

# Mitigation des inondations causées par les rivières de plaine en zones urbaines : méthodes et exemples de solutions

## *Measures to counter floods in urban areas along low land rivers : methods and examples*

**R. Slomp<sup>1</sup>, L. Deroo<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Rijkswaterstaat, Pays Bas, Robert.slomp@rws.nl

<sup>2</sup> ISL Ingénierie, Lyon, deroo@isl.fr

### Résumé

Cet article tire parti d'approches notamment françaises et néerlandaises sur le sujet des inondations causées par les rivières de plaine, en zone urbaine.

Les rivières de plaine ont des crues lentes, sont influencées par le niveau de la mer sur des dizaines ou centaines de km de leur embouchure, ont un débit de pointe modéré mais qui, cumulé sur plusieurs jours, correspond à un grand volume. Les enjeux économiques dans les zones urbaines sont importants ou très importants en cas d'inondation ; l'enjeu humain est souvent fort en cas de rupture des digues.

Trois thèmes sont développés.

Méthodes de l'analyse Coûts-Bénéfices : nous examinons comment sont évalués les coûts et bénéfices : bénéfices économiques de la protection, évaluation et appréciation du risque humain

Retour d'expérience des solutions : nous présentons de manière comparée les démarches adoptées dans nos pays respectifs, avec par exemple :

- L'aménagement du bassin de la Seine (depuis 1910) : entre mesures d'amélioration de l'hydraulicité, protections locales et gestion globale à l'échelle du bassin notamment avec les barrages réservoirs.
- Le plan Delta aux Pays Bas (1953-1985) qui a montré la nécessité de beaucoup investir pour les zones à risques, urbaines et rurales, en renforçant les ouvrages existants et en construisant des ouvrages nouveaux [1]. Ceci a donné lieu à un programme important : construction de digues de 1960 à 1990, renforcement de digues de 1996 à 2001 suite aux crues de 1993 et 1995.
- Le plan français submersions rapides (2011-2016) et son focus sur la prévision et la réduction de la vulnérabilité [2].
- Le projet Room for Rivers 2001-2015, qui a montré

que renforcer les ouvrages n'est pas la seule solution. Après 200 ans de réduction du lit majeur, il fallait trouver des solutions avec la population pour réduire les obstacles à l'écoulement.

Pistes pour l'avenir : les solutions nouvelles (résistance à l'érosion, pompage de grande capacité, ...), les moyens nouveaux de prévision, inspection en crue et communication, les approches nouvelles (services écosystémiques, ACB) sont de nature à faire évoluer nos méthodes. Nous tentons de combiner retours d'expérience et nouveautés pour suggérer et quantifier des types de protections adaptés. Dans la mesure du possible, nous illustrons le propos avec le cas de la Seine.

### Abstract

This article covers flood risk and floods along the lower reaches of rivers and in urban areas. These rivers are often characterized by floods which last weeks, not very high peak flows, but because of the duration it involves large volumes of water and the influence of sea in the estuaries (tides, storm surges) can be observed from ten kilometers from the sea up to a hundred. Potential economic losses due to floods in the urban areas can be huge or devastating.

We will cover three themes :

Cost Benefit Analysis : We will cover how costs (flood damages and reinforcement costs) and benefits (avoided or reduced damages) are estimated, the cost of a human life, and monetizing costs and benefits for ecosystems

A comparison of measures to cope with flood risk : We will cover the policy issues and the implementation, e.g.:

- Since the 1910 floods the Seine catchment has been improved with measures to increase the conveyance capacity, the (re)construction of flood defenses and large reservoirs to reduce peak discharges to the main rivers.
- The Dutch Delta Plan (1953-1985) showed it was necessary to invest in flood protection for both

urban and rural areas by reinforcing existing flood defences, by building new flood defenses [1]. The plan also initiated a large scale reconstruction program for river dikes from 1960 until 1990 which was continued from 1996-2001 after two large flood events in 1993 and 1995.

- The French Plan « Le plan submersions rapides (2011-2016) » set up after the storm surge Xynthia and flash floods in the Var region. This plan focused on improving the forecasts and reducing the risk for the population [2].
- The Room for Rivers program (2001-2015) which shows reinforcing flood defenses is not the only solution. After 200 years of building in the flood plain and reducing the size of the flood plain especially at cities hydraulic constraints had to be addressed

**Solutions :** There are a lot of possible solutions available for coping with floods on rivers, technical solutions (e.g. reducing the erodibility of flood defenses, large pumps in combination with reservoirs to reduce peak flows), improved forecasting, inspection and communication techniques to reduce flood impacts, new solutions. We will cover different types of solutions and add examples from the Seine river.

## Contexte

La Seine est une rivière qui traverse plusieurs grandes agglomérations. Paris et surtout les villes voisines en bord de Seine sont les plus à risque. Les dernières crues, 2016 et 2018, l'ont rappelé.

Économiquement, il est rentable de protéger des zones avec des fortes densités de population, y compris pour des événements rares. Cette « rentabilité », déjà démontrée lorsque sont considérés uniquement les dommages directs, est encore meilleure si l'on tient compte des dommages indirects. Par exemple, les dommages indirects ont été 10 fois plus grands que les dommages directs après le passage de l'ouragan Katrina à la Nouvelle Orléans. Une inondation peut avoir une forte influence sur l'économie d'un pays ou sur l'économie mondiale. L'inondation de Bangkok en 2011 a perturbé pendant plusieurs mois l'approvisionnement mondial en pièces clés des ordinateurs, disques durs et certaines pièces détachées pour l'automobile.

Mais évidemment, protéger les zones urbaines à risque avec de grandes digues ou de grands murs a aussi des inconvénients...

## L'aménagement du bassin de la Seine

Le bassin de la Seine fait face à plusieurs défis d'inondation, (cf. figure 1) :

