



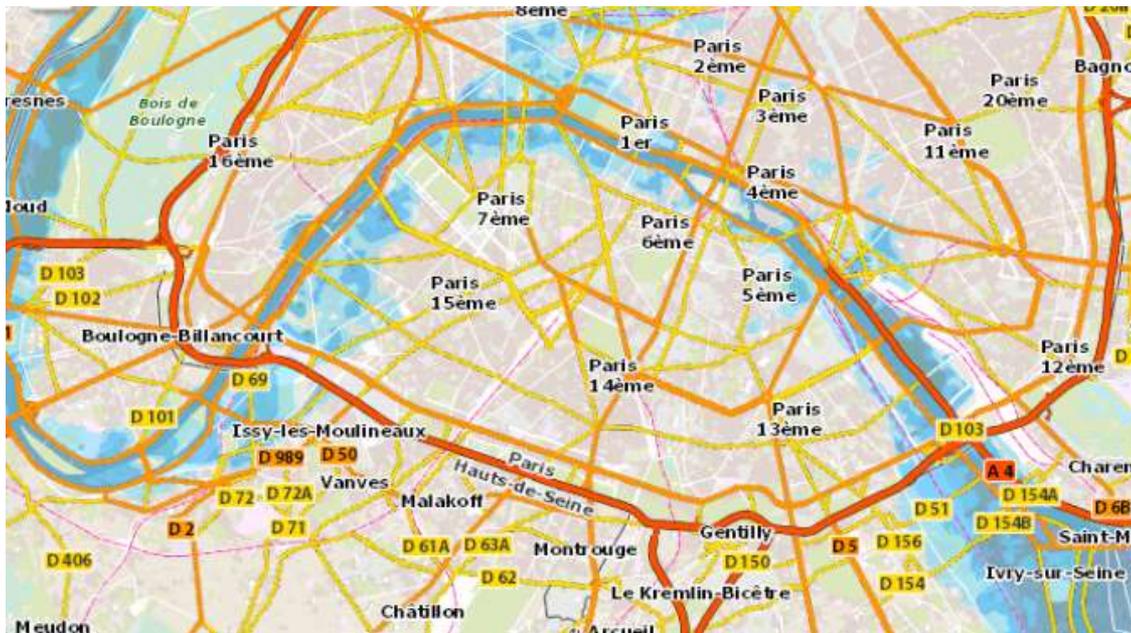
Symposium du CFBR du 25 janvier 2018 à Chambéry

Peut-on éviter les inondations à Paris ?

François LEMPÉRIÈRE
HYDROCOOP

Luc DEROO
I.S.L.

Peut-on éviter les inondations à Paris ?



