste plus influente en aval qu'en amont (Aizier : 0.85 ; Elbeuf : 0.60). Concernant le débit, la corrélation à la hauteur d'eau varie fortement le long de l'estuaire avec une faible corrélation à l'aval (Aizier : 0.15) et une importante corrélation en amont (Elbeuf : 0.71). Les paramètres météorologiques (composante du vent d'ouest et pression atmosphérique) présentent un niveau de corrélation relativement stable avec la hauteur d'eau, bien qu'une faible décroissance soit observée d'aval en amont (Aizier : 0.36 ; Elbeuf : 0.26).

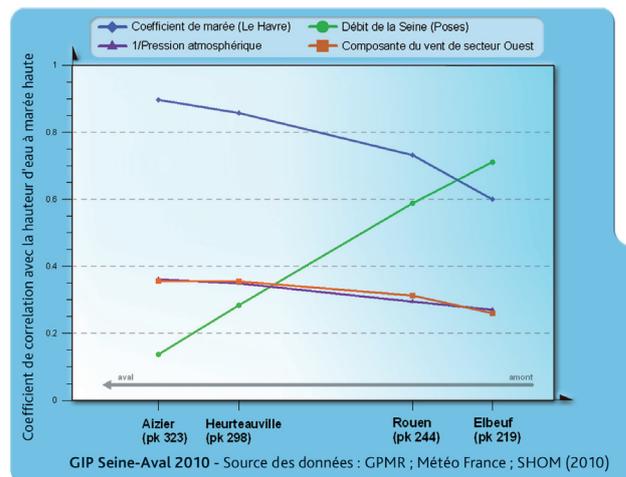


Figure 34: Relation entre hauteur d'eau à marée haute et les facteurs influant (1985-2009).

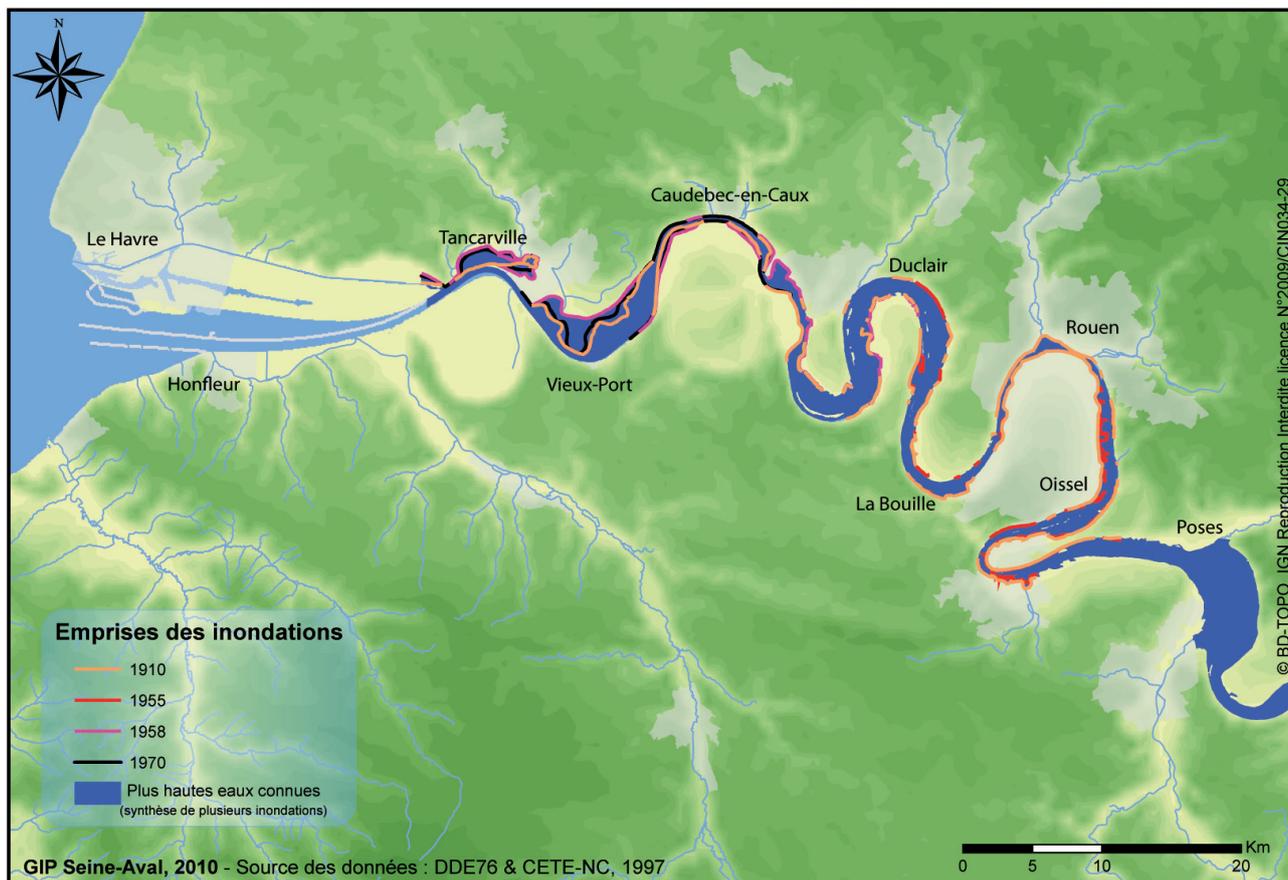


Figure 33: Emprise des inondations par débordement de la Seine.

## Chapitre 4 : La gestion du risque inondation

### Evolution des principaux enjeux

#### Démographie

Le bassin de la Seine est le bassin fluvial le plus peuplé de France (17 millions d'habitants, soit 30% de la population nationale). Cette situation est en grande partie due à la présence de la région parisienne, mais les agglomérations de Rouen et du Havre pèsent aussi dans ce rapport puisque leurs aires urbaines totalisent près d'un million d'habitants. Combinées à la proximité de la capitale, la fonction de port et les traditions industrielles des deux pôles haut-normands ont eu un rôle dominant dans l'évolution démographique de la vallée de la Seine. Cette évolution est globalement fidèle à l'évolution nationale (Figure 35) : une croissance relativement constante jusqu'aux années 1950 puis une accélération jusqu'aux années 1990. La population des communes riveraines de l'estuaire de la Seine a été multipliée par 3.6 depuis 1800 et par 1.6 depuis 1910.

Dès le début du XIX<sup>ème</sup> siècle, les villes d'Elbeuf, de Rouen et du Havre vont soutenir une forte activité industrielle dans l'estuaire de la Seine. Au milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle, profitant de l'emploi généré par les trois pôles normands, la population va augmenter au profit des communes périphériques. La Figure 36 présente les surfaces urbanisées de la boucle de Rouen en 1830 et 2006. L'emprise urbaine s'est étalée sur la quasi-totalité du méandre avec des communes dont les densités sont élevées (>1500hab/km<sup>2</sup>). La zone d'Elbeuf, avec Saint-

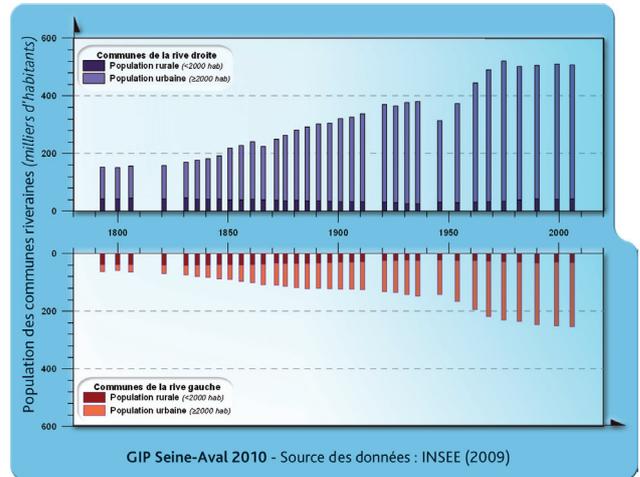


Figure 35: Evolution démographique des communes riveraines de l'estuaire de la Seine.

Pierre-lès-Elbeufs, Saint-Aubin-lès-Elbeufs et Cléon a également connu un développement, quoique plus relatif. Cette zone a pu se développer grâce à la dynamique industrielle du textile jusqu'au début du XX<sup>ème</sup> siècle, pour ensuite profiter de l'activité automobile et pétrolière.

#### Occupation du sol et plus hautes eaux connues

Le risque inondation correspond à la rencontre, sur un même espace, d'un aléa (le débordement) et d'une vulnérabilité (les enjeux) (Jousseaume, 2003). Sur cette base, un exercice théorique peut être réalisé en

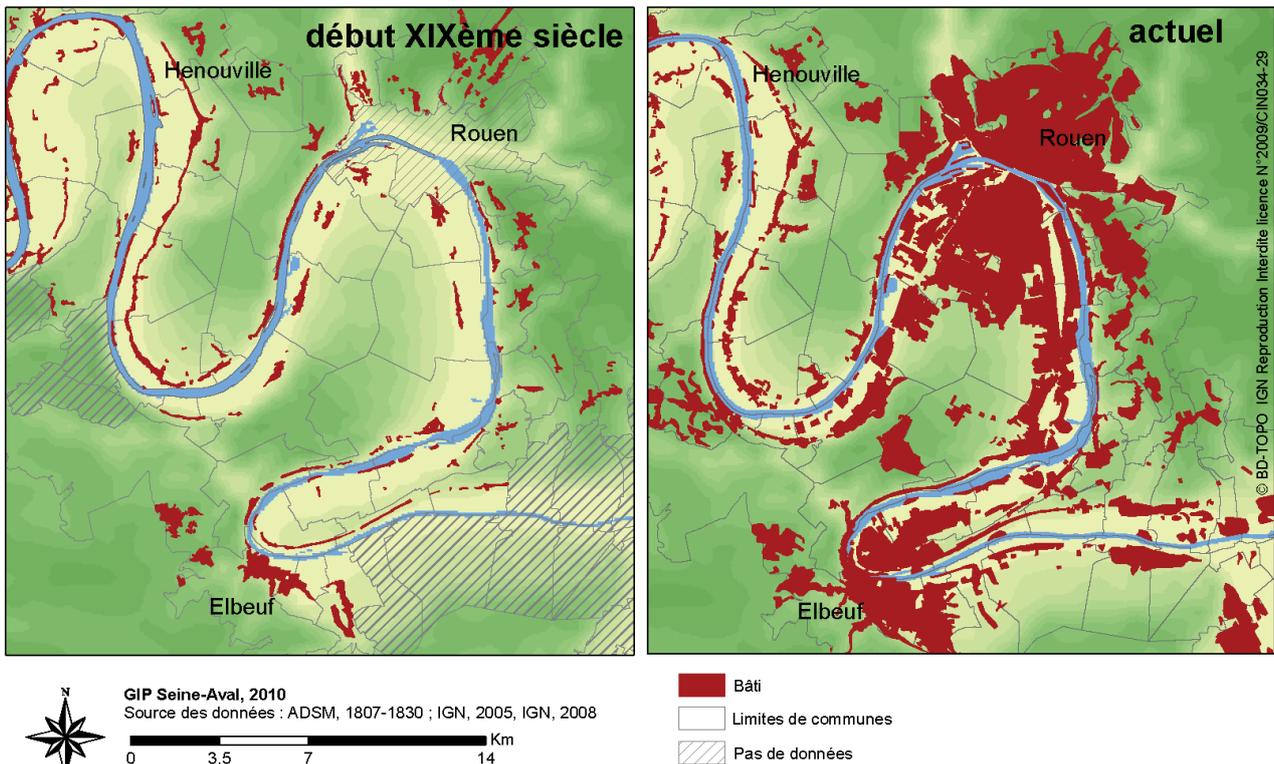


Figure 36: Evolution du bâti dans la boucle de Rouen.