- Inondation marine

- Débordement de cours d'eau et la Seine
- Remontée des nappes
- Ruissellement

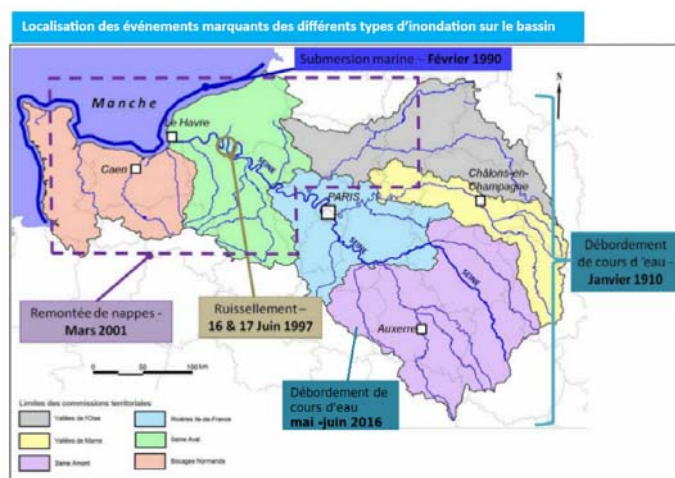
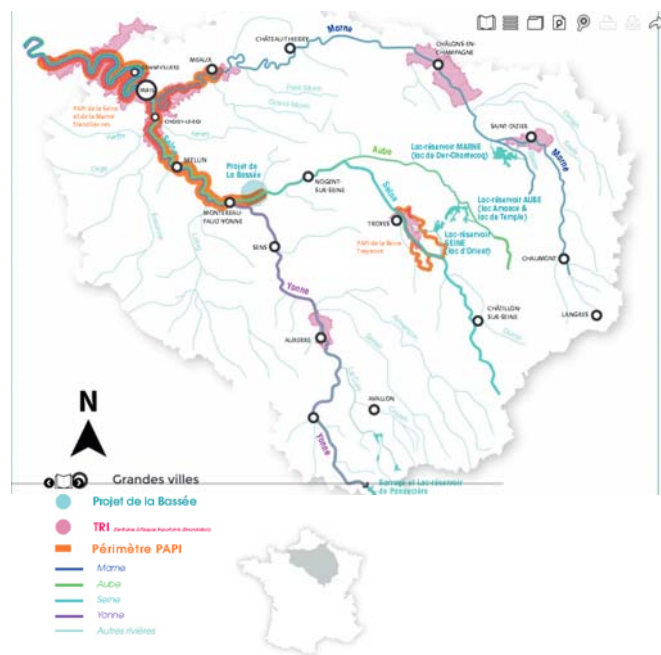


FIGURE 1 : DEFIS D'INONDATION DANS LE BASSIN VERSANT : AGENCE DE L'EAU SEINE NORMANDIE

Depuis les inondations de 1910 à Paris plusieurs mesures ont été prises pour réduire le risque d'inondation. Parmi celles-ci, la plus importante à l'échelle du bassin a été la mise en service des barrages réservoirs, qui réduisent les débits des crues, dans les villes en amont, à Paris et dans la région francilienne. Ces réservoirs soutiennent également les étiages.

Quelques chiffres

- 4,8 millions de personnes habitent en zone potentiellement inondable, soit plus de 25 % de la population du bassin
- un quart des communes possède plus de 30 % de leur population en zone inondable
- sur le littoral, 200 000 habitants sont soumis au risque de submersion et dans certaines communes jusqu'à 80 % de la population réside en zone submersible notamment Cherbourg-Octeville, Caen, Dives-Ouistreham, Le Havre, Dieppe.
- le bassin accueille plus de 17 millions d'emplois dont 3 millions localisés en zone inondable
- le bassin abrite un patrimoine culturel particulièrement important pouvant être affecté.
- L'OCDE a évalué en janvier 2014, les conséquences économiques d'une crue de type 1910 en Île-de-France. Le coût des dommages directs est estimé à un montant compris entre 3 et 30 milliards d'euros, auquel s'ajoute un coût pour l'économie nationale compris entre 1,5 à 58,5 milliards d'euros sur 5 ans.

FIGURE 2: ZONE GEREE PAR L'EPTB<sup>1</sup>

## Retours d'expérience

### Le plan Delta aux Pays Bas (1953-1985)

Ce projet est lancé après une tempête avec surcote dans le sud-ouest (Zélande et Brabant du Nord) et l'ouest (Hollande méridionale) des Pays Bas, qui a eu des conséquences désastreuses : dommages matériels et pertes humaines (1 851 morts). Les causes : un message d'alerte météorologique mal ou pas compris, un manque d'entretien depuis plusieurs décennies, un manque de fonds dû à la grande crise, la seconde guerre mondiale et une mauvaise organisation, (en particulier, une multitude d'organisations aux tâches mal réparties).

Plusieurs mesures ont été mises en œuvre directement après la tempête pour améliorer la prévision et les messages d'alerte, réparer les digues détruites et préparer un plan pour le futur. Ce plan a pris plus de 30 ans pour être achevé. Ce plan a été élaboré à partir d'une étude coût-bénéfice. Le but principal était de réduire le risque d'inondation à une valeur négligeable. Des digues ont été plus que doublées en hauteur et largeur. Des mesures de système étaient essentielles. La longueur de la côte a été réduite d'environ 1 000 km par la fermeture d'estuaires. Ces travaux ont eu des incidences notables sur l'environnement, qui ne sont corrigées que maintenant, en 2018-20. Le projet a aussi permis de désenclaver des îles : après le projet la population s'est trouvée à moins de 1 heure de route de Antwerpen/Anvers ou de Rotterdam. Ceci a significativement influé sur les niveaux

<sup>1</sup> <https://en.calameo.com/read/005626553b12f5ddb0b0b>

de salaire et par suite sur l'économie locale. En 70 ans, le nombre d'organismes impliqués dans la gestion des crues est passé de 2 500 à 21.

L'étude coût-bénéfice qui a été conduite comparait les dommages évités avec les coûts de reconstruction des digues et déterminait ainsi les minima du coût total (figure 3).

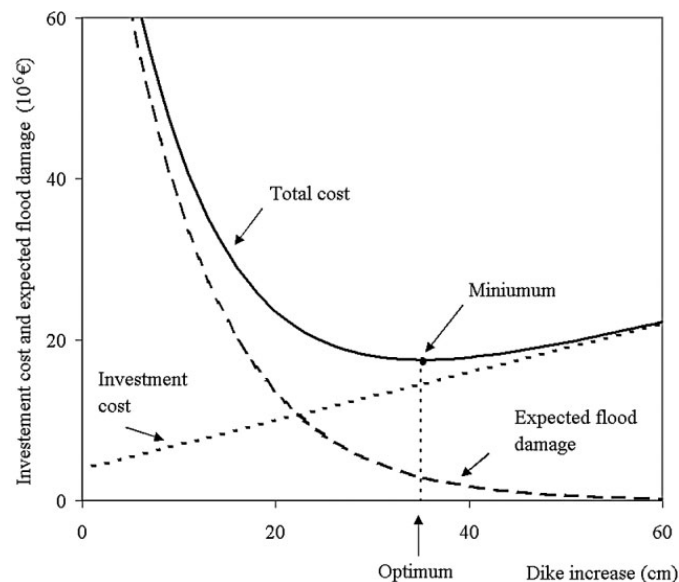


FIGURE 3 : PRINCIPE D'ETUDE COUT-BENEFICE AUX PAYS BAS [3]

Depuis 2007, la valeur de la vie humaine (ou la valeur de la fatalité évitée) est prise en compte dans les études coût-bénéfice [3], ce qui n'était pas le cas auparavant.

Le risque lié aux submersions marines était connu depuis les années 30. Il a fallu un désastre concret pour mobiliser la société sur ces questions. Un consensus politique s'est créé immédiatement pour éviter à tout prix un nouveau désastre de ce type à l'avenir, et a mis en place une gestion et financement durables pour la construction et l'entretien. La gestion des digues est une compétence locale et celle des grands ouvrages, nationale [4].