Crue de référence : 1910

Source : IAU

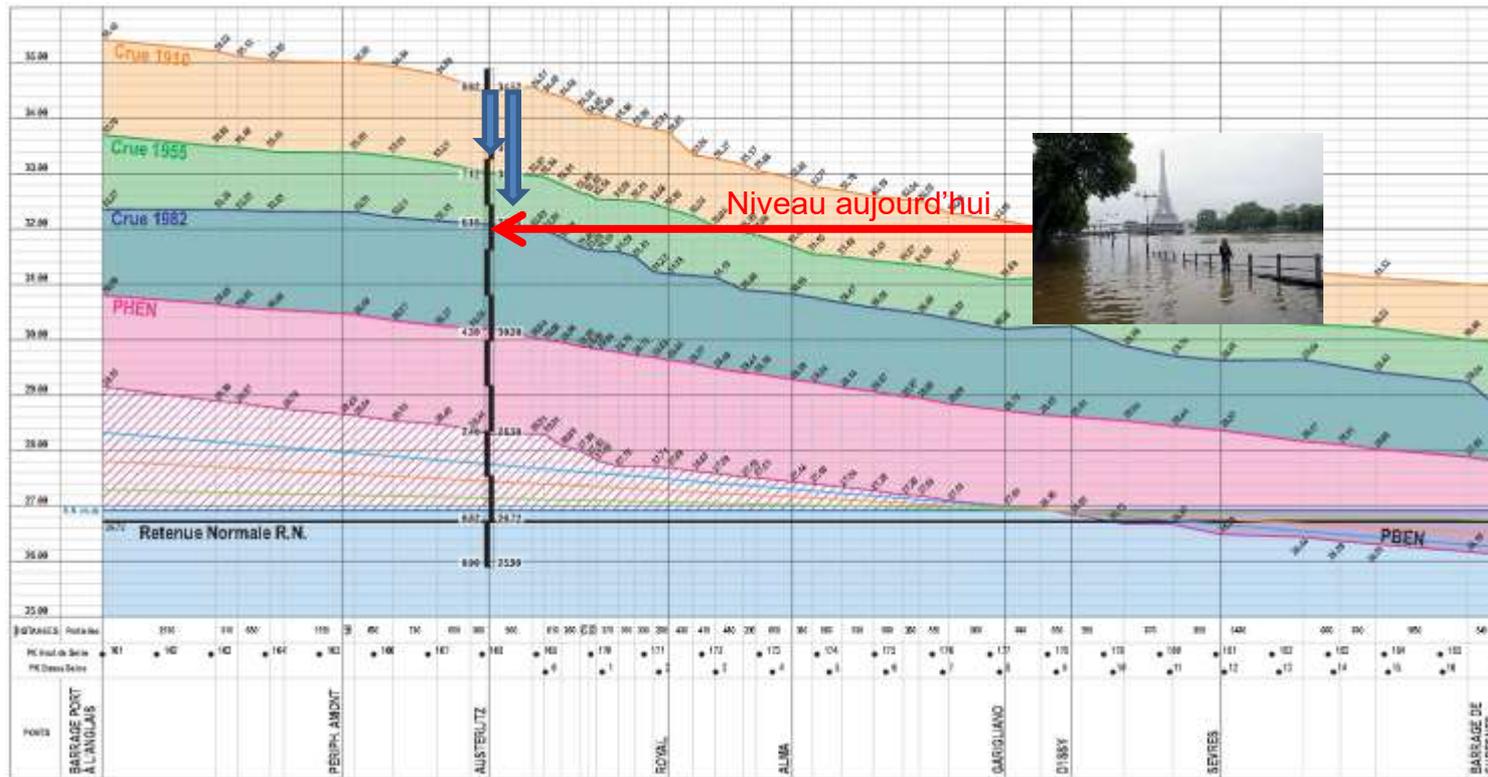
Étude de l'OCDE sur la gestion
des risques d'inondation

La Seine en Île-de-France

Les dommages d'une telle catastrophe ont été estimés de 3 à 30 milliards d'euros pour les dommages directs selon les scénarios d'inondation, assortis d'une réduction significative du PIB qui atteindrait sur cinq ans de 1.5 à 58.5 milliards d'euros, soit de 0.1 à 3 % en cumulé.

Un investissement de plus de 1 milliard est justifié s'il est efficace, c'est-à-dire si on peut baisser de 1 à 2 m le niveau atteint en crue.

Peut-on éviter les inondations à Paris ?