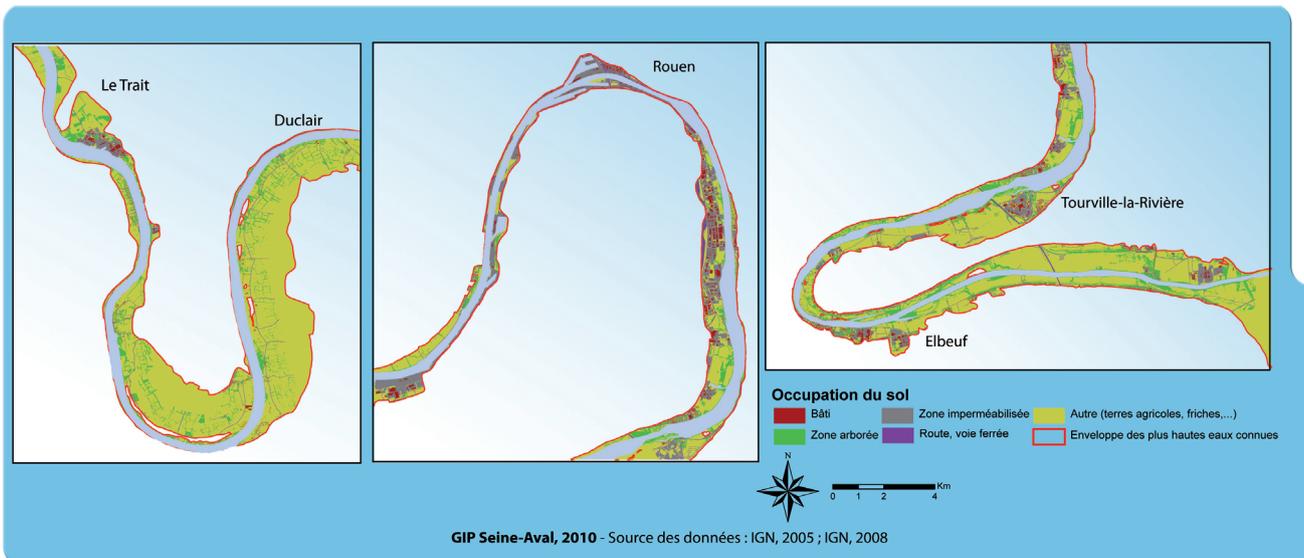


Figure 37: Plus hautes eaux connues et occupation actuelle du sol, zoom sur trois secteurs de l'estuaire de la Seine.

superposant les plus hautes eaux connues depuis le début du XX<sup>ème</sup> siècle à l'occupation du sol actuelle, pour définir les zones potentiellement soumises au risque inondation (Figure 37). La surface totale des plus hautes eaux connues est de 12 944 hectares, ce qui représente 20% du lit majeur de l'estuaire de la Seine. Les terres agricoles et les friches (10 653 hectares) et les zones

arborées (1 243 hectares) sont les surfaces le plus soumises aux inondations par débordement. Les entités de l'occupation du sol qui concentrent des enjeux plus importants pour les biens, les personnes et l'économie sont également concernées par le risque inondation, mais sur de plus petites surfaces. Pour les bâtiments agricoles, cela représente une surface de 14 hectares, dont 60 %

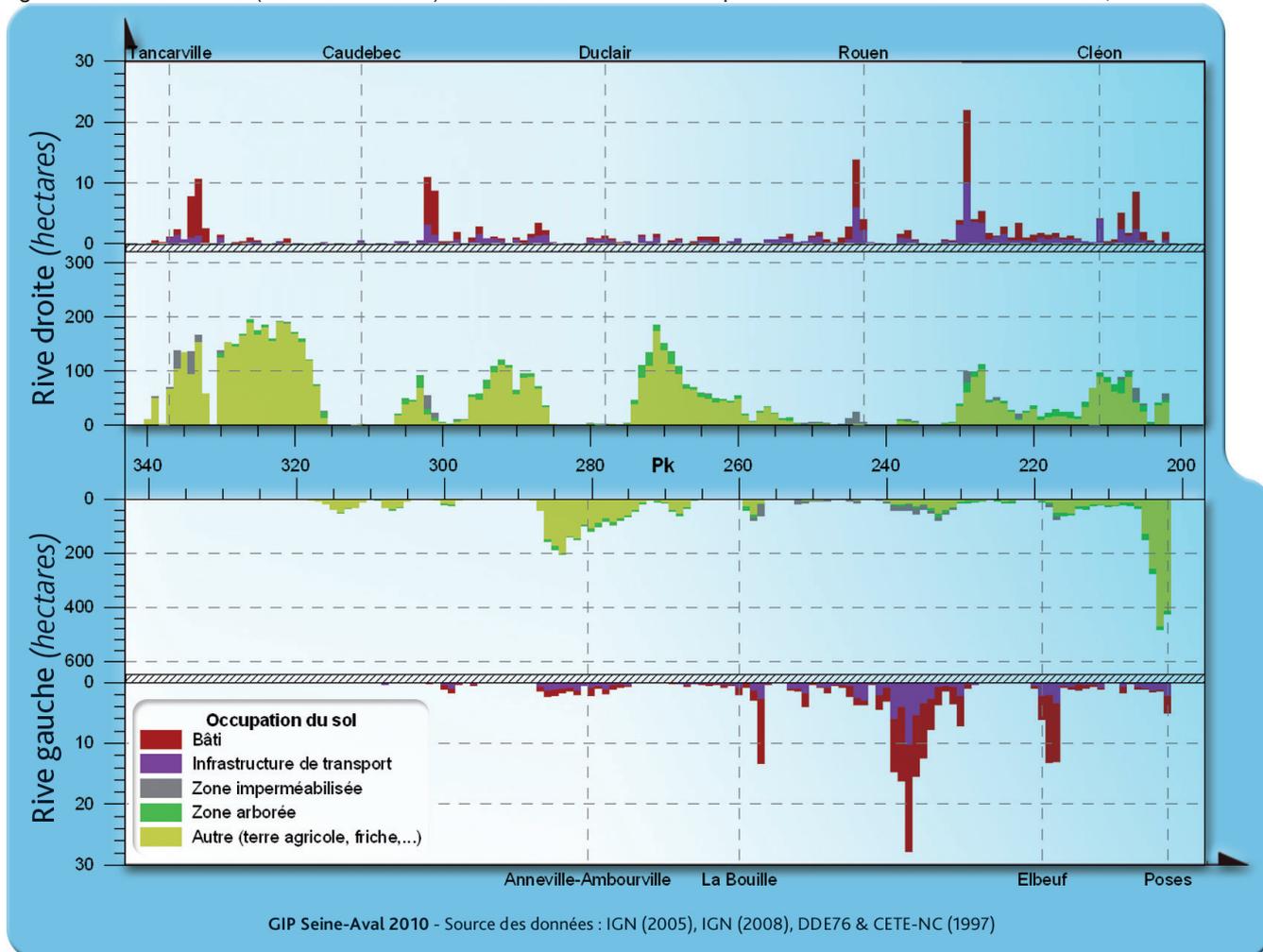


Figure 38 : Répartition des enjeux soumis au risque inondation par débordement de la Seine.

entre la Boucle de Duclair et Heurteauville. Les petites industries ou commerces représentent 44 hectares, dont 33 hectares en rive droite dans les communes de Tourville-la-Rivière, de Rouen et du Trait. Les habitations exposées aux risques d'inondation par débordement cumulent une surface de 61 hectares et sont réparties tout au long de la Seine, dont 33% entre Poses et Oissel. Les grandes zones de bâtiments industriels occupent 141 hectares et se trouvent en amont de Rouen, au Trait et à Lillebonne (Figure 38).

## Politiques de prévention

Les politiques de prévention des risques contre les

inondations sont articulées autour de plusieurs axes : les mesures de prévision, de prévention de protection, et de compensation ; la gestion de crise ; l'information de la population. La prévision des inondations dans l'estuaire de la Seine est depuis 2006 sous la responsabilité de la DDTM à travers le Service de Prévision des Crues Seine Aval et fleuves Côtiers Normands (SPC SACN). Ce service fait partie d'une ramification nationale quotidienne de surveillance et de diffusion d'information.

Les mesures de prévention sont principalement des outils réglementaire et cartographique traduits par des règlements d'urbanisme. Ces documents sont validés par l'Etat et appliqués par les municipalités. Ils permettent une politique de réduction de la vulnérabilité et d'information au

### L'évolution de la vulnérabilité aux inondations à Tourville-la-Rivière

En 1807, Tourville-la-Rivière est une commune essentiellement rurale et peu peuplée avec 800 habitants. La population cohabitait avec le fleuve, les habitations avaient été construites à proximité des terres labourées de la rive, et des îles exploitées majoritairement sous forme de labours. La population est installée sur les parties les plus hautes et au pied du coteau sur la voie qui relie Rouen à Elbeuf (Figure D). A cette époque, la vulnérabilité de la commune est faible et les habitants se préservent des inondations tout en garantissant la richesse des terres avec les alluvions déposés lors des périodes de crues. Il est important de souligner qu'en 1807, il n'y a avait pas encore de protection anti-inondation. L'espace était ainsi régulièrement inondé lors des crues d'hivers, ce qui n'encourageait la construction sous cet aléa.

