



# Identification de l'efficacité de mesures de réduction des niveaux de crue dans le Rhin

Mise en œuvre du  
Plan d'Action contre les Inondations 1995 - 2010  
et prévisions pour 2020 et 2020+

Internationale  
Kommission zum  
Schutz des Rheins

Commission  
Internationale  
pour la Protection  
du Rhin

Internationale  
Commissie ter  
Bescherming  
van de Rijn

Rapport n° 199



## Groupe d'experts HVAL

Dr. G. Brahmer	Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Hesse
Dr. M. Bremicker	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz, Bade-Wurtemberg
M. Brinkmann	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz, Rhénanie-du-Nord - Westphalie
H. Buiteveld	Ministerie van Infrastructuur en Milieu - Rijkswaterstaat – Waterdienst, Pays-Bas
N. Busch	Bundesanstalt für Gewässerkunde, Allemagne
R. Creusot	Direction Régionale de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement d'Alsace, France
R. Diezig	Office fédéral de l'environnement, Suisse
F. Fever	Service de la Navigation de Strasbourg, France
R. Frieze	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz, Bade-Wurtemberg
M. Hammer	Bundesanstalt für Gewässerkunde, Allemagne
Dr. R. Lammersen	Ministerie van Infrastructuur en Milieu - Rijkswaterstaat – Waterdienst, Pays-Bas
B. Mehlig	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Rhénanie-du-Nord - Westphalie
Dr. A. Meuser (président)	Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht, Rhénanie-Palatinat
B. Plonka	Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht, Rhénanie-Palatinat
A. Schmid-Breton	Secrétariat de la CIPR
Dr. A. Schulte-Wülwer-Leidig	Secrétariat de la CIPR
R. Vogt	Stadtentwässerungsbetriebe, Cologne
Dr. A. Vogelbacher	Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Bavière
J-P. Wagner	Direction Régionale de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement de Lorraine, France
Dr. Marlene Willkomm	Stadtentwässerungsbetriebe, Cologne

### **Editeur:**

Commission Internationale pour la Protection du Rhin (CIPR)  
Kaiserin-Augusta-Anlagen 15, D 56068 Coblenz  
Postfach 20 02 53, D 56002 Coblenz  
Téléphone +49-(0)261-94252-0, téléfax +49-(0)261-94252-52  
Courrier électronique: sekretariat@iksr.de  
www.iksr.org

ISBN 3-941994-19-0978-3-941994-19-5

© IKS-R-CIPR-ICBR 2012

## **Sommaire**

### **Abréviations et symboles utilisés**

### **Synthèse**

### **Glossaire**

- 1. Introduction et exposé des tâches**
- 2. Genèse des crues dans le bassin du Rhin**
- 3. Démarche suivie**
- 4. Modèles, états d'aménagement et échelles de référence**
  - 4.1 Modèles**
  - 4.2 Etats d'aménagement et règlements de manœuvre considérés**
    - 4.2.1 Etats d'aménagement**
    - 4.2.2 Mesures et objectifs de prévention des inondations, règlements de manœuvre**
  - 4.3 Echelles de référence et tronçons d'évaluation**
- 5. Crues utilisées et crues modélisées**
  - 5.1 Crues historiques sélectionnées et données d'entrée**
  - 5.2 Crues modélisées**
- 6. Analyse de la réduction des crues sans prise en compte de submersions de digues**
  - 6.1 Evaluation du tronçon du Rhin Maxau – Worms à l'état de référence 1977**
  - 6.2 Evaluation du tronçon Rhin supérieur (Maxau) – delta du Rhin (Lobith) à l'état de référence 1995**
- 7. Analyse des calculs de réduction des crues avec prise en compte de submersions de digues**
  - 7.1 Méthode et bases de calcul**
    - 7.1.1 Localisation des surfaces inondables prises en compte et volumes du Rhin supérieur**
    - 7.1.2 Modélisation du Rhin supérieur**
    - 7.1.3 Emplacement, volumes et modélisation des surfaces inondables sur le Rhin inférieur**
  - 7.2 Résultats des calculs de réduction des crues avec prise en compte de submersions de digues**

## **Bibliographie**

## **Annexes**

## Abréviations et symboles utilisés

BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BW	Bade-Wurtemberg
CIPR	Commission Internationale pour la Protection du Rhin
CHR	Commission internationale de l'Hydrologie du bassin du Rhin
F	France
HLUG	Office de l'environnement et de la géologie du Land de Hesse
HQ	Débit de crue [ $m^3/s$ ]
HQ <sub>T</sub>	Débit de pointe une fois atteint ou dépassé dans un intervalle de temps de T années sur une série prolongée d'années consécutives
HIRI	Groupe d'experts de la CIPR chargé d'élaborer une méthode d' « Identification de la réduction des risques de dommages »
HKV	Bureau d'études néerlandais de la gestion des eaux et de l'hydrologie
HSG	Groupe d'études des crues pour le tronçon rhénan compris entre Kaub et Rolandswerth
HSK	Commission d'études des crues du Rhin
HVAL	Groupe d'experts de la CIPR : « Validation des calculs sur les instruments d'identification de l'efficacité des mesures de réduction des niveaux de crue extrêmes »
HW	Episode de crue
LANUV	Office de la nature, de l'environnement et de la protection des consommateurs du Land de Rhénanie-du-Nord-Westphalie
LUA	Office de l'environnement du Land de Rhénanie-du-Nord-Westphalie
LUBW	Office de l'environnement, des mesures et de la protection de la nature du Land de Bade-Wurtemberg (anciennement LfU : Office de la protection de l'environnement du Land de Bade-Wurtemberg)
LUWG	Office de l'environnement, de la gestion des eaux et de l'inspection du travail du Land de Rhénanie-Palatinat (anciennement LfW : Office de la gestion des eaux du Land de Rhénanie-Palatinat)
NAXOS	Nom du modèle conceptionnel de transformation pluies-débits mis au point par l'institut Leichtweiß de l'Université de Braunschweig et utilisé pour les mesures prises dans le bassin de la Lahn
NL	Pays-Bas
NRW	Rhénanie-du-Nord-Westphalie
PAI	Plan d'Action contre les Inondations
RP	Rhénanie-Palatinat
RWS-RIZA	Rijkswaterstaat Office national de la gestion intégrale des eaux intérieures et d'épuration des eaux usées
RWS-WD	Rijkswaterstaat - Waterdienst
SOBEK	Nom du modèle de propagation d'ondes de crue appliqué au tronçon compris entre Worms et l'embouchure du Rhin
SYNHP	Nom du modèle de propagation d'ondes de crue appliqué au tronçon compris entre Bâle et Worms
Q	Débit [ $m^3/s$ ]
T	Période de retour (récurrence)
W	Niveau d'eau [cm, m + NN]
Z	Situation actuelle

## Synthèse

Le Plan d'Action contre les Inondations pour le Rhin (PAI) présenté par la Commission Internationale pour la Protection du Rhin (CIPR) a été adopté le 22 janvier 1998 à Rotterdam en 12<sup>ème</sup> Conférence ministérielle sur le Rhin (CIPR, 1998). Le PAI contribue à l'atteinte des objectifs visant à améliorer l'état de protection contre les inondations du Rhin en aval d'Iffezheim. La « réduction des niveaux de crue » jusqu'à 70 cm revendiquée dans le 2<sup>ème</sup> objectif opérationnel du PAI, qu'il convient d'obtenir par le biais de mesures de redynamisation des zones inondables et de dispositifs techniques de rétention sur le Rhin (jusqu'à 60 cm) et dans son bassin (env. 10 cm), et le bilan des impacts de ces mesures en 2010, sont les sujets traités dans le présent rapport.

L'identification 2005 s'est uniquement fondée sur quelques crues modélisées. L'identification 2010 a intégré au total dans la modélisation 18 crues historiques qui ont été amplifiées jusqu'à un niveau extrême et à partir desquelles ont pu être générées (artificiellement) 108 crues modélisées synthétiques. A la différence de l'identification 2005, on a utilisé des facteurs uniformes pour l'ensemble du bassin. Cette méthode permet de conserver les particularités régionales des genèses des crues historiques.

L'évaluation de la réduction **le long du Rhin** est effectuée au niveau de points donnés (échelles) et de tronçons fluviaux. Sur le Rhin supérieur et le Rhin moyen, les échelles sélectionnées sont représentatives des tronçons fluviaux correspondants. En revanche, l'évaluation des modifications de niveau d'eau sur le Rhin inférieur et son delta suit une approche par tronçon.

Dans la définition des objectifs du PAI, on est en outre parti de l'hypothèse d'un faible impact de mesures de réduction des niveau d'eau **dans le bassin** de l'ordre d'env. **10 cm**. Des analyses plus poussées, mises en retrait par manque de temps, restent à effectuer dans ce volet. On propose donc de reprendre les déclarations correspondantes figurant dans le rapport CIPR n°153 (2006).

Les échelles de Maxau, Worms, Mayence, Kaub, Andernach, Cologne et Lobith sont les échelles déterminantes pour l'évaluation des modifications des débits de pointe et de niveau d'eau. Pour le Rhin supérieur et le Rhin moyen, les modifications de niveau d'eau rassemblées dans les tableaux suivants font référence aux échelles correspondantes (tableaux 1 à 5). Pour le Rhin inférieur et le delta du Rhin, les modifications de niveau d'eau sont respectivement indiquées sous forme de moyennes rapportées à des tronçons (tableaux 6 à 10). Les tableaux 1 à 10 présentent les modifications de niveau d'eau, rapportées à l'état 1995 pour chacun des états d'aménagement analysés. Ces modifications sont respectivement subdivisées en trois niveaux de probabilité d'occurrence de crue. En règle générale, les indications sur les probabilités de crue sont rapportées à l'état d'aménagement 1977 (= fin de la régulation du Rhin supérieur).

Les calculs de modélisation reposent donc sur un ensemble de 108 crues modélisées. Ces crues englobent différentes formes d'onde et de genèse et illustrent ainsi une large palette d'effets susceptibles d'être obtenus au travers des mesures de protection contre les inondations.

Il convient ici de noter que deux variantes ont été calculées notamment pour le niveau de la crue extrême à l'état de référence 1995 ainsi qu'aux états d'aménagement 2010 et 2020 : une valeur théorique que l'on obtiendrait s'il n'y avait pas de submersions de digues même en situation de crue extrême et une valeur (plus réaliste) tenant compte de submersions de digues en cas de crue extrême.

Les résultats présentés tiennent compte des progrès accomplis en matière de protection technique contre les inondations, des améliorations apportées aux outils de modélisation, du cadre élargi de l'approche d'identification et des évolutions survenues au niveau du

contrôle et de l'extension des bases de données. Les différences numériques constatées par rapport aux analyses antérieures résultent de ces faits.

Parallèlement, des écarts sont également possibles entre les résultats communiqués dans le présent rapport et les calculs officiels établis par la « Commission permanente pour l'aménagement du Rhin supérieur » ainsi que ceux effectués dans le cadre du programme néerlandais « Espace pour le fleuve », car les dispositions à la base des calculs de modélisation sont différentes de part et d'autre. Il n'est donc pas admissible, sous l'angle scientifique, de transposer directement les résultats de calcul présentés dans le présent bilan aux analyses d'efficacité d'autres institutions.

Les tableaux ci-dessous présentent, pour les **états d'aménagement 2005, 2010, 2020 et ultérieur à 2020 (= 2020+)**, les **modifications minimales, moyennes et maximales de niveau d'eau** obtenues par calcul et rapportées à différentes **échelles ou tronçons du Rhin**, que les mesures de rétention sont susceptibles d'occasionner. Les **valeurs moyennes** surlignées en gras sont les indications les plus informatives.

Maxau	Modifications minimales, moyennes et maximales des niveaux d'eau [cm] des états d'aménagement analysés par rapport à l'état 1995											
	pour un HQ <sub>10</sub>			pour un HQ <sub>100</sub>			Pour un HQ <sub>extrême</sub>					
	Mini- mum	<b>Moy- enne</b>	Maxi- mum	Mini- mum	<b>Moy- enne</b>	Maxi- mum	sans submersion de digues			avec submersion de digues		
							Mini- mum	<b>Moy- enne</b>	Maxi- mum	Mini- mum	<b>Moy- enne</b>	Maxi- mum
Δ W 2005	0	<b>-3</b>	-13	3	<b>-6</b>	-12	3	<b>-3</b>	-10	-	-	-
Δ W 2010	0	<b>-3</b>	-13	3	<b>-6</b>	-12	3	<b>-3</b>	-10	1	<b>-2</b>	-4
Δ W 2020	2	<b>-3</b>	-14	0	<b>-10</b>	-18	3	<b>-6</b>	-16	2	<b>-3</b>	-7
ΔW 2020+	0	<b>-5</b>	-17	-10	<b>-18</b>	-26	-4	<b>-14</b>	-27	-	-	-

*Valeurs minimales et valeurs maximales évaluées pour le percentile 10 et le percentile 90, pour autant que l'on ait plus de 10 valeurs dans la classe.*

Tab. 1: Modifications des niveaux d'eau (réduction : valeur négative) pour les états d'aménagement analysés à l'échelle de Maxau ; chiffres rapportés à l'état 1995 (état de référence CIPR).

Worms	Modifications minimales, moyennes et maximales des niveaux d'eau [cm] des états d'aménagement analysés par rapport à l'état 1995											
	pour un HQ <sub>10</sub>			pour un HQ <sub>100</sub>			Pour un HQ <sub>extrême</sub>					
	Mini- mum	Moy- enne	Maxi- mum	Mini- mum	Moy- enne	Maxi- mum	sans submersion de digues			avec submersion de digues		
							Mini- mum	Moy- enne	Maxi- mum	Mini- mum	Moy- enne	Maxi- mum
Δ W 2005	0	<b>-3</b>	-11	-4	<b>-10</b>	-15	1	<b>-9</b>	-18	-	-	-
Δ W 2010	0	<b>-3</b>	-11	-5	<b>-10</b>	-16	0	<b>-9</b>	-18	0	<b>-5</b>	-12
Δ W 2020	1	<b>-7</b>	-18	-15	<b>-23</b>	-32	-4	<b>-21</b>	-36	-4	<b>-15</b>	-31
Δ W 2020+	-1	<b>-9</b>	-25	-18	<b>-31</b>	-43	-17	<b>-36</b>	-54	-	-	-

*Valeurs minimales et valeurs maximales évaluées pour le percentile 10 et le percentile 90, pour autant que l'on ait plus de 10 valeurs dans la classe.*

Tab. 2: Modifications des niveaux d'eau (réduction : valeur négative) pour les états d'aménagement analysés à l'échelle de Worms ; chiffres rapportés à l'état 1995 (état de référence CIPR).

Mayence	Modifications minimales, moyennes et maximales des niveaux d'eau [cm] des états d'aménagement analysés par rapport à l'état 1995											
	pour un HQ <sub>10</sub>			pour un HQ <sub>100</sub>			Pour un HQ <sub>extrême</sub>					
	Mini- mum	Moy- enne	Maxi- mum	Mini- mum	Moy- enne	Maxi- mum	sans submersion de digues			avec submersion de digues		
							Mini- mum	Moy- enne	Maxi- mum	Mini- mum	Moy- enne	Maxi- mum
Δ W 2005	-5	<b>-10</b>	-20	-6	<b>-11</b>	-15	-4	<b>-6</b>	-8	-	-	-
Δ W 2010	-5	<b>-11</b>	-21	-7	<b>-13</b>	-18	-4	<b>-6</b>	-8	-2	<b>-4</b>	-7
Δ W 2020	-5	<b>-16</b>	-30	-10	<b>-22</b>	-32	-7	<b>-11</b>	-15	-2	<b>-7</b>	-10
Δ W 2020+	-6	<b>-19</b>	-36	-13	<b>-36</b>	-54	-13	<b>-24</b>	-33	-	-	-

*Valeurs minimales et valeurs maximales évaluées pour le percentile 10 et le percentile 90, pour autant que l'on ait plus de 10 valeurs dans la classe.*

Tab. 3: Modifications des niveaux d'eau (réduction : valeur négative) pour les états d'aménagement analysés à l'échelle de Mayence ; chiffres rapportés à l'état 1995 (état de référence CIPR).

Kaub	Modifications minimales, moyennes et maximales des niveaux d'eau [cm] des états d'aménagement analysés par rapport à l'état 1995											
	pour un HQ <sub>10</sub>			pour un HQ <sub>100</sub>			Pour un HQ <sub>extrême</sub>					
	Mini- mum	Moy- enne	Maxi- mum	Mini- mum	Moy- enne	Maxi- mum	sans submersion de digues			avec submersion de digues		
							Mini- mum	Moy- enne	Maxi- mum	Mini- mum	Moy- enne	Maxi- mum
Δ W 2005	-6	<b>-12</b>	-24	-9	<b>-16</b>	-21	-9	<b>-15</b>	-23	-	-	-
Δ W 2010	-6	<b>-14</b>	-24	-11	<b>-19</b>	-25	-10	<b>-17</b>	-24	-4	<b>-13</b>	-22
Δ W 2020	-6	<b>-19</b>	-37	-17	<b>-29</b>	-42	-14	<b>-27</b>	-40	-4	<b>-21</b>	-32
Δ W 2020+	-6	<b>-23</b>	-44	-18	<b>-46</b>	-71	-25	<b>-41</b>	-63	-	-	-

*Valeurs minimales et valeurs maximales évaluées pour le percentile 10 et le percentile 90, pour autant que l'on ait plus de 10 valeurs dans la classe.*

Tab. 4: Modifications des niveaux d'eau (réduction : valeur négative) pour les états d'aménagement analysés à l'échelle de Kaub ; chiffres rapportés à l'état 1995 (état de référence CIPR).

Andernach	Modifications minimales, moyennes et maximales des niveaux d'eau [cm] des états d'aménagement analysés par rapport à l'état 1995											
	pour un HQ <sub>10</sub>			pour un HQ <sub>100</sub>			Pour un HQ <sub>extrême</sub>					
	Mini- mum	Moy- enne	Maxi- mum	Mini- mum	Moy- enne	Maxi- mum	sans submersion de digues			avec submersion de digues		
							Mini- mum	Moy- enne	Maxi- mum	Mini- mum	Moy- enne	Maxi- mum
Δ W 2005	0	<b>-6</b>	-15	0	<b>-6</b>	-13	3	<b>-1</b>	-7	-	-	-
Δ W 2010	0	<b>-8</b>	-18	-1	<b>-8</b>	-16	0	<b>-3</b>	-7	-8	<b>-10</b>	-13
Δ W 2020	-1	<b>-13</b>	-29	0	<b>-16</b>	-29	-3	<b>-7</b>	-12	-11	<b>-14</b>	-17
Δ W 2020+	-2	<b>-16</b>	-36	-1	<b>-29</b>	-56	-4	<b>-12</b>	-23	-	-	-

*Valeurs minimales et valeurs maximales évaluées pour le percentile 10 et le percentile 90, pour autant que l'on ait plus de 10 valeurs dans la classe.*

Tab. 5: Modifications des niveaux d'eau (réduction : valeur négative) pour les états d'aménagement analysés à l'échelle d'Andernach ; chiffres rapportés à l'état 1995 (état de référence CIPR).

Tronçon fluvial compris entre la Sieg et le débouché de la Ruhr	Modifications minimales, moyennes et maximales des niveaux d'eau [cm] des états d'aménagement analysés par rapport à l'état 1995											
	pour un HQ <sub>10</sub>			pour un HQ <sub>100</sub>			Pour un HQ <sub>extrême</sub>					
	Minimum	Moyenne	Maximum	Minimum	Moyenne	Maximum	sans submersion de digues			avec submersion de digues		
							Minimum	Moyenne	Maximum	Minimum	Moyenne	Maximum
Δ W 2005	5	1	-5	8	2	-10	5	0	-3	-	-	-
Δ W 2010	5	-1	-7	8	0	-10	5	-1	-8	4	1	-1
Δ W 2020	5	-7	-18	7	-4	-21	4	-7	-19	-1	-4	-6
Δ W 2020+	5	-12	-30	6	-7	-28	3	-12	-34	-	-	-

*Valeurs minimales et valeurs maximales évaluées pour le percentile 10 et le percentile 90, pour autant que l'on ait plus de 10 valeurs dans la classe.*

Tab. 6: Modifications des niveaux d'eau (réduction : valeur négative) pour les états d'aménagement analysés pour le tronçon fluvial compris entre la Sieg et le débouché de la Ruhr ; chiffres rapportés à l'état 1995 (état de référence CIPR).

Tronçon fluvial compris entre le débouché de la Ruhr et Pannerdensche Kop	Modifications minimales, moyennes et maximales des niveaux d'eau [cm] des états d'aménagement analysés par rapport à l'état 1995											
	pour un HQ <sub>10</sub>			pour un HQ <sub>100</sub>			Pour un HQ <sub>extrême</sub>					
	Minimum	Moyenne	Maximum	Minimum	Moyenne	Maximum	sans submersion de digues			avec submersion de digues		
							Minimum	Moyenne	Maximum	Minimum	Moyenne	Maximum
Δ W 2005	2	-2	-7	4	1	-2	3	2	-1	-	-	-
Δ W 2010	2	-2	-8	6	1	-4	4	3	0	6	3	-1
Δ W 2020	-3	-11	-22	-4	-14	-25	-21	-27	-31	-9	-17	-23
Δ W 2020+	-4	-13	-27	-4	-19	-32	-22	-33	-40	-	-	-

*Valeurs minimales et valeurs maximales évaluées pour le percentile 10 et le percentile 90, pour autant que l'on ait plus de 10 valeurs dans la classe.*

Tab. 7: Modifications des niveaux d'eau (réduction : valeur négative) pour les états d'aménagement analysés pour le tronçon fluvial compris entre le débouché de la Ruhr et Pannerdensche Kop ; chiffres rapportés à l'état 1995 (état de référence CIPR).

Cours d'eau Nederrijn/Lek	Modifications minimales, moyennes et maximales des niveaux d'eau [cm] des états d'aménagement analysés par rapport à l'état 1995											
	pour un HQ <sub>10</sub>			pour un HQ <sub>100</sub>			Pour un HQ <sub>extrême</sub>					
	Minimum	Moyenne	Maximum	Minimum	Moyenne	Maximum	sans submersion de digues			avec submersion de digues		
							Minimum	Moyenne	Maximum	Minimum	Moyenne	Maximum
Δ W 2005	0	-1	-4	0	-1	-3	0	-1	-3	-	-	-
Δ W 2010	0	-2	-5	-1	-3	-5	-1	-2	-3	0	-2	-5
Δ W 2020	-5	-11	-17	-4	-10	-17	-8	-15	-26	-6	-9	-16
Δ W 2020+	-5	-12	-20	-4	-11	-20	-9	-20	-32	-	-	-

*Valeurs minimales et valeurs maximales évaluées pour le percentile 10 et le percentile 90, pour autant que l'on ait plus de 10 valeurs dans la classe.*

Tab. 8: Modifications des niveaux d'eau (réduction : valeur négative) pour les états d'aménagement analysés pour le Nederrijn/Lek ; chiffres rapportés à l'état 1995 (état de référence CIPR).

Waal	Modifications minimales, moyennes et maximales des niveaux d'eau [cm] des états d'aménagement analysés par rapport à l'état 1995											
	pour un HQ <sub>10</sub>			pour un HQ <sub>100</sub>			Pour un HQ <sub>extrême</sub>					
	Minimum	Moyenne	Maximum	Minimum	Moyenne	Maximum	sans submersion de digues			avec submersion de digues		
							Minimum	Moyenne	Maximum	Minimum	Moyenne	Maximum
Δ W 2005	0	-2	-5	0	-3	-5	-1	-2	-4	-	-	-
Δ W 2010	-1	-3	-6	-2	-5	-8	-3	-5	-6	0	-2	-7
Δ W 2020	-9	-17	-31	-11	-19	-24	-21	-25	-29	-12	-19	-26
Δ W 2020+	-9	-18	-32	-11	-23	-33	-26	-32	-41	-	-	-

*Valeurs minimales et valeurs maximales évaluées pour le percentile 10 et le percentile 90, pour autant que l'on ait plus de 10 valeurs dans la classe.*

Tab. 9: Modifications des niveaux d'eau (réduction : valeur négative) pour les états d'aménagement analysés pour le Waal ; chiffres rapportés à l'état 1995 (état de référence CIPR).

IJssel	Modifications minimales, moyennes et maximales des niveaux d'eau [cm] des états d'aménagement analysés par rapport à l'état 1995											
	pour un HQ <sub>10</sub>			pour un HQ <sub>100</sub>			Pour un HQ <sub>extrême</sub>					
	Mini- mum	Moy- enne	Maxi- mum	Mini- mum	Moy- enne	Maxi- mum	sans submersion de digues			avec submersion de digues		
							Mini- mum	Moy- enne	Maxi- mum	Mini- mum	Moy- enne	Maxi- mum
Δ W 2005	0	-1	-3	0	-2	-4	-1	-2	-4	-	-	-
Δ W 2010	0	-2	-4	-1	-3	-6	-3	-5	-7	-1	-3	-7
Δ W 2020	-32	-38	-42	-39	-45	-56	-44	-52	-60	-41	-46	-53
Δ W 2020+	-32	-39	-45	-39	-46	-59	-46	-58	-73	-	-	-

*Valeurs minimales et valeurs maximales évaluées pour le percentile 10 et le percentile 90, pour autant que l'on ait plus de 10 valeurs dans la classe.*

Tab. 10: Modifications des niveaux d'eau (réduction : valeur négative) pour les états d'aménagement analysés pour l'IJssel ; chiffres rapportés à l'état 1995 (état de référence CIPR).

L'écart des modifications de niveau d'eau est indiqué dans les tableaux 1 à 10. Cependant, ce sont les moyennes qui sont déterminantes pour l'évaluation globale des résultats. Les valeurs minimales et maximales ne reflètent que des cas particuliers rapportés aux crues et tronçons considérés. Afin de limiter les variations aléatoires dans la représentation des résultats, les tableaux indiquent dans chaque cas les percentiles 10 et 90 (pour autant que l'on ait plus de 10 valeurs dans la classe).

Dans l'ordre de grandeur de HQ<sub>extrême</sub>, on tiendra compte par ailleurs du fait que des submersions éventuelles de digues affaiblissent généralement l'impact des mesures de rétention.

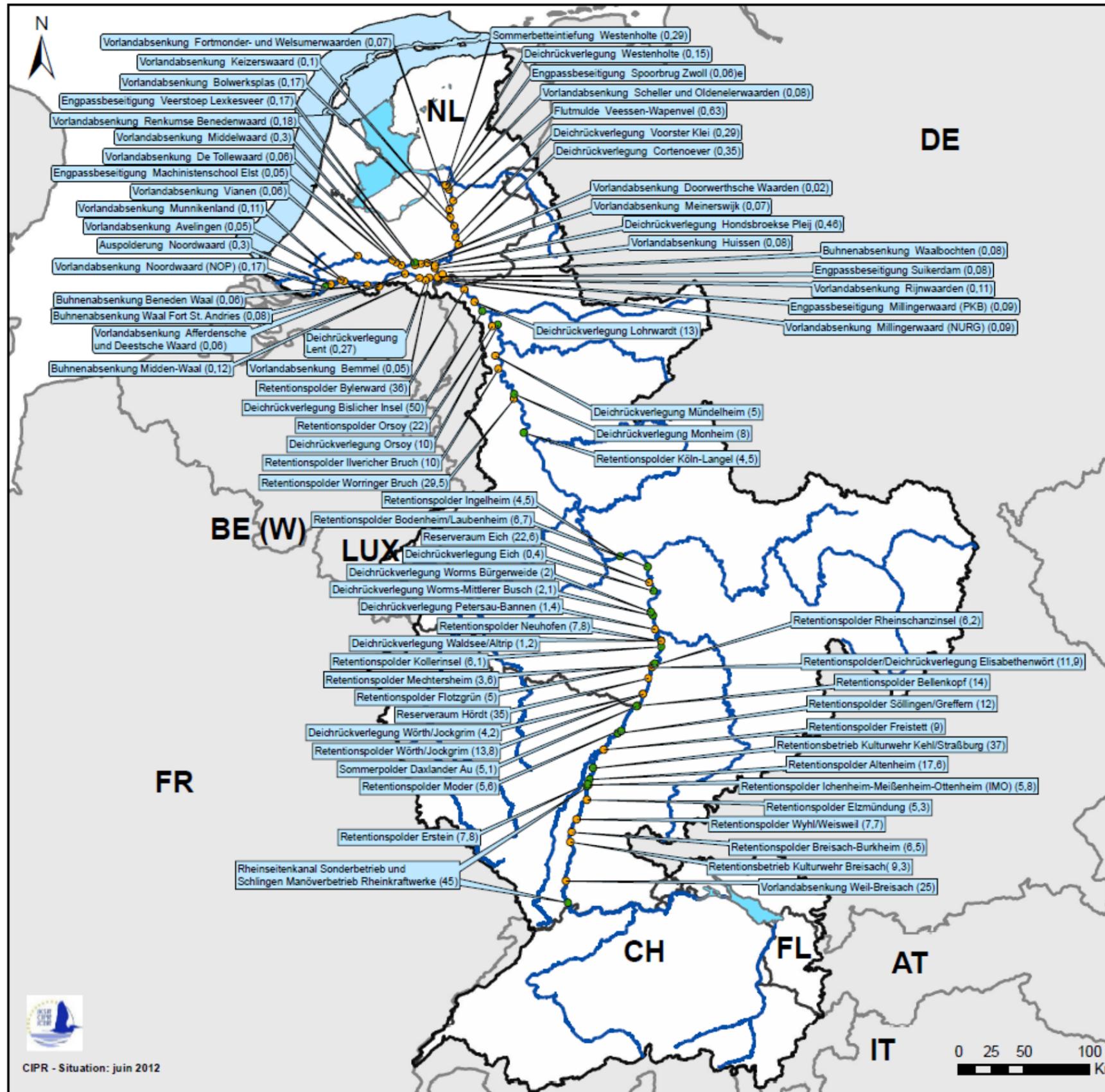
L'étude ne vise pas à déterminer l'impact de submersions de digues mais plutôt à estimer l'effet de ces submersions sur l'efficacité des mesures de rétention.

Les analyses des impacts des mesures sur le Rhin entre Bâle et la mer du Nord se fondent sur les résultats de calculs pour les états d'aménagement suivants (voir mesures correspondantes sur la carte page 11 et dans les tableaux 11 et 12) :

- **Etat d'aménagement 1977** (= date d'achèvement des travaux du dernier barrage construit sur le Rhin supérieur, celui d'Iffezheim au PK Rhin 334) et avant la construction et la mise en service de mesures de rétention sur le Rhin supérieur. L'état 1977 permet de tirer des enseignements sur les crues du Rhin supérieur sans l'impact de mesures de rétention<sup>1</sup>.
- **Etat d'aménagement 1995** (état de référence du Plan d'Action contre les Inondations de la CIPR). 160 millions de m<sup>3</sup> de volume de rétention étaient opérationnels sur le cours principal du Rhin à l'état 1995.

<sup>1</sup> Avant même l'adoption du PAI en 1998, il existait déjà des accords de construction de plusieurs espaces de rétention fondés sur la Convention franco-allemande de 1969 et prévoyant le rétablissement du niveau de protection des crues qui existait avant l'aménagement jusqu'en 1977 du Rhin supérieur. S'il n'avait pas été fixé 1995 comme année de référence dans le Plan d'Action contre les Inondations, il serait possible d'ajouter à l'évaluation actuelle de l'impact des mesures mises en œuvre jusqu'en 2010 celui des mesures réalisées sur le Rhin supérieur entre 1977 et 1995 sous forme d'ouvrages de rétention manœuvrables pour un volume total d'env. 105 millions de m<sup>3</sup>.

- **Etat d'aménagement 2005** (date d'évaluation du Plan d'Action contre les Inondations de la CIPR par rapport à 1995). Environ 211 millions de m<sup>3</sup> au total de volume de rétention étaient opérationnels sur le cours principal du Rhin à l'état 2005.
- **Etat d'aménagement 2010** (date d'évaluation CIPR par rapport à 1995). 229 millions de m<sup>3</sup> de volume de rétention au total étaient opérationnels sur le cours principal du Rhin à l'état 2010.
- **Etat d'aménagement 2020** (état pronostiqué CIPR par rapport à 1995). En l'état 2020, 361 millions de m<sup>3</sup> de volume de rétention seront opérationnels sur le cours principal du Rhin d'après la méthode utilisée jusqu'à présent. Viennent s'y ajouter d'autres mesures visant à réduire les niveaux d'eau dans les bras du Rhin en aval de Lobith.
- **Etat d'aménagement 2020+** (état pronostiqué CIPR par rapport à 1995). L'état 2020+ comprend toutes les mesures de rétention prévues sur le Rhin supérieur (également celles qui ne pourront probablement être mises en service qu'après 2020), y compris les espaces de réserve du Land de Rhénanie-Palatinat. En l'état 2020+, 535 millions de m<sup>3</sup> de volume de rétention seront probablement opérationnels. Viennent s'y ajouter d'autres mesures visant à réduire les niveaux d'eau dans les bras du Rhin en aval de Lobith.



### Mesures de rétention sur le cours principal du Rhin

#### Etat de mise en œuvre des mesures

- Réalisé
- En construction/Planifié

#### Eaux

- Cours d'eau
- Eaux côtières et eaux de transition

#### Remarques concernant les données chiffrées

Concernant les mesures d'abaissement des niveaux d'eau situées dans le Delta du Rhin à partir de Lobith: Réduction des niveaux d'eau en m

Concernant les mesures de rétention entre Bâle et Lobith: volume de rétention en millions de m<sup>3</sup>

*Remarque: les noms français ou néerlandais des mesures sont donnés dans les tableaux ci-joints.*



CIPR - Situation: juin 2012

PK du Rhin	Zone	Etat/Land	Localisation de la mesure	Type de mesure	Volume opérationnel					
					[millions de m <sup>3</sup> ]					
					1977	1995	2005	2010	2020	2020+
174 - 226 234 - 291	Rhin supérieur	F	Grand Canal d'Alsace et festons	Manœuvres exceptionnelles des usines du Rhin		45	45	45	45	45
174,6 - 219		D-BW	Weil-Breisach	Décaissement du lit majeur					2,8 <sup>2)</sup>	25
224,8		D-BW	Breisach	Manœuvres de rétention des barrages agricoles					9,3	9,3
228,4		D-BW	Breisach-Burkheim	Polder de rétention					6,5	6,5
243		D-BW	Wühl-Weisweil	Polder de rétention						7,7
260,5		D-BW	Débouché de l'Elz	Polder de rétention					5,3	5,3
272		D-BW	Ichenheim-Meißenheim -Ottenheim (IMO)	Polder de rétention						5,8
276		F	Erstein	Polder de rétention			7,8	7,8	7,8	7,8
278,4		D-BW	Altenheim	Polder de rétention		17,6	17,6	17,6	17,6	17,6
290,3		D-BW	Kehl/Strasbourg	Manœuvres de rétention des barrages agricoles		37 <sup>1)</sup>	37	37	37	37
302		D-BW	Freistett	Polder de rétention						9
317,4		D-BW	Söllingen/Greffern	Polder de rétention			12	12	12	12
330		F	Moder	Polder de rétention			5,6	5,6	5,6	5,6
354,9		D-BW	Bellenkopf	Polder de rétention						14
357,5		D-RP	Daxlander Au	Polder d'été	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1
368		D-RP	Wörth/Jockgrim	Recul de digues					4,2	4,2
377				Polder de rétention					13,8	13,8
381,3		D-RP	Hördt	Espace de réserve						35
390		D-BW	Elisabethenwört	Polder de rétention / recul de digues						11,9
390,4		D-RP	Mechtersheim	Polder de rétention					3,6	3,6
392,6		D-BW	Ile de Rheinschanz	Polder de rétention					6,2	6,2
409,9		D-RP	Flotzgrün	Polder de rétention			5	5	5	5
411,5		D-RP	Ile de Koller	Polder de rétention			6,1	6,1	6,1	6,1
436		D-RP	Waldsee/Altrip Neuhofen	recul de digues					1,2	1,2
439				Polder de rétention					7,8	7,8
440,2		D-RP	Petersau-Bannen	Recul de digues					1,4	1,4
467,3		D-RP	Worms – Mittlerer Busch	Recul de digues				2,1	2,1	2,1
468,5		D-RP	Worms Bürgerweide	Recul de digues			2	2	2	2
489,9		D-RP	Eich	Recul de digues			0,4	0,4	0,4	0,4
517,3		D-RP	Eich	Espace de réserve						22,6
668,5		D-RP	Bodenheim/Laubenheim	Polder de rétention				6,7	6,7	6,7
705,5		D-RP	Ingelheim	Polder de rétention				4,5	4,5	4,5
707,5		D-NRW	Cologne-Langel	Polder de rétention				4,5	4,5	4,5
750	D-NRW	Worringer Bruch	Polder de rétention					29,5	29,5	
760,5	D-NRW	Monheim	Recul de digues			8	8	8	8	
802	D-NRW	Ilvericher Bruch	Polder de rétention						10	
797,5	D-NRW	Mündelheim	Recul de digues					5	5	
818,5	D-NRW	Orsoy	Recul de digues			10	10	10	10	
832,5	D-NRW	Orsoy	Polder de rétention					22	22	
850	D-NRW	Ile de Bislich	Recul de digues	50 <sup>3)</sup>	50	50	50	50	50	
	D-NRW	Lohnwardt	Recul de digues					13	13	
	D-NRW	Bylerward	Polder de rétention						36	
<b>Somme des volumes de rétention des mesures d'abaissement des niveaux d'eau sur le Rhin par état d'aménagement</b>					<b>55,1</b>	<b>160,3<sup>1)</sup></b>	<b>211,6</b>	<b>229,4</b>	<b>361</b>	<b>535,2</b>

<sup>1)</sup> Barrage agricole de Kehl : volume opérationnel de 13 millions de m<sup>3</sup> en régime régulier jusqu'en 2002 et 24 millions de m<sup>3</sup> supplémentaires opérationnels en cas exceptionnel

<sup>2)</sup> 2,8 millions de m<sup>3</sup> = 1<sup>er</sup> tronçon sur 4 au total. De plus, des parties des tronçons III et IV seront déjà achevées en 2020.

<sup>3)</sup> Daxlander Au et l'île de Bislich étaient déjà des zones inondées par les crues du Rhin avant l'achèvement des mesures de rétention.

Tab. 11: Volumes (en millions de m<sup>3</sup>) des mesures de rétention entre Bâle et Lobith.

PK	Zone	Etat/Land	Localisation de la mesure	Type de mesure	Effet minimal d'abaissement de niveau d'eau attendu <sup>4)</sup> (par mesure) (m)				
					1995	2005	2010	2020	2020+
865	Bovenrijn/Waal/Merweddes	NL	Rijnwaarden	décaissement du lit majeur				0,11	0,11
871		NL	Millingerwaard (PKB)	élimination des obstacles				0,09	0,09
871		NL	Millingerwaard (NURG)	décaissement du lit majeur					
871		NL	Suikerdam	élimination des obstacles				0,08	0,08
878		NL	Bemmel	décaissement du lit majeur				0,05	0,05
882		NL	Lent	recul de digues				0,27	0,27
897		NL	Afferdensche et Deestsche Waard	décaissement du lit majeur				0,06	0,06
867		NL	Méandres du Waal	abaissement d'épis				0,08	0,08
887		NL	Midden-Waal	abaissement d'épis				0,12	0,12
916		NL	Waal à Fort St. Andries	abaissement d'épis				0,08	0,08
934		NL	Beneden Waal	abaissement d'épis				0,06	0,06
948		NL	Munnikenland	décaissement du lit majeur				0,11	0,11
955		NL	Avelingen	décaissement du lit majeur				0,05	0,05
964		NL	Noordwaard	dépoldérisation				0,3	0,3
968		NL	Noordwaard (NOP)	décaissement du lit majeur			0,17	0,17	0,17
871		Pannerdensch Kanaal, Nederrijn, Lek	NL	Huissen	décaissement du lit majeur				0,08
883	NL		Meinerswijk	décaissement du lit majeur				0,07	0,07
893	NL		Doorwerthsche Waarden	décaissement du lit majeur				0,02	0,02
898	NL		Renkumse Benedenwaard	décaissement du lit majeur				0,18	0,18
898	NL		Rampe d'accès au bac de Lexkesveer	élimination des obstacles			0,17		
908	NL		Middelwaard	décaissement du lit majeur				0,03	0,03
911	NL		De Tollewaard	décaissement du lit majeur				0,06	0,06
917	NL		Machinistenschool Elst	élimination des obstacles				0,05	0,05
946	NL		Vianen	décaissement du lit majeur				0,06	0,06
878	IJssel	NL	Hondsbroekse Pleij	recul de digues				0,46	0,46
918		NL	Cortenoever	recul de digues				0,35	0,35
930		NL	Voorster Klei	recul de digues				0,29	0,29
943		NL	Bolwerksplas	décaissement du lit majeur				0,17	0,17
947		NL	Keizerswaard	décaissement du lit majeur				0,1	0,1
957		NL	Fortmonder- et Welsumerwaarden	décaissement du lit majeur				0,06 - 0,08	0,06 - 0,08
961		NL	Veessen-Wapenveld	chenal de dérivation des crues				0,63	0,63
977		NL	Scheller et Oldenelerwaarden	décaissement du lit majeur				0,08	0,08
978		NL	Pont ferroviaire de Zwolle	élimination des obstacles				0,06	0,06
980		NL	Westenholte	recul de digues				0,15	0,15
980		NL	Westenholte	creusement du lit mineur				0,29	0,29

<sup>4)</sup> Ces mesures visent principalement à augmenter la capacité d'écoulement dans le delta du Rhin. Il n'est donc indiqué que l'effet minimal d'abaissement du niveau d'eau par mesure. Ceci explique pourquoi les mesures ne sont pas prises en compte dans le volume total de rétention.  
Des mesures atteignant environ 17 km<sup>2</sup> de surface ont déjà été réalisées en 2005 (voir Bilan PAI 1995-2005). Cette surface a été étendue à 38 km<sup>2</sup> en 2010 grâce à la réalisation de mesures supplémentaires.  
PKB = Planologische Kernbeslissing (directive nationale d'aménagement du territoire)  
NURG = Nadere Uitwerking Rivierengebied (développement de la zone fluviale)  
NOP = Natuurontwikkelingsproject (projet de développement de la nature)

Tab. 12: Mesures de réduction des niveaux d'eau dans le delta du Rhin à partir de Lobith avec effet minimal d'abaissement du niveau d'eau attendu (en m) ; seules sont listées les principales mesures. Le tableau ne rassemble que les mesures réalisées dans le cadre de la décision nationale d'aménagement du territoire « Espace pour le fleuve » (planologische kernbeslissing; 2006)

On trouvera dans le glossaire les explications sur les types de mesures mentionnés dans les tableaux.

## Vue synoptique des résultats

Pour l'**état 2010**, les réductions **moyennes** atteintes par les mesures pour une crue d'un débit de l'ordre de **HQ<sub>100</sub>** sont les suivantes :

- Rhin supérieur 6 à 13 cm (valeur individuelle maximale de 25 cm)
- Rhin moyen 8 à 19 cm (valeur individuelle maximale de 33 cm)
- Rhin inférieur aucune réduction (valeur individuelle maximale de 11 cm)
- Delta du Rhin 3 à 5 cm (valeur individuelle maximale de 8 cm)

Pour l'**état 2010**, les réductions **moyennes** atteintes par les mesures pour une crue d'un débit de l'ordre de **HQ<sub>extrême</sub>** (compte tenu de submersions de digues) sont les suivantes :

- Rhin supérieur 2 à 5 cm (valeur individuelle maximale de 14 cm)
- Rhin moyen 10 à 13 cm (valeur individuelle maximale de 22 cm)
- Rhin inférieur aucune réduction (valeur individuelle maximale de 6 cm)
- Delta du Rhin 2 à 3 cm (valeur individuelle maximale de 7 cm)

Pour l'**état 2020**, les réductions **moyennes** atteintes par les mesures pour une crue d'un débit de l'ordre de **HQ<sub>100</sub>** sont les suivantes :

- Rhin supérieur 10 à 23 cm (valeur individuelle maximale de 44 cm)
- Rhin moyen 16 à 29 cm (valeur individuelle maximale de 50 cm)
- Rhin inférieur 4 à 14 cm (valeur individuelle maximale de 25 cm)
- Delta du Rhin 10 à 45 cm (valeur individuelle maximale de 57 cm)

Pour l'**état 2020**, les réductions **moyennes** atteintes par les mesures pour une crue d'un débit de l'ordre de **HQ<sub>extrême</sub>** (compte tenu de submersions de digues) sont les suivantes :

- Rhin supérieur 3 à 15 cm (valeur individuelle maximale de 31 cm)
- Rhin moyen 14 à 21 cm (valeur individuelle maximale de 32 cm)
- Rhin inférieur 4 à 17 cm (valeur individuelle maximale de 29 cm)
- Delta du Rhin 9 à 46 cm (valeur individuelle maximale de 56 cm)

A propos du 2<sup>ème</sup> objectif opérationnel de la CIPR (réduction des niveaux de crue jusqu'à 70 cm, à savoir 60 cm env. par rétention d'eau sur le Rhin et 10 cm env. par rétention d'eau dans le bassin du Rhin), on retient les résultats suivants :

- qu'à la lumière des nouvelles connaissances relatives à la valeur maximale, l'ancien objectif de réduction du niveau d'eau jusqu'à 60 cm au moyen de mesures prises sur le cours principal était particulièrement ambitieux ;
- que l'objectif maximal de 60 cm ne peut être atteint que ponctuellement et uniquement pour quelques crues, même si l'on tient compte de toutes les mesures envisagées aujourd'hui (conformément à l'état modélisé pour 2020plus) ;
- qu'il ressort des analyses disponibles que la réduction de 60 cm du niveau d'eau ne peut être fiablement atteinte que si sont mis en place d'autres espaces de rétention ou prises des mesures améliorant le débit - pour autant que ceci n'augmente pas le risque auquel sont exposés les riverains en aval.

La présente étude est la première à avoir modélisé dans son ensemble le cours principal du Rhin et ses dispositifs de rétention pour un grand nombre de crues. Pour la première fois également, les résultats obtenus permettent d'évaluer de manière fondée l'ordre de grandeur dans lequel les objectifs exprimés dans le Plan d'Action contre les Inondations ont été atteints.

### **Indications complémentaires**

En tenant compte de l'impact de toutes les mesures de rétention des crues réalisées entre 1977 et 2010, on obtient des réductions de niveau d'eau nettement plus importantes, avec un abaissement supplémentaire de l'ordre de 20 à 40 cm sur le Rhin

supérieur. Les réductions de niveau d'eau obtenues sur le Rhin moyen sont intégralement dues aux mesures de rétention des crues prises sur le Rhin supérieur. Concernant la réduction des pointes de crue sur le Rhin inférieur, il n'y a pas de différence particulière entre les états d'aménagements 1977 et 1995.

Les mesures de baisse des niveaux d'eau ont des effets distincts sur les 3 bras néerlandais du Rhin. Les réductions de niveau d'eau sont les plus prononcées dans l'IJssel ; elles le sont moins dans le Waal et le Lek. Les mesures agissant sur le régime hydraulique du fleuve (par ex. le programme « Espace pour le fleuve ») sont possibles, notamment dans le delta du Rhin, car elles ne mettent pas en danger de riverains plus en aval.

---

## **GLOSSAIRE**

### **Mesures de protection contre les inondations**

Mesures de réduction (ou d'élimination) du risque d'inondation par abaissement des probabilités et/ou des impacts de crues dans une zone donnée. Il est fait la distinction entre mesures de protection actives et passives, mesures constructives (par ex. digues) et non constructives (par ex. prévention des inondations), mesures de protection fixes et mobiles.

### **Polder**

Ce terme désigne globalement les surfaces habituellement protégées des eaux mais qui peuvent être temporairement mises en eau. Cette intrusion d'eau ou mise en eau peut être intentionnelle ou non intentionnelle. Elle peut survenir par effet d'une inondation, de mesures engagées ou encore de défaillance des installations de protection.

Les surfaces polderisées sont donc soit des zones situées derrière les ouvrages de protection contre les inondations, soit des espaces de rétention des crues, soit encore des zones asséchées mais malgré tout exposées à une défaillance des systèmes de pompage.

Selon les régions, ouvrages ou modes de fonctionnement considérés, plusieurs expressions intègrent la notion de « polder » et doivent être précisées selon leur contexte (voir plus bas).

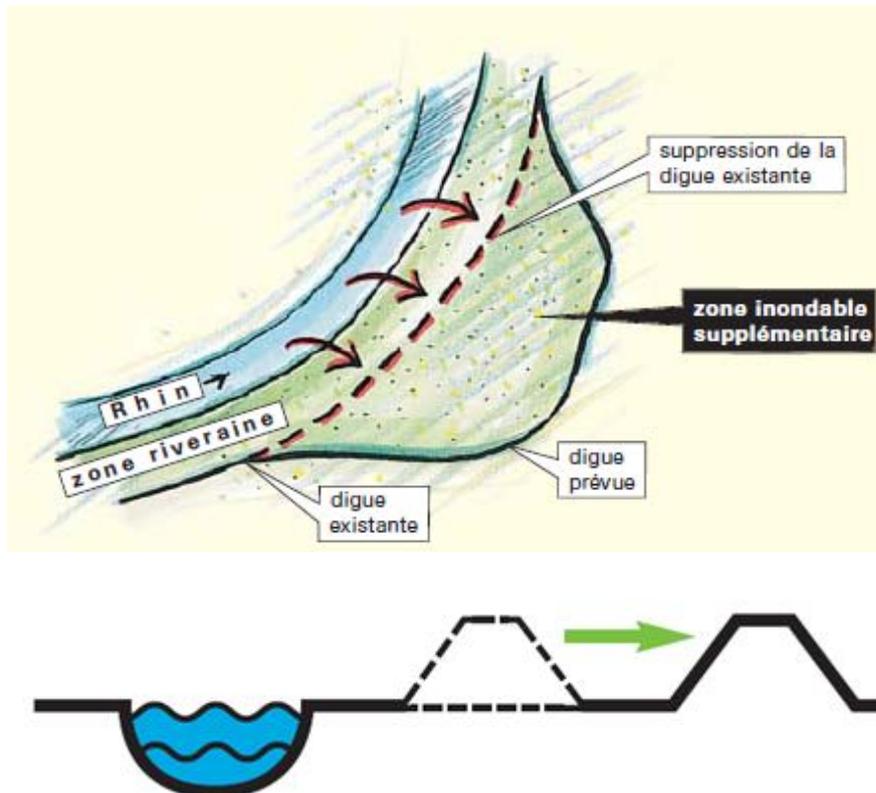
Dans le cadre des mesures techniques de protection contre les inondations, un polder est une zone déconnectée du régime naturel des crues du fait de la mise en place de dispositifs de protection contre les inondations. Dans le sens traditionnel qui lui est donné aux Pays-Bas, la zone peut être urbanisée ou soumise à exploitation agricole etc. du fait de la protection quasiment totale dont elle jouit contre les submersions.

Dans un contexte plus spécifique, le terme 'polder' est fréquemment utilisé pour les zones fondamentalement protégées contre les submersions par des dispositifs correspondants, mais qui sont (ou peuvent être) mises en eau (intentionnellement). Le terme 'polder' est alors utilisé en relation avec d'autres expressions telles que 'polder d'été' (voir plus bas) ou 'polder de rétention' (voir également ci-après), ou encore 'digue-tiroir' ou 'polder de submersion'.

Aux fins d'évaluation du 2<sup>ème</sup> objectif opérationnel du Plan d'Action contre les Inondations, le GE HVAL analyse à l'aide de techniques de modélisation les types de mesures d'abaissement des niveaux d'eau et les impacts de rétention sur le Rhin mentionnés ci-dessous :

## 1. Mesures non manœuvrables d'abaissement des niveaux d'eau

### 1a) Recul de digues



Déplacement d'une digue vers les terres, ce qui permet de reconquérir le lit majeur et de redonner plus d'espace au fleuve.

## 1b) Dépoldérisation



La digue située côté fleuve d'un polder est mise en retrait vers les terres, parfois mise en eau ou complètement retirée. Cette zone est alors dépoldérisée et l'eau peut y affluer à nouveau en situation de crue.

## 1c) Polders d'été

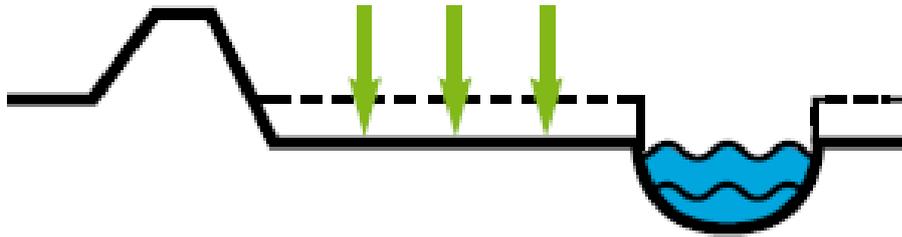
Des surfaces séparées du lit mineur du Rhin par une digue basse (« digue d'été ») sont remises en eau par submersion (non manœuvrable) de la digue d'été en période de crues de faible amplitude. Les polders d'été ne sont généralement pas équipés d'ouvrage de prise ou de vidange.

*Submersion de la digue d'été « Daxlander Au » (août 2007) :*



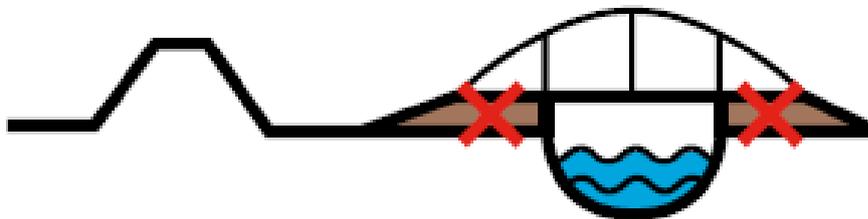
*Digue d'été côté Rhin en situation d'inondation et montée des eaux dans une zone poldérisée*

**1d) Décaissement du lit majeur**



Le creusement (de parties) du lit majeur permet de redonner plus d'espace au fleuve.

**1e) Elimination des obstacles = élimination des goulets d'étranglement**



Elimination d'un goulet hydraulique d'étranglement pour supprimer une accumulation d'eau à un niveau local. Il en résulte une meilleure évacuation de l'eau et, par là même, une baisse du niveau d'eau en situation de crue.

**1f) Abaissement d'épis**



Abaissement d'épis sur les voies navigables. Il en résulte une meilleure évacuation de l'eau et, par là même, une baisse du niveau d'eau en situation de crue.