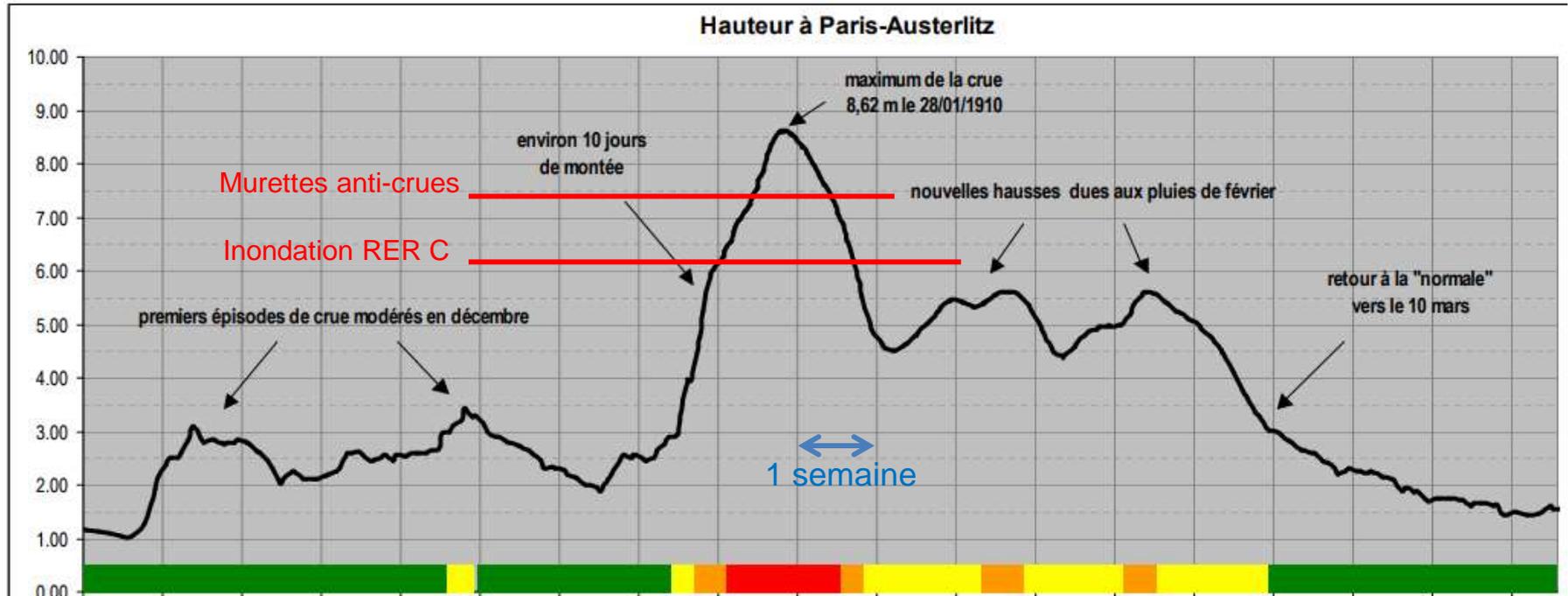


Source : VNF

Baisser de 1 à 2 m le niveau atteint en crue, c'est passer de 1910 à 1955 ou 1982. Baisser de 2,50 m, c'est retrouver le niveau de 1982 ou 2016.

La crue de 1910 à Paris

- Le débit est resté important un mois, voisin du maximum plusieurs jours.
- Volume journalier de 200 millions de m³, 5 mm sur BV de 40.000 km².
- Une telle crue peut donc durer très longtemps car elle correspond à une pluviométrie assez faible sur un sol saturé.



Source : DRIEE

Les solutions classiques contre les inondations

- 1) Réduire le débit en stockant l'eau : 4 réservoirs réalisés il y a 50 ans en amont de Paris stockent **800 millions de m³** sur 100 km²; ils permettent de gagner environ **50 cm** sur les crues d'hiver mais sont pleins pour les crues de printemps comme en 2016. Un projet complémentaire de **50 millions de m³** (La Bassée) vise à gagner **20 cm**.
- 2) Elargir la Seine est à peu près impossible.
- 3) Approfondir le lit est inefficace sur quelques km mais peut être efficace s'il s'applique sur 50 km. La section draguée sera assez limitée mais un gain de quelques dm est envisageable. L'approfondissement peut être discontinu. C'est ce qui a été fait après la crue de 1910 (gain : **30-50 cm**).
- 4) Endiguer la Seine a été fait par endroits, sur de petites hauteurs

Une solution innovante : augmenter la vitesse pour baisser le niveau

- La vitesse moyenne de l'eau V est liée à la pente i de la rivière suivant une formule proche de : $V = K\sqrt{Ri}$

K est une constante liée à la forme des berges et du lit, et R le rapport de la section mouillée S au périmètre mouillé p .

- Pour un débit donné $q = S V$:

$$\frac{q}{S} = K\sqrt{\frac{S}{p}i} \quad \text{d'où} \quad \frac{q^2}{S^2} = K^2 \frac{S}{p} i \quad \text{et} \quad \frac{p q^2}{K^2} = S^3 i$$

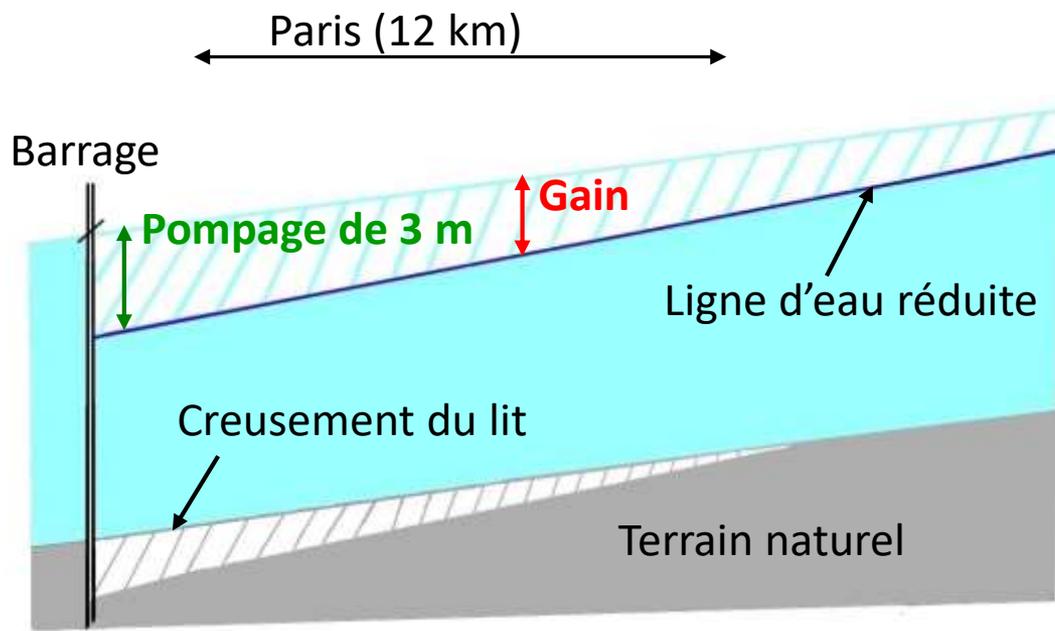
p et K varient peu pour un débit q de crue, le produit $S^3 i$ varie donc peu. Un doublement de i permettrait de diviser S^3 par 2, c'est-à-dire de réduire S de 20% ($0,8 \times 0,8 \times 0,8 \approx 0,5$) et de baisser le niveau de 1 à 2 m.