### Le plan français submersions rapides (2011-2016)

Ce programme a été lancé après une tempête avec surcote (Xynthia) et les inondations dans le Var

Les raisons de ces grands dégâts et de près de 50 morts étaient : un message d'alerte météorologique mal ou pas compris, un manque d'entretien depuis plusieurs décennies, trop d'organisations avec des tâches mal réparties, la pression urbaine sur la cote, une population de plus en plus âgées, la réglementation d'urbanisme, par exemple interdiction de R+1, et la submersions des bases d'opérations de service de secours (à Aiguillon sur Mer et Draguignan). En plus les

ouvrages n'avaient pas été rehaussés depuis longtemps. En un siècle 20 cm d'augmentation de niveau de la mer correspondent à une augmentation de charge hydraulique (vagues et niveau d'eau) de 50 cm.

Le plan était composé des quatre volets

- Maîtriser l'urbanisation dans les zones à risques
  - Accélération des plans de prévention des risques littoraux
  - Aucune construction de digue ne peut être autorisée pour ouvrir de nouveaux secteurs à l'urbanisation.
  - L'État a établi un référentiel technique de travaux de prévention du risque d'inondation dans l'habitat existant, afin d'aider les professionnels à définir, prescrire, ou réaliser ces travaux.
- Améliorer les systèmes de surveillance, de prévision et d'alerte
  - Météo-France a mis en place une vigilance spécifique météo vagues submersions, opérationnelle depuis octobre 2011
  - Une meilleure couverture du territoire par le renouvellement et le renforcement du réseau de radars hydrométéorologiques
  - L'extension du réseau de cours d'eau surveillé par l'État et bénéficiant du dispositif de surveillance Vigicrues. 20 800 km de cours d'eau faisaient l'objet d'une surveillance par l'État sur le territoire métropolitain en 2011
  - Le service d'avertissement pluies intenses à l'échelle des communes (APIC), mis en œuvre par Météo-France au début de l'année 2012,
  - Un service anticipation de la possibilité de crues soudaines
- Renforcer la fiabilité des digues
  - L'engagement de 1 200 km de travaux de confortement d'ouvrages est prévu sur la période 2011-2016 et l'État mobilisera pour cela des ressources de l'ordre de 500 M€
  - La compétence de gestion des milieux aquatiques et de prévention des inondations (dite GEMAPI) a été créée par la loi du 27 janvier 2014 de modernisation de l'action publique territoriales et d'affirmation des métropoles.
  - L'association France digues, créée le 22 mai 2013, anime et assiste le réseau des gestionnaires publics de digues et d'ouvrages de protection contre les crues et les submersions marines.
- Développer une véritable culture du risque
  - Les plans communaux de sauvegarde, procédures visant à préparer et organiser la commune pour faire face aux situations d'urgence, seront rendus obligatoires dès prescription d'un plan de prévention des risques.
  - Les dossiers départementaux sur les risques

majeurs (DDRM) et les documents d'information communaux sur les risques majeurs (DICRIM) doivent mieux prendre en compte le risque de submersion marine.

- L'application mobile Ma commune face aux risques permet de s'informer facilement sur l'état des risques dans chaque commune de France. Témoins historiques de grandes crues passées, les repères de crues sont des marqueurs destinés à faire vivre la mémoire des inondations.

Ce plan était bien conçu en ce qu'il s'attaque aux causes : prévisions, choix d'urbanisme et de constructions des bâtiments, manque de financement pour l'entretien et réparations, gestion des ouvrages et sensibilisation de tous les acteurs. Formellement le plan français submersions rapides est achevé en 2016. Plusieurs volets sont encore actifs (lois sur l'urbanisme sur la cote, améliorations de Météo France en Vigicrues, plans communaux et départementaux) et les réglementations pour entretien et constructions de ouvrages hydrauliques, « le décret digues »<sup>2</sup>

#### **Le programme Room for Rivers (Pays Bas) 2001-2015**

En 1993 et en 1995 il y eut deux grandes crues de la Meuse et du Rhin. 10 000 maisons dans la partie néerlandaise de la zone d'expansion des crues de la Meuse ont été inondées deux fois. 250 000 Néerlandais ont été évacués préventivement en 1995. Les crues étaient centennales et les digues étaient prévues pour des crues millénales ; celles-ci n'ont pas cédé, mais ont été proches de la rupture.

Suite à cet épisode, 150 km de nouvelles digues ont été construites en 2 ans. 800 km des digues ont été améliorées en 6 ans. Toutes ces reconstructions et améliorations ont été conçues pour les crues de référence d'avant 1993 et 1995. Or, pour diverses raisons, la crue de référence pour le Rhin a gagné en importance après 1995 : +1 000 m<sup>3</sup>/s de débit et +30 cm de hauteur d'eau. La raison principale est que depuis 100 ans la zone d'expansion des crues du Rhin est de plus en plus réduite, surtout autour des villes. Ceci a causé des constriction hydrauliques, souvent juste aux endroits aux enjeux socio-économiques les plus forts, les plus forts, qui s'ajoutent aux conséquences de 100 ans d'industrialisation dans le lit majeur : infrastructures de transport fluvial, briqueteries, sites d'extraction de granulats, etc.

Le projet Room for Rivers, « Espace pour les fleuves » avait deux buts : réduire le risque inondation en agissant sur les hauteurs d'eau de la crue de référence et améliorer la prise en compte de l'environnement

Les solutions mises en œuvre dans le cadre du projet sont de neuf types (cf. figure 4) : 1 réduction d'hauteur des épis, 2

<sup>2</sup> <https://www.legifrance.gouv.fr/lo/pdf.do?id=JORFTEXT000030591079>



creusement/affouillement du lit mineur, 3 réduction d'ancienne industrie et digues secondaires, 4 chenaux dans la plaine/ creusement/affouillement de la plaine 5 recule de digues, 7 zones d'expansion des crues 8 chenaux dans la zone actuellement protégé 9 rehaussement /renforcement de la digue comme dernière recours.

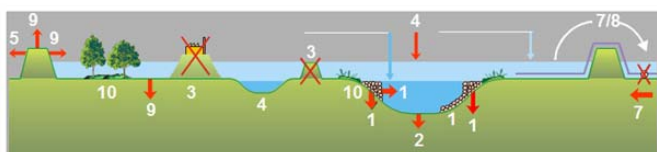


FIGURE 4: MESURES POUR REDUIRE LES HAUTEUR D'EAU DE REFERENCE DANS LE FLEUVE

Les digues construites en 1996-2002 avaient été mises en œuvre avec très peu de concertation; il avait même été dérogé aux règles portant sur la participation du public en raison de l'urgence. Pour le programme Room for the Rivers 2001-2015 et les projets de même type mis en œuvre dans le lit de la Meuse, la participation du public a, au contraire, été essentielle. Par exemple, pour le Rhin, 400 projets étaient proposés par les experts de l'État, les provinces, les municipalités, les autorités régionales de l'eau, les associations de protection de la nature et la population. Tous ont été évalués selon la même méthode et avec la même rigueur. Pour ceci des outils de communication ont été développés. Ce qui montre la réussite de cette approche est le fait que très peu de dossiers ont fait l'objet de recours contentieux ; beaucoup moins qu'avec d'autres grands projets d'utilité publique. Certaines grandes villes ont bénéficié d'arbitrages favorables à d'autres projets, rendus pour recueillir leur adhésion : Nimègue a ainsi pu construire plusieurs ponts dix ans avant la date prévue et Gorinchem a pu améliorer toute une grande zone industrielle et portuaire.