### 1g) Chenal de dérivation des crues



Un chenal de dérivation des crues est un lit majeur séparé du milieu fluvial par des digues, dérivé du fleuve et évacuant par là même une partie de l'eau par une autre voie.

### 1h) Creusement du lit mineur



Le lit mineur est approfondi par creusement. Cette mesure a pour effet d'augmenter la capacité à un niveau d'eau constant.

## 2. Mesures de rétention manœuvrables

### 2a) Manœuvres exceptionnelles des usines du Rhin supérieur méridional

En situation de crue, le débit turbiné est progressivement diminué dans le tronçon canalisé et une partie du débit est dirigée vers le Vieux Rhin (non navigable) parallèle au Grand Canal d'Alsace ou vers les festons, ce qui permet d'utiliser le Vieux Rhin comme espace de rétention.



*Dans le Grand Canal d'Alsace et les festons : Le ralentissement du débit dans les canaux de fuite donne lieu à un débordement et une rétention dans le lit naturel du fleuve.*

## 2b) Manœuvres de rétention des barrages agricoles du Rhin supérieur méridional

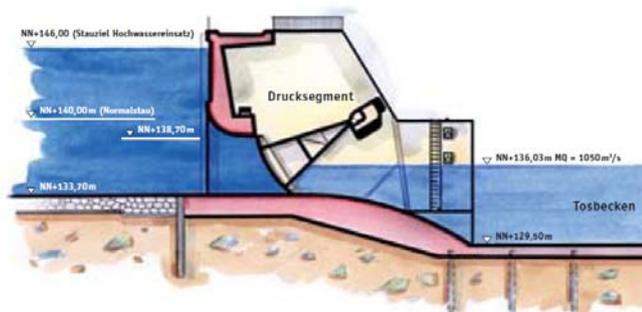
Les barrages agricoles permettent de gérer le niveau de la nappe alluviale pour l'agriculture.

En mode de rétention, les barrages agricoles placés sur le cours principal du Rhin sont manœuvrés pour retenir les crues de manière ciblée. Un règlement défini est appliqué aux barrages agricoles du Rhin pour gérer le niveau d'eau dans le lit du Rhin et dans les zones inondables en amont des barrages. Dans un premier temps, la retenue dans le barrage agricole doit être vidangée pour permettre de retenir la crue par la suite. Du fait de la hausse des niveaux d'eau à l'aval du barrage, les zones contiguës peuvent être inondées.

Après abaissement des vannes du barrage, l'espace de rétention est à nouveau vidé. Comme les polders, les barrages manœuvrés de manière ciblée sont des outils très efficaces de rétention des crues.

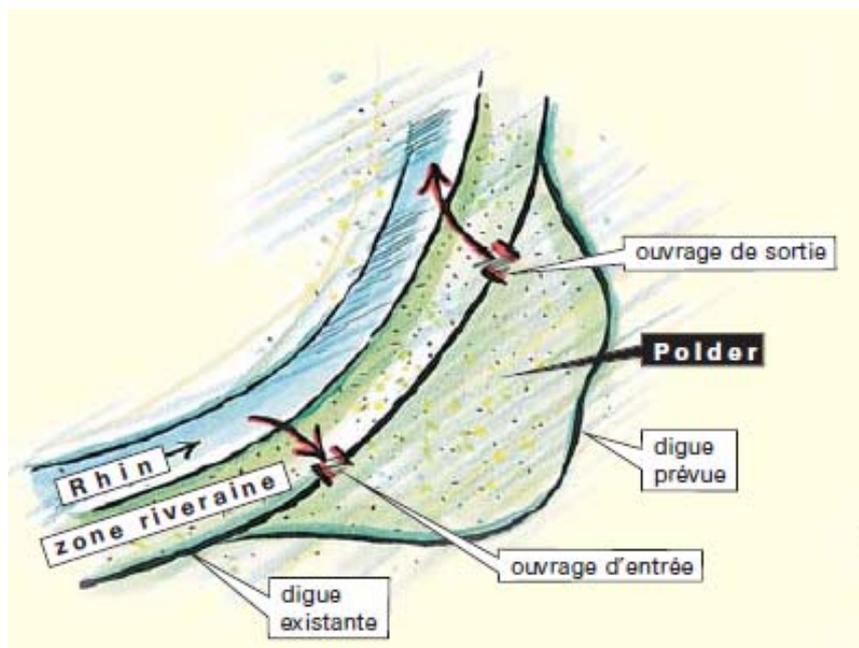


Barrage agricole de Kehl/Strasbourg



## 2c) Polders de rétention

Les surfaces de polder situées dans les zones de rétention parallèles au cours principal du Rhin sont inondées pour écrêter les pointes de crue par le biais d'ouvrages de prise aux fins de rétention des crues. A titre de mesure écologique compensatoire, des polders sont inondés au passage de crues de petite amplitude (« inondations écologiques »). Les polders de rétention sont généralement appelés 'espaces de rétention des crues' ou encore 'polders de submersion' dans d'autres bassins.



*Polder d'Erstein*

**2d) Espaces de réserve** (également désignés **espaces de décharge (exceptionnels)** ou **deuxième ligne de défense** dans la brochure sur la prévention du risque de dommages liés aux inondations publiée par la CIPR en 2002)

Il s'agit de surfaces de rétention parallèles au Rhin qui sont très rarement submergées. En règle générale, elles n'entrent en action que quand le débit de dimensionnement des digues est dépassé et apportent ainsi une marge de sécurité supplémentaire au-delà de

ce débit de dimensionnement. Dans la plupart des cas, le volume d'un espace de réserve est nettement supérieur à celui d'un polder de rétention classique.

### **3. Surfaces submersibles en situation de crue extrême**

En situation de crue extrême, il peut arriver, notamment en cas de dépassement des débits de dimensionnement, que les digues soient submergées ou rompent, ce qui peut provoquer l'inondation à grande échelle de surfaces situées derrière les digues (entre autres des zones d'urbanisation étendues).

L'écoulement des eaux du Rhin dans les terres situées derrière les digues et leur reflux vers le Rhin à des endroits parfois très éloignés plus en aval peut avoir un impact très marquant sur l'évolution de l'onde de crue du Rhin.



*Rupture de digue sur le Rhin supérieur à Flotzgrün (crue de juin 1953)*

## 1. Introduction et exposé des tâches

Le Plan d'Action contre les Inondations pour le Rhin (PAI) présenté par la Commission Internationale pour la Protection du Rhin (CIPR) a été adopté le 22 janvier 1998 à Rotterdam en 12<sup>ème</sup> Conférence ministérielle sur le Rhin (CIPR, 1998).

La PAI contribue à l'atteinte des objectifs visant à améliorer la situation vis-à-vis des crues du Rhin en aval d'Iffezheim tels que formulés dans les traités franco-allemands de 1969 et de 1982. Les quatre objectifs opérationnels qui figurent dans le PAI définissent comment améliorer, au travers de mesures diverses, les conditions de crue sur le Rhin par rapport aux conditions en présence en 1995. Ce plan d'action pour le Rhin est novateur en cela qu'il désigne concrètement des objectifs, des mesures, des coûts, des échéances et des stratégies de mise en œuvre etc. ; il a depuis servi d'exemple à de nombreux plans d'action fluviaux autant dans le cadre que hors du cadre du bassin du Rhin. La « réduction des niveaux de crue » revendiquée dans le 2<sup>ème</sup> objectif opérationnel du PAI, qu'il convient d'obtenir par le biais de mesures préventives de rétention des eaux dans le cours principal du Rhin et dans son bassin, et le bilan des impacts de ces mesures en 2010 sont les sujets traités dans le présent rapport. Le but est d'identifier si l'objectif de « réduire les niveaux de crues extrêmes jusqu'à 30 cm d'ici 2005 et jusqu'à 70cm d'ici 2020 en aval du tronçon régulé » pourra être atteint (CIPR, 1998).

Pour la réalisation des objectifs, le Plan d'Action s'est vu fixer une échéance à long terme (2020) avec des étapes intermédiaires sanctionnées par des objectifs opérationnels en 2000, 2005 et 2020. Cet échelonnement dans le temps permet de contrôler les résultats jusqu'à l'atteinte de l'objectif final. Un premier bilan des résultats obtenus a été tiré par la CIPR en 2001 (CIPR, 2001). Le total des volumes de rétention créés depuis 1995, mentionné dans le premier bilan, permet d'affirmer que « ... la réduction des niveaux d'eau visée de 5 cm a été atteinte » (CIPR, 2001). Dans le bilan tiré jusqu'en 2005, le suivi s'est fondé sur les résultats de simulations obtenus par modélisation mathématique des débits. Pour identifier l'efficacité des mesures réalisées, on est parti d'un collectif de crues modélisées susceptible de reproduire de manière exemplaire les conditions de crue dans le bassin du Rhin.

En résumé du deuxième bilan tiré jusqu'en 2005 (CIPR, 2006), il est apparu que la réduction visée des niveaux de crues du Rhin jusqu'à 30 cm avait été atteinte sur le Rhin supérieur grâce aux ouvrages de rétention mis en place de 1995 à 2005. Sur le Rhin moyen, cette réduction a été d'env. 10 cm. Sur le Rhin inférieur, les calculs ont débouché sur des réductions de l'ordre de 10 cm également autour de Cologne. Les réductions ont atteint un maximum de 7 cm à hauteur de la frontière germano-néerlandaise et de 3 cm dans le cas d'une crue dite 'de dimensionnement'. Ces réductions n'ont pas été atteintes dans chaque cas de figure analysé. Il arrive en effet dans certains cas, selon la genèse de la crue, qu'aucune réduction des niveaux de pointe ne soit pratiquement constatée. Dans la présente analyse, les réductions maximales de 30 cm à l'état 2005 ne sont pas atteintes dans le Rhin supérieur méridional. Ceci est dû pour l'essentiel à de nouvelles règles de calcul pour le débit hydrologique maximal (HQ extrême selon la DI) à l'échelle de Bâle.

Le groupe d'experts HVAL suit et pilote les études d'identification de l'efficacité de mesures sur le Rhin, réalisées à l'aide de modèles mathématiques de calcul des débits, visant à réduire les niveaux de crue conformément au 2<sup>ème</sup> objectif opérationnel du Plan d'Action contre les Inondations. Comme pour les mesures mises en œuvre jusque fin 2005, les calculs pour l'identification 2010 sont réalisés sur la base de crues modélisées. Le modèle a pu cependant être optimisé entre-temps. On a sélectionné pour ce faire différents états d'aménagement du fleuve, décrits plus en détail au chapitre 4.2.1 :

- Etat d'aménagement 1995 (état de référence)
- Etat d'aménagement 2005
- Etat d'aménagement 2010 (actuel)

- Etat d'aménagement 2020 (prévu)
- Etat d'aménagement 2020+ (selon le planning jusqu'en 2030 environ)

Il est tenu compte en plus dans ces calculs de l'état d'aménagement 1977. L'aménagement du Rhin supérieur a pris fin en 1977 avec la construction du barrage d'Iffezheim, considéré provisoirement comme dernier barrage. Ces mesures d'aménagement ont entraîné une accélération des ondes de crue et, par là même, sensiblement renforcé le risque d'inondation. Après 1977, on a commencé à pallier à ce renforcement anthropique du risque d'inondation par la construction ciblée d'espaces de rétention.

## **2. Genèse des crues dans le bassin du Rhin**

Les crues dans les cours d'eau peuvent exceptionnellement provenir de raz-de-marée ou être la conséquence d'une rupture de digues ou de barrières de glace. Les rétrécissements du profil d'écoulement engendrés par la glace, les avaries, les glissements de terrain ou les dépôts de matériaux solides peuvent provoquer des retenues d'eau qui ne sont temporairement pas liées à l'évolution des débits. En général toutefois, les crues ont leur origine dans les précipitations (éventuellement en relation avec la fonte des neiges) et leur répartition dans l'espace et dans le temps. Par ailleurs, certains facteurs hydrologiques spécifiques aux bassins versants et aux cours d'eau jouent un rôle notable.

Le bassin du Rhin est dominé toute l'année par des vents soufflant de l'ouest. Des masses d'air atlantiques humides traversent ainsi l'Europe centrale du sud-ouest jusqu'au nord. Les précipitations sont particulièrement abondantes en hiver lorsque les conditions météorologiques sont caractérisées par les courants occidentaux. Lorsque les masses d'air viennent du sud-ouest, des crues peuvent se produire notamment dans la partie sud-ouest du bassin du Rhin du fait des précipitations et de l'impact des retenues. Dans les Alpes, on observe des couches de neige durables en altitude.

Le caractère très varié des zones de dépression fait qu'il est extrêmement rare d'avoir un temps homogène sur l'ensemble du bassin du Rhin. On le voit par exemple au fait que l'on ne peut trouver dans les longues séries de données hydrologiques (depuis l'an 1000 après J.C.) de crues exceptionnelles simultanées et comparables en taille dans tous les sous-bassins du Rhin. Ce phénomène est également dû aux différents régimes hydrologiques qui caractérisent le bassin du Rhin.

Dans le régime glaciaire (dominé par les glaciers), les débits dépendent des variations saisonnières de la température : minimum en hiver, maximum en été. Dans le régime nival, les précipitations sont retenues sous forme de neige pendant l'hiver et restituées au printemps et en été lors de la fonte des neiges. En fonction du pourcentage détenu par les glaciers, les débits journaliers moyens les plus importants sont observés entre mai et août dans la zone alpine. Au fur et à mesure qu'augmente la superficie du bassin versant, les surfaces soumises à un régime pluvial gagnent en importance. Ces zones ne font plus partie de la haute montagne et sont influencées directement par les précipitations pendant la saison froide. Le régime pluvial est dominant lorsque les valeurs moyennes observées en hiver dépassent celles de l'été.

L'échelle de Rheinfelden/haut Rhin reflète le régime hydrologique de la haute montagne. L'hydrogramme annuel de cette échelle se compose pour l'essentiel du débit très équilibré quittant le lac de Constance et du débit de l'Aar influencé par les lacs subalpins. La somme de ces débits se traduit par un maximum prononcé en été (juin et juillet) et par de faibles débits d'octobre à mars. Les hydrogrammes annuels des fleuves des hautes terres centrales font état d'une période de faibles débits de juin à octobre. En

novembre, on note une hausse sensible des niveaux d'eau. Les débits restent à un niveau élevé entre décembre et mars.

La modification du régime hydrologique le long du Rhin se reflète dans les débits mensuels moyens des tronçons caractéristiques du Rhin (figure 2.1). On voit clairement à quelle saison des crues sont principalement attendues : en été dans la zone à influence alpine, en hiver plus en aval. Le passage du régime caractérisé par des débits maximums en été à un régime où le maximum est en hiver se fait sur le Rhin moyen. Des analyses plus détaillées du régime de crue montrent toutefois que ce passage (crues plus fréquentes en hiver qu'en été) se fait plus au sud, alors que ce n'est pas le cas pour les débits moyens. A hauteur de Maxau sur le Rhin supérieur, le régime de crue est sous l'influence prédominante des crues du semestre d'hiver.

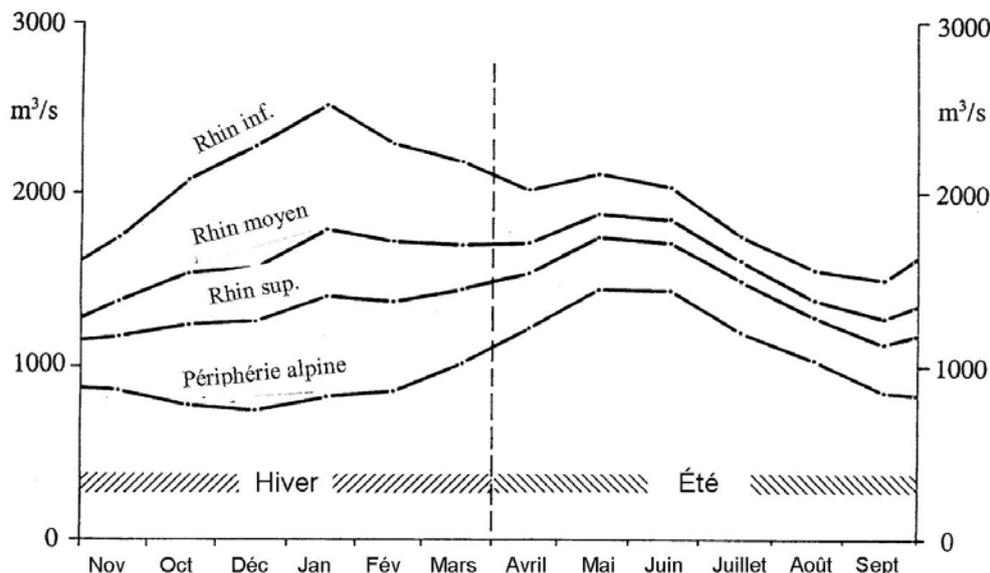


Fig. 2.1 : Débits mensuels moyens (1931/1990) de différents tronçons du Rhin

Le bassin versant du Rhin peut être subdivisé en plusieurs secteurs hydrologiques :

- La zone du Rhin alpin et du haut Rhin avec les éléments caractéristiques du régime glacio-nival de haute montagne
- Les trois zones du Neckar, du Main et de la Moselle caractérisées par le régime pluvial des hautes terres centrales
- La superposition de ces deux régimes régularise progressivement dans la partie plus en aval du Rhin la répartition du débit sur l'année (« régime combiné » ; échelle de Cologne).

Les différentes réactions zonales et les conditions météorologiques hétérogènes font que les crues du Rhin sont toujours régionales. Il est indispensable que plusieurs régions soient touchées de manière conjointe pour engendrer dans le Rhin des crues exceptionnelles de grande étendue. C'est ce qui ressort de l'analyse des crues récentes et de l'étude de rapports sur les crues qui se sont produites lors des décennies et siècles passés.

Sur le haut Rhin, les crues extrêmes se produisent normalement entre mai et juillet. A cette époque de l'année, il n'y a pas d'apport important venant des hautes terres centrales, raison pour laquelle de telles ondes estivales ne sont en général exceptionnelles que sur la partie méridionale du Rhin supérieur jusqu'à l'embouchure du Neckar et sans importance particulière plus en aval. Une exception très rare s'est produite avec la crue de fin 1882/début 1883 avec les débits les plus élevés jamais atteints sur l'ensemble du Rhin supérieur à partir de Bâle, générant de nombreuses

ruptures de digues. Malgré ces débordements, cette crue compte parmi les dix plus fortes crues enregistrées depuis 1870 dans le Rhin inférieur.

A partir du Rhin supérieur moyen et plus en aval, les crues extrêmes apparaissent généralement en hiver avec différents apports des bassins du Neckar, du Main et de la Moselle. Le Neckar et la Moselle génèrent des ondes plutôt courtes et abruptes, alors que le Main produit des ondes étirées avec des pointes moins élevées. La forme des ondes correspond aux zones de précipitation correspondantes. Sur le Neckar et la Moselle, celles-ci suivent de manière synchrone l'évolution de l'onde respective, sur le Main par contre, elles se déplacent dans le sens opposé, ce qui dans un cas entraîne une augmentation continue de l'onde et dans l'autre cas un étirement de l'onde. En ce sens, les pointes du Neckar et de la Moselle peuvent passer avant ou après la pointe du Rhin, alors qu'en général les pointes du Main et du Rhin se chevauchent. Ce n'est pas le cas lorsque des précipitations très abondantes venant de l'est s'abattent sur le bassin du Main, par ex. dans le cas de la dépression du type V b s'étendant largement vers l'ouest. Dans un tel cas, les périodes de précipitations sont longtemps stationnaires, intenses et donnent naissance à des crues extrêmes – uniquement en été toutefois (comme en 1342 par ex.) lorsque les concomitances avec les crues du Rhin et de la Moselle sont assez improbables.

Comme on peut s'y attendre, les contributions des différents sous-bassins à l'amplification des ondes varient fortement. Dans le cas de crues d'hiver, les pourcentages varient souvent dans certaines limites. Ainsi, le pourcentage détenu par la Moselle dans le volume de l'onde à Cologne varie entre 35 et 50%, celui du bassin alpin est assez constant avec 20%. Par contre, il n'y a pas de relation systématique entre l'ampleur de l'onde et le niveau de la pointe.

Le tableau 2.1 fait état des neuf crues majeures survenues à Cologne depuis 1925 avec leurs débits de pointe et leur ampleur dépassant les débits de base. On peut déduire des données que le volume de la crue le plus important relevé à Cologne en 1988 ne correspond qu'au huitième débit de pointe, alors que la crue présentant le plus haut débit de pointe (1925/26) ne vient qu'en 3<sup>ème</sup> position au niveau du volume. Le débit global significatif en termes de crue était en 1988 supérieur de 15 % à celui de 1925/26 et même de 35% à celui de 1995.

Cette description montre que chaque crue est un cas particulier et qu'il est impossible d'établir un schéma applicable dans tous les cas pour la mise en œuvre des dispositifs de rétention ; par ailleurs, l'efficacité de telles mesures diverge en fonction de la genèse des crues.

Crue	Débit de pointe		Volume	
	en m <sup>3</sup> /s	Position	En milliards de m <sup>3</sup>	Position
1925/26	11100	1	9,4	3
1995	11000	2	8,0	4
1993/94	10800	3	7,4	5
1947/48	9950	4	10,3	2
1983 (5)	9910	5	3,5	9
1970	9740	6	4,2	8
1983 (4)	9690	7	4,2	7
1988	9580	8	10,8	1
1955	9550	9	6,9	6

\* Débit de base = part de débit qui se serait écoulée même sans crue

Tab. 2.1: Les neuf débits de pointe les plus importants relevés depuis 1925 à l'échelle de Cologne et les volumes des ondes de crue correspondantes au-dessus des débits de base respectifs\*

### 3. Démarche suivie

En avril 2009, le groupe d'experts HVAL a présenté une analyse d'efficacité des mesures dans le bassin du Rhin et dans le Rhin en 2010 - 2015 - 2020. Cette identification se compose de 3 éléments :

- a) Identification de l'effet des mesures prises le long du Rhin (sur le niveau des eaux et le débit)
- b) Identification de l'effet des mesures prises à l'échelle du bassin (sur le niveau des eaux et le débit dans le Rhin)
- c) Identification de la modification de la probabilité de crue occasionnée par les mesures

Il est apparu depuis la mi-2009 que les travaux présentés dans l'analyse étaient très étendus. Pour cette raison, les travaux se sont concentrés sur les activités mentionnées au point a). Pour le point b), le groupe a recouru à des informations existantes. Enfin, les travaux relatifs au point c) seront effectués à une date ultérieure. Ce report a été possible car les travaux du groupe d'experts HIRI ne dépendaient plus de ces résultats, comme on le pensait initialement.

Les paragraphes ci-dessous donnent un aperçu succinct de la démarche suivie. Les chapitres suivants présentent plus en détail la méthode et les résultats des analyses réalisées par HVAL dans le cadre de l'identification de l'efficacité 2010.

#### *a) Impact des mesures le long du Rhin*

Dans le cadre de l'identification de l'efficacité 2005, l'impact des mesures prises le long du Rhin en aval de Bâle a été recensé sur la base des modèles hydrologiques SYNHP (tronçon Bâle-Worms) et SOBEK (tronçon Worms-Lobith) (voir PLEN 18-04 rév. 19.09.04, HVAL 35-05 rév. 23.6.2006). Les calculs ont été réalisés pour 3 à 5 crues modélisées en fonction de l'échelle d'évaluation. Les résultats ont été évalués aux échelles de Maxau, Worms, Kaub, Cologne et Lobith. A l'époque, seul a été considéré l'impact des mesures déjà réalisées en 2005, par rapport à l'état 1995 et, dans le cas du Rhin supérieur, par rapport à l'état 1977 également.

Pour l'identification de l'efficacité 2010, on a convenu d'appliquer une méthode comparable à celle utilisée en 2005 et d'élargir entre autres les études.

Pour cette raison, on a eu recours dans un premier temps aux mêmes outils de modélisation, après les avoir mis à jour et complétés, et étendu la zone considérée au delta du Rhin. A présent, il est donc tenu compte des mesures « Espace pour le fleuve » réalisées dans les bras du Rhin aux Pays-Bas. Les modèles suivants ont été utilisés pour le Rhin :

- modèle SYNHP pour le Rhin de Bâle à Worms avec ses principaux affluents (LUBW Bade-Wurtemberg et LUWG Rhénanie-Palatinat).
- modèle SOBEK pour le Rhin de Worms à la mer du Nord avec ses principaux affluents (BfG, LANUV, RWS-WD).

L'analyse ne s'est pas restreinte à l'impact des mesures sur le débit et/ou le niveau d'eau des échelles de référence à Maxau, Worms, Mayence, Kaub, Andernach, Cologne et Lobith mais s'est étendue, là où ceci était jugé opportun ou nécessaire, à l'axe longitudinal, de nombreuses mesures ayant un effet très variable à l'échelle locale et l'image rendue restant incomplète quand l'analyse se limite à quelques points.

L'identification 2005 s'est uniquement fondée sur quelques crues modélisées.

L'identification 2010 intègre dans la modélisation un total de 18 crues historiques pour l'amplification à un niveau extrême. Pour ce faire, les hydrogrammes des crues historiques ont été multipliés par des facteurs, ce qui a permis de générer (artificiellement) des crues modélisées synthétiques. A l'opposé de l'identification 2005, on a utilisé des facteurs uniformes pour l'ensemble du bassin. Cette méthode permet de conserver les particularités régionales des genèses des crues historiques.

L'exercice d'identification 2010 ne se limite pas uniquement à analyser l'efficacité des mesures en 2010 (par rapport à 1995) mais établit également une prévision pour les états 2015, 2020 et 2020+ (état plus = état 2020 plus les espaces initialement prévus pour 2020 mais qui ne seront probablement finalisés qu'après 2020, c'est-à-dire vers 2030, complété par deux espaces de réserve). En plus de l'état 2010, il a fallu calculer à cette fin l'état de référence 1995, les états prévisionnels 2020 et 2020+ ainsi que l'état 1977 pour le Rhin supérieur. L'état 1977 permet de tirer des enseignements sur les crues sans l'impact de mesures de rétention.

Quand surviennent des crues extrêmes générant des débits nettement supérieurs aux débits pris comme référence de dimensionnement, la capacité hydraulique de retenue du Rhin est dépassée et il se produit des submersions ou des ruptures de digues. L'endroit précis et le moment exact d'une submersion ou d'une rupture de digues varient selon les crues et sont impossibles à estimer en détail.

Dans le cas précis de crues modélisées dont les débits de points dépassent le débit de dimensionnement, la réduction de débit due aux submersions, et éventuellement aux ruptures de digues, est d'une importance capitale pour le déroulement de la crue vers l'aval. Pour cette raison, le GE HVAL a effectué des calculs exemplaires combinant l'impact de mesures de rétention et celui de submersions de digues pour les états 1995 (référence), 2010 et 2020.

#### ***b) Effet des mesures dans le bassin***

Pour l'identification 2010, une étude de sensibilité a tenté de déterminer, par rapport à l'ordre de grandeur visé dans le PAI d'ici 2020, les effets des mesures surfaciques dans de grands affluents sélectionnés du Rhin, autant en termes de modification des hauteurs d'eau que de temps d'écoulement d'ondes. Le travail devait être suivi d'un calcul des répercussions de cette étude sur le débit du Rhin de Bâle jusqu'à la mer du Nord. Mais par manque de temps, la réalisation de telles analyses a été reportée à une date ultérieure. On propose donc de reprendre les déclarations correspondantes figurant dans le rapport CIPR n° 153, annexe 2 (voir annexe 1) :

Pour la majeure partie des mesures concernant le bassin du Rhin (catégorie 1), les évaluations réalisées par un sous-groupe de travail mis en place à l'initiative des Länder allemands impliqués ont montré que beaucoup d'entre elles ne contribuaient pas de manière essentielle à la réduction des niveaux d'eau extrêmes du Rhin et qu'il n'était ni justifié ni nécessaire de tenter d'identifier leur efficacité à l'aide de modèles techniques onéreux. De nombreuses études scientifiques (CHR, 2003, CIPR, 2005) montrent que les mesures visant à renaturer les cours d'eau, extensifier l'agriculture, développer la nature / reboiser et désimpermeabiliser notamment ont uniquement de faibles impacts réducteurs à proximité immédiate de cours d'eau de petite taille. Ceci vient d'ailleurs étayer les estimations figurant dans le Plan d'Action contre les Inondations qui attribue à la catégorie de mesures « Rétention des eaux dans le bassin du Rhin » un impact relativement faible sur la réduction des niveaux de crue dans le Rhin (CIPR, 1999). Pour les deux catégories de mesures dans le bassin du Rhin « Redynamiser les zones alluviales » et « Mettre en place des dispositifs techniques de rétention des crues », les Länder ont tenté d'identifier sous forme mathématique l'efficacité de mesures importantes réalisées sur de grands affluents du Rhin.

#### ***c) Modification de la probabilité de crue sous l'effet des mesures***

Le calcul des modifications de la probabilité de crue dues aux mesures réalisées entre dans les tâches que le GE HVAL réalisera à compter de 2012.

Pour l'identification 2010, l'exercice a consisté à faire une estimation de probabilité et à la mettre à disposition du groupe d'experts HIRI de la CIPR. Les estimations de probabilité à réaliser devaient se référer à des débits de pointe au droit d'échelles sélectionnées le long du Rhin, de sorte que les modifications de la probabilité aux différentes échelles soient représentatives de différents tronçons du Rhin. Les travaux se sont fondés sur les statistiques actuellement valables (statistiques de référence). Les

débites de pointe des crues historiques et des crues extrêmes modélisées obtenus par calcul pour l'état 1995 (échelle de Kaub et plus en aval) et pour l'état 1977 (échelles de Maxau et de Worms) ont été ordonnés à l'aide de ces statistiques de référence. Il leur est ainsi attribué une probabilité d'occurrence. Dans un deuxième temps, les débits de pointe modifiés ou non par les mesures ont été reportés sur les crues modélisées. Ils obtiennent, de ce fait, la même occurrence que les crues modélisées correspondantes dans l'état 1995 ou 1977.

## **4. Modèles, états d'aménagement et échelles de référence**

### **4.1. Modèles**

Pour évaluer l'impact des mesures visant à abaisser les niveaux d'eau, les services impliqués gèrent une série de modèles comprenant principalement les modules suivants :

- modèles SYNHP pour le Rhin de Bâle à Cologne avec ses principaux affluents (LUBW Bade-Wurtemberg et LUWG Rhénanie-Palatinat).
- modèles SOBEK pour le Rhin de Maxau à la mer du Nord avec ses principaux affluents (BfG, LANUV, RWS-WD).

Les calculs requis pour l'évaluation 2010 se fondent sur les modèles SYNHP pour le tronçon Bâle-Worms.

Le modèle synoptique SYNHP fait partie des modèles hydrologiques dont les méthodes de calcul se fondent sur des équations de continuité et de mouvement. SYNHP calcule par intervalle de temps (de manière synoptique) le débit de tronçons fluviaux quelconques. Parallèlement à la translation d'ondes de débit et à leur déformation due à différentes géométries du lit mineur, le modèle permet de calculer l'impact d'opérations de rétention manœuvrables ou non dans le fleuve et dans les polders.

Le modèle synoptique a été perfectionné en 2007 pour permettre d'utiliser comme option, au lieu de la méthode hydrologique de propagation des ondes de crues, des méthodes de calcul hydrodynamique unidimensionnelles sur la base des équations de Saint-Venant. La variante de calcul hydrodynamique du modèle synoptique (SYNHP-1D) est utilisée dans une première étape par la LUBW pour le tronçon du Rhin situé au droit du remous du Neckar entre Germersheim-Sondernheim (PK 380,6 du Rhin) et Worms-Rheindürkheim (PK 450,6 du Rhin). On s'efforce d'étendre progressivement et en fonction des besoins les tronçons pouvant être calculés à l'aide de cette méthode hydrodynamique. Entre-temps, le LUWG a étendu ce modèle jusqu'à Andernach (PK 613,8 du Rhin).

Le modèle SYNHP est l'outil officiel utilisé par la « Commission Permanente pour l'aménagement du Rhin supérieur » pour le tronçon du Rhin situé entre Bâle et Worms pour fixer les règles des manœuvres de rétention sur le Rhin supérieur. Il permet de calculer différents scénarios de rétention. Le modèle se réfère à l'état du Rhin supérieur postérieur à l'aménagement des barrages. Le modèle SYNHP est également utilisé pour analyser les modifications de l'écoulement des crues sur le tronçon Bâle-Maxau-Worms à la suite des mesures d'aménagement.

La LUBW a mis au point/actualisé le modèle et réalisé les calculs.

La BfG a réalisé les calculs pour le tronçon du Rhin à partir de Worms jusqu'au delta du Rhin en utilisant le modèle hydraulique SOBEK. A cette fin, les modules couvrant les tronçons

- de Worms (PK 443,4 du Rhin) à Andernach (PK 613,8 du Rhin)
- d'Andernach (PK 613,8 du Rhin) à Lobith (PK 862,2 du Rhin)
- du delta du Rhin (à partir du PK 862,2 du Rhin)

ont été mis à disposition par la BfG, le LANUV et RWS-WD et raccordés ensuite les uns aux autres par la BfG pour constituer un modèle global.

Le modèle SOBEM reproduisant l'état 2010 de Worms à la mer du Nord se compose du modèle Worms-Andernacht mis au point en 2009 et fourni par la BfG, du modèle Andernach-Lobith mis au point en 2008 et fourni par le LANUV et du modèle delta du Rhin (à partir du PK 862,2 du Rhin) mis au point en 2010 et fourni par RWS-WD. Ces modèles (partiels) et tous les autres modèles mentionnés sont décrits en détails dans les références bibliographiques BfG (2011), LANUV (2011), Deltares (2010) et HKV (2011).

En raison des améliorations régulières apportées aux modèles et à leurs modules d'extension, il est fondamentalement concevable que les résultats de calculs obtenus diffèrent de ceux d'analyses antérieures ou postérieures.

## 4.2 Etats d'aménagement et règlements de manœuvre considérés

### 4.2.1 Etats d'aménagement

Les analyses des impacts des mesures sur le Rhin entre Bâle et la mer du Nord se fondent sur les résultats de calculs pour les états d'aménagement suivants (voir sur la carte page 33 et dans les tableaux 4.1 et 4.2) :

- **Etat d'aménagement 1977** (= date d'achèvement des travaux du dernier barrage construit sur le Rhin supérieur, celui d'Iffezheim au PK Rhin 334) et avant la construction et la mise en service de mesures de rétention sur le Rhin supérieur. L'état 1977 permet de tirer des enseignements sur les crues du Rhin supérieur sans l'impact de mesures de rétention.
- **Etat d'aménagement 1995** (état de référence du Plan d'Action contre les Inondations de la CIPR). 160 millions de m<sup>3</sup> de volume de rétention étaient opérationnels sur le cours principal du Rhin à l'état 1995.
- **Etat d'aménagement 2005** (date d'évaluation du Plan d'Action contre les Inondations de la CIPR par rapport à 1995). Environ 211 millions de m<sup>3</sup> au total de volume de rétention étaient opérationnels sur le cours principal du Rhin à l'état 2005.
- **Etat d'aménagement 2010** (date d'évaluation CIPR par rapport à 1995). 229 millions de m<sup>3</sup> de volume de rétention au total étaient opérationnels sur le cours principal du Rhin à l'état 2010.
- **Etat d'aménagement 2020** (état attendu CIPR par rapport à 1995). En l'état 2020, 361 millions de m<sup>3</sup> de volume de rétention seront opérationnels sur le cours principal du Rhin d'après la méthode utilisée jusqu'à présent. Viennent s'y ajouter d'autres mesures visant à réduire les niveaux d'eau dans les bras du Rhin en aval de Lobith.
- **Etat d'aménagement 2020+** (état attendu CIPR par rapport à 1995). L'état 2020+ comprend toutes les mesures de rétention prévues sur le Rhin supérieur (également celles qui ne pourront probablement être mises en service qu'après 2020), y compris les espaces de réserve du Land de Rhénanie-Palatinat et les zones/espaces figurant dans l'approche de protection contre les inondations de Rhénanie-du-Nord-Westphalie. En l'état 2020+, 535 millions de m<sup>3</sup> de volume de rétention seront probablement opérationnels. Viennent s'y ajouter d'autres mesures visant à réduire les niveaux d'eau dans les bras du Rhin en aval de Lobith.

Les deux tableaux 4.1 et 4.2 présentent les mesures de rétention opérationnelles pour ces états d'aménagement et les mesures d'abaissement des niveaux d'eau du Rhin (selon les indications des exploitants) dont l'impact est pris en compte dans les calculs HVAL.

#### 4.2.2 Mesures et objectifs de prévention des inondations, règlements de manœuvre

Un grand nombre de mesures de prévention des inondations le long du Rhin ont pour effet de réduire les niveaux d'eau en situation de crue. Un relevé des principales mesures figure dans les tableaux 4.1 et 4.2. On note des différences le long du Rhin au niveau du type de mesures, des objectifs poursuivis et des règlements. Des informations fondamentales sur l'impact des mesures de rétention des crues figurent en annexe 2. Sur le Rhin supérieur, les mesures de rétention sont le plus souvent manœuvrables. Les reculs de digues etc., peu nombreux, jouent un rôle secondaire. Ces mesures ont pour objectif de restaurer le niveau de protection contre les inondations qui existait avant l'aménagement du Rhin supérieur. L'application de ces mesures se fait selon un règlement international. Le GT 'Manœuvres' se charge d'actualiser pour le compte de la « Commission Permanente » pour l'aménagement du Rhin supérieur les règles de manœuvres en fonction des mesures achevées et opérationnelles et de les ajuster en cas de besoin aux nouvelles conditions ou aux nouvelles connaissances.

Les règlements peuvent donc évoluer au fil du temps, également pour des mesures déjà achevées. Pour cette raison, le règlement international convenu entre la France et les Länder allemands de Bade-Wurtemberg, Rhénanie-Palatinat et Hesse ainsi que la Fédération allemande est intégré dans le modèle synoptique à la base des calculs pour les états d'aménagement 1995, 2005 et 2010. Entre 2005 et 2010, le règlement des mesures de rétention sur le Rhin supérieur n'a pas été actualisé de manière significative. Le règlement appliqué en 2005 à l'utilisation des dispositifs de rétention manœuvrés a donc également pu être utilisé pour l'état 2010.

Pour les états 2020 et 2020+, le règlement s'inspire du règlement global de toutes les mesures existantes et prévues tirées de la « Vérification de l'efficacité des mesures de rétention des crues sur le Rhin supérieur entre Bâle et Worms – GT 'Vérification de l'efficacité' » (1998). Pour les dispositifs de rétention des crues entre Worms et le débouché de la Nahe, les services de gestion des eaux rhénano-palatin ont défini des règlements de manœuvre similaires à ceux fixés pour le Rhin supérieur méridional.

En regard des 972 crues modélisées au total (108 crues modélisées x 6 états d'aménagement plus 3 états d'aménagement avec submersion de digues), il n'a pas été possible, dans les échéances fixées, de prendre une décision sur chaque détail du règlement (par ex. les « décisions facultatives ») pour chacune des crues. Comme pour les analyses réalisées par HVAL en 2005, les calculs des mesures se fondent sur les hypothèses suivantes :

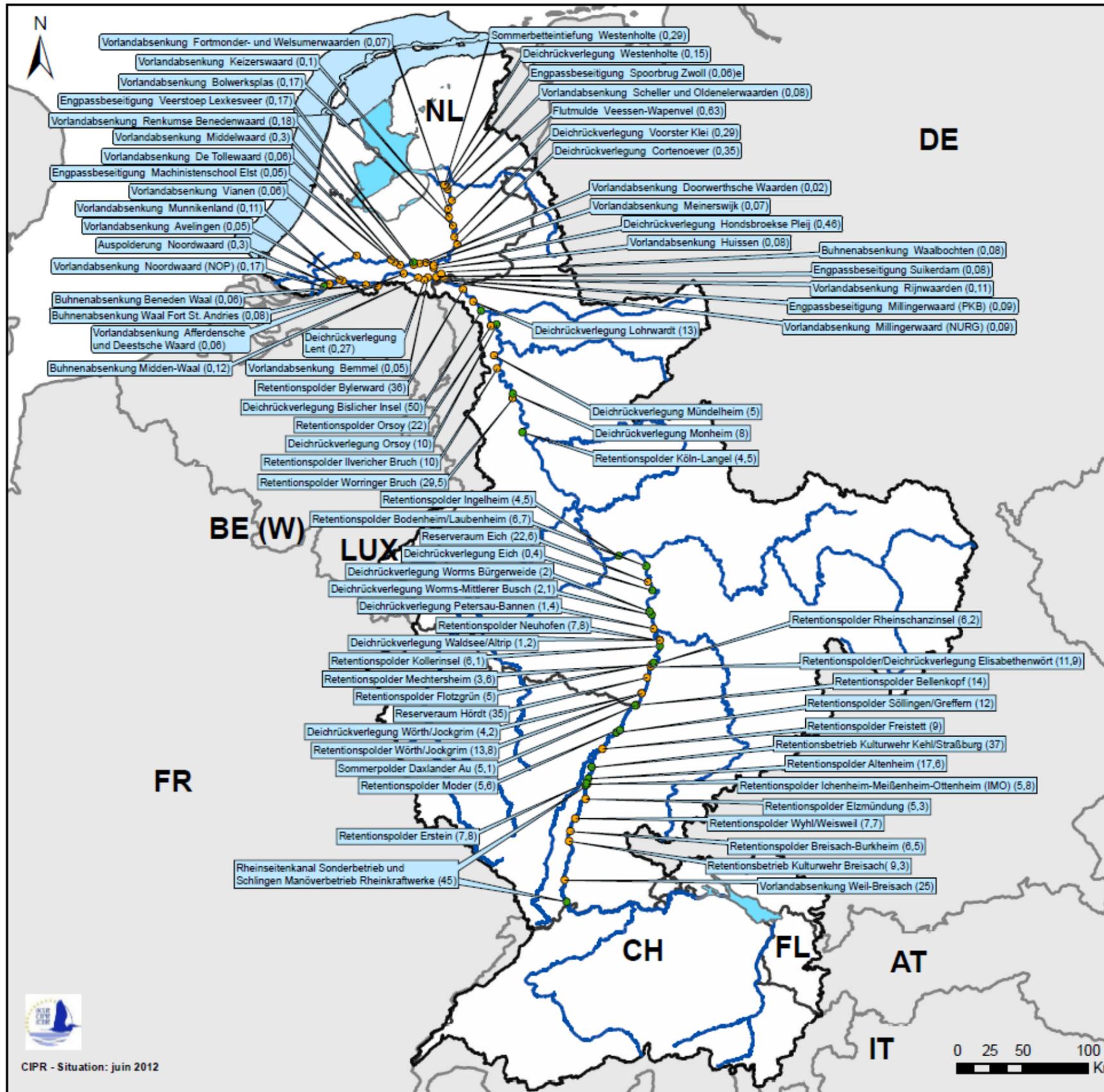
- Il n'est pas tenu compte d'éventuelles inondations écologiques de polders avant l'utilisation proprement dite de ces espaces aux fins de rétention.
- Les dispositifs de rétention sont fondamentalement mis en service conformément aux débits mesurés aux échelles de manœuvre, tels que définis dans le règlement. On part de l'hypothèse qu'il doit être satisfait à d'éventuels critères supplémentaires basés sur la prévision (exemple : conformément au règlement, on se prononce fondamentalement pour l'utilisation du dispositif de rétention lorsque la décision est laissée à l'appréciation des experts. La procédure choisie est ainsi claire).

Sur le tronçon du Rhin en Rhénanie-du-Nord-Westphalie, on trouve des reculs de digues et des espaces de rétention. Les objectifs de protection de ces espaces de rétention s'orientent sur les crues de référence et visent à prévenir la submersion des dispositifs de prévention des inondations. Le dimensionnement étant différent selon les dispositifs en Rhénanie-du-Nord-Westphalie (NRW), la mise en service des mesures de rétention varie et s'oriente sur les conditions locales/régionales en présence. C'est ainsi qu'est conçu le fonctionnement du polder réalisé à Langel et que sont programmés les autres polders de rétention à Worringen, Orsoy et Lohrwardt.

En regard des différents stades de planification et des dimensionnements variables, il n'existe pas actuellement en NRW de règlement global analogue à celui du Rhin supérieur. Il est tenu compte de la mise en service des mesures dans les jeux de données modélisées pour les horizons respectifs.

On suppose que ces hypothèses n'entraîneront pas globalement de modification significative des résultats de l'analyse (par ex. modifications de la probabilité).

Dans les bras néerlandais du Rhin, l'abaissement du niveau des eaux passe en premier lieu par des mesures d'élargissement du profil du fleuve. L'objectif est de pouvoir évacuer le débit de dimensionnement qui est passé en 2001 de 15.000 m<sup>3</sup>/s à 16.000 m<sup>3</sup>/s sans rehausser les digues. Les reculs de digues, les abaissements d'épis et décaissements, la levée de goulets hydrauliques et les chenaux de dérivation sont des mesures typiques figurant dans le catalogue. Il est tenu compte du fait que chaque mesure a un impact propre qui se superpose et s'ajoute à l'impact individuel de mesures voisines et donne ainsi lieu à un abaissement du niveau d'eau sur tout le linéaire. Du fait de ces impacts, le tableau 4.2 n'indique pas de volumes de rétention, mais les abaissements de niveau d'eau visés pour chaque mesure.



### Mesures de rétention sur le cours principal du Rhin

#### Etat de mise en œuvre des mesures

- Réalisé
- En construction/Planifié

#### Eaux

- Cours d'eau
- Eaux côtières et eaux de transition

#### Remarques concernant les données chiffrées

Concernant les mesures d'abaissement des niveaux d'eau situées dans le Delta du Rhin à partir de Lobith: Réduction des niveaux d'eau en m

Concernant les mesures de rétention entre Bâle et Lobith: volume de rétention en millions de m<sup>3</sup>

Remarque: les noms français ou néerlandais des mesures sont donnés dans les tableaux ci-joints.



CIPR - Situation: juin 2012

PK du Rhin	Zone	Etat/Land	Localisation de la mesure	Type de mesure	Volume opérationnel						
					[millions de m <sup>3</sup> ]						
					1977	1995	2005	2010	2020	2020+	
174 - 226 234 - 291	Rhin supérieur	F	Grand Canal d'Alsace et festons	Manœuvres exceptionnelles des usines du Rhin		45	45	45	45	45	
174,6 – 219		D-BW	Weil-Breisach	Décaissement du lit majeur					2,8 <sup>2)</sup>	25	
224,8		D-BW	Breisach	Manœuvres de rétention des barrages agricoles					9,3	9,3	
228,4		D-BW	Breisach-Burkheim	Polder de rétention					6,5	6,5	
243		D-BW	Wyhl-Weisweil	Polder de rétention						7,7	
260,5		D-BW	Débouché de l'Elz	Polder de rétention					5,3	5,3	
272		D-BW	IMO	Polder de rétention						5,8	
276		F	Erstein	Polder de rétention			7,8	7,8	7,8	7,8	
278,4		D-BW	Altenheim	Polder de rétention		17,6	17,6	17,6	17,6	17,6	
290,3		D-BW	Kehl/Strasbourg	Manœuvres de rétention des barrages agricoles		37 <sup>1)</sup>	37	37	37	37	
302		D-BW	Freistett	Polder de rétention						9	
317,4		D-BW	Söllingen/Greffern	Polder de rétention			12	12	12	12	
330		F	Moder	Polder de rétention		5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	
354,9		D-BW	Bellenkopf	Polder de rétention						14	
357,5		D-RP	Daxlander Au	Polder d'été	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	
368		D-RP	Wörth/Jockgrim	Recul de digues					4,2	4,2	
377				Polder de rétention					13,8	13,8	
381,3		D-RP	Espace de réserve de Hördt	Espace de réserve						35	
390		D-BW	Elisabethenwört	Polder de rétention / recul de digues						11,9	
390,4		D-RP	Mechtersheim	Polder de rétention					3,6	3,6	
392,6		D-BW	Ile de Rheinschanz	Polder de rétention					6,2	6,2	
409,9		D-RP	Flotzgrün	Polder de rétention			5	5	5	5	
411,5		D-RP	Ile de Koller	Polder de rétention		6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	
				recul de digues					1,2	1,2	
436		D-RP	Neuhofen	Polder de rétention					7,8	7,8	
439		D-RP	Petersau-Bannen	Recul de digues					1,4	1,4	
440,2		D-RP	Worms – Mittlerer Busch	Recul de digues				2,1	2,1	2,1	
467,3		D-RP	Worms Bürgerweide	Recul de digues			2	2	2	2	
468,5		D-RP	Eich	Recul de digues			0,4	0,4	0,4	0,4	
489,9		D-RP	Espace de réserve d'Eich	Espace de réserve						22,6	
517,3		D-RP	Bodenheim/Laubenheim	Polder de rétention				6,7	6,7	6,7	
668,5		D-RP	Ingelheim	Polder de rétention				4,5	4,5	4,5	
705,5		Rhin inférieur	D-NRW	Cologne-Langel	Polder de rétention				4,5	4,5	
707,5			D-NRW	Worringer Bruch	Polder de rétention				29,5	29,5	
750			D-NRW	Monheim	Recul de digues			8	8	8	
760,5			D-NRW	Ilvericher Bruch	Polder de rétention					10	
802			D-NRW	Mündelheim	Recul de digues					5	
797,5			D-NRW	Orsoy : recul de digues	Recul de digues			10	10	10	
818,5			D-NRW	Orsoy : espace de rétention	Polder de rétention					22	
832,5			D-NRW	Ile de Bislich	Recul de digues	50 <sup>3)</sup>	50	50	50	50	
850			D-NRW	Bylerward	Recul de digues					13	13
					Polder de rétention						36
<b>Somme des volumes de rétention des mesures d'abaissement des niveaux d'eau sur le Rhin par état d'aménagement</b>					<b>55,1</b>	<b>160,3<sup>1)</sup></b>	<b>211,6</b>	<b>229,4</b>	<b>361</b>	<b>535,2</b>	

<sup>1)</sup> Barrage agricole de Kehl : volume opérationnel de 13 millions de m<sup>3</sup> en régime régulier jusqu'en 2002 et 24 millions de m<sup>3</sup> supplémentaires opérationnels en cas exceptionnel

<sup>2)</sup> 2,8 millions de m<sup>3</sup> = 1er tronçon sur 4 au total. De plus, des parties des tronçons III et IV seront déjà achevées en 2020.

<sup>3)</sup> L'île de Bislich était déjà une zone inondée par les crues du Rhin avant l'achèvement de la mesure de rétention. La mesure n'a été calculée que pour l'état 1995.

Tab. 4.1 : Mesures de rétention entre Bâle et Lobith avec indications des volumes correspondants (en millions de m<sup>3</sup>)

PK	Zone	Etat/Land	Localisation de la mesure	Type de mesure	Effet minimal d'abaissement de niveau d'eau attendu <sup>4)</sup> (par mesure) (m)				
					1995	2005	2010	2020	2020+
865	Bovenrijn/Waal/Merweddes	NL	Rijnwaarden	décaissement du lit majeur				0,11	0,11
871		NL	Millingerwaard (PKB)	élimination des obstacles				0,09	0,09
871		NL	Millingerwaard (NURG)	décaissement du lit majeur					
871		NL	Suikerdam	élimination des obstacles				0,08	0,08
878		NL	Bemmel	décaissement du lit majeur				0,05	0,05
882		NL	Lent	recul de digues				0,27	0,27
897		NL	Afferdensche et Deestsche Waard	décaissement du lit majeur				0,06	0,06
867		NL	Méandres du Waal	abaissement d'épis				0,08	0,08
887		NL	Midden-Waal	abaissement d'épis				0,12	0,12
916		NL	Waal à Fort St. Andries	abaissement d'épis				0,08	0,08
934		NL	Beneden Waal	abaissement d'épis				0,06	0,06
948		NL	Munnikenland	décaissement du lit majeur				0,11	0,11
955		NL	Avelingen	décaissement du lit majeur				0,05	0,05
964		NL	Noordwaard	dépoldérisation				0,3	0,3
968		NL	Noordwaard (NOP)	décaissement du lit majeur			0,17	0,17	0,17
871		Pannerdensch Kanaal, Nederrijn, Lek	NL	Huissen	décaissement du lit majeur				0,08
883	NL		Meinerswijk	décaissement du lit majeur				0,07	0,07
893	NL		Doorwerthsche Waarden	décaissement du lit majeur				0,02	0,02
898	NL		Renkumse Benedenwaard	décaissement du lit majeur				0,18	0,18
898	NL		Rampe d'accès au bac de Lexkesveer	élimination des obstacles			0,17		
908	NL		Middelwaard	décaissement du lit majeur				0,03	0,03
911	NL		De Tollewaard	décaissement du lit majeur				0,06	0,06
917	NL		Machinistenschool Elst	élimination des obstacles				0,05	0,05
946	NL		Vianen	décaissement du lit majeur				0,06	0,06
878	IJssel		NL	Hondsbroekse Pleij	recul de digues				0,46
918		NL	Cortenoever	recul de digues				0,35	0,35
930		NL	Voorster Klei	recul de digues				0,29	0,29
943		NL	Bolwerksplas	décaissement du lit majeur				0,17	0,17
947		NL	Keizerswaard	décaissement du lit majeur				0,1	0,1
957		NL	Fortmonder- et Welsumerwaarden	décaissement du lit majeur				0,06 - 0,08	0,06 - 0,08
961		NL	Veessen-Wapenveld	chenal de dérivation des crues				0,63	0,63
977		NL	Scheller et Oldenelerwaarden	décaissement du lit majeur				0,08	0,08
978		NL	Pont ferroviaire de Zwolle	élimination des obstacles				0,06	0,06
980		NL	Westenholte	recul de digues				0,15	0,15
980		NL	Westenholte	creusement du lit mineur				0,29	0,29

<sup>4)</sup> Ces mesures visent principalement à augmenter la capacité d'écoulement dans le delta du Rhin. Il n'est donc indiqué que l'effet minimal d'abaissement du niveau d'eau par mesure. Ceci explique pourquoi les mesures ne sont pas prises en compte dans le volume total de rétention.  
Des mesures atteignant environ 17 km<sup>2</sup> de surface ont déjà été réalisées en 2005 (voir Bilan PAI 1995-2005). Cette surface a été étendue à 38 km<sup>2</sup> en 2010 grâce à la réalisation de mesures supplémentaires.  
PKB = Planologische Kernbeslissing (directive nationale d'aménagement du territoire)  
NURG = Nadere Uitwerking Rivierengebied (développement de la zone fluviale)  
NOP = Natuurontwikkelingsproject (projet de développement de la nature)

Tab. 4.2: Mesures de réduction des niveaux d'eau dans le delta du Rhin à partir de Lobith avec effet minimal d'abaissement du niveau d'eau attendu (en m) ; seules sont listées les principales mesures. Le tableau ne rassemble que les mesures réalisées dans le cadre de la décision nationale d'aménagement du territoire « Espace pour le fleuve » (planologische kernbeslissing; 2006)

### **4.3 Echelles de référence et tronçons d'évaluation**

Echelles de référence utilisées pour les analyses :

#### **Rhin supérieur**

Maxau

Worms

Mayence

#### **Rhin moyen**

Kaub

Andernach

Pour le Rhin supérieur et le Rhin moyen, les échelles de Maxau, Worms et Mayence (Rhin supérieur) et de Kaub et Andernach (Rhin moyen) sont les échelles de référence. Les échelles du Rhin supérieur et l'échelle de Kaub servent également à manœuvrer les dispositifs de rétention des crues. Les deux échelles du Rhin moyen notamment peuvent être considérées comme représentatives des niveaux d'eau dans le Rhin moyen méridional (échelle de Kaub) et le Rhin moyen septentrional en aval du débouché de la Moselle (échelle d'Andernach). La population locale, entre autres, s'y réfère également pour prendre des mesures de prévention à temps en cas de hausse des niveaux d'eau.

