



**INTERNATIONALE KOMMISSION ZUM SCHUTZ DES RHEINS  
COMMISSION INTERNATIONALE POUR LA PROTECTION DU RHIN**

**Estimation de l'impact de la  
rétention des eaux dans le  
bassin du Rhin**

Editeur: Commission Internationale pour la Protection du Rhin (CIPR)  
Postfach 20 02 53  
D - 56002 Koblenz  
Tél.: (49)-261-1 24 95  
Fax: (49)-261-3 65 72  
E-mail: [iksr@rz-online.de](mailto:iksr@rz-online.de) <http://www.iksr.org>

Date de publication: mars 1999

Groupe de projet 'Plan d'action contre les inondations' avec le concours des services suivants:

Bundesamt für Wasser und Geologie, Biel; Direction Régionale de l'Environnement de Lorraine, Metz; Service de la Navigation de Strasbourg, Strasbourg; Direction Régionale de l'Environnement d'Alsace, SEMA, Horbourg-Wihr; Services Techniques de l'Agriculture, Luxembourg; Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn; Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz, Mainz; Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg, Stuttgart; Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf; Bundesministerium für Verkehr, Bonn; Rijkswaterstaat, Hoofddirectie van de Waterstaat, Den Haag; Rijkswaterstaat (RIZA), Lelystad; Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directie Gelderland, Arnhem; Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, Den Haag

Membres du cercle d'experts ayant contribué à la rédaction de ce rapport:

Heinz Engel (président), Martial Gerlinger, Dr. Andreas Meuser, Dr. Armin Petrascheck, Wim Silva, Dr. Anne Schulte-Wülwer-Leidig (secrétariat)

## PREFACE

Le Plan d'action contre les inondation élaboré par la CIPR prévoit la mise en œuvre de mesures jusqu'en 2020 dans les Etats riverains du Rhin, l'objectif étant de réduire sensiblement les dommages occasionnés par les inondations sur le Rhin. Au travers de ce plan d'action, on entend notamment limiter fortement les risques de dommages et les niveaux de crue. On peut également citer comme autres objectifs importants de prévention des crues ceux consistant à renforcer la prise de conscience face au risque d'inondation et à améliorer le système d'annonce des crues. Le présent rapport entreprend dans un premier temps une analyse générale de l'éventail des mesures d'amélioration envisageables dans le domaine particulièrement important de la « réduction des niveaux de crue » et procède dans un deuxième temps à une évaluation groupée de ces mesures dans un volet relatif à « l'estimation de l'impact de la rétention des eaux dans le bassin du Rhin ».

Dans son document intitulé „Constat et stratégie pour le Plan d'action contre les inondations" de décembre 1995, la CIPR liste déjà une série de mesures susceptibles d'atténuer les inondations. Ces mesures très diversifiées vont de la rétention des eaux en surface aux mesures techniques de protection contre les inondations au moyen de bassins de rétention et de barrages, en passant par la rétention des eaux dans le cours d'eau même et dans la plaine alluviale. Dans ses principes directeurs visant à limiter les dommages dus aux inondations, la CIPR en appelle à tous pour que ces possibilités soient largement prises en compte sur l'ensemble du bassin du Rhin.

Cette énumération qualitative de mesures à prendre ne suffisait cependant pas pour le Plan d'action contre les inondations de la CIPR. L'objectif visé, à savoir atténuer les inondations, devait être quantifié, c'est-à-dire étayé par des chiffres concrets. A cet effet, un groupe composé d'experts internationaux sous la direction de la Bundesanstalt für Gewässerkunde a rassemblé les connaissances disponibles sur les effets des différentes mesures de prévention des crues, les a évaluées pour le bassin du Rhin et exposées systématiquement pour chaque tronçon. La CIPR s'est engagée ici sur un nouveau terrain. Cette estimation de l'impact des mesures de rétention a permis pour la première fois de présenter clairement les relations complexes de différentes séries de mesures sur le régime hydrologique d'un grand fleuve, en laissant toutefois de côté l'éventuelle faisabilité de ces mesures. Il s'est avéré que les mesures les plus efficaces pour abaisser le niveau des eaux en cas de crue étaient celles visant à reconquérir les anciennes surfaces inondables dans la plaine alluviale du Rhin. Il ne faut toutefois en aucun cas négliger les différentes mesures s'appliquant sur les surfaces et qui ont pour effet de réduire et de retarder les débits tout en contribuant également à améliorer l'équilibre naturel et l'aménagement du paysage.

Le présent document sur l'estimation de l'impact de la rétention des eaux dans le bassin du Rhin devra être actualisé au fil des connaissances supplémentaires que l'on pourra acquérir au niveau scientifique et dans le cadre de la mise en œuvre du Plan d'action contre les inondations de la CIPR. Il constitue dès à présent une base essentielle pour atteindre l'un des principaux objectifs opérationnels, à savoir celui d'„abaisser les niveaux de crues". Nous adressons tous nos remerciements aux experts réunis au sein de ce groupe.

## **PREFACE**

### **Structure**

	<b>Page</b>
<b>I Résultats de l'estimation de l'impact de la rétention des eaux dans le bassin du Rhin</b>	<b>5</b>
• Graphiques sur la genèse des crues	
• Matrice d'estimation de l'impact de mesures conjuguées	
• Recherches à engager	
<b>II Estimation de l'impact de la rétention des eaux dans le bassin du Rhin</b>	<b>10</b>
<b>1. Rétention des eaux dans le bassin versant</b>	<b>10</b>
1.1 Végétation	10
1.2 Sols	11
1.3 Terrain	13
1.4 Réseau hydrographique	15
<b>2. Rétention des eaux dans le Rhin et aux abords du Rhin</b>	<b>19</b>
2.1 Lac de Constance et haut Rhin	20
2.2 Rhin supérieur	20
2.3 Rhin moyen	23
2.4 Rhin inférieur	23
2.5 Rhin deltaïque	24
2.6 Rétention manœuvrable ou non manœuvrable: évaluation	27
<b>3. Estimation de l'impact des mesures de rétention dans le bassin du Rhin à l'exemple des crues de mai 1983, mars 1998 et janvier 1995</b>	<b>28</b>

## I. Résultats de l'estimation de l'impact de la rétention des eaux dans le bassin du Rhin

Les résultats de l'estimation de l'impact des mesures de prévention des crues examinées se présentent sous forme d'un éventail des possibilités actuellement envisageables. Le degré d'efficacité de mesures particulières reste à analyser en temps et lieu. Cependant, les résultats rassemblés dans le présent document ne connaîtront pas de modifications fondamentales.

1. Le régime de crue du Rhin est caractérisé par une extrême hétérogénéité. Par conséquent, les crues exceptionnelles ne surviennent toujours que dans des parties du bassin versant (cf. graphique).
2. En règle générale, les pointes de crue de nombreux affluents (du Rhin) précèdent les pointes de crues du Rhin qui leur sont subordonnées. Un ralentissement de l'écoulement des ondes des affluents peut donc entraîner une superposition défavorable avec l'onde du Rhin.<sup>1</sup>
3. Les mesures permettant de retenir les eaux le long du fleuve pendant toute la durée d'une crue (p.ex. rétention dans les lacs, les polders) ont pour effet de réduire le débit dans les affluents et les cours d'eau supérieurs.
4. Les mesures prises dans le bassin (végétation, sol, terrain, réseau hydrographique) ont pour effet d'atténuer et de retarder le débit et ont un impact écologique positif multiple. A l'heure actuelle, les efforts en matière de recherche doivent porter notamment sur la quantification de la rétention des eaux en surface et dans les affluents (quel doit être le volume de rétention, à quel endroit, à quelles conditions, pendant combien de temps ?).
5. Les mesures techniques de rétention peuvent réduire sensiblement les pointes de crues lorsque les objectifs de protection sont clairement définis. Leur impact s'atténue à mesure que l'on s'éloigne de l'objet de protection.
6. Les mesures visant à atténuer les crues ne sont le plus souvent<sup>2</sup> possibles que si une crue survient également à l'endroit où ces mesures sont prises.

---

<sup>1</sup> Dans le cas du Main et de la Moselle, l'effet d'aggravation et l'effet d'atténuation sur les pointes de crue du Rhin se contrebalancent. Cette constatation ne vaut pas pour le Neckar. Les mesures contractuelles de rétention des crues semblent pouvoir décaler les pointes de crue du Rhin et du Neckar. Une superposition défavorable peut ainsi être en grande partie évitée au travers de mesures prises dans le bassin du Neckar.

<sup>2</sup> En raison d'échéances de prévision trop courtes (échéance de 4 à 5 jours souhaitée, échéance de 1 jour à 1 jour et demi réalisable), on ne peut actuellement mettre en action, en dehors de situation de crues, des dispositifs de rétention techniquement manoeuvrables (pour satisfaire des objectifs précis de protection éloignés).

7. En atténuant l'impact des crues par une gestion ciblée des espaces submersibles, on peut prévenir des dommages de grande ampleur.
8. Pour autant qu'elles soient en nombre restreint, les mesures de protection contre les inondations limitées à la protection locale sur la Moselle et le Rhin moyen ne mobilisent que des volumes réduits et n'ont pas d'impact négatif sur les riverains d'aval.<sup>3</sup>
9. Les élargissements de la section transversale d'écoulement permettent d'abaisser localement le niveau des eaux. Il n'ont aucun effet à distance.<sup>4</sup>
10. On ne peut obtenir la somme des effets en additionnant purement et simplement les effets distincts des différentes mesures de protection contre les inondations.

Dans l'état actuel des connaissances, de toutes les conditions externes et de l'hypothèse que les possibilités mentionnées dans le présent document soient politiquement réalisables, on obtient, en les cumulant toutes, des réductions moyennes de niveaux d'eau extrêmes sur l'ensemble du Rhin d'env.

- ⇒ **80 cm sur le Rhin supérieur**
- ⇒ **100 cm de l'embouchure du Main jusqu'à Lobith (p.ex. 12 m à l'échelle de Cologne = HQ 280 au lieu de 13 m = HQ 1000).**

En augmentant la capacité d'écoulement du profil fluvial et indépendamment du pourcentage de réduction apporté par les affluents d'amont, on peut obtenir dans les bras néerlandais du Rhin une baisse de niveau pouvant se traduire par un abaissement de 40 à 80 cm à Lobith.

En détail, l'impact serait le suivant:

- Dans le cas de crues extrêmes sur place (HQ 200), la moyenne statistique des réductions qu'entraînerait la mise en œuvre de toutes les mesures de rétention sur le Rhin supérieur méridional (voir annexe 5 de la publication "Protection contre les inondations sur le Rhin - inventaire" p. 27) serait de l'ordre de
  - ⇒ **60 cm env. entre l'embouchure du Neckar et celle du Main (Worms)**
  - ⇒ **65 cm env. dans le Rhin moyen (Kaub)**
  - ⇒ **45 cm env. dans le Rhin inférieur (Cologne)**
  - ⇒ **30 cm env. à hauteur de la frontière germano-néerlandaise (Lobith)**

---

<sup>3</sup> Les aggravations de débit de la Moselle et du Rhin moyen, imputables à la perte d'espaces de rétention, se font le plus sentir lorsque les eaux commencent à déborder, de sorte qu'elles n'ont généralement aucune incidence sur les pointes des ondes de crue. Si l'on protégeait toutes les localités riveraines de la Moselle ou du Rhin moyen par des mesures locales, on obtiendrait une aggravation moyenne du débit de pointe de l'ordre de 10 m<sup>3</sup>/s au maximum.

<sup>4</sup> En raison des conditions en présence dans la partie aval du bassin versant et des possibilités limitées de rétention technique et de prise de mesures en surface, un renforcement de la capacité d'écoulement dans le Rhin deltaïque apparaît comme le moyen adéquat pour réduire les niveaux de crue. A titre d'exemple, on peut citer les mesures visant à reconquérir d'anciennes zones inondables, à décaisser l'ancien lit majeur et à repousser les digues vers les terres.