## Mesures envisagées et pistes disponibles

### Les mesures actuelles et envisagées dans le bassin de la Seine

Après les inondations de la Seine en 1910, des travaux importants ont été entrepris : recalibrage de la Seine puis, entre 1949-1991, quatre barrages ont été construits en amont de Paris. Principalement construits pour étaler les crues les réservoirs sont devenus également indispensables pour d'autres usages. Ils soutiennent les étiages, et permettent ainsi de garantir les usages aval (navigation, prises d'eau, paysage) et de contribuer à la qualité de l'eau en période sèche. Ils apportent une contribution à la biodiversité. Ils sont devenus des lieux de loisirs, tourisme, détente.

L'EPTB SGL (Établissement public territorial de bassin Seine Grands Lacs) compétent développe actuellement une nouvelle zone de stockage (avec un système de pompage) dans La Bassée. Ceci va réduire le niveau de crue à Paris de 8 cm. La zone de stockage devrait également permettre une

valorisation écologique de zones humides.

Mais les mesures structurelles peinent aujourd'hui à se concrétiser. Cela est illustré par exemple pour le cas de Paris et de sa stratégie de « ville résiliente ».

D'un côté, il est admis qu'une crue centennale provoquerait des dommages directs de 30 Mds€ et des pertes indirectes d'activité économique de 60 Mds€

Pour assurer la résilience, les actions envisagées sont celles du PAPI (Paris et territoire francilien), avec trois objectifs : accroître la culture du risque inondation, stabiliser le coût des dommages d'une crue type 1910 (site pilote de La Bassée, modernisation d'une vanne et réfection de murettes), renforcer la résilience des services publics, pour améliorer le retour à la normale post-crue.

Ainsi, il semble admis que Paris et ses alentours ne sont pas protégés pour une crue centennale. C'est une situation que l'on peut trouver anormale par comparaison à d'autres métropoles de cette envergure.

Ci-dessous quelques exemples de périodes de retour au niveau européen : aux Pays-Bas, où le souvenir de 1953 est vivace, Rotterdam 30 000 ans, Amsterdam 300 ans pour les lacs et 30 000 ans pour la mer ; en République Tchèque ou, après les crues de 2002 (1 Md€ de dommages), Prague a décidé de se protéger contre la crue de 500 ans [9]. Au Royaume-Uni, Londres est protégée pour la crue de 100 ans et planifie (TE2100 projet) de porter le niveau de protection à 1 000 ans. À Vienne, le projet « nouveau Danube » a porté en 1998 le niveau de protection de la ville à 10 000 ans, après les crues de 1954 [5]. À Bratislava, les travaux engagés en 2007 avec forte contribution du budget européen ont porté le niveau de protection à 1 000 ans [5].

La capacité à se protéger de crues très fortes semble dépendre très (trop ?) étroitement de la mémoire récente. 1910 est peut-être trop ancienne pour que Paris et la région francilienne décident de se protéger de manière adéquate. Nous revenons sur cette question au § relatif à l'analyse coûts-bénéfices.

Il y a lieu de s'interroger sur ce qu'aurait été le PAPI francilien (en particulier dans son volet « réduction de l'aléa ») s'il avait fait suite à un événement de type 1910.

Par ailleurs, les tendances supposées du changement climatique vont dans le sens d'une plus grande exposition aux aléas crues et sécheresses : augmentation possible de la fréquence des crues sur le bassin de la Seine [6], aggravation probable des étiages, élévation certaine du niveau de la mer.

Nous souhaitons mettre en avant dans les « Solutions disponibles », ci-dessous, quelques éléments nouveaux, ou moins nouveaux, qui permettraient d'élargir la palette des politiques publiques, et rendre davantage possibles les

mesures structurelles.

## Solutions disponibles

- Gestion dynamique
- Stocker/Sur-stocker
- Abaisser la ligne d'eau
- Rendre sûres les digues de protection
- Combiner les solutions

### Gestion dynamique des débits de pointe

Assez logiquement, la gestion dynamique des débits de pointe ou l'optimisation du passage des crues peut parfois provenir d'actions sur l'horloge des crues.

- dans le bassin versant
  - écouler l'eau avant que le système primaire des fleuves ne sature
  - éviter que les rivières tributaires soient en crue au même temps que le cours principal.
  - stocker l'eau (si possible) quand le système primaire des fleuves est saturé
  - étaler le pic de crues, par stockage.
- dans les rivières et fleuves
  - accélérer l'écoulement pendant les crues, jusqu'à l'embouchure.

Exemple de Yodo, au Japon

Un exemple de gestion dynamique des débits de pointe a été illustré avec force lors du passage du typhon 18 au Japon, en 2013 [11].

Lors de cet épisode, le bassin de la rivière Yodo (8 240 km<sup>2</sup>) a reçu de l'ordre de 300 mm de précipitations en 48 h.

La rivière Yodo (cf. figure 5) et ses affluents traversent des zones très urbanisées, avec notamment Kyoto et Osaka.

Le bassin est équipé de plusieurs barrages à vocations multiples dont l'écrêtement des crues. Le lac intérieur Biwa est également une composante importante du système hydraulique.

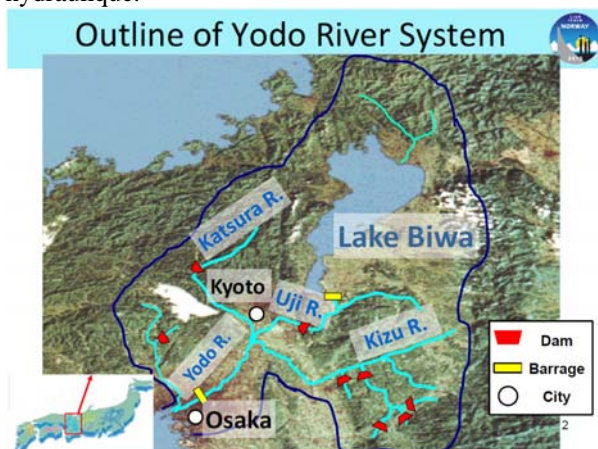


FIGURE 5 : LE SYSTEM DU FLEUVE YODO

Les vannes des barrages et les vannes de contrôle de l'exutoire du lac Biwa ont été manœuvrées de sorte à minimiser la hauteur d'eau notamment à Kyoto. Dans cette ville, la hauteur maximale a dépassé la cote de crête des digues d'une vingtaine de centimètres, et a pu être contrôlée par des sacs de sable.

Une évaluation a posteriori a montré que, sans cette gestion coordonnée des réservoirs amont, la hauteur d'eau aurait été relevée de plusieurs dizaines de centimètres, et la digue rive droite de la Katsura à Kyoto n'aurait pas pu être protégée ; les dommages évités ont été de 10 Mds de dollars, pour une zone préservée de 9,8 km<sup>2</sup> en centre-ville de Kyoto.