En 2006, la population a triplé par rapport à 1807 avec 2316 habitants. Les différents aménagements ont profondément modifié le paysage et l'occupation du sol. L'implantation d'une des plus importantes zones commerciales de l'agglomération rouennaise et la construction sur le territoire de la commune de l'autoroute de Normandie (1970-1974), ont favorisé la disparition des zones agricoles en bord de Seine. Les surfaces restantes s'apparentent à des prairies ou des friches, mais elles ne sont que très peu exploitées. Certaines îles ont été rattachées aux berges ou fusionnées pour améliorer la navigation. Les espaces insulaires restants ne sont plus exploités, laissant place à la végétation arbustive et arborée. La présence de plans d'eau, sur les zones anciennement agricoles, témoigne d'une utilisation des terres pour l'extraction de matériaux afin de répondre, dès le début du XXe siècle, aux besoins grandissant pour la construction. Leur activité est aujourd'hui en déclin et l'espace est reconverti en zone de loisirs dédiée aux sports d'eau et à la pêche. A l'ouest de l'axe routier Rouen-Paris, quelques terres labourées subsistent et le bâti n'a que très peu évolué sur les berges de Seine. C'est en arrière, sur la plaine alluviale, que les transformations sont les plus flagrantes. L'est est dédié à l'activité commerciale et aux habitations (Figure D).

La vulnérabilité de l'espace aux débordements de la Seine a augmenté. Les surfaces habitées qui cumulaient 2 hectares en 1807 couvrent aujourd'hui 26,8 hectares, dont 63% se trouvent sous les plus hautes eaux connues. Malgré l'aménagement de commerces sur pilotis, une

grande partie de la zone commerciale peut se retrouver les pieds dans l'eau lors d'événements hydrologiques majeurs. Cette prise de risque est une responsabilité à l'échelle nationale puisque le dédommagement en cas de catastrophe naturelle vient puiser ses ressources dans un fond mutualisé, alimenté par les assurances souscrites par chaque citoyen. De manière objective, il faut aussi rappeler que les fortes crues de Seine ont une inertie lente et qu'elles peuvent être anticipées si l'organisation de la population, des biens commerciaux et industriels a été pensé en amont, à travers des diagnostics de vulnérabilité. La question de vulnérabilité reste ainsi un pari sur l'expansion de la société contre ou avec la nature, mais de mémoire d'homme, le fleuve est toujours sorti gagnant.

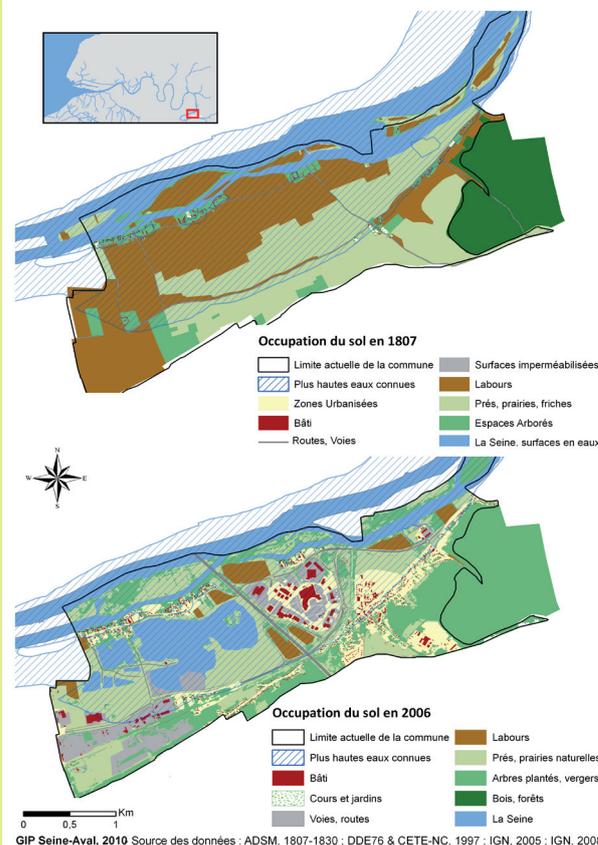


Figure D : Vulnérabilité La Commune de Tourville-la-Rivière.

## Le Service de Prédiction des Crues Seine Aval et fleuves Côtiers Normands

Le Service de Prédiction des Crues Seine Aval et Côtiers Normands (SPC SACN), basé à la Direction Départementale des Territoires et de la Mer de la Seine-Maritime à Rouen a remplacé depuis le 5 juillet 2006 les anciens Services d'Annonces de Crues notamment de la Seine. La zone d'action du SPC SACN, englobe les 5 départements de Haute et Basse-Normandie et une partie de l'Eure-et-Loir. Nos principales missions sont :

- la capitalisation de la connaissance sur les risques inondations sur tous les cours d'eau de notre zone d'action, impliquant la fourniture de données aux acteurs du territoire,
- la vigilance relative aux crues des 13 cours d'eau de Normandie à enjeux en terme de risque inondation retenus par l'Etat, mission qui doit être assurée 365j/365j et 24h/24. La vigilance sur les crues consiste à affecter une probabilité de survenue de crue sur le cours d'eau dans les prochaines 24 heures. Les informations de vigilance sont envoyées aux différentes préfectures concernées pour leur permettre de gérer les crises inondations et sont mises en ligne toutes les heures sur le site internet : [www.vigicrues.ecologie.gouv.fr](http://www.vigicrues.ecologie.gouv.fr), où elles sont accessibles pour le grand public.
- l'assistance auprès des collectivités dans le domaine de la prédiction des crues pour les cours d'eau non suivis par l'Etat et dans le domaine de l'information sur les crues (mises en place de repères de crues...).

Les grands enjeux pour le SPC à moyen terme sont de fiabiliser sa vigilance sur les crues grâce à la mise en place d'outils (notamment de modèles hydrauliques) et de passer de la prédiction des crues (c'est à dire de la prédiction des hauteurs d'eau atteintes dans les 24 heures) à la prédiction des inondations, c'est à dire des dégâts associés sur le territoire.

Pour élaborer ses prévisions de crues sur la Seine, le SPC exploite en continu de nombreuses données :

- les cumuls en pluies enregistrés par les pluviomètres de Météo France,
- les prévisions de pluie fournies par Météo France par bassin versant,
- les surcotes marines,
- les coefficients de marée,
- le débit de la Seine mesuré à la station automatique de Vernon et le débit calculé à Poses par Voies Navigables de France,
- l'humidité des sols,
- les hauteurs d'eau mesurées sur la Seine par les marégraphes du Grand Port Maritime de Rouen et celles mesurées sur les affluents par les stations hydrométriques de l'Etat,...

Le SPC réalise tous les jours une prédiction de hauteur d'eau au droit du marégraphe de Rouen : en calculant la hauteur probable atteinte en fonction de la marée, du débit de la Seine calculé deux jours avant à Poses et réévaluée à partir des différentes conditions climatiques (vent, pression), en pondérant cette hauteur calculée aux hauteurs atteintes par les crues historiques ayant eu lieu dans les

mêmes conditions, cela permet notamment de prendre en compte « la vidange » de l'estuaire réalisé par la basse-mer précédente, en relativisant en fonction des prévisions fournies par notre modèle hydraulique.

Le SPC a mis en place un modèle hydraulique monodimensionnel à l'aide du logiciel Mascaret sur le tronçon Seine aval. Ce type de modèle permet de simuler les conditions particulières de la zone d'étude (conditions fluviales en amont et maritimes en aval, apports intermédiaires). Le lit de la Seine a été extrapolé en rentrant dans le modèle différents profils du lit de la Seine. Les apports des affluents ont été injectés dans le modèle à partir des hauteurs d'eau mesurées par les stations limnimétriques en amont des confluences et des courbes de tarage en vigueur à leur niveau (relations hauteur-débit). Les darses présentes notamment en aval de Rouen ont également été prises en compte pour traduire leur rôle de réservoir hydraulique. Au total, le modèle comprend 17 arêtes et est capable de calculer une ligne d'eau en utilisant des méthodes numériques robustes et rapides. Il a été calé sur la base de plusieurs événements de crues historiques récentes, notamment pour estimer la valeur des coefficients de frottement par zone homogène. Puis, la validation du modèle a été testée sur un autre jeu de crues historiques. Globalement, le modèle est assez satisfaisant car il retraduit correctement en continu la dynamique de crues dans l'estuaire : le cycle des hautes mers puis les basses mers (Figure E). Ce modèle nous permet en opérationnel de prévoir les hauteurs attendues au niveau du marégraphe de Rouen pour les prochaines 48 h avec un temps de calcul de quelques minutes et de les recaler sur les données observées par les marégraphes.

Ce type de modèle nous permet de mieux fiabiliser et de mieux anticiper la mise en vigilance des cours d'eau et de prévenir suffisamment tôt les entités en charge de la sécurité civile, qui doivent coordonner la gestion des secours.