- Si, partant d'un HQ 200, il est en outre possible de retenir 80 millions de m<sup>3</sup> supplémentaires entre l'embouchure du Neckar et celle du Main, les réductions pourraient augmenter en moyenne de
  - ⇒ 20 cm env. en aval jusqu'à Cologne et de
  - ⇒ 15 cm env. à l'échelle de Lobith.
- Si, sur le territoire de Rhénanie-du-Nord-Westphalie, les trois polders à hauteur de Cologne et les huit polders à hauteur de Düsseldorf jugés réalisables (env. 174 millions de m<sup>3</sup> de volume de rétention) sont mis en œuvre et en supposant qu'ils soient manœuvrés de manière appropriée, on obtiendra une réduction supplémentaire du niveau des eaux en débit de pointe de
  - ⇒ 30 cm env. à l'échelle de Lobith.
- On peut envisager pour les bras néerlandais du Rhin d'appliquer un ensemble de mesures susceptibles d'augmenter la capacité d'écoulement, chaque mesure rapportée au HQ1250 permettant d'abaisser le niveau des eaux de cinq cm à trois à quatre décimètres selon les cas. En cumulant ces effets, on obtient un total de réduction
  - ⇒ de l'ordre de 40 à 80 cm (avec le même usage des surfaces dans le lit majeur), diminuant progressivement jusqu'à 0 cm dans la zone influencée par la mer du Nord et l'IJsselmeer.
 (Cette réduction n'est intégralement obtenue que si l'on est en présence de crues extrêmes).
- Pour le Rhin deltaïque, une rétention des eaux aux Pays-Bas permettrait d'atteindre
  - ⇒ un abaissement supplémentaire de 10 à 20 cm.
- En règle générale, il n'y a pas concomitance entre les crues du lac de Constance et celles du Rhin moyen et du Rhin inférieur. Ceci explique pourquoi, malgré le volume important d'emmagasinement du lac de Constance, la rétention des eaux ne serait que de l'ordre de 100 à 200 m<sup>3</sup>/s pendant toute la période de crue. Ceci correspondrait à une réduction des niveaux de crue de l'ordre de 5 à 15 cm. En raison des échéances importantes (5 à 10 jours) des prévisions requises et d'une forte opposition dans tous les Etats riverains, la régulation du lac de Constance n'est pas réalisable dans un avenir proche.
- Les mesures de rétention prévues en Allemagne dans les affluents du Rhin n'ont pas systématiquement un impact positif sur le Rhin. Dans certains cas, on peut envisager
  - ⇒ des réductions de l'ordre de 10 cm.
 (Des conflits d'intérêt concernant l'objectif de protection à choisir empêchent la mise en œuvre de ces mesures selon les besoins en présence sur le Rhin.)
- Il est quasiment impossible de quantifier les volumes de rétention obtenus sur place en modifiant l'usage des sols, laissant s'infiltrer les eaux, désimperméabilisant les surfaces etc. En partant, pour les besoins de l'estimation, d'une rétention prolongée d'1 mm de précipitations sur l'ensemble du bassin du Rhin, on obtient une réduction de la pointe de crue du Rhin de l'ordre de
  - ⇒ 5 cm env. à Cologne.

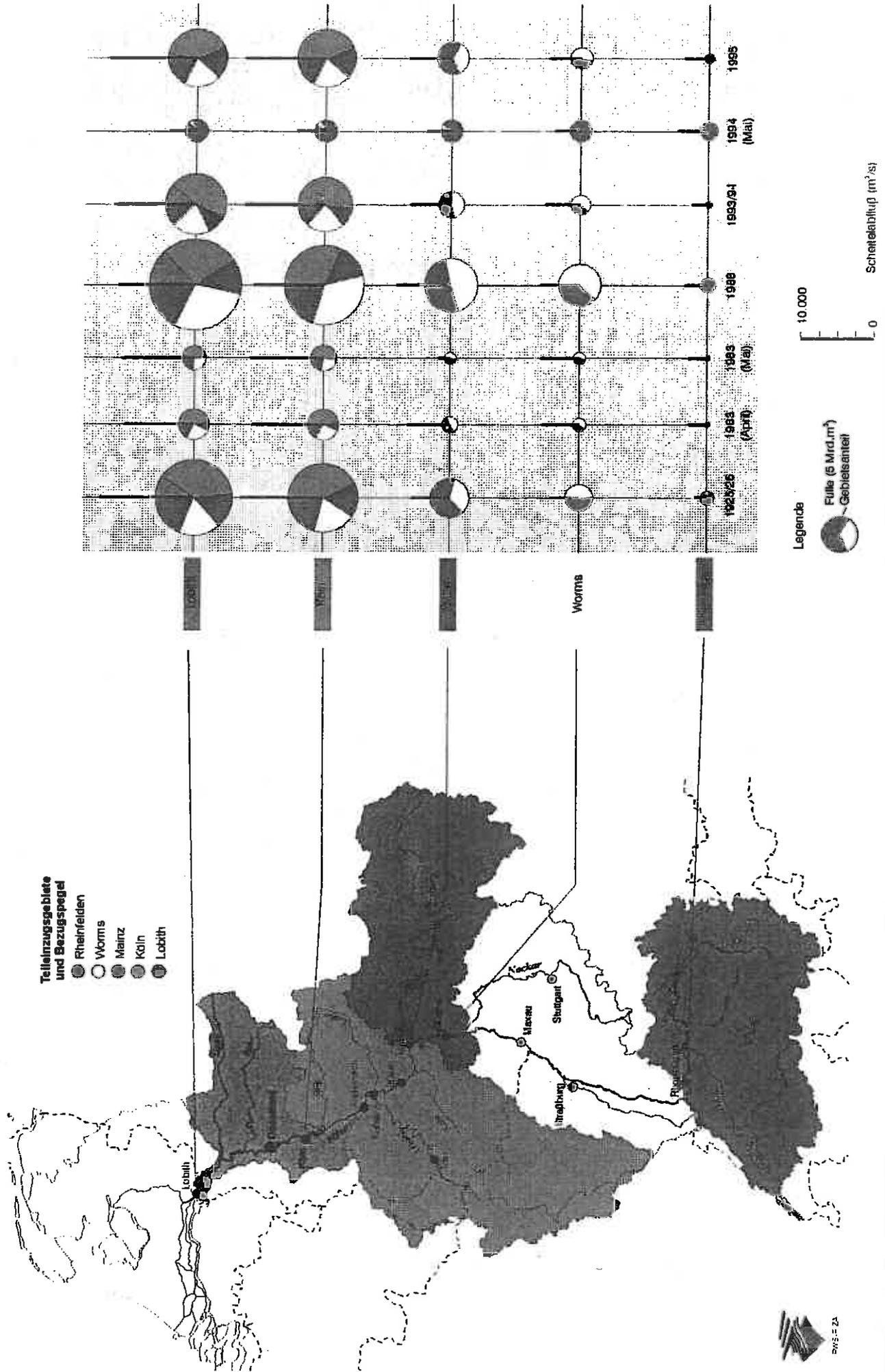
◆ **Recherches à engager**

- Etude de l'impact de l'aspérité végétale sur l'écoulement de surface
- Etudes sur le recensement quantitatif de la rétention en surface sur le terrain (cuvettes, creusements de terrain, systèmes de drainage)
- Estimation de l'augmentation du volume de rétention par le biais de mesures de re-naturation
- Mise au point de crues-modèles aux fins de suivi quantitatif des résultats (modélisation hydraulique de l'ensemble du bassin versant)
- Quantification de la rétention prolongée et temporaire en fonction du type de gestion des sols
- Etude de l'impact morphologique de mesures de prévention des crues sur le Rhin.

évaluation de l'impact sur les crues des mesures de rétention dans le bassin du Rhin	impact dans la											
	zone rapprochée sur les						zone éloignée (Rhin)					
	faibles			fortes			faibles			fortes		
impact:	crues											
	ips de passage	volume	niveau	durée	ips de passage	volume	niveau	durée	ips de passage	volume	niveau	durée
de la végétation		-	-	-								
du sol		(+)	+	-		+	(+)	(-)				
		+	+	-		+	(+)	(-)		(+)		
		+	+	-		+	+	+		(+)		
du terrain		+	+	-		+	-	+		+		
		+	+	-		+	+	+		+		
		-	-	-		-	-	-		-		
du réseau hydrographique		+	+	+		+	+	+		+		
		+	-	+		+	+	+		+		
		-	(+)	(-)		-	(+)	(-)		-		
			(-)	-			(-)	-				
		(+)	(-)	(-)		(+)	(-)	(+)		(+)		
		(+)	(-)	(-)		(+)	(-)	(+)		(+)		
			(-)	(-)			(-)	(-)		(-)		
		+	(-)	(+)		+	(-)	(+)		(-)		
			-	-			-	-		-		
		+	(-)	(+)		(+)	(-)	(+)		(-)		
			-	-			-	-		-		
			-	-			-	-		-		
			(+)	(+)			(+)	(+)		(+)		

+ renforcement, prolongation, relassement  
 (-) sous certaines conditions  
 - diminution, atténuation  
 + risque à considérer en particulier  
 - amélioration de la situation de crue

# Hochwasserentwicklung (Scheitelabfluß und Fülle) in Bezug auf die Größe der Teilinzugsgebiete des Rhein zwischen Rheinfelden und Lobith



## II Estimation de l'impact de la rétention des eaux dans le bassin versant

Les mesures de prévention des crues examinées ci-après se présentent sous forme d'un éventail des possibilités actuellement envisageables. Le degré d'efficacité de mesures particulières reste à analyser en temps et lieu. Cependant, les résultats rassemblés dans le présent document ne connaîtront pas de modifications fondamentales.

### 1. Rétention des eaux dans le bassin versant

Outre la répartition des précipitations dans le temps et dans l'espace, la capacité d'emmagasinement de la végétation, des sols, des terrains et du réseau hydrographique du bassin versant a un effet déterminant sur le niveau des crues.

#### 1.1 Végétation

La végétation a un impact multiple sur les débits. Par le biais des organismes vivants et morts recouvrant des sols, elle a un effet sur l'interception et augmente l'évaporation, réduisant par là même en principe les débits. La pénétration racinaire intensive dans le sol a également un impact décisif sur la capacité d'infiltration. Par ailleurs, la végétation modifie la rugosité de la surface. Elle freine et réduit ainsi le ruissellement en surface.

**L'interception** (emmagasinement temporaire des précipitations tombées et déposées à la surface (des plantes)) est particulièrement prononcée lorsque la végétation croît en hauteur et joue un rôle important pendant toute l'année lorsqu'il s'agit d'espèces toujours vertes. Dans les cultures agricoles, l'interception ne joue un rôle relativement important que pendant la période de végétation.

Pour les forêts, on peut partir de l'hypothèse d'un taux moyen d'interception d'environ 25 % des précipitations annuelles sur les surfaces non urbanisées. Pour les plantes toujours vertes (p. ex. les épicéas), on suppose que ce taux varie entre 30 % et 50 %, alors qu'il est d'environ 15 % à 20 % pour les espèces à feuilles caduques (p. ex. les hêtres). Les arbustes ont un comportement analogue aux forêts feuillues. Pour les cultures agricoles, les taux moyens annuels d'interception atteignent un ordre de grandeur de 10 % des précipitations tombant sur les surfaces non urbanisées, *c'est-à-dire que l'ordre de grandeur de l'interception varie entre 0,5 et environ 5 mm de hauteur de précipitations par crue*. Les capacités d'interception de la couche supérieure des forêts sont de 2 mm en moyenne.