Comment doubler la pente de la Seine ?

- Pertes d'énergie par frottement = débit * dénivelée =
$$P = Q \times i \times g, \quad \text{en W/m}$$
- Pour la Seine en « crue de 1910 » :
$$Q = 2.400 \text{ m}^3/\text{s}, \quad i = 15 \text{ cm par km},$$
$$P = 3,5 \text{ MW/km}$$
- Pour doubler la pente naturelle sur 20 km, il faut fournir une puissance correspondante à $20 \times 3,5 \text{ MW} = 70 \text{ MW}$.

Comment fournir près de 100 MW à la Seine pour traverser Paris ?

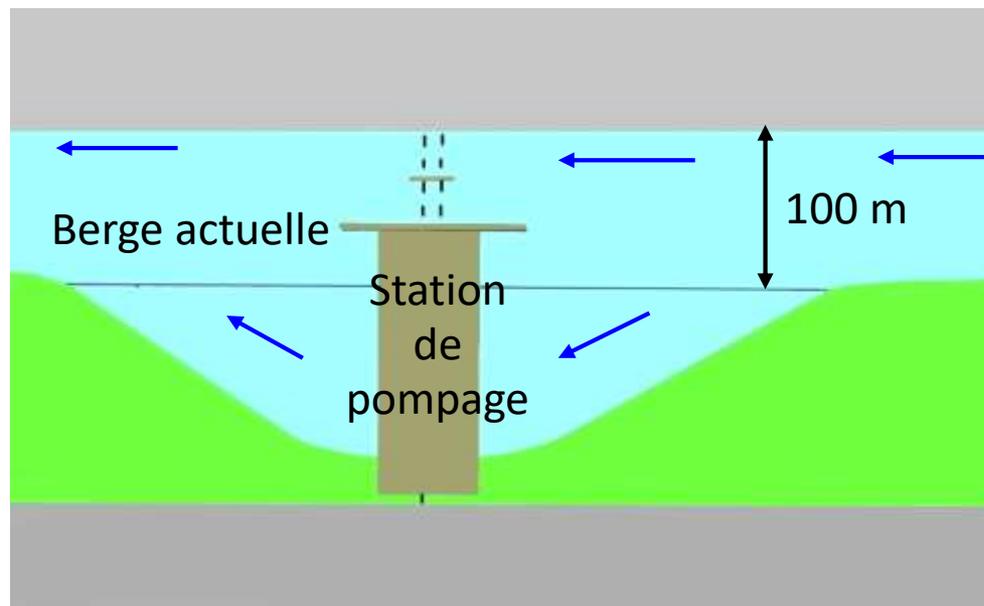
- Barrer la Seine un peu en aval de Paris et pomper le débit total en amont du barrage pour le rejeter en aval ne modifie pas les conditions ou les niveaux du fleuve en aval mais permet de baisser le niveau amont de 3 m, donc de doubler la pente et la puissance disponible sur 20 km.
- Un approfondissement du lit sur une dizaine de km optimise l'impact.