#### **Rhin inférieur**

Echelle de Cologne (domaine d'application : débouché de la Sieg – débouché de la Ruhr)

Echelle de Lobith (domaine d'application : débouché de la Ruhr – Pannerdensche Kop)

#### **Delta du Rhin**

Echelle de Lobith (domaine d'application : cours d'eau Nederrijn/Lek)

Echelle de Lobith (domaine d'application : Waal)

Echelle de Lobith (domaine d'application : IJssel)

Pour le Rhin inférieur, les échelles de Cologne et de Lobith sont considérées comme représentatives des débits pour le tronçon situé entre le débouché de la Sieg et celui de la Ruhr ainsi qu'entre le débouché de la Ruhr et le Pannerdensche Kop ; les débits à l'échelle de Lobith (en non les débits en présence après la subdivision en différents bras du Rhin) sont représentatifs du delta du Rhin et de ses bras Nederrijn/Lek, Waal et IJssel (traditionnellement). Des études antérieures montrent cependant que l'impact de mesures visant à réduire le long du Rhin inférieur et aux Pays-Bas est très variable et que l'abaissement du niveau d'eau au droit de ces échelles (comme à tout autre point également) n'est pas représentatif des tronçons fluviaux mentionnés. C'est pourquoi les abaissements moyens du niveau d'eau sont évalués et présentés par tronçon du Rhin dans l'analyse des résultats.

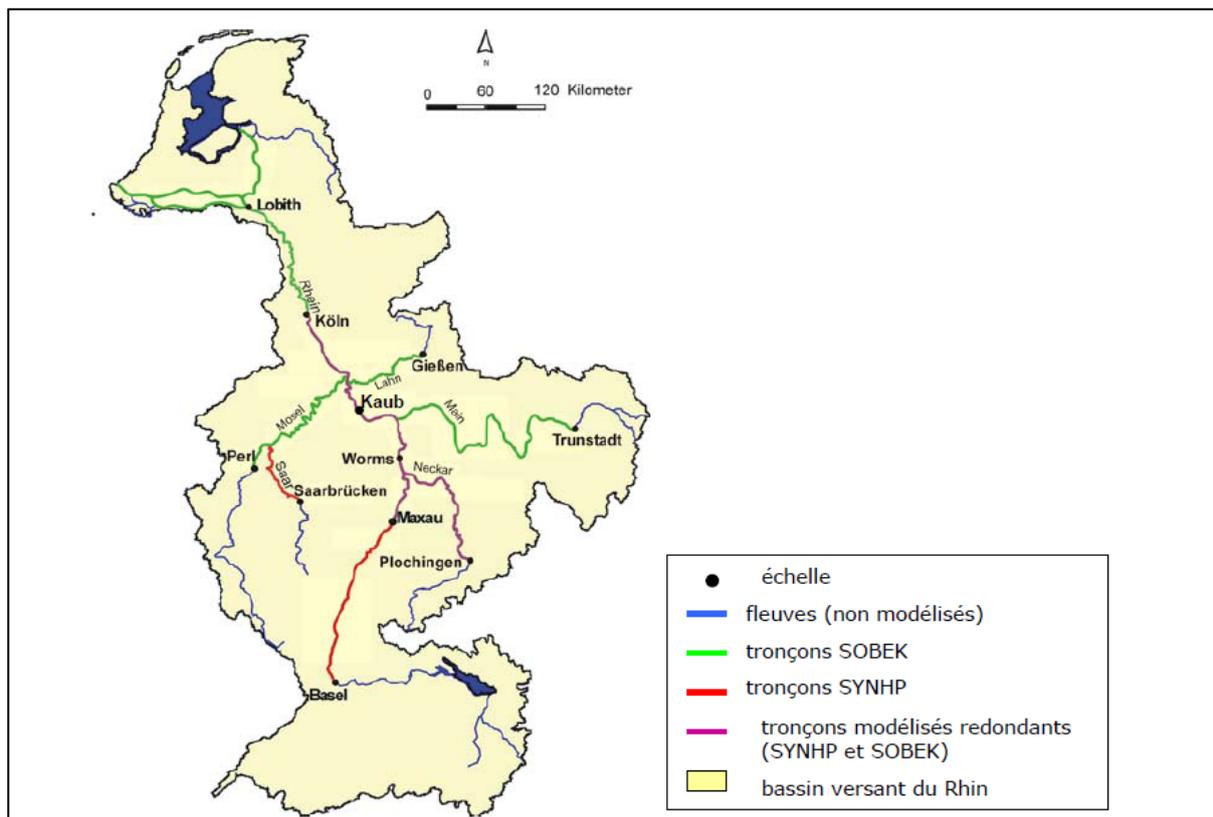


Fig. 4.1 : Tronçons fluviaux du modèle ,épine dorsale' dans le bassin du Rhin (source : rapport CIPR n° 153, 2006)

## 5. Crues utilisées et crues modélisées

Comme en 2005, les calculs basés sur les modèles de simulation ont été réalisés en 2010 sur la base de crues modélisées. On génère les crues modélisées à partir de crues historiques en convertissant aux marges du modèle (par ex. à l'échelle de Bâle ou au niveau des affluents du Rhin) les hydrogrammes historiques mesurés à des niveaux de débit supérieurs (ou inférieurs dans certains cas). Cette méthode utilise des facteurs uniformes pour le bassin du Rhin. La méthode permet de conserver les particularités régionales des genèses des crues historiques.

### 5.1 Crues historiques sélectionnées et données d'entrée

Afin de tenir compte du plus grand nombre possible de genèses et de crues régionales du Rhin, le GE HVAL a sélectionné 18 crues historiques survenues dans le bassin du Rhin entre 1882 et 2003<sup>2</sup>. Ce collectif peut être considéré comme une sélection représentative des crues du Rhin tant au niveau des genèses qu'à celui de leur importance régionale. Il englobe des crues d'hiver et d'été, des crues avec une et deux pointes ainsi que des crues avec des pointes de longue ou de courte durée. Par ailleurs, ce collectif comprend des crues importantes survenues sur le haut Rhin, le Rhin supérieur, le Rhin moyen, le Rhin inférieur et les bras du Rhin aux Pays-Bas.

Le tableau 5.1 rassemble les crues historiques avec leurs débits de pointe homogénéisés à l'état 1977 (sans mesures de rétention) ainsi que les probabilités de crue à l'état 1977, telles qu'elles ont été utilisées dans des études antérieures.

<sup>2</sup> Un 1<sup>er</sup> rapport intermédiaire de la BfG a présenté l'inventaire de ces données réalisé selon des critères définis ainsi que les résultats des contrôles de plausibilité (voir références bibliographiques).

Probabilités de débit (état 1977)	Echelle Bâle [m³/s]	Echelle Maxau [m³/s]	Echelle Worms [m³/s]	Echelle Mayence [m³/s]	Echelle Kaub [m³/s]	Echelle Andernach [m³/s]	Echelle Cologne [m³/s]	Echelle Lobith [m³/s]
HQ <sub>10</sub>	3980	4100	4750	5700	5800	8850	9010	9459
HQ <sub>100</sub>	4780	5300	6300	7900	8000	12200	12000	12675
HQ <sub>extrême</sub>	5480	6500	7600	10300	10400	15250	15300	16000
Débits de pointe								
Crue 1882/1883	4100	6260	7520	9668	9653	12470	12886	10690*
Crue 1918/1919	3850	4480	4710	5163	5047	6680	6748	6896
Crue 1919/1920	3160	4520	5380	7235	7365	10849	10951	11394
Crue 1925/1926	2150	3260	4234	5923	5992	10394	11021	11694
Crue 01/1955	3240	4560	6160	6836	6832	10340	10324	10328
Crue 02/1957	3340	4140	4590	5606	5634	7530	7580	7807
Crue 02/03 1970	3190	4200	4990	4823	7105	9340	10137	10780
Crue 05/1978	3000	4180	5270	5800	5857	6339	6401	6656
Crue 02/1980	3370	4160	4763	5939	6010	8666	9084	9630
Crue 04/1983	2249	4110	4990	6178	6318	9736	9888	9817
Crue 05/1983	3078	4260	5250	5967	6227	9768	9953	10043
Crue 03/1988	3273	4090	5270	7161	7240	10029	10022	10852
Crue 12/1993	2109	3020	4765	5567	6493	10600	10800	11039
Crue 01/1995	3485	4080	4245	5935	6670	10200	10940	11885
Crue 10/1998	2818	3320	3675	4881	5454	8360	8989	9487
Crue 02/1999	3833	4490	4945	5597	6022	7778	8082	7974
Crue 05/1999	5059	4720	4577	4455	4662	4643	4671	4516
Crue 01/2003	2036	2810	3522	5060	5540	8722	9329	9451

Probabilités de crue à l'échelle de Bâle : LUBW/OFEV, février 2010 : débits de crue - profil longitudinal pour le haut Rhin

Probabilités de crue aux échelles de Maxau et Worms : GT Statistiques, 2001 (valeurs relatives aux crues d'hiver)

Probabilités de crue aux échelles de Mayence, Kaub et Andernach : HSG Kaub-Rolandswerth, 1992 et débits théoriques pour les cartes des zones inondables Rhin, 2009

Probabilités de crue à l'échelle de Cologne : Débits théoriques pour les cartes des zones inondables Rhin, 2009 et débits de crue de récurrences données aux échelles du Rhin, 2002

Probabilités de crue à Lobith : Débits théoriques pour les cartes des zones inondables Rhin, 2009 et Werklijn Lobith WD 10/2009

\* Les baisses de débit entre les échelles de Cologne et Lobith sont très probablement dues à des submersions de digues

Tab. 5.1: Débits de pointe et probabilités de crue à l'état 1977 pour l'identification 2010 des mesures

Le relevé des périodes de simulation pour chaque crue figure en annexe 3.

Les services associés ont procédé à des recensements détaillés des données d'entrée. On a rassemblé pour ce faire les hydrogrammes historiques de toutes les échelles pertinentes pour les calculs. Pour les calculs sur le Rhin supérieur jusqu'à Worms, ce sont les hydrogrammes de l'échelle de Bâle-Rheinhalle ainsi que ceux des affluents Wiese, canal Leopold, canal de décharge de l'Il, Kinzig, Ill, Acher/Rench, Moder, Murg, Sauer et Neckar. Pour le tronçon entre Worms et Lobith, ce sont les hydrogrammes des affluents Weschnitz, Modau, Main, Nahe, Wisper, Lahn, Moselle, Nette, Wied, Rhin, Ahr, Sieg, Wupper, Erft, Ruhr, Emscher et Lippe, auxquels s'ajoutent, aux fins de comparaison, les échelles du Rhin à Mayence, Kaub, Andernach, Cologne, Düsseldorf, Ruhrort, Wesel, Rees, Emmerich et Lobith (voir annexe 4a). Pour la partie néerlandaise, les données de l'Oude IJssel et du Twentekanaal ont été mises à disposition (annexe 4b), ce qui a permis de déterminer les apports issus de ruisseaux et de canaux de drainage (pour plus d'informations voir Deltares, 2010). La Meuse formant dans sa partie aval un delta commun avec le Rhin, des hydrogrammes ont également dû être pris en compte pour la Meuse.

## 5.2 Crues modélisées

Dans une seconde étape, les hydrogrammes ont été amplifiés à l'aide de facteurs sur la base de ces crues historiques, ce qui a permis de générer de nouvelles « crues modélisées » synthétiques (artificielles). Cette méthode utilise pour ce faire des facteurs uniformes pour le bassin du Rhin dans son ensemble. La méthode permet ainsi de conserver les particularités régionales des genèses des crues historiques.

Dans des études antérieures, la BfG et la LUBW ont, dans un premier temps, estimé de manière simplifiée les facteurs d'amplification des hydrogrammes (y compris de celui à l'échelle de Bâle) pour chaque crue. Les débits de dimensionnement le long du Rhin et les valeurs extrêmes HQ ont été utilisés comme valeurs d'orientation pour déterminer le plus grand facteur d'amplification de chaque crue.

On entend par débit de dimensionnement le débit maximal pouvant s'écouler dans le Rhin sans impact négatif et dans le respect du franc-bord respectif. Le tableau 5.2 présente un relevé des débits de dimensionnement pour les tronçons du Rhin en aval de Bâle.

PK du Rhin	Champ d'application	Débit de dimensionnement [m³/s] (Situation 2010) (pour les tronçons court-circuités : somme des débits du Vieux Rhin et du canal)	
		gauche	droite
de - à			
166 - 282	Bâle – décharge de l'III (dans le périmètre du barrage de Strasbourg)	6000	6000
282 - 298	Retenue de Strasbourg (après la décharge de l'III) – Débouché de la Kinzig (dans le périmètre du barrage de Gamsheim)	6500	6500
298 - 309	Débouché de la Kinzig – Retenue de Gamsheim (après le débouché de la Kinzig)	7200	7200
309 - 334	Retenue d'Iffezheim	7500	7500
334 - 428	En aval d'Iffezheim – débouché du Neckar :	5000	5000
428 - 497	Débouché du Neckar – débouché du Main :	6000	6000
497 - 529	Débouché du Main – débouché de la Nahe	7960	
	Au niveau du Rhin moyen, protection locale sporadique contre les inondations rapportée à des débits de dimensionnement variables		
640 - 659	Frontière NRW – débouché de la Sieg	12600	12600
659 - 780	Débouché de la Sieg – débouché de la Ruhr	12900	12900
780 - 814	Débouché de la Ruhr – débouché de la Lippe	14800	14800
814 - 845	Débouché de la Lippe – Grietherorter Altrhein	14700	14700
845 - ~ 862	Grietherorter Altrhein – frontière NRW/Pays-Bas	14500	14500
A partir de ~ 862	A partir de la frontière NRW/Pays-Bas	16000	16000

Tab. 5.2: Débits de dimensionnement pour les ouvrages hydrauliques (pour l'essentiel digues des hautes eaux et digues, indications sans revanche), mise à jour : 2010

Le groupe d'experts HVAL a convenu de ne pas dépasser dans la mesure du possible les valeurs extrêmes HQ ( $\sim HQ_{1000}$ ) en générant les crues modélisées. On prend comme valeur d'orientation le débit maximal à hauteur de l'échelle du Rhin  $\leq 1.15 * HQ_{\text{extrême}}$ . Le 1<sup>er</sup> rapport intermédiaire de la BfG fait état de la méthode et des résultats de cette estimation provisoire.

Les hydrogrammes multipliés par les facteurs d'amplification (FA) estimés (et éventuellement limités à la capacité maximale) ont ensuite été utilisés comme données d'entrée dans le modèle synoptique Bâle - Worms pour calculer les débits du Rhin correspondant à l'état d'aménagement 1977. Dans le cas de la limitation des hydrogrammes au débit maximal, cet hydrogramme est « bloqué » au niveau du maximum respectif (voir annexe 5), c'est-à-dire qu'il est limité à la valeur d'amplification qui permet à l'hydrogramme d'atteindre le débit maximal possible.

Les valeurs maximales des FA pour les affluents du Rhin supérieur ont été ajustées sur la base des débits de pointe calculés pour les échelles de Maxau et Worms de sorte que l' $HQ_{\text{extrême}}$  aux échelles de Maxau et Worms est atteint, mais n'est pas sensiblement dépassé.

Pour finir, tous les autres hydrogrammes en aval de Worms ont été amplifiés à l'aide des facteurs ainsi déterminés, éventuellement en les limitant aux débits maximaux indiqués dans l'annexe 5.

Le tableau 5.3 donne un aperçu des facteurs.

Crues	Facteurs d'amplification						
	Hausse du FA choisie	FA1	FA2	FA3	FA4	FA5	FA <sub>max.</sub>
1882	0,05	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
1918	0.10	0,90	1,00	1,15	1,25	1,35	1,45
1919	0.05	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20
1925	0.15	0,85	1,00	1,15	1,30	1,45	1,60
1955	0.05	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20
1957	0.10	0,90	1,00	1,05	1,15	1,25	1,35
1970	0.10	0,90	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40
1978	0.10	0,90	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40
1980	0.15	0,85	1,00	1,15	1,30	1,45	1,60
1983 avril	0.10	0,90	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40
1983 mai	0.10	0,90	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40
1988	0.10	0,90	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40
1993	0.10	0,90	1,00	1,15	1,25	1,35	1,45
1995	0.15	0,85	1,00	1,10	1,25	1,40	1,55
1998	0.20	1,00	1,30	1,50	1,70	1,90	2,10
1999 février	0.15	0,90	1,00	1,15	1,25	1,35	1,50
1999 mai	0.05	0,95	1,00	1,10	1,15	1,20	1,25
2003	0.25	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25

Tab. 5.3: Facteurs d'amplification utilisés pour générer les crues modélisées

## 6. Analyse de la réduction des crues sans prise en compte de submersions de digues

Comme les statistiques de crues se réfèrent fondamentalement aux conditions de débit sans application des mesures de rétention, la classification statistique de la probabilité des crues modélisées par le GE HVAL est une modélisation ne prenant pas non plus en compte, dans un premier temps, l'impact des mesures de rétention. Dans le cas du Rhin supérieur, cette modélisation correspond à l'état d'aménagement 1977.

Dans une seconde étape, la modélisation des crues sélectionnées par le GE HVAL porte sur l'état d'aménagement 1995 que le Plan d'Action contre les Inondations de la CIPR prend comme référence pour estimer les réductions de crue obtenues en 2005, 2010, 2020 et 2020+.

Le LUBW et la BfG ont réalisé les simulations de déroulement d'ondes pour l'état de référence 1995, pour l'état 2005, pour l'état actuel 2010, pour l'état pronostiqué en 2020 et pour celui pronostiqué en 2020+. Les résultats des états 1977, 1995, 2005, 2010, 2020 et 2020+ sont mis à disposition sous forme de diagrammes pour les échelles (ou tronçons fluviaux) de Maxau, Worms, Mayence, Kaub, Andernach, Cologne et Lobith, et sous forme de tableaux (voir annexe).

Dans un premier temps, les diagrammes présentent pour Maxau et Worms (état de référence 1977) dans un ordre (de classement) croissant les pointes de débit calculées pour chacune des 7 échelles de référence pour l'état de référence 1995. Cette liste de classement des crues pour l'état 1995 est conservée pour la représentation des résultats obtenus pour les états 1977, 2005, 2010, 2020 et 2020+. Elle permet d'identifier, pour chacune des crues, les différences dues à l'effet des mesures aux différents horizons. Les valeurs de débit statistiques  $HQ_{10}$ , BHQ (débit de dimensionnement),  $HQ_{100}$ ,  $HQ_{200}$ ,  $HQ_{\text{extrême}}$  valables pour l'état 1977 sont également reportées sur l'axe des ordonnées à gauche.

Les différences de niveaux de pointe (en cm) constatées ont été calculées entre les états 1977-1995, 2005-1995, 2010-1995, 2020-1995 et 2020+-1995 et sont également représentées dans ces diagrammes sur l'axe des ordonnées à droite pour les échelles de Maxau, Worms, Mayence, Kaub et Andernach.

En aval du débouché de la Sieg dans le Rhin, les pointes de débit des échelles de Cologne et de Lobith ont été représentées dans les diagrammes sous forme de réductions moyennes des niveaux d'eau des pointes rapportées à un tronçon, car les résultats des échelles de Cologne et Lobith utilisées ici ne sont pas représentatifs de leurs tronçons. La pointe de débit de l'échelle de Cologne est représentée dans le diagramme correspondant par les réductions moyennes des niveaux d'eau des pointes sur le tronçon correspondant de 120,9 km (242 profils transversaux) entre le débouché de la Sieg et celui de la Ruhr. Les réductions moyennes des niveaux d'eau des pointes, également rapportées au tronçon compris entre le débouché de la Ruhr dans le Rhin et le Pannerdensche Kop - de même que celles rapportées au Nederrijn/Lek, au Waal et à l'IJssel - sont représentées par rapport au débit de pointe de l'échelle de Lobith.

Vu l'état de référence retenu (1995) et le calcul de la différence  $HW_{Zx} - HW_{1995}$ , une valeur négative dans les diagrammes correspond à une réduction du niveau de pointe par rapport à l'état 1995 et une valeur positive à une hausse du niveau de pointe par rapport à 1995.

## 6.1 Evaluation du tronçon du Rhin Maxau – Worms à l'état de référence 1977

Les résultats des calculs présentés ci-dessous pour le tronçon du Rhin entre Maxau et Worms se fondent sur les analyses que la LUBW a réalisées à l'aide du modèle synoptique entre Bâle et Worms. Les graphiques correspondants représentent l'état d'aménagement à considérer par rapport à l'état de référence.

Etats d'aménagement 1977 et 1995

Les figures 6.1 à 6.10 rassemblent les valeurs de pointe pour les échelles de Maxau et Worms conformément à leur classement rapporté à l'état de référence 1977.

Impact des mesures opérationnelles **en 1995 à l'échelle de Maxau** :

- Les dispositifs de rétention ne sont pas mis en service jusqu'à un HQ<sub>10</sub> environ.
- En situation de crue de faible ampleur, il est possible que les pointes augmentent (légèrement) à l'état 1995 par rapport à l'état 1977. Ce ci est imputable à l'abaissement préalable du niveau d'eau au droit du barrage agricole de Kehl et de celui de Breisach.
- Les réductions de débit les plus importantes sont atteintes entre le HQ<sub>10</sub> et le HQ<sub>200</sub>. Lorsque les crues HVAL sont supérieures à un HQ<sub>100</sub> environ, certaines d'entre elles dépassent le débit de dimensionnement.
- La réduction maximale de la pointe sur une crue modélisée est d'environ 760 m<sup>3</sup>/s (pour un HQ<sub>150</sub> environ).

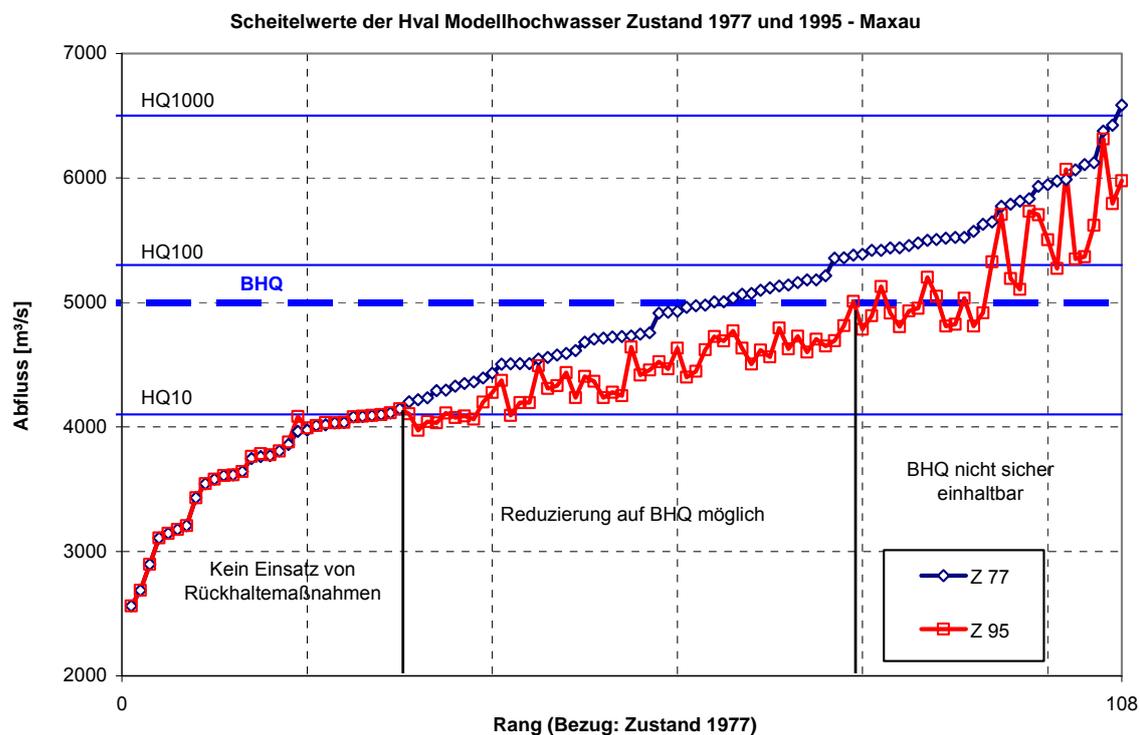


Fig. 6.1 : Valeurs de débit de pointe pour les états d'aménagement 1977 et 1995 à l'échelle de Maxau. Classement rapporté à l'état 1977.

### Impact des mesures opérationnelles en 1995 à l'échelle de Worms :

- Aucune mesure de rétention n'était encore opérationnelle en 1995 entre Maxau et Worms. De ce fait, il n'existe pas à l'état 1995 de mesures susceptibles d'être mises en service pour réduire les pointes à l'échelle de Worms.
- En fonction de l'interaction entre la pointe de la crue du Rhin en amont du Neckar et celle de la crue même du Neckar, on n'observe pas de tendance claire au niveau de la réduction des pointes en fonction de la récurrence de crue à Worms.
- La réduction maximale de la pointe d'une crue modélisée est d'environ 660 m<sup>3</sup>/s (pour un HQ<sub>200</sub> environ).

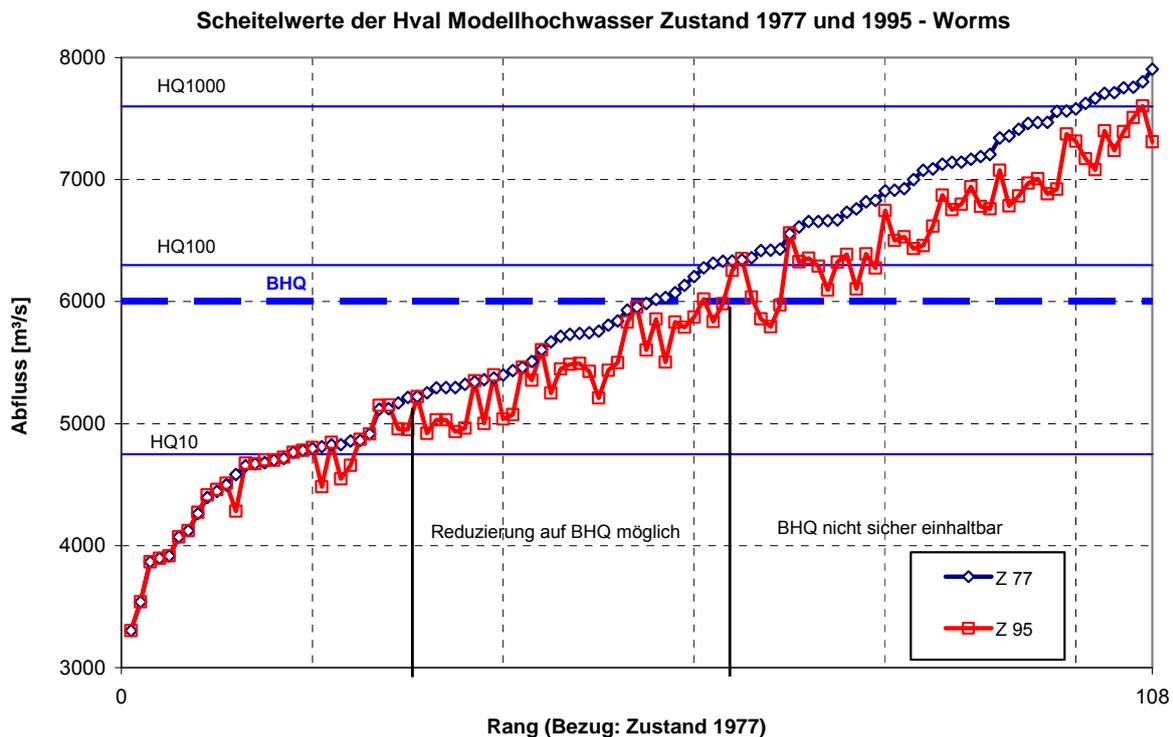


Fig. 6.2 : Valeurs de débit de pointe pour les états d'aménagement 1977 et 1995 à l'échelle de Worms. Classement rapporté à l'état 1977.

### Réduction atteinte en 2005 par rapport à 1995

Les figures 6.3 et 6.4 rassemblent les valeurs de pointe des crues modélisées pour les états 1995 et 2005 à l'échelle de Maxau et de Worms. Il en ressort les principaux résultats pour l'état d'aménagement 2005. En amont de l'échelle de Maxau, les polders d'Erstein et Söllingen sont venus s'ajouter aux mesures existantes par rapport à l'état 1995. En aval de Maxau, les polders Flotzgrün et île de Koller ainsi que le recul de la digue à Worms-Bürgerweide sont également opérationnels.

#### Impact des mesures opérationnelles en 2005 à l'échelle de Maxau :

- Les pointes de crue continuent de baisser par rapport à l'état 1995. Les réductions supplémentaires des pointes de crue ne sont pas aussi prononcées que celles relevées entre l'état 1995 et l'état 1977. Ce phénomène est dû au fait que chaque réduction supplémentaire du débit de pointe doit faire effet sur une phase plus large (c'est-à-dire prolongée dans le temps) de l'onde de crue et que l'on a donc besoin d'un volume disproportionnellement plus élevé (« progression du volume »).
- Le dépassement du débit de dimensionnement est un peu plus rare que pour l'état 1995. Il est possible de réduire les crues HVAL jusqu'à un HQ<sub>120</sub> environ tout en respectant le débit de dimensionnement.
- La réduction maximale par rapport à l'état 1995 est de 290 m<sup>3</sup>/s.
- La réduction maximale par rapport à l'état 1977 est de 959 m<sup>3</sup>/s.

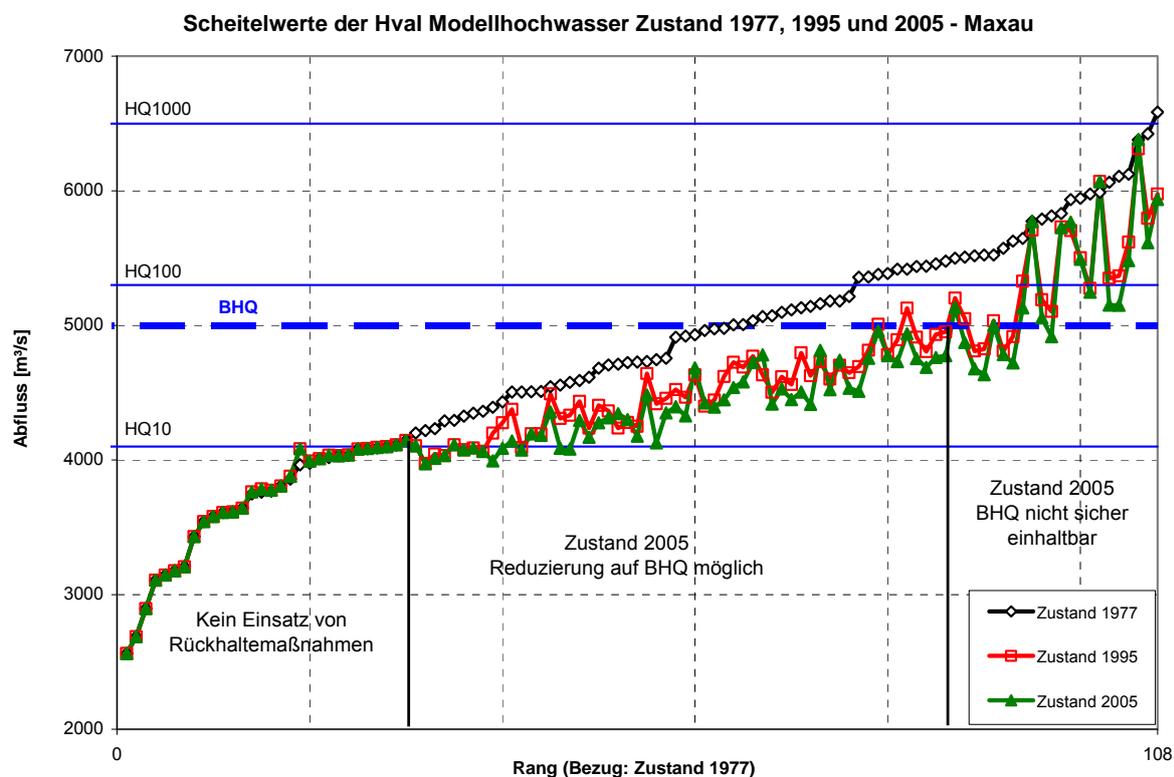


Fig. 6.3 : Valeurs de débit de pointe pour les états d'aménagement 1977, 1995 et 2005 à l'échelle de Maxau. Classement rapporté à l'état 1977.

### Impact des mesures opérationnelles en 2005 à l'échelle de Worms :

- L'impact des nouvelles mesures de rétention (env. 13 millions de m<sup>3</sup> en aval de Maxau) est nettement visible, même en situation de crues de période de retour élevée.
- La réduction la plus importante par rapport à l'état 1995 est d'env. 350 m<sup>3</sup>/s.
- La réduction maximale par rapport à l'état 1977 est de 969 m<sup>3</sup>/s.

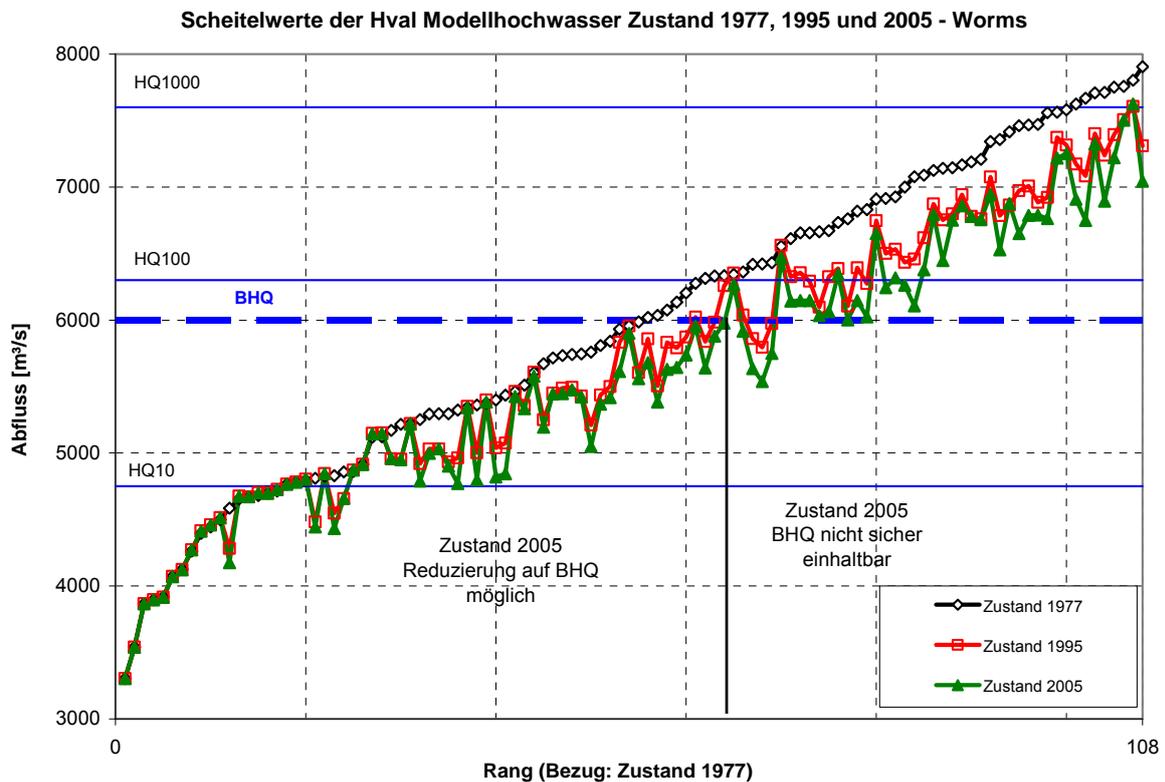


Fig. 6.4 : Valeurs de débit de pointe pour les états d'aménagement 1977, 1995 et 2005 à l'échelle de Worms. Classement rapporté à l'état 1977.

### **Réduction atteinte en 2010 par rapport à 1995**

Seul le recul de digue à Worms-Mittlerer Busch dont le volume est de quelque 2 millions de m<sup>3</sup> est venu s'ajouter aux mesures existantes entre 2005 et l'état d'aménagement 2010. Les valeurs de débit de pointe calculées sont présentées dans les figures 6.5 et 6.6.

### **Impact des mesures opérationnelles en 2010 à l'échelle de Maxau :**

- Aucune nouvelle mesure n'ayant été mise en service sur le tronçon jusqu'à Maxau par rapport à l'état 2005, on obtient pour l'état 2010 les mêmes résultats de calcul que pour l'état 2005.

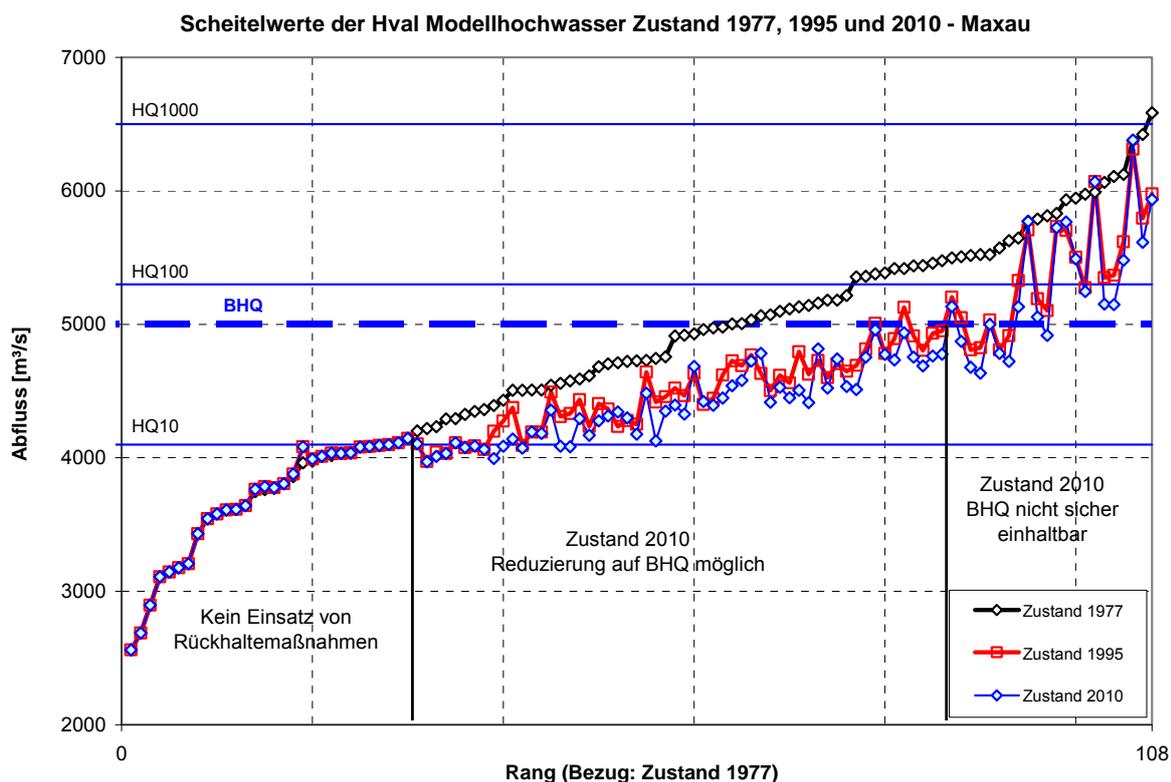


Fig. 6.5 : Valeurs de débit de pointe pour les états d'aménagement 1977, 1995 et 2010 à l'échelle de Maxau. Classement rapporté à l'état 1977.

### Impact des mesures opérationnelles en 2010 à l'échelle de Worms :

- En regard de l'augmentation très faible du volume de rétention par rapport à l'état 2005, les différences au niveau des valeurs de débit de pointe ne sont que très faibles.

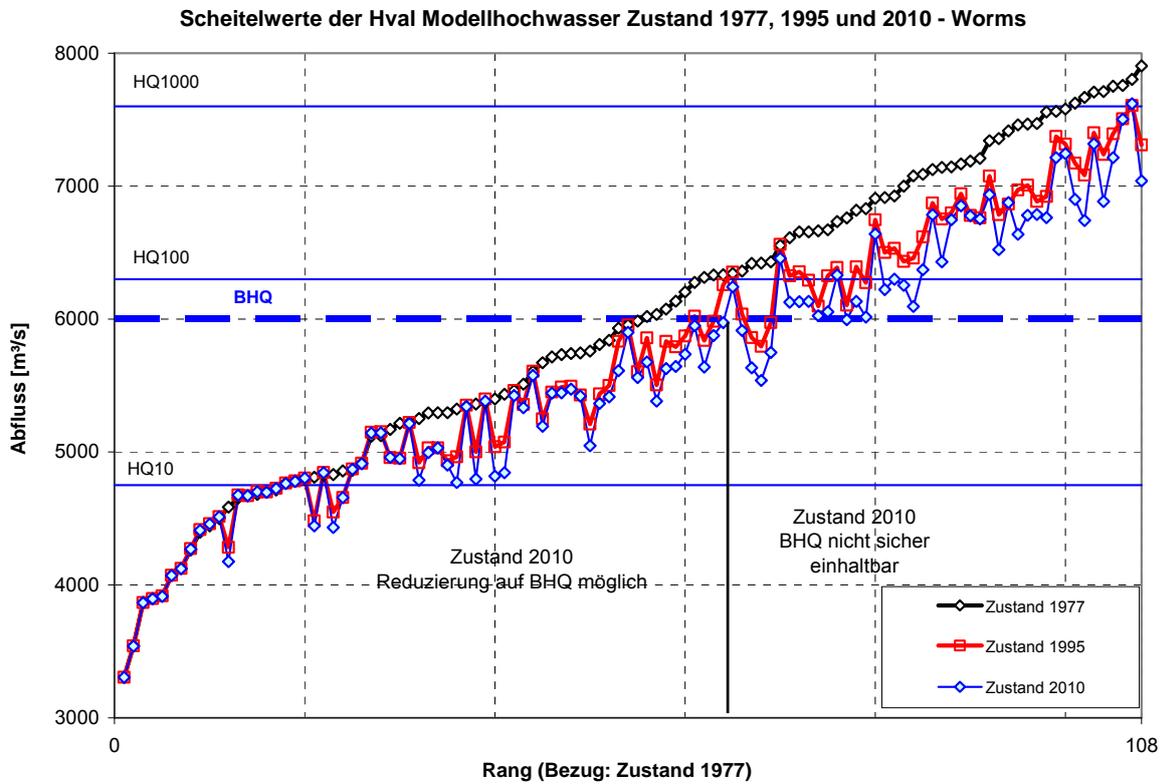


Fig. 6.6 : Valeurs de débit de pointe pour les états d'aménagement 1977, 1995 et 2010 à l'échelle de Worms. Classement rapporté à l'état 1977.

### **Réduction atteinte en 2020 par rapport à 1995**

On note à l'état 2020 une hausse sensible du volume de rétention pour les mesures sur le Rhin supérieur. Sur le tronçon jusqu'à Maxau, cette hausse est de quelque 24 millions de m<sup>3</sup> auxquels viennent s'ajouter 38 millions de m<sup>3</sup> entre Maxau et Worms.

#### **Impact des mesures opérationnelles en 2020 à l'échelle de Maxau :**

- Le dégravolement du lit majeur à hauteur de Weil – Breisach peut avoir des impacts sur les pointes, même en situation de débits relativement faibles.
- La mise en service du barrage agricole de Breisach à partir de l'état 2020 comprend également une pré-vidange, ce qui peut donner lieu à des rehaussements en cas de faibles débits (masqués par l'effet réducteur du dégravolement du lit majeur mentionné plus en avant).
- Le dépassement du débit de dimensionnement se réduit par rapport à l'état 2005 dans la mesure où on réussit à présent à abaisser au débit de dimensionnement les crues HVAL d'un débit légèrement supérieur à HQ<sub>150</sub> (voir figure 6.7).
- La réduction maximale du débit de pointe par rapport à l'état 1977 est de 1.090 m<sup>3</sup>/s.
- La réduction du débit de pointe par rapport à l'état 1995 atteint jusqu'à 392 m<sup>3</sup>/s.

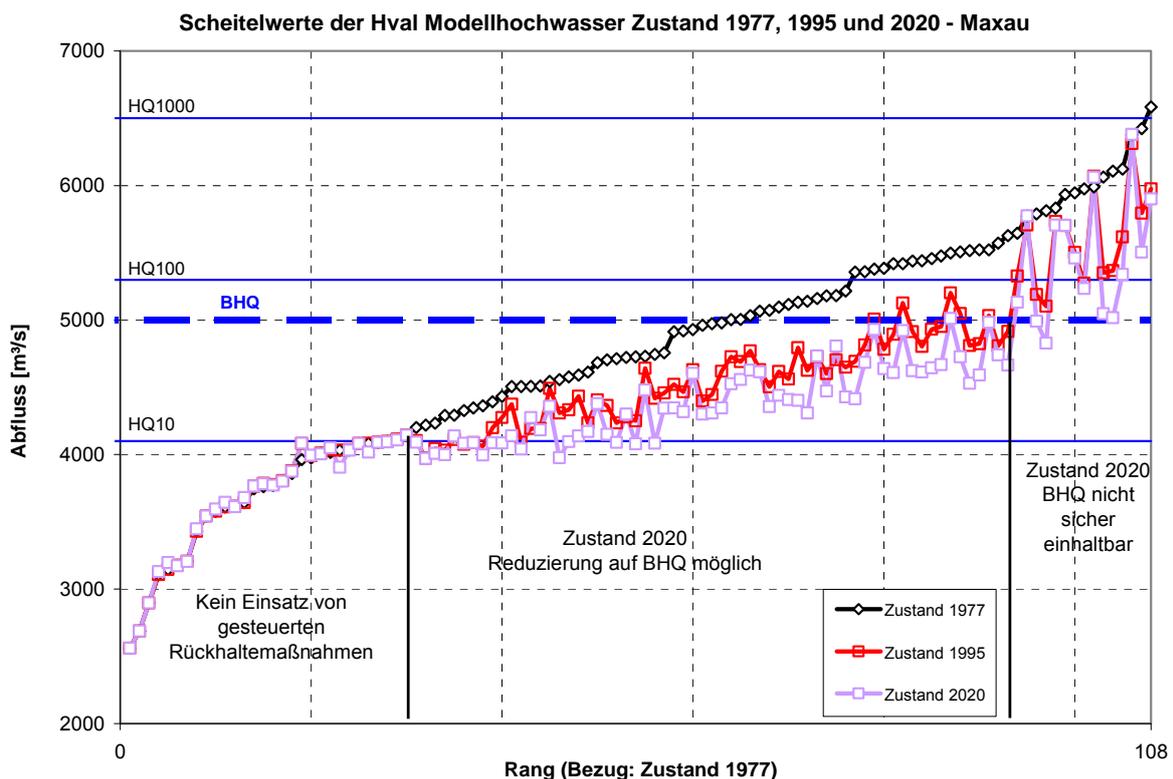


Fig. 6.7 : Valeurs de débit de pointe pour les états d'aménagement 1977, 1995 et 2020 à l'échelle de Maxau. Classement rapporté à l'état 1977.

### Impact des mesures opérationnelles en 2020 à l'échelle de Worms :

- On relève une nette réduction des débits de pointe par rapport à 2010 pour un grand nombre de crues HVAL, notamment sur les crues supérieures à un HQ<sub>100</sub> (voir figure 6.8).
- Les débits de pointe baissent de 1.300 m<sup>3</sup>/s au plus par rapport à l'état 1977.
- Par rapport à l'état 1995, les réductions des débits de pointe s'élèvent jusqu'à 714 m<sup>3</sup>/s.
- On notera que le nombre de crues pour lesquelles le débit de dimensionnement ne peut être respecté avec fiabilité ne change pratiquement pas. Ceci est dû à la crue HVAL d'octobre 1998 (amplifiée par le facteur 1,70). Bien que la réduction des débits de pointe soit plus importante entre l'état 2020 et les états d'aménagement antérieurs, il n'est pas possible de passer en deça du débit de dimensionnement. Ce phénomène s'explique par l'arrivée extrêmement précoce de la crue du Neckar et son débit de pointe relativement élevé (> 3.300 m<sup>3</sup>/s). L'interaction de ces deux éléments fait que les mesures de rétention sur le tronçon en amont de Maxau sont pratiquement sans effet sur la valeur de pointe observée à l'échelle de Worms.

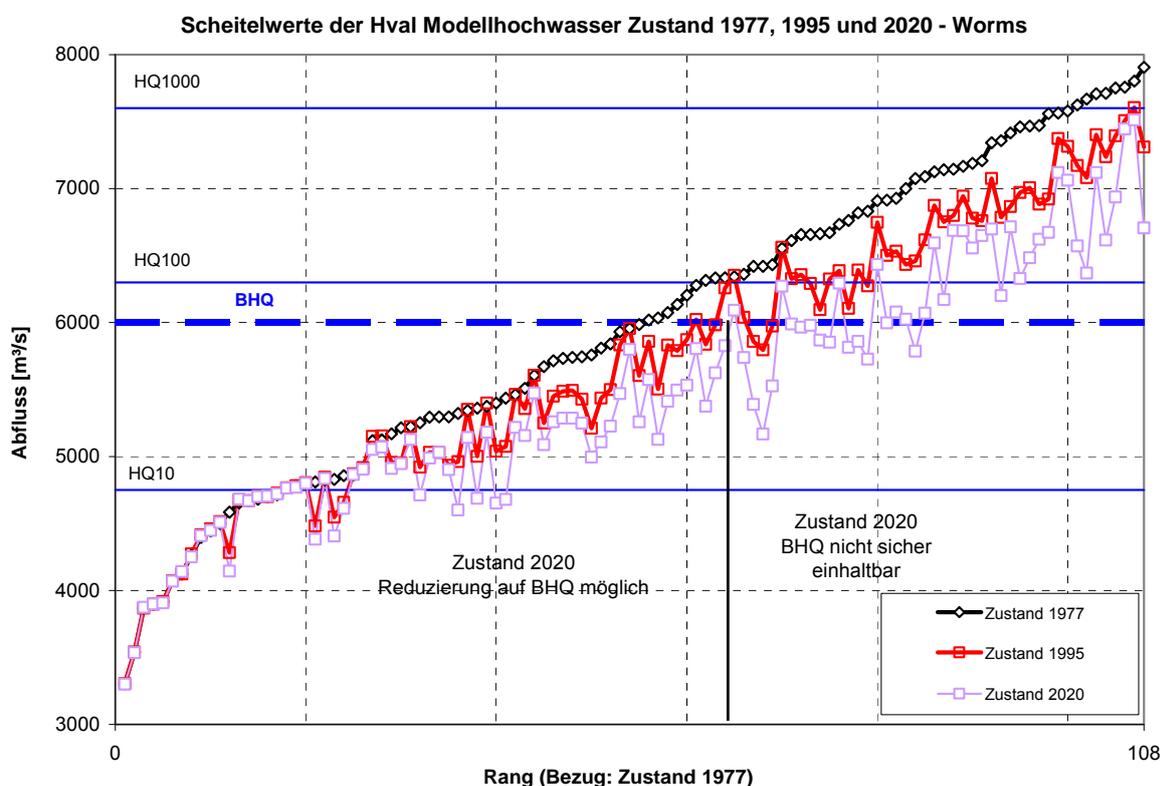


Fig. 6.8 : Valeurs de débit de pointe pour les états d'aménagement 1977, 1995 et 2020 à l'échelle de Worms. Classement rapporté à l'état 1977.

### **Réduction en 2020+ par rapport à 1995**

Pour l'état final 2020+, on obtient par rapport à l'état 2020 une augmentation du volume de rétention opérationnel de quelque 106 millions de m<sup>3</sup> dont environ 22 millions de m<sup>3</sup> ne sont pas manœuvrables. Sur cette hausse globale, environ 59 millions de m<sup>3</sup> se trouvent sur le tronçon entre Bâle et Maxau. 47 millions de m<sup>3</sup> viennent s'y ajouter en aval de Maxau (jusqu'à Worms).

### **Impact des mesures opérationnelles en 2020+ à l'échelle de Maxau :**

- Le volume de dégravolement à hauteur de Weil – Breisach est d'environ 25 millions de m<sup>3</sup>. Ce dispositif de rétention non manœuvrable est donc sensiblement étendu par rapport à l'état d'aménagement 2020 (d'environ 22 millions de m<sup>3</sup>).
- Le nouveau volume de rétention constitué par les dispositifs manœuvrables de Wyhl/Weisweil, Ichenheim/Meissenheim/Ottenheim (IMO), Freistett et Bellenkopf s'élève au total à env. 37 millions de m<sup>3</sup>.
- On obtient par rapport à l'état d'aménagement 1995 une réduction maximale des débits de pointe de 670 m<sup>3</sup>/s.
- Rapportée à l'état 1977, la réduction maximale des débits de pointe représente 1.379 m<sup>3</sup>/s.
- A l'échelle de Maxau, les mesures de rétention disponibles à l'état 2020+ permettront d'abaisser un débit de crue situé entre un HQ<sub>150</sub> et un HQ<sub>200</sub> au débit de dimensionnement.