Exemple de la Seine

La question de l'importance de l'horloge des crues et de la gestion des vannages est également démontrée pour le bassin de la Seine [13] : par exemple, pour 1910 « *le pic enregistré à Paris le 28 janvier résulte de la coïncidence parfaite des ondes de crue en provenance des vallées lentes de la Marne, de la Petite Seine et des vallées rapides de l'Yonne, des Morins et du Loing* ». Le même article montre comment la genèse des crues de la Seine de 1924, 1955 ou 1982 procède d'autres mécanismes de concomitance.

### Systèmes passifs vs. systèmes vannés

Les progrès récents en matière de mesures hydrologiques, de traitement de ces mesures (simulations de prévision) et de communication en temps réel de l'information permettent certainement d'optimiser la gestion des ouvrages hydrauliques, sur le réseau principal (les lacs réservoirs notamment), mais aussi sur le réseau secondaire, avec le bon timing de mise en eau des bassins d'écrêtement.

Mais la difficulté principale est sans doute ailleurs. Vouloir agir de manière appropriée sur l'horloge des crues impose de considérer le fait que la genèse des crues et les concomitances diffèrent d'un événement à l'autre. Et donc qu'un système d'écrêtement optimisé des crues ne peut pas être simplement un système passif de ralentissement : ralentir les affluents rapides peut augmenter la crue à la confluence. Cela a par exemple été démontré par [12]. Il faut donc une intervention (humaine ou automatisée) pour manœuvrer des vannes de sorte à adapter au mieux le système au déroulement constaté et prévu de la crue : accélérer certains affluents, en ralentir d'autres. Or il y a une grande réticence des Maîtres d'ouvrage à recourir aux systèmes vannés : car le lendemain de la crue, la question sera toujours posée de savoir si les vannes ont été manœuvrées de manière adéquate. La piste la plus prometteuse consiste probablement à (1) établir à l'avance des consignes de gestion des crues, débattues avec tous les interlocuteurs concernés, (2) mettre en œuvre un système de pilotage automatisé, avec surveillance humaine et possibilité d'adaptation pendant la crue, (3) tirer les leçons post-crue pour faire évoluer

l'algorithme de l'automate.

### Stocker / Surstocker

Stocker l'eau des crues est une réponse classique.

Dans le cas des grandes rivières de plaine, c'est une solution qui est difficile à mettre en œuvre. D'abord, parce que les volumes en jeu sont considérables. En 1910, au plus fort de la crue, le débit journalier est de 200 Mm<sup>3</sup>. Ensuite, parce qu'en terrain plat et généralement urbanisé, il est difficile de dégager de grands volumes de stockage.

L'ETPB SGL (et ses prédécesseurs) ont pourtant réussi à mettre en œuvre des projets ambitieux offrant une capacité de stockage de 800 Mm<sup>3</sup> dans les réservoirs amont, et 50 Mm<sup>3</sup> en projet sur le site de La Bassée. Ces projets sont conçus avec des organes actifs (vannes, pompes) qui permettent au moins en théorie d'agir sur la pointe de la crue.

Le développement de nouveaux projets est plus difficile aujourd'hui qu'il ne l'était hier. La mémoire de la crue de 1910 s'est estompée, les enjeux environnementaux mieux pris en compte sont difficiles à peser et freinent les projets. Difficulté supplémentaire : les projets de stockage sont développés dans des territoires à l'amont des enjeux, territoires qui n'ont donc pas de réel intérêt à leur mise en œuvre.

Quelles pistes ?

À l'image de ce qui a été pratiqué dans d'autres pays, une piste consiste déjà à faire le meilleur usage possible des retenues d'eau existantes, en y envisageant la possibilité de surstocker de manière exceptionnelle. Par exemple dans les retenues de SGL, par pompage ou par gravité à partir de nouveaux canaux (sous réserve de faisabilité, 1 m au Lac Marne représente 50 Mm<sup>3</sup>).

Notons que cette piste est par exemple envisagée dans le cadre du SLGRI de Creil et Compiègne (possibilité d'augmenter les capacités de l'aménagement de Longueil-Sainte-Marie en utilisant la technique du pompage, [8]).

Une autre piste consiste à prévoir des casiers d'inondation de grande extension, qui ne serait mis en eau que de manière exceptionnelle (typiquement : Q50 ou plus) pour que les inconvénients de la mise en eau soient clairement contrebalancés par les bénéfices aval. Ceci est fait à Grenoble avec l'Isère, 20 champs d'inondation contrôlés sur 40 km.

Enfin, dans le cadre de projets neufs, l'approche doit être nécessairement multi-usages. Cela a été pleinement démontré par les réservoirs de SGL.

### Abaisser la ligne d'eau dans le réseau principal

Abaisser la ligne d'eau, à débit constant, a été la réponse immédiate à Paris après la crue de 1910, en supprimant des obstacles en lit mineur. Ca a été également la réponse apportée à Vienne, avec des travaux d'une toute autre

ampleur : la création d'un nouveau lit pour le Danube au passage de la ville, qui augmente beaucoup la section offerte à l'écoulement.

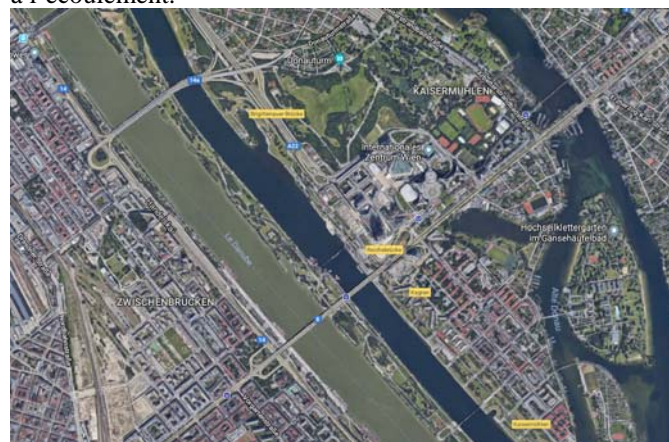


FIGURE 6 : NEUE DONAU, VIENNA (SOURCE : GOOGLE MAPS)  
L'expérience montre que réduire des constrictions hydrauliques est relativement cher (de l'ordre de deux fois plus cher) par rapport aux protections locales par systèmes d'endiguements. Mais cette solution permet parfois de nouveaux aménagements autour du fleuve (exemple de Room for Rivers, Pays-Bas).

Abaisser la ligne d'eau à débit constant est la seule option lorsque les inondations ne sont pas provoquées par un excès de débit, mais par une condition limite aval imposée, par exemple le débouché en mer : Nouvelle-Orléans, Rotterdam, Londres. L'abaissement de la ligne d'eau est réalisé par un barrage d'estuaire qui déconnecte la condition limite aval (la mer) de la rivière.