Karine Goncalves-Ladiray, DDTM

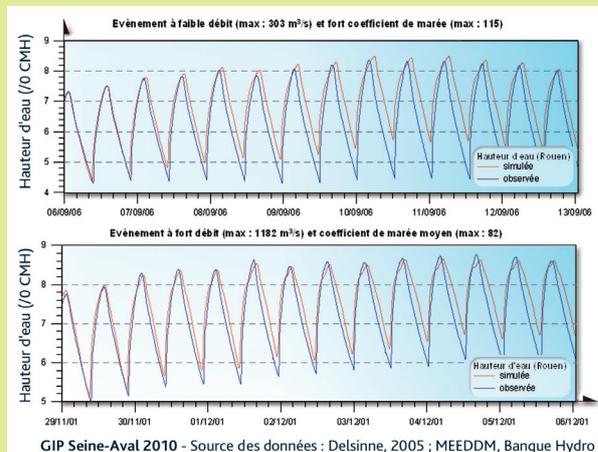


Figure E : Application du modèle de prédiction de la hauteur d'eau à Rouen.

public. Les politiques de prévention des risques inondation ont évolué tout au long du XXème siècle et ont été principalement motivées par l'occurrence de catastrophes importantes causant dégâts et pertes humaines. Cinq phases qui ont modifié l'approche des mesures de prévention ainsi que les règles d'urbanisme peuvent être considérées (Tableau VI). Datée du 23/10/2007, la Directive Cadre Inondation pose de nouveaux enjeux qui modifient en profondeur l'appréhension de la prévention des inondations. Cette approche, inédite pour la France, prend en compte notamment des enjeux économiques, du patrimoine naturel ou culturel dans les impacts. Cette Directive s'articule autour de trois objectifs :

- évaluation préliminaire des risques d'inondation (topographie, occupation des sols, analyse des crues, évaluation des impacts,...)
- cartographie des zones inondables et du risque d'inondation (scénarii probabiliste des crues : rare, moyenne ou forte, nombre d'habitants touchés, type d'activités économiques,...)
- élaboration de plans de gestion du risque d'inondation sur des territoires prioritaires en terme de risque, incluant les objectifs de gestion du risque déterminés par l'Etat et les mesures envisagées pour les atteindre (prévention, protection, gestion de crise,...)

Tableau VI: Historique de la réglementation du risque inondation (adapté de Pottier, 2003)

Phase	Objectifs	Evènement	Règlement	Cartographie
1ère phase : 1930-1982 Apparition des premiers outils juridiques et cartographique pour lutter contre les inondations	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faciliter l'écoulement et préserver les zones d'expansion de crues</li> <li>- Protéger les zones urbanisées contre les inondations</li> </ul>	1930 : Crue violente de Tarn et de la Garonne, 400 victimes	1955 : Code de l'Urbanisme application de l'article R111-2 et R111-3 réduisant l'étalement urbain en créant les "Périmètres de risque"	1935 : Création des Plans de Surfaces Submersibles (PSS)
2ème phase : 1981-1994 Nouveaux outils de planification et de cartographie, conscience des enjeux	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réduire les dommages en contrôlant l'urbanisation et en imposant des mesures de prévention</li> <li>- Information la population Gestion intégrée de l'eau</li> </ul>	Hiver 1981-82 : inondations sur la Saône, du Rhône et Garonne  1983 : inondations sur de nombreux bassins versant  Été 1987 : Crues rapides dans Le Grand-Bornand (23 morts)  Automne 1988 : Crues rapide à Nîmes (11 morts)  Été 1992 : Crues rapide à Vaison-la-Romaine (34 morts)  Hiver 1993-94 : inondations massives dans les régions nord et est de la France	1982 : nouvelle réglementation concernant l'indemnisation des victimes CAT-NAT  1987 : loi sur l'organisation de la sécurité civile, la protection contre les incendies de forêt et la prévention des risques majeurs  1992 : Loi sur l'eau	1984 : Décret "Plan d'exposition aux risques " (PER)  1987 : Création des atlas des zones inondables
3ème phase : 1984-2003 Clarification et de renforcement du cadre juridique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Précision de la politique de prévention contre les dangers naturels</li> <li>- Le PPRNP est l'unique document juridique pour la prévention</li> </ul>	1995 : inondations dans 43 dép., 40000 maisons inondées dans le nord de la France  Automne 1999 : inondations dans l'Aude, l'Hérault, Pyrénées-Orientales  Hiver 2000-2001 : inondations de la Somme en Bretagne	1994 : Circulaire sur la prévention des inondations et la gestion des zones inondable 1995 : loi sur le renforcement de la protection environnementale  1995 : Décret sur la possibilité d'expropriation de propriétaires lorsqu'une catastrophe naturelle menacent des vies humaines  1996 : circulaire sur les dispositions spécifiques pour les constructions existante dans les plaines inondable	Décret "Plans de prévention des risques Naturels" (PPRN)
4ème phase : 2003-2007 Développement d'outils	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Identification des zones d'expansion des crues</li> <li>- Meilleure information au public</li> <li>- Réduction de la vulnérabilité</li> </ul>		2003 : loi sur la prévention des risques naturels et technologiques et la réparation des dommages	
5ème phase : 2007-... Approche globale, concertée et prospective sur le long terme	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Evaluation préliminaire des risques inondations</li> <li>- Carte de zones inondables et des risques d'inondation</li> <li>- Plans de gestion des risques inondation sur des territoires prioritaires en terme de risque</li> </ul>		2007 : Directive Cadre Inondations	

Les mesures de protection consistent essentiellement en la construction d'ouvrages hydrauliques (diguette, barrages, réservoir) qui permettent de réduire les risques naturels. Pour leur dimensionnement, ne sont gardées comme référence que les crues qui ont eu lieu à partir du XXème siècle.

Les mesures de compensation sont fondées sur un système hybride de la collaboration entre l'Etat et des compagnies d'assurance, afin d'offrir des conditions de solidarité nationale. Le système français d'assurance sur les catastrophes naturelles est définie par la loi Cat-Nat, du 13 Juillet 1982 : «L'effet de catastrophe naturelle sur

*les dommages matériels directs considérés comme non assurables, ayant en tant que cause l'intensité anormale de facteurs naturels, lorsque la mise en œuvre de protection habituelle contre ces dommages-intérêts ne permet pas d'éviter leurs occurrences ou pourraient ne pas être pris».*

Les législateurs considèrent les inondations en tant que catastrophe naturelle, car une inondation n'est assurable en raison de «l'anti-sélection». En effet, «l'anti-sélection» concerne les risques qui sont en partie imprévisibles sauf que les inondations surviennent en majeure partie près des rivières. Ainsi il serait facile aux assureurs de

### Problématique des PPRi de bord de Seine

Le Plan de Prévention des Risques d'inondations consiste à cartographier les secteurs susceptibles d'être inondés et d'y prescrire une réglementation d'urbanisme adaptée à l'occupation des sols et à l'intensité du phénomène.

Le PPRi ayant vocation à protéger les biens et les personnes, ses prescriptions peuvent aller de l'interdiction à la recommandation simple. Les zones d'interdiction peuvent comprendre les zones les plus à risque, mais aussi des secteurs moins dangereux où il est nécessaire de préserver des espaces d'expansion de crue. Il est préférable de maintenir des herbages en herbe, afin que les volumes d'eau de crue s'y accumulent plutôt que dans les zones urbanisées.

Les principes généraux des PPRi, prescrits et approuvés par l'État, s'inscrivent dans la non-exposition au risque des futurs projets, mais aussi dans la baisse de la vulnérabilité des biens déjà en place dans les secteurs inondables. Les règles édictées doivent permettre d'adapter le projet au risque s'il n'est pas de nature dangereuse, et permettre de ne pas aggraver la situation aux alentours lors d'un évènement d'inondation.

Sur le département de la Seine-Maritime, il existe deux PPRi relatifs au débordement de la Seine (Figure F). La démarche de sélection de leur périmètre tient compte des enjeux, mais aussi d'une dimension technique de faisabilité. Le choix a consisté à couvrir les communes des méandres de la Seine boucle par boucle, en priorisant les boucles les plus urbanisées. Ainsi, il existe le PPRi de la Boucle d'Elbeuf, et dans sa continuité en aval le PPRi de la Boucle de Rouen. Le PPRi de la Boucle d'Elbeuf a été prescrit le 8 juillet 1998 et approuvé le 17 avril 2001. Il couvre 9 communes de Sotteville-sous-Val à Tourville-la-Rivière. Le PPRi de la Boucle de Rouen a été prescrit le 29 juillet 1999 et approuvé le 20 avril 2009. Il couvre 18 communes de Oissel à la Bouille et se caractérise par sa prise en compte de la problématique portuaire, ainsi que par la possibilité de réhabiliter d'anciennes friches industrielles si le niveau de l'aléa le permet.

Au-delà de la simple application réglementaire du PPRi, les services de la DDTM accompagnent les collectivités qui en font la demande dans la planification de leurs projets d'aménagement qui pourraient s'étendre sur des secteurs modérément inondables. Le principe n'étant

pas de systématiquement écarter tous projets en zone inondable, mais de refuser ceux incompatibles avec le niveau de risque et ceux ne tenant pas compte des prescriptions en vigueur dans le PPRi, permettant de garantir la sécurité des usagers et de leurs biens.

Si ces deux PPRi couvrent des secteurs relativement peu impactés par le phénomène de marée en terme d'inondation, celui-ci est toutefois perceptible jusqu'au barrage de Poses. Les évènements de submersion marine liés à la tempête Xynthia peuvent toutefois nous amener à pousser la réflexion sur l'opportunité de réaliser un PPRi estuarien sur la Seine. Bien que ce secteur n'ait pas été spécifiquement sinistré lors du passage de la tempête, un évènement du même type, dans des conditions de marées et météorologiques aggravées, accompagnées d'une crue de Seine, aurait probablement eu un impact majeur sur les enjeux occupant l'arrière des digues du fleuve. Seule une étude hydraulique, aux nombreuses variables il est vrai, pourrait nous permettre de modéliser ce scénario « du pire ».

Eloi Larchevêque, DDTM

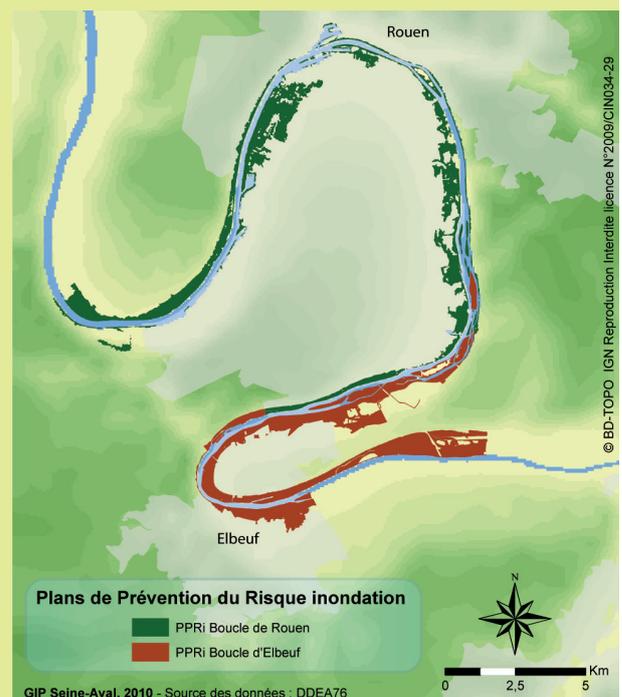


Figure F : Délimitation des PPRi relatifs au débordement de la Seine.

différencier le prix des contrats de souscription ainsi que l'indemnisation des personnes vivant dans la zone définie à risque avec d'autres personnes vivant en dehors de la zone définie. Par conséquent, le législateur a créé un droit fondé sur un système de solidarité nationale, pour avoir un système d'assurance mutuelle alimenté par un prélèvement auprès de l'ensemble des assurés afin de répondre aux dégâts causés par les catastrophes naturelles. Ainsi, le coût annuel des dommages-intérêts est partagé entre un grand nombre de personnes assurées.