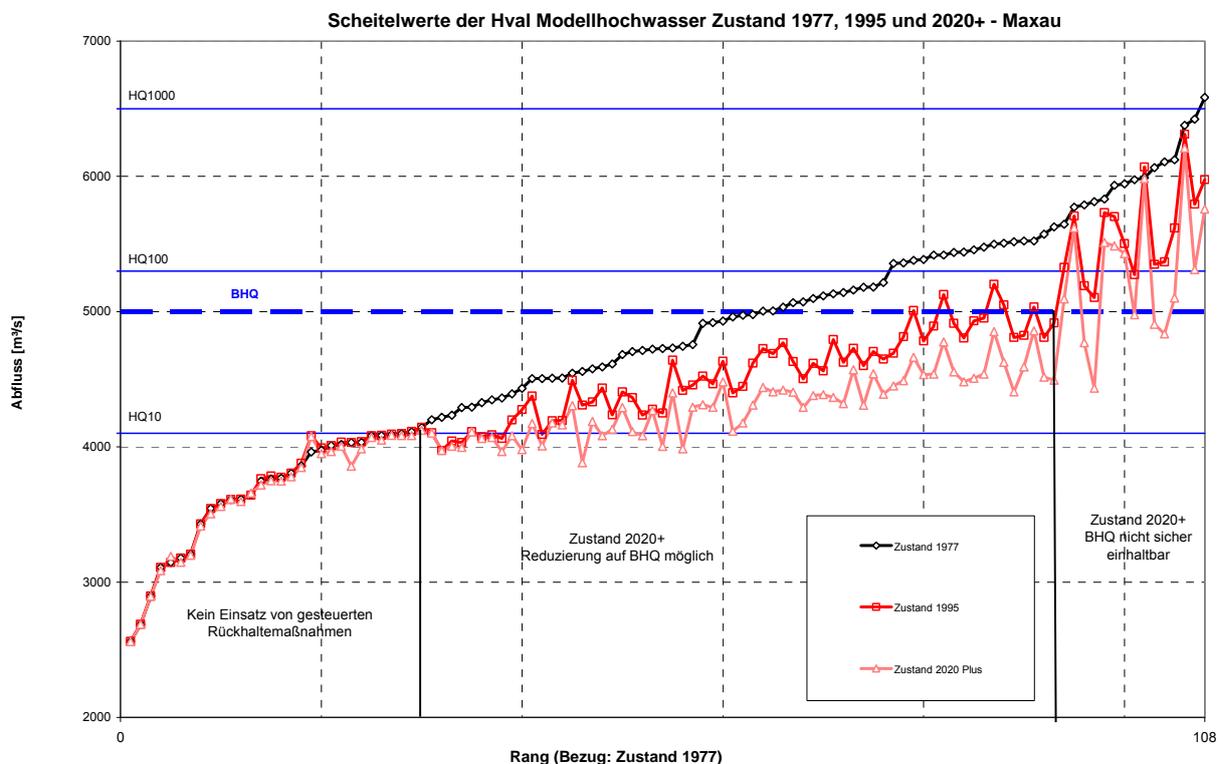


Fig. 6.9 : Valeurs de débit de pointe pour les états d'aménagement 1977, 1995 et 2020+ à l'échelle de Maxau. Classement rapporté à l'état 1977.

### Impact des mesures opérationnelles en 2020+ à l'échelle de Worms :

- Viennent s'ajouter aux mesures de rétention mentionnées ci-dessus le polder Elisabethenwört et l'espace de réserve Hördt en aval de Maxau.
- Ces deux mesures manœuvrables font augmenter le volume de rétention à env. 47 millions de m<sup>3</sup>.
- Par rapport à l'état d'aménagement 1995, la réduction maximale du débit de pointe à l'échelle de Worms est de 1.164 m<sup>3</sup>/s.
- La réduction maximale des débits de pointe est de 1.750 m<sup>3</sup>/s par rapport à l'état 1977.
- Comme pour l'état 2020, il n'est pas possible pour l'état 2020+ d'abaisser la crue d'octobre 1998 (facteur d'amplification de 1,70) au-dessous du débit de dimensionnement. Comme déjà indiqué pour l'état 2020, ce phénomène s'explique par l'arrivée extrêmement précoce et un débit de pointe relativement élevé pour le Neckar. Malgré l'impact des mesures de rétention qui permet de réduire sensiblement le débit de pointe, même sur de nombreuses crues aux débits de pointe supérieurs à un HQ<sub>100</sub>, la plage dans laquelle le débit de dimensionnement ne peut pas être fiablement respecté reste inchangée par rapport à l'état 2020, ce qui est imputable à l'influence de la crue d'octobre 1998.

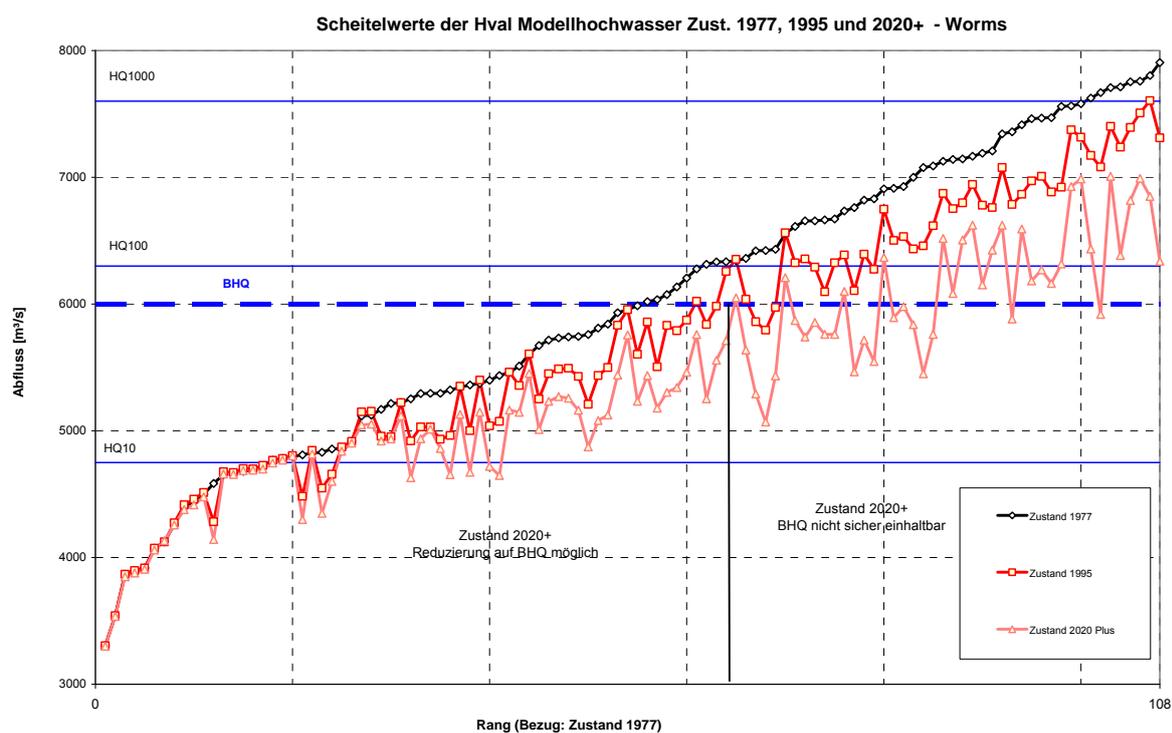


Fig. 6.10 : Valeurs de débit de pointe pour les états d'aménagement 1977, 1995 et 2020+ à l'échelle de Worms. Classement rapporté à l'état 1977.

L'état de référence 1977 a été choisi dans les figures 6.1 à 6.10 pour satisfaire aux conditions particulières en présence sur le Rhin supérieur.

## **6.2 Evaluation du tronçon Rhin supérieur (Maxau) – delta du Rhin (Lobith) à l'état de référence 1995**

Les résultats de calculs indiqués ci-dessous pour le tronçon du Rhin situé entre Maxau et le delta du Rhin (Lobith) se fondent sur les analyses qu'ont réalisées la LUBW avec le modèle synoptique entre Bâle et Worms et la BfG à l'aide du modèle SOBEM depuis Worms jusqu'au delta du Rhin (échelle de Lobith). Les graphiques correspondants représentent l'état d'aménagement à considérer par rapport à l'état de référence 1995.

On trouvera dans la figure 6.11 pour l'échelle de Maxau et dans la figure 6.12 pour celle de Worms la représentation graphique des valeurs de pointe [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] et des réductions des débits de pointe [ $\text{cm}$ ] entre les différents états d'aménagement rapportés à l'état 1995.

En résumé, on peut retenir les points essentiels suivants sur l'impact des mesures de rétention sur le Rhin supérieur :

- (1) Les dispositifs de rétention ne sont généralement pas mis en service jusqu'à un  $\text{HQ}_{10}$  environ. A partir de l'état d'aménagement 2020, il est possible que des effets se fassent ressentir sur les pointes en cas de plus faibles débits du fait du décaissement du lit majeur entre Weil et Breisach.
- (2) En situation de crue de faible ampleur, il est possible que les pointes augmentent faiblement par rapport à l'état 1977. Cette hausse est due aux vidanges effectuées au droit du barrage agricole de Kehl (à partir de l'état d'aménagement 1995) et de celui de Breisach (à partir de l'état 2020).
- (3) En fonction de l'interaction entre la pointe de la crue du Rhin en amont du Neckar et celle de la crue même du Neckar, on n'observe pas de tendance claire au niveau de la réduction des pointes en fonction de la récurrence de crue à Worms. (Exemple de la crue modélisée d'octobre 1998 : Cette crue se caractérise par une arrivée extrêmement précoce de la crue du Neckar et un débit de pointe relativement élevé ( $> 3.300 \text{ m}^3/\text{s}$ ). L'interaction de ces deux éléments fait que les mesures de rétention sur le tronçon en amont de Maxau sont pratiquement sans effet sur la valeur de pointe observée à l'échelle de Worms.)

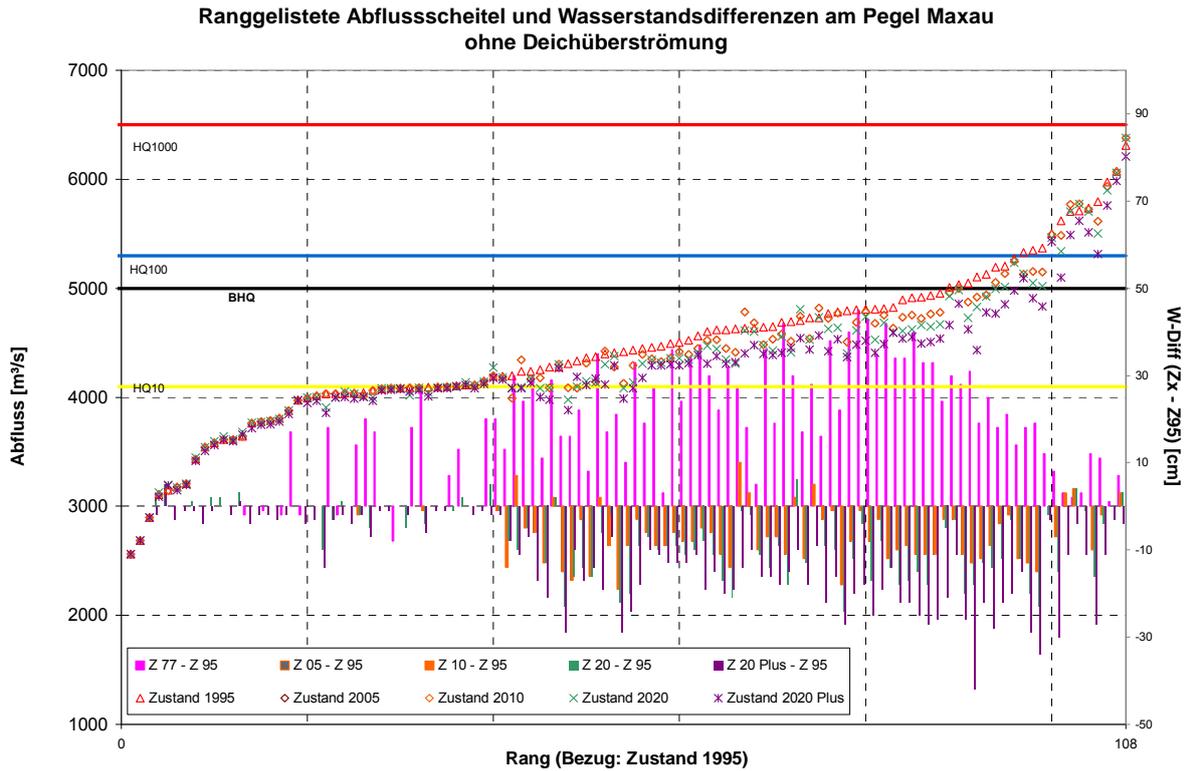


Fig. 6.11 : Valeurs de pointe pour les états d'aménagement 1995, 2005, 2010, 2020 et 2020+ à l'échelle de Maxau (calculées sans submersion de diges). Classement rapporté à l'état 1995.

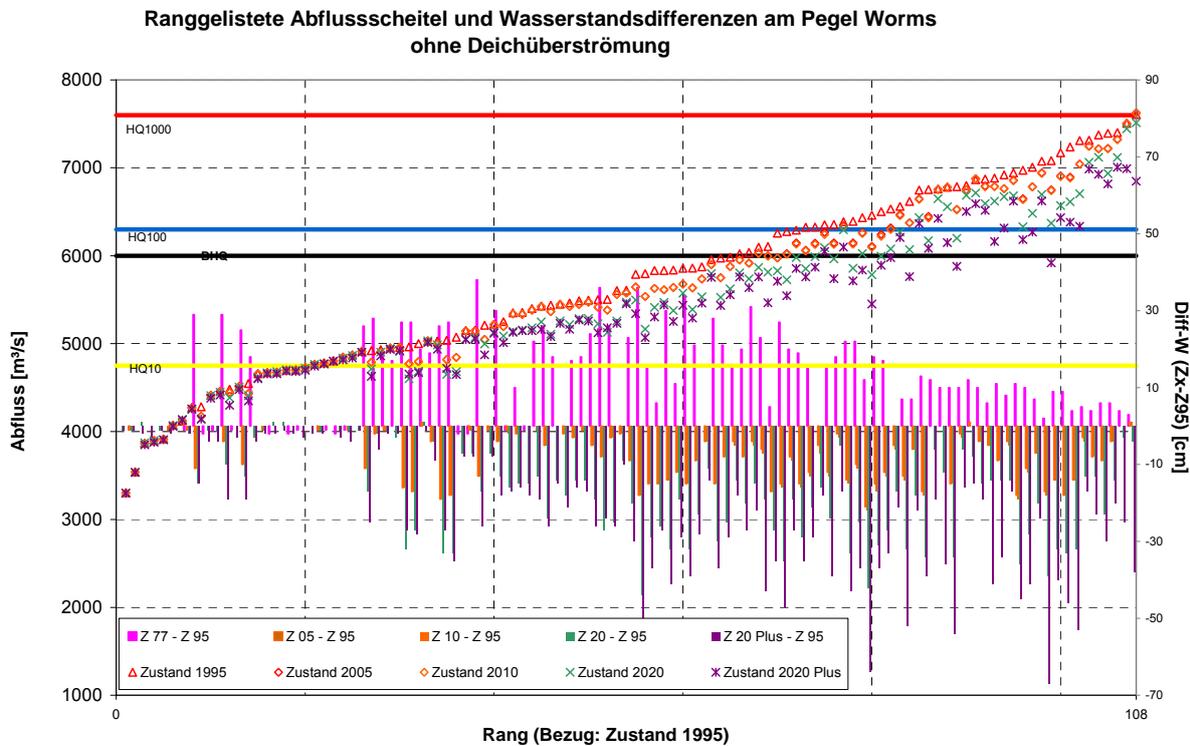


Fig. 6.12 : Valeurs de pointe pour les états d'aménagement 1995, 2005, 2010, 2020 et 2020+ à l'échelle de Worms (calculées sans submersion de diges). Classement rapporté à l'état 1995.

L'évaluation pour l'échelle de Mayence sans prise en compte des submersions de digues est présentée dans la figure 6.13. A l'aide des débits de pointe classés de l'état de référence 1995 (triangles rouges) et des valeurs statistiques de débit extrêmes représentées ici sous forme de lignes horizontales, il est possible d'affecter une probabilité d'occurrence aux résultats des calculs.

On s'aperçoit que les débits de pointe déterminés pour quelque 70 crues modélisées dépassent le débit de  $HQ_{10}$  à l'échelle de Mayence.  $HQ_{\text{extrême}}$  n'est pas dépassé. Les débits de pointe des états 2005 (cercles marron) et 2010 (losanges orange) également reportés sur l'axe des ordonnées à gauche représentent les pointes de débit influencées par les mesures à la date respective. Ceux-ci sont pour la plupart inférieurs aux pointes de débit relevées à l'état 1995 et traduisent donc l'impact réducteur de débit des mesures réalisées pour un état donné sur la pointe de l'onde. Du fait de l'impact non stationnaire des mesures en relation avec la vidange d'espaces mis en eau, mais aussi de l'utilisation de différents modèles pour les états du Rhin, il peut arriver dans certains cas que les pointes de débit augmentent légèrement.

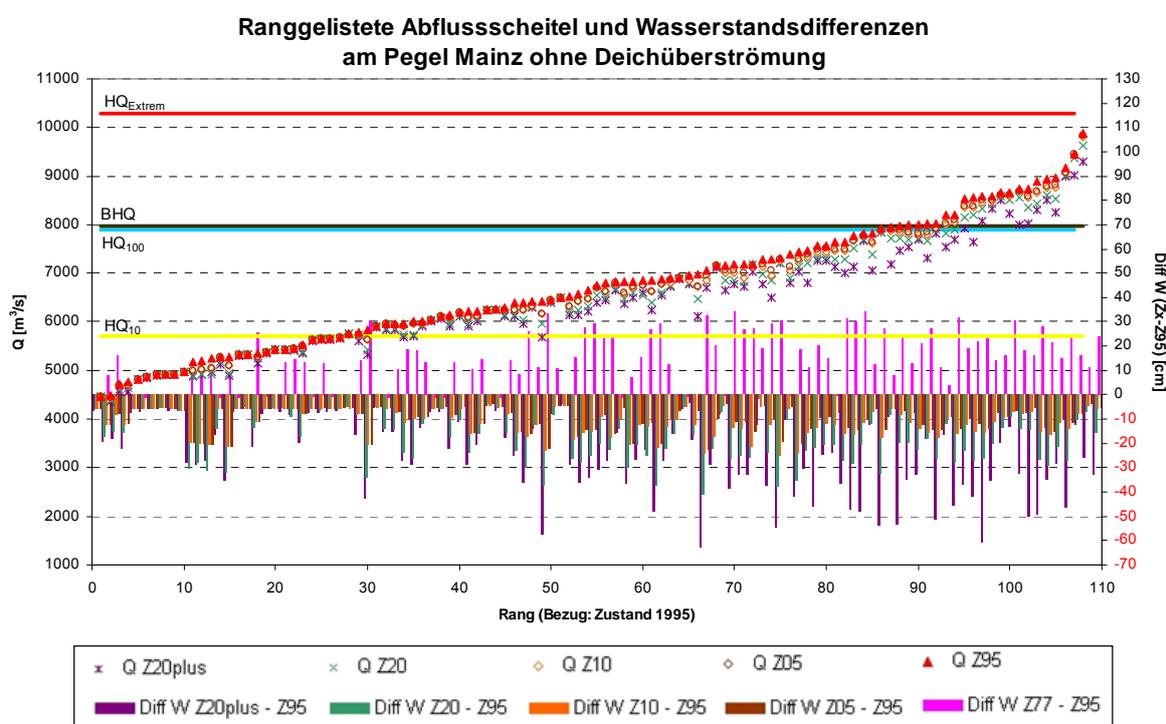


Fig. 6.13 : Débits de pointe et différences de niveaux d'eau pour les états d'aménagement 1995, 2005, 2010, 2020 et 2020+ à l'échelle de Mayence (calculées sans submersion de digues). Classement rapporté à l'état 1995.

A l'opposé des pointes de débit nettement divergentes entre 2020 (x vert) et 2020+ (astérisque violet) par rapport à 1995, la figure 6.13 ne fait pas apparaître de grande différence entre les états 2005 et 2010, ce que l'on pouvait attendre du fait des volumes de rétention supplémentaires d'env. 8,8 millions de  $m^3$  mis en service entre Bâle et Mayence sur la période 2005 - 2010. Les réductions sensibles du débit de pointe pour 2020 sont imputables à l'impact d'un volume de rétention supplémentaire de quelque 57,6 millions de  $m^3$  qu'il est prévu de mettre en place d'ici cette date entre Breisach et Mayence.

Les modifications des pointes de niveau d'eau (diff. W), reportées sur l'axe des ordonnées à droite, sont affectées aux différentes pointes de débit rapportées aux crues et aux états.

A l'état 1977, les pointes de niveau d'eau sont nettement supérieures à celles relevées à l'état 1995 (les différences par rapport à 1995 sont représentées ici sous forme de colonnes verticales roses). Les niveaux d'eau plus faibles en 1995 sont dus aux mesures de rétention déjà réalisées sur le Rhin supérieur entre 1977 et 1995, dont l'ordre de grandeur s'établit autour de 110 millions de m<sup>3</sup>. Un volume de rétention supplémentaire de quelque 57,3 millions de m<sup>3</sup> a été mis en service entre Bâle et Mayence sur la période 1995 - 2005. Les réductions des pointes de niveau d'eau en résultant, qui peuvent atteindre jusqu'à 23 cm, (colonnes marron - état 2005) ne se distinguent guère de celles déterminées pour 2010 jusqu'à 25 cm (colonnes orange). Un volume de rétention d'env. 8,8 millions de m<sup>3</sup> est venu s'y ajouter entre 2005 et 2010 sur le tronçon séparant Breisach et Mayence. De ce fait, les différences au niveau des réductions de niveau d'eau sont faibles entre 2005 et 2010. La baisse moyenne du niveau d'eau dans l'ordre de grandeur d'un HQ<sub>100</sub> est de 13 cm pour 2010, de 22 cm pour l'état 2020 et de 36 cm pour 2020+ par rapport à 1995.

L'évaluation de l'échelle de Kaub montre que le débit a subi des variations locales entre 1995 et 2010 du fait de modifications morphologiques du lit mineur (érosion du lit). Si l'on considère notamment différentes crues fréquentes, on relève ici des réductions du niveau d'eau bien que les débits augmentent.

Les réductions de la pointe de niveau d'eau, qui peuvent atteindre jusqu'à 34 cm pour l'état 2010 et jusqu'à 31 cm à l'état 2005 par rapport à l'état de référence 1995 sont à nouveau représentées sous forme de colonnes verticales (orange et marron). Les réductions des débits de pointe et des pointes de niveau d'eau sont par ailleurs influencées par les affluents Selz, Nahe et Wisper et par le polder de rétention d'Ingelheim.

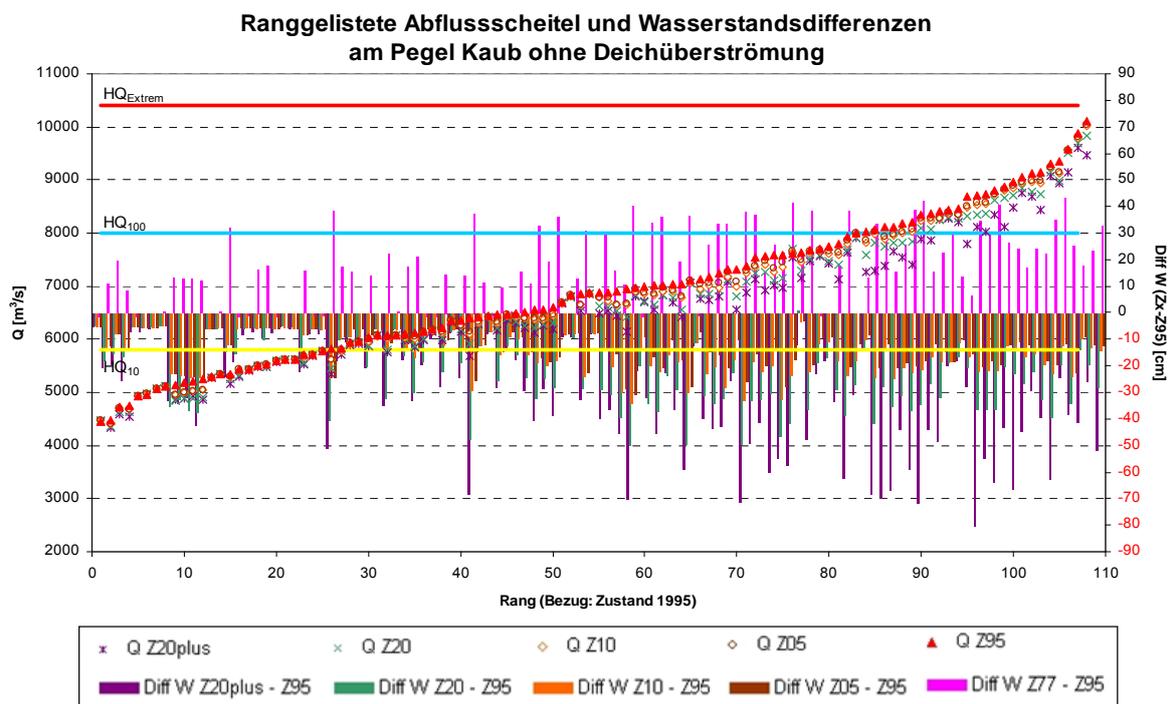


Fig. 6.14 : Pointes de débit et différences de pointes de niveau d'eau pour les états d'aménagement 1995, 2005, 2010, 2020 et 2020+ à l'échelle de Kaub (calculées sans submersion de digues). Classement rapporté à l'état 1995.

La figure 6.14 présente l'évaluation des pointes calculées pour les crues modélisées à l'échelle de Kaub sans prise en compte de submersions de digues.

Pour l'état 2010, les pointes de niveau d'eau à l'échelle de Kaub sont abaissées en moyenne de -19 cm en situation de  $HQ_{100}$  et de -17 cm en moyenne en situation de  $HQ_{\text{extrême}}$  par rapport à l'état 1995. La plage de réduction des pointes de niveau d'eau entre les crues de forte probabilité (autour d'un  $HQ_{100}$ ) et de faible probabilité ( $HQ_{\text{extrême}}$ ) varie entre -3 cm et -34 cm.

A l'opposé des pointes de débit nettement divergentes entre 2020 (x vert) et 2020+ (astérisque violet) par rapport à 1995, la figure 6.14 ne fait pas apparaître de grande différence entre les états 2005 et 2010, ce que l'on pouvait attendre du fait des volumes de rétention supplémentaires d'env. 13,3 millions de  $m^3$  mis en service entre Bâle et Kaub sur la période 2005 - 2010. Les réductions sensibles du débit de pointe pour 2020 sont imputables à l'impact d'un volume de rétention supplémentaire de quelque 62,1 millions de  $m^3$  qu'il est prévu de mettre en place d'ici cette date entre Breisach et Kaub.

A l'état 1977, les pointes de niveau d'eau sont sensiblement supérieures à celles de 1995 (colonnes verticales roses). Les niveaux d'eau plus faibles en 1995 sont dus aux mesures de rétention déjà réalisées sur le Rhin supérieur entre 1977 et 1995, dont l'ordre de grandeur s'établit autour de 110 millions de  $m^3$ . Le Plan d'Action contre les Inondations de la CIPR visant une réduction supplémentaire des niveaux d'eau par rapport à 1995, les réductions de niveau d'eau déjà atteintes entre 1977 et 1995 sont présentées ici séparément et ne sont pas prises en compte dans l'atteinte des objectifs pour les états 2005 à 2020+.

Dans certains cas, les résultats des simulations font apparaître des réductions des pointes de niveau d'eau jusqu'à 30 cm pour 2005 (colonnes marron) et 2010 (colonnes orange) par rapport à l'état de référence 1995. Un volume de rétention supplémentaire de quelque 57,3 millions de  $m^3$  a été mis en service entre Bâle et Kaub sur la période 1995 - 2005. Un volume de rétention d'env. 13,3 millions de  $m^3$  est venu s'y ajouter entre 2005 et 2010 sur le même tronçon du Rhin. De ce fait, les différences au niveau des réductions de niveau d'eau sont faibles entre 2005 et 2010. Dans la figure 6.14, les colonnes respectives représentant les réductions de la pointe de niveau d'eau sont donc pratiquement identiques.

Pour l'état 2010, les pointes de niveau d'eau à l'échelle d'Andernach présentées dans la figure 6.15 sont abaissées en moyenne de -8 cm en situation de  $HQ_{100}$  et de -3 cm en moyenne en situation de  $HQ_{\text{extrême}}$  par rapport à l'état 1995. La plage de réduction des pointes de niveau d'eau entre les crues de forte probabilité (autour d'un  $HQ_{100}$ ) et de faible probabilité ( $HQ_{\text{extrême}}$ ) varie entre +9 cm et -25 cm.

Pour l'échelle d'Andernach, l'analyse statistique fait apparaître un phénomène pratiquement symétrique par rapport à l'échelle de Kaub située quelque 68 km en amont. Ici, les modifications du lit (rehaussement du lit) sont visibles à l'aide de faibles augmentations du niveau d'eau, même lorsque les débits baissent légèrement. Les faibles augmentations du débit, que l'on observe dans des cas isolés, peuvent cependant être en relation avec la vidange d'espaces mis en eau, phénomène visible dans le déroulement de l'onde de crue. Ici aussi, la figure reproduit l'impact d'un affluent important, la Moselle, sur le déroulement de l'onde. Une baisse de la pointe de débit de -73  $m^3/s$  dans l'ordre de grandeur d'un  $HQ_{\text{extrême}}$  à l'état 2010 par exemple donne lieu à une hausse du niveau d'eau de +1 cm (voir annexe) dans le cas de la crue modélisée 1998 VGMax. Pour l'état 2020+, la réduction de la pointe de niveau d'eau atteint jusqu'à 59 cm.

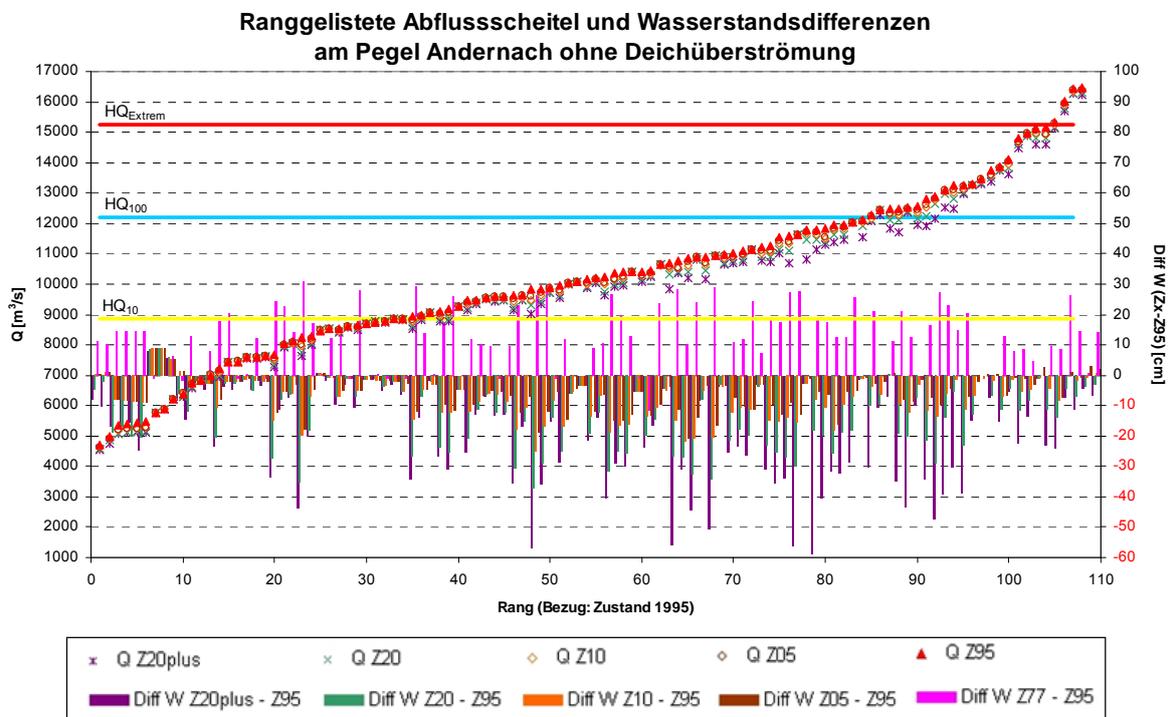


Fig. 6.15 : Pointes de débit et différences de pointes de niveau d'eau pour les états d'aménagement 1995, 2005, 2010, 2020 et 2020+ à l'échelle d'Andernach (calculées sans submersion de digues). Classement rapporté à l'état 1995.

La figure 6.16 reproduit les pointes de débit à l'échelle de Cologne et les réductions moyennes du niveau d'eau sur le tronçon situé entre le débouché de la Sieg et celui de la Ruhr. Plus de 30% des crues modélisées affichent une pointe de débit de l'ordre de grandeur d'un  $HQ_{100}$  ou plus ; pour 12% d'entre elles, cette pointe correspond à un  $HQ_{\text{extrême}}$ . Pour l'état 2010, les pointes de niveau d'eau entre le débouché de la Sieg et celui de la Ruhr sont abaissées en moyenne de 0 cm en situation de  $HQ_{100}$  et de -1 cm en moyenne en situation de  $HQ_{\text{extrême}}$  par rapport à l'état 1995. La plage de variation des pointes de niveau d'eau entre les crues de forte probabilité (autour d'un  $HQ_{100}$ ) et de faible probabilité ( $HQ_{\text{extrême}}$ ) se situe entre +9 cm et -14 cm. Dans certains cas, on relève également de faibles augmentations du niveau d'eau sur ce tronçon du Rhin. La vidange d'espaces mis en eau et l'arrivée concomitante d'ondes d'affluents donnent parfois lieu à des augmentations du niveau d'eau. A partir des résultats obtenus pour une crue de l'ordre d'un  $HQ_{10}$ , il est possible, comme pour l'échelle d'Andernach, de reproduire la modification des débits due à une modification du lit mineur (atterrissement) entre 1995 et 2010. Pour l'état 2020, la réduction moyenne de la pointe de niveau d'eau varie entre -4 cm (pour un  $HQ_{100}$ ) et -7 cm (pour un  $HQ_{\text{extrême}}$ ). La simulation des crues modélisées pour l'état 2020+ (colonnes violettes) fait apparaître une réduction de la pointe de niveau d'eau jusqu'à -44 cm pour une crue de l'ordre d'un  $HQ_{10}$ .

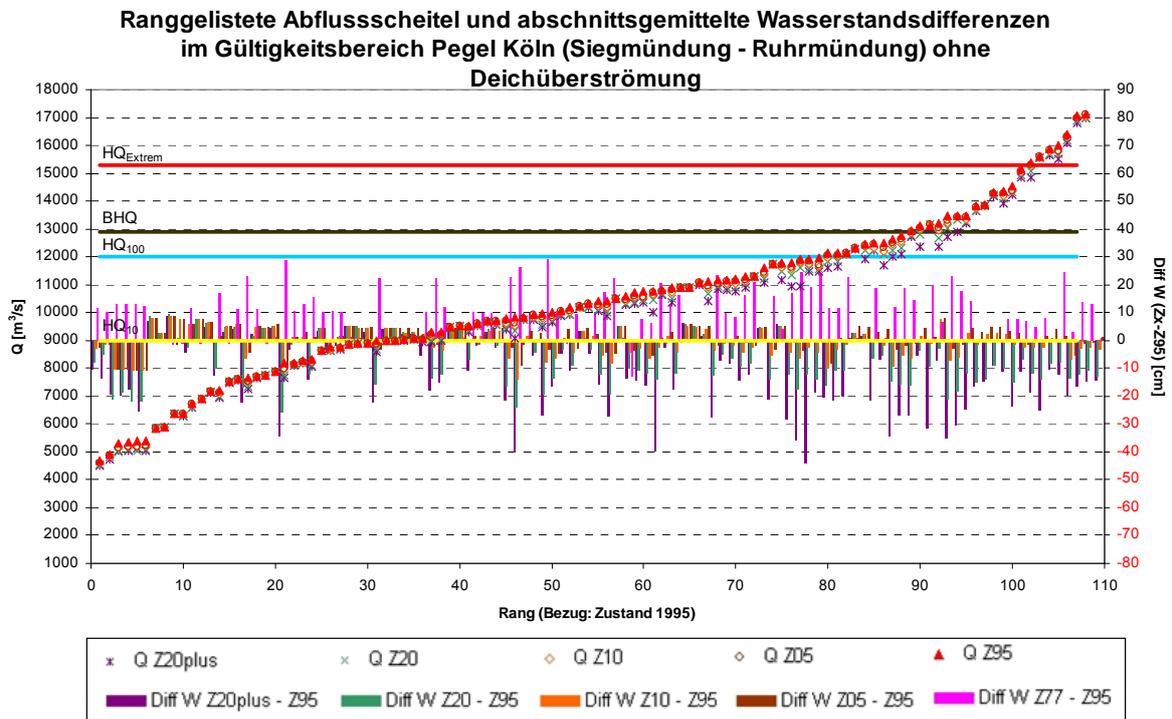


Fig. 6.16 : Valeurs de pointes de débit et différences moyennes des pointes de niveau d'eau rapportées au tronçon situé entre le débouché de la Sieg et celui de la Ruhr (échelle de Cologne) pour les états d'aménagement 1995, 2005, 2010, 2020 et 2020+ (calculées sans submersion de digues). Classement rapporté à l'état 1995.

La figure 6.17 rassemble les pointes de débit à l'échelle de Lobith et les différences moyennes des pointes de niveau d'eau rapportées au tronçon situé entre le débouché de la Ruhr et le Pannerdensche Kop pour les états 1977, 1995, 2005, 2010, 2020 et 2020+. En moyenne, les pointes de niveau d'eau à l'état 2010 augmentent de +1 cm pour un  $HQ_{100}$  et de +3 cm pour un  $HQ_{\text{extrême}}$  par rapport à l'état 1995. La plage de réduction des pointes de niveau d'eau entre les crues de forte probabilité (autour d'un  $HQ_{100}$ ) et de faible probabilité ( $HQ_{\text{extrême}}$ ) varie entre +7 cm et -12 cm pour 2010. Dans certains cas, on relève de légères augmentations du niveau d'eau dans toutes les plages de débit analysées.

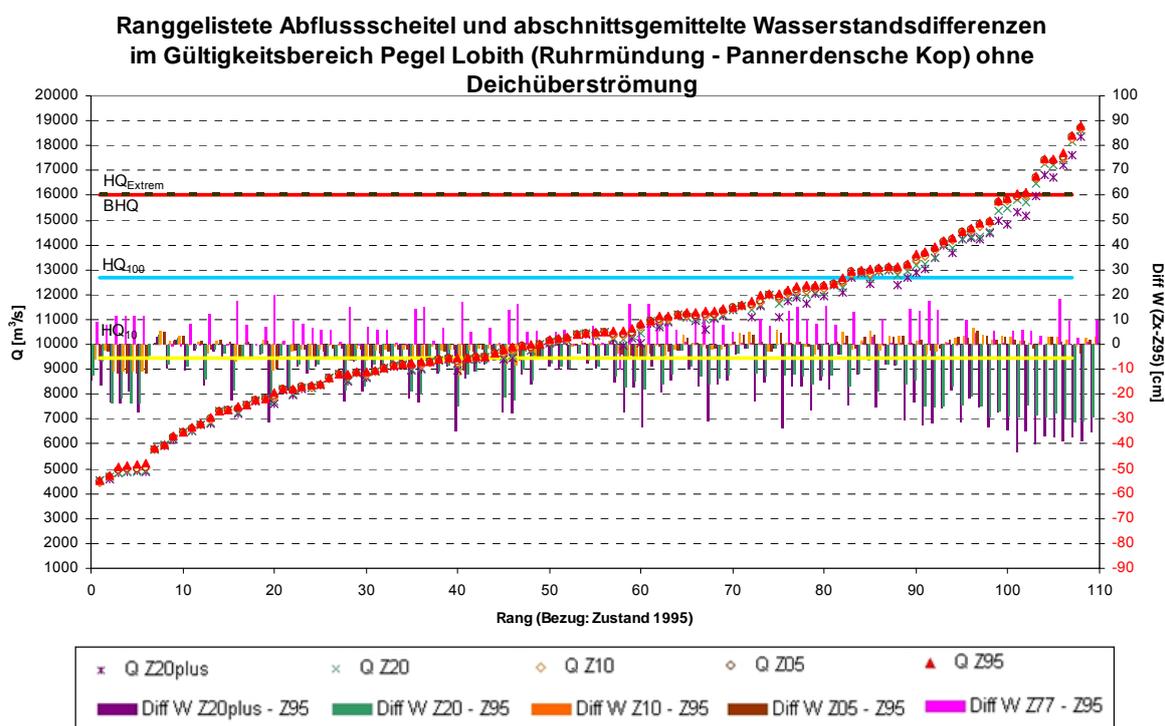


Fig. 6.17 : Valeurs de pointes de débit et différences moyennes des pointes de niveau d'eau rapportées au tronçon situé entre le débouché de la Ruhr et le Pannerdensche Kop (échelle de Lobith) pour les états d'aménagement 1995, 2005, 2010, 2020 et 2020+ (calculées sans submersion de digues). Classement rapporté à l'état 1995.

A la lumière de la figure 6.18, on note que pour l'état 2010 les pointes de niveau d'eau baissent de -3 cm pour un  $HQ_{100}$  et de -2 cm en moyenne pour un  $HQ_{\text{extrême}}$  par rapport à l'état 1995 au niveau du Nederrijn et du Lek. La plage de réduction des pointes de niveau d'eau entre les crues de forte probabilité (autour d'un  $HQ_{100}$ ) et de faible probabilité ( $HQ_{\text{extrême}}$ ) varie entre +1 cm et -7 cm pour 2010. La réduction maximale de la pointe de niveau d'eau est de +32 cm à l'état 2020 pour un  $HQ_{\text{extrême}}$ .

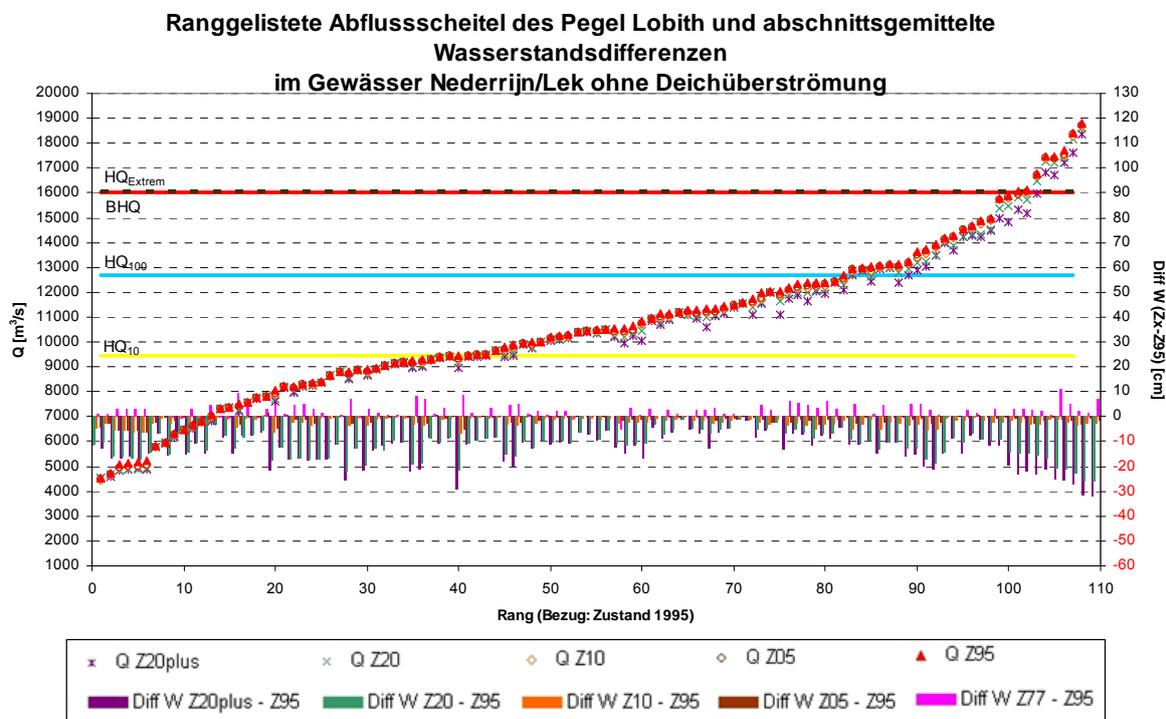


Fig. 6.18 : Valeurs de pointes de débit et différences moyennes des pointes de niveau d'eau rapportées au tronçon du Nederrijn/Lek (échelle de Lobith) pour les états d'aménagement 1995, 2005, 2010, 2020 et 2020 (calculées sans submersion de digues). Classement rapporté à l'état 1995.

Il ressort de la figure 6.19 que pour l'état 2010, les pointes de niveau d'eau dans le Waal sont abaissées en moyenne de -5 cm en situation de  $HQ_{100}$  et de  $HQ_{\text{extrême}}$  par rapport à l'état 1995. La plage de réduction des pointes de niveau d'eau entre les crues de forte probabilité (autour d'un  $HQ_{100}$ ) et de faible probabilité ( $HQ_{\text{extrême}}$ ) varie entre 0 cm et -10 cm. A l'état 2020, la réduction de la pointe de niveau d'eau atteinte en moyenne -19 cm pour un  $HQ_{100}$  et -25 cm pour un  $HQ_{\text{extrême}}$ . Pour l'état 2020+, la simulation fait apparaître pour un  $HQ_{\text{extrême}}$  une réduction de la pointe de niveau d'eau jusqu'à -42 cm.

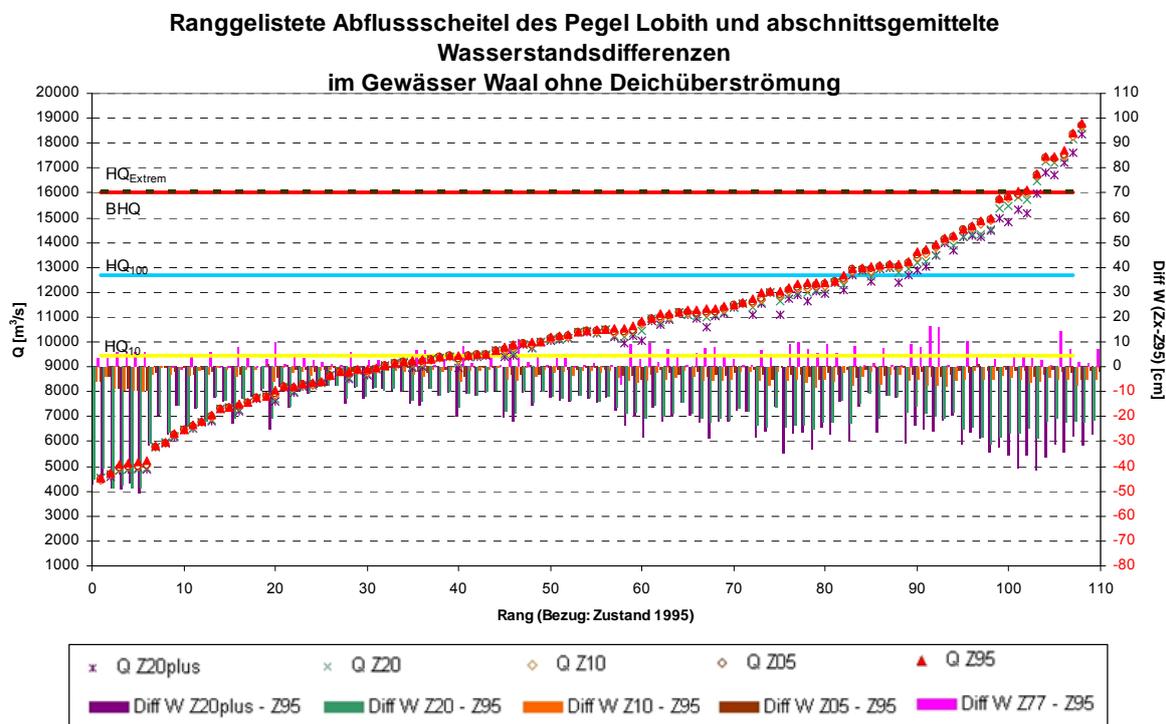


Fig. 6.19 : Valeurs de pointes de débit et différences moyennes des pointes de niveau d'eau rapportées au tronçon du Waal (échelle de Lobith) pour les états d'aménagement 1995, 2005, 2010, 2020 et 2020 (calculées sans submersion de digues). Classement rapporté à l'état 1995.

Il ressort de la figure 6.20 que pour l'état 2010, les pointes de niveau d'eau dans l'Ijssel sont abaissées en moyenne de -3 cm en situation de  $HQ_{100}$  et de -5 cm en situation de  $HQ_{\text{extrême}}$  par rapport à l'état 1995. La plage de réduction des pointes de niveau d'eau entre les crues de forte probabilité (autour d'un  $HQ_{100}$ ) et de faible probabilité ( $HQ_{\text{extrême}}$ ) varie entre 0 cm et -8 cm. Les réductions du niveau d'eau, notamment à l'état 2020+, sont nettement plus prononcées. Les réductions de la pointe de niveau d'eau de plus de 70 cm sont principalement imputables à la mesure « Veessen Wapenveld ».

Dans les tronçons fluviaux néerlandais, on relève une saute dans l'effet atténuateur des mesures ou submersions de digues pour une crue de l'ordre  $HQ_{\text{extrême}}$ . Ceci s'explique par les mesures hydrauliques prises en compte aux Pays-Bas, notamment après 2020.

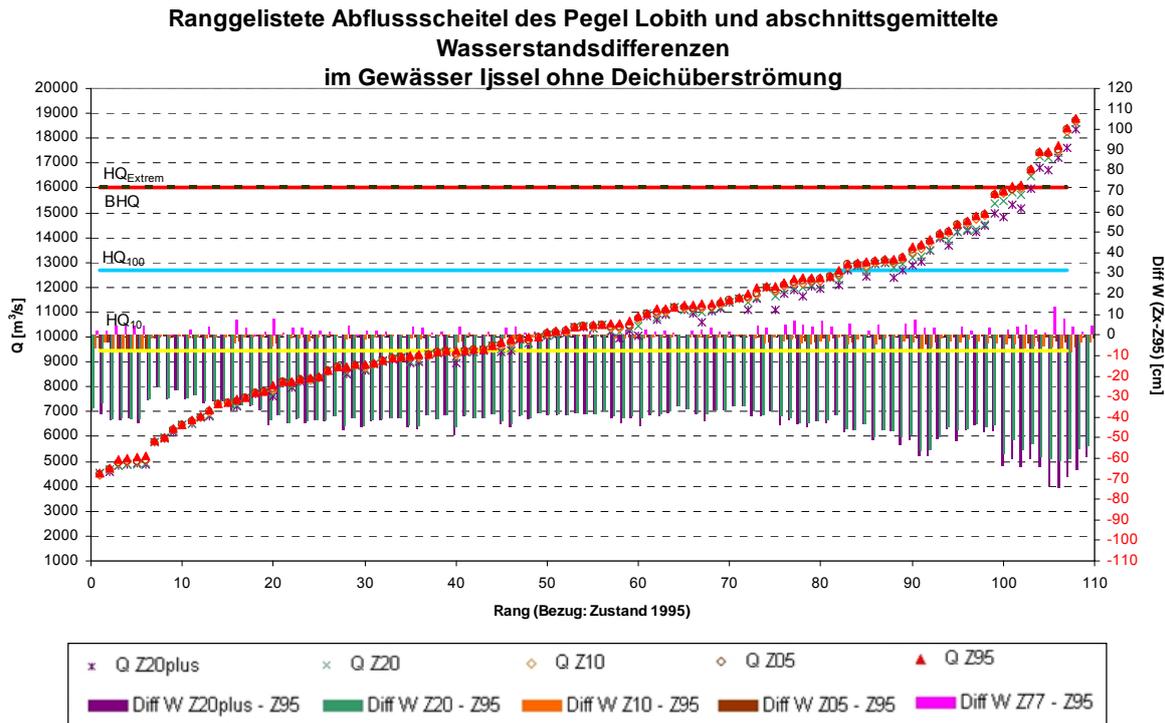


Fig. 6.20 : Valeurs de pointes de débit et différences moyennes des pointes de niveau d'eau rapportées à un tronçon pour les états d'aménagement 1995, 2005, 2010, 2020 et 2020 dans l'IJssel (échelle de Lobith) (calculées sans submersion de digues). Classement rapporté à l'état 1995

## 7. Analyse des calculs de réduction des crues avec prise en compte de submersions de digues

L'expression 'submersion de digues' peut également être éventuellement entendue comme la submersion d'autres ouvrages de protection contre les inondations (par ex. des murs de protection). On emploie également l'expression 'submersion des digues des hautes eaux', en particulier sur le Rhin supérieur.

### 7.1 Méthode et bases de calcul

Dans le cas de crues modélisées dont les débits de points dépassent le débit de dimensionnement, la réduction de débit due aux submersions, et éventuellement aux ruptures de digues, est d'une importance capitale pour le déroulement de la crue vers l'aval et, par là même aussi pour l'effet des mesures prises pour réduire les niveaux

d'eau. Des calculs ont été réalisés à l'exemple des états 1995, 2010 et 2020 pour analyser l'effet combiné des mesures de rétention et des submersions de digues pour 2010 et 2020 par rapport à l'état de référence 1995.

Les aspects fondamentaux de l'impact de la submersion des digues sur le déroulement et la pointe de l'onde sont présentés en annexe 6.

Le long du Rhin, les surfaces potentiellement inondées à la suite de submersions de digues se situent essentiellement sur le Rhin supérieur, le Rhin inférieur et aux Pays-Bas (annexe 7).

En regard de la capacité de protection très élevée des digues du Rhin sur le tronçon canalisé entre Bâle et Iffezheim, même les plus grandes crues modélisées par le groupe HVAL ne dépassent pas la capacité d'écoulement entre les digues dans ce tronçon. Il n'est donc pas nécessaire de tenir compte d'éventuelles inondations suite à la submersion de digues entre Bâle et Iffezheim. On a par ailleurs renoncé à modéliser les submersions aux Pays-Bas. Le système y est si complexe qu'il n'est guère possible de réaliser une modélisation unidimensionnelle. Par ailleurs, on peut partir du principe que, dans l'ordre de grandeur choisi pour les crues modélisées, les ondes de crue sont très atténuées par les submersions se produisant dans le bassin en amont de Lobith et que la capacité d'écoulement n'est donc pas ou guère dépassée.