Profil en long de la Seine en crue à Paris

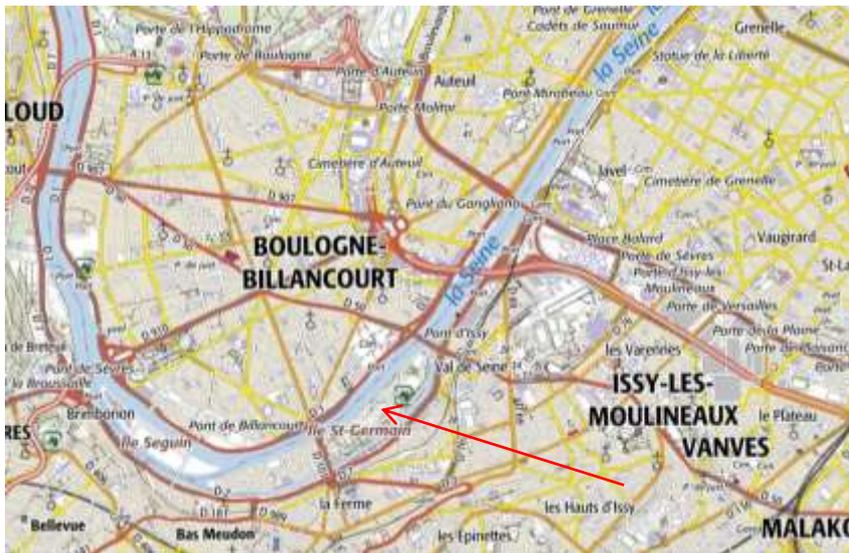
Faisabilité ? 1- Ouvrages hydrauliques

- Un aménagement comprend une passe navigable et une station de pompage pour environ $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ sous 3 m de charge.
- La passe navigable est vannée ; les vannes sont fermées pour $Q > Q_{10}$, tout le débit étant alors pompé sous une charge de 1 à 3 m.
- Puissances et débits sont analogues à ceux mis en œuvre à La Rance (pompage de $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ sous 3 m).