## Et demain ?

Aujourd'hui, seules les crues des XX<sup>ème</sup> et XXI<sup>ème</sup> siècles sont gardées comme référence pour les aménagements de protection et de prévention contre le risque inondation. La crue de 1910 (2600m<sup>3</sup>/s) est qualifiée de centennale, celles de 1955 et 2001 (~2000m<sup>3</sup>/s) de trentennales et celles de 1970, 1982, 1988, 1995 (~1500m<sup>3</sup>/s) de décennales (Delsinne, 2005). Le choix de ces valeurs seuils comme débit de référence permet de qualifier une échelle d'intensité et de durée d'une crue (Javelle, 2001). Ces seuils indiquent la probabilité de survenue d'un tel événement chaque année. Ainsi, une crue centennale ne correspond pas à un événement qui se déroule tous les 100 ans, mais à un événement dont la probabilité de survenue annuelle est de 1%.

Un événement hydrologique similaire ou supérieur à la crue de 1910 est donc toujours possible, même si ce n'est pas un phénomène courant. Par contre, les conséquences d'un tel événement sur le territoire estuarien seront différentes de celles de 1910, sans pouvoir cependant les prédire aujourd'hui précisément. En effet, depuis un siècle, le fonctionnement hydrologique de l'estuaire a été fortement modifié par les aménagements, les enjeux sur le territoire et les modes de prévision et de gestion de crise ont également évolué.

Ainsi aujourd'hui, même si les crues en Seine sont d'inertie lente et que de nombreux aménagements permettent la réduction de l'étalement de la Seine dans l'espace, l'urbanisation et la transformation du paysage passé a augmenté la vulnérabilité des personnes, des biens et de l'activité économique.

## Conséquences possibles du changement climatique

A l'avenir, le degré par lequel le territoire estuarien risque d'être affecté par des inondations doit être analysé en tenant compte des projections d'évolution du régime hydrométéorologique. La réalité du changement climatique est désormais sans équivoque et fait l'objet d'un consensus affirmé. De nombreux phénomènes témoignent d'ores et déjà de cette évolution et les projections sur le siècle à venir permettent d'envisager certains effets sur le fonctionnement hydrologique de l'estuaire (Laignel *et al.*, 2010).

L'augmentation globale moyenne de la température atmosphérique, sur l'ensemble du globe, au cours du XX<sup>e</sup> siècle est de l'ordre de 0,6°C (Houghton *et al.*, 1996,

2001 ; IPCC, 2007). Cette augmentation de température se répartit inégalement à la surface de la Terre. En France, entre 1901 et 2000, l'augmentation moyenne des températures est comprise globalement entre 0,7 et 1,1°C. Sur le secteur de l'estuaire de Seine, cette augmentation est comprise entre 0,7 et 0,9°C (Moisselin *et al.*, 2002). Les projections climatiques prévoient 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 (Ducharme *et al.*, 2010).

L'augmentation des températures entraîne un réchauffement des eaux, une fonte des glaciers, ainsi qu'une dilatation thermique des océans. La combinaison de ces phénomènes explique l'augmentation du niveau des eaux à l'échelle du globe (+18 à +59cm en moyenne d'ici 2100) (IPCC, 2007). Localement, les données du marégraphe du Havre montrent une montée des eaux de  $1,8 \pm 0,4$  mm/an depuis 1938 et de  $2,7 \pm 1,5$  mm/an depuis 1993 (Figure 39 ; Pirazzoli, 2007). L'estimation quantitative de la hausse probable du niveau marin à une échelle régionale diffère en fonction des auteurs. Néanmoins, un intervalle peut-être défini sur l'estuaire de la Seine au regard des différentes estimations (Laignel *et al.*, 2010) :

- valeur minimale à partir des tendances observées grâce aux mesures : +18 à +27 cm
- valeur haute déterminée par le GIEC : +60 cm
- effet des surcotes marines : +40 cm

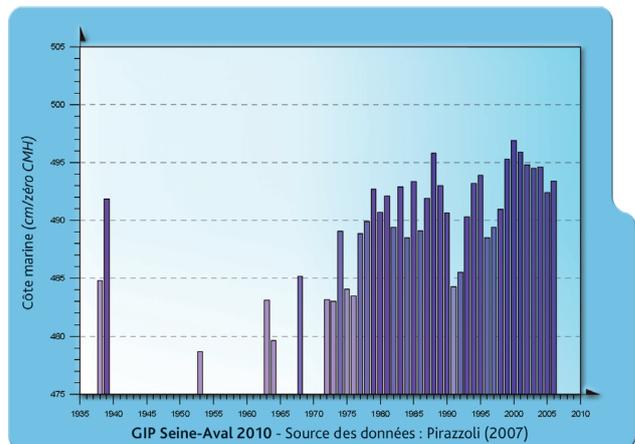


Figure 39 : Niveau moyen de la mer au Havre.

La sensibilité du territoire au regard de ces projections est illustrée par la cartographie des secteurs topographiques inférieurs à la cote 10m CMH (Figure 40). Cette cote correspond à la cote des plus hautes eaux actuelles (8,5m CMH pour les marées de vives-eaux au Havre) à laquelle s'ajoute 1m selon les projections des effets du changement climatique (60cm pour l'augmentation maximum du niveau marin selon les projections du GIEC à l'horizon 2100 + 40cm liés à l'amplitude des phénomènes de surcote ; la cote a été arrondie à 10m CMH en raison de l'incertitude - de 50cm à 1m - sur les données topographiques). De nombreux secteurs de la vallée de la Seine présentent une topographie inférieure à cette cote, notamment en aval de La Bouille.

La modélisation du changement climatique

**Des hypothèses d'évolution socio-économiques**

Dès lors que la communauté scientifique a observé un réchauffement du climat (une augmentation des températures atmosphérique et océanique à l'échelle du globe) l'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), ou GIEC en français (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat), a été créé afin de synthétiser la littérature scientifique et technique relative au changement climatique, d'en évaluer les conséquences environnementales et socio-économiques et de proposer des stratégies pour pallier au phénomène. Jugés comme une référence pour la plupart des gouvernements, des scientifiques et des experts, les travaux du GIEC permettent de définir des bases de travail communes au sein de la communauté internationale. Quatre grandes hypothèses d'évolution socio-économique à l'échelle mondiale ont été retenues par le GIEC à l'horizon 2100 (scenarii du Spécial Report on Emissions Scenarios (SRES) ; Figure G), sans prendre en compte les initiatives climatiques supplémentaires récentes, comme la Convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques ou encore le protocole de Kyoto concernant les émissions. Chaque trajectoire socio-économique mondiale possible peut alors se traduire par des schémas d'évolution de la concentration en gaz à effet de serre (GES), responsables en grande partie du réchauffement planétaire observé depuis le milieu du XXème siècle.

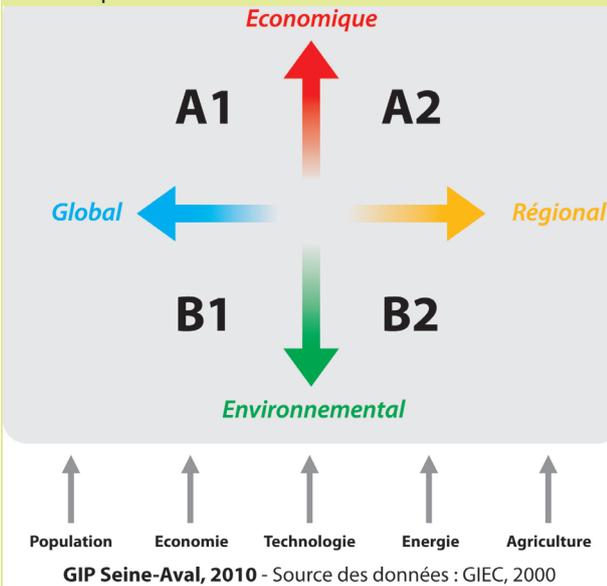


Figure G : Hypothèses d'évolution socio-économique.

**Des modèles globaux aux modèles régionaux**

A partir des différents patrons d'évolution de la concentration en GES, des Modèles de Circulation Générale de l'Atmosphère et des Modèles Globaux de la Circulation des Océans, on aboutit à différents scénarii d'évolutions possibles du climat et de ses caractéristiques. Les modèles sont eux même sources d'incertitude en raison des lacunes de connaissance sur le fonctionnement du système climatique. La multiplication des outils de modélisation et des scénarii SRES aboutit à des résultats caractérisés par une incertitude. Par exemple, en fonction des modèles et du type de SRES, l'IPCC (2007) évalue l'augmentation de la température globale de la surface

de la Terre, d'ici 2100, entre 1,1 et 6,4°C, mais de façon plus probable entre 1,8 et 4°C.

Ensuite, une étape importante est celle de la désagrégation de projections climatiques de grande échelle (ou régionalisation ou descente d'échelle ; Figure H). En effet, si les modèles climatiques décrivent correctement les principales caractéristiques de grande échelle du climat global (anticyclones et systèmes dépressionnaires, moussons, etc.), ils en représentent assez mal les caractéristiques locales, du fait de leur faible résolution spatiale (> 100km de côté). Il s'agit donc d'introduire les hétérogénéités spatiales non résolues par les modèles climatiques de grande échelle (le relief par exemple), tout en corrigeant les biais éventuels, notamment ceux des précipitations qui sont particulièrement pénalisants pour la simulation hydrologique. Les résultats de modèles climatiques régionaux peuvent ainsi être utilisés par les modèles dédiés au champ d'études au niveau local.