En regard des différences de modélisation technique, les chapitres suivants décrivent la méthode de calcul utilisée pour le Rhin supérieur, puis pour le Rhin inférieur.

### **7.1.1 Localisation des surfaces inondables prises en compte et volumes du Rhin supérieur**

Le relevé des surfaces inondables prises en compte dans les calculs du groupe HVAL au Bade-Wurtemberg et en Rhénanie-Palatinat est présenté dans les figures des annexes 7b et 7c.

Par ailleurs, 5 zones ont également été prises en compte en Hesse. Toutes les zones prises en compte, leur emplacement et leur volume global sont listés dans le tableau 7.1. Pour les zones rhénano-palatines et hessoises, les surfaces inondables maximales (approche théorique) ont été déterminées sur la base d'un SIG et les volumes correspondants estimés. Pour le Bade-Wurtemberg, on s'est basé sur les résultats du modèle bidimensionnel opérationnel à la LUBW. Pour un débit stationnaire dans le Rhin (5.000 m<sup>3</sup>/s à l'échelle de Maxau et 6.000 m<sup>3</sup>/s à celle de Worms), on a calculé l'état final stationnaire de l'inondation maximale survenant en cas de ruptures de digues côté bade-wurtembergeois du Rhin entre Iffezheim et la frontière avec la Hesse.

La France a exprimé le souhait que soient dorénavant prises en compte les surfaces inondables sur la rive française entre Iffezheim et Lauterbourg. A ce niveau, des volumes importants ont déjà été pris en compte par le biais de surfaces inondables sur la rive droite. On part du principe que les mêmes conditions s'appliquent aux submersions sur rive droite et rive gauche. La prise en compte des surfaces françaises aurait ainsi débouché pour l'essentiel sur une nouvelle répartition des volumes retenus dans ce tronçon. Compte tenu des contraintes de délais, le GE HVAL a estimé qu'à ce stade l'impact supplémentaire des surfaces inondables sur la rive française pouvait être considéré comme négligeable. Dans l'éventualité d'un complément de modélisation à venir ultérieurement, les volumes correspondants auraient vocation à être calculés et à être intégrés au tableau 7.1.

Zone partielle	Localisation de la zone partielle [du PK Rhin au PK Rhin]		Land fédéral	Rive droite/ gauche du Rhin	Surface inondable maximale [km <sup>2</sup> ]	Volume maximal selon MNT [millions de m <sup>3</sup> ]	Volume de rétention net [millions de m <sup>3</sup> ]
BW 1	332	344	Bade-Wurtemberg	droite	36	51	25
BW 2	344	359	Bade-Wurtemberg	droite	56	84	42
RP G2g	354	381	Rhénanie-Palatinat	gauche	62	147	74
BW 3	359	371	Bade-Wurtemberg	droite	36	93	46
BW 4	371	396	Bade-Wurtemberg	droite	101	294	147
RP G12g	390	400	Rhénanie-Palatinat	gauche	13	32	16
BW 5	396	407	Bade-Wurtemberg	droite	25	72	36
RP G15g	400	408	Rhénanie-Palatinat	gauche	9	27	13
RP G15-G16g	408	420	Rhénanie-Palatinat	gauche	32	96	48
BW 6	415	427	Bade-Wurtemberg	droite	28	28	14
RP G17g	422	443	Rhénanie-Palatinat	gauche	80	219	109
BW 14	431	438	Bade-Wurtemberg	droite	71	41	20
Frontière du Land - Weschnitz	437	453	Hesse	droite	76	165,9	80
Weschnitz - Winkelbach	453	461.5	Hesse	droite	28	52	26
G8g	443	480	Rhénanie-Palatinat	gauche	74	166	83
Winkelbach - Modau	461.5	470	Hesse	droite	19	33	16,5
Modau - Sandbach	470	471	Hesse	droite	8	7	3,5
G11g	480	485	Rhénanie-Palatinat	gauche	0,3	0,3	0,15
Sandbach - Main	471	496	Hesse	droite	146	316	158
G7g	485	494	Rhénanie-Palatinat	gauche	11	39,4	19,7
G6g	494	505	Rhénanie-Palatinat	gauche	2	2,2	1,1
G5g	510	518	Rhénanie-Palatinat	gauche	9	23,2	11,6
G4g	518	523	Rhénanie-Palatinat	gauche	2	1,6	0,8
Total :					<b>924</b>	<b>1991</b>	<b>~ 990</b>

Tab. 7.1: Emplacement, superficies et volumes des surfaces inondables maximales au Bade-Wurtemberg, en Rhénanie-Palatinat et en Hesse.

### 7.1.2 Modélisation du Rhin supérieur

Le tronçon du Rhin supérieur est reproduit dans le modèle synoptique jusqu'à Worms et dans le modèle SOBEK à partir de Worms. On s'est fondamentalement efforcé de reproduire les submersions de manière comparable dans les différents modèles.

Pour estimer le déroulement des ondes de crues extrêmes dépassant les débits de dimensionnement, on a opté sur le **tronçon entre Bâle et Worms** pour la procédure suivante :

- (1) On part du principe qu'un débit dépassant le débit de dimensionnement dans un ordre de grandeur de 500 m<sup>3</sup>/s au maximum peut encore s'écouler à travers les digues grâce à la revanche sans qu'il y ait rupture ou submersion de digues.
- (2) Dans l'hypothèse d'un dépassement du débit de dimensionnement de plus de 500 m<sup>3</sup>/s env., on estime que les digues de hautes eaux sont submergées à certains endroits (sans qu'il y ait rupture de digues).

- (3) Lorsque le débit de dimensionnement indiqué ci-dessus (voir tableau 5.2 au chapitre 5) est dépassé de plus de 500 m<sup>3</sup>/s, on suppose que 10% des tronçons endigués dans une zone inondable sont submergés.
- (4) Les parties de digues submergées sont si possible fixées à peu près au milieu, entre la limite sud et la limite nord de chacune des zones inondables.
- (5) Le reflux des hautes eaux dans le Rhin a lieu dès que le débit est à nouveau inférieur au débit de dimensionnement plus 500 m<sup>3</sup>, à condition toutefois qu'un reflux soit hydrauliquement possible.
- (6) Par souci de simplification, l'ordre de grandeur de la submersion est calculé, en fonction du débit du Rhin, selon l'hypothèse d'une submersion parfaite. Pour l'afflux des eaux, la ligne d'eau obtenue par calculs stationnaires pour le débit de dimensionnement de 5.500 m<sup>3</sup>/s est estimée correspondre à la hauteur du lit mineur/hauteur de seuil. Pour le reflux des eaux, l'hypothèse retenue est celle de la hauteur du pied de la digue, le calcul du reflux se fondant sur une longueur submergée de 100 m.
- (7) Pour des raisons de simplification, on considère dans les calculs de modélisation que le volume de rétention efficace maximal (volume net) correspond à 50% du volume de rétention maximal indiqué pour chaque zone inondable (voir tableau 7.1) (en effet, une zone inondable ne peut être remplie à 100% que si (1) la submersion de digues survient dans la partie la plus au sud de cette zone et que si (2) aucune rupture ou ouverture ne se produit de l'intérieur des terres vers le Rhin dans la partie la plus au nord de cette même zone).
- (8) Seules sont prises en compte des surfaces inondables affichant un volume net d'au moins 5 millions de m<sup>3</sup>.

Pour le **tronçon situé sur le Rhin supérieur à partir de Worms**, calculé à l'aide du modèle SOBEK, la méthode utilisée est la même à quelques exceptions près :

- (1) Il est également tenu compte de zones inondables dont le volume net est inférieur à 5 millions de m<sup>3</sup>.
- (2) Lorsque le volume net est atteint, l'afflux dans la surface inondable n'est pas stoppé, de sorte que plus d'eau peut s'engouffrer dans la surface inondable tant que le niveau d'eau dans le fleuve est plus élevé que dans l'espace inondable modélisé.
- (3) Dans le modèle SOBEK, il n'est pas possible de placer l'afflux et le reflux à différents endroits. Pour cette raison, le reflux se fait au même endroit que l'afflux dans la zone modélisée à l'aide de SOBEK.
- (4) La longueur submergée par le reflux des eaux n'est pas de 100 m comme dans le modèle synoptique unidimensionnel, mais toujours identique à celle de l'afflux (soit 10% de la longueur de digue de chaque espace inondable). Pendant la phase de reflux des eaux, le seuil est lentement ramené au niveau du sol de l'espace inondable en fonction de la vitesse à laquelle baisse le niveau d'eau dans le fleuve pendant la phase décroissante de la crue.

Au cours du projet, il n'a pas été possible, par manque de temps, d'ajuster ces différences entre le modèle SYNHP et le modèle SOBEK. Ceci étant toutefois possible à l'exception de la réalisation mentionnée au point (3), il serait judicieux, en cas de nouvelle utilisation du modèle SOBEK dans ce cadre, d'ajuster le modèle (voir également HKV, 2011). Le tableau 7.2 fait état des principaux paramètres introduits dans les modèles.

Zone partielle	Localisation des submersions fictives de digues [PK du Rhin]	Rive droite/gauche du Rhin	Volume de rétention net [millions de m <sup>3</sup> ]	Débit de la submersion à partir d'env.	Modèle
BW 1	338	droite	25	> 5.500 m <sup>3</sup> /s	SynMod
BW 2	355	droite	42	> 5.500 m <sup>3</sup> /s	SynMod
RP G2g	367	gauche	74	> 5.500 m <sup>3</sup> /s	SynMod
BW 3	367	droite	46	> 5.500 m <sup>3</sup> /s	SynMod
BW 4	384	droite	147	> 5.500 m <sup>3</sup> /s	SynMod
RP G12g	398	gauche	16	> 5.500 m <sup>3</sup> /s	Syn-1D
BW 5	402	droite	36	> 5.500 m <sup>3</sup> /s	Syn-1D
RP G15g	404	gauche	13	> 5.500 m <sup>3</sup> /s	Syn-1D
RP G15-G16g	411	gauche	48	> 5.500 m <sup>3</sup> /s	Syn-1D
BW 6	418	droite	14	> 5.500 m <sup>3</sup> /s	Syn-1D
RP G17g	425	gauche	109	> 5.500 m <sup>3</sup> /s	Syn-1D
BW 14	435	droite	20	> 6.500 m <sup>3</sup> /s	Syn-1D
Frontière du Land - Weschnitz	445	droite	80	> 6.500 m <sup>3</sup> /s	SOBEK
Weschnitz - Winkelbach	457	droite	26	> 6.500 m <sup>3</sup> /s	SOBEK
Gg8	461.5	gauche	83	> 6.500 m <sup>3</sup> /s	SOBEK
Winkelbach - Modau	466	droite	17	> 6.500 m <sup>3</sup> /s	SOBEK
Modau - Sandbach	471	droite	4	> 6.500 m <sup>3</sup> /s	SOBEK
Gg11	482.5	gauche	0,15	> 6.500 m <sup>3</sup> /s	SOBEK
Sandbach - Main	483	droite	158	> 6.500 m <sup>3</sup> /s	SOBEK
Gg7	489.5	gauche	20	> 6.500 m <sup>3</sup> /s	SOBEK
Gg6	499.5	gauche	1	> 8.460 m <sup>3</sup> /s	SOBEK
Gg5	514	gauche	12	> 8.460 m <sup>3</sup> /s	SOBEK
Gg4	520.5	gauche	1	> 8.460 m <sup>3</sup> /s	SOBEK

Tab. 7.2 : Paramétrage des surfaces inondables dans les modèles

Des informations plus détaillées figurent dans LUBW, 2011 pour le tronçon modélisé calculé à l'aide de SYNHP et dans HKV, 2011 pour le tronçon du Rhin supérieur modélisé calculé à l'aide de SOBEK (voir rapport CIPR 153 « Identification HVAL 2005 »).

Conformément à l'écoulement dans le temps et dans l'espace d'une crue, les submersions de digues et le remplissage des zones inondables sur rive gauche et rive droite du Rhin au passage d'une crue extrême se succèdent généralement du sud vers le nord.

L'illustration 7.1 présente à titre d'exemple l'impact d'une submersion de digues à l'aide de la crue modélisée par HVAL de février 1999 avec un facteur d'amplification de 1,5 :

- En amont de la partie où la digue est submergée, le débit de pointe du Rhin est de l'ordre de 6.200 m<sup>3</sup>/s (ligne bleue)

- L'impact de la submersion de digues fait effet à partir d'un niveau d'eau correspondant à env. 5.500 m<sup>3</sup>/s sur la courbe ascendante de la crue. Un volume maximal de 500 m<sup>3</sup>/s afflue dans la zone inondable (ligne rouge)
- L'onde de crue du Rhin en résultant en aval de la zone inondable est indiquée par la ligne grise en pointillés
- Après abaissement du niveau d'eau du Rhin à la limite nord de la zone inondable après le passage de la pointe de crue, cette zone se vide quasi intégralement, conformément aux conditions hydrauliques en présence, par reflux de l'eau dans le Rhin (ligne verte)
- En aval de la submersion de digues, le débit de pointe du Rhin tombe à env. 5.700 m<sup>3</sup>/s (ligne fine en gris)

Plusieurs ruptures de digues le long du Rhin sont également des cas de figure réalistes pour les scénarios de calcul. Lors des inondations catastrophiques de 1882 sur le Rhin supérieur par exemple, des ruptures de digues se sont produites entre autres à Bobenheim, Mannheim, Altlußheim, Worms, Otterstadt, Oppenheim, Oppenau et Frankenthal. Pour cette raison, il est indispensable de tenir compte des submersions de digues, au moins sous une forme simplifiée, pour procéder à un calcul réaliste de crues extrêmes qui dépassent le débit de dimensionnement des digues.

L'endroit précis et le moment exact d'une submersion ou d'une rupture de digues varient selon les crues et sont impossibles à estimer en détail. Pour cette raison, on a effectué des calculs exemplaires combinant l'impact de mesures de rétention et celui de submersions de digues.

Le volume d'inondation maximal théorique en cas de ruptures de digues sur le Rhin supérieur entre Iffezheim et Worms est de l'ordre de 1,2 milliards de m<sup>3</sup> au total côté allemand (au Bade-Wurtemberg et en Rhénanie-Palatinat). Ce volume dépasse d'un facteur 4,5 le volume total de toutes les mesures de rétention franco-allemandes existantes et prévues pour 2020 entre Bâle et Worms. Comme expliqué plus, il n'a cependant été appliqué que 50% du volume dans les présents calculs.

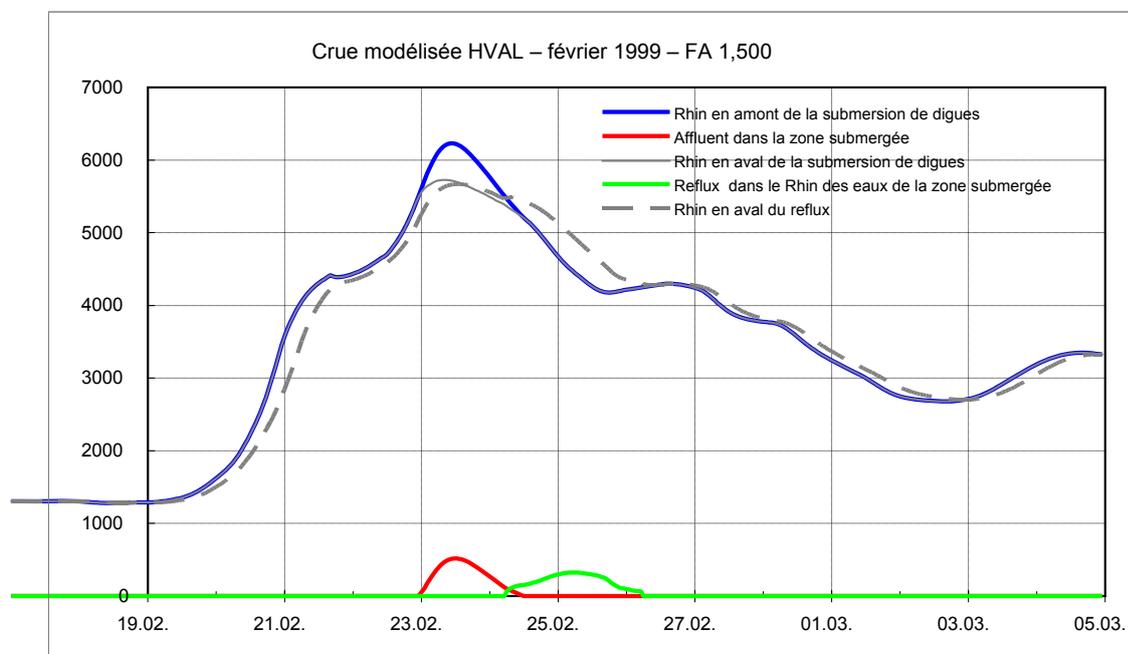


Fig. 7.1 : impact sur les débits du Rhin d'une submersion de digues provoquée par une crue extrême

### 7.1.3 Emplacement, volumes et modélisation des surfaces inondables sur le Rhin inférieur

Le paramétrage des inondations du Rhin inférieur dues à des submersions de digues se fonde sur les résultats de calculs dynamiques réalisés à l'aide du modèle bidimensionnel DELFT-FLS (Deutsch-Niederländische Arbeitsgruppe Hochwasser, 2004a et 2004b) et d'une mise à jour par des calculs dynamiques réalisés avec le modèle bidimensionnel WAQUA (LANUV, 2011). Pour que les résultats des modèles 2D puissent être reportés sur le modèle unidimensionnel, toute la surface inondable le long du Rhin inférieur a été subdivisée en sous-unités hydrauliques (annexe 7d). A l'opposé des approches suivies sur le Rhin supérieur, les analyses effectuées sur le Rhin inférieur partent du principe que la submersion d'une digue constitue une rupture de digue. Les murs de protection érigés contre les crues quant à eux sont conservés. Les zones caractérisées par un « O » dans les annexes 7d et 8 sont remplies d'eau s'écoulant au-dessus d'un tel mur érigé contre les crues ; les zones caractérisées par un « D » sont inondées à la suite de ruptures de digues provoquées par des submersions. Enfin, les zones caractérisées par un « L » sont des zones plus élevées qui ne sont pas submergées (annexe 7d).

Le tableau 7.3 donne un aperçu de l'emplacement, de la superficie et des volumes des surfaces potentiellement inondables en Rhénanie-du-Nord-Westphalie. Ces surfaces sont déterminées à partir des données d'entrée dans le modèle SOBEK avec submersion de digues et sur la base des résultats de DELFT-FLS et des calculs de WAQUA.

Les **calculs dynamiques** réalisés le long du Rhin inférieur avec les modèles 2D ont montré qu'outre l'effet de rétention, l'afflux d'eau derrière les digues parallèlement au cours principal jouait un rôle important, d'autant plus qu'une grande partie de cette eau rejoint le fleuve plus en aval (Deutsch-Niederländische Arbeitsgruppe Hochwasser, 2004b). Ce phénomène a également été intégré dans le modèle unidimensionnel. La schématisation des inondations dans le modèle SOBEK à partir du Rhin inférieur est reproduite dans l'annexe 8.

Zone	Localisation début zone inondable	Localisation fin zone inondable	Superficie maximale	Volume dans le modèle en dessous du seuil d'afflux	Rive
	PK	PK	ha	millions de m <sup>3</sup>	
W_101_103	642	652	97,9	1,92	g + d
O_001	652	657	237	10,59	d
O_002	657	658	104	4,94	d
O_003	658	659	141	5,74	d
O_004	658	659	266	15,03	d
O_005	659	666	177	6,39	d
O_006	664	672	314	10,71	g
O_008	666	673	174	6,47	d
O_009	672	684	304	10,73	g
O_010	684	688	84,5	1,36	g
O_011	680	686	93,5	3,81	d
O_012	686	689	234	2,95	d
O_013	689	692	82,9	1,71	d
O_014	692	702	219	12,09	d
O_015	695	699	123	3,17	d
O_016	690	705	1210	37,39	g
O_017	705	708	695	24,67	g

O_018	708	711	217	6,92	g
D_019	704	717	790	42,74	d
O_021	711	717	541	18,18	g
O_022	717	727	386	13,78	g
D_023	717	745	818	27,08	d
O_024	724	728	23,1	1,27	d
O_025	727	735	515	14,27	g
D_026	735	740	272	10,83	g
D_027	735	740	2060	99,09	g
D_27_b	763	822	6890	344,50	g
O_030	765	765	33,5	1,73	g
D_031	745	756	690	9,32	d
D_033	758	773	1310	12,31	d
D_034	777	780	192	11,08	d
D_035	780	798	241	10,70	d
O_037	798	813	98,4	3,23	d
O_039	843	881	16800	10,08	g
O_040	847	852	648	36,81	g
			<b>37081,8</b>	<b>833,57</b>	
			<b>371 km<sup>2</sup></b>	<b>833 millions de m<sup>3</sup></b>	

Tab. 7.3 : Emplacement, superficie et volume des surfaces potentiellement inondables en NRW. Réalisation dans le modèle (selon : Deutsch-Niederländische Arbeitsgruppe Hochwasser, 2004a).

## 7.2 Résultats des calculs de réduction des crues avec prise en compte de submersions de digues

Si l'on analyse l'impact de mesures de rétention dans le cadre des variantes de calcul intégrant des submersions éventuelles de digues, il convient de tenir compte du fait que les réductions maximales sont fréquemment obtenues dans des débits d'ordres de grandeur n'entraînant pas de submersion de digues. L'étude ne vise pas à déterminer l'impact de submersions de digues mais plutôt à estimer l'effet de ces submersions sur l'efficacité des mesures de rétention.

### Réduction 1995 avec submersion de digues (dans les graphiques = DUEB)

Etats d'aménagement 1977 et 1995 calculés avec submersion de digues à l'échelle de Maxau :

A l'échelle de Maxau, l'impact de réduction du débit de pointe obtenu grâce aux surfaces inondées varie fortement en fonction des caractéristiques spécifiques des crues appliquées. Dans le cas des crues essentiellement déterminées par les affluents du haut Rhin et du Rhin supérieur, l'impact le plus important est, comme on peut s'y attendre, celui des submersions de digues survenant en amont de Maxau.

### Impact des mesures opérationnelles en 1995 et des submersions de digues à l'échelle de Maxau

- L'impact des submersions de digues est reproduit dans la figure 7.2. On n'obtient pour l'**état d'aménagement 1977 avec submersion de digue** qu'une valeur de pointe maximale de  $5.919 \text{ m}^3/\text{s}$  par rapport aux  $6.585 \text{ m}^3/\text{s}$  maximaux atteints dans le calcul sans submersion de digue.
- Le volume maximal de stockage des surfaces inondables localisées en amont de Maxau (total des deux surfaces les plus au sud) s'élève à 38 millions de  $\text{m}^3$  pour l'état d'aménagement 1995 (en comparaison, il est de 66 millions de  $\text{m}^3$  pour l'état d'aménagement 1977).
- En raison des interactions entre les surfaces inondables et les ouvrages de rétention manœuvrables, on note en tendance que l'impact de réduction du débit de pointe imputable aux retenues est plus faible par rapport à la variante de calcul n'intégrant pas des submersions de digues.
- La réduction maximale du débit de pointe d'une crue modélisée s'amenuise de  $40 \text{ m}^3/\text{s}$  par rapport à la variante de calcul sans submersion de digues pour atteindre env.  $720 \text{ m}^3/\text{s}$ .

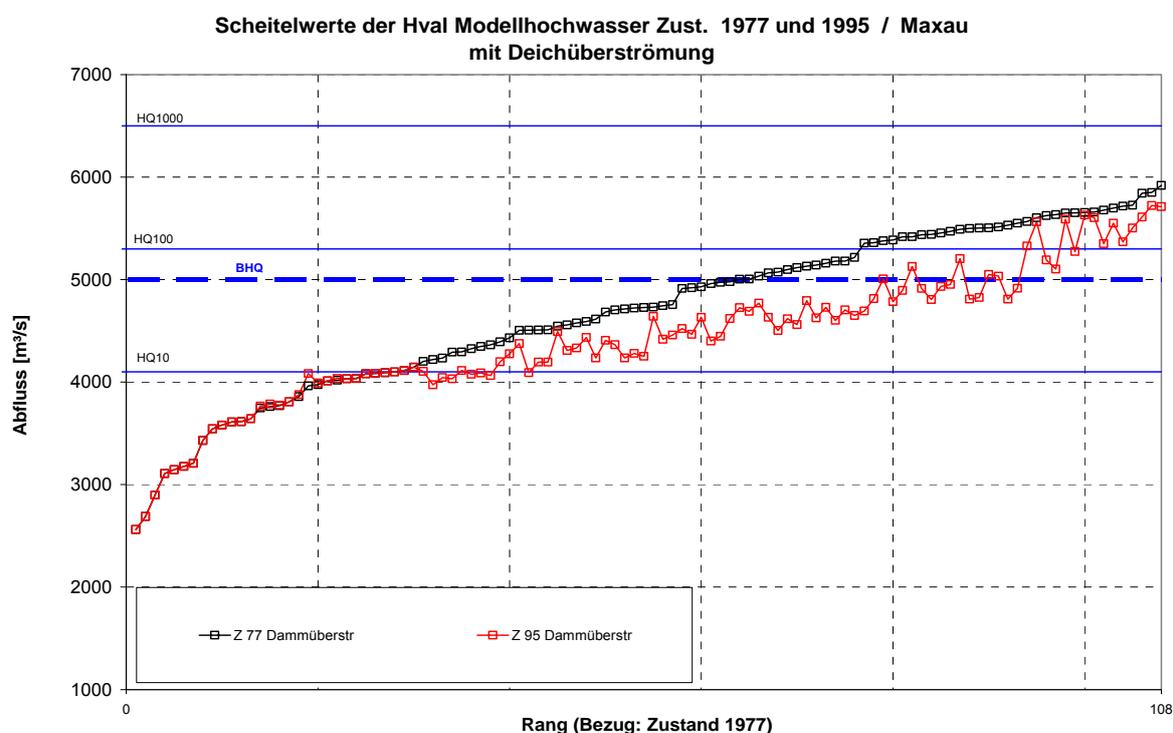


Fig. 7.2 : Valeurs de débit de pointe pour les états d'aménagement 1977 et 1995 (calculés avec submersion de digues) à l'échelle de Maxau. Classement rapporté à l'état 1977.

Etats d'aménagement 1977 et 1995 calculés avec submersion de digues à l'échelle de Worms :

Les surfaces inondables sont situées pour la plupart entre l'échelle de Maxau et le débouché du Neckar dans le Rhin. Leur part de volume est de 85% du volume maximal total obtenu au travers d'une submersion de digues sur le Rhin supérieur. On ne rencontre plus qu'une petite zone inondable en aval du débouché du Neckar. Cela signifie que les crues marquées par un apport de débit extrême du Neckar sont uniquement influencées par l'effet de cette zone sur le tronçon s'étendant jusqu'à Worms. A ceci s'ajoute, dans une moindre mesure, l'impact des surfaces situées plus en amont dans la zone de remous du débouché du Neckar.

#### Impact des mesures opérationnelles en 1995 et des submersions de digues à l'échelle de Worms

- La figure 7.3 met en évidence la réduction des débits de pointe obtenue à l'échelle de Worms par effet de submersion de digues.
- A l'état **1977**, le maximum atteint n'est plus que d'env. 7.250 m<sup>3</sup>/s par rapport aux quelque 7.900 m<sup>3</sup>/s obtenus pour ce même état sans submersion de digues.
- Le volume maximal atteint au total par les 12 surfaces inondables est de 92 millions de m<sup>3</sup> pour l'état d'aménagement 1995 (et de 164 millions de m<sup>3</sup> pour l'état d'aménagement 1977).
- La réduction maximale du débit de pointe d'une crue modélisée s'élève à env. 570 m<sup>3</sup>/s (comparés aux 660 m<sup>3</sup>/s env. obtenus pour la variante de calcul sans submersion de digues).

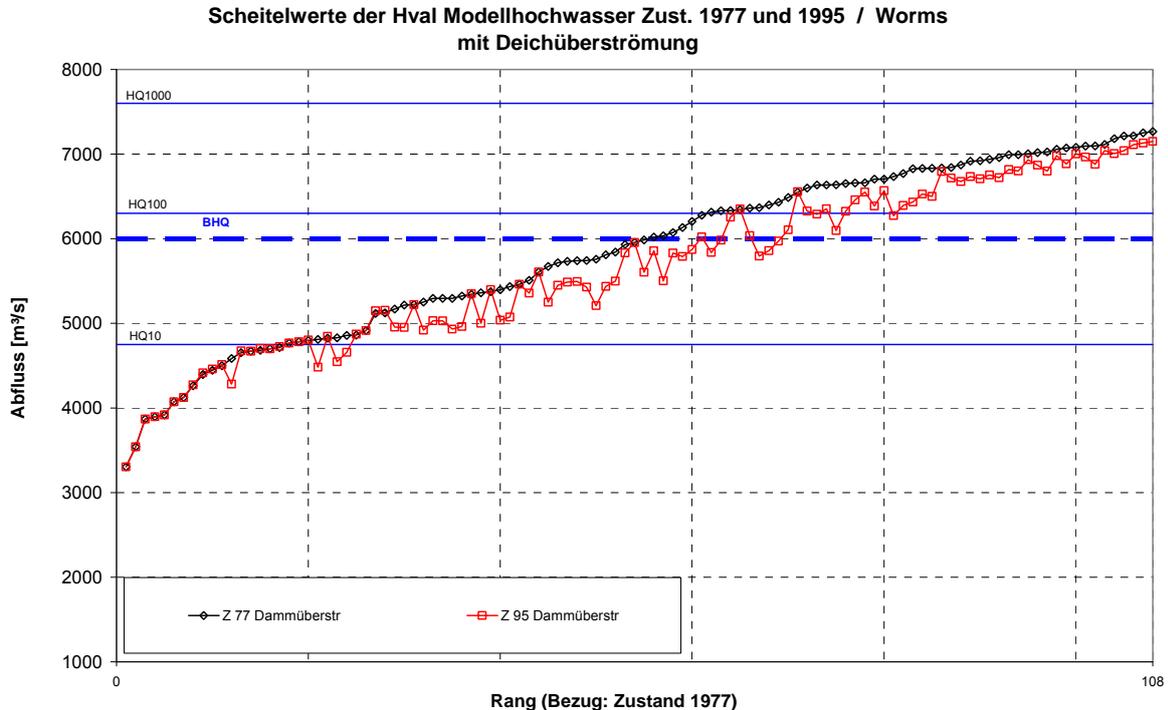


Fig. 7.3 : Valeurs de débit de pointe pour les états d'aménagement 1977 et 1995 (calculés avec submersion de digues) à l'échelle de Worms. Classement rapporté à l'état 1977.

## Réduction 2010 avec submersion de digues

### Impact des mesures opérationnelles en 2010 à l'échelle de Maxau

- La réduction maximale par rapport à l'état 1995 est de 290 m<sup>3</sup>/s (inchangée par rapport à la variante de calcul sans submersion de digues).

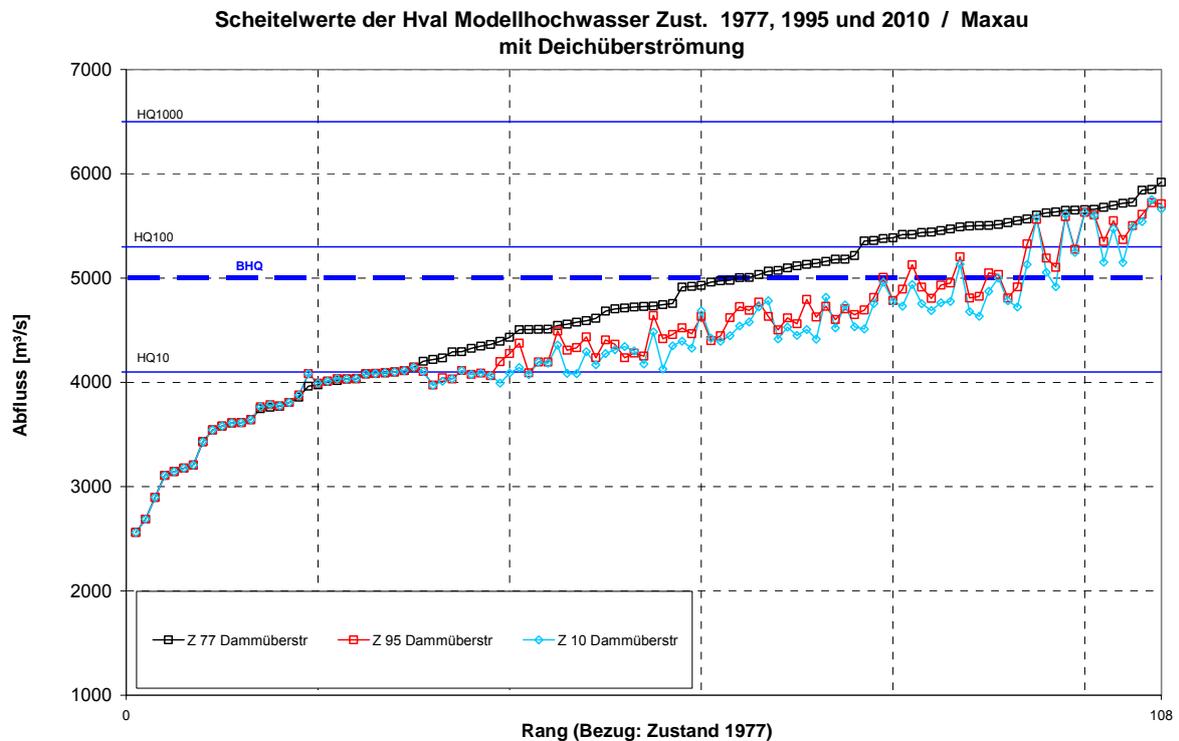


Fig. 7.4 : Valeurs de débit de pointe pour les états d'aménagement 1977, 1995 et 2010 (calculés avec submersion de digues) à l'échelle de Maxau. Classement rapporté à l'état 1977.

### Impact des mesures opérationnelles en 2010 à l'échelle de Worms

- La réduction maximale par rapport à l'état 1995 est d'env. 350 m<sup>3</sup>/s (identique à la variante de calcul sans submersion de digues).

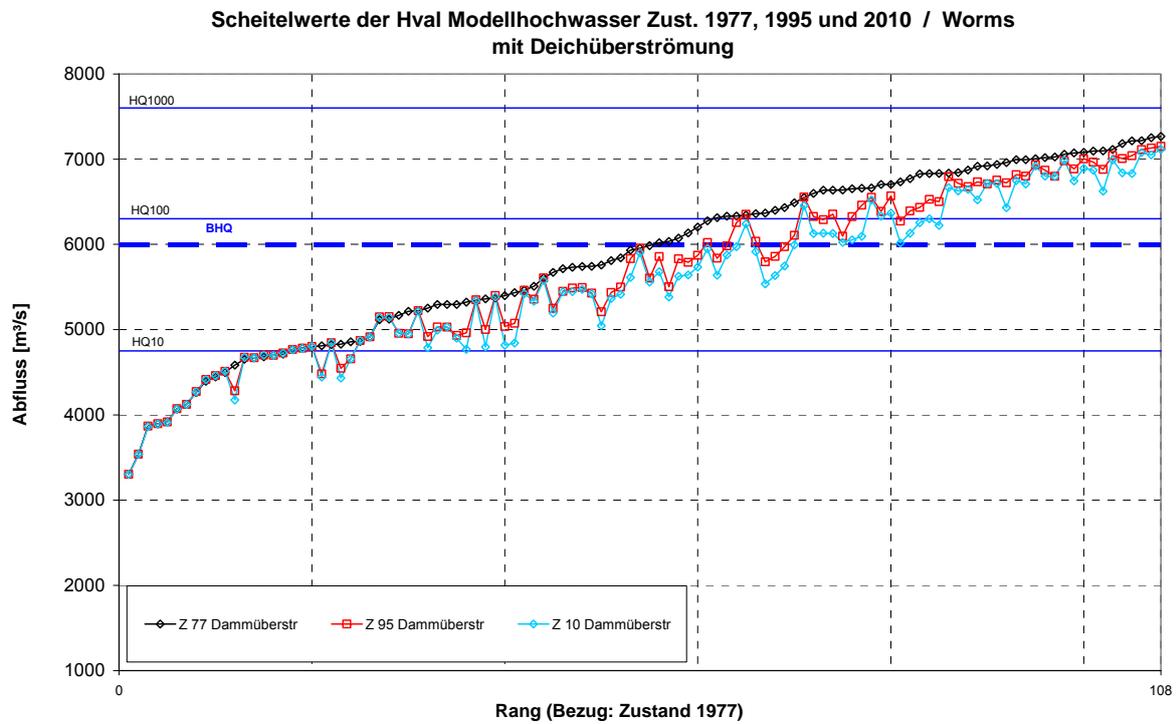


Fig. 7.5 : Valeurs de débit de pointe pour les états d'aménagement 1977, 1995 et 2010 (calculés avec submersion de digues) à l'échelle de Worms. Classement rapporté à l'état 1977.

### Réduction 2020 avec submersion de digues

Etats d'aménagement 1995 et 2020 calculés avec submersion de digues à l'échelle de Maxau :

### Impact des mesures opérationnelles en 2020 à l'échelle de Maxau

- A l'état 2020, on obtient pour les surfaces inondables situées en amont de Maxau un volume maximal de 40 millions de m<sup>3</sup> (et de 65,5 millions de m<sup>3</sup> à l'état 1977).
- La réduction maximale de débit de pointe atteinte par rapport à l'état d'aménagement 1995 est de 392 m<sup>3</sup>/s au maximum (résultat identique à celui de la variante sans submersion de digues).

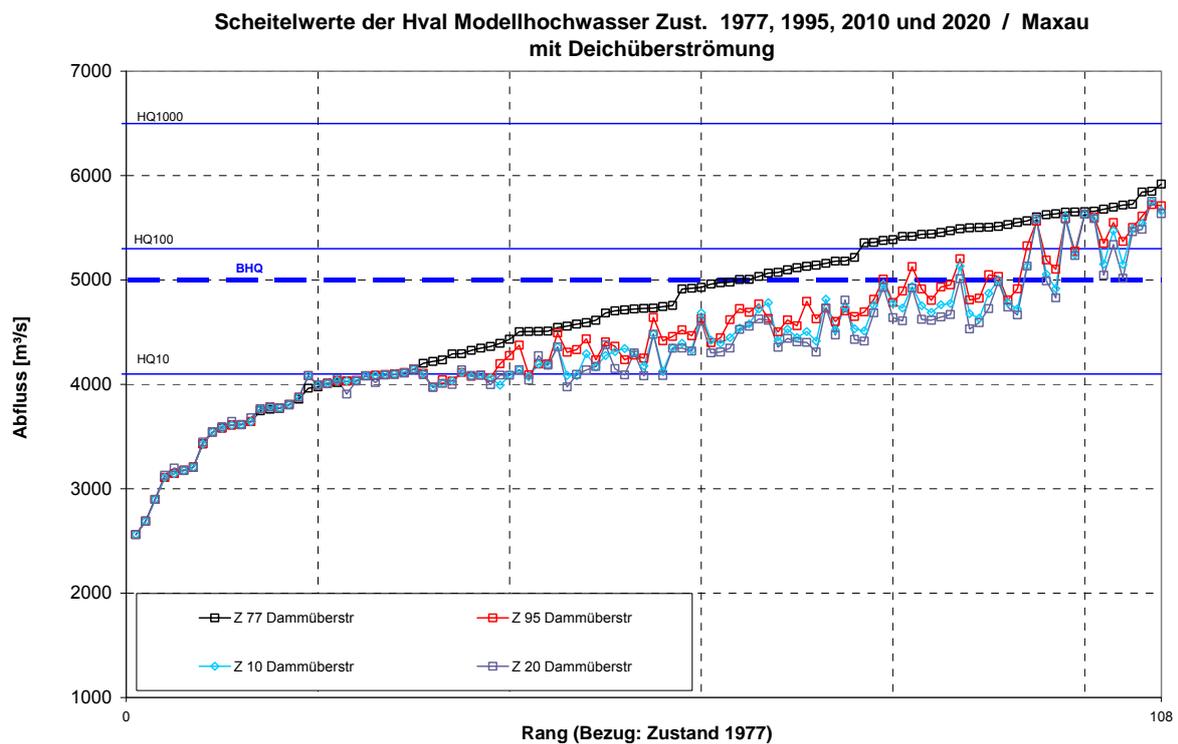


Fig. 7.6 : Valeurs de débit de pointe pour les états d'aménagement 1977, 1995, 2010 et 2020 (calculés avec submersion de digues) à l'échelle de Maxau. Classement rapporté à l'état 1977.

### Impact des mesures opérationnelles en 2020 à l'échelle de Worms

- Le volume maximal atteint au total par les 12 surfaces inondables est de 79 millions de m<sup>3</sup> (et de 164 millions de m<sup>3</sup> pour l'état d'aménagement 77).
- Rapporté à l'état 1995, les réductions de débit de pointe atteignent jusqu'à 674 m<sup>3</sup>/s (40 m<sup>3</sup>/s de moins que dans le calcul sans submersion de digues).

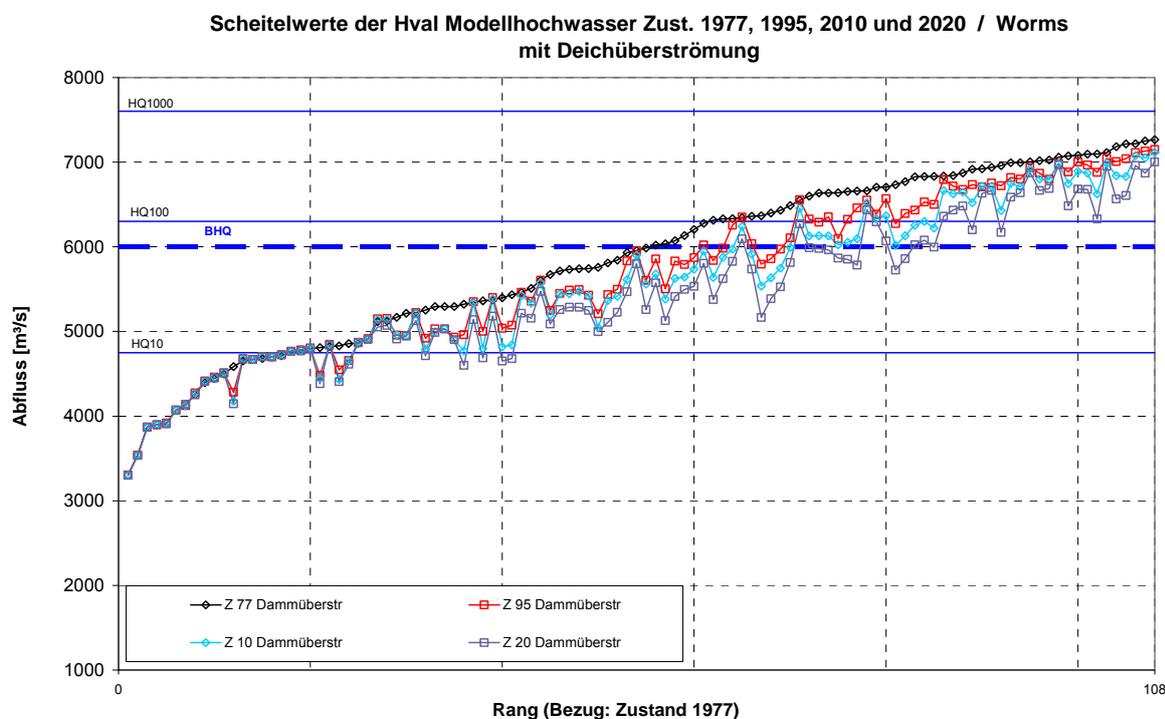


Fig. 7.7 : Valeurs de débit de pointe pour les états d'aménagement 1977, 1995, 2010 et 2020 (calculés avec submersion de digues) à l'échelle de Worms. Classement rapporté à l'état 1977.

L'état de référence 1977 a été choisi dans les figures 7.2 à 7.7 pour satisfaire aux conditions particulières en présence sur le Rhin supérieur.

On trouvera dans la figure 7.8 pour l'échelle de Maxau et dans la figure 7.9 pour celle de Worms la représentation graphique des valeurs de pointe [m<sup>3</sup>/s] et des réductions des débits de pointe [cm] entre les différents états d'aménagement classés à l'état 1995 sans submersion de digues.

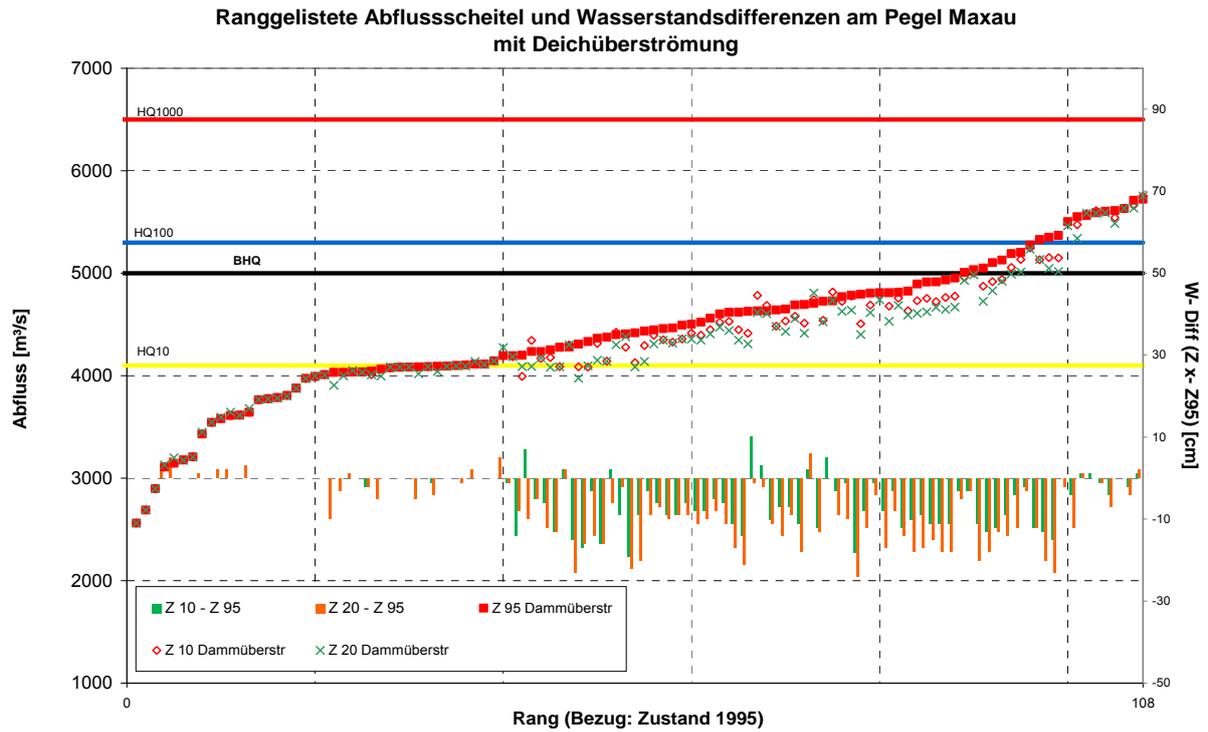


Fig. 7.8 : Valeurs de pointes de débit pour les états d'aménagement 1995, 2010 et 2020 (calculées avec submersion de digues) à l'échelle de Maxau. Classement rapporté à l'état 1995

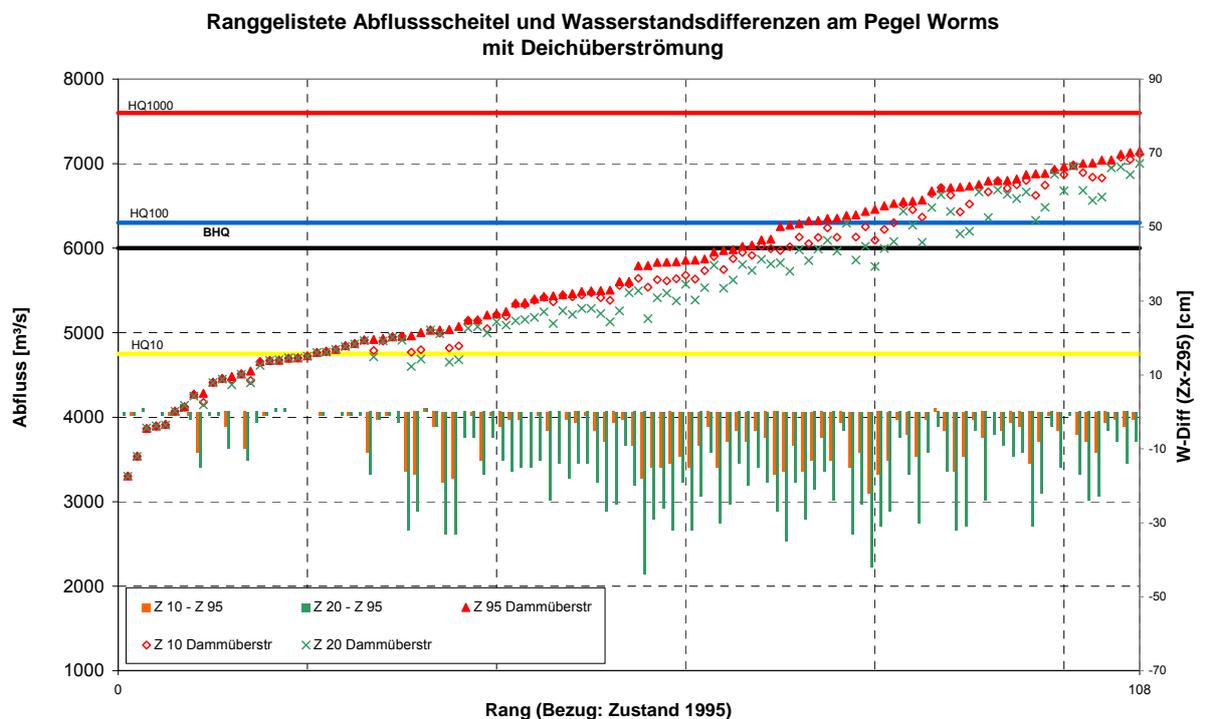


Fig. 7.9 : Valeurs de pointes de débit pour les états d'aménagement 1995, 2010 et 2010 (calculées avec submersion de digues) à l'échelle de Worms. Classement rapporté à l'état 1995

La représentation ci-dessous (figure 7.10) expose les pointes de débit et les réductions de pointes de niveau d'eau pour les échelles et tronçons du Rhin considérés dans les calculs du GE HVAL rapportés à l'état 1995 avec submersion de digues, 2010 avec submersion de digues et 2020 avec submersion de digues. Les différentes valeurs sont listées dans les tableaux en annexe et peuvent ainsi être mises en relation avec les crues modélisées correspondantes.

La figure 7.10 représente à l'échelle de Mayence (en les ordonnant sur l'axe gauche des ordonnées) les débits de pointe classés par rapport à l'état 1995 sous forme de carrés bleus (état 1995 avec prise en compte de submersions de digues), de losanges oranges (état 2010 avec prise en compte de submersions de digues) et de croix vertes (état 2020 avec prise en compte de submersions de digues). Les valeurs statistiques de débit extrêmes  $HQ_{10}$ ,  $HQ_{100}$ ,  $HQ_{200}$ ,  $HQ_{\text{extrême}}$  valables pour l'état 1977 sont également reportées sur l'axe des ordonnées à gauche. Les différences de pointes de niveau d'eau reportées à l'état 1995 sur l'axe droit des ordonnées avec prise en compte de submersions de digues sont représentées sous forme de barres orange pour l'état 2010 (avec submersions de digues) et de barres vertes pour l'état 2020 (avec submersions de digues).

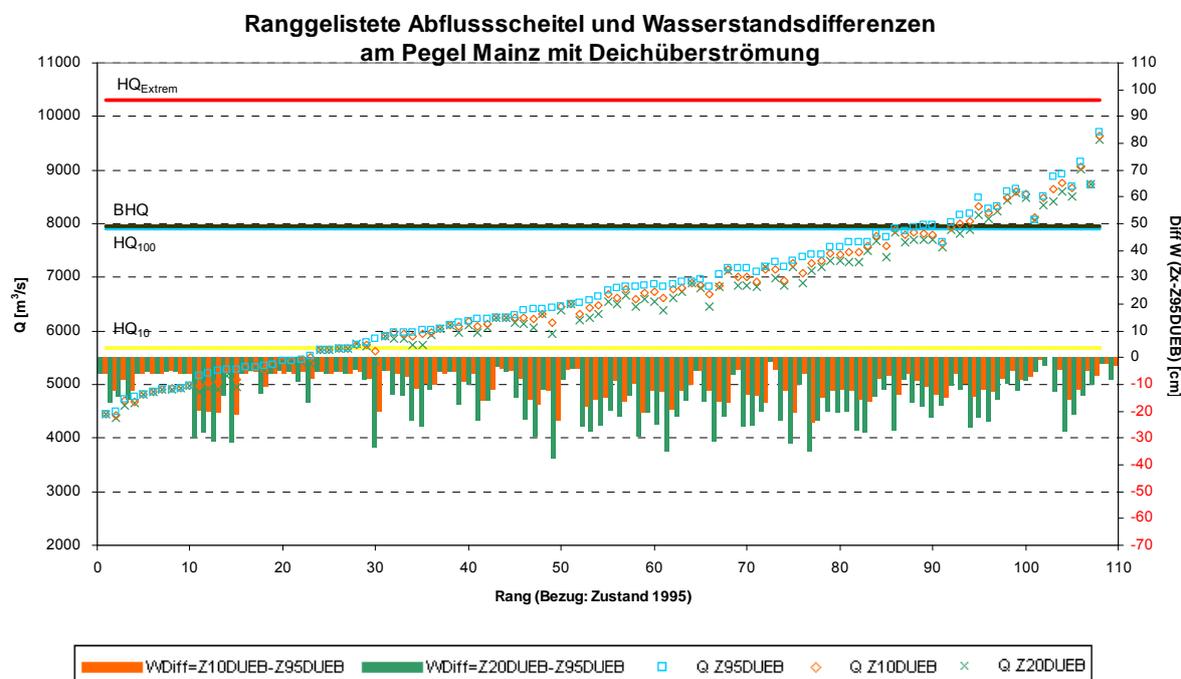


Fig. 7.10 : Valeurs de pointes de débit et différences de pointes de niveau d'eau à l'échelle de Mayence pour les états d'aménagement 1995, 2010 et 2020 (dans chaque cas avec prise en compte de submersions de digues). Classement rapporté à l'état 1995

Pour l'état 2010, les pointes de niveau d'eau à l'échelle de Mayence sont abaissées en moyenne de 11 cm en situation de  $HQ_{100}$  et de 4 cm en moyenne en situation de  $HQ_{\text{extrême}}$  par rapport à l'état 1995, compte tenu de submersions de digues. La plage de réduction des pointes de niveau d'eau entre crues de forte probabilité et crues de faible probabilité varie entre 0 cm et -24 cm pour l'état 2010 avec prise en compte de submersions de digues. Pour l'état 2020, les pointes de niveau d'eau évoluent entre -2 cm et -37 cm, de sorte que l'on obtient en moyenne pour cet état une réduction de pointe de niveau d'eau de 18 cm pour une crue  $HQ_{100}$  et de 7 cm pour une crue  $HQ_{\text{extrême}}$ .