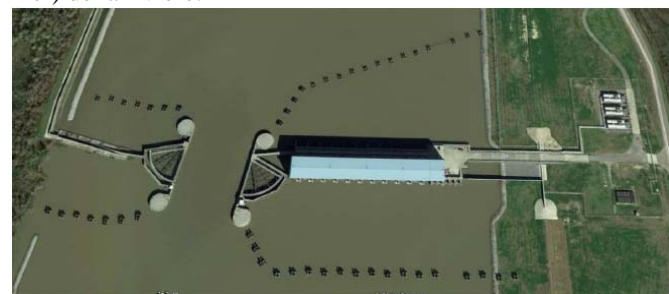


FIGURE 7 : WESTERN CLOSURE, NEW ORLEANS (SOURCE : GOOGLE EARTH)

Cette solution a été présentée de manière innovante pour le cas de la Seine à Paris et en région francilienne[10]. Le principe de la solution est le suivant :

- pour les rivières lentes de plaine, en régime fluvial, la ligne d'eau est imposée par l'aval, et la pente d'écoulement est faible : les vitesses sont lentes,
- pour abaisser la ligne d'eau, à débit constant, il faut accélérer les vitesses ; accélérer les vitesses peut être réalisé en fournissant de l'énergie, par pompage,
- mais cela n'est efficace qu'à la condition de supprimer



l'influence aval, en interposant un barrage entre l'amont (à protéger) et l'aval.

Cette idée a été testée pour le cas de Paris et, hydrauliquement, elle fonctionne : en fournissant 100 MW de pompage, il est possible d'abaisser la ligne d'eau de 2 m environ pour une crue de type 1910.

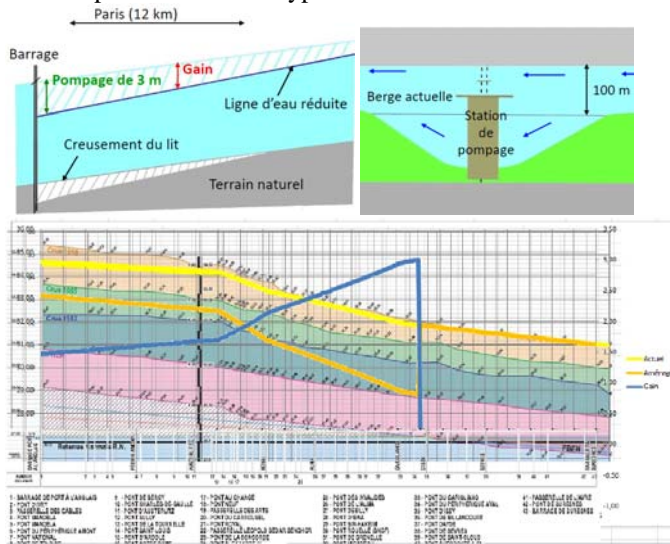


FIGURE 8 : SYSTEME DE POMPAGE PROPOSE

Le coût d'un tel aménagement est raisonnable : quelques centaines de M€ pour le gain de 2 m à Paris. La faisabilité technique est acquise, car elle ne repose que sur des technologies éprouvées, peu différentes de celles mises en œuvre sur les barrages d'estuaires. Au stade actuel de la réflexion, il n'est pas apparu d'inconvénient majeur.

À l'inverse, la pente de la rivière doit être réduite pendant les étiages. C'est ce qui a été historiquement fait sur de nombreuses rivières à faible pente, dont la Seine et ses affluents principaux, pour garantir la navigation.

### Rendre sûres les digues et protections

Selon le PGRI, « les digues ne constituent pas une protection absolue contre le risque. Leur action est limitée à l'ampleur de la crue pour laquelle elles sont dimensionnées. Par ailleurs, le risque de rupture des ouvrages doit être envisagé. »

Cette affirmation est malheureusement confirmée par les ruptures historiques de nombreuses digues de protection, en France et à l'étranger (Nouvelle-Orléans par exemple).

La situation serait très différente si nous pouvions compter sur des digues absolument sûres, capable de résister aux sollicitations de toutes sorte, et notamment aux deux modes de rupture les plus fréquents : l'érosion interne et l'érosion externe de surverse.

En effet, dans ce cas, les digues continuent de rendre service au-delà de la crue pour laquelle elles sont dimensionnées, en limitant les entrées d'eau dans la zone protégée, et en

réduisant la durée de submersion.

Or, les techniques actuelles permettent d'envisager cela. Par exemple, des digues en sols traités aux liants peuvent intrinsèquement résister à l'érosion interne et à l'érosion de surverse, car les matériaux sont rendus résistants à l'érosion. Cela a été développé en France (projet Diguelite), avec les solutions sols-chaux ; et dans d'autres pays également avec des matériaux cimentaires : dans le district de Natsui (Japon), frappée par le Grand East Japan Earthquake (Fukushima), une nouvelle digue de hauteur 9 m en sol-ciment résiste aux tsunamis.



FIGURE 9 : DIGUE RESISTANT AUX TSUNAMIS, COURTESY : KAJIMA CORP.

Par exemple également, les digues de la Nouvelle Orléans ont été reconstruites avec des matelas de protection contre la surverse.

Ces techniques ne peuvent pas être déployées en remplacement de toutes les digues, pour des raisons évidentes de coût.

Les digues existantes peuvent (et doivent) être rendues sûres jusqu'au niveau de protection souhaité. D'importants progrès ont été faits et continuent de l'être, pour porter un diagnostic de sécurité sur ces ouvrages, et pour mettre en œuvre d'éventuels travaux de confortement permettant d'atteindre des niveaux de sécurité élevés.

Aux Pays-Bas, depuis 1960 les digues sont ainsi rendues sûres pour des niveaux de confiance jusqu'à 10 000 ans (et objectif 100 000 ans pour certaines, depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2017). Le § sur l'Analyse Coûts Bénéfices apporte quelques indications sur le sujet.

Une autre piste de progrès pour l'avenir s'inspire du cas des barrages à retenue permanente. Les barrages en service jouissent d'un niveau de sécurité bien plus élevé que les digues ; une des raisons principales est la possibilité d'assurer une surveillance pendant la mise en eau et une maintenance locale si des désordres apparaissent. C'est bien plus difficile pour les digues de protection, rarement mises en eau. Le développement des méthodes d'auscultation linéaires (fibre optique) et de surveillance pendant les crues (drones, webcams) devraient permettre des avancées importantes.



### Combiner les solutions

La gestion des risques inondations nécessite une approche à l'échelle du bassin, comme cela est d'ailleurs fait au travers du PGRI.

Parmi les quatre objectifs du PGRI (réduire la vulnérabilité, agir sur l'aléa, raccourcir le délai de retour à la normale, mobiliser les acteurs), l'accent est placé sur des mesures relatives à la réduction de la vulnérabilité et aux mesures non structurelles (organisation, mobilisation).

Ces mesures recourent les bonnes pratiques observées dans plusieurs pays :

- Une analyse approfondie du risque d'inondation basée sur des analyses des systèmes économiques, hydrologiques, hydrauliques et des prévisions des changements du climat et de leurs effets,
- La qualité de l'information des messages d'alertes et d'organisation pré-crue et pendant la crue pour limiter les dommages et accélérer le retour à la normale,
- Faire évoluer le plan occupation du sol, en concertation avec les habitants, et ne pas vouloir défendre à tout prix lorsque les inondations sont trop fréquentes ou trop difficiles à éviter
- Faire évoluer les constructions dans les zones inondables, pour réduire les effets de l'eau. Plusieurs manuels illustrent cela, par exemple de CEPRI pour Orléans.