On peut déduire des valeurs susmentionnées qu'en période de fortes crues, l'interception n'a qu'un effet de rétention relativement faible. Lorsque les crues sont faibles ou moyennes, l'effet cumulatif de l'interception doit cependant être pris en compte. Lorsque les plantes présentent une forte interception (p. ex. l'épicéa), le déficit d'eau dans les sols en période estivale est comblé avec env. 2 mois de retard comparé à une zone de végétation rase (p.ex. prairie). Les sols sont alors en mesure d'emmagasiner des précipitations de l'ordre de 50 mm, précipitations qui ne viennent pas renforcer le débit des fleuves.

Grâce à ses **racines**, la végétation influence la **capacité d'infiltration** dans les sols. Dans les forêts, on observe en général des taux d'infiltration très élevés à moyens. Les taux sont moyens pour les prairies permanentes à exploitation intense, alors qu'ils peuvent être très faibles ou très élevés dans les terres cultivées en fonction du type de gestion.

Plus la **rugosité** de la végétation est élevée, plus le ruissellement en surface est ralenti et/ou retenu. En principe, plus la végétation est dense et hétérogène, plus la quantité d'eau retenue est importante. La forêt empêche presque complètement le ruissellement en surface. La couche supérieure, la structure favorable du sol et la part importante de macropores favorisent l'infiltration. Sur les surfaces en jachère sociale abandonnées à l'herbe ou aux arbustes, les conditions sont également favorables et empêchent le ruissellement superficiel.

Sur les prairies permanentes exploitées par contre, le taux de ruissellement superficiel peut être significatif, selon le degré de compactage dû au piétinement des animaux et au passage des machines. Il est intéressant de constater qu'au printemps, avant même que le bétail ne rejoigne les pâturages pour la première fois, le ruissellement superficiel est nul ou relativement faible, exception faite de la fonte des neiges et/ou de la pluie sur des sols gelés. C'est une conséquence de la période de repos des sols pendant plusieurs mois, période au cours de laquelle se mettent en place des conditions favorables à l'infiltration.

Le ruissellement superficiel peut être encore plus important sur les terres cultivées. Il existe toutefois de grandes différences en fonction des cultures et de leur stade de développement respectif. On observe le ruissellement superficiel le plus élevé juste après la récolte sur les sols consolidés par le passage des machines.

## 1.2 Sols

L'influence qu'exercent les sols sur l'impact des mesures de prévention des crues est souvent très sous-estimé.

Un des processus essentiels de réduction des crues dans les sols est l'évaporation, due notamment à la transpiration des plantes. En raison du déficit d'eau dans les sols en période estivale, les sols peuvent absorber et emmagasiner, malgré la gravitation, de grandes quantités de précipitations. Le risque

de crues d'été sur l'ensemble du Rhin est donc minimisé. *Selon le type et la nature des sols, la capacité d'absorption des sols est de l'ordre de 100 à 300 mm de précipitations.*

Le processus susmentionné est donc la principale raison pour laquelle les débits élevés du Rhin survenant entre juin et septembre sont en général presque exclusivement dus à la fonte des neiges dans les Alpes. Il convient de tenir compte du fait que ces débits sont généralement accompagnés de précipitations abondantes, y compris dans les massifs moyens; par contre, la contribution des rivières naissant dans les massifs moyens aux débits du Rhin est négligeable. Ceci ne veut pas dire que des crues extrêmes sont exclues pendant l'été; leur probabilité d'occurrence est toutefois très faible (cf. crue de juillet 1342).

Pour mettre à profit la capacité d'emmagasinement des sols, il est indispensable de savoir si les précipitations peuvent s'infiltrer dans les sols ou ruissellent rapidement en surface. Les conditions nécessaires à l'**infiltration** étant optimales dans les forêts, il est peu probable d'y observer un ruissellement superficiel. Par contre, sur les surfaces imperméabilisées, on ne peut s'attendre qu'à un ruissellement superficiel. Quant aux surfaces agricoles, elles se trouvent à mi-chemin.

Les pores grossiers des sols accélèrent l'infiltration, ce qui peut également avoir une importance particulière pour l'infiltration à partir du système racinaire. Sur les coteaux (massifs moyens), le transfert des eaux infiltrées par écoulement latéral peut sensiblement contribuer à la formation accélérée de crues. Les vitesses d'écoulement sont toutefois inférieures de plusieurs puissances de dix au ruissellement superficiel.

En matière d'infiltration, les surfaces cultivées sont particulièrement instables. Un facteur essentiel qui détermine la capacité d'infiltration et, par là même, le ruissellement superficiel sur les terres cultivées est la **stabilité de la structure du sol**. Lorsqu'elle est élevée, il n'y a ni envasement ni destruction des pores grossiers dans le sol. Elle dépend entre autres de la teneur en humus. Ainsi, les différences dans la stabilité de la structure du sol exercent une influence plus importante sur les valeurs du ruissellement superficiel que l'humidité du sol avant précipitations ou la végétation.

Vis-à-vis du ruissellement, le gel a généralement pour effet d'"imperméabiliser les surfaces". Le terme de "quasi-imperméabilisation" pour désigner une humidité élevée du sol (sans gel) ne décrit cependant pas les conditions réelles en période de crue. Même lorsque l'humidité du sol est élevée (état de saturation), l'eau s'infiltré dans le sol par le biais du système de macropores et de micropores. Ces eaux sont ensuite transférées et emmagasinées dans les macropores. Les coefficients d'écoulement élevés observés lors des crues de 1993 et 1995 ne sont donc pas exclusivement dus au ruissellement superficiel, mais au débit direct. Une grande partie de l'onde écoulée est donc passée par le sol. Dans le cas d'une imperméabilisation réelle de la superficie globale (p. ex. dans le cas de sols extrêmement envasés et dont la structure est instable), les précipitations se seraient écoulées plus vite encore.

### 1.3 Terrain

L'impact de la rétention due au terrain est notamment fonction des facteurs de végétation et de sol rapportés à la surface. *L'eau retenue en surface dans de petites et toutes petites dépressions et cuvettes est estimée à environ 10 mm.* Il est certain que les valeurs sont très variables en fonction des usages.

Dans la mesure où il est possible d'isoler et de présenter les **impacts dus aux usages** sur l'écoulement d'une crue, on peut dresser la liste suivante:

- Structure des usages dans un paysage, c'est-à-dire parts tenues par les types de cultures, les forêts, les prairies permanentes, les surfaces cultivées, ainsi que leur répartition
- Morcellement de surfaces agricoles, en partie déterminé par les systèmes de chemins et de fossés, ou réalisé parallèlement à leur mise en place
- Localisation des surfaces agricoles par rapport au cours d'eau
- Mise en valeur du paysage par la création de chemins (notamment de chemins consolidés et imperméabilisés). Si ces chemins présentent une forte pente longitudinale sans possibilité suffisante d'écoulement transversal (et infiltration ultérieure), le ruissellement superficiel est transféré et favorise par là même la formation de ruissellements superficiels supplémentaires.
- Densité et tracé des fossés eu égard à la fonction qu'ils remplissent dans le transfert du ruissellement superficiel.

Ces impacts assez généraux peuvent être complétés comme suit pour les surfaces cultivées et les prairies permanentes:

- Grandes surfaces de coteaux ayant un impact sur l'écoulement, sans bandes intermédiaires pour atténuer cet écoulement
- Gestion des terres dans le sens de la pente
- Usage ou mauvais usage de cuvettes ouvertes à l'aval des coteaux, dans lesquelles peuvent converger les ruissellements de surface; lorsque les terres sont exploitées, les cuvettes peuvent avoir un impact décisif sur le ruissellement superficiel, surtout si elles ne sont pas exploitées conformément à leur contour.
- Voies de passage très fréquentées par les machines dans le sens de la pente
- Type d'exploitation des terres détruisant la structure du sol, gestion des sols entraînant une réduction de la couche d'humus
- Compactage du sol (compactage du fond de raie du labour, tassement due au passage des machines, voies de passage des machines)
- Faible degré de couverture par des plantes utiles pendant les périodes pluvieuses ou les périodes où l'intensité des précipitations est élevée.
- Hivernage des surfaces cultivées sans exploitation (= jachère nue).

Sur les prairies permanentes:

- Compactages dues au piétinement des animaux en pâturage
- Compactages dues au passage des machines (fertilisation, prairies tondues, fanage, etc.)
- Entrée dans les prairies permanentes très fréquentée à des endroits où la pente est forte.

Lorsque les précipitations sont simultanées et régulières, la forme du bassin versant a également un impact sur l'écoulement des ondes de crue. Dans les bassins versants étirés, les crues sont aplaties, étant donné que les ondes provenant des sous-bassins se succèdent dans le cours d'eau principal. Si les bassins sont plus ou moins ronds, les ondes des sous-bassins arrivent en même temps et se cumulent. Les pointes extrêmes surviennent lorsque la direction du déplacement des précipitations et celle du déroulement de l'onde coïncident.

Il n'est guère possible aux différentes échelles de quantifier à l'aide d'analyses statistiques des débits de crue l'effet de l'**imperméabilisation** du sol due aux agglomérations et voies de circulation. En comparant un état fictif sans agglomérations avec l'état de 1985, on obtient, par le biais de calculs-modèles, des augmentations des débits de pointe dans le Rhin comme suit: *pour des épisodes pluviaux d'une durée de 4 jours, l'augmentation est d'env. + 8 %, alors que si les épisodes pluviaux durent une seule journée, l'augmentation s'élève à env. + 12 %*. Pour la période allant de 1951 à 1985, on peut partir d'une valeur approximative correspondant à la moitié de l'augmentation, puisqu'en 1951 la construction de bâtiments était de moitié inférieure à celle de 1985. Les pourcentages d'augmentation les plus élevés sont observés lors d'épisodes avec de petites pointes de crue dans le Rhin. Les zones de concentration urbaine ne tiennent qu'une part relativement faible dans ces augmentations (en moyenne 1,3 %); la majeure partie vient des constructions réparties sur l'ensemble du bassin, ce qui représente presque 80 % des constructions totales.

On ne dispose pas de connaissances fiables sur l'impact qu'exerce le **dépérissement des forêts** sur les débits de crue. *Si l'on part d'un dépérissement global des forêts, les calculs réalisés à l'aide d'un modèle de bassin fluvial font ressortir une augmentation des débits de pointe dans le Rhin supérieur d'env. + 17 % en moyenne pour un épisode pluvial de 4 jours et d'env. + 28 % en moyenne pour un épisode pluvial d'un jour.*

L'**infiltration des eaux de précipitation** est un élément du plan de rétention des crues. Comme c'est déjà le cas pour de nombreuses mesures dans le cadre de la rétention naturelle des eaux, l'infiltration des eaux pluviales ne doit pas être considérée comme un objectif isolé de protection contre les inondations, mais comme un élément de gestion interdisciplinaire des surfaces et des cours d'eau dans le but de préserver et d'améliorer la qualité de l'environnement dans son ensemble.

Par contre, laisser s'infiltrer sur place les eaux pluviales peut être efficace dans les petits bassins fortement peuplés, mais c'est un programme à long terme. Cette possibilité pourrait toutefois être directement utilisée dans les nouvelles zones de construction ainsi que lors de l'aménagement d'installations surchargées ou devant être remises en état. L'utilisation générale de systèmes de rigoles reliant

des cuvettes p. ex. peut créer une capacité d'emmagasinement utile, d'autant plus que la part des sols imperméabilisés par le gel et donc des surfaces étanches ne vient pas s'ajouter au ruissellement superficiel. Il faut cependant prendre en considération que le potentiel de désimpermeabilisation dans le bassin du Rhin s'élève au plus à 1 % de la superficie du bassin versant. Pour les grandes crues du Rhin, l'effet de réduction des débits est donc minimal.