La figure 7.11 met en évidence les effets constatés sur les pointes de débit et de niveau d'eau à l'échelle de Kaub, compte tenu de submersions de digues.

Pour l'état 2010, qui est représenté en couleur orange, les pointes de niveau d'eau à l'échelle de Kaub sont abaissées en moyenne de 16 cm en situation de  $HQ_{100}$  et de 13 cm en moyenne en situation de  $HQ_{\text{extrême}}$  par rapport à l'état 1995. La plage correspondante de réduction des pointes de niveau d'eau entre les crues de forte probabilité et les crues de faible probabilité varie entre -2 cm et -33 cm. Pour l'état 2020, la réduction moyenne de la pointe de niveau d'eau varie entre -26 cm pour un  $HQ_{100}$  et -21 cm pour un  $HQ_{\text{extrême}}$ . Les valeurs extrêmes de modification des pointes de niveau d'eau évoluent dans un intervalle de +1 cm à -49 cm.

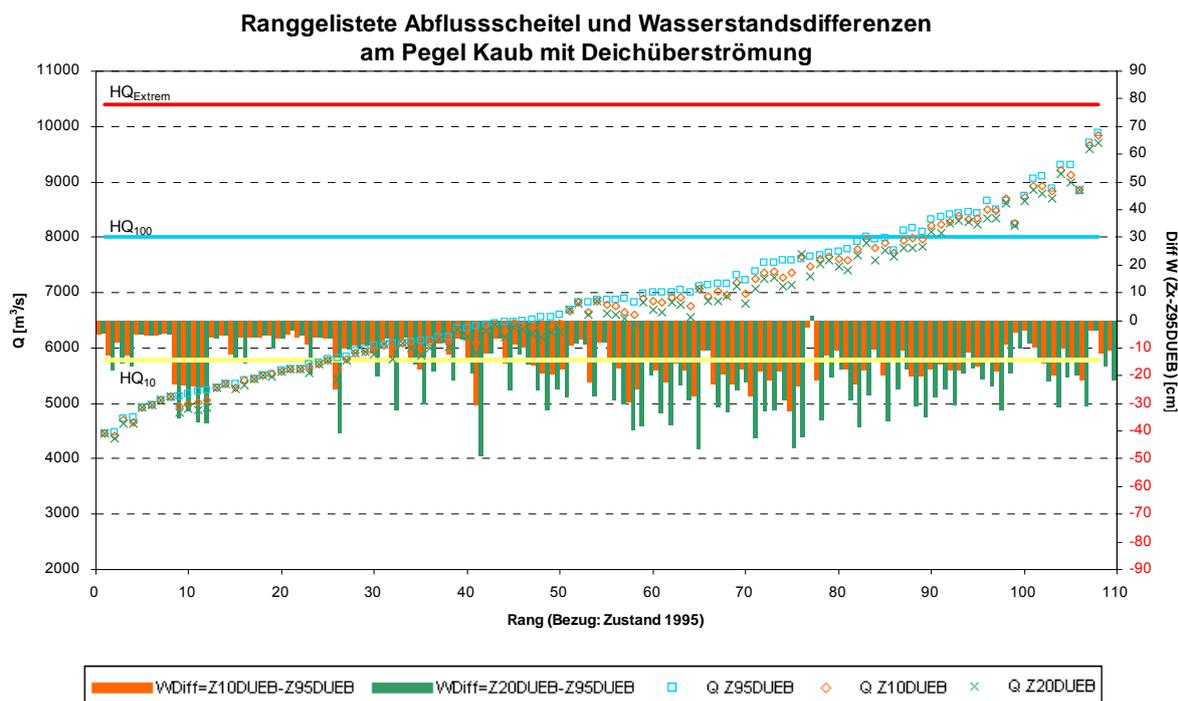


Fig. 7.11 : Valeurs de pointes de débit et différences de points de niveau d'eau à l'échelle de Kaub pour les états d'aménagement 1995, 2010 et 2020 (dans chaque cas avec prise en compte de submersions de digues). Classement rapporté à l'état 1995

La figure 7.12 montre sous forme de barres orange que les réductions obtenues à l'échelle d'Andernach sur les pointes de niveau d'eau pour l'état 2010 évoluent entre + 2 cm et - 25 cm et sont en moyenne de -12 cm pour une crue HQ<sub>100</sub> et de -10 cm pour une crue HQ<sub>extrême</sub>. Les barres vertes représentent les réductions moyennes obtenues sur les pointes de niveau d'eau pour l'état 2020 évoluent entre + 2 cm et - 37 cm, compte tenu de submersions de digues, et sont en moyenne de -18 cm pour une crue HQ<sub>100</sub> et de -14 cm pour une crue HQ<sub>extrême</sub>.

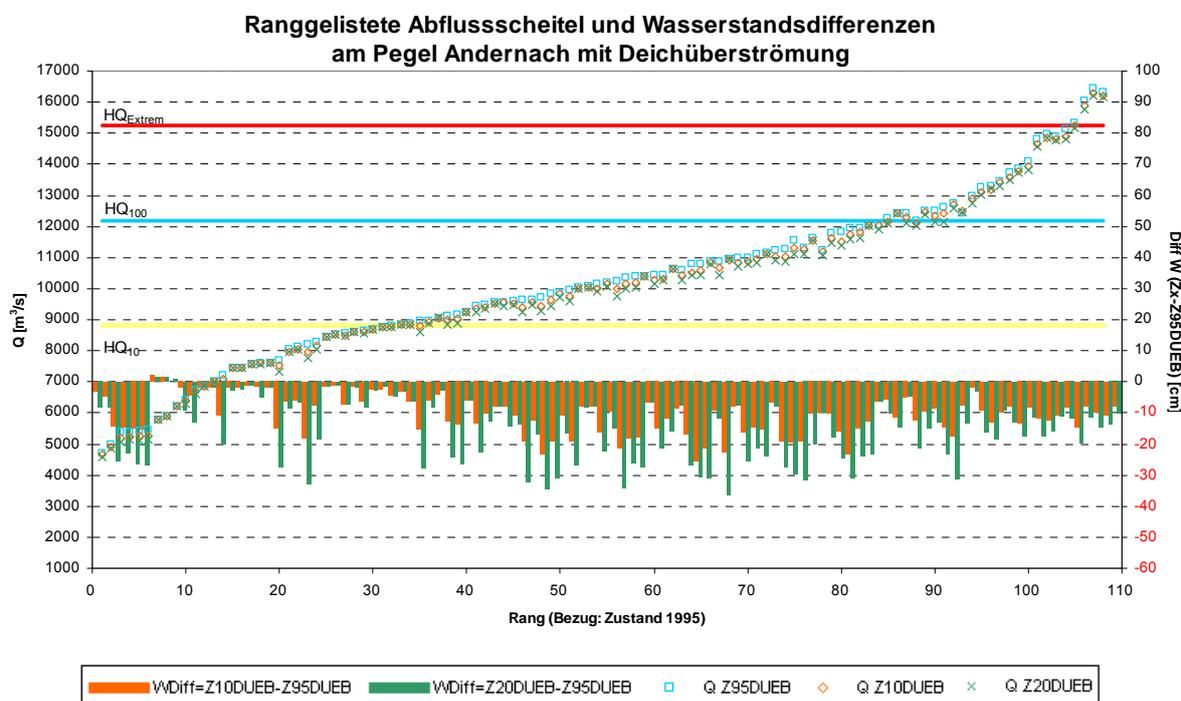


Fig. 7.12 : Valeurs de pointes de débit et différences de pointes de niveau d'eau à l'échelle d'Andernach pour les états d'aménagement 1995, 2010 et 2020 (dans chaque cas avec prise en compte de submersions de digues). Classement rapporté à l'état 1995

La figure 7.13 montre les pointes de débit à l'échelle de Cologne avec prise en compte de submersions de digues pour 1995 (carrés bleus), 2010 (losanges orange) et 2020 (croix vertes) (classement rapporté à l'état 1995). Les réductions de pointes de niveau d'eau ici représentées sont exprimées sous forme de moyennes pour le tronçon compris entre le débouché de la Sieg et celui de la Ruhr. Pour l'état 2010, les modifications de pointes de niveau d'eau sont en moyenne de 0 cm pour une crue HQ<sub>100</sub> et de + 1 cm pour une crue HQ<sub>extrême</sub>. La plage correspondante de réduction des pointes de niveau d'eau (barres orange reportées sur l'axe droit des ordonnées) entre les crues de forte probabilité et les crues de faible probabilité varie entre +9 cm et -11 cm pour l'état 2010. Les modifications obtenues sur les pointes de niveau d'eau pour l'état 2020 évoluent entre + 9 cm et - 24 cm et sont en moyenne de -5 cm pour une crue HQ<sub>100</sub> et de -4 cm pour une crue HQ<sub>extrême</sub>.

En regard de la modification du profil d'écoulement sur le Rhin inférieur (lit mineur plus large), une réduction des débits semblable à celle de l'échelle d'Andernach entraîne une diminution nettement plus faible des niveaux d'eau.

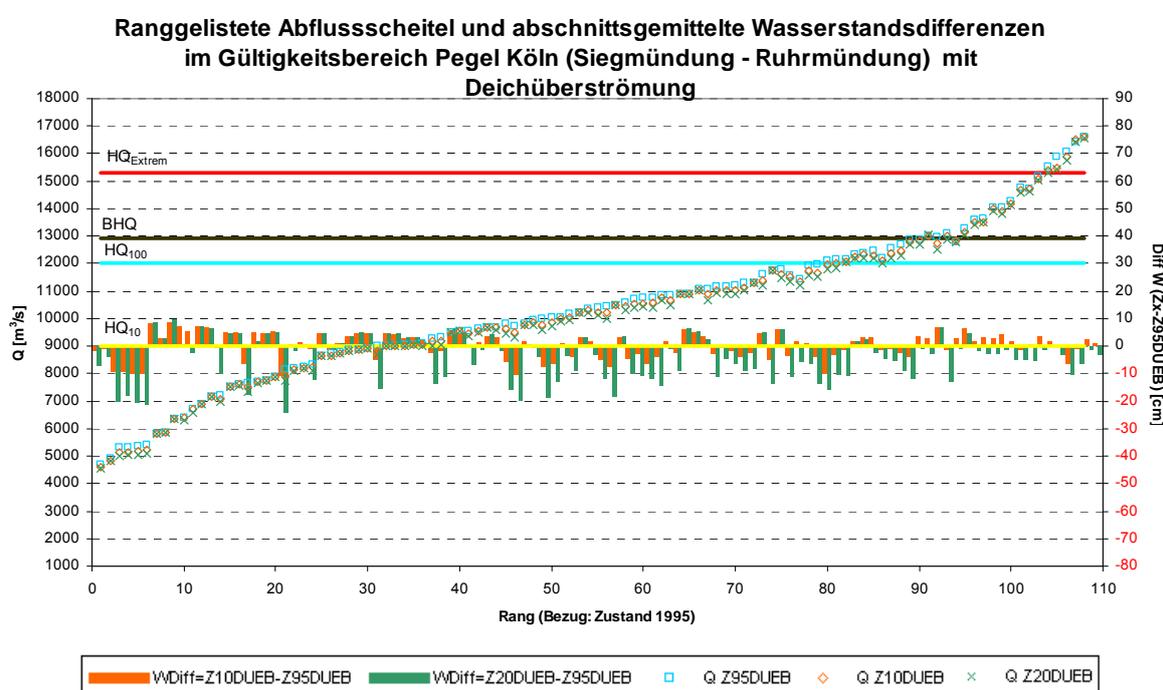


Fig. 7.13 : Valeurs de pointes de débit et différences moyennes des pointes de niveau d'eau rapportées au tronçon situé entre le débouché de la Sieg et celui de la Ruhr (échelle de Cologne) pour les états d'aménagement 1995, 2010 et 2020 (calculées avec submersion de digues). Classement rapporté à l'état 1995

Pour l'état 2010 avec prise en compte de submersions de digues, les pointes de niveau d'eau entre le débouché de la Ruhr et le Pannerdensche Kop sont rehaussées en moyenne de +2 cm en situation de  $HQ_{100}$  et de +3 cm en situation de  $HQ_{\text{extrême}}$  par rapport à l'état 1995 avec prise en compte des submersions de digues. Ces modifications (moyennes rapportées à un tronçon) de pointes de niveau d'eau sont représentées dans la figure 7.14 avec les pointes de débit à l'échelle d'Andernach. La plage correspondante de modification des pointes de niveau d'eau (barres orange) entre les crues de forte probabilité et les crues de faible probabilité varie entre +7 cm et -10 cm. Pour l'état 2020, on obtient une marge de variation comprise entre +5 cm et -29 cm. La réduction moyenne de la pointe de niveau d'eau d'une crue  $HQ_{100}$  est de -9 cm, celle d'une crue  $HQ_{\text{extrême}}$  de -17 cm.

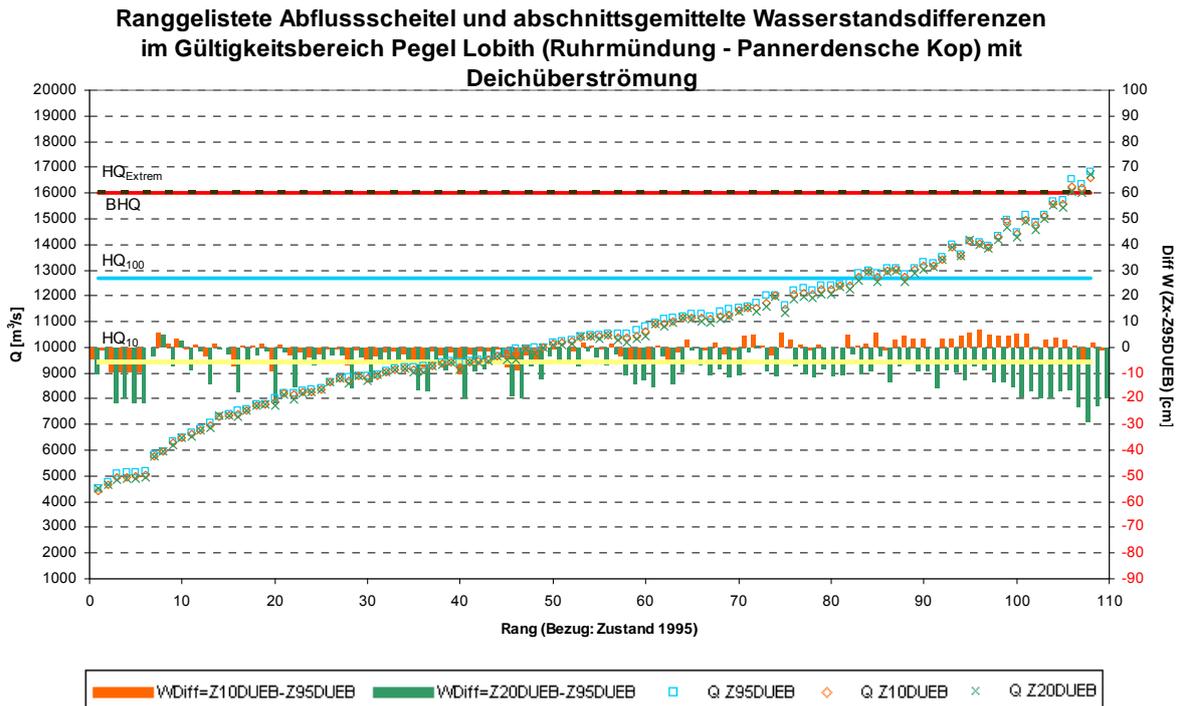


Fig. 7.14 : Valeurs de pointes de débit et différences moyennes des pointes de niveau d'eau rapportées au tronçon situé entre le débouché de la Ruhr et le Pannerdensche Kop (échelle de Lobith) pour les états d'aménagement 1995, 2010 et 2020 (calculées avec submersion de digues). Classement rapporté à l'état 1995

La figure 7.15 représente les pointes de débit à l'échelle de Lobith et les réductions moyennes des niveaux d'eau des pointes rapportées au tronçon Nederrijn/Lek avec prise en compte de submersions de digues. Pour l'état 2010, les pointes de niveau d'eau sont abaissées en moyenne de 2 cm pour une crue  $HQ_{100}$  et une crue  $HQ_{\text{extrême}}$ . La plage correspondante de réduction des pointes de niveau d'eau (barres orange) entre les crues de forte probabilité et les crues de faible probabilité varie entre +1 cm et -6 cm pour l'état 2010. Pour l'état 2020, on obtient une marge de variation comprise entre -1 cm et -23 cm. La modification moyenne de la pointe d'une crue  $HQ_{100}$  est de -7 cm, celle d'une crue  $HQ_{\text{extrême}}$  de -9 cm.

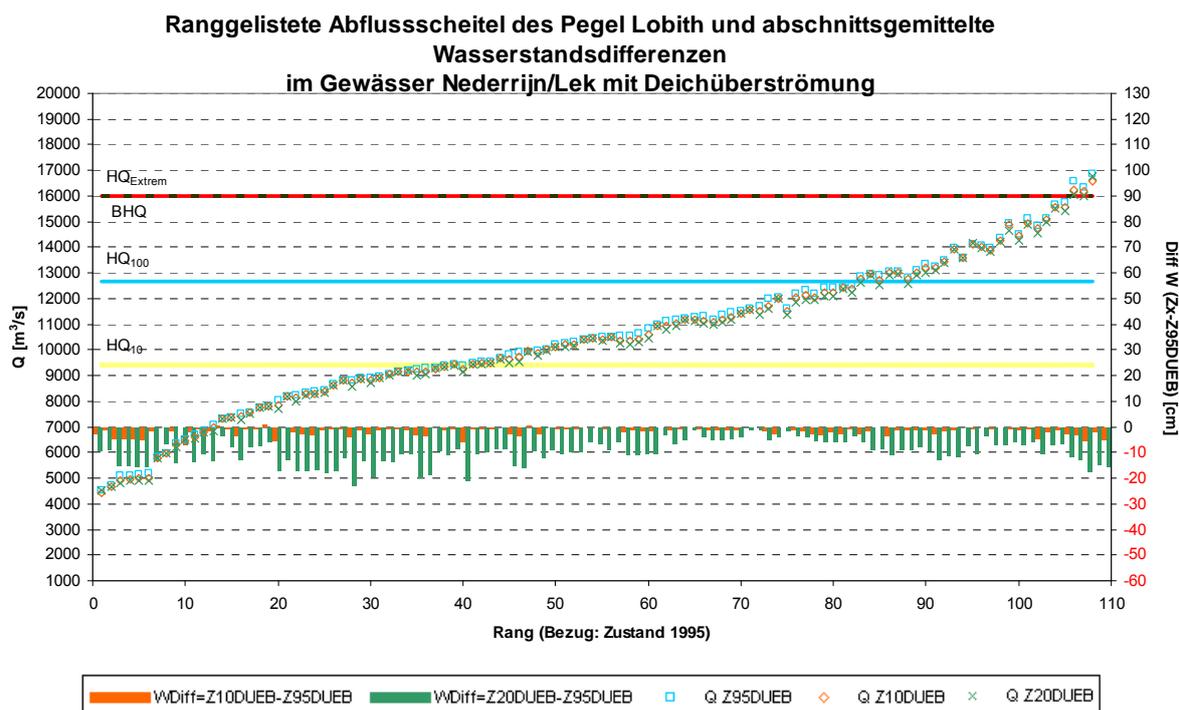


Fig. 7.15 : Valeurs de pointes de débit et différences moyennes des pointes de niveau d'eau rapportées au tronçon du Nederrijn/Lek pour les états d'aménagement 1995, 2010 et 2020 (échelle de Lobith) (calculées avec submersion de digues). Classement rapporté à l'état 1995

La figure 7.16 représente les pointes de débit à l'échelle de Lobith et les réductions moyennes des niveaux d'eau des pointes rapportées au tronçon du Waal avec prise en compte de submersions de digues. Pour l'état 2010, les pointes de niveau d'eau sont abaissées en moyenne de 2 cm pour une crue HQ<sub>100</sub> et une crue HQ<sub>extrême</sub>. La plage correspondante de réduction des pointes de niveau d'eau (barres orange) entre les crues de forte probabilité et les crues de faible probabilité varie entre +1 cm et -8 cm pour l'état 2010. Pour l'état 2020, les chiffres évoluent dans une fourchette comprise entre -6 cm et -48 cm, la modification moyenne de pointe de niveau d'eau étant de -16 cm pour une crue HQ<sub>100</sub> et de -19 cm pour une crue HQ<sub>extrême</sub>.

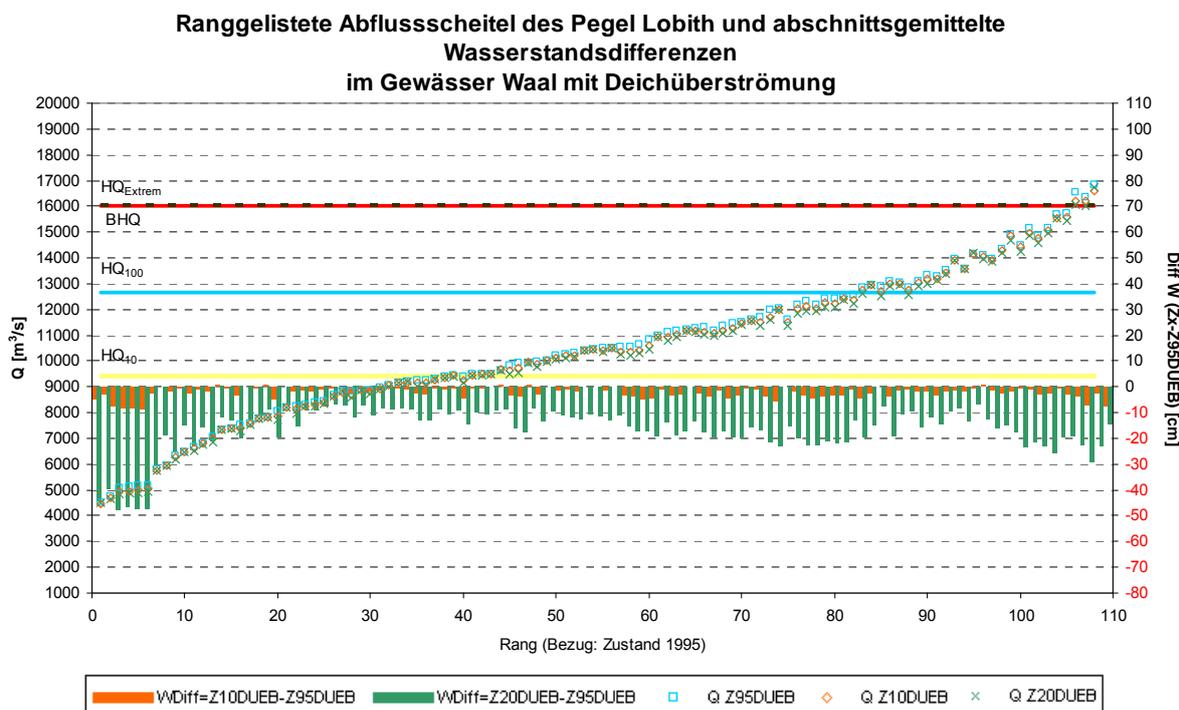


Fig. 7.16 : Valeurs de pointes de débit et différences moyennes des pointes de niveau d'eau rapportées au tronçon du Waal (échelle de Lobith) pour les états d'aménagement 1995, 2010 et 2020 (calculées avec submersion de digues). Classement rapporté à l'état 1995

La figure 7.17 représente les pointes de débit à l'échelle de Lobith et les réductions moyennes des niveaux d'eau des pointes rapportées au tronçon de l'IJssel avec prise en compte de submersions de digues. Pour l'état 2010, les pointes de niveau d'eau sont abaissées en moyenne de 2 cm pour une crue HQ<sub>100</sub> et de 3 cm une crue HQ<sub>extrême</sub>. La plage correspondante de réduction des pointes de niveau d'eau (barres orange) entre les crues de forte probabilité et les crues de faible probabilité varie entre 0 cm et -7 cm pour l'état 2010. Pour l'état 2020, on obtient une marge de variation comprise entre -25 cm et -56 cm. La réduction moyenne de la pointe d'une crue HQ<sub>100</sub> est de -43 cm, celle d'une crue HQ<sub>extrême</sub> de -46 cm.

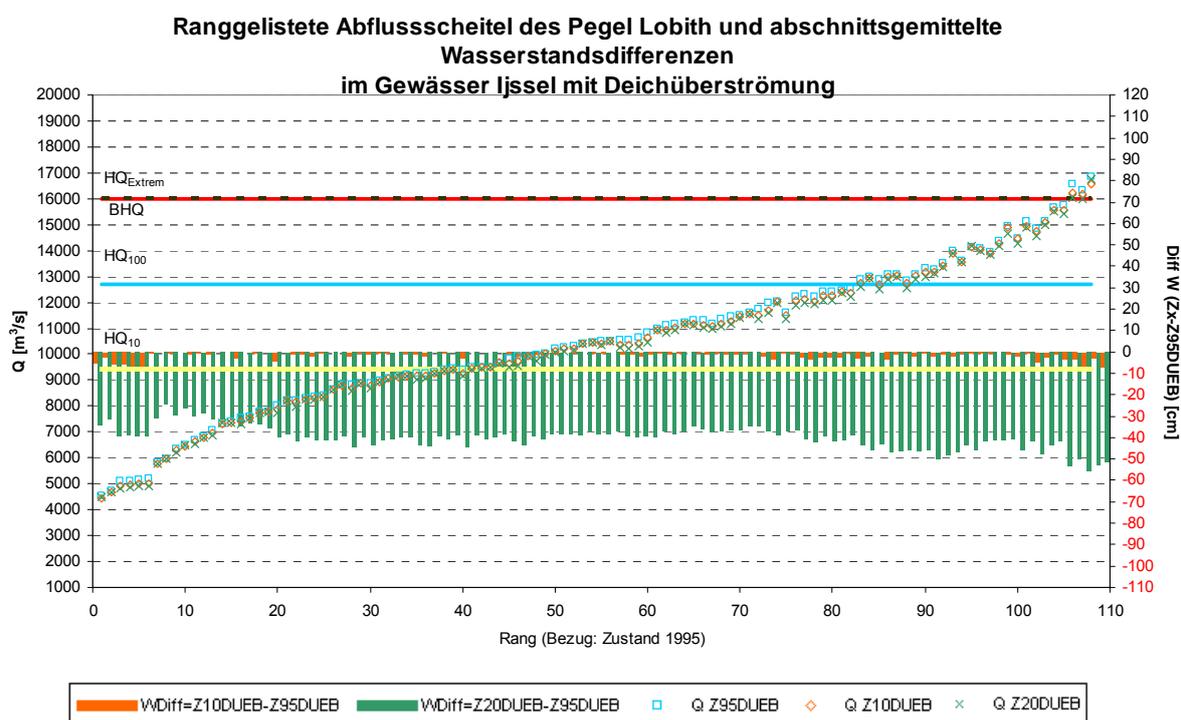


Fig. 7.17 : Valeurs de pointes de débit et différences moyennes des pointes de niveau d'eau rapportées au tronçon de l'IJssel (échelle de Lobith) pour les états d'aménagement 1995, 2010 et 2020 (calculées avec submersion de digues). Classement rapporté à l'état 1995

Pour les crues modélisées de l'ordre d'un HQ<sub>100</sub>, on trouvera sous forme d'aperçu général dans la figure 7.18 les modifications moyennes de débit et de pointe de niveau d'eau obtenues dans les différents tronçons du Rhin au travers des mesures de réduction des niveaux d'eau pour l'état 2010 par rapport à l'état 1995 avec et sans prise en compte de submersions de digues. En aval du débouché de la Moselle (à partir de l'échelle d'Andernach), les réductions de niveau d'eau atteintes sont sensiblement plus faibles dans le Rhin inférieur et dans les bras néerlandais du Rhin que dans le cours septentrional du Rhin supérieur (Mayence) et le cours méridional du Rhin moyen (Kaub) en raison des conditions morphologiques respectives (largeur et lit).

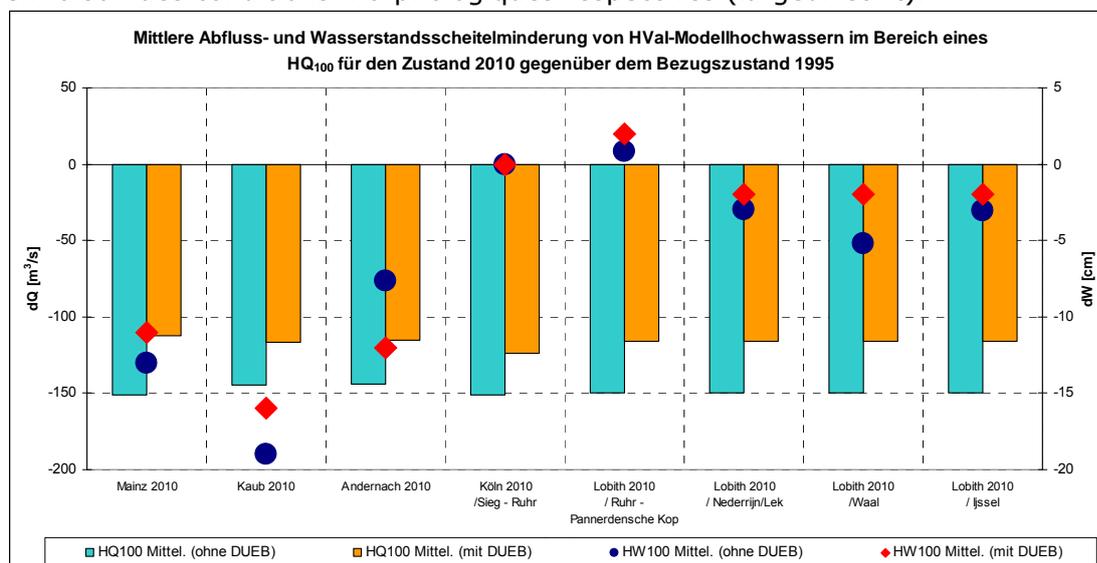


Fig. 7.18 : Réductions moyennes des pointes de débit et de niveau d'eau pour l'état 2010 et une crue de l'ordre d'un HQ<sub>100</sub>

En raison de la somme importante de résultats de calculs, il n'est pas possible d'afficher ici ces résultats dans le détail.

On trouvera dans la synthèse toutes les modifications déterminantes des niveaux d'eau pour tous les états d'aménagement du Rhin (voir tableaux 1 à 10). Cependant, ce sont les moyennes qui sont déterminantes pour l'évaluation globale des résultats. Les valeurs extrêmes ne reflètent que des cas particuliers rapportés aux crues et tronçons considérés. Afin de limiter les variations aléatoires des résultats, les tableaux présentent dans chaque cas les percentiles 10 et 90 (pour autant que l'on ait plus de 10 valeurs dans la classe).

Pour compléter cette synthèse, l'annexe 9 rassemble, également pour les valeurs extrêmes, les différences de débit et de niveau d'eau.

## Bibliographie

Bundesanstalt für Gewässerkunde (1999) : Einfluss der geplanten Retentionsmaßnahmen an Ober- und Niederrhein auf extreme Abflüsse am Niederrhein, Abschlussbericht, BfG-1221, Koblenz.

Bundesanstalt für Gewässerkunde (2011): Nachweis 2010 der Wirkung von wasserstandsmindernden Maßnahmen auf Extremhochwasserstände des Rheins zwischen Worms und der Nordsee, Abschlussbericht, BfG, Koblenz, Stand 2.11.2011; Document HVAL(5)11-04-04, non publié, non traduit

CIPR (2006) : Identification de l'efficacité des mesures de réduction des niveaux de crue extrêmes à la suite de la mise en œuvre du Plan d'action contre les inondations. Rapport final (rapport CIPR n° 153f)

CIPR (2006) : Plan d'Action contre les Inondations 1995 – 2005 – Objectifs opérationnels, mise en oeuvre et résultats (brochure et rapport CIPR n° 156d)

CIPR (1998) : Plan d'Action contre les Inondations

Commission permanente pour l'aménagement du Rhin supérieur, GT Statistiques (2001) : Débits de crue selon différentes fréquences aux limnimètres du Rhin à Maxau et Worms. Groupe de travail 'Statistiques' de la Commission permanente pour l'aménagement du Rhin entre Kehl/Strasbourg et Neuburgweier/Lauterbourg

Commission permanente pour l'aménagement du Rhin supérieur (1998) : Vérification de l'efficacité des mesures de rétention des crues sur le Rhin supérieur entre Bâle et Worms. GT Identification de l'efficacité des mesures

DELTA RES (2010): SOBEK-modellen Deltarijn, Bericht Projekt Nr. 1201161-000, Auftraggeber Rijkswaterstaat Waterdienst

Deutsch-Niederländische Arbeitsgruppe Hochwasser (2004a): Grenzüberschreitende Auswirkungen von extremem Hochwasser am Niederrhein, Teilbericht Eingabedaten für das DSS Niederrhein-Rheinzweige. ISBN9036956668. Auch in niederländischer Sprache unter ISBN9036956714.

Deutsch-Niederländische Arbeitsgruppe Hochwasser (2004b): Grenzüberschreitende Auswirkungen von extremem Hochwasser am Niederrhein, Teilbericht Überflutungen in Nordrhein-Westfalen und Gelderland. ISBN9036956641. Auch in niederländischer Sprache unter ISBN9036956629.

Hochwasserstudienkommission für den Rhein (1978): Ergebnisse der Untersuchungen über die Hochwasser und ihre Entwicklung von Beginn der Aufzeichnungen an, die Einflüsse des Ausbaus des Rheins, seiner Nebenflüsse und der Seen auf das Hochwasser, den derzeitigen Stand des Hochwasserschutzes sowie Empfehlungen für Maßnahmen gegen die vergrößerte Hochwassergefahr (Teil 1: Text; Teil 2: Anlagen; Teil 3: Berichte der Delegationen; Teil 4: Dokumentation von Pegelunterlagen und sonstige Daten).

Hochwasserstudienkommission für die Rheinstrecke Kaub-Rolandswerth (1993): Der Einfluss des Oberrheinausbaus und der am Oberrhein vorgesehenen Retentionsmaßnahmen auf die Hochwasser am Mittelrhein von Kaub bis Köln; Bericht: Auswirkung der Rückhaltmaßnahmen am Oberrhein nach dem deutsch-französischen Vertrag von 1982. Materialien zum Hochwasserschutz am Rhein. Ministerium für Umwelt, Rheinland-Pfalz. 74 S.; Anlagen.

HKV (2011): SOBEEK-Models Rhine for HAL and GRADE including flood areas behind the dikes, Bericht HKV-consultants, Project PR2140.10 in Auftrag von Deltares, Lelystad 2011 vgl. HVAL(5)11-03e

HSK (1978) : Rapport Final de la Commission d'Étude des Crues du Rhin

HVAL (2006) : Identification de l'efficacité des mesures de réduction des niveaux de crue extrêmes à la suite de la mise en œuvre du Plan d'action contre les inondations jusqu'en 2005 (rapport CIPR n° 153d).

HVAL (2009) : Approche d'identification de l'efficacité de mesures dans le bassin du Rhin et dans le Rhin (objectif opérationnel n° 2 du Plan d'Action contre les inondations) 2010 – 2015 – 2020, document HVAL(1)09-03f

HVAL/Bundesanstalt für Gewässerkunde (2010) : 1. rapport intermédiaire de la BfG dans le cadre de l'accord de coopération entre la CIPR et la BfG : Crues sélectionnées pour les calculs de simulation et éléments de base pour l'estimation de facteurs générateurs de crues modélisées ; document HVAL(4)10-04-01f, non publié.

LANUV NRW (2011): Erweiterung des SOBEEK-Modelldatensatzes von Andernach bis Lobith um die Einflüsse des Deichüberströmens, erstellt von HKV-Hydrokontor im Auftrag des LANUV NRW

Linde, A. Te (2011): Rhine at Risk? Impact of climate change on low-probability floods in the Rhine basin and the effectiveness of flood management measures. Dissertation an der Universität Amsterdam, 2011. ISBN 978-90-8570-742-4

LUA [Ed.] (2002): Hochwasserabflüsse bestimmter Jährlichkeiten  $HQ_T$  an den Pegel des Rheins. Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (LUA), Essen 2002, ISSN 1610-9619.

LUBW/BAFU (Februar 2010): Aktualisierung des Hochwasserabfluss-Längsschnitts für den Hochrhein (abgestimmter Endbericht). Bericht des Instituts für Wasser und Gewässerentwicklung des Karlsruher Institut für Technologie im Auftrag von Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Regierungspräsidium Freiburg (RPF) und Bundesamt für Umwelt der Schweizerischen Eidgenossenschaft (BAFU)

LUBW (2012): Untersuchungen zur Minderung der Hochwasserstände im Oberrhein zwischen Iffezheim und Worms zur Validierung des Aktionsplans Hochwasser der IKSR. Zwischenbericht der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg

RWS-WD (2009): Werklijn Lobith

Mens, Weerts and Ogink, (2007): Water balance Maxau-Rhine branches, Bericht WL|Delft Hydraulics, project Q4231.00, im Auftrag von Rijkswaterstaat/RIZA, Delft.

## Registre des annexes

**Annexe 1 :** Impact de mesures de rétention des eaux dans le bassin versant (tiré du rapport CIPR n° 153, annexe 2).

**Annexe 2 :** Remarques fondamentales sur l'impact des mesures de rétention

**Annexe 3 :** Crues et périodes de simulation

**Annexe 4a :** Données disponibles pour les crues historiques sélectionnées de Bâle à Lobith

**Annexe 4b :** Données disponibles pour les crues historiques sélectionnées dans le delta du Rhin

**Annexe 5 :** Relevé des débits maximaux des affluents du Rhin

**Annexe 6 :** Aspects fondamentaux concernant l'impact de submersions de digues sur le déroulement de l'onde et sur la pointe d'une crue

**Annexe 7 :**

- (1) Annexe 7a : Surfaces potentiellement inondables à la suite de submersions de digues sur le Rhin en aval du lac de Constance ; les surfaces inondables sont représentées en bleu, par analogie avec l'atlas du Rhin de la CIPR, 2001 (tiré de : te Linde, 2011)
- (2) Annexe 7b : Zones inondables prises en compte au Bade-Wurtemberg
- (3) Annexe 7c : Zones inondables prises en compte en Rhénanie-Palatinat
- (4) Annexe 7d : Subdivision de l'enveloppe inondable du Rhin inférieur en différentes surfaces inondables. La désignation des différentes zones est expliquée dans le texte (tiré de : Deutsch-Niederländische Arbeitsgruppe Hochwasser, 2004b)

**Annexe 8 :** Schématisation dans le modèle SOBEK des zones inondables derrière les digues entre Andernach et Lobith

- (1) Annexe 8a : Schéma des zones de submersion et des ruptures de digues dans le modèle SOBEK (tiré de : Deutsch-Niederländische Arbeitsgruppe Hochwasser (2004a). Tronçon Andernach - Cologne
- (2) Annexe 8b : Schéma des zones de submersion et des ruptures de digues dans le modèle SOBEK (tiré de : Deutsch-Niederländische Arbeitsgruppe Hochwasser (2004a). Tronçon Cologne - Düsseldorf
- (3) Annexe 8c : Schéma des zones de submersion et des ruptures de digues dans le modèle SOBEK (tiré de : Deutsch-Niederländische Arbeitsgruppe Hochwasser (2004a). Tronçon Düsseldorf - Lobith

**Annexe 9 :** Réduction des pointes de débit et de niveau d'eau pour les états d'aménagement analysés

**Annexe 10 :** Carte des mesures de réduction des niveaux d'eau le long du Rhin

## **Annexe 1 : Impact de mesures de rétention des eaux dans le bassin versant (tiré du rapport CIPR n° 153, annexe 2).**

Le « Plan d'Action contre les Inondations » pour le Rhin mentionne cinq catégories de mesures visant à améliorer les situations de crue sur le Rhin. Deux des cinq catégories de mesures contribuent à atteindre l'objectif opérationnel « Réduire les niveaux de crues » dans le Rhin. Il s'agit : - de la catégorie de mesures 1 :

- de la catégorie de mesures 1 : Rétention des eaux dans le bassin du Rhin, et
- de la catégorie de mesures 2 : Rétention des eaux dans le corridor fluvial.

Dans le „Plan d'action contre les inondations“, il n'est déjà accordé à la catégorie de mesures « Rétention des eaux dans le bassin du Rhin » qu'un faible effet de réduction des niveaux de crue dans le Rhin à l'opposé de la catégorie « Rétention des eaux dans le corridor fluvial. Parmi les mesures mentionnées, les mesures consistant à

- 1a renaturer les cours d'eau
- 1c extensifier l'agriculture
- 1d développer les espaces naturels, reboiser
- 1e désimpermeabiliser

n'ont que de faibles impacts locaux et ne réduisent pas les niveaux d'eau dans le Rhin (CIPR 1998). Seules les catégories de mesures

- 1b redynamiser les zones inondables et
- 1f mettre en place des dispositifs techniques de rétention des crues

sont susceptibles d'avoir également des effets limités de réduction des niveaux de crue sur le Rhin. Le rapport « Estimation de l'impact de la rétention des eaux dans le bassin du Rhin » publié en 1999 par la CIPR fournit lui aussi, dans un sens similaire, des estimations détaillées à caractère surtout qualitatif sur l'impact de cette catégorie de mesures.

Il apparaît qu'une quantification précise (de la catégorie de mesures 1) ne peut être obtenue qu'à grand renfort de temps et de moyens financiers, même avec indication exacte du lieu et de l'impact. En effet, de tels calculs s'étendent encore parfois au-delà des limites d'une application modélisée fiable et vérifiable.

De l'avis des Länder, il n'est pas possible actuellement de quantifier exactement les mesures agissant au niveau local. Il n'est pas non plus nécessaire de le faire, eu égard au fait que l'impact de réduction des niveaux d'eau sur le Rhin ne peut momentanément pas être démontré. Seule les mesures consistant à « redynamiser les zones inondables » et à « mettre en place des dispositifs techniques de rétention des crues » pourraient avoir un impact, toutefois limité, sur le Rhin. Dans la mesure où d'amples mesures de ce type sont appliquées dans les bassins des affluents du Rhin, elles devraient être quantifiées, pour autant que les moyens à mettre en œuvre restent raisonnables.

Il est indiqué dans les pages suivantes pour toutes les mesures individuelles contribuant à retenir les eaux dans le bassin

- s'il semble judicieux de faire la démonstration détaillée, sous forme modélisée, de l'impact de la mesure sur le régime de crue du Rhin ou
- s'il est suffisant de faire une description qualitative de ces impacts

### **Catégorie de mesures 1 a : Restauration écologique**

Comme il est mentionné dans la publication CIPR (1999), les mesures de restauration des cours d'eau consistant à rallonger le tracé (notamment par la mise en place de méandres) permettent de réduire la pente et par conséquent d'abaisser en tendance les pointes de crue pour les tronçons directement situés en aval. Il faut cependant conserver

à l'esprit que le cours d'eau peut, en période de crue, éventuellement réutiliser l'ancien lit antérieur aux mesures de restauration pour évacuer ses eaux. En règle générale, les tronçons restaurés sont plus rugueux, dans le champ d'inondation également, et ont donc un effet de rétention, ce qui ralentit l'arrivée de la pointe de crue d'un cours d'eau au niveau de son embouchure dans l'hydrosystème auquel il est directement subordonné. Notamment dans le cas d'une restauration étendue à tout l'hydrosystème d'un affluent, on peut obtenir des réductions sensibles de pointes de crue, ceci s'accompagnant cependant d'un ralentissement de l'onde. Comme les ondes de crue des affluents précèdent souvent celle du Rhin, par exemple sur le Rhin moyen (MINISTERIUM FÜR UMWELT RHEINLAND-PFALZ 1993), il peut en résulter un rehaussement tendanciel de l'onde du Rhin sans que cette hausse ne se répercute toutefois de manière notable sur la crête.

Il existe entre-temps toute une série d'études qui se consacrent aux modifications de débit sous l'effet de mesures de restauration écologique. LEICHTFUSS & KIVUMBI (1995) quantifient à l'aide d'un modèle hydraulique l'influence de mesures de restauration dans un bassin de la Nahe (587 km<sup>2</sup> à l'échelle d'Eschenau). Ils partent de l'hypothèse d'une restauration de toutes les rivières et d'une augmentation consécutive du tracé de 30 %. Par modification du coefficient de Strickler, la rugosité a été rehaussée de cinq points. Il ressort de l'étude pour les crues observées des baisses de niveau d'eau pouvant aller jusqu'à quatre centimètres au passage de la pointe de crue à l'échelle d'Eschenau.

Pour les deux bassins situés dans les hautes terres (Mittelgebirge), celui de la Nahe (4066 km<sup>2</sup>) et celui de la Rems (583 km<sup>2</sup>), MARENBACH (2002) procède également à une quantification de l'impact de mesures de revitalisation (= restauration). Là aussi, la modélisation passe par une modification de la rugosité et des voies d'écoulement, cependant uniquement pour les tronçons de rivière jugés restaurables après étude de cartes correspondantes (par ex. les tronçons d'écoulement au cours linéaire). Dans le bassin de la Nahe, on trouve de tels tronçons dans le cours amont de la Nahe et de la Glan, ainsi que dans tous leurs tributaires. Les réductions de pointe de crue accessibles pour un HQ 100 sont de l'ordre de 6% dans le cours aval de la Nahe (ce qui correspond à une baisse de niveau d'eau d'env. 10 cm à l'échelle de Grolsheim/Nahe); sur la Rems, on peut espérer une réduction de 5% de la pointe de crue en combinaison avec de petites mesures de rétention. Toutefois, l'étude montre également que des augmentations de pointe peuvent également se produire selon les conditions morphologiques en place. Si par exemple les mesures de revitalisation ne portent que sur le cours aval de la Nahe, on obtient de légères hausses de pointe à l'embouchure de cette rivière, du fait de la superposition des ondes issues de différents sous-bassins. Sur les 5 à 6000 km de linéaire fluvial dans le bassin de la Nahe, on compte jusqu'à 1000 km de tracé dans un état (relativement) proche du naturel. Plus de 300 km de bandes riveraines ont été acquis depuis 1995, 25 km restaurés dans le cadre de projets d'aménagement écologique. L'effet des mesures de restauration réalisées entre 1995 et 2005 à hauteur du débouché dans le Rhin paraît donc arithmétiquement quasi impossible à démontrer.

Pour le bassin versant de la Lahn, LANG et TÖNSMANN (2002) ont étudié l'impact de mesures de restauration en utilisant des cartes de qualité du milieu physique, ce qui a permis d'estimer de manière à peu près réaliste le potentiel de restauration sans avoir à passer par ex. par l'hypothèse forfaitaire d'un rallongement du tracé. Pour HQ 1 à HQ 100, on obtient par calcul des abaissements de pointe de crue compris entre 6% et 17 %. Les réductions de pointes de crue dans les affluents de la Lahn ont certes pour effet d'aplatir l'onde, elles entraînent cependant en même temps une extension dans le temps des ondes de crue. Il en résulte un affaiblissement de l'effet des mesures de restauration en soi à mesure que le bassin s'agrandit, du fait de la superposition des ondes. Au niveau de la frontière avec le Land de Rhénanie-Palatinat, les calculs indiquent encore des réductions du débit de pointe de l'ordre de 2,5 à 5,5 %. Cette étude également se réfère aux objectifs potentiellement réalisables.

La conclusion que l'on peut tirer de toutes ces études est que les mesures de restauration de 3.500 km dans les affluents du Rhin visées dans le Plan d'action contre

les inondations d'ici 2005 ne contribueront pas de manière déterminante à réduire les crues extrêmes dans le bassin du Rhin. Le Plan d'action contre les inondations ne concède d'ailleurs à ces mesures de renaturation qu'un faible effet local sur de petites rivières, sans impact de réduction notable pour les grandes crues du Rhin.

Pour ces raisons, il n'apparaît pas nécessaire de démontrer plus précisément dans le cadre du Plan d'action contre les inondations, à l'aide d'outils techniques de modélisation, l'effet des mesures de renaturation des affluents en termes d'abaissement des pointes de crues du Rhin.

### **Catégorie de mesures 1 b: redynamiser les zones inondables**

Au sens strict de l'expression, la redynamisation de zones inondables doit être rangée parmi les mesures de restauration. C'est pourquoi l'impact de la rétention est ici évoqué en premier lieu (NAEF et al.

Une rétention des eaux peut avoir lieu dans le lit mineur sous forme de rétention dynamique ou dans les surfaces inondables sous forme de rétention statique. La rétention dans le lit mineur se ressent sur les crues de brève durée avec des pointes élevées (faible volume de débit) dans les cours fluviaux dont la pente est inférieure à 1%. L'atténuation de la pointe de crue par submersion du lit majeur peut être nettement plus importante que dans le cas d'une rétention dans le lit mineur. On obtient un effet de rétention dynamique dans le lit majeur par subdivision du cours en sections transversales et formation consécutive de différentes vitesses de courant dans le lit mineur et dans le lit majeur. En raison de la faible profondeur d'eau et de l'effet de friction renforcé dans le lit majeur, l'eau s'y écoule plus lentement que dans le lit mineur. Quand le ralentissement de l'onde dans le lit majeur est tel que celle-ci ne se superpose plus à l'onde du lit mineur à la fin du tronçon, on obtient alors une atténuation sensible de l'onde. Si la différence entre les vitesses d'écoulement est faible, il faut que le tronçon d'écoulement soit suffisamment long ou la durée de la crue suffisamment courte pour produire une modification notable des hydrogrammes. Si l'on a par exemple une différence de 1 m/s entre les deux vitesses, la durée de la crue doit être inférieure à trois heures sur un tronçon d'écoulement de 10 km pour que la rétention dynamique fasse réellement effet. Pour ce qui est de la rétention statique, elle survient quand les eaux atteignent le lit majeur et y sont retenues ou s'écoulent avec une vitesse négligeable. L'élément déterminant pour l'impact de la rétention statique est le moment où se produit la submersion du lit majeur. Lorsque la capacité du lit mineur est si faible qu'une submersion se produit dès le début de la crue, le volume de rétention peut déjà être épuisé sur un tronçon donné avant que la pointe de crue n'atteigne ce dernier et l'effet d'atténuation de la pointe est alors nul. En plus du moment de la submersion, le rapport entre le volume de l'espace de rétention et le volume d'eau s'écoulant dans le lit majeur est également important. Si le volume de rétention est supérieur au volume des eaux débordantes, la pointe de la crue sera alors fortement écrêtée.

Les mesures consistant à redynamiser les surfaces inondables le long des affluents du Rhin portent essentiellement sur les surfaces séparées du fleuve par des digues. On les trouve principalement dans le cours aval des fleuves et parfois également dans leur cours moyen, pour autant que ces zones aient une faible pente, comme par ex. sur la Lahn. La longueur des digues est souvent de plusieurs kilomètres et les zones protégées derrière celles-ci peuvent s'étendre sur plusieurs centaines de mètres. En règle générale, les digues ne sont certainement pas totalement abandonnées. Pour une estimation approximative du volume, on partira de l'hypothèse d'une mise en retrait des digues sur une longueur de 500 mètres, de manière à reconquérir un volume supplémentaire de rétention de 100 mètres de large et de 2 mètres de haut. On obtiendrait ainsi un volume de rétention supplémentaire de 100.000 m<sup>3</sup>. En supposant qu'il s'agisse d'une rétention plus ou moins statique, ce volume d'eau serait soustrait de l'onde. Si l'on attribue (incorrectement) ce volume uniquement à la pointe de crue, on obtiendrait pour la crue de décembre 1993 par ex. une réduction de tout juste 10 cm à l'échelle de Grolsheim/Nahe proche du débouché dans le Rhin. L'effet d'emmagasinement des eaux

démarrant cependant avec le débordement, l'effet d'atténuation ne serait plus généré au passage de la pointe de la crue. En phase de décrue, le volume stocké est rendu au fleuve et rehausse l'onde d'autant, ce qui peut se traduire par une légère augmentation de débit dans le Rhin. On peut dire globalement que la crête de crue ne serait pas touchée. D'après une étude de l'ETH (université technique) de Zurich (1998), il a été procédé - sur un tronçon d'env.10 km du cours moyen de la Nahe avec possibilité de débordement d'env.200 mètres sur les deux rives - au calcul de l'effet de rétention du lit majeur et de son impact sur le débit à l'aide d'un modèle d'écoulement bi-dimensionnel. On s'est fondé ici sur les crues de décembre 1993 et de janvier 1995 (la crue la plus forte consignée pour ce tronçon de la Nahe). Pour quantifier l'impact d'une submersion du lit majeur, on a supposé, par calcul, la présence de digues à proximité immédiate du cours d'eau, ceci pour empêcher tout débordement. Les hydrogrammes ainsi obtenus ont été comparés aux hydrogrammes historiques. En raison de la rétention dynamique de la Nahe pour les grandes crues, les résultats montrent que la réduction de débit attendue sur ce tronçon reste minime (de l'ordre de 0 à deux pour cent à l'échelle de Groshelm) et que l'on obtient uniquement un décalage de l'onde de quelques heures. Des atténuations plus importantes ne sont envisageables que sur des crues de moindre ampleur et n'ayant pas les caractéristiques de celles de 1993 et 1995. Les débordements se produisant à proximité du passage de la pointe de crue ont un effet écrêteur sensible.

Les zones inondables reconquises ne peuvent faire effet sur le débit de pointe du Rhin que si les surfaces qu'il est possible de regagner sur un affluent donné représentent un volume de rétention significatif par rapport à l'onde de crue considérée ou encore si le débordement ou l'entrée en action des surfaces reconquises ne survient que quand les niveaux d'eau sont déjà élevés et juste avant le passage de la pointe de l'onde.

Le Plan d'action contre les inondations n'attribue aux mesures de redynamisation de zones inondables qu'un faible impact (de réduction de pointe de crue) sur le Rhin. Si de telles mesures de redynamisation sont mises en œuvre à grande échelle sur des affluents importants du Rhin, on visera à en démontrer l'effet par calcul.