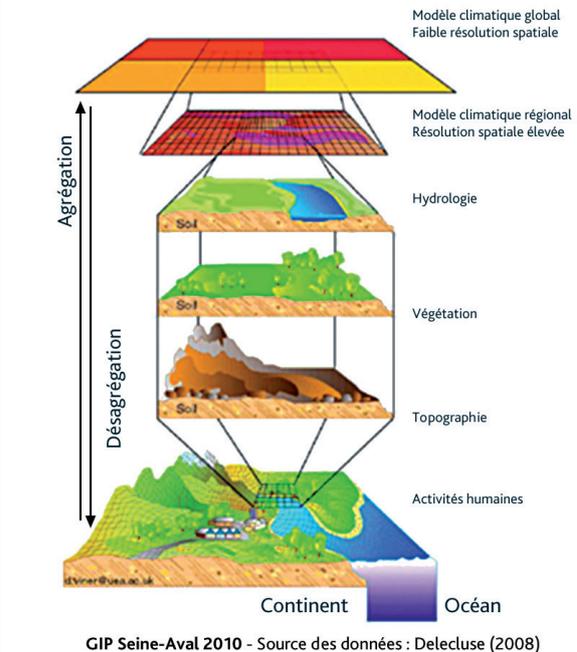


Figure H : Principe de désagrégation des projections climatiques.

**Des incertitudes inhérentes à la modélisation**

Les incertitudes sont une question cruciale dans ce type d'études reposant sur des modèles complexes et diverses hypothèses de prospective socio-économiques. Ainsi, dans le cadre de l'étude des effets du changement climatique sur l'hydrologie du bassin de la Seine (Ducharne et al., 2010), douze scénarios désagrégés de changement climatique, caractérisés par huit modèles climatiques différents, forcés par un ou deux scénarios d'émissions utilisés pour les simulations du GIEC, et désagrégés par une à trois méthodes différentes ont été utilisés, pour servir en entrée de cinq modèles hydrologiques différents. C'est à partir de l'ensemble de ces simulations que les scientifiques ont pu construire des hypothèses d'évolution de certaines variables hydrologiques et mettre en garde sur l'impossibilité de se prononcer à l'heure actuelle sur d'autres comme les phénomènes les plus extrêmes.

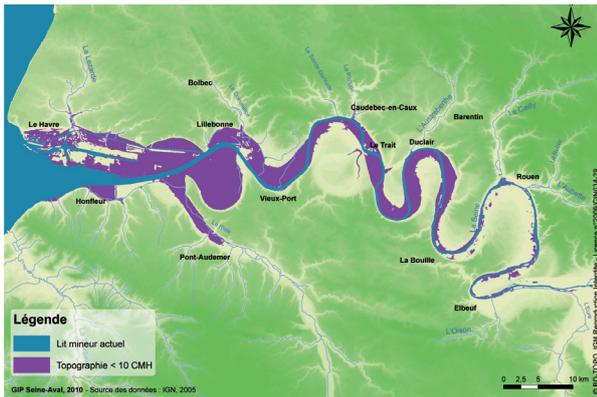


Figure 40 : Secteurs potentiellement sensibles à une élévation du niveau marin.

Le suivi des précipitations sur les dernières décennies ne montre pas de tendance, mises à part des fluctuations pluriannuelles en lien avec le régime climatique (Massei et al., 2009). Il est traduit par l'indice d'Oscillation nord-Atlantique qui définit la position du rail de dépression entre l'Europe du nord et du sud (Laignel et al., 2010). A l'horizon 2100, les résultats issus de la modélisation pour le bassin de la Seine indiquent une baisse des précipitations annuelles de l'ordre de 12%, et ce principalement en été (Ducharne et al., 2009).

Un assèchement dû à l'augmentation des températures et à la baisse des précipitations, se traduirait également par une diminution de la recharge annuelle des aquifères de 33 % (même ordre de grandeur que les prélèvements réalisés actuellement dans le bassin de la Seine), par une baisse des niveaux piézométriques et par une baisse du débit moyen annuel de la Seine à Poses d'environ 28 % soit -152m<sup>3</sup>/s. Cette diminution du débit serait surtout marquée entre les mois d'août et février (Figure 41 ; Ducharne et al., 2009).

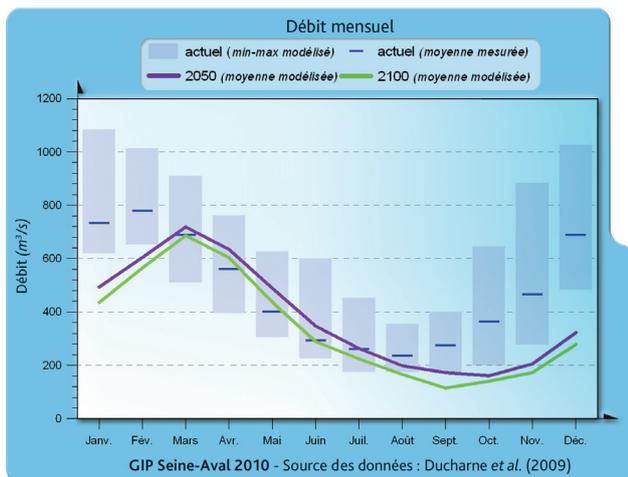


Figure 41 : Débits moyens mensuels de la Seine à Poses : actuel, 2050, 2100.

L'analyse des résultats des projections hydrologiques en terme de régime de crue montre une évolution modérée, qu'il s'agisse des crues décennales comme des crues centennales (Ducharne et al., 2010). Ce résultat, beaucoup moins inquiétant que la baisse générale des ressources en eau décrite précédemment, doit cependant être pris en compte avec beaucoup de

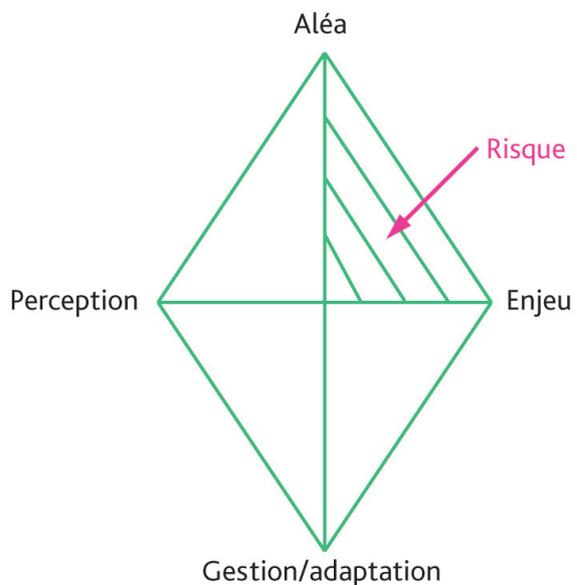
précautions, étant données les incertitudes fortes qui l'entachent. Effectivement, l'incertitude sur l'analyse du régime de crues est étroitement liée à l'incertitude sur les projections de pluies hivernales. Or, l'évolution des précipitations hivernales est l'un des éléments le plus incertains des projections du changement climatique en raison de l'importante dispersion des résultats selon les modèles et les méthodes de désagrégation utilisée (encadré 'La modélisation du changement climatique').

Les études sur l'évolution à venir de la fréquence des événements extrêmes (tempêtes, orages...) responsables de phénomènes hydrologiques de fortes ampleurs sur de courtes durées ne permettent pas aujourd'hui de discerner des tendances nettes. Toutefois, il est globalement reconnu que sous un climat plus chaud, l'instabilité climatique est plus forte et pourrait conduire à une augmentation de la fréquence de ces événements.

### Évolution de la vulnérabilité : une approche systémique ?

L'analyse de la vulnérabilité d'un territoire s'envisage selon certains auteurs (Laignel et al., 2010) par l'analyse de quatre variables : l'aléa, les enjeux, la gestion du risque et la perception du risque.

En fonction du risque, défini lui-même par le croisement des aléas et des enjeux, et selon la manière dont celui-ci est pris en compte par les gestionnaires (anticipation du risque et stratégie d'adaptation) et perçu par les habitants, la vulnérabilité d'un territoire est plus ou moins grande. Autrement dit, pour ce qui est de la perception, si les habitants n'ont pas conscience qu'un risque existe ou s'ils l'évaluent mal, la vulnérabilité sera plus importante.



GIP Seine-Aval 2010 - Source des données : Laignel et al. (2010)

Figure 42 : Composantes de la vulnérabilité globale d'un territoire.

Ainsi, l'évolution du régime hydrologique limitée aux seuls effets du changement climatique n'apporte qu'une vision partielle des évolutions possibles de ce régime. La

capacité d'adaptation définie comme « l'ajustement des systèmes naturels ou humains en réponse à des stimuli climatiques ou à leurs effets, afin d'atténuer les effets néfastes ou d'exploiter des opportunités bénéfiques » (IPCC, 2007) sera un facteur qui influera sur le risque. La modification des aménagements de retenue, la réouverture de connexion latérale au fleuve pour favoriser l'expansion des crues, le renforcement de la protection contre les inondations de certains secteurs, la modification des types d'occupation du sol dans des secteurs protégés en cas de défaillance des protections ou d'aléa exceptionnel sont autant d'actions qui auront un impact très important sur les niveaux d'eau et la protection des biens et des personnes.

L'évolution des enjeux du territoire estuarien devrait être analysée au regard d'un exercice de prospective socio-économique qui permettrait de mieux replacer l'estuaire dans un contexte plus global et d'intégrer les forçages extérieurs, en particulier les orientations politiques et économiques. Les pistes méthodologiques disponibles auprès des experts (Laignel *et al.*, 2010) font ressortir les grands secteurs socio-économiques et les variables pertinentes à prendre en compte (l'agriculture, la pêche, le secteur industrie et services, le secteur portuaire, la

logistique et l'organisation des transports et le tourisme, le patrimoine naturel...) ainsi que leurs interactions pour permettre de construire des scénarii d'évolution de l'estuaire à long terme.

Une meilleure connaissance de la perception et de la représentation qu'ont les habitants du risque permettrait de réduire cette vulnérabilité, dans un premier temps en aidant les pouvoirs publics locaux et nationaux à prendre les décisions/mesures adéquates. Elles doivent nécessairement être basées sur des constats pour être acceptables et acceptées par le plus grand nombre. La mise en exergue d'un éventuel décalage entre le risque objectif et le risque subjectif devrait également indiquer sur quels points l'information est déficiente et donc quel type d'information donner au public pour que sa perception du risque se rapproche davantage de la réalité. Ceci permettrait d'aboutir à la naissance ou à l'entretien d'une culture du risque, favorisant à long terme une meilleure gestion du territoire.