#### 1.4 Réseau hydrographique

L'emmagasinement d'eau dans le fleuve ou le réseau hydrographique a pour effet d'écarter l'onde de crue et de décaler son écoulement. Un **réseau hydrographique** dense avec de fortes pentes entraîne un écoulement rapide sur l'ensemble du bassin versant. A l'inverse, lorsque les pentes sont faibles, l'écoulement plus rapide peut être compensé par la plus forte capacité d'emmagasinement des petits cours d'eau, fossés, etc. Les corrections de fleuves entraînent l'accélération des ondes de crue. Etant donné que dans un bassin versant les ondes de crue provenant des sous-bassins situés en aval sont les premières à s'écouler, les mesures de correction réalisées sur le cours supérieur créent un effet de superposition des ondes de crue pouvant entraîner par là même une montée brutale de l'onde. Sous certaines conditions, une atténuation des débits de pointe est également possible.

Les **dispositifs de rétention des crues dans les sous-bassins** du Rhin ralentissent la propagation de l'onde et peuvent ainsi renforcer en tendance la pointe de crue du cours principal. Les mesures techniques de rétention visent en général à protéger certaines localités menacées dans ces bassins versants. Les temps de prévision des crues décisifs pour la mise en œuvre des systèmes de rétention s'élèvent au plus à 6-12 heures. Les manœuvres techniques sur ces espaces de rétention doivent également respecter ces délais. Ceci implique que les espaces de rétention, une fois remplis, doivent être vidés le plus vite possible, puisque l'on doit pratiquement s'attendre à tout moment à une nouvelle pointe de crue génératrice de dommages.

Pour estimer l'impact de tels espaces de rétention dans les sous-bassins du Rhin sur les ondes de crue dans le Rhin, des calculs correspondants ont été effectués pour la Nahe (bassin versant d'env. 4000 km<sup>2</sup>). On est parti de l'hypothèse d'un espace de rétention d'env. 20 millions de m<sup>3</sup> pour protéger la ville de Bad Kreuznach, puisqu'ici les ondes de crue entraînent des dommages à partir d'un débit d'environ 600 m<sup>3</sup>/s à 700 m<sup>3</sup>/s. L'impact des dispositifs de rétention fictifs sur le débit de crue du Rhin a été déterminé à l'aide de modèles basés sur les ondes de crue qui ont en partie provoqué de fortes inondations à Cologne.

En raison de la genèse des crues dans les sous-bassins, les effets sur les échelles situées sur le cours aval du Rhin, donc sur le système hydrographique des grands fleuves, sont hétérogènes. Les calculs font ressortir des réductions des pointes de crue dans le Rhin, mais aussi des aggravations du débit. Dans quelques cas, l'impact des dispositifs de rétention du type de ceux cités pour la Nahe sur le débit de pointe du Rhin est même nul. *Ce résultat se fonde sur des calculs correspondants pour la*

*Lahn (volume de rétention de 14,9 millions de m<sup>3</sup>). Les réductions dues à la mise en œuvre des dispositifs de rétention et les aggravations de débit faisant suite à leur vidange peuvent être d'env. 10 cm aux différentes échelles du Rhin (p.ex. un impact de 7 cm à l'échelle de Cologne lors de la crue de février 1984 en raison des dispositifs de rétention sur la Lahn).*

On peut tirer des résultats des études la conclusion générale suivante:

Les mesures techniques de rétention permettent manifestement de réduire les crues, mais toujours à un niveau sectoriel pour l'objectif de protection respectivement prévu. Ceci a certes un impact sur l'hydrosystème de la catégorie fluviale supérieure, mais cet impact est faible du fait du petit volume de rétention par rapport à la masse des ondes de crue. Selon la genèse de la crue, la mise en œuvre des dispositifs de rétention dans le système de catégorie fluviale supérieure peut accroître le débit de pointe, le réduire ou encore n'avoir aucun effet.

Des analyses relatives à l'impact de bassins de rétention sur des affluents ont été réalisées à titre d'exemple pour un bassin de rétention donné sur un affluent direct du Rhin (la Kinzig), sur le Neckar en amont de l'embouchure de la Fils et sur deux affluents du Neckar (la Kocher et la Jagst). La baisse moyenne des débits de pointe le long du Rhin est dans tous les cas inférieure à 5 %. Il est cependant indispensable de commencer à retenir les eaux dès que les débits commencent à augmenter sur le cours d'eau respectif et de disposer de volumes très importants. La rétention se fait donc pour des épisodes qui ne sont pas problématiques pour le cours d'eau concerné, mais provoquent de forts débits de crue sur le Rhin. Cette mise en œuvre est en contradiction avec les objectifs de protection locale contre les inondations, pour laquelle de tels bassins de rétention sont construits en priorité. Lorsque les débits continuent à augmenter, l'impact des bassins sur les débits de crue du Rhin devient quasiment nulle.

On évoque fréquemment les possibilités de **stocker les eaux dans les retenues des barrages**. Il est vrai que les tronçons régulés des voies navigables fédérales uniquement s'étendent sur env. 1.200 km au total. La démarche ici revendiquée consisterait à abaisser les barrages des chutes fluviales avant le début de la crue, c'est-à-dire à vider les retenues, et à redresser les barrages en phase ascendante de la crue. On utiliserait ainsi les retenues comme bassins de rétention.

Les calculs approximatifs débouchent sur des volumes préremplis de l'ordre du double ou du triple du débit moyen (MQ) pour le Neckar, le Main et la Moselle, de 70 à 80 millions de m<sup>3</sup> respectivement. Pour la Lahn et la Sarre, on obtient des volumes d'env. 15 à 20 millions de m<sup>3</sup>. En rendant disponibles ces espaces de rétention, on ralentirait toutes les ondes au début de leur progression, l'effet de ralentissement étant plus ou moins grand en fonction des gradients d'ascendance du débit. Ce ralentissement se répercuterait jusque sur les débits dont les sections transversales d'écoulement sont déjà entièrement ouvertes à l'heure actuelle. Dans le cas de la Moselle, le volume utilisable obtenu permettrait de ralentir la progression de l'onde de 12 à 24 heures, en fonction de l'ampleur du débit au pied de l'onde et de la rapidité de la montée de l'onde. Cet effet retombe à zéro quand les débits sont supérieurs à 2.500 m<sup>3</sup>/s. Sur la Sarre, la durée d'un tel effet se limite à quelques heures.

Si l'on souhaitait concrétiser cette méthode de ralentissement des ondes de crue, il serait nécessaire de vider les retenues (en abaissant les barrages) avant que ne survienne une crue. Ces opérations de vidange devraient être achevées au moment où serait atteinte la moyenne statistique définissant les débits de base d'une crue. Pour s'assurer que l'abaissement préalable des barrages ne donnent pas naissance en aval à des niveaux d'onde non tolérables, les vidanges préalables doivent avoir lieu en période débit relativement faible, ce qui suppose un temps de vidange extrêmement long. Dans le Neckar, la Moselle ou le Main, une vidange de  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  prendrait entre 190 et 220 h et produirait en continu une montée des eaux de 20 à 30 cm au niveau des embouchures respectives. Dans une période de temps aussi prolongée, les débits ont déjà dépassé depuis longtemps la valeur de référence, c'est-à-dire que les volumes disponibles sont déjà en partie réoccupés par les eaux des affluents. Pour ces volumes à disponibilité réduite, le temps de vidange serait bien sûr plus court, mais resterait cependant de l'ordre de grandeur de plusieurs jours.

Pour procéder à de telles vidanges préalables, il conviendrait donc de disposer de prévisions sur plusieurs jours, ce qui n'est pas réalisable aujourd'hui, même pour le Rhin. Quant aux prévisions pour les affluents du Rhin, elles sont toutes inférieures à 24 h.

On constate donc qu'en modifiant le régime de retenue des barrages des voies navigables fédérales que sont le Neckar, le Main, la Lahn et la Moselle, on ne se donne pas d'instruments supplémentaires de protection contre les inondations.

Sur le Rhin supérieur et la Sarre, les retenues des barrages ne sont pas complètement occupées. Un volume potentiel de retenue manœuvrable est donc toujours disponible.

Ces volumes de rétention sont déjà utilisés sur le Rhin supérieur, dans le cadre des manœuvres exceptionnelles des usines du Rhin, où l'on utilise le volume du fleuve en dérivant une partie du débit du tronçon canalisé vers l'ancien cours du Rhin, ce qui permet une rétention des eaux de crue en période d'exploitation des barrages agricoles. Des digues de canalisation, nécessaires à la protection des riverains, ont été érigées ou consolidées spécialement à cet effet.

La situation est différente sur la Sarre. On pourrait concevoir ici des abaissements préalables de barrages et rendre ainsi env. 20 millions de  $\text{m}^3$  de volume de rétention. Ce volume est obtenu à partir du niveau actuel de retenue constante. Sans mesures de protection supplémentaires, une augmentation des objectifs de retenue dépassant le niveau fixé dans le plan d'aménagement constituerait un risque pour les riverains, ce qui est inconcevable, pour les mêmes raisons que celles invoquées pour la Moselle, le Neckar et le Main, indépendamment du fait que les barrages de la Sarre ne sont pas conçus pour des retenues plus élevées en situation de crue.

Les modifications des pointes du Rhin dues à la **rétention prolongée dans les bassins versants du Neckar, du Main et de la Moselle** ont été déterminées à l'aide d'une série de crues correspondant à l'état d'aménagement du Rhin en 1977. On a supposé que les mesures de prévention des crues en

surface prises dans ces bassins entraînaient *une rétention prolongée supplémentaire de 1 mm (conditions générales: voir plus bas) pendant toute la durée de crue des affluents. L'impact sur les pointes du Rhin varierait en moyenne entre env. 10 et 40 m<sup>3</sup>/s. On pourrait également s'attendre à un effet cumulatif sur le tronçon du Rhin en aval de ces affluents; il serait de l'ordre de 90 m<sup>3</sup>/s [ 5 cm] en moyenne aux échelles d'Andernach et Cologne.*

A première vue, il semble que l'effet de réduction des débits qu'a la rétention prolongée dans les affluents pendant une onde de crue, même si elle ne s'élève au total qu'à 1 mm de précipitations effectives, soit relativement important. Il faut toutefois tenir compte du fait qu'il doit s'agir d'une rétention prolongée. Pour atteindre cette rétention de 1 mm sur l'onde de crue dans son ensemble, un volume de rétention considérable est requis. Même en supposant qu'il serait possible d'atteindre cette rétention prolongée grâce à une gestion agricole écologique, env. 50 % de la surface agricole et env. 1/3 des surfaces cultivées consolidées devraient permettre une rétention prolongée de 6 mm. Une telle gestion représentant toutefois en principe une rétention temporaire, cette dernière doit être plusieurs fois supérieure à 6 mm; l'espace de rétention mis à disposition n'a d'effet global qu'au début de l'onde de crue. On peut supposer que pour atteindre une rétention prolongée de 6 mm sur la superficie à gestion écologique pendant toute la durée de l'onde de crue (plusieurs jours), on nécessite une capacité de rétention dix à vingt fois supérieure. Par ailleurs, on peut globalement déduire des études qu'en cas de crues relativement courtes et prononcées, la rétention prolongée dans le bassin versant des affluents du Rhin n'a aucun impact ou qu'un impact faible sur la réduction des débits des crues du Rhin.

En rallongeant leur tracé (création de méandres), les **mesures de renaturation** de cours d'eau permettent de réduire la pente et de ralentir l'écoulement. Ils ont donc tendance à retenir les crues. A partir du moment où les eaux débordent, une rétention supplémentaire (végétation) vient s'y ajouter dans la zone de submersion, ce qui a pour effet d'atténuer la situation dans le tronçon fluvial en aval. Par contre, cette rétention entraîne un retard à l'embouchure du cours d'eau dans l'hydrosystème de la catégorie supérieure. L'aspect essentiel des mesures de renaturation de cours d'eau est l'aspect écologique global. On ne dispose que de peu d'études pour estimer l'impact des mesures de renaturation des cours d'eau ou l'effet de rétention dans le lit majeur. Pour que la rétention dans le lit majeur atténue les crues, il est essentiel que l'eau soit emmagasinée temporairement dans le lit majeur.