### **Catégorie de mesures 1c : extensifier l'agriculture / appliquer des formes de gestion agricole stimulant l'infiltration**

Des mesures particulières de gestion agricole, notamment le passage d'une culture labourée à une culture d'ensemencement sous paillis, peuvent contribuer à renforcer la capacité d'infiltration des surfaces agricoles. Des taux d'infiltration plus élevés ne débouchent cependant pas ici sur une réduction proportionnelle de la crue dans le cours d'eau, étant donné que le débit de crue est constitué pour une part déterminante par des processus souterrains à réaction rapide (LEIBUNDGUT & UHLENBROOK 1997; PIK 2001).

La formation de crues dans des bassins versants exploités à des fins agricoles ou sylvicoles par ex., résulte d'une superposition complexe de processus partiels multiples. On ne connaît que de manière très sommaire la manière dont ces différents processus générateurs de débit interfèrent à l'échelle plus fine des bassins de petite et de moyenne taille et transportent les précipitations dans les cours d'eau et on ne peut pas attribuer fiablement ces processus à l'une ou l'autre voie d'écoulement souterraine ou de surface (PIK 2001). Il en résulte que les modèles de simulation disponibles ne peuvent pas reproduire de manière suffisante les processus réels pour quantifier avec la fiabilité requise l'impact des mesures agricoles. Les recherches doivent se poursuivre dans ce domaine autant au niveau de la compréhension des processus que des techniques de modélisation.

On doit donc se limiter à une estimation qualitative de l'impact des mesures d'extensification agricole sur le débit de crue du Rhin. A ce propos, il convient de faire les remarques suivantes:

Alors que les crues extrêmes survenant dans les très petits bassins sont le plus souvent dues à des précipitations orageuses locales très intenses et relativement brèves, la formation de zones de précipitations abondantes et prolongées est nécessaire à grande

échelle pour donner lieu aux grandes crues du Rhin surviennent. S’y ajoute éventuellement l’impact d’un phénomène simultané de fonte des neiges.

Ce type de précipitations frontales, essentiel pour les crues du Rhin, ne déclenche dans les bassins non imperméabilisés pratiquement que des processus majoritairement souterrains (cf. NIEHOFF & BRONSTERT 2002) ; le fait de renforcer les capacités d’infiltration n’aura par conséquent ici pratiquement pas d’impact de réduction des crues.

Les études du PIK réalisées dans le cadre du projet LAHoR (CHR 2003) montrent que même à l’échelle de petits bassins, comme celui de la Lein pris pour exemple, « les répercussions sur les crues de la modification de paramètres de gestion des sols et des cultures par le biais de mesures de couverture du sol restent extrêmement faibles » (PIK 2001, pp. 171-172), bien que le scénario étudié parte d’une gestion par ensemencement sous paillis d’env. 23 % de la superficie du bassin. Les calculs de modélisation importants effectués dans le cadre du projet LAHoR laissent donc à penser qu’une gestion agricole promouvant l’infiltration sur env. 1% de la superficie du bassin (objectif du Plan d’action pour 2005) et sur 2% de la superficie (objectif 2020) ne contribuera pas à réduire les crues extrêmes dans le bassin du Rhin.

Le Plan d’action n’attribue également aux mesures de gestion agricoles favorisant l’infiltration qu’un faible impact de réduction des crues à l’échelle locale de cours d’eau de petite taille, cet impact étant considéré nul pour les grandes crues du Rhin.

Pour ces raisons, il n’apparaît pas nécessaire de démontrer plus précisément dans le cadre du Plan d’action contre les inondations, à l’aide d’outils techniques de modélisation, l’effet des mesures de gestion agricoles stimulant l’infiltration en termes d’abaissement des pointes de crues du Rhin.

### **Catégorie de mesures 1d : développer les espaces naturels, reboiser**

Une mesure envisageable d’atténuation des crues réside dans la transformation de la gestion sylvicole de surfaces cultivées et de prairies permanentes.

Les impacts d’une gestion visant à promouvoir le développement naturel de zones forestières et mixtes ou à instaurer une sylviculture proche du naturel sont attendus tout particulièrement dans les processus de génération de débit. Les recherches en cours sur la manière de classer correctement les processus générateurs de débit et sur leur quantification ne sont toutefois pas représentables à l’heure actuelle (LEIBUNDGUT & UHLENBROOK 1997). Les mécanismes de transpiration élevée, d’interception des précipitations à hauteur de la couronne des arbres et de leur dispersion au sol, ainsi que la capacité élevée d’infiltration des pores grossiers et celle, fréquente, de stockage de l’eau par les sols forestiers (on ne connaît pratiquement pas de ruissellement de surface en forêt) font que la forêt a un effet atténuateur sur l’ampleur de la crue et sur sa pointe.

Cet impact de réduction des crues imputable aux forêts a fréquemment été démontré dans des études comparatives sur de petits bassins adjacents caractérisés par des usages agricoles nettement dissemblables (MENDEL 2000). Pour ce qui est de l’impact de mesures de reboisement dans les bassins de moyenne ou de grande taille, les études modélisées se fondent principalement sur un scénario hypothétique de « zones intégralement boisées ou déboisées » ou encore sur les « impacts de pourcentages forestiers » : On trouvera dans le tableau ci-dessous, sous forme transposée et convertie, toutes les estimations des impacts imputables à une augmentation du pourcentage forestier (pourcentage absolu dans le bassin) :

Etude	Bassin versant	Superficie [km <sup>2</sup> ]	Surface forestière réelle [%]	Surface forestière Scénario [%]	Baisse de pointe de crue ( $\Delta Q$ ) [%]	Pointe $\Delta$ par % $\Delta$ de forêt [%]	Crue
LAHoR *	Nahe	4013	48	100	14	0,27	Déc. 91
LAHoR*	Lippe	4783	21,5	100	29	0,37	Mai 83
LANG & TÖNS-MANN(2002)	Lahn	5964	41,83	45,99	2,3	0,55	HQ100
MÜLLER(1987)	Dreisam	257	0	55	50	0,91	Mai 83
LAHoR (KHR, 2003)	Körsch	127	12	18	n.n.	n.n.	Déc. 93
KOEHLER (1993)	Rhin supérieur / Worms	68827	0	37	17	0,46	4 jours
LAHoR*	Rhin/Worms	68827	37	100	7	0,11	1988
LAHoR*	Rhin/Worms	68827	37	100	20	0,32	1993

Les baisses relatives des débits de pointe de crue en fonction de l'augmentation du pourcentage forestier dans le bassin sont comprises entre 0,11, 27 et 0,9% pour les affluents du Rhin et entre 0,11 et 0,45% pour le bassin du Rhin jusqu'à l'échelle de Worms. Il n'est cependant pas judicieux de transposer de telles déclarations, fondées à l'origine sur l'hypothèse d'une couverture forestière totale ou d'une disparition intégrale de toute végétation forestière, à des modifications réalistes du pourcentage forestier, d'autant plus que les conditions d'infiltration modifiées dans des parcelles de petite superficie jouent plutôt un rôle de second plan dans le régime d'écoulement des crues par rapport aux autres conditions non modifiées. Pour la Lahn, on a déterminé une baisse de la pointe de crue de 2,3 % quand le pourcentage forestier passe de 41,8 à 46 % en tenant compte d'une perte de départ. Pour la Körsch, en revanche, un scénario réaliste de reboisement faisant augmenter le pourcentage forestier de 12 à 18 % n'a pas permis de reconnaître une réduction de la pointe de crue. Jusqu'à l'échelle de Worms par ex., les répercussions dans le bassin du Rhin sont de l'ordre d'une réduction de 0,11 à 0,45 % de pointe de crue pour chaque pour cent de hausse de la part forestière. Au bout du compte, les résultats obtenus dépendent de la méthode (simplifiée) choisie pour prendre en compte les processus de formation des débits sous la forêt, étant donné que le processus réel de formation des débits n'est pas représenté physiquement dans les modèles et n'est pas non plus modélisable de manière satisfaisante à l'heure actuelle.

Dans le Plan d'action contre les inondations sur le Rhin, on indique pour la Suisse et l'Allemagne d'ici 2020 des projets de développement des espaces naturels et des mesures complémentaires de reboisement sur une superficie totale de 1600 km<sup>2</sup>. A hauteur de l'échelle de Rees, cette superficie (159300 km<sup>2</sup>) correspond à une augmentation de 1% de la part occupée par les forêts dans le bassin. Il est impossible de reproduire avec précision avec l'outil de modélisation l'impact de ces mesures supposées dispersées. En se référant à l'ordre de grandeur (aléatoire) des pourcentages de réduction de pointe de crue dérivés du tableau ci-dessus, on obtiendrait par ex. pour le Rhin une baisse maximale du débit de pointe comprise entre 0,1 et 0,4%. En plus des effets positifs attendus au niveau local et en termes de qualité écologique, cette estimation permet au moins de supposer que cet impact peut se traduire par une baisse de la pointe de crue d'à peu près 1 cm. Pour la période de mise en œuvre des mesures jusqu'en 2005 définie dans le Plan d'action, 1200 km<sup>2</sup> sont prévus pour le développement des espaces naturels et les reboisements. L'effet attendu sur la réduction de la pointe de crue sera donc plus faible encore. Pour les raisons susmentionnées, il n'apparaît pas judicieux de démontrer cette effet par modélisation.

**Catégorie de mesures 1 e : désimpermeabiliser**

Les surfaces urbaines et celles occupées par les axes de trafic couvrent approximativement 15 % de la superficie du pays (CHR 2003). Une infiltration des eaux pluviales continue cependant à avoir lieu sur env. 65% de ces surfaces, par ex. dans les espaces verts urbains. Il en résulte que la pluie ne tombe dans le bassin du Rhin que sur 5 % de surfaces imperméabilisées. De plus, une partie de ces 5 % s'infiltrer malgré tout, par ex. le long des routes de campagne. On peut retenir globalement que les précipitations et les eaux de fonte de neige s'écoulent sur des surfaces non imperméabilisées sur au moins 95 % du bassin du Rhin.

Dans pratiquement tous les cas, les crues extrêmes d'importance suprarégionale sont caractérisées par le régime d'écoulement des surfaces non imperméabilisées. Etant donné que les crues extrêmes du Rhin se produisent après de longues périodes de précipitation et/ou sous l'effet de précipitations frontales prolongées, ces parties non imperméabilisées du bassin du Rhin sont aussi si saturées d'eau qu'elles ne peuvent quasiment plus emmagasiner d'eau supplémentaire et présentent alors, tout comme les surfaces imperméabilisées de hauts coefficients d'écoulement.

Dans l'état actuel des connaissances scientifiques et techniques, on constate qu'en cherchant à quantifier les impacts de mesures de désimpermeabilisation des surfaces sur le régime des crues, on atteint les limites des applications fiables et vérifiables de la modélisation hydraulique. Tout particulièrement dans le cadre de l'étude du régime d'écoulement des surfaces naturelles saturées d'eau, les recherches doivent se poursuivre et les modèles disponibles ne reproduisent que de manière très schématique ces processus importants pour la genèse des crues.

Certaines études fondées sur des reproductions de processus simplifiées montrent cependant que l'impact de mesures de désimpermeabilisation concrètement réalisables reste négligeable sur le débit de crue des grands fleuves.

Ainsi, dans le cadre du projet LAHoR par ex., on a analysé l'influence de différents types d'occupation des sols sur le régime de crue du Rhin (CHR 2003). Les grandes crues hivernales du Rhin, considérées dans cette analyse, sont restées « plus ou moins insensibles » (CHR 2003, p. 57) à une mesure (fictive) de désimpermeabilisation d'une surface de 2.500 km<sup>2</sup> dans le bassin du Rhin (= objectif du Plan d'action contre les inondations pour 2020). En termes purement arithmétiques, les mesures de désimpermeabilisation envisagées dans le Plan d'action jusqu'en 2020 entraîneraient un abaissement des crues de 0 cm à l'échelle de Lobith pour les crues hivernales analysées (CHR 2003, tableau 6.8, comparaison entre les options D1 et D2 à l'échelle de Lobith). Si l'on calcule la moyenne de toutes les échelles et crues analysées, l'impact arithmétique des mesures de désimpermeabilisation prévues se traduit par une réduction du niveau de crue de 0,5 cm en 2020. On obtient par conséquent pour les désimpermeabilisations visées d'ici 2005 (700 km<sup>2</sup>) dans le bassin jusqu'à l'échelle de Lobith une réduction moyenne de la pointe de crue du Rhin de 0,1 centimètre par rapport à un état sans ces mesures. Tous les résultats de calcul indiqués sont inférieurs, d'un facteur multiple, à la marge d'incertitude technique inhérente aux modèles hydrauliques.

On retient donc pour le bassin du Rhin que les mesures de désimpermeabilisation ne contribuent pas notablement à la réduction de crues extrêmes dans ce bassin. Pour ces raisons, il n'apparaît pas nécessaire de démontrer plus précisément dans le cadre du Plan d'action contre les inondations, à l'aide d'outils techniques de modélisation, l'effet des mesures de désimpermeabilisation des surfaces en termes d'abaissement des pointes de crues du Rhin.

**Catégorie de mesures 1 f: dispositifs techniques de rétention**

Pour la protection locale contre les inondations, la mise en place de dispositifs techniques de rétention, par ex. sous forme de bassins de rétention, constitue fondamentalement une mesure efficace de réduction des crues.

L'impact des mesures techniques de rétention sur les débits de pointe dépend fortement de la hauteur de la crête et de la forme de l'hydrogramme de chaque crue considérée. L'ordre de grandeur dans lequel une réduction peut être atteinte est également déterminé par la taille du polder comparée au volume de la pointe de cet hydrogramme. Les polders de rétention n'ont un effet optimal que si le volume de stockage du polder est soustrait à l'onde de crue exactement au niveau supérieur du débit de pointe (calotte de la crête). C'est pourquoi l'objectif de protection conditionnant l'entrée en action des mesures de rétention doit être défini avec précision et concrétisé par des mesures de génie hydraulique, par ex. au niveau des caractéristiques des ouvrages de prise et de décharge ou leur gestion (GT D/NL 'Inondations' 2004).

En raison des paramètres de commande (moment du remplissage, durée de l'ouverture etc.), la mise à profit réelle d'un bassin de rétention aux fins d'abaissement de la pointe d'une crue, même lorsqu'on connaît la forme de l'onde, n'est possible que dans un ordre de grandeur de 80 à 90 %. En situation d'intervention réelle fondée sur une prévision, le volume de rétention utilisable pour l'abaissement de la crête est tout au plus de 40 à 60 %. Il n'est donc que partiellement justifié de projeter le volume de rétention disponible ou prévu sur l'estimation de l'impact d'écêtement de la calotte d'une crue.

Les bassins de rétention des crues font surtout effet en aval. En outre, la pointe se décale légèrement vers l'arrière et la courbe de décrue fait apparaître des débits un peu plus élevés (GT D/NL 'Inondations' 2004). Il est donc possible que la situation s'aggrave dans le fleuve principal quand la situation s'améliore en aval d'espaces de rétention placés dans un affluent de ce fleuve. Un tel cas peut se produire quand les débits rehaussés de l'axe de décrue de l'affluent rencontrent la pointe de crue du fleuve récepteur.

Quand un pourcentage significatif du volume d'eau retiré de l'onde de crue s'engouffre dans les espaces de rétention, la modification de l'inclinaison hydraulique peut également générer un impact vers l'amont.

Il est tout à fait concevable que l'impact de dispositifs techniques de rétention dépasse le cadre local. Cependant, il baisse rapidement sur le cours à mesure que l'on se déplace vers l'aval. A la suite de plusieurs études, KOEHLER (1993) en arrive à la conclusion que « dans des conditions réalistes, les débits de crue du Rhin ne peuvent être abaissés efficacement par des rétentions sur les affluents ». La raison en est l'absence d'espaces de stockage de très grand volume, qu'il serait en outre nécessaire de manœuvrer, contrairement aux besoins locaux.

Dans le cadre de l'étude sur la Lahn (LANG & TÖNSMANN 2002), un examen a porté, entre autres, sur les espaces de rétention dans les vallées voisines. Le modèle s'est fondé sur une simulation englobant 47 bassins fictifs de rétention des crues localisés dans la zone de transition entre le cours moyen et le cours aval du cours d'eau et représentant un volume total de 13 à 19 millions de m<sup>3</sup>. Les apports en eau ont été définis dans une marge comprise entre un HQ 2 et un HQ 50. On a ainsi atteint les principales réductions, jusqu'à 17% au maximum, à partir d'un HQ 10 à l'aval immédiat des mesures. Cet effet disparaît toutefois rapidement plus en aval, allant même jusqu'à provoquer parfois de légères augmentations de pointe, de l'ordre d'env. 1 % dans la Lahn même, en raison d'une superposition défavorable avec l'onde de crue de la Lahn.

Huit mesures de protection contre les inondations ont été mises en œuvre dans le cadre de l'étude sur la Lahn et leurs effets ont été comparés à la situation de départ. Ces mesures ont consisté à mettre en place, raccorder et mettre en service des espaces de rétention dans la plaine alluviale de la Lahn ou sur des affluents importants de celle-ci, le tout pour un volume total de 1,2 million de m<sup>3</sup>, notamment dans le tiers amont du bassin de la Lahn. Ces mesures ont permis d'atteindre sur le cours moyen de la Lahn une réduction de 4 % du débit de pointe d'un HQ 100, cette réduction étant encore de l'ordre de 2,3 % à l'embouchure de la Lahn. Là encore cependant, l'impact suprarégional dépend tout particulièrement de la superposition d'ondes partielles, de sorte que l'impact d'une crue de genèse différente pourrait être sensiblement plus faible.

L'étude des répercussions sur le Rhin d'une proposition de mise à exécution de mesures de protection contre les inondations sur la Lahn (mesures surfaciques, mesures dans le cours d'eau et dans la plaine alluviale, mesures de rétention, avec une réduction de débit de pointe d'env. 12 % pour un HQ 100 au niveau de l'embouchure de la Lahn) montre que les effets d'une baisse de débit surviennent généralement en phase ascendante de l'onde du Rhin et sont plutôt faibles sur le débit de pointe du Rhin.

Comme les mesures techniques de rétention de grande ampleur prises dans le bassin peuvent se ressentir sur les pointes de crue du Rhin (quand bien même dans une faible mesure), on visera dans certains cas spécifiques à en prendre compte dans le cadre des études du groupe d'experts HVAL.

CIPR (1998) : Plan d'Action contre les Inondations. Commission Internationale pour la Protection du Rhin 30 pages, Coblenz.

CIPR (1999) : Estimation de l'impact de la rétention des eaux dans le bassin du Rhin. 39 pages, Coblenz.

D-NL-AG Hochwasser (2004): Projektstudie „Grenzüberschreitende Auswirkungen von extremem Hochwasser am Niederrhein“.

ETH – Zürich (1998): Die Wirkung der Retention auf den Abfluss der Nahe bei extremen Hochwassern. Bericht Nr. A 006, Zürich.

KHR ( 2003): Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes, Bericht Nr. II-18: LAHOR - Quantifizierung des Einflusses der Landoberfläche und der Ausbaumaßnahmen am Gewässer auf die Hochwasserbedingungen im Rheingebiet. 77 Seiten und CD.

KOEHLER, G. (1993): Auswirkungen verschiedener anthropogener Veränderungen auf die Hochwasserabflüsse im Oberrheingebiet. Materialien zum Hochwasserschutz am Rhein, Heft 4 , 113 S. und Anlagen, Ministerium für Umwelt Rheinland-Pfalz, Mainz.

LANG, T. und TÖNSMANN, F. (2002): Vorbeugender Hochwasserschutz im Einzugsgebiet der hessischen Lahn. Teil 1 Zusammenfassender Bericht – Handbuch – 278 Seiten plus Anhang, Kassel.

LEIBUNDGUT, Ch. & UHLENBROOK, S. (1997): Abflussbildung bei Hochwasser. Materialien zum Hochwasserschutz am Rhein, Heft 5, 81 Seiten, Ministerium für Umwelt und Forsten, Rheinland-Pfalz, Mainz.

LEICHTFUSS, A. und KIVUMBI, D. (1995): Quantifizierung von Vermeidungs- und Ausgleichsmaßnahmen. Technische Hochschule Darmstadt, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, 46 Seiten plus Anhang.

MARENBACH, B. (2002): Der Beitrag naturnaher Retentionsmaßnahmen in den Talauen zur Hochwasserdämpfung. Bericht 13 Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft, Universität Kaiserslautern. 183 Seiten.

MENDEL, H. G. (2000): Elemente des Wasserkreislaufs - eine kommentierte Bibliographie zur Abflussbildung. 244 Seiten, Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Analytica Berlin.

MINISTERIUM FÜR UMWELT RHEINLAND-PFALZ (1993): Hochwasserstudienkommission für die Rheinstrecke Kaub – Rolandswerth; Der Einfluss des Oberrheinausbaus und der am Oberrhein vorgesehenen Retentionsmaßnahmen für die Hochwasser am Mittelrhein von Kaub bis Köln. Materialien zum Hochwasserschutz am Rhein, Heft 3, 74 Seiten plus Anhang, Mainz.

MÜLLER, N. (1987): Wie stark beeinflussen Umweltveränderungen den Hochwasserabfluß? Diplomarbeit am Institut für Geographie der Universität Freiburg.

NAEF, F.; KULL, D. und THOMA, C. (1999): Retentionswirkung von Vorlandüberflutungen. 40 Seiten, Zürich.

NIEHOFF, D. & BRONSTERT, A. (2002): Landnutzung und Hochwasserentstehung: Modellierung anhand dreier mesoskaliger Einzugsgebiete. Wasser & Boden, 54/10, S. 20 - 28.

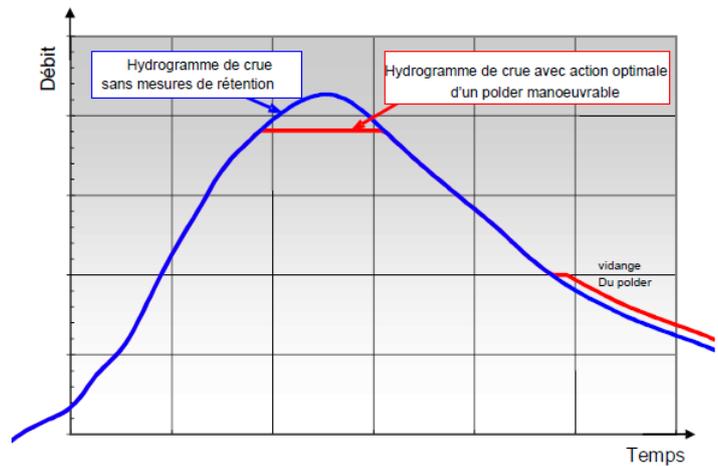
PIK (2001): Quantifizierung des Einflusses der Landnutzung und -bedeckung auf den Hochwasserabfluss in Flussgebieten. Final report des Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung.

## Annexe 2 : Remarques fondamentales sur l'impact des mesures de rétention

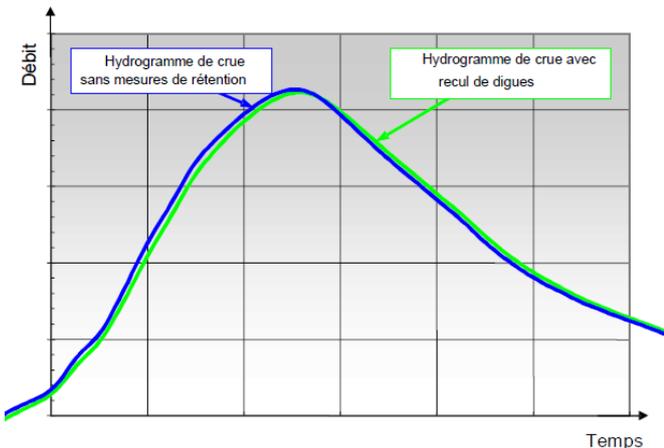
On entend par mesure de rétention la mise à disposition de surfaces d'inondation supplémentaires pour un cours d'eau. Dans ce contexte, on fait la distinction entre mesures de rétention manœuvrables et mesures de rétention non manœuvrables.

Les **mesures de rétention manœuvrables** telles que les polders ne sont mises en eau que lorsque des niveaux d'eau critiques définis sont dépassés.

Judicieusement mis à contribution, le volume de rétention disponible peut permettre d'écarter les pointes de crue. Il en résulte une réduction de débit accompagné d'une baisse de niveau d'eau à un niveau local et sur une longue distance vers l'aval (100 km). On constate en amont une baisse de niveau d'eau sur un court tronçon. La prise en compte des prévisions de crue permet de cibler les manœuvres de remplissage et le vidage du polder et d'optimiser ainsi l'utilisation du volume disponible.

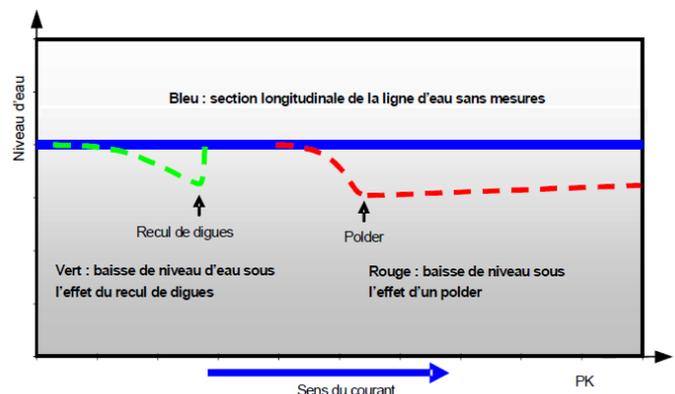


Quand se produisent des petites crues sans danger, la plupart des polders sont ouverts à des submersions écologiques, ceci pour améliorer les conditions alluviales ; leur effet est alors similaire à celui de reculs de digues (voir plus bas).



Les **mesures de rétention non manœuvrables** telles que les reculs de digues sont mises en eau dès que le niveau d'eau augmente. L'espace de rétention se remplit pendant toute la phase de montée des eaux de crue et est donc déjà pratiquement plein au passage de la pointe de la crue. C'est pourquoi la réduction de la pointe de crue est faible. Un recul de digue a donc en premier lieu

pour effet de ralentir l'onde de débit. Etant donné que les mesures de rétention non manœuvrables vont généralement de pair avec un agrandissement du profil transversal du lit, elles font malgré tout baisser le niveau des eaux en situation de débit constant. Cette baisse du niveau d'eau est observée autant sur le lieu même de la mesure qu'en amont de celle-ci avec un effet décroissant. Elle s'imprime sur l'onde de crue dans son ensemble à partir de l'instant où démarre la mise en eau de la mesure de rétention.

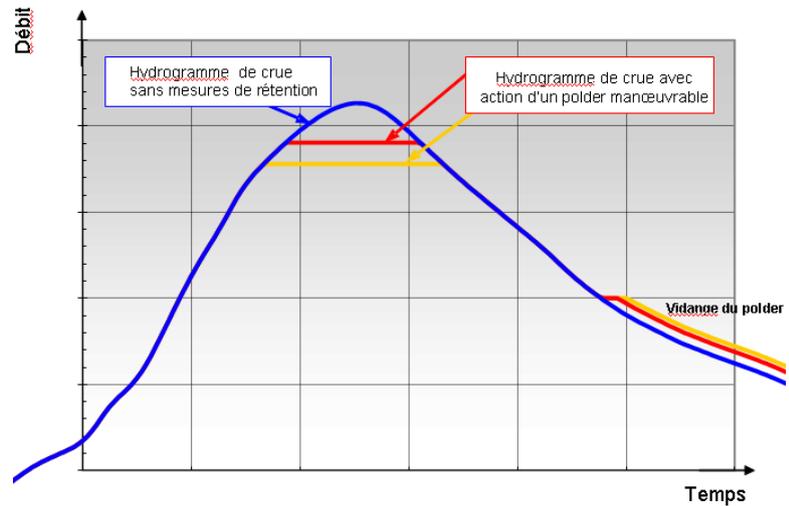


La coupe longitudinale schématisée à gauche montre les différents effets d'abaissement du niveau d'eau atteints par les reculs de digues et par les polders.

En doublant le volume de rétention mis à disposition, on ne double en aucun cas la réduction du débit. Dans l'exemple de droite, on voit qu'une augmentation du volume de

réétention d'un polder de 100% ne se traduit que par une baisse d'env. 50% du débit de pointe (cf. lignes rouge et orange)

Ceci s'explique par la « largeur » croissante de l'onde de crue quand les débits s'abaissent, ce qui a pour conséquence de rehausser de manière surproportionnelle le volume d'eau de crue à retenir (volume = débit x durée).



Pour tous les types de mesures de rétention, la réduction de débit pouvant être atteinte dépend du déroulement spécifique de chaque crue (durée, volume et hauteur de la pointe de crue).

**Annexe 3 : Crues et périodes de simulation**

Crue	Période de simulation	
	Tronçon calculé Bâle - Worms	Tronçon calculé Worms - mer du Nord
Crue 1882/1883	26.12.1882 – 10.01.1883	26.12.1882 – 12.01.1883
Crue 1918/1919	22.12.1918 – 05.01.1919	22.12.1918 – 14.01.1919
Crue 1919/1920	22.12.1919 – 06.01.1920	22.12.1919 – 08.01.1920
Crue 1925/1926	26.12.1925 – 09.01.1926	26.12.1925 – 09.01.1926
Crue 01/1955	11.01.1955 – 26.01.1955	11.01.1955 – 26.01.1955
Crue 02/1957	24.02.1957 – 11.03.1957	24.02.1957 – 11.03.1957
Crue 02/03 1970	20.02.1970 – 07.03.1970	20.02.1970 – 07.03.1970
Crue 05/1978	22.05.1978 – 04.06.1978	22.05.1978 – 04.06.1978
Crue 02/1980	02.02.1980 – 15.02.1980	02.02.1980 – 15.02.1980
Crue 04/1983	05.04.1983 – 16.04.1983	05.04.1983 – 21.04.1983
Crue 05/1983	21.05.1983 – 01.06.1983	21.05.1983 – 04.06.1983
Crue 03/1988	10.03.1988 – 29.03.1988	10.03.1988 – 05.04.1988
Crue 12/1993	15.12.1993 – 30.12.1993	15.12.1993 – 01.01.1994
Crue 01/1995	21.01.1995 – 05.02.1995	21.01.1995 – 07.02.1995
Crue 10/1998	23.10.1998 – 11.11.1998	23.10.1998 – 11.11.1998
Crue 02/1999	17.02.1999 – 04.03.1999	17.02.1999 – 05.03.1999
Crue 05/1999	10.05.1999 – 29.05.1999	10.05.1999 – 29.05.1999
Crue 01/2003	31.12.2002 – 15.01.2003	31.12.2002 – 15.01.2003

## Annexe 4a : Données disponibles pour les crues historiques sélectionnées de Bâle à Lobith

Vue synoptique des données hydrologiques de crues historiques du Rhin utilisées pour générer des crues modélisées au sein du GE HVAL												
Mise à jour : 28.07.2010 Informations sur chaque crue : intervalle de discrétisation [h], fournisseur des données, source des données												
Crue affluent/station	Bassin	Détenteur des données (interlocuteur pour le GE HVAL)	Crue 1882/1883	Crue 1918/1919	Crue 1919/1920	Crue 1925/1926	Crue 01/1955	Crue 02/1957	Crue 02/03 1970	Crue 05/1978	Crue 02/1980	
Bâle <sup>1</sup>	Rhin	OFEV, LUBW	2h, LUBW, B, D	2h, LUBW, B, D	2h, LUBW, B, D	2h, BFG, D	2h, LUBW, B, D	2h, LUBW, B, D	2h, LUBW, B, D	2h, LUBW, D	2h, LUBW, D	
Lörrach	Wiese	LUBW	6h, LUBW, B, D	6h, LUBW, B, D	6h, LUBW, B, D							
Bâle		OFEV				6h, BFG, D	1h, OFEV, A					
Riegel	Canal Leopold	LUBW	6h, LUBW, B, D	6h, LUBW, B, D	6h, LUBW, B, D	6h, BFG, D	6h, LUBW, B, D	6h, LUBW, B, D	6h, LUBW, B, D	2h, LUBW, C	1h, LUBW, D	
Pont de Gerstheim	Décharge de l'III	LUBW	6h, LUBW, B, D	6h, LUBW, B, D	6h, LUBW, B, D	6h, BFG, D	6h, LUBW, B, D	6h, LUBW, B, D	6h, LUBW, B, D	2h, LUBW, C	2h, LUBW, C	
Schwalbach	Kinzig	LUBW	6h, LUBW, B, D	6h, LUBW, B, D	6h, LUBW, B, D	6h, BFG, D	6h, LUBW, B, D	6h, LUBW, B, D	6h, LUBW, B, D	1h, LUBW, D	1h, LUBW, D	
Chasseur Froid	III	LUBW	6h, LUBW, B, D	6h, LUBW, B, D	6h, LUBW, B, D	6h, BFG, D	6h, LUBW, B, D	6h, LUBW, B, D	6h, LUBW, B, D	2h, LUBW, C	2h, LUBW, C	
Kappelrodeck / Oberkirch <sup>2)</sup>	Ach/Rench	LUBW	6h, LUBW, B, D	6h, LUBW, B, D	6h, LUBW, B, D	6h, BFG, D	6h, LUBW, B, D	6h, LUBW, B, D	6h, LUBW, B, D	2h, LUBW, C	2h, LUBW, C	
Schweighouse	Moder	LUBW			12h, LUBW, B, D			12h, LUBW, B, D	12h, LUBW, B, D	2h, LUBW, C	2h, LUBW, C	
Schweighouse / Hoerd	Moder/Zorn	LUBW										
Rotenfels	Murg	LUBW	6h, LUBW, B, D	6h, LUBW, B, D	6h, LUBW, B, D	6h, BFG, D	6h, LUBW, B, D	6h, LUBW, B, D	6h, LUBW, B, D	2h, LUBW, C	1h, LUBW, C	
Beinheim	Sauer	LUBW										
Beinheim / Niederroedern	Sauer / Seltzbach	LUBW										
Maxau	Rhin	BFG	6h, BFG, B, D	6h, BFG, B, D	6h, BFG, B, D	6h, BFG, D	6h, BFG, B, D	6h, BFG, B, D	6h, BFG, B, D	2h, LUBW, C	2h, LUBW, C	
Heidelberg débouché	Neckar	LUBW	6h, LUBW, B, D	6h, LUBW, B, D	6h, LUBW, B, D	6h, BFG, D	6h, LUBW, B, D	6h, LUBW, B, D	6h, LUBW, B, D		2h, LUBW, C	
Worms	Rhin	BFG	6h, BFG, B, D	6h, BFG, B, D	6h, BFG, B, D	6h, BFG, B, D	6h, BFG, B, D	6h, BFG, B, D	6h, BFG, B, D	2h, LUBW, C	2h, LUBW, C	
Lorsch	Weschnitz	HLUG							24h, HLUG, D	24h, HLUG, D	24h, HLUG, D	
Eberstadt	Modau	HLUG							24h, HLUG, D	24h, HLUG, D	24h, HLUG, D	
Raunheim	Main	BFG		6h, LUWG, B	6h, LUWG, B	6h, LUWG, B	6h, LUWG, B	6h, LUWG, B	6h, LUWG, B	6h, LUWG, C	6h, LUWG, C	
Gr. Steinheim		LUWG		6h, LUWG, B								
Mayence	Rhin	BFG	6h, LUWG, B			6h, LUWG, B	24h, LUWG, B	6h, LUWG, B	6h, LUWG, B	6h, LUWG, B	12h, LUWG, C	
Groisheim	Nähe	LUWG			1h, LUWG, B	1h, LUWG, C	1h, LUWG, C					
Pfaffentahl	Wisper	HLUG							24h, HLUG, D	24h, HLUG, D	24h, HLUG, D	
Kaub	Rhin	BFG	6h, LUWG, B	12h, LUWG, B	6h, LUWG, B	6h, LUWG, B	24h, LUWG, B	6h, LUWG, B	6h, LUWG, B	6h, LUWG, C	6h, LUWG, C	
Kalkofen	Lahn	BFG	6h, LUWG, B	6h, LUWG, B	6h, LUWG, B	6h, LUWG, B	6h, LUWG, B	6h, LUWG, B	6h, LUWG, B	6h, LUWG, C	6h, LUWG, C	
Cochem	Moselle	BFG	6h, LUWG, B	6h, LUWG, B	6h, LUWG, B	6h, LUWG, B	6h, LUWG, B	6h, LUWG, B	6h, LUWG, B	6h, LUWG, C	6h, LUWG, C	
Nettegut	Nette	LUWG					1h, LUWG, B	1h, LUWG, B	1h, LUWG, B	1h, LUWG, C	1h, LUWG, C	
Friedrichsthal	Wied	LUWG								1h, LUWG, C	1h, LUWG, C	
Andernach	Rhin	BFG	24h, BFG, B	1h, BFG, B	6h, LUWG, B	6h, LUWG, B	6h, LUWG, B	6h, LUWG, B	12h, LUWG, B	6h, LUWG, C	6h, LUWG, C	
Reimerzhofen	Ahr	LUWG				1h, LUWG, B	1h, LUWG, B	1h, LUWG, B	1h, LUWG, B	1h, LUWG, C	1h, LUWG, C	
Altenahr		LUWG										
Menden I	Sieg	LANUV	24h, LUWG, B (une seule valeur)						1h, BFG, D	1h, BFG, D	1h, BFG, G	
Buisdorf 3)		(LANUV)		6h, LUWG, B	6h, LUWG, B							
Kaldauen 4)		LANUV				6h, BFG, B	6h, LUWG, B	1h, BFG, D				
Cologne	Rhin	BFG	24h, BFG, B	24h, BFG, G	6h, LUWG, B	6h, LUWG, C	6h, LUWG, C					
Opladen	Wupper	LANUV								12h, BFG, G	Valeur ponctuelle, BFG, G	
Neubröck	Erf	LANUV						Valeur ponctuelle, BFG, G				
Düsseldorf	Rhin	BFG	24h, BFG, D	24h, BFG, D	24h, BFG, D	24h, BFG, D	24h, BFG, D	24h, BFG, D	24h, BFG, D	24h, BFG, D	24h, BFG, D	
Hattingen	Ruhr	Ruhrverband (LANUV)						24h, BFG, G	24h, BFG, G	6h, BFG, G	6h, BFG, G	Valeur ponctuelle, BFG, G
Blankenstein		(LANUV)			24h, BFG, G	24h, BFG, G	24h, BFG, G					
Ruhrort	Rhin	BFG		24h, BFG, D	24h, BFG, D	24h, BFG, D	24h, BFG, D	24h, BFG, D	24h, BFG, D	24h, BFG, D	24h, BFG, D	
Königsstraße	Emscher	Emschergenossenschaft (LANUV)					0,25h, BFG, G	0,25h, BFG, G	0,25h, BFG, G	Valeur ponctuelle, BFG, G	Valeur ponctuelle, BFG, G	
Buschhausen		Emschergenossenschaft (LANUV)			Valeur ponctuelle, BFG, G	Valeur ponctuelle, BFG, G	Valeur ponctuelle, BFG, G					
Wesel	Rhin	BFG		24h, BFG, D	24h, BFG, D	24h, BFG, D	24h, BFG, D	24h, BFG, D	24h, BFG, D	24h, BFG, D	24h, BFG, D	
Schermbeck	Lippe	LANUV							6h, BFG, G	6h, BFG, G	Valeur ponctuelle, BFG, G	
Krudenburg		(LANUV)			24h, BFG, G							
Rees	Rhin	BFG	24h, BFG, B	24h, BFG, G	24h, BFG, G	24h, BFG, G	24h, BFG, G	24h, BFG, G	24h, BFG, G	24h, BFG, G	24h, BFG, G	
Emmerich	Rhin	BFG		24h, BFG, D	24h, BFG, D	24h, BFG, D	24h, BFG, D	24h, BFG, D	24h, BFG, D	24h, BFG, D	24h, BFG, D	
Lobith	Rhin	WD	24h, WD, F	24h, WD, F	24h, WD, F	24h, WD, F	24h, WD, F	24h, WD, F	24h, WD, F	24h, WD, F	24h, WD, F	

**Vue synoptique des données hydrologiques de crues historiques du Rhin utilisées pour générer des crues modélisées au sein du GE HVAL**

Mise à jour : 28/07/2010 Informations sur chaque crue : intervalle de discrétisation [h], fournisseur des données, source des données

Crue affluent/station	Bassin	Détenteur des données (interlocuteur pour le GE HVAL)	Crue 04/1983	Crue 05/1983	Crue 03/1988	Crue 12/1993	Crue 01/1995	Crue 10/1998	Crue 02/1999	Crue 05/1999	Crue 01/2003
Bâle	Rhin	OFEV, LUBW	2h, LUBW, D	2h, LUBW, D	6h, LUBW, D	1h, LUBW, D	1h, OFEV, A	1h, OFEV, A	1h, OFEV, A	1h, OFEV, A	1h, OFEV, A
Lörrach		LUBW									
Bâle	Wiese	OFEV	1h, OFEV, A	1h, OFEV, A	1h, OFEV, A	1h, OFEV, A	1h, OFEV, A	1h, OFEV, A	1h, OFEV, A	1h, OFEV, A	1h, OFEV, A
Riegel	Canal Leopold	LUBW	1h, LUBW, D	1h, LUBW, C	2h, LUBW, C	1h, LUBW, D	2h, LUBW, D	1h, LUBW, D	2h, LUBW, D	2h, LUBW, D	1h, LUBW, D
Pont de Gerstheim	Décharge de l'III	LUBW	4h, LUBW, C	4h, LUBW, C	2h, LUBW, C	1h, EDF	1, LUBW, D	1h, LUBW, D	1h, EDF	1, LUBW, D	1h, LUBW, D
Schwalbach	Kinzig	LUBW	1h, LUBW, D	2h, LUBW, D	2h, LUBW, C	1h, LUBW, D	1h, LUBW, D	1h, LUBW, D	1h, LUBW, D	1h, LUBW, D	1h, LUBW, D
Chasseur Froid	Ill	LUBW	4h, LUBW, C	4h, LUBW, C	2h, LUBW, C	1h, LUBW, D*	1h, LUBW, D	1h, SNS, D	1h, LUBW, D	1h, LUBW, D	1h, SNS, D
Kappelrodeck / Oberkirch	Ach/Rench	LUBW	2h, LUBW, C	2h, LUBW, C	2h, LUBW, C	1h, LUBW, D	2h, LUBW, D	1h, LUBW, D	2h, LUBW, D	2h, LUBW, D	1h, LUBW, D
Schweighouse	Moder	LUBW					2h, LUBW, D	1h, SNS, D			1h, SNS, D
Schweighouse / Hoerd	Moder/Zorn	LUBW	6h, LUBW, C	6h, LUBW, C	2h, LUBW, C	1h, LUBW, D			2h, LUBW, D	2h, LUBW, D	
Rotenfels	Murg	LUBW	2h, LUBW, C	2h, LUBW, C	2h, LUBW, C	1h, LUBW, D	2h, LUBW, D	1h, LUBW, D	2h, LUBW, D	1h, LUBW, D	1h, LUBW, D
Beinheim	Sauer	LUBW	6h, LUBW, C	2h, LUBW, C			2h, LUBW, D	1h, SNS, D		1h, SNS, D	
Beinheim / Niederodem	Sauer / Sellzbach	LUBW				1h, LUBW/SNS, D			2h, LUBW, D		
Maxau	Rhin	BFG	2h, BFG, D	2h, BFG, D	6h, LUBW, D	1h, BFG, D	1h, BFG, D	1h, BFG, D	1h, BFG, D	1h, BFG, D	1h, BFG, D
Heidelberg débouché	Neckar	LUBW	1h, LUBW, C	1h, LUBW, C	1h, LUBW, C	1h, LUBW, D	1h, LUBW, D	1h, LUBW, D	1h, LUBW, D	1h, LUBW, D	1h, LUBW, D
Worms	Rhin	BFG	1h, WSD, D	1h, WSD, D	1h, WSD, D	1h, WSD, D	1h, WSD, D	1h, WSD, D	1h, WSD, D	1h, WSD, D	1h, WSD, D
Lorsch	Weschnitz	HLUG	24h, HLUG, D	24h, HLUG, D	0,25h, HLUG, D	0,25h, HLUG, D	0,25h, HLUG, D	0,25h, HLUG, D	0,25h, HLUG, D	0,25h, HLUG, D	0,25h, HLUG, D
Eberstadt	Modau	HLUG	24h, HLUG, D	24h, HLUG, D	0,25h, HLUG, D	0,25h, HLUG, D	0,25h, HLUG, D	0,25h, HLUG, D	0,25h, HLUG, D	0,25h, HLUG, D	0,25h, HLUG, D
Raunheim		BFG	6h, LUWG, C	6h, LUWG, C	6h, LUWG, C	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, LUWG, D	1h, BFG, E	1h, LUWG, D	1h, LUWG, D
Gr. Steinheim	Main	LUWG									
Mayence	Rhin	BFG	6h, LUWG, C	6h, LUWG, C	6h, LUWG, C	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, LUWG, D	1h, LUWG, D	1h, LUWG, D
Grolsheim	Nahe	LUWG	1h, LUWG, C	1h, LUWG, C	1h, LUWG, C	1h, LUWG, D	1h, LUWG, D	1h, LUWG, D	1h, BFG, E	1h, LUWG, D	1h, LUWG, D
Pfaffentahl	Wisper	HLUG	24h, HLUG, D	24h, HLUG, D	0,25h, HLUG, D	0,25h, HLUG, D	0,25h, HLUG, D	0,25h, HLUG, D	0,25h, HLUG, D	0,25h, HLUG, D	0,25h, HLUG, D
Kaub	Rhin	BFG	6h, LUWG, C	6h, LUWG, C	6h, LUWG, C	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, LUWG, D	1h, LUWG, D
Kalkofen	Lahn	BFG	6h, LUWG, C	6h, LUWG, C	6h, LUWG, C	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, LUWG, D	1h, BFG, E
Cochern	Moselle	BFG	6h, LUWG, C	6h, LUWG, C	1h, LUWG, C	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, LUWG, D
Nettegut	Nette	LUWG	1h, LUWG, C	1h, LUWG, C	1h, LUWG, C	1h, LUWG, D	1h, LUWG, D	1h, LUWG, D	1h, LUWG, D	1h, LUWG, D	1h, LUWG, D
Friedrichsthal	Wied	LUWG	1h, LUWG, C	1h, LUWG, C		1h, LUWG, D	1h, LUWG, D	1h, LUWG, D	1h, LUWG, D	1h, LUWG, D	1h, LUWG, D
Andernach	Rhin	BFG	1h, BFG, G	1h, BFG, G	1h, BFG, G	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, LUWG, D	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E
Reimerzhofen		LUWG	1h, LUWG, C	1h, LUWG, C	1h, LUWG, C						
Altenahr	Ahr	LUWG				1h, LUWG, D	1h, LUWG, D	1h, LUWG, D	1h, LUWG, B	1h, LUWG, D	1h, LUWG, D
Menden I		LANUV	1h, BFG, G	1h, BFG, G	1h, BFG, G	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, LUWG, D	valeurs ponctuelles LUWG, D	1h, BFG, E	1h, LUWG, D
Buisdorf 3)	Sieg	(LANUV)									
Kaldauen 4)		LANUV									
Cologne	Rhin	BFG	6h, LUWG, C	6h, LUWG, C	6h, LUWG, C	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E
Opladen	Wupper	LANUV	Valeur ponctuelle, BFG, G	Valeur ponctuelle, BFG, G	1h, BFG, G	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E
Neubrück	Erf	LANUV	Valeur ponctuelle, BFG, G	Valeur ponctuelle, BFG, G	Valeur ponctuelle, BFG, G	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E
Düsseldorf	Rhin	BFG	24h, BFG, D	24h, BFG, D	24h, BFG, D	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E
Hattingen	Ruhr	Ruhrverband (LANUV)	1h, BFG, G	1h, BFG, G	1h, BFG, G	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E
Blankenstein		(LANUV)									
Ruhrort	Rhin	BFG	24h, BFG, D	24h, BFG, D	24h, BFG, D	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E
Königsstraße		Emschergenossenschaft (LANUV)	Valeur ponctuelle, BFG, G	Valeur ponctuelle, BFG, G	Valeur ponctuelle, BFG, G	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E
Buschhausen	Emscher	Emschergenossenschaft (LANUV)									
Wesel	Rhin	BFG	24h, BFG, D	24h, BFG, D	24h, BFG, D	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E
Scherbeck		LANUV	Valeur ponctuelle, BFG, G	Valeur ponctuelle, BFG, G	Valeur ponctuelle, BFG, G	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E
Krudenburg	Lippe	(LANUV)									
Rees	Rhin	BFG	24h, BFG, G	24h, BFG, G	24h, BFG, G	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E
Emmerich	Rhin	BFG	24h, BFG, D	24h, BFG, D	24h, BFG, D	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E
Lobith	Rhin	WD	24h, WD, F	24h, WD, F	24h, WD, F	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E	1h, BFG, E

**Légende**

OFEV (Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC, Office fédéral de l'environnement, service de l'hydrologie); source : Edith Ooserbrug, 3003 Berne, tél. : +41 313220768, courriel : edith.ooserbrug@batu.admin.ch

LUBW (Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg); source : Dr. Manfred Bremicker, Postfach 10 01 63, D-76231 Karlsruhe, tél. : 0721/5600-1386, courriel : Manfred.Bremicker@luba.wv.de

LUWG (Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz); source : Barbara Plonka, Abteilung 7, Referat 721, Kaiser-Friedrich-Straße 7, 55118 Mayence, tél. : 061316033-1727, courriel : barbara.plonka@lwg.de

HLUG (Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie); source : Dr. Gerhard Brahmmer, Rheingaustr. 186, 65203 Wiesbaden, tél. : +49 (0)611-6939-737, courriel : Gerhard.brahmmer@hlu.g.hessen.de

LANUV (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen); source : Bernd Mehlig, Fachbereich 53, Auf dem Drasp 25, 40221 Düsseldorf, tél. : 0721/1590-2214, courriel : Bernd.Mehlig@lanuv.nrw.de

WD (Rijkswaterstaat Waterdienst); source : Dr. Rita Lammerßen, Rijkswaterstaat Waterdienst, Afdeling Onderhoud Hoogwaterbescherming, Postbus 17, 8200 AA Lelystad, tél. : 0031-(0)6-51923811, courriel : Rita.Lammerßen@rws.nl

BFG (Bundesanstalt für Gewässerkunde); source : Referat M1/M2 Matthias Hammer, Mainzer Tor 1, 56068 Coblenz, tél. : +49(0)261-1306-5384, courriel : hammer@batg.de

- A Banque de données DAMAST de ROFEV <sup>1)</sup> Les débits on été recensés à Bâle dans 3 sites distincts jusqu'à la crue de 1993 et à l'échelle de Rheinhalle à partir de la crue de 1995
- B Commission d'Etudes des Crues du Rhin (D, C, H, A, F), 1978 ; <sup>2)</sup> L'échelle de Rambsbach a été utilisée pour la Rensch à partir de la crue de 1925/1926
- C Groupe de travail franco-allemand 'identification de l'efficacité des mesures sur le Rhin supérieur' <sup>3)</sup> Somme formée à partir de Boisdorf (Sieg) et Lohmar (Agger)
- D annuaires hydrologiques, banques de données <sup>4)</sup> Somme formée à partir de Kaldauen (Sieg) et Lohmar (Agger)
- E Echelle de Colmar <sup>\*)</sup>
- F Mens, Weents and Ogink : "Water balance Maxau-Rhine branches", 2006 ;
- G Banque de données DONAR du Waterdienst ; crue 1882/1883 : uniquement W tiré de DONAR, Q déterminé par Projet d'homogénéisation (BFG-RIZA 1998-1999) Données inexistantes

## Annexe 4b : Données disponibles pour les crues historiques sélectionnées dans le delta du Rhin

			Vue synoptique des données hydrologiques de crues historiques du Rhin utilisées pour générer des crues modélisées au sein du GE HVAL																		
			Informations sur chaque crue : intervalle de discrétisation [h], fournisseur des données, source des données																		
Affluent/ station	Bassin	Détenteur des données (interlocuteur pour le GE HVAL)	Crue 1882/ 1883	Crue 1918/ 1919	Crue 1919/ 1920	Crue 1925/ 1926	Crue 01 1955	Crue 02 1957	Crue 02/03 1970	Crue 05 1978	Crue 02 1980	Crue 04 1983	Crue 05 1983	Crue 03 1988	Crue 12 1993	Crue 01 1995	Crue 10 1998	Crue 02 1999	Crue 05 1999	Crue 01 2003	
de Pol	Oude IJssel	WD	1h, WD, H	1h, WD, H	1h	1h	1h	1h	1h	1h	1h	1h	1h	1h	1h	1h, WD, G	1h, WD, G				
Eeftde	Twente- kanaal	WD	1h	1h	1h	1h	1h	1h	24h, WD, F	24h, WD, F	24h, WD, F	24h, WD, F	24h, WD, F	24h, WD, F	24h, WD, F	24h, WD, F	24h, WD, F	24h, WD, F	24h, WD, F	24h, WD, F	24h, WD, F
Lith	Meuse	WD	24h, WD, F	24h, WD, F	24h, WD, F	24h, WD, F	24h, WD, F	24h, WD, F	24h, WD, F	24h, WD, F	24h, WD, F	24h, WD, F	24h, WD, F	24h, WD, F	24h, WD, F	24h, WD, F	24h, WD, F	24h, WD, F	24h, WD, F	24h, WD, F	24h, WD, F

= Données inexistantes, données tirées des débits au niveau de Lobith calculés par la BfG avec le modèle SOBEK

F = Banque de données DONAR du Waterdienst  
 G = Données de "Waterschap Rijn en IJssel", sollicitées dans le cadre du projet "onderzoek afvoer Oude IJssel, HKV 2004, Projekt PR803"  
 H = Données inexistantes, données tirées de ...