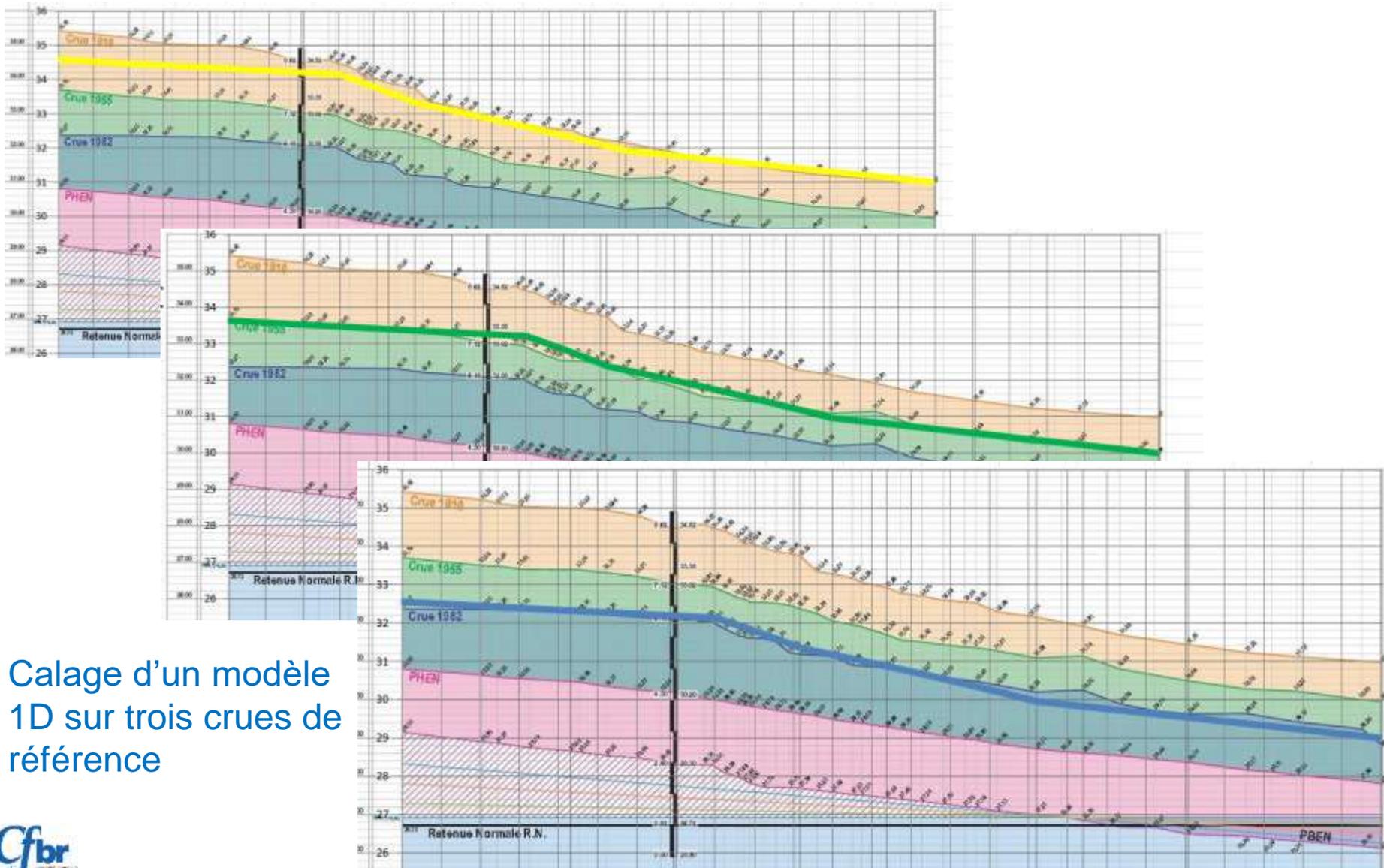


Faisabilité ? 2 - Un site favorable

- Le site techniquement idéal est un site de plus de 250 m de largeur immédiatement en aval de Paris.
- Ce site existe dans l'Île Saint-Germain à Issy-les-Moulineaux à 1 km en aval de Paris, à 500 m en aval du pont d'Issy.
- L'inconvénient pour ce site est la perturbation apportée à un parc de loisirs attractif : cette perturbation peut être temporaire. Station de pompage et chenal peuvent être ensuite recouverts.