## Conclusion

L'estuaire de la Seine est soumis à une grande variété d'inondations : les inondations par débordements, les remontées de nappes, le ruissellement (urbain et agricole) et les submersions marines sur le littoral. Les inondations les plus marquantes sont liées à l'importance des dégâts et à la violence de l'événement hydrologique souvent généré par des conditions météorologiques extrêmes, difficiles à anticiper. Les inondations par débordement sont actuellement les événements hydrologiques les plus prévisibles, notamment du fait de l'inertie des phénomènes qui les génèrent. Toutefois, chaque événement hydrologique majeur paralyse la vie et l'économie de la région en figeant les communes et les axes de communication.

Depuis le XX<sup>ème</sup> siècle, un grand nombre d'inondations par débordements ont été enregistrées. Les plus hauts niveaux d'eau atteints correspondent à la conjonction des différents paramètres : forts débits, grandes marées, vents d'ouest et faible pression atmosphérique. L'intensité de chacun de ces paramètres n'étant jamais identique, ceci confère à chaque inondation un caractère singulier. Les inondations par débordement peuvent ainsi être liées à de forts débits se construisant à une échelle hydrologique annuelle, mais les variations de hauteur d'eau se construisent également à l'échelle journalière en fonction de la synchronisation météorologique (basse pression atmosphérique et vent fort direction sud-ouest) et de forts coefficients de marée. Les inondations par débordement peuvent se produire avec de faibles débits lors de fortes tempêtes où les dépressions sont importantes et les vents violents sont orientés sud-ouest. Les apports latéraux (écoulements de surfaces et souterrains) jouent également un rôle important dans le soutien du débit de la Seine (à l'aval de Poses), tant en période d'étiage, qu'en période de crue. Il est difficile de déterminer la part de chaque facteur sur le niveau d'eau. En revanche, les différents facteurs n'ont pas la même influence tout au long de l'estuaire : les inondations liées aux tempêtes et à de fortes marées ont une influence prépondérante à l'aval de Duclair alors que les inondations liées à de forts débits ont plus d'impact en amont de Duclair.

Sur l'estuaire de la Seine, il n'existe aucun ouvrage permettant de réguler les inondations. Les ouvrages d'Amfreville-Poses n'ont aucune capacité de stockage d'eau et ne peuvent pas lutter contre les inondations, ni les provoquer. Seules les digues et murets anti-inondation peuvent réduire la fréquence des débordements. Les Grands Lacs de Seine situés en tête de bassin de la Seine permettent de réduire la ligne d'eau à Paris en cas d'inondation et assurent un niveau d'étiage minimum. Leur gestion, optimisée pour la région parisienne, ne considère pas l'hydrologie particulière de l'estuaire de la Seine.

Les enjeux liés au risque inondation dans l'estuaire de la Seine sont importants et ils ne cessent d'évoluer depuis le début du XX<sup>ème</sup> siècle, et ce, malgré l'occurrence

d'événements hydrologiques importants. L'instauration de textes réglementaires, tels les PPRi, a offert aux communes un outil de gestion de l'espace face aux risques inondation. Toutefois, l'échelle des documents cartographiques et la difficulté pour certaines communes de s'approprier le texte réglementaire, peuvent rendre son exécution difficile.

Le risque inondation dans l'estuaire de la Seine doit être anticipé à l'échelle globale de l'estuaire, car les aménagements d'une commune en amont peuvent avoir des effets à l'aval et inversement. Il faut également créer un urbanisme au cas par cas, afin de répondre aux différentes configurations du risque tout en valorisant la diversité urbaine, ce qui implique un règlement de prévention des risques à une échelle plus fine et plus proche de la réalité. Un premier point pour atteindre cet objectif est la réalisation d'une étude de vulnérabilité de l'ensemble de l'estuaire en *i*) caractérisant les différents enjeux (habitations, industries, bâtiments agricoles, zones imperméables...) à l'échelle la plus fine possible ; *ii*) actualisant des modèles hydrologiques prenant en compte les paramètres les plus influents *iii*) localisant les différents aléas. Un second point consiste à proposer un diagnostic de vulnérabilité auprès des entreprises et des habitations exposées, afin d'enclencher leurs responsabilités face au risque inondation et leur proposer des solutions d'aménagement, de gestion ou une relocalisation dans une zone moins exposée. Pour les communes les plus soumises aux débordements, cela peut passer par le réaménagement des berges en espaces naturels et par la création de champs naturels d'expansion des crues. Pour les communes soumises au ruissellement, il ne faut plus penser uniquement en termes d'évacuation et de stockage massif d'eau, mais il faut favoriser l'infiltration dans des secteurs majoritairement imperméables (chaussées drainante, végétalisation des bâtiments...).

Les conséquences possibles du changement climatique sur l'hydrologie de l'estuaire de la Seine apportent les principaux résultats suivants : baisse de la pluviométrie, des débits et des apports souterrains ; augmentation du niveau marin. L'analyse des régimes de crue (décennale et centennale) montre une évolution modérée mais est soumise à une incertitude plus forte. Bien que dépendant des scénarii d'évolution socio-économique testés et comportant de nombreuses incertitudes, une modélisation hydrologique de l'estuaire de la Seine sous forçage climatique pourrait apporter des éléments importants pour la gestion du risque inondation sur ce territoire.

## Glossaire

---

**Aléa** : Manifestation d'un phénomène naturel d'occurrence et d'intensité donnée.

**Apports latéraux** : Apport de surface + Apport souterrain.

**Crue** : Augmentation du débit d'un cours d'eau dépassant plusieurs fois le débit moyen.

**Débit** : Mesure un volume ou une quantité de matière par unité de temps.

**Enjeux** : Ensemble des personnes et des biens pouvant être affectés par une inondation.

**Etiage** : Période de l'année où le débit d'un cours d'eau atteint son point le plus bas.

**Hydrologie** : Science qui s'intéresse au cycle de l'eau, c'est-à-dire aux échanges entre l'atmosphère, la surface terrestre et son sous-sol. L'hydrologie de surface étudie le ruissellement, les phénomènes d'érosion, les écoulements des cours d'eau et les inondations.

**Inondation** : Débordement des eaux hors du lit mineur. Les eaux occupent alors tout ou partie du lit majeur du cours d'eau.

**Remontée de nappes** : sous certaines conditions une élévation exceptionnelle du niveau de la nappe phréatique entraîne des inondations appelées remontées de nappes.

**Risque** : Conséquence d'un aléa d'origine naturelle ou humaine dont les effets peuvent mettre en jeu un grand nombre de personnes et occasionner des dégâts importants.

**Ruissellement** : Ecoulement des eaux à la surface des sols.

**Vulnérabilité** : Niveau de conséquence prévisible de l'aléa sur les enjeux. Différentes actions peuvent la réduire en atténuant l'intensité de certains aléas ou en limitant les dommages sur les enjeux.

## Abréviations

---

<b>ADECI</b> : Association D'Epouville Contre les Inondations	Réservoirs du Bassin de la Seine
<b>ADSM</b> : Archives Départementales de Seine-Maritime	<b>INSEE</b> : Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques
<b>ASIVA</b> : Association des Sinistré(e)s des Inondations de la Vallée de l'Austreberthe	<b>IPCC</b> : Intergovernmental Panel on Climate Change
<b>BRGM</b> : Bureau de Recherches Géologiques et Minières	<b>M2C</b> : Morphodynamique Continentale et Côtière
<b>CETE-NC</b> : Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement Normandie Centre	<b>MEEDDM</b> : Ministère de l'Ecologie de l'Energie du Développement Durable et de la Mer
<b>CMH</b> : Cote Marine du Havre	<b>MIN</b> : Marché d'Intérêt National
<b>COTECO</b> : COmité TEchnique de COordination de l'Institution	<b>PER</b> : Plan d'Exposition aux Risques
<b>DDE76</b> : Direction Départementale de l'Equipement de Seine-Maritime	<b>PHEC</b> : Plus hautes Eaux Connues
<b>DDTM</b> : Direction Départementale des Territoires et de la Mer	<b>PPS</b> : Plan de Surfaces Submersibles
<b>DREAL</b> : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement	<b>PPRi</b> : Plan de Prévention du Risque inondation
<b>GES</b> : Gaz à Effet de Serre	<b>PPRN</b> : Plans de Prévention des Risques Naturels
<b>GIEC</b> : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat	<b>SAGE</b> : Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux
<b>GIPSA</b> : Groupe d'Intérêt Public Seine-Aval	<b>SHOM</b> : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
<b>GPMR</b> : Grand Port Maritime de Rouen	<b>SPC SACN</b> : Service de Prévision des Crues Seine Aval et fleuves Côtiers Normands
<b>IGN</b> : Institut Géographique National	<b>SRES</b> : Spécial Report on Emissions Scenarios
<b>IIBRSB</b> : Institution Interdépartementale des Barrages-	<b>UNALCI</b> : Union Nationale des Associations de Lutte Contre les Inondations