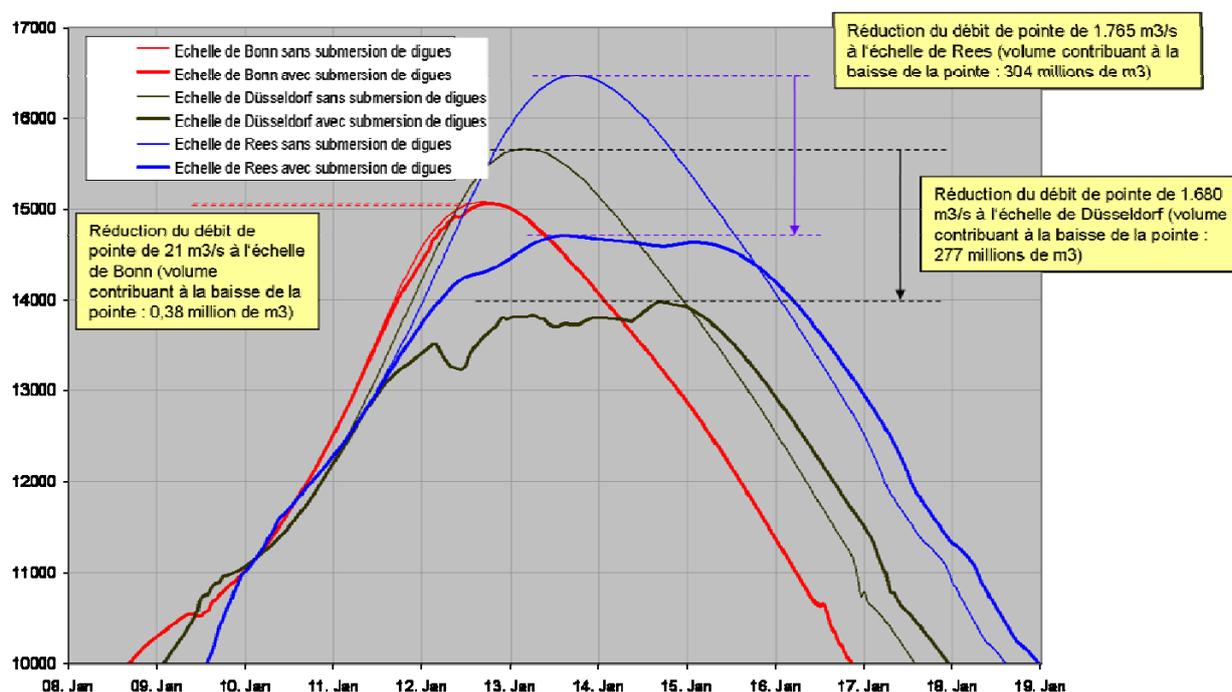
**Annexe 5 : Relevé des débits maximaux des affluents du Rhin**

Affluent [Nom de la rivière]	Apport maximal [m <sup>3</sup> /s]	Observation / source bibliographique
Bâle (Rhin)	5.480	(Indication sur HQextrême conformément à la mise en œuvre de la DI au sein de la CIPR)
Wiese	600	Identification CIPR 2005, rapport n° 153, 2006
Canal Leopold	700	HSK, 1978 (annexe 6.1)
Décharge de l'III	1.000	Identification CIPR 2005, rapport n° 153, 2006
Kinzig	1.100	HSK, 1978 (annexe 6.1)
III	300	Identification CIPR 2005, rapport n° 153, 2006
Acher/Rench	300	Identification CIPR 2005, rapport n° 153, 2006
Moder	420	Identification CIPR 2005, rapport n° 153, 2006
Murg	750	Indication LUBW, 06.2010
Sûre	180	HSK, 1978 (annexe 6.1)
Neckar	3.970	(Indication sur HQextrême conformément à la mise en œuvre de la DI au sein de la CIPR)
Weschnitz	65	Indication HLUG, 04.2010
Modau	30	Indication HLUG, 04.2010
Main	3.350	Indication HLUG, 31.05.2011
Nahe	1.300	Identification CIPR 2005, rapport n° 153, 2006
Wisper	60	Indication HLUG, 04.2010
Lahn	1.100	Identification CIPR 2005, rapport n° 153, 2006
Moselle	6.500	GT H 18.03.2010
Nette	100	Identification CIPR 2005, rapport n° 153, 2006
Wied	200	Identification CIPR 2005, rapport n° 153, 2006
Ahr	300	Identification CIPR 2005, rapport n° 153, 2006
Sieg	1.600	Identification CIPR 2005, rapport n° 153, 2006
Wupper	400	Identification CIPR 2005, rapport n° 153, 2006
Erft	150	Identification CIPR 2005, rapport n° 153, 2006
Ruhr	1.500	Identification CIPR 2005, rapport n° 153, 2006
Emscher	400	Identification CIPR 2005, rapport n° 153, 2006
Lippe	700	CIPR 2005, rapport n° 153, 2006/LANUV; Monsieur Brinkmann par courriel le 12.03.2010

## Annexe 6 : Aspects fondamentaux concernant l'impact de submersions de digues sur le déroulement de l'onde et sur la pointe d'une crue

Une submersion de digue a toujours un impact sur le déroulement de l'onde et sur la crête de la crue plus en en aval. Cet impact est généralement important pour la prévision de crue ; il l'est également pour l'éventuelle gestion d'ouvrages de rétention. Les répercussions d'une submersion sont présentées ici à titre d'exemple pour le Rhin inférieur avec le calcul, à l'aide du modèle SOBEK, d'une onde de crue démarrant à Andernach et dont la pointe est plus élevée que le débit de dimensionnement (15.000 m<sup>3</sup>/s par rapport à un HQ de dimensionnement à Cologne (BemHQ<sub>Köln</sub>) de 12.900 m<sup>3</sup>/s).

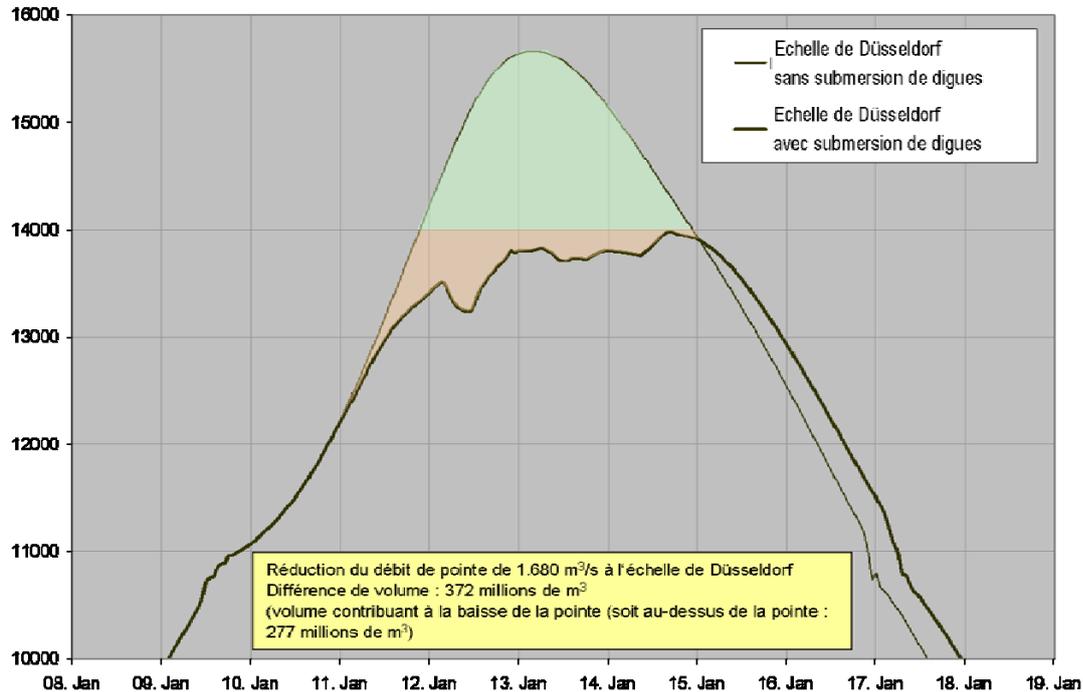
### Calcul sur la base d'env. 15.000 m<sup>3</sup>/s à partir de l'échelle d'Andernach Impact de la submersion de digues en NRW



Les calculs montrent qu'il ne survient pratiquement aucune modification d'Andernach à Bonn. Jusqu'à Düsseldorf, ces modifications deviennent cependant très importantes, autant au niveau de la forme de l'onde que de l'abaissement de la pointe de crue. L'impact est ressenti jusqu'à la frontière germano-néerlandaise, bien que l'espace occupé derrière les digues au sud de Düsseldorf soit restreint.

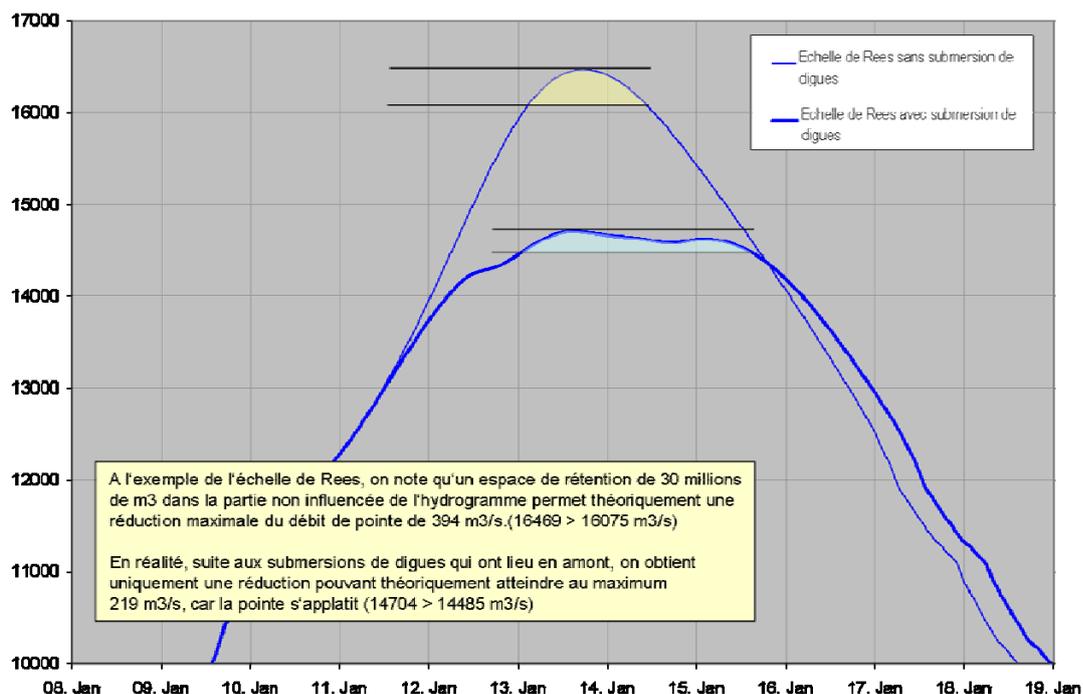
L'espace occupé derrière les digues ne contribue pas dans sa totalité à l'abaissement de la pointe de crue. Le graphique suivant montre que, de manière similaire au fonctionnement d'espaces de rétention, la partie du volume comprise entre les hydrogrammes en dessous de la pointe de crue n'a pas d'effet atténuateur.

## Calcul sur la base d'env. 15.000 m<sup>3</sup>/s à partir de l'échelle d'Andernach Impact de la submersion de digues en NRW à l'échelle de Düsseldorf

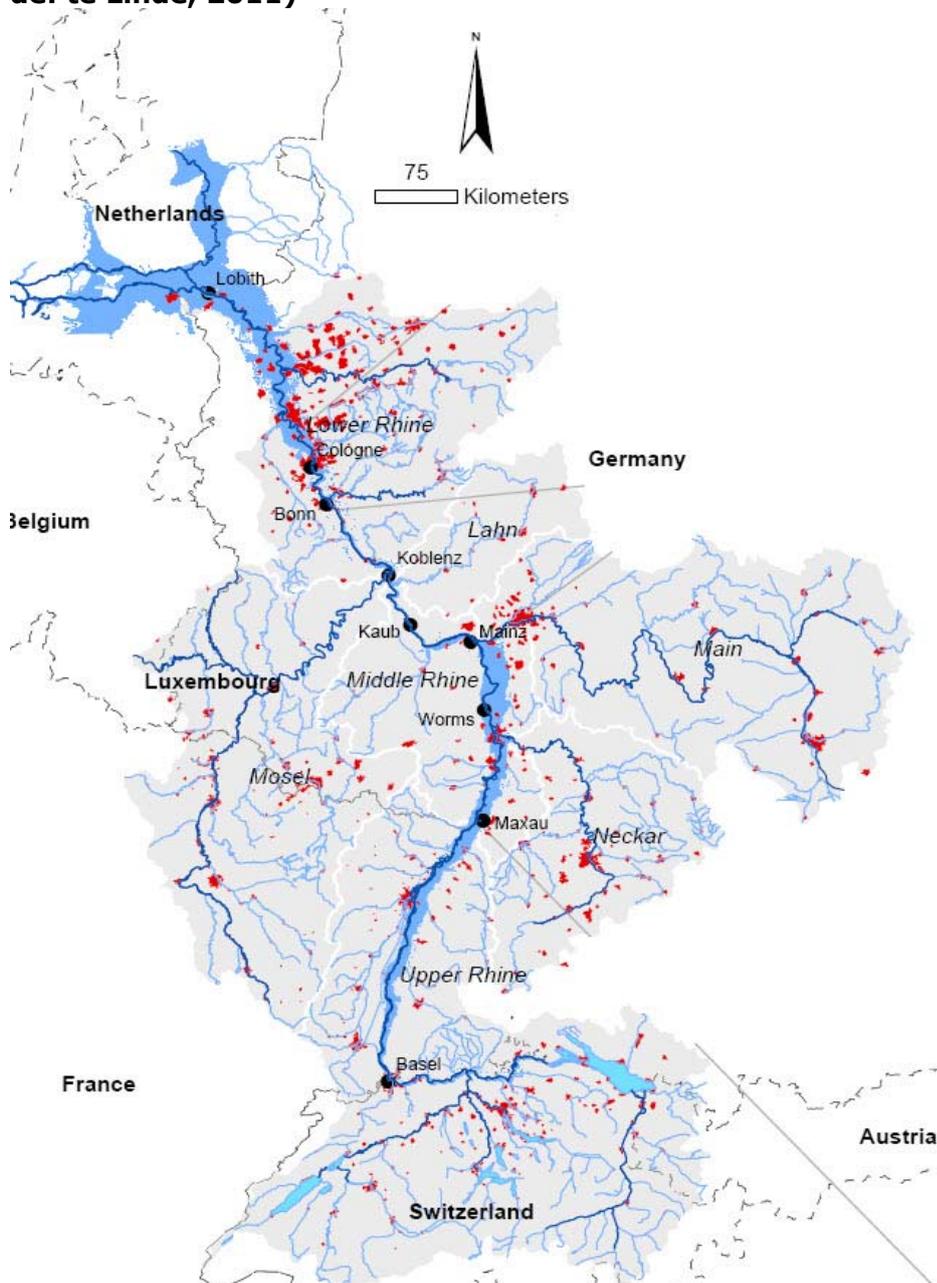


L'efficacité des zones de rétention dépend tout particulièrement de la déformation de l'onde et éventuellement de la hauteur qu'atteint la pointe de crue.

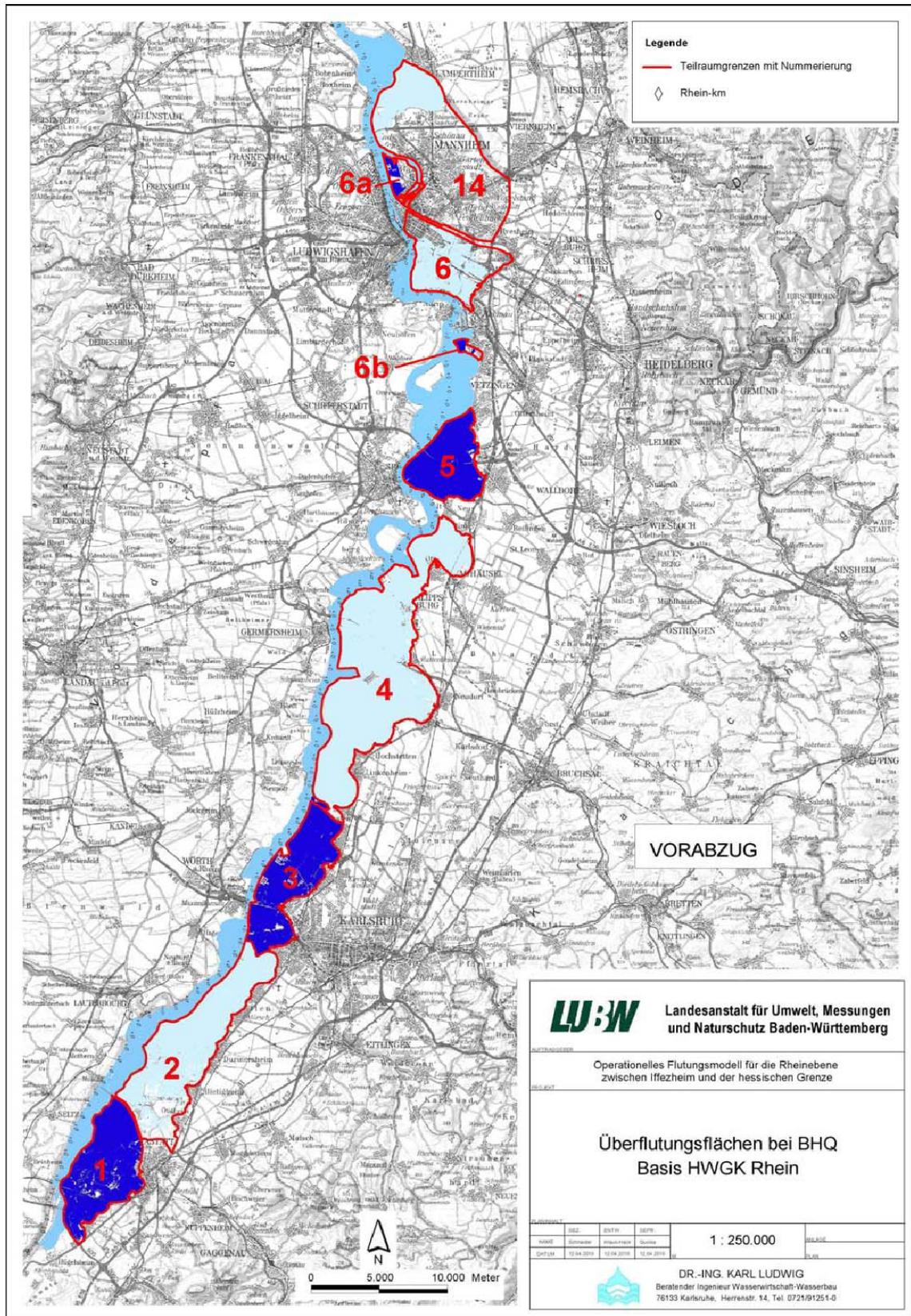
Le graphique suivant montre pour l'hydrogramme de l'échelle de Rees qu'un espace de rétention d'un volume réaliste de 30 millions de m<sup>3</sup> agit de manière idéale quand l'hydrogramme n'est pas influencé. En revanche, son effet réel est plus faible quand l'hydrogramme est influencé, du fait de la calotte de pointe aplatie.



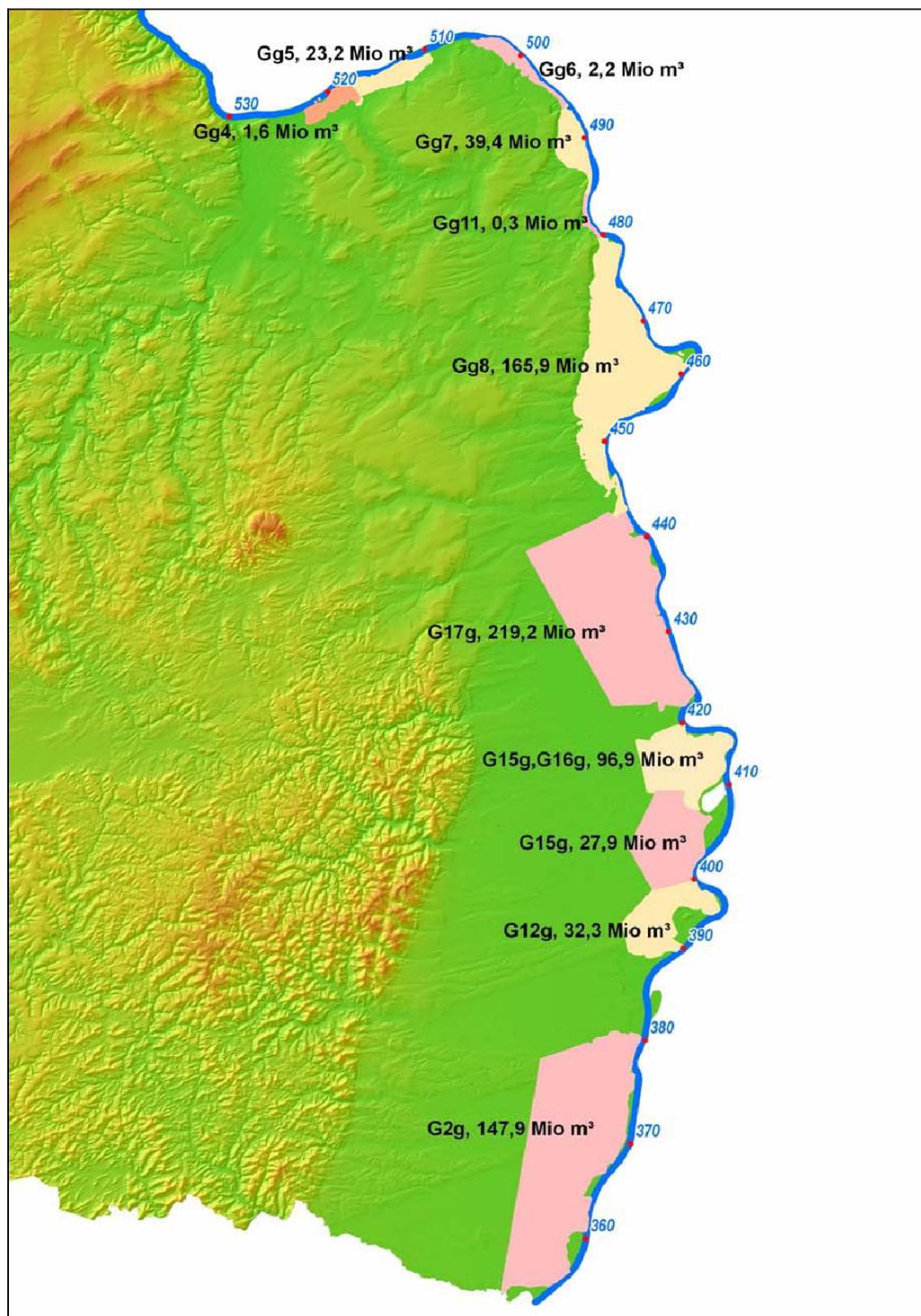
**Annexe 7a : Surfaces potentiellement inondables à la suite de submersions de digues sur le Rhin en aval du lac de Constance ; les surfaces inondables sont représentées en bleu, par analogie avec l'atlas du Rhin de la CIPR, 2001 (tiré de: te Linde, 2011)**



**Annexe 7b : Zones inondables prises en compte au Bade-Wurtemberg**  
*(les surfaces françaises seront ajoutées dans une phase ultérieure, voir chap. 7.1.1)*



**Annexe 7c : Zones inondables prises en compte en Rhénanie-Palatinat**



### Annexe 7d : Subdivision de l'enveloppe inondable du Rhin inférieur en différentes surfaces inondables (tiré de : Deutsch-Niederländische Arbeitsgruppe Hochwasser, 2004b)

Les zones caractérisées par un « O » sont remplies d'eau s'écoulant au-dessus d'un tel mur érigé contre les crues ; les zones caractérisées par un « D » sont inondées à la suite de ruptures de digues provoquées par des submersions. Enfin, les zones caractérisées par un « L » sont des zones plus élevées qui ne sont pas submergées.

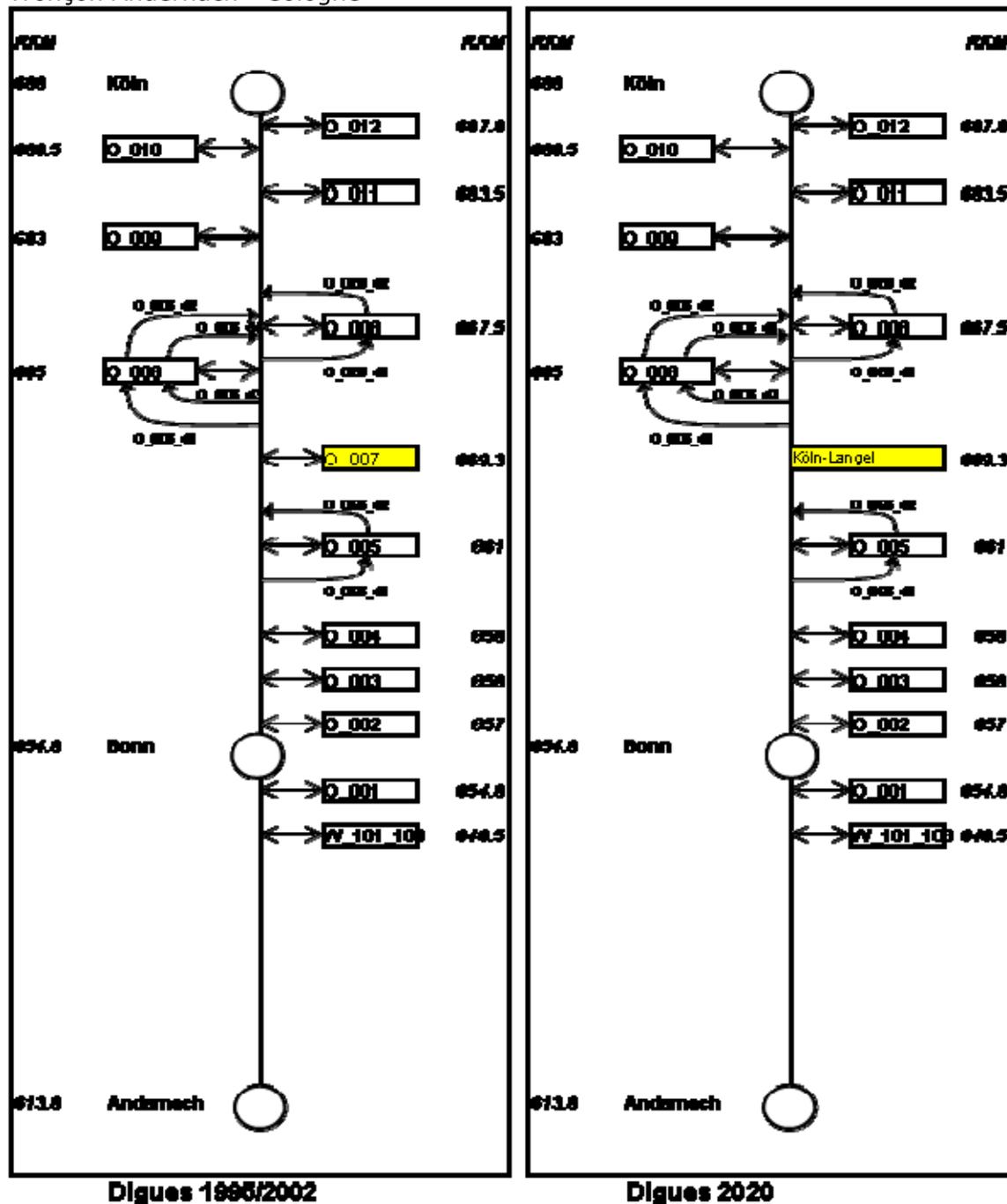


### Annexe 8 : Schématisation dans le modèle SOBEK des zones inondables derrière les digues entre Andernach et Lobith

Les zones caractérisées par un « O » sont remplies d'eau s'écoulant au-dessus d'un tel mur érigé contre les crues ; les zones caractérisées par un « D » sont inondées à la suite de ruptures de digues provoquées par des submersions.

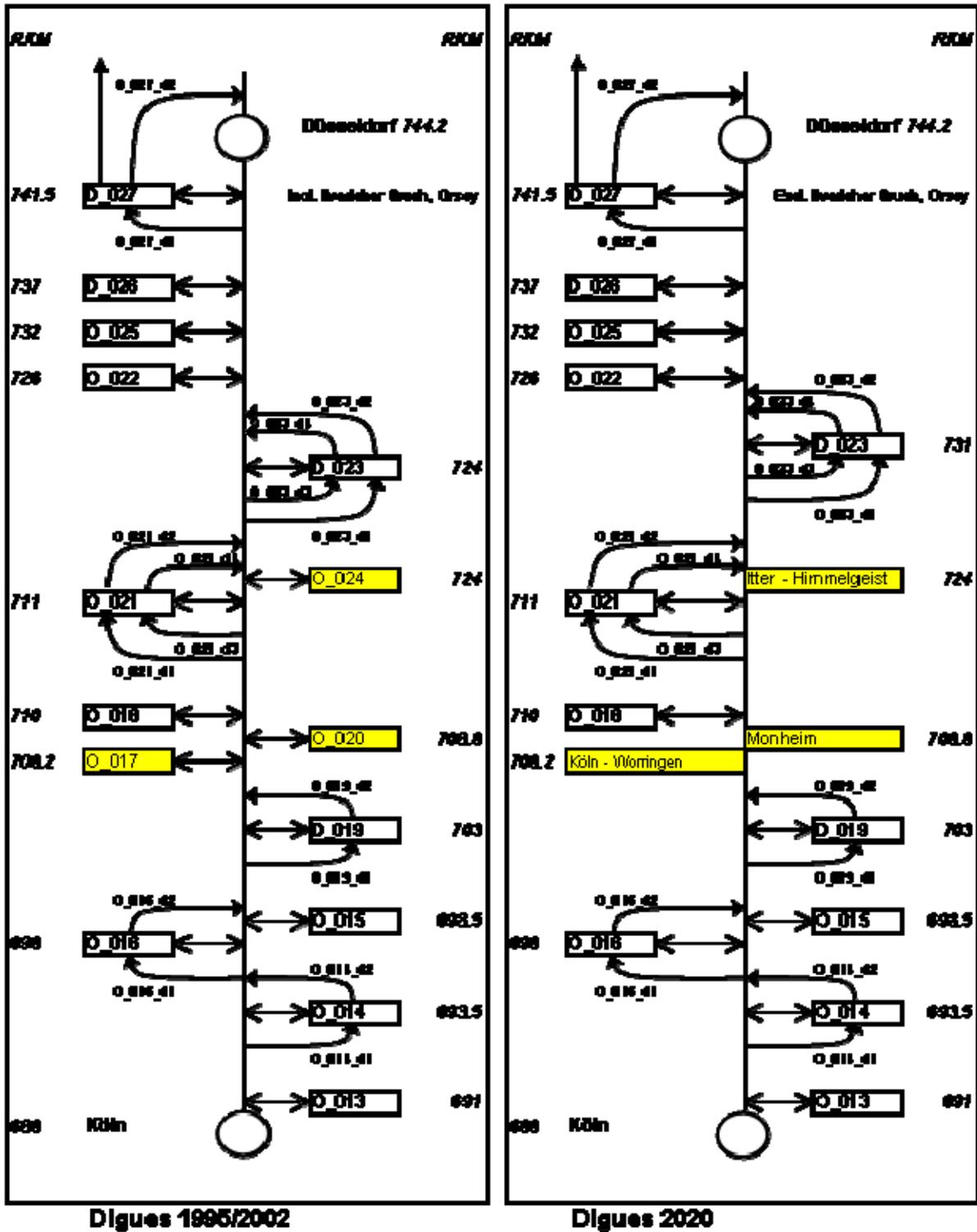
**Annexe 8a :** Schéma des zones de submersion et des ruptures de digues dans le modèle SOBEK (tiré de : Deutsch-Niederländische Arbeitsgruppe Hochwasser (2004a).

Tronçon Andernach - Cologne



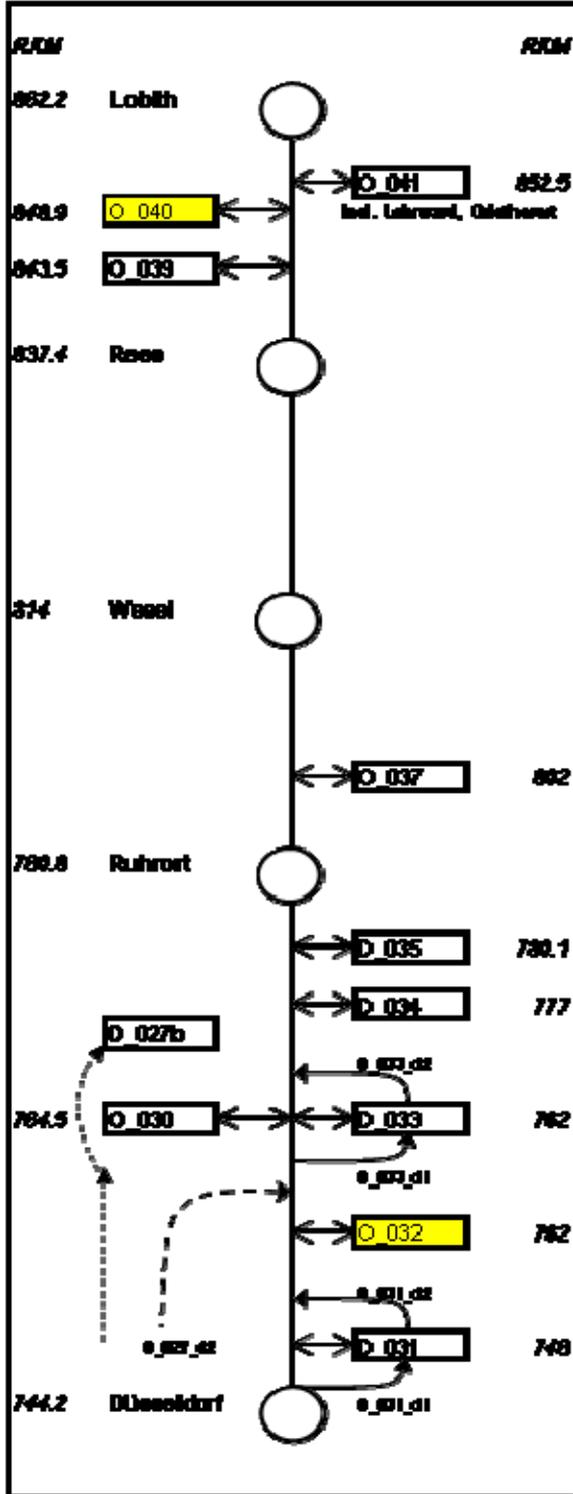
**Annexe 8b** : Schéma des zones de submersion et des ruptures de digues dans le modèle SOBEK (tiré de : Deutsch-Niederländische Arbeitsgruppe Hochwasser (2004a).

Tronçon Cologne - Düsseldorf

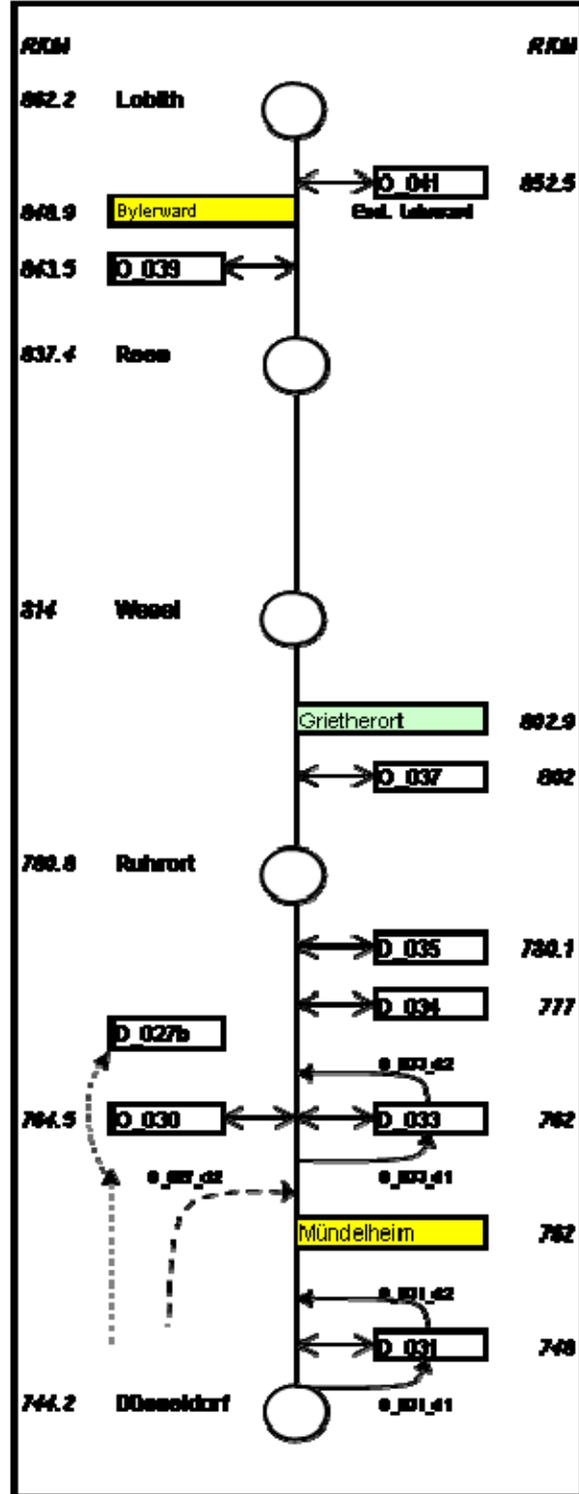


**Annexe 8c :** Schéma des zones de submersion et des ruptures de digues dans le modèle SOBEK (tiré de : Deutsch-Niederländische Arbeitsgruppe Hochwasser (2004a).

Tronçon Düsseldorf - Lobith



Digues 1996/2002



Digues 2020

## Annexe 9 : Réduction des pointes de débit et de niveau d'eau pour les états d'aménagement analysés

Point traité : indications des valeurs minimales et maximales ainsi que des moyennes pour chaque hydrogramme calculé. La synthèse rassemble les données sur les percentiles, dans la mesure où ils ont pu être calculés

Echelle Maxau	Modifications minimales, moyennes et maximales des pointes de débit [m <sup>3</sup> /s] des états d'aménagement analysés par rapport à l'état 1995															
	Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>10</sub>			Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>100</sub>			Pour une crue de l'ordre de HQ <sub>extrême</sub>									
	sans submersion de digues		avec submersion de digues	sans submersion de digues		avec submersion de digues	sans submersion de digues		avec submersion de digues							
	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.				
Δ HQ 1977	-120	<b>121</b>	47				-81	<b>462</b>	763		65	<b>434</b>	628			
Δ HQ 2005	-290	<b>-38</b>	10				-289	<b>-89</b>	150		-180	<b>-50</b>	70			
Δ HQ 2010	-290	<b>-38</b>	10				-289	<b>-89</b>	150		-180	<b>-50</b>	70	-70	<b>-30</b>	29
Δ HQ 2020	-333	<b>-51</b>	81				-392	<b>-157</b>	102		-291	<b>-100</b>	68	-126	<b>-57</b>	32
Δ HQ 2020+	-431	<b>-79</b>	46				-670	<b>-284</b>	-74		-483	<b>-268</b>	-103			

Echelle Maxau	Modifications minimales, moyennes et maximales des pointes de niveaux d'eau [cm] des états d'aménagement analysés par rapport à l'état 1995															
	Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>10</sub>			Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>100</sub>			Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>extrême</sub>									
	sans submersion de digues		avec submersion de digues	sans submersion de digues		avec submersion de digues	sans submersion de digues		avec submersion de digues							
	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.				
Δ crue 1977	-8	<b>8</b>	30				-3	<b>29</b>	47		3	<b>18</b>	27			
Δ crue 2005	-19	<b>-3</b>	7				-18	<b>-6</b>	10		-10	<b>-3</b>	3			
Δ crue 2010	-19	<b>-3</b>	7				-18	<b>-6</b>	10		-10	<b>-3</b>	3	-4	<b>-2</b>	1
Δ crue 2020	-23	<b>-3</b>	5				-24	<b>-10</b>	6		-16	<b>-6</b>	3	-7	<b>-3</b>	2
Δ crue 2020+	-29	<b>-5</b>	5				-42	<b>-18</b>	-3		-27	<b>-14</b>	-4			

Echelle Worms	Modifications minimales, moyennes et maximales des pointes de débit [m <sup>3</sup> /s] des états d'aménagement analysés par rapport à l'état 1995															
	Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>10</sub>			Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>100</sub>			Pour une crue de l'ordre de HQ <sub>extrême</sub>									
	sans submersion de digues		avec submersion de digues	sans submersion de digues		avec submersion de digues	sans submersion de digues		avec submersion de digues							
	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.				
Δ HQ 1977	-31	<b>115</b>	421				-10	<b>349</b>	656		190	<b>426</b>	638			
Δ HQ 2005	23	<b>-32</b>	4				-279	<b>-156</b>	-43		-343	<b>-167</b>	18			
Δ HQ 2010	23	<b>-33</b>	2				-284	<b>-163</b>	-44		-354	<b>-172</b>	16	-255	<b>-98</b>	5
Δ HQ 2020	39	<b>-92</b>	17				-628	<b>-357</b>	-93		-714	<b>-396</b>	-62	-551	<b>-266</b>	-13
Δ HQ 2020+	42	<b>-112</b>	9				-729	<b>-463</b>	-201		-1164	<b>-661</b>	-274			

Echelle Worms	Modifications minimales, moyennes et maximales des pointes de niveaux d'eau [cm] des états d'aménagement analysés par rapport à l'état 1995															
	Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>10</sub>			Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>100</sub>			Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>extrême</sub>									
	sans submersion de digues		avec submersion de digues	sans submersion de digues		avec submersion de digues	sans submersion de digues		avec submersion de digues							
	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.				
Δ crue 1977	-2	<b>9</b>	30				0	<b>21</b>	39		9	<b>21</b>	32			
Δ crue 2005	-19	<b>-3</b>	1				-18	<b>-10</b>	-2		-18	<b>-9</b>	1			
Δ crue 2010	-19	<b>-3</b>	1				-18	<b>-10</b>	-3		-19	<b>-9</b>	1	-14	<b>-5</b>	0
Δ crue 2020	-33	<b>-7</b>	2				-44	<b>-23</b>	-5		-39	<b>-21</b>	-3	-31	<b>-15</b>	-1

Δ crue 2020+	-35	-9	1	-52	-31	-14	-67	-36	-15
--------------	-----	----	---	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Echelle Mayence	Modifications minimales, moyennes et maximales des pointes de débit [m <sup>3</sup> /s] des états d'aménagement analysés par rapport à l'état 1995																	
	Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>10</sub>						Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>100</sub>						Pour une crue de l'ordre de HQ <sub>extrême</sub>					
	sans submersion de digues			avec submersion de digues			sans submersion de digues			avec submersion de digues			sans submersion de digues			avec submersion de digues		
	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.
Δ HQ 1977	-18	151	528				-4	328	570				229	335	487			
Δ HQ 2005	-265	-69	10				-250	-120	-19				-102	-56	-16			
Δ HQ 2010	-271	-76	10	-259	-73	10	-334	-151	-34	-306	-112	56	-102	-63	-25	-99	-48	17
Δ HQ 2020	-512	-150	10	-471	-146	10	-477	-286	-71	-475	-230	11	-241	-159	-78	-154	-91	18
Δ HQ 2020+	-858	-198	12				-894	-504	-81				-588	-406	-189			

Echelle Mayence	Modifications minimales, moyennes et maximales des pointes de niveaux d'eau [cm] des états d'aménagement analysés par rapport à l'état 1995																	
	Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>10</sub>						Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>100</sub>						Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>extrême</sub>					
	sans submersion de digues			avec submersion de digues			sans submersion de digues			avec submersion de digues			sans submersion de digues			avec submersion de digues		
	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.
Δ crue 1977	-1	10	35				0	20	34				12	17	24			
Δ crue 2005	-23	-10	-3				-20	-11	-5				-8	-6	-4			
Δ crue 2010	-24	-11	-4	-23	-10	-4	-25	-13	-6	-24	-11	0	-8	-6	-4	-7	-4	-2
Δ crue 2020	-41	-16	-2	-37	-15	-2	-38	-22	-8	-35	-18	-3	-15	-11	-7	-10	-7	-2
Δ crue 2020+	-63	-19	-4				-61	-36	-9				-33	-24	-13			

Echelle Kaub	Modifications minimales, moyennes et maximales des pointes de débit [m <sup>3</sup> /s] des états d'aménagement analysés par rapport à l'état 1995																	
	Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>10</sub>						Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>100</sub>						Pour une crue de l'ordre de HQ <sub>extrême</sub>					
	sans submersion de digues			avec submersion de digues			sans submersion de digues			avec submersion de digues			sans submersion de digues			avec submersion de digues		
	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.
Δ HQ 1977	-18	144	476				-17	297	539				235	383	575			
Δ HQ 2005	-278	-68	11				-245	-105	42				-204	-106	-20			
Δ HQ 2010	-311	-85	11	-298	-84	7	-317	-145	38	-313	-117	44	-219	-125	-31	-189	-78	20
Δ HQ 2020	-520	-153	12	-494	-151	17	-504	-273	87	-476	-232	93	-422	-263	-86	-327	-180	21
Δ HQ 2020+	-799	-193	9				-893	-481	-68				-717	-451	-244			

Echelle Kaub	Modifications minimales, moyennes et maximales des pointes de niveaux d'eau [cm] des états d'aménagement analysés par rapport à l'état 1995																	
	Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>10</sub>						Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>100</sub>						Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>extrême</sub>					
	sans submersion de digues			avec submersion de digues			sans submersion de digues			avec submersion de digues			sans submersion de digues			avec submersion de digues		
	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.
Δ crue 1977	-2	13	40				-1	23	42				18	28	43			
Δ crue 2005	-31	-12	-5				-28	-16	-3				-23	-15	-9			
Δ crue 2010	-34	-14	-5	-30	-13	-5	-33	-19	-3	-33	-16	-2	-24	-17	-10	-22	-13	-4
Δ crue 2020	-50	-19	-5	-49	-19	-4	-50	-29	1	-46	-26	1	-40	-27	-14	-32	-21	-4
Δ crue 2020+	-70	-23	-5				-80	-46	-12				-63	-41	-25			

Echelle Andernach	Modifications minimales, moyennes et maximales des pointes de débit [m <sup>3</sup> /s] des états d'aménagement analysés par rapport à l'état 1995																			
	Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>10</sub>						Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>100</sub>						Pour une crue de l'ordre de HQ <sub>extrême</sub>							
	sans submersion de digues			avec submersion de digues			sans submersion de digues			avec submersion de digues			sans submersion de digues			avec submersion de digues				
max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.			
Δ HQ 1977	-183	158	501						-14	272	533				-7	195	577			
Δ HQ 2005	-242	-64	17						-270	-96	12				-224	-83	-10			
Δ HQ 2010	-339	-85	17	-278	-87	6			-305	-144	-3	-307	-115	56	-231	-116	-57	-219	-124	-63
Δ HQ 2020	-524	-158	17	-463	-159	18			-542	-275	4	-493	-227	39	-348	-204	-72	-330	-202	-132
Δ HQ 2020+	-854	-208	18						-950	-502	-18				-562	-301	-73			

Echelle Andernach	Modifications minimales, moyennes et maximales des pointes de niveaux d'eau [cm] des états d'aménagement analysés par rapport à l'état 1995																			
	Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>10</sub>						Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>100</sub>						Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>extrême</sub>							
	sans submersion de digues			avec submersion de digues			sans submersion de digues			avec submersion de digues			sans submersion de digues			avec submersion de digues				
max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.			
Δ crue 1977	-12	11	31						-1	14	27				0	9	26			
Δ crue 2005	-21	-6	9						-16	-6	1				-8	-1	3			
Δ crue 2010	-25	-8	9	-25	-10	2			-18	-8	0	-23	-12	-2	-8	-3	1	-15	-10	-8
Δ crue 2020	-37	-13	9	-37	-14	2			-30	-16	0	-32	-18	-3	-14	-7	-1	-20	-14	-10
Δ crue 2020+	-57	-16	8						-59	-29	0				-24	-12	-1			

Echelle Cologne	Modifications minimales, moyennes et maximales des pointes de débit [m <sup>3</sup> /s] des états d'aménagement analysés par rapport à l'état 1995																			
	Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>10</sub>						Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>100</sub>						Pour une crue de l'ordre de HQ <sub>extrême</sub>							
	sans submersion de digues			avec submersion de digues			sans submersion de digues			avec submersion de digues			sans submersion de digues			avec submersion de digues				
max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	Moyenne	min.	max.	moyenne	min.			
Δ HQ 1977	-201	135	485						-15	258	501				-7	158	569			
Δ HQ 2005	-217	-58	12						-257	-95	34				-232	-75	-2			
Δ HQ 2010	-308	-77	12	-254	-79	6			-294	-151	21	-295	-124	15	-232	-106	-50	-392	-104	87
Δ HQ 2020	-478	-143	17	-419	-144	16			-542	-276	55	-460	-238	34	-315	-182	-28	-437	-168	10
Δ HQ 2020+	-795	-185	21						-960	-469	7				-511	-263	-29			

Tronçon allant du débouché de la Sieg au débouché de la Ruhr	Modifications minimales, moyennes et maximales (valeurs moyennes rapportées au tronçon) des pointes de niveaux d'eau [cm] des états d'aménagement analysés par rapport à l'état 1995																			
	Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>10</sub>						Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>100</sub>						Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>extrême</sub>							
	sans submersion de digues			avec submersion de digues			sans submersion de digues			avec submersion de digues			sans submersion de digues			avec submersion de digues				
max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	Moyenne	min.	max.	moyenne	min.			
Δ crue 1977	-1	10	26						-13	7	22				-1	14	29			
Δ crue 2005	-11	1	8						-11	2	9				-10	0	6			
Δ crue 2010	-14	-1	8	-11	0	9			-11	0	9	-10	0	7	-12	-1	6	-6	1	4
Δ crue 2020	-24	-7	9	-24	-4	9			-22	-4	9	-16	-5	7	-26	-7	5	-10	-4	0
Δ crue 2020+	-44	-12	7						-34	-7	9				-39	-12	3			

Echelle Lobith	Modifications minimales, moyennes et maximales des pointes de débit [m <sup>3</sup> /s] des états d'aménagement analysés par rapport à l'état 1995																	
	Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>10</sub>						Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>100</sub>						Pour une crue de l'ordre de l'ordre de HQ <sub>extrême</sub>					
	sans submersion de digues			avec submersion de digues			sans submersion de digues			avec submersion de digues			sans submersion de digues			avec submersion de digues		
	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.
Δ HQ 1977	-304	125	480				-1	214	429				-8	153	576			
Δ HQ 2005	-203	-64	21				-240	-97	-12				-220	-71	26			
Δ HQ 2010	-221	-82	22	-225	-80	19	-285	-150	-15	-290	-116	-12	-230	-111	2	-330	-107	2
Δ HQ 2020	-400	-135	18	-389	-133	14	-539	-301	-16	-399	-234	-30	-515	-321	-146	-505	-188	38
Δ HQ 2020+	-807	-181	17				-942	-450	-13				-1044	-629	-188			

Tronçon allant du débouché de la Ruhr à Pannerdensch Kop	Modifications minimales, moyennes et maximales (valeurs moyennes rapportées au tronçon) des pointes de niveaux d'eau [cm] des états d'aménagement analysés par rapport à l'état 1995																	
	Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>10</sub>						Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>100</sub>						Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>extrême</sub>					
	sans submersion de digues			avec submersion de digues			sans submersion de digues			avec submersion de digues			sans submersion de digues			avec submersion de digues		
	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.
Δ crue 1977	-10	6	20				0	8	17				0	5	19			
Δ crue 2005	-12	-2	5				-3	1	4				-4	2	5			
Δ crue 2010	-12	-2	6	-10	-2	6	-4	1	6	-3	2	6	-1	3	7	-5	3	7
Δ crue 2020	-25	-11	4	-22	-8	5	-25	-14	-2	-16	-9	0	-31	-27	-17	-29	-17	-7
Δ crue 2020+	-35	-13	3				-34	-19	-2				-43	-33	-18			

Tronçon du Nederrijn/Lek	Modifications minimales, moyennes et maximales (valeurs moyennes rapportées au tronçon) des pointes de niveaux d'eau [cm] des états d'aménagement analysés par rapport à l'état 1995																	
	Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>10</sub>						Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>100</sub>						Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>extrême</sub>					
	sans submersion de digues			avec submersion de digues			sans submersion de digues			avec submersion de digues			sans submersion de digues			avec submersion de digues		
	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.
Δ crue 1977	-5	2	12				0	3	6				0	3	11			
Δ crue 2005	-6	-1	2				-3	-1	0				-3	-1	1			
Δ crue 2010	-7	-2	1	-6	-1	1	-6	-3	-1	-3	-2	0	-4	-2	-1	-6	-2	0
Δ crue 2020	-22	-11	-1	-23	-11	-1	-19	-10	-2	-13	-7	-2	-26	-15	-7	-18	-9	-4
Δ crue 2020+	-29	-12	-1				-21	-11	-2				-32	-20	-8			

Tronçon du Waal	Modifications minimales, moyennes et maximales (valeurs moyennes rapportées au tronçon) des pointes de niveaux d'eau [cm] des états d'aménagement analysés par rapport à l'état 1995																	
	Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>10</sub>						Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>100</sub>						Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>extrême</sub>					
	sans submersion de digues			avec submersion de digues			sans submersion de digues			avec submersion de digues			sans submersion de digues			avec submersion de digues		
	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.
Δ crue 1977	-7	3	11				0	6	17				0	4	14			
Δ crue 2005	-9	-2	1				-5	-3	0				-5	-2	1			
Δ crue 2010	-10	-3	0	-8	-2	1	-8	-5	-2	-6	-2	0	-7	-5	-2	-7	-2	1
Δ crue 2020	-49	-17	-7	-48	-16	-7	-25	-19	-11	-23	-16	-8	-31	-25	-18	-29	-19	-6
Δ crue 2020+	-50	-18	-7				-35	-23	-10				-42	-32	-19			

Tronçon de l'Jssel	Modifications minimales, moyennes et maximales (valeurs moyennes rapportées au tronçon) des pointes de niveaux d'eau [cm] des états d'aménagement analysés par rapport à l'état 1995																	
	Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>10</sub>						Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>100</sub>						Pour une crue de l'ordre d'un HQ <sub>extrême</sub>					
	sans submersion de digues			avec submersion de digues			sans submersion de digues			avec submersion de digues			sans submersion de digues			avec submersion de digues		
	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.	max.	moyenne	min.
Δ crue 1977	-3	2	8				0	3	7				0	3	13			
Δ crue 2005	-8	-1	0				-5	-2	0				-6	-2	0			
Δ crue 2010	-8	-2	0	-7	-1	0	-8	-3	-1	-4	-2	0	-8	-5	-2	-7	-3	0
Δ crue 2020	-45	-38	-25	-44	-38	-25	-57	-45	-37	-50	-43	-36	-61	-52	-43	-56	-46	-40