**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

La carte ci-dessous illustre les TRI du bassin de la Seine.

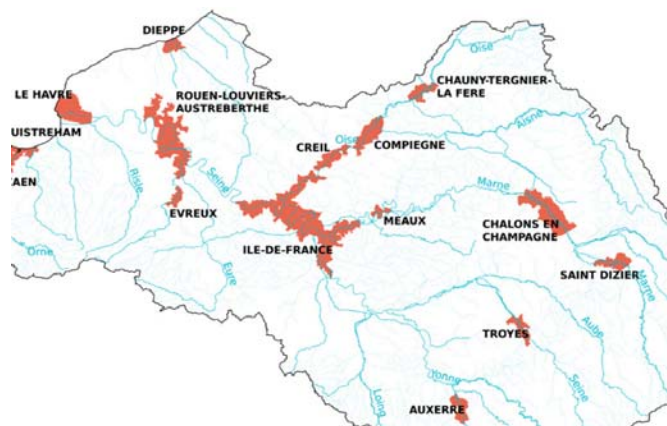


FIGURE 10 : BASSIN DE LA SEINE, SOURCE : PLGRI

Il apparaît clairement que, pour les crues de grandes rivières, les enjeux sont liés.

À l'échelle du bassin versant, il est difficile de prédire quelle est la solution la mieux adaptée.

Les choix ne résultent pas que d'une optimisation technico-économique. Ils dépendent aussi de qui les prend, qui paye, quels autres problèmes on souhaite résoudre en même temps (notamment : étiages ?), et surtout combien de temps on souhaite prendre pour résoudre les problèmes.

Pour trouver des solutions, par exemple pour la région francilienne, l'expérience hollandaise montre qu'il faut une volonté partagée de l'Etat central, des collectivités locales (région, villes, EPTB) et nécessairement aussi la population. Les inondations de 2016 en 2018 ont été des avertissements, mais presque contre-productifs en termes de prise de décision, car les dommages sont restés modérés. L'étude OCDE montre la toute autre ampleur des conséquences en cas de crue de type 1910. Les enjeux sont clairs – les réponses très en retrait par rapport à ce qui se pratique ailleurs, par exemple aux Pays-Bas.

Typiquement, sur les bassins de l'Oise et de l'Aisne, il n'y a pratiquement pas d'outil de réduction de l'aléa. Le PGRI fait état d'un seul projet, d'utilisation des anciens bassins de sucrerie de Vic-sur-Aisne (60, 02) pour le stockage des eaux de crue de l'Aisne est à l'étude. Cela paraît peu au regard des enjeux à l'aval.

### L'analyse coûts-bénéfices

Aux Pays-Bas, l'outil qui est utilisé en support de la prise de décisions est l'analyse coût-bénéfices (ACB).

L'Analyse Coût-Bénéfices est un outil puissant, qui a été utilisé en de nombreuses occasions.

Par exemple, aux Pays-Bas, c'est cette analyse qui permet de démontrer la nécessité de protéger certaines zones. Il faut augmenter la protection des zones à risque et parfois endiguer pour protéger les biens et la population. L'ACB du programme Room for the Rivers a permis de mettre en évidence l'existence, pour un niveau de protection donné (en général équivalent à la période de retour du phénomène de crue, T), d'un optimum de la longueur de digue mise en place par habitant protégé. Par exemple, pour protéger 100 000 habitants, l'ACB montre qu'il est rentable de mettre en place 10 km de digues si ces digues protègent contre une crue de référence plus forte que celle correspondant à la période de retour 10 000 ans. Il est rentable de se protéger ensemble ! [14 et 15].

Pour la région de Rotterdam, qui se situe dans l'estuaire du Rhin et de la Meuse, une étude/analyse coûts-bénéfices a été faite dans le cadre du dernier programme Delta lancé en 2012 [16]. Ce programme est national mais les sous-programmes sont régionaux. La zone de Rotterdam est très industrialisée, très urbanisée, mais comporte aussi de vastes espaces agricoles (des serres, des fleurs et légumes en pleine terre, des champs de colza et du blé), des zones naturelles / des zones à fort intérêt écologiques (lacs, milieux humides et marais), et un parc national (le Biesbosch). Environ 100 000 personnes habitent en dehors des zones protégées par les digues, dans des villes anciennes ou sur des zones situées en hauteur. Compte tenu du changement climatique, une ACB a été mise en œuvre notamment pour élaborer un système de protection adéquat pour ces personnes (horizon de référence :

2100).

Une contrainte de principe s'est imposée : envisager comme seules solutions des solutions adaptatives, qui ne mènent pas à des impasses selon les évolutions des scénarios c'est-à-dire qui ne forceront pas à engager des dépenses incontournables très importantes dans le futur.

Les différentes parties prenantes dans l'étude ont été l'autorité nationale de l'eau « Rijkswaterstaat », les autorités régionales de l'eau et les municipalités. À Rotterdam le grand défi en 2100 sera probablement une montée de 1 m de niveau de la mer, des débits des fleuves 20 % plus forts en hiver et des étiages plus sévères en été. Dans la première phase les scénarios envisagés favorisaient les enjeux de protection contre les inondations et la préservation de la disponibilité en eau douce en été. Quatre scénarios ont été comparés :

- Remplacer les barrières contre les surcotes par des barrages munis d'écluses. Les anciennes villes portuaires (ports encore en fonction maintenant) seraient alors abritées derrière un barrage,
- Écouler plus d'eau en hiver à travers l'estuaire de l'Escaut,
- Enlever la barrière contre les surcotes et augmenter tous les digues en hauteur et largeur,
- Envoyer plus d'eau du Rhin vers le bras nord au lieu des deux bras vers l'Ouest.

Tous ces scénarios ont été considérés trop chers et/ou avec un impact environnemental trop important.

Le scénario retenu à ce jour consiste donc à poursuivre la poursuite la stratégie déjà à l'œuvre : des digues fortes (surdimensionnées parce que les normes de sécurité sont très élevées), des barrages que l'on peut fermer en cas de surcote et les mesures de « Room for the River » dans les zones où le gain sur les hauteurs d'eau est maximal.

Dans une seconde phase, il a été nécessaire de hiérarchiser les projets identifiés dans le cadre de cette stratégie, dans une région très vaste et à la géographie très hétérogène. Des projets qui pouvaient consister en :

- la réparation/réfection des ouvrages selon l'ancienne réglementation ou la nouvelle réglementation (à partir de 1/1/2017 [17].
- la réfection des ouvrages pour faire face aux changements climatologiques et géologiques : augmentation du niveau de la mer, crues plus fortes en hiver et subsidence des digues,
- des mesures de « Room for the Rivers (figure 3)
- des mesures pour réduire la vulnérabilité en cas d'inondation.