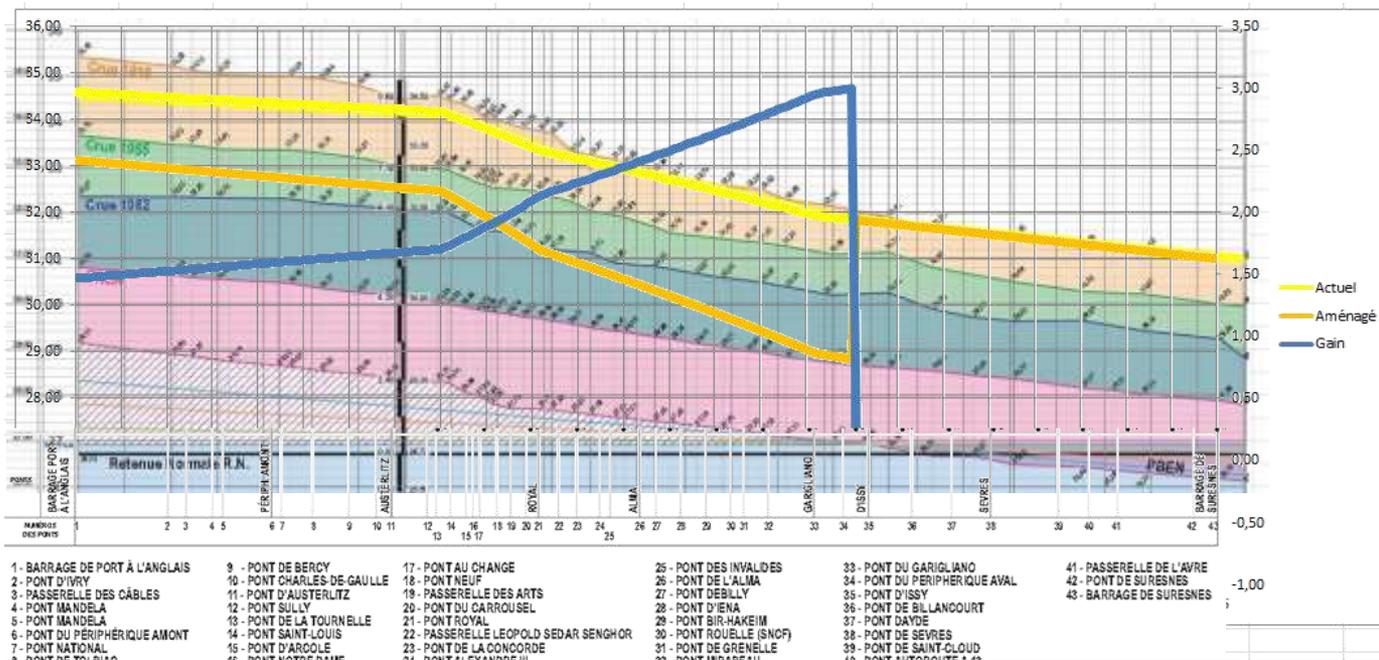


Faisabilité ? 3- Impact hydraulique



Calage d'un modèle
1D sur trois crues de
référence

Faisabilité ? 3- Impact hydraulique



Avec pompage + approfondissement du lit : gain de 1,50 m à 3 m dans Paris

Avec pompage seul : gain de 1,25 m à 2,50 m dans Paris

Faisabilité ? 4 - Coût

- **Station de pompage :**
 - 3000 m³/s sous 3 m : 100 MW (1% de la puissance utilisée en IdF)
 - 100 MW x 2 M€ = 200 M€.
- **Barrage + terrassements : 50 à 100 M€**
- **Réaménagement du parc (dalle, jardins, ...) : 50 M€**
- **Approfondissement du lit, dragage 1 Mm³ : 50 M€, y compris sécurisation des piles de pont.**

TOTAL : 400 M€

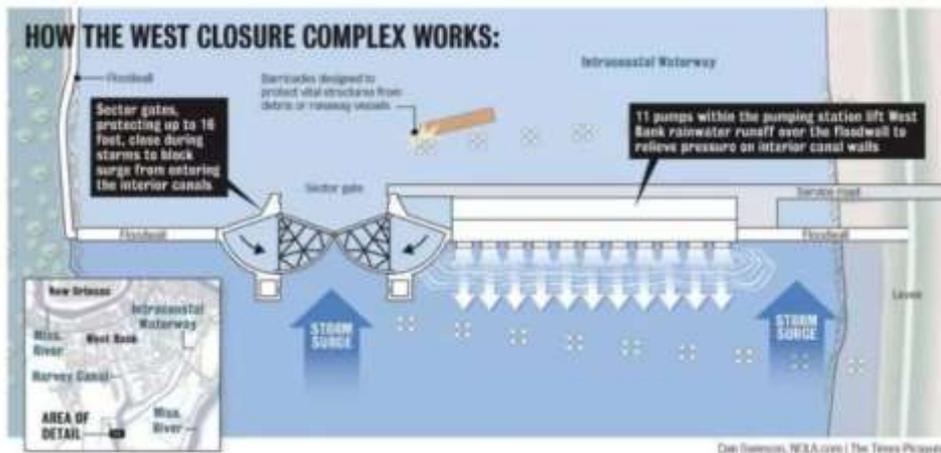
Faisabilité ? 5 – Fonctionnement

- **Fiabilité de fonctionnement :**
 - Sécuration de la conduite en crue : pas plus difficile que pour les barrages en crue
 - Sécuration de l'alimentation électrique réseau à assurer,
- **Corps flottants : une des difficultés du projet**
 - Dispositif de « dégrillage » au barrage, pendant la crue
 - Sécuration amont pour les bateaux à la dérive
- **Quelques retours d'expérience : ici à York (UK), 50 m³/s - 1986**