L'effet d'atténuation des submersions du lit majeur le long de la Nahe a été quantifié. La submersion du lit majeur lors de fortes crues comme celles de décembre 1993 et janvier 1995 n'aurait eu qu'un impact négligeable sur les débits de pointe, en raison des débits élevés et de l'absence de rétention stagnante dans le lit majeur. Les études ont été réalisées entre autres à l'aide d'un calcul bidimensionnel du courant. En principe, l'affaiblissement des débits de pointe n'est efficace que tant que le débordement des eaux permet d'étendre sensiblement le lit majeur humidifié.

Par rapport à la situation en amont, la **rétention dans le bassin versant néerlandais** est plutôt faible. Lors de la crue de 1995, l'apport des petits cours d'eau dans le Waal et le Neder-Rijn par exemple ne

s'élevait qu'à 45 et 20 m<sup>3</sup>/s. Dans les deux cas, ceci représente moins de 1 % du débit de pointe de ces bras du Rhin. L'impact de mesures prises dans les bassins versants régionaux sur les niveaux d'eau de ces fleuves est donc lui aussi très faible. Dans le cas de l'IJssel pourtant, l'apport latéral a une influence significative sur les débits: lors de la crue de 1995, la pointe de crue a ainsi été rehaussée de 10 % (160 m<sup>3</sup>/s).

Une étude montre que l'on peut atteindre une baisse d'env. 25 % d'un débit de crue centennale en prenant dans des sous-bassins de l'IJssel des mesures ayant trait à l'exploitation des surfaces et des cours d'eau. On pourrait envisager de prendre des mesures telles que la transformation de surfaces agricoles en zones humides, la redynamisation de zones inondables le long de ruisseaux et la suppression de surfaces imperméabilisées dans les zones à drainage artificiel. L'effet de ce type de mesures de rétention des eaux sur les crues rares est difficile à quantifier, mais il est en tous cas de moindre ampleur.

Il est encore plus difficile de présenter l'impact de mesures de rétention dans les sous-bassins sur les niveaux de hautes eaux de l'IJssel. La concomitance éventuelle de pointes d'ondes du fleuve principal et des affluents est d'une importance capitale. Dans la plupart des cas, les pointes des affluents précèdent le débit de pointe de l'IJssel. Si les mesures prises dans les sous-bassins entraînent un retard des débits de pointe, il est encore plus probable que ceux-ci coïncident avec les niveaux d'eau les plus élevés de l'IJssel. Les mesures de rétention des eaux dans les sous-bassins peuvent même avoir un certain impact négatif sur la situation engendrée par les crues de l'IJssel.

Les affluents latéraux de l'IJssel ont un impact positif incontestable, éventuellement en combinaison avec des mesures de rétention manœuvrables, p.ex. l'arrêt des stations de pompage ou l'interruption du drainage des cours d'eaux latéraux. Pour mettre en œuvre de telles mesures, il est indispensable de disposer derrière les digues d'un espace suffisant pour retenir temporairement les eaux. *Un calcul montre que si les circonstances sont favorables, ce type de mesures doit permettre d'abaisser d'env. 10 cm les niveaux d'eau de l'IJssel, ce qui correspond à une réduction du débit d'environ 100 m<sup>3</sup>/s.*

## **2. Rétention des eaux dans le Rhin et aux abords du Rhin**

De l'ancien champ d'inondation du Rhin, il ne subsiste aujourd'hui plus que quelques vestiges. La conséquence en est une aggravation des crues. En étendant les mesures de rétention fluviale et en mettant en place des dispositifs de rétention en bordure du fleuve, on peut contribuer à améliorer la situation face aux crues. Pour chaque tronçon particulier, les conditions du milieu naturel ne permettent la mise en œuvre que de certaines mesures. Il convient de soumettre à examen le cours du Rhin dans son ensemble pour faire ressortir les possibilités de rétention.

## 2.1 Lac de Constance et haut Rhin

Le lac de Constance offre un volume de rétention potentiel de 5 millions de m<sup>3</sup> par centimètre de variation du niveau d'eau. Sous réserve de prévisions appropriées, il serait possible, en règle générale, de mettre à profit pendant le semestre d'hiver une variation du niveau des eaux du lac de l'ordre de 100 cm. L'impact de la rétention dépend du débit entrant des périodes de crue, dont la durée moyenne est d'environ 10 jours, et du débit minimal à la sortie du lac de Constance. On peut illustrer cette hypothèse à l'exemple de la crue de Noël 1993:

Le débit moyen à la sortie du lac était de 325 m<sup>3</sup>/s pendant les 10 jours cruciaux pour Cologne. En abaissant le débit à 260 m<sup>3</sup>/s, ce qui correspondrait au débit moyen du mois de décembre, on aurait obtenu une hausse du niveau des eaux du lac de Constance de 10 cm et une réduction du débit de pointe de 60 m<sup>3</sup>/s à Cologne, c'est-à-dire une baisse de l'échelle de 4 cm. Réduire de 200 m<sup>3</sup>/s le débit en sortie du lac pour ne laisser s'écouler que 120 m<sup>3</sup>/s aurait pour conséquence une hausse du niveau du lac de 35 cm et une baisse d'env. 12 cm à l'échelle de Cologne. En raison du temps d'écoulement prolongé, une telle réduction de débit du lac de Constance devrait démarrer au moins 5 jours avant que la pointe de crue n'atteigne Cologne.

## 2.2 Rhin supérieur

Des 1.400 km<sup>2</sup> de zones inondables qui existaient à l'origine sur le Rhin supérieur, il ne reste aujourd'hui plus qu'env. 450 km<sup>2</sup>. La dernière opération d'endiguement en date a porté sur une surface de 130 km<sup>2</sup> entre 1955 et 1977 dans le cadre de l'aménagement de barrages sur la partie méridionale du Rhin supérieur. L'aggravation des crues consécutive à cet endiguement doit être compensée par des mesures de rétention dans le lit du fleuve et dans des polders en bordure du fleuve. Le volume de rétention requis a été initialement estimé en 1978 à env. 220 millions de m<sup>3</sup> (Convention franco-allemande du 6.12.1982).

Après modification du plan de rétention, rendue nécessaire par la prise en compte de conditions écologiques générales comme celles de limiter la profondeur des eaux et d'éviter un temps prolongé de rétention des eaux dans les polders, le volume de rétention requis a été rehaussé pour atteindre 290 millions de m<sup>3</sup> aujourd'hui. Parallèlement aux activités visant à compenser l'aggravation des crues imputable à l'aménagement de barrages sur le Rhin, des études ont été réalisées pour déterminer les possibilités de reconquête de zones alluviales endiguées plus en aval, l'objectif étant d'améliorer globalement en aval la situation des riverains face aux inondations. En effet, les mesures prises au sud de l'embouchure du Neckar, évoquées plus haut, ont un effet positif aléatoire.

Depuis 1988, quelques mesures fixées pour Rhin supérieur méridional sont opérationnelles. Leur gestion fait l'objet d'instructions précises dans le cadre d'accords internationaux et leur fonction est d'em-

pêcher une submersion des digues en aval du tronçon régulé. Une opération de rétention d'un volume de 25 millions de m<sup>3</sup> a eu lieu pour la première fois lors d'une crue survenue en mars 1988. Des études comparées sur modèle ont montré que l'impact, qui visait principalement l'échelle de Maxau, se répercutait également positivement sur toutes les valeurs de pointe plus en aval. Cependant, l'effet de réduction des pointes s'affaiblit, passant de 265 m<sup>3</sup>/s à Maxau (correspond à 23 cm) à 100 m<sup>3</sup>/s à Andernach (correspond à 10 cm). A Cologne, la réduction de la pointe de crue était de 3 à 5 cm et a donc pu tout juste empêcher que le mur mobile de protection érigé devant le centre historique de Cologne ne soit submergé.

Une fois qu'auront été achevées toutes les mesures de rétention prévues sur le Rhin supérieur, il devrait être possible de limiter à 5000 m<sup>3</sup>/s les pointes de crues bicentennales à Maxau (baisse de 700 m<sup>3</sup>/s) et à 6000 m<sup>3</sup>/s à Worms (baisse de 800 m<sup>3</sup>/s). L'exemple de 1988 a mis en évidence que la diminution locale des débits d'une crue était très variable pendant la propagation de l'onde sur l'axe longitudinal du fleuve. Deux éléments jouent dans ce contexte un rôle primordial: l'écrêtement de l'onde, c'est-à-dire l'atténuation vers l'aval de l'effet de réduction de débit, et le décalage de la pointe de crue dû à l'impact d'événements régionaux, notamment l'effet de superposition d'ondes avec les affluents.

Les ouvrages techniques (manœuvrables) de rétention ont toujours un objectif de protection très précis. Leur impact est sectoriel et vise des localités déterminées. Les ouvrages techniques de rétention du Rhin supérieur ont également un impact sur le Rhin inférieur. *En cas de crues bicentennales sur le Rhin supérieur, les réductions de débit à l'échelle de Kaub sont de 1.210 m<sup>3</sup>/s maximum (correspond env. à 100 cm), 660 m<sup>3</sup>/s minimum et 890 m<sup>3</sup>/s en moyenne. Ces valeurs sont plus faibles pour le Rhin inférieur (échelle de Cologne). Les réductions de débit sont de 1.000 m<sup>3</sup>/s maximum, 520 m<sup>3</sup>/s minimum et 800 m<sup>3</sup>/s en moyenne. Elles correspondent à des baisses maximales de niveau d'eau d'env. 60 cm à Cologne et d'env. 40 cm à Lobith (et à des baisses moyennes de 45 cm et de 30 cm respectivement).*

En comparaison, les valeurs estimées pour l'échelle de Worms, jugée représentative du régime hydrologique du Rhin supérieur, indiquent une réduction de débit de 1.230 m<sup>3</sup>/s maximum, 670 m<sup>3</sup>/s minimum et 890 m<sup>3</sup>/s en moyenne. Tous ces chiffres sont le résultat de calculs sur modèles.

Pour les crues de grande ampleur sur le Rhin, on note également qu'une réduction de 80 % du débit de pointe obtenue sur le Rhin supérieur se fait aussi ressentir sur le Rhin inférieur, dans la mesure où les pointes sont systématiquement déterminées par le Rhin supérieur.

Les pointes de crues qui ne prennent pas principalement leur essor dans le Rhin supérieur sont souvent déterminées par les affluents en aval. Les pointes peuvent donc survenir avant ou après la crête de crue du Rhin supérieur, c'est-à-dire avant ou après la partie de l'hydrogramme accusant une baisse sous l'effet des mesures de lutte engagées. Les réductions des pointes de débit sur le Rhin moyen et le Rhin inférieur peuvent alors être beaucoup plus faibles que les valeurs indiquées plus haut. *L'impact respectif de ces valeurs et l'ordre de grandeur de cet impact sur les pointes de crues données dépen-*

*dent de la genèse de ces crues, c'est-à-dire de la conjonction des différents sous-bassins du Rhin.*

Des études sur des mesures théoriques de rétention dans le tronçon du Rhin compris entre l'embouchure du Neckar et celle du Main ont montré qu'il serait possible de reconquérir de larges surfaces de l'ancien champ d'inondation aux fins de rétention. Pour avoir une idée de l'impact qu'auraient ces surfaces en aval, des calculs d'écoulement des crues ont été effectués en supposant l'existence d'un grand polder manœuvrable juste en amont de l'embouchure du Main. Le volume global de ce polder a été fixé à 80 millions de m<sup>3</sup> et différents critères de rétention ont été examinés.

La gestion de ce polder devait viser si possible à influencer uniformément toutes les zones de pointes de crue du Rhin et, par conséquent, agir sur une longue phase de propagation de l'onde. On a donc décidé de fixer à environ 400 m<sup>3</sup>/s maximum la somme des volumes d'apport de débit du polder. Le remplissage a été réalisé en fonction du débit du Rhin sur place. En situation optimale, il démarre avec un  $Q_{\text{Rhin}} = 5000$  à 5300 m<sup>3</sup>/s, ce qui correspond à un HQ entre HQ<sub>30</sub> et HQ<sub>50</sub> à l'échelle de référence de Worms. On obtient dans ce cas de figure une réduction sur le Rhin de tous les niveaux de pointe de 13 crues-modèles (avec des débits de pointe de récurrence bicentennale à Worms) vers l'aval avec des volumes de réduction sur le Rhin inférieur correspondant encore à env. 95 % des baisses initiales. La durée de l'impact est de l'ordre de 3 à 4 jours, ce qui laisse supposer que ces mesures agissent également sur les crues principalement imputables à la Moselle, à condition toutefois que l'on soit en présence de débits relativement importants également en amont de l'embouchure du Main. *Dans l'hypothèse d'un tel volume de rétention de 80 millions de m<sup>3</sup> juste en amont de l'embouchure du Main, on obtiendrait pour un débit de pointe bicentennal à Worms dans le meilleur des cas un abaissement supplémentaire de 20 à 25 cm du niveau d'eau sur le Rhin moyen et dans la zone de Cologne (20 cm jusqu'à Cologne et 15 cm jusqu'à Lobith en moyenne).*

Mettre en œuvre des ouvrages de rétention temporaire revient toujours à répartir le débit pendant la crue. Pour obtenir une baisse de la pointe de l'onde de crue sur le lieu même où sont prises les mesures, les volumes retenus doivent donc être relâchés (si possible rapidement). Dans certains cas, on procède même au préalable à une vidange de l'espace de rétention pour renforcer l'efficacité de la mesure de rétention. Toutes les vidanges occasionnent une hausse des niveaux d'eau vers l'aval. Cette hausse risque alors d'avoir un impact défavorable sur des niveaux d'eau critiques plus en aval.

Des **systèmes de digues d'été** existent sur le Rhin supérieur. Entre l'embouchure du Neckar et Bingen, ils englobent un espace de rétention estimé à 70 millions de m<sup>3</sup>. Par rapport aux digues principales, les polders compris entre les digues d'été (qui sont en moyenne env. 1 m moins élevées) peuvent réduire sensiblement les crues de moyenne ampleur. Ainsi, la crue de mai/juin 1983, avec une pointe d'une récurrence de 15 ans env. à l'échelle de Kaub et de 20 ans env. à l'échelle d'Andernach, aurait augmenté de 150 m<sup>3</sup>/s si les digues d'été entre Worms et Bingen n'avaient pas été en place.

En se basant sur 120 crues-modèles, on a quantifié les modifications de débit de pointe qui résulteraient à l'échelle de Kaub de l'abandon de toutes les digues d'été au profit de surfaces naturelles submersibles. Il ressort clairement des calculs que *l'effet de baisse du débit dû aux polders d'été situés entre Worms et Bingen se répercute à grande échelle sur les pointes de crue. Il commence en*

*moyenne à se manifester dès les pointes de crues de récurrence de 10 ans à l'échelle de Kaub et atteint son ampleur maximale avec des débits de pointe de crues d'une périodicité de 20 à 25 ans avec 100 m<sup>3</sup>/s en moyenne (correspond env. à 10 cm).*

La marge de variation importante vient de l'apport variable des eaux du Main. En aval de l'embouchure de la Moselle, l'impact des polders d'été est influencé par la concomitance des pointes de crue du Rhin et de la Moselle. Les polders d'été occasionnent encore une nette réduction des pointes de crue du Rhin en aval de l'embouchure de la Moselle.

Dans la partie française du Rhin supérieur, des possibilités de rétention des crues, non mentionnées jusqu'à présent, sont envisageables et représentent un volume global d'env. 16 millions de m<sup>3</sup>. En manoeuvrant ces espaces de rétention de manière appropriée, on pourrait retenir env. 90 m<sup>3</sup>/s pendant 2 jours, ce qui reviendrait à abaisser la pointe de crue de 10 cm maximum sur le Rhin supérieur.

### **2.3 Rhin moyen**

Le Rhin moyen traverse l'étroite vallée encaissée du massif schisteux rhénan. Il n'existe pas sur ce parcours de vastes zones inondables et les digues sont rares.

Il ressort des études sur le plan global de protection locale contre les inondations de la Moselle et du Rhin moyen que les impacts sur les débits de pointe des crues sont extrêmement faibles et pratiquement nuls.

On constate dans l'ensemble une légère aggravation du débit lorsque les crues sont moins élevées ou égales aux ouvrages de protection choisis. Lorsque les crues dépassent le niveau de ces ouvrages, on obtient une atténuation du débit. Ceci vient de la réduction des espaces de rétention jusqu'au niveau de crue théorique fixé comme objectif de protection. Lorsque le niveau de crue théorique est dépassé, les surfaces inondables situées derrière les ouvrages de protection sont à nouveau submergées et ont un effet de stockage des eaux jusqu'au niveau de crue théorique. Si les hautes eaux continuent à monter, les différences de débit tendent à nouveau à s'atténuer. *L'impact sur les pointes de crue est extrêmement faible.*

### **2.4 Rhin inférieur**

En Rhénanie-du-Nord-Westphalie, 3 polders sont estimés réalisables dans la région de Cologne et 8 dans la région de Düsseldorf (env. 174 millions de m<sup>3</sup> de volume de rétention). *En supposant que ces polders soient manoeuvrés de manière appropriée, on obtiendra pour les crues extrêmes une baisse supplémentaire de pointe de crue d'env. 30 cm à l'échelle de Lobith.* Si les mesures ne portaient que sur 4 polders de rétention statique dits "polders de poche", la baisse se limiterait alors à 10 cm environ.

## 2.5 Rhin deltaïque

A l'heure actuelle, il n'existe pas aux Pays-Bas de possibilité de stockage temporaire des eaux du Rhin au passage d'une onde de crue. Les villes et les villages, l'urbanisation intensive dans les zones endiguées aux abords du fleuve constituent des facteurs limitants importants. Une étude met cependant à jour qu'il est possible de créer des espaces de rétention d'env. 3000 ha. *Des calculs sur modèle montrent qu'une baisse de pointe de crue d'env. 10 à 20 cm serait possible.* Le volume total d'eau pouvant être stocké temporairement représente 100 à 150 millions de m<sup>3</sup>, ce qui correspond à une réduction du débit de pointe de 500 à 750 m<sup>3</sup>/s en se basant sur l'actuel débit théorique de 15.000 m<sup>3</sup>/s fixé à Lobith pour une crue d'une récurrence de 1.250 ans.

Sous l'angle de la protection contre les inondations, l'utilisation d'espaces de rétention représenterait une mesure très efficace, qu'il conviendrait cependant d'ajuster soigneusement aux autres usages en présence. Leur situation de riverains d'aval sur le Rhin et les possibilités restreintes de rétention dont ils disposent dans le bassin versant et le long du fleuve font que les Néerlandais souhaitent en premier lieu une augmentation de la capacité d'écoulement. Celle-ci est essentiellement déterminée par l'importance de la section transversale d'écoulement et par la résistance du lit à l'écoulement des eaux. Plusieurs mesures sont envisageables pour **augmenter la capacité d'écoulement**. En avril 1997, le Rijkswaterstaat a lancé une étude sur l'aménagement du Rhin qui s'inscrit dans le prolongement du projet intitulé "Integrale Verkenning inrichting Rijntakken". Cette étude, qui porte le titre de "Ruimte voor de Rijntakken", doit, d'ici la fin de l'an 2000, estimer l'impact des combinaisons de mesures possibles et vérifier l'applicabilité de différents groupes de mesures susceptibles d'assurer le niveau actuel de protection contre les inondations jusqu'en l'an 2010, en partant de l'hypothèse de débits croissants et en écartant si possible une surélévation des digues. L'étude part d'un débit théorique de 16.000 m<sup>3</sup>/s à Lobith alors que le débit théorique actuel est de 15.000 m<sup>3</sup>/s. *Cette augmentation du débit, estimée sur la base des deux dernières crues de 1993 et de 1995, provoquerait, dans les conditions actuelles du lit du fleuve, des niveaux d'eau de 10 à 30 cm plus élevés dans les bras du Rhin.* On examine également un scénario partant d'une progression des débits du Rhin au-delà de cette estimation.

Les paragraphes suivants présentent, sans ordre de priorité particulier, différentes mesures susceptibles d'élargir le profil transversal du fleuve et exposent les effets potentiels d'abaissement du niveau des eaux pouvant être atteints en cas de **mise en œuvre intégrale** de ces mesures dans les bras du Rhin. Ces effets sont beaucoup plus faibles en cas de mise en œuvre locale de ces mesures.<sup>5</sup>

Les mesures applicables dans la partie la plus en aval du Rhin deltaïque ont un impact relativement faible sur les niveaux d'eau, ces derniers étant en grande partie sous influence marine en aval de Krimpen aan de Lek (Lek), Dordrecht (Waal/Merwede) et Kampen (IJssel).

---

<sup>5</sup> La baisse du niveau des eaux a un impact sur place et vers l'amont. Les effets de plusieurs mesures peuvent également se superposer. L'effet cumulatif de toutes les mesures ci-dessous peut entraîner une baisse du niveau des eaux de 40 à 80 cm à Lobith. Ceci implique toutefois que l'occupation actuelle des sols reste telle quelle; des mesures de renaturation réduiraient cet effet.

En raison de l'affaissement du fond du lit d'étiage, les épis construits entre 1860 et 1920 sont plus élevés qu'il n'est morphologiquement nécessaire. Sans réduire leur efficacité, il est possible d'**abaisser la crête des épis**. Cette mesure suppose des investissements élevés. Elle a surtout pour effet de réduire la résistance des épis à l'écoulement. *Un abaissement des épis de 0,5 à 1 m entraînerait une diminution moyenne des niveaux de crue de 5 à 10 cm.*

En cas de crue, les voies d'accès aux ponts (de chemin de fer) et aux bacs et zones bâties font obstacle à l'écoulement dans le lit majeur et ont un effet de barrage. Des passages et/ou piliers aideraient à réduire cet effet d'obstruction.

Une évaluation montre que de telles infrastructures existent notamment sur le Neder-Rijn entre Arnhem et Rhenen. Il n'existe pas d'**étranglements hydrauliques** particuliers le long de l'IJssel; le gain visé en termes de baisse de niveau des eaux est inférieur à 5 cm. L'effet obstructeur de ponts et de passerelles d'accès aux bacs est sans grande importance sur le Waal. On trouve sur tous les bras du Rhin, dans une plus ou moins large mesure, des étranglements hydrauliques comme p.ex. les ponts de chemin de fer. Ici, les aménagements n'ont aucun impact sur l'effet dominant des étranglements dus aux digues. *Les étranglements hydrauliques importants sont rares, voire inexistant, le long des bras du Rhin, à l'exception du Neder-Rijn entre Arnhem et Rhenen. En supprimant tous ces étranglements, on obtiendrait un abaissement des niveaux d'eau de 10 à 20 cm.*

Il existe à plusieurs endroits de l'ancien lit majeur des **zones surélevées à l'abri des hautes eaux**.

Elles occupent env. 3 % de la superficie globale de l'ancien lit majeur. Ces surfaces sont réparties de façon relativement homogène sur les différents bras du Rhin et sont en grande partie bâties, en particulier par des briqueteries, dont la plupart ne sont aujourd'hui plus exploitées.

L'effet d'obstruction des zones à l'abri des hautes eaux et, par là même, la réduction des niveaux d'eau qu'on obtiendrait en levant ces obstacles dépend en grande partie de l'emplacement d'une zone donnée dans l'ancien lit majeur et des conditions d'écoulement du fleuve à cet endroit. Ainsi, on obtiendra un meilleur résultat en creusant (décaissant) les zones jusqu'à présent à l'abri des hautes eaux à hauteur d'Arnhem, où le lit du fleuve est étroit et le courant relativement rapide, qu'en procédant de même à un endroit de faible courant dans un tronçon fluvial plus large. *Partant du débit théorique actuel, le creusement (décaissement) de zones actuellement à l'abri des hautes eaux le long des bras du Rhin permettrait un abaissement limité du niveau des eaux de 5 à 10 cm. On peut obtenir localement un impact plus important.*

Au cours des siècles, un système complexe de digues a été mis en place dans l'ancien lit majeur. Les **digues d'été érigées le long du lit d'étiage** ont pour fonction première de protéger contre les débits élevés les surfaces agricoles exploitées dans l'ancien lit majeur. Par ailleurs, les digues d'été servent de déflecteurs et contribuent à éviter la formation de grandes variations de débit entre lit d'étiage et ancien lit majeur. C'est un élément important vis-à-vis de l'évolution du fond du lit d'étiage. Les digues autour des mares et les digues longitudinales et transversales ont une fonction comparable. Il existe en outre des digues qui donnent accès à des parcelles agricoles, des habitations et des briqueteries. Le système actuel de digues détermine de manière fondamentale la résistance à l'écoulement qu'offre

en cas de crue une zone d'exploitation agricole située dans l'ancien lit majeur. *En particulier dans la zone deltaïque du Rhin en territoire néerlandais, la suppression de digues d'été se traduirait par une baisse du niveau des eaux de 5 à 10 cm au total. Les différences sont relativement importantes le long du fleuve. On obtiendrait encore un meilleur résultat en retirant toutes les digues de l'ancien lit majeur. De telles opérations de suppression de digues ont déjà eu lieu au début du 19ème siècle, entre autres aux abords de l'IJssel, pour que le fleuve ainsi aménagé puisse évacuer les eaux de crues et des glaces. A l'exemple d'un tronçon du Midden-Waal, on constate qu'il est ainsi possible d'abaisser le niveau des eaux de 15 cm.*

Les **ramifications latérales** ont disparu du paysage fluvial actuel. L'objectif d'un "cours principal stable" n'était pas conciliable avec un système de ramifications latérales, dont le tracé varie régulièrement (et naturellement) sous l'effet de l'ensablement, de l'alluvionnement et de l'érosion. Sous forme restreinte et dans le cadre d'un projet soigneusement conçu, certaines possibilités sont néanmoins envisageables. L'attention doit notamment porter sur la conception de l'entrée des eaux, la stabilité des courbes extérieures et l'écart par rapport à la digue. Des travaux préparatoires sont en cours dans quelques zones des bras du Rhin pour la mise en place de ramifications latérales.

Les ramifications latérales élargissent la section transversale d'écoulement du lit du fleuve. La largeur d'une ramification a été fixée à un quart de la largeur du lit d'étiage du fleuve. Il a en outre été posé comme condition d'aménager les ramifications latérales sur un des côtés du fleuve. *L'aménagement de ramifications latérales sur toute la longueur des bras du Rhin entraînerait un abaissement des niveaux de hautes eaux de 5 à 10 cm. Des différences relativement importantes apparaissent le long du fleuve.*

Après que l'ancien lit majeur ait été endigué, son niveau a été continuellement rehaussé au cours des siècles par l'apport d'alluvions. Ce phénomène se poursuit encore aujourd'hui, bien qu'à un rythme ralenti. Son résultat est aisément reconnaissable à la différence de niveau entre les zones devant et les zones derrière les digues. Lors de crues extrêmes, les eaux dépassent largement le niveau des surfaces situées derrière les digues. Il n'est pas rare d'avoir le long du Waal des différences de niveau de 6 m. Dans l'ancien lit majeur endigué, l'alluvionnement a entraîné un rétrécissement de la section transversale d'écoulement dans cette partie du lit du fleuve. Il est possible de restaurer ce dernier en retirant la couche argileuse qui s'est constituée au fil de ces apports boueux, pour obtenir un abaissement moyen du fond d'environ 30 cm. Peut-être sera-t-il même nécessaire de faire un pas de plus et d'enlever une couche superficielle du sable situé sous l'argile pour atteindre finalement une réduction des niveaux d'eau plus importante encore. *En décaissant de 50 cm l'ancien lit majeur sur toute sa superficie, les niveaux de crue théoriques peuvent être rabaissés de 20 cm env. par rapport aux niveaux actuels. En creusant deux fois plus profond, on obtiendrait un impact deux fois plus important.*

Pour se faire une idée précise de l'impact du **décaissement de l'ancien lit majeur** sur la réduction du niveau d'eau, on part de la répartition actuelle du débit aux points de bifurcation des bras du Rhin, comme on l'a fait dans le cadre des calculs pour les autres mesures. La méthode consisterait à installer des déflecteurs à proximité des points de bifurcation, par exemple sous forme de digues longitudinales ou transversales. Si cette éventualité s'avérait irréalisable ou si l'impact souhaité ne pouvait être

atteint, une solution pourrait alors consister en un décaissement différencié de l'ancien lit majeur pour chaque bras du Rhin.

Les endiguements ont fortement restreint le champ d'inondation initial du fleuve, le faisant passer à certains endroits de plusieurs dizaines de kilomètres à quelques centaines de mètres. Le fleuve a par contre été doté d'un chenal principal étroit et profond. Ce système est satisfaisant à l'égard de nombreux usages. Des débordements de digues n'ont plus lieu depuis longtemps. Les digues ont été rehaussées de temps en temps, chaque fois qu'il est apparu que le fleuve nécessitait plus d'espace. L'exemple en est la nouvelle campagne de consolidation des digues engagée aujourd'hui. Si les débits continuent à augmenter, il est possible qu'après examen de toutes les autres possibilités envisageables, il s'avère inévitable de chercher une alternative au rehaussement des digues, c'est-à-dire une mesure qui, plus que toute autre, (re)donne au fleuve l'espace requis en prônant un **agrandissement de l'ancien lit majeur** par une mise en retrait des digues vers l'intérieur des terres. En terme de gestion des eaux, l'agrandissement de l'ancien lit majeur est une mesure séduisante là où l'ancien lit majeur est relativement étroit et enserré entre les digues d'hiver. Il s'agit en fait souvent de zones où les villes et villages sont à proximité immédiate du fleuve et une mise en retrait des ouvrages de protection contre les inondations n'est pas ici une option concevable. Si l'on fixe un pourcentage d'urbanisation limité comme critère d'application, ces mesures ne sont pas a priori exclues, notamment si elles sont mise en œuvre progressivement. Une estimation montre que, sur l'ensemble du bassin, env. 90 km de digues fluviales répondraient au critère exigé. La digue pourrait être repoussée en moyenne d'environ 400 m vers l'intérieur des terres. *Conformément aux attentes, une mise en retrait de digues d'hiver, qui permettrait d'élargir sensiblement l'espace d'expansion du fleuve, représente une mesure efficace. Cette mesure pourrait être appliquée dans les tronçons fluviaux disposant de zones faiblement urbanisées derrière les digues. Elle s'appliquerait à des tronçons généralement courts et disséminés sur l'ensemble du bassin. Malgré ces restrictions, les calculs d'estimation font état d'un impact relativement important s'exprimant par une baisse de niveau d'eau de 20 à 40 cm.*

## 2.6 Rétention manœuvrable ou non manœuvrable: évaluation

Pour tester l'efficacité des mesures de **redynamisation d'anciennes zones inondables**, il a été procédé à de nombreux calculs sur modèle. En règle générale, on peut dire que pour obtenir le même effet, le volume d'eau à stocker (la surface requise) est beaucoup plus important dans le cas d'une **rétention non manœuvrable** que dans celui d'une **rétention manœuvrable**. L'impact dépend en outre essentiellement des particularités de chaque espace de rétention, comme p.ex. de la dynamique des ondes et les conditions locales.

Pour les espaces de rétention du Rhin supérieur jusqu'à Worms, on a déterminé un facteur allant de 1 à 8, avec une moyenne située entre 3 et 4. Dans certains cas particuliers, les facteurs obtenus dépassaient largement le chiffre 20. Des calculs effectués à partir de polders du Rhin inférieurs ont donné des résultats identiques.

Différentes études ont eu lieu, p.ex. dans la zone de Hördt (PK 327 du Rhin), pour déterminer l'impact de la **mise en retrait de digues** aux fins de rétention non manœuvrable. Il a été fait appel ici à un modèle mathématique d'écoulement bidimensionnel.

Le calcul s'est fondé sur l'hypothèse d'un espace de rétention pouvant stocker une bonne vingtaine de millions de m<sup>3</sup>. L'impact de la mise en retrait des digues sur l'évolution du niveau des eaux s'exprime par une baisse de niveau des eaux du Rhin de l'ordre de 10 à 30 cm par rapport à l'état réel. Cette valeur ne se réfère qu'à la zone locale de mise en retrait des digues. L'impact en aval est sensiblement plus faible. *En se basant sur une crue théorique d'une récurrence de 200 ans à Worms, on obtient par calcul une réduction moyenne d'env. 30 m<sup>3</sup>/s (correspond env. à 2 cm) de la pointe de crue. Partant d'env. 70 crues au total, on obtient à l'échelle de Kaub (Rhin moyen) une réduction moyenne de la pointe de crue d'env. 15 m<sup>3</sup>/s (correspond env. à 2 cm). La moyenne calculée pour les crues de plus de 5.000 m<sup>3</sup>/s est de l'ordre de 20 m<sup>3</sup>/s (env. 2 cm) à cet endroit. On constate une très forte variation de l'effet d'abaissement potentiel selon le type de crue considéré.*

### 3. Estimation de l'impact des mesures de rétention dans le bassin du Rhin à l'exemple des crues de mai 1983, mars 1998 et janvier 1995

Pour une meilleure classification des valeurs chiffrées obtenues ci-après, on a rassemblé dans le tableau 1 les débits de pointe historiques des crues citées ainsi que leur récurrence.

**Tableau 1: Débits de pointe et récurrence de ces débits pour les crues de mai 1983, mars 1988 et janvier 1995 à hauteur d'échelles sélectionnées**

crue	Échelle							
	Maxau		Worms		Kaub		Cologne	
	HQ en m <sup>3</sup> /s	récurrence en années	HQ en m <sup>3</sup> /s	récurrence en années	HQ en m <sup>3</sup> /s	Récurrence en années	HQ en m <sup>3</sup> /s	récurrence en années
mai 83	4.260	20	5.250	50 - 25	6.110	20 - 15	9.910	22 - 15
mars 88	4.090	15	5.270	50 - 25	7.200	95 - 65	9.580	18 - 12
janv. 95	4.080	15	4.290	7 - 5	6.670	38 - 29	10.900	70 - 45

Les récurrences sont calculées à partir d'un pool de données sur les pointes de crue historiques; lorsque deux récurrences sont indiquées, la deuxième se fonde sur des débits de pointe convertis sur la base des critères actuellement en vigueur.

On trouvera ci-après une estimation de l'impact des mesures examinées dans la partie principale du rapport:

- régulation du lac de Constance **(1)**
- mise à disposition de toutes les mesures de rétention actuellement prévues pour satisfaire aux engagements contractuels passés sur le Rhin supérieur méridional (manoeuvre F39) **(2)**
- mise à disposition de 80 millions de m<sup>3</sup> de volume de rétention supplémentaire entre l'embouchure du Neckar et celle du Main **(3)**
- mise à disposition des polders prévus en Rhénanie-du-Nord-Westphalie **(4)**
- prise en compte d'un ensemble de mesures dans les bras néerlandais du Rhin **(5)**
- prise en compte des mesures dans le delta du Rhin **(6)**
- prise en compte des possibilités de rétention dans les affluents du Rhin **(7)**
- prise en compte des rétentions en surface dans le bassin du Rhin **(8)**

### **(1) Impact d'une rétention dans le lac de Constance**

Pour maintenir dans l'ordre de grandeur des variations naturelles l'impact d'une mise en œuvre concrète de la régulation du lac de Constance en tant que mesure de protection du Rhin supérieur et du Rhin moyen contre les inondations, les conditions suivantes sont posées:

- la rétention ne doit pas avoir pour effet de rendre le débit du lac à hauteur de Constance inférieur au débit moyen pluriannuel valable pour le mois de crue (MQ)
- le niveau maximal des eaux du lac ne doit pas dépasser, sous l'effet de la rétention, le maximum mensuel pluriannuel (MHW)

On ne cherchera pas ici à analyser comment une telle mesure devrait être mise en œuvre, eu égard aux échéances de prévisions de 5 à 10 jours requises, ni comment procéder ensuite pour retourner au niveau non régulé. Vu l'opposition politique que continue à susciter cette mesure dans les Etats riverains, on s'abstiendra également de tout commentaire sur son applicabilité et on se limitera à montrer son impact éventuel dans des conditions de fonctionnement optimales:

#### **A) Crue de mai 1983**

Débit fixé pour Constance:  $MQ_{\text{mai}} = 345 \text{ m}^3/\text{s}$   $MHW_{\text{juillet (1974/83)}} = 456 \text{ cm}$  à l'échelle

Au niveau maximum de la période de crue de 10 jours, on a un dépassement de MQ de **245 m<sup>3</sup>/s**.

En appliquant cette valeur à une rétention de 10 jours, on obtient une hausse du niveau du lac de **42 cm**, ce qui correspond à 452 cm maximum à l'échelle. ( $< MHW_{\text{juillet}}$ )

#### **B) Crue de mars 1988**

Débit fixé pour Constance:  $MQ_{\text{mars}} = 220 \text{ m}^3/\text{s}$   $MHW_{\text{juillet (1979/88)}} = 460 \text{ cm}$  à l'échelle

Au niveau maximum de la période de crue de 10 jours, on a un dépassement de MQ de **125 m<sup>3</sup>/s**. Une rétention de ce débit sur 10 jours entraîne une hausse du niveau du lac de **22 cm**, ce qui correspond à un max. de 377 cm à l'échelle. (< MHW<sub>juillet</sub>)

#### C) Crue de janvier 1995

Débit fixé pour Constance: MQ<sub>janvier</sub> = 210 m<sup>3</sup>/s      MHW<sub>juillet (1986/95)</sub> = 445 cm à échelle

Au niveau maximum de la période de crue de 10 jours, on a un dépassement de MQ de **70 m<sup>3</sup>/s**. Une rétention de ce débit sur 10 jours entraîne une hausse du niveau du lac de **12 cm**, ce qui correspond à un max. de 334 cm à l'échelle. (< MHW<sub>juillet</sub>)

D'après ce calcul, on aurait pu procéder à une rétention moyenne sur 10 jours des volumes suivants:

1983	env. 300 m <sup>3</sup> /s
1988	env. 200 m <sup>3</sup> /s
1995	env. 50 m <sup>3</sup> /s

En raison de la durée prolongée de la rétention, son impact reste constant, c'est-à-dire qu'il est ressenti intégralement sur l'ensemble du Rhin.

### **(2)(3) Impact des mesures de rétention sur le Rhin supérieur**

Les calculs ont été effectués en novembre 1997 selon la manoeuvre F39 en vigueur à cette date dans le cadre d'une réalisation intégrale des mesures.

Sur la base des ondes mesurées à Bâte, on a déterminé l'impact de la manoeuvre F39 jusqu'à Cologne. Les différences ressortent de comparaisons entre ondes calculées (situation sans et avec rétention). Conformément à la manoeuvre F39, la mise en service des polders sur le Rhin supérieur septentrional est ajustée à un cas maximal de HQ<sub>200</sub> et n'a donc qu'un faible impact sur les crues sélectionnées. Le volume de rétention de 80 millions de m<sup>3</sup> supposé entre l'embouchure du Neckar et celle du Main est mis à disposition à partir de débits de Q<sub>Rhin</sub> = 5000 à 5300 m<sup>3</sup>/s (sur place). Sous l'impact des mesures de rétention plus en amont, les débits sont déjà inférieurs à ces valeurs-seuils. Avec la mise en service des polders, il ne serait donc plus nécessaire de faire appel à l'espace de rétention situé en aval de l'embouchure du Neckar. Les résultats des calculs pour les échelles de Worms, Kaub et Cologne figurent dans le tableau 2.

**Tableau 2: différences entre pointes de crue (calculées en m<sup>3</sup>/s et en cm)**

Echelle	Crue	Différences entre calcul sans mesures et					
		calcul avec mesure F 39		calcul avec mesures F 39 et Neckar septentrional		calcul avec mesures sur Neckar septentrional	
		DQ m <sup>3</sup> /s	DW cm	DQ m <sup>3</sup> /s	DW cm	DQ m <sup>3</sup> /s	DW cm
Worms	mai 1983	250	21	-	-	-	-
	mars 1988	170	13	-	-	-	-
	janvier 1995	60	6	-	-	-	-
Kaub	mai 1983	130	11	130	11	40	3
	mars 1988	270	20	320	23	210	16
	janvier 1995	60	5	60	5	0	0
Cologne	mai 1983	190	12	190	12	50	3
	mars 1988	100	6	140	8	110	7
	janvier 1995	50	3	50	3	0	0

Sur le Rhin supérieur, le polder d'Altenheim et le volume disponible derrière le barrage agricole de Kehl ont été en partie utilisés lors de la crue de mars 1988 à raison d'un volume de rétention global de 25 millions de m<sup>3</sup>, ce qui a permis de réduire les débits de pointe de 140 m<sup>3</sup>/s à Worms, de 120 m<sup>3</sup>/s à Kaub et de 60 m<sup>3</sup>/s à Cologne.

#### **(4) Impact des polders situés en Rhénanie-du-Nord-Westphalie**

Dans une étude datée de décembre 1996, l'Institut für Wasserbau und Kulturtechnik de l'Université de Karlsruhe a analysé l'impact des mesures de rétention sur le Rhin actuellement discutées en Rhénanie-du-Nord-Westphalie. Comme indiqué précédemment au point 2.4, onze sites de polders ont été examinés. Les calculs se sont fondés sur différentes options, celle consistant à mettre en place 7 polders inondables et 4 polders de rétention statique dits "polders de poche" étant toutefois la plus probable. Les volumes présumés par l'Université de Karlsruhe ne sont plus actuels entre-temps. Ils sont aujourd'hui estimés à 161 millions de m<sup>3</sup> contre 184 millions de m<sup>3</sup> indiqués dans l'étude. Les volumes de tous les polders de rétention statique ont été rabaissés de 11 %, passant de 78 millions de m<sup>3</sup> à 70 millions de m<sup>3</sup>. Cependant, face à trois réductions, on note également dans un cas une augmentation conséquente du volume de rétention. Dans le cadre des mesures de mise en retrait des digues, un volume de rétention a été réduit de moitié, faisant baisser de 14 % la capacité globale de rétention (qui passe ainsi de 106 millions de m<sup>3</sup> à 91 millions de m<sup>3</sup>). On dispose par contre d'un polder d'été de 25 millions de m<sup>3</sup>, prévu pour entrer en action à partir de débits de crue supérieurs à ceux initialement fixés. Dans l'ensemble, les réductions déterminées à l'origine pour les crues sélectionnées correspondent approximativement à celles du plan modifié.

On obtient donc les réductions d'ondes de crue suivantes à hauteur de Lobith:

Crue	DQ m <sup>3</sup> /s	DW cm
Mai 1983	135	6
Mars 1988	140	6
Janvier 1995	85	4

Ces réductions ont pour avantage important de retarder l'arrivée de la crête de crue de 12 h.

#### **(5)(6) Impact des mesures aux Pays-Bas**

Lors des crues de 1983 et de 1988, l'impact cumulé des mesures prévues dans les bras néerlandais du Rhin ainsi que dans le delta du Rhin aurait pu être de l'ordre d'une réduction de 20 à 40 cm à Lobith (en partant d'usages inchangés dans le lit majeur). Cet impact aurait régressé jusqu'à 0 cm dans la zone influencée par la mer du Nord et l'IJsselmeer. La réduction estimée pour la crue de 1995 est de l'ordre de 30 à 50 cm.

## **(7) Impact de mesures envisageables dans les affluents du Rhin**

Dans les bassins des grands affluents du Rhin (Neckar, Main et Moselle), les mesures de rétention des crues peuvent donner lieu à des réductions de pointe de crue et retarder simultanément le passage de la crête de crue. On ne peut écarter ici d'éventuelles hausses tendancielle du débit de pointe du Rhin. Cet aspect est à considérer à part pour chaque crue. Les volumes globaux des débits sont des valeurs indicatrices qui ont été déterminées dans l'hypothèse de possibilités de rétention analogues dans les différents affluents.

- A) Crue de mai 1983: aggravation envisageable des débits de pointe du Rhin de  $55 \text{ m}^3/\text{s}$  sur le Rhin supérieur et le Rhin moyen et de  $40 \text{ m}^3/\text{s}$  sur le Rhin inférieur.
- B) Crue de mars 1988: on aurait ici pu avoir une faible aggravation des débits de l'ordre de  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  sur le Rhin supérieur et de  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  sur le Rhin moyen. A Cologne en revanche, on aurait obtenu une réduction des débits de pointe de  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- C) Crue de janvier 1995: les estimations font apparaître pour cette crue une aggravation systématique des débits de pointe du Rhin:  $60 \text{ m}^3/\text{s}$  sur le Rhin supérieur,  $40 \text{ m}^3/\text{s}$  sur le Rhin moyen et env.  $15 \text{ m}^3/\text{s}$  sur le Rhin inférieur.

## **(8) Impact des rétentions en surface**

Les usages modifiés sur les sols, l'infiltration et la désimperméabilisation etc. sont pris en compte à raison d'une rétention durable de 1mm de précipitations sur les zones du bassin touchées par les pluies.

- A) Crue de mai 1983 /  
crue de janvier 1995: dans les deux cas, un impact sur le Rhin supérieur est très peu probable. Sur le Rhin moyen et le Rhin inférieur, les estimations correspondent à des baisses de débit de  $65$  et de  $105 \text{ m}^3/\text{s}$  (1983) ainsi que de  $30$  et de  $55 \text{ m}^3/\text{s}$  (1995).
- B) Crue de mars 1988: des baisses des débits de pointe entre  $35 \text{ m}^3/\text{s}$  sur le Rhin supérieur et  $95 \text{ m}^3/\text{s}$  sur le Rhin inférieur seraient envisageables.

## **Estimation des effets cumulés à partir des résultats individuels obtenus**

Les rétentions sur le lac de Constance agissent sur chaque onde globale de crue et abaissent les débits dans une même proportion constante. Elles ont donc un impact sur le moment de mise en œuvre de toutes les autres mesures sur le Rhin supérieur et peuvent, le cas échéant, empêcher leur applica-

tion. Les hydrogrammes introduits dans les modèles ne prennent cependant pas en compte les réductions consécutives à une rétention des eaux du lac de Constance. Il faut donc estimer les effets cumulés de toutes les autres mesures. Il n'a pas été possible de tenir compte des mesures prévues en Rhénanie-du-Nord-Westphalie.

L'impact le plus significatif sur une onde dans son ensemble serait celui d'une régulation du lac de Constance. Elle aurait eu une influence majeure sur les ondes de crue de 1983 et de 1988. Une estimation des effets cumulés fait ainsi ressortir pour 1983 et 1988 des rétentions importantes du lac de Constance. Les ondes de crues auraient alors été si atténuées que les conditions requises pour le déclenchement des mesures sur le Rhin supérieur n'auraient pas été remplies. La situation aurait été analogue en 1995, mais à un niveau moindre.

- A) Crue de mai 1983: réductions entre 350 m<sup>3</sup>/s (Rhin sup.) et 450 m<sup>3</sup>/s (Rhin inf.)
- B) Crue de mars 1988: réduction d'au moins 200 m<sup>3</sup>/s sur le Rhin supérieur