## Bibliographie

- Allain S.**, 2009. Approche sociologique de la problématique des inondations dans l'estuaire de la Seine. Rapport d'étude pour le GIP Seine-Aval, 46p. + annexes.
- Archives Départementales de Seine-Maritime (ADSM)**, 1807-1830. Cadastres napoléoniens.
- Archives Départementales de Seine-Maritime**. Laisses de la crue de 1910 à Elbeuf.
- Base de Léry-Poses, 2004a**. Les aménagements de la Seine à Poses - écluses, barrage, usine hydroélectrique. Plaquette d'information, 11p.
- Base de Léry-Poses, 2004b**. Les poissons de la passe du barrage de Poses. Plaquette d'information, 19p.
- Bravard J.P. (coord.)**, 2000. Les régions françaises face aux extrêmes hydrologiques, gestion des excès et de la pénurie ; Chap. VIII- Paris et la Seine. Editions SEDES, Paris, 287p.
- Calba F.**, 1980. Hydrogéologie du karst crayeux du pays de Caux (France) - Etude de deux bassins (Rançon-Fontenelle et Ambion-Sainte-Gertrude). Paris : Université Paris 6 Pierre et Marie Curie. 189 p. + annexes.
- CATNAT**, 2010. Base de données CATNAT. [en ligne] <http://www.catnat.net>
- CATNAT**. Dossier historique : la crue de 1910 à Paris. 5p.
- Chery V.**, 2000. Inondations : Quels risques pour l'agglomération parisienne ? Annales des mines. Réalités industrielles. p. 73-79.
- Cioffi C. & Paporey B.**, 2009. Comité de pilotage du projet de système de vidéo-comptage à la chambre d'observation de Poses. Rapport de présentation des résultats provisoires du 1<sup>er</sup> janvier au 30 juin 2009. 39p.
- Delsinne N.**, 2005. Evolution pluri-millénaire à pluri-annuelle du prisme sédimentaire de l'embouchure de la Seine. Facteurs de contrôle naturels et d'origine anthropique. Thèse de doctorat, Université de Caen, 185p.
- Delecluse P.**, 2008. Où en est-on sur la connaissance du changement climatique ?, Présentation Séminaire Seine-Aval, Juin 2008.
- Direction Départementale de l'Équipement de Seine-Maritime (DDE76) & Centre d'Études Techniques de l'Équipement Normandie Centre (CETE-NC)**, 1997. Constitution d'une base de données sur les zones inondables en vallée de Seine.
- Direction Régionale de l'Environnement (DIREN) Île-De-France Bassin Seine-Normandie**, 2005. Schéma directeur de prévision des crues du bassin Seine-Normandie. Document approuvé par arrêté n°2005-2558 du 22/12/2005. 62p.
- Ducharne A., Habets F., Oudin L., Gascoïn S., Sauquet E., Viennot P., Hachour A., Deque M., Martin E., Page C., Terray L., Thierry D.**, 2010. Evolution potentielle du régime des crues de la Seine sous changement climatique. Colloque SHF : «Risques inondation en Ile de France», Paris, 24-25 mars 2010.
- Ducharne A., Habets F., Déqué M., Evaux L., Hachour A., Lepaillier A., Lepelletier T., Martin E., Oudin L., Pagé C., Ribstein P., Sauquet E., Thiéry D., Terray L., Viennot P., Boé J., Bourqui M., Crespi O., Gascoïn S., Rieu J.**, 2009. Impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme. Programme GICC Rapport de fin de contrat, 62p.
- Equilbey E., Leuret P.**, 2001. Mesures piézométriques (hautes eaux exceptionnelles) de l'aquifère crayeux en Haute-Normandie, printemps 2001. BRGM/RP-51153-FR, 54p.
- Fournier M., Massei N., Dupont J.P.**, 2006. Interrelations entre la nappe de la craie et la Seine. Etude préliminaire sur le site pilote de Norville UMR CNRS 6143 M2C, UFR Sciences et des techniques, Université de Rouen.
- Foussard V., Cuvilliez A., Fajon P., Fisson C., Lesueur P., Macur O.**, 2009. Evolution morphologique d'un estuaire anthropisé de 1800 à nos jours. Fascicule Seine aval n°2.3, 42p. ISBN 2-84834-052-5
- Gibert J.C. & Boillon B.**, 2007a. Les écluses d'Amfreville. Plaquette d'information du Service de Navigation de la Seine, 4p.
- Gibert J.C. & Boillon B.**, 2007b. Le barrage de Poses. Plaquette d'information du Service de Navigation de la Seine, 4p.
- Groupe d'Intérêt Public Seine-Aval (GIPSA)**, 2009. **Apports en eaux douces à l'estuaire de la Seine** - Fiche thématique du système d'observation de l'état de santé de l'estuaire de la Seine, 6p.
- Grand Port Maritime de Rouen (GPMR)**. Données de hauteurs d'eau aux marégraphes.
- Guérin O.**, 2004. Tout savoir sur les marées. Ed. Ouest-France, 166p.
- Guilcher A.**, 1965. Précis d'hydrologie marine et continentale. Masson, Paris, 389p.
- Houghton J.T., Meiro-Filho L.G., Callander B.A., Harris N., Kattenberg A., Maskell K.**, 1996. Climate Change 1995. The Science of Climate Change, Cambridge.
- Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.C., Noguer M., van der Linden P.J., Dai X., Maskell K., Johnson C.A.**, 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (INSEE)**, 2009. Recensement de la population. [en ligne] <http://www.insee.fr/fr/>
- Institut Géographique National (IGN)**, 2008. BD ORTHO. Licence N° 2009/CIN034-29
- Institut Géographique National (IGN)**, 2005. BD TOPO. Licence N° 2009/CIN034-29
- Institution Interdépartementale des Barrages-Réservoirs du Bassin de la Seine (IIBRSB)**, 2010. Présentation. [en ligne] <http://www.iibrbs.fr>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)**, 2007. Impacts, Adaptation & Vulnerability. Cambridge University Press, Cambridge.
- Javelle P.**, 2001. Caractérisation du régime des crues : le modèle débit-durée-fréquence convergent. Approche locale et régionale. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 1<sup>er</sup> mars 2001, 268p.
- Jousseume V.**, 2003. La vulnérabilité des hommes et des habitations face au risque d'inondation dans le Val nantais (1841-2003), p. 29-45
- Laignel B., Souissi S., Allain S., Bodilis J., Briand A., Cornier T., Ducrotoy J-P., Flanquart H., Morel F., Rochard E., Treyer S.**, 2010. Les effets du changement climatique dans le contexte des changements globaux - Expertise collective sur l'estuaire de la Seine, rapport Seine-Aval.
- Laignel B., Fritier N., Massei N., Ducharne A., Etcheber H., Laverman A.**, 2010. Les effets du changement climatique dans le contexte des changements globaux. Expertise collective sur l'estuaire de Seine – Synthèse sur les thèmes : Climatologie, Hydrologie, Qualité de l'eau. Rapport Seine-Aval 4, 66p.
- Le Hir P., Jacinto R.S.**, 2001. Courants, vagues et marées : les mouvements de l'eau. Fascicule Seine-Aval n°2, 32p. Editions Ifremer, Plouzané (France). ISBN 2-84433-028-2
- Massei N. & Fritier N.**, 2010. Quantification de l'évolution spatio-temporelle de la contribution de la nappe de la Craie au débit de la Seine Aval. Rapport d'étude pour le GIP Seine-Aval, 61p.
- Météo-France**. Données de vent et de pression atmosphérique.



**Ministère de l'Ecologie de l'Energie du Développement Durable et de la Mer (MEEDDM)**, 2010. Banque Hydro. [en ligne] <http://www.hydro.eaufrance.fr>

**Moisselin J.M., Schneider M., Canellas C., Mestre O.**, 2002. Les changements climatiques en France au 20ème siècle. Etude des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations. La Météorologie, n°38, août 2002, p. 45-56.

**Nouailhac-Pioch F. & Mailler E.**, 1910. Monographie de la crue de janvier-février-mars 1910. Commission des inondations, 62p.

**Picard A.**, 1910. Analyse de la crue de 1910.

**Pottier N.**, 2003. La lutte contre les inondations en France : outils et stratégies d'hier à demain. p. 173-204 *in* Les risques (coord. Moriniaux V.), Editions du temps, collection géographie, 256p.

**Rizzoli J.L.**, La régulation du bassin de la Seine. Institution interdépartementale des barrages-réservoirs du bassin de la Seine. Fiche technique [en ligne] [www.iibrs.fr](http://www.iibrs.fr)

**Pirazzoli P.A.**, 2007. Données pour le dimensionnement des structures côtières et des ouvrages de bord de mer à longue échéance. Projet DISCOBOLE – rapport final. 72p.

**Sequana-Normandie**. La seine et son histoire. [en ligne] <http://www.sequana-normandie.com/>

**Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM)**, 2010. Prédiction des marées. [en ligne] [www.shom.fr](http://www.shom.fr)

**Valdès D.**, 2005. L'influence du contexte structural sur les grands écoulements souterrains et leurs impacts sur le régime hydrologique des rivières, thèse Université de Rouen.

# Le Risque inondation

Conditions de déclenchement et perspectives

## Fascicules Seine-Aval

- 1.1 Seine-Aval : un estuaire et ses problèmes
  - 1.2 Courants, vagues et marées : les mouvements de l'eau
  - 1.3 Sables, chenaux et vasières : dynamique des sédiments et évolution morphologique
  - 1.4 Matériaux fins : le cheminement des particules en suspension
  - 1.5 L'oxygène : un témoin du fonctionnement microbiologique
  - 1.6 Contaminations bactérienne et virale
  - 1.7 Patrimoine biologique et chaînes alimentaires
  - 1.8 La contamination métallique
  - 1.9 Fer et manganèse : réactivités et recyclages
  - 1.10 Le cadmium: comportement d'un contaminant métallique en estuaire
  - 1.11 La dynamique du mercure
  - 1.12 Les contaminants organiques qui laissent des traces : sources, transport et devenir
  - 1.13 Les contaminants organiques : quels risques pour le monde vivant?
  - 1.14 Des organismes sous stress
  - 1.15 Zones humides de la basse vallée de la Seine
  - 1.16 Les modèles : outils de connaissance et de gestion
- 2.1 Le Programme Seine-Aval 3 : contexte, bilan et enjeux
  - 2.2 La génotoxicité : quel risque pour les espèces aquatiques ?
  - 2.3 Evolution morphologique d'un estuaire anthropisé de 1800 à nos jours
  - 2.4 Le Benthos de l'estuaire de la Seine
  - 2.5 Poissons, habitats, & ressources halieutiques : Cas de l'estuaire de la Seine
  - 2.6 Le Risque inondation : conditions de déclenchement et perspectives

<b>Réalisation</b>	: GIP Seine-Aval 12 Avenue Aristide Briand 76 000 Rouen <a href="http://www.seine-aval.fr">www.seine-aval.fr</a>
<b>Conception - Edition</b>	: AAZ Consultants
<b>Infographie</b>	: Quai 24
<b>Impression sur papier recyclé</b>	: IB4
<b>ISBN</b>	:
<b>Crédits photos (couverture)</b>	: GIP Seine-Aval, DDTM76, GPMR
<b>Date d'édition</b>	: Décembre 2010



**Seine-Aval**  
GROUPEMENT D'INTÉRÊT PUBLIC