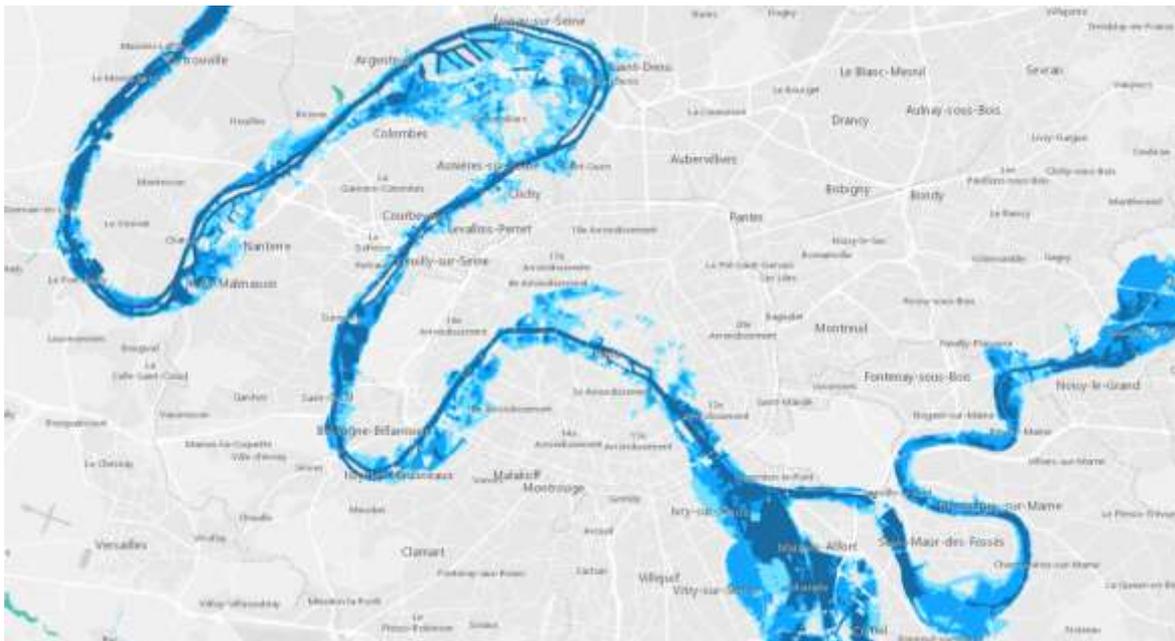
Faisabilité ? 6 – Retours d'expérience

- REX Amsterdam : station Ijmuiden (200 m³/s en 2010), Afsluitdijk (500 m³/s, extension en cours) ; projet Afsluitdijk 2 (1500 m³/s)
- Singapour (Marina barrage), 240 m³/s
- Nouvelle Orléans : 11*3,75 MW pour 70 m de large, 550 m³/s,
- Rance : 24 pompes, chacune à plus de 100 m³/s sous 3 m de charge



Faisabilité ? 7 – Ile de France

- Une station de pompage peut être efficace sur 15-20 km. La station d'Issy est efficace sur Paris (12 km) et quelques km du Val de Marne.
- Plusieurs sites sont envisageables pour une station de pompage en aval sur la Seine à Nanterre : l'impact concerne les Hauts-de-Seine, la Seine-Saint-Denis et le Val d'Oise. Le coût serait de 300 à 400 M€.
- Moins de sites en amont, mais possibilité de prolonger le gain obtenu à Issy par un approfondissement de la Seine sur 20 ou 30 km.



Faisabilité ? 8 – Optimisations

- **Le fonctionnement optimal, à l'échelle du bassin versant, combine :**
 - Le pompage, pour évacuer de grands volumes, avec éventuellement deux ou trois stations en série
 - Le stockage amont dans les retenues de Seine Grands Lacs pour écrêter la pointe.
- **Par rapport aux retenues seules ou au pompage seul, ce fonctionnement optimal permet de :**
 - Diminuer les puissances des station de pompage.
 - Conserver de l'efficacité pour des crues plus longues, ou des crues plus fortes

Où utiliser le pompage des crues dans le monde ?

- Les zones d'application du pompage sont différentes des zones où on peut réduire les inondations par des barrages.
 - Barrages : plutôt pour pentes de rivière supérieures à 1 m par km
 - Pompage : plutôt pour faibles pentes, inférieures à 20 ou 30 cm par km.
- Une autre condition est nécessaire : des dommages très importants à éviter, ce qui correspond à des zones riches et peuplées.
- Paris réunit ces deux conditions. D'autres grands sites sont probablement déjà rentables, notamment en Europe du Nord. Le changement climatique peut favoriser beaucoup cette solution au milieu du siècle.
- Des débits très importants sont envisageables, supérieurs au débit à Paris.

Sites d'estuaires

- Beaucoup de grandes villes sont situées près de la mer sur des rivières importantes à faible pente.
- L'association des marées, de la montée générale des océans, et des épisodes climatiques exceptionnels, est une cause d'inondations dans des régions très peuplées. Elle s'accroît avec le changement climatique.
- La solution de pompage des crues par un barrage d'estuaire est très efficace, par exemple pour une ville comme Bangkok. Plusieurs villes sont d'ailleurs déjà équipées :
 - Amsterdam, avec projet d'extension,
 - La Nouvelle Orléans, travaux récents
 - Singapour



Sites de deltas

- De très grands fleuves, en particulier en Asie, créent des deltas de très grande surface.
- Pour un delta comme celui du Gange ou du Mékong, le bras principal pourrait être conservé inchangé pour l'essentiel de la crue de dizaine de milliers de m³/s mais les autres bras pourraient être barrés et maintenus en eau douce au niveau optimum.
- Leur utilisation, qui sera réduite par la montée des océans, pourrait être augmentée sur des dizaines de milliers de km² pour une centaine de millions d'habitants.

CONCLUSION

- Les barrages réduisent les inondations des rivières à pente importante.
- Le pompage des crues extrêmes s'applique aux rivières de faible pente ; il utilise des techniques éprouvées ; son efficacité est améliorée par un approfondissement du lit de la rivière.
- Dans les estuaires, l'intérêt de la solution s'accroît avec le changement climatique.