L'analyse coûts-bénéfices a été utilisée pour établir l'ordre de priorité entre tous ces projets. Elle a intégré plusieurs critères tels que : les coûts de mesures à prendre, le bénéfice d'une réduction des dommages, le bénéfice environnemental (intégrant les enjeux liés au cadre de vie, particulièrement prégnant dans les zones urbaines) et les préférences des différents acteurs dans la région. Et en considérant le fait que certaines mesures ont une grande zone d'influence, et

d'autres sont locales.

L'étude économique a donné une réponse aux questions suivantes :

- quelles mesures ont les meilleures performances ?
- quelles mesures sont prioritaires ?
- quelles mesures faut-il prendre ensemble, dans quel ordre et à quel moment ?

16 stratégies ont été évaluées. Les ratios B/C ont varié de 0.1 à 2.64. L'étude a été discriminante.

La commission qui a commandité l'étude a choisi des mesures adaptées à chaque zone (20) :

- investir dans les zones concernées par le plus grand risque (les zones urbaines et industrielles), investir avec dans l'amélioration du système de digues et barrages de surcote. Les digues sont intégrées à la trame urbaine sous forme de routes, belvédères et zones d'habitation.
- dans les secteurs de l'Est concernés par les grands fleuves, investir dans les mesures " Room for the River " dans les partis à l'est avec les grands fleuves ;
- investir dans l'infrastructure « vitale » pour le protéger contre l'inondation. Le plus important est le système d'approvisionnement de l'électricité (Ceci est comparable au réseau stratégique de transport d'électricité en France)
- pour les 50 000 personnes résidant en dehors de système protégé par les digues, garantir le fonctionnement actuel des barrages de surcote pour réduire les dégâts à l'appareil productif les plus économiques fréquents ;
- même si l'évacuation de 3,6 millions de personnes n'est pas possible, investir dans les services de protections civiles pour être prêt pour affronter des inondations éventuelles.
- relocaliser les captages d'eau destinée à la consommation humaine vers l'Est, hors des nappes salines

## Conclusions

À Paris l'enjeu de risque d'inondation est trop grand pour laisser les choses en l'état. L'OCDE [18] a remarqué que le coût des dommages directs causé par une crue de type 1910 serait estimé à un montant compris entre 3 et 30 milliards d'euros, auquel s'ajoute un coût pour l'économie nationale compris entre 1,5 à 58,5 milliards d'euros sur 5 ans. Il ne compte même pas le coût pour l'économie européenne. Le présent article montre comment des métropoles européennes comparables se protègent contre des aléas bien plus rares.

La protection contre les inondations est un investissement de l'état nécessaire pour une économie stable. Mais certainement difficile à mener.

Une difficulté centrale semble être la difficulté à prendre des décisions engageant des dépenses et des contraintes immédiates, pour des bénéfices qui ne sont que futurs et incertains. Pourtant, c'est l'outil pratique et concret qu'ont utilisé les métropoles qui ont vécu de très grandes crues au

cours des dernières décennies. L'exemple des Pays-Bas, certainement un des pays les plus avancés en matière de protection contre les crues en pays de plaine, est tout à fait éclairant à cet égard. Pour la métropole francilienne, faut-il attendre que la grande crue se produise ?

Nous avons souhaité, au travers de cet article, et par exemple à travers le retour d'exemple des Pays-Bas, montré qu'il est techniquement et socialement possible de trouver de bonnes mesures à prendre pour réduire le risque d'inondation ; et que c'est rentable de le faire.

### Remerciements

Robert Slomp remercie Samy Ouahsine du Direction Régionale et Interdépartementale de l'Environnement et de l'Énergie de Ile de France pour ses suggestions.

### References:

- [1] Bos, F and P. Zwaneveld, (2017), Cost benefit analysis for flood risk management and water governance, an overview of one century,
- [2] MEDDE (2017), Le plan national submersions rapides
- [3] Kind, J.M., Economically efficient flood protection standards for the Netherlands, *Journal of Flood Risk Management* 7 (2014) 103–117
- [4] Slomp, R.M. Flood Risk and Water Management in the Netherlands: A 2012 Update
- [5] Kryżanowski, M. Brilly, S. Rusjan, and S. Schnabl, Review Article: Structural flood-protection measures referring to several European case studies *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 135–142, 2014
- [6] Zbigniew W. Kundzewicz et al., Assessing river flood risk and adaptation in Europe—review of projections for the future, *Mitig Adapt Strateg Glob Change* DOI 10.1007/s11027-010-9213-6, 2010
- [7] PAPI de la Seine et de la Marne franciliennes, Synthèse 2017-2019, ETPB Seine Grands Lacs
- [8] Plan de gestion des risques d'inondation 2016-2021, bassin Seine-Normandie, Direction Régionale et Interdépartementale de l'Environnement et de l'Énergie d'Île-de-France
- [9] The European Climate Adaptation Platform (Climate-ADAPT), European Environment Agency
- [10] Lempérière F., Deroo L., Peut-on éviter les inondations à Paris ? Symposium du CFBR du 25 janvier 2018 à Chambéry
- [11] Masayuki Kanmuri. et al., Flood Control for Typhoon No. 18 at Yodo River System in 2013 - Avoidance of Catastrophe Through Coordinated Operation of 7 Dams-
- [12] L. Deroo, P. Royet, C. Poulard. Sûreté et efficacité des barrages écrêteurs de crue. Colloque CFBR “ Sûreté des barrages et enjeux”, Nov 2016, Chambéry, France. Sûreté des barrages et enjeux, pp.203-221, 2016,
- [13] R. Marti, Th. Lepelletier, L'hydrologie de la crue de 1910 et autres grandes crues du bassin de la Seine, *La houille Blanche* N° 8-1997
- [14] EIJGENRAAM C.J.J., Optimal safety standards for dike ring areas, CPB Discussion Paper no. 62, CPB Netherlands Bureau for Economic Policy Analysis, The Hague, 2006.
- [15] EIJGENRAAM, C.J.J., “From optimal to practical safety standards for dike-ring areas”, *Water Science and Technology: Journal of the International Water Association*, vol. 56, no. 4, pp. 113-124, 2007.
- [16] Kind, J., Vos, R., Tijssen, A., Jeuken, A., Slootjes, N. Towards the development and evaluation of adaptive flood risk management strategies for the Rhine Estuary - Drechtsteden, september 2014,
- Sao Paola ICFM6
- [17] Slomp, R., Knoeff, H. Bizzarri, A., Bottema, M., de Vries W. S., Probabilistic Flood Defence Assessment Tools, FLOODrisk 2016, Lyon.
- [18] OCDE, Étude de l'OCDE sur la gestion des risques d'inondation: la Seine en Île-de-France 2014, Éditions OCDE, 2014
- [19] CEPRI, Comment saisir les opérations de renouvellement urbain pour réduire la vulnérabilité des territoires inondables face au risque d'inondation ? - Principes techniques d'aménagement – 2015
- [20] Deltaprogramma Stuurgroep Rijnmond-Drechtsteden, Advies Deltaprogramma Rijnmond-Drechtsteden, juin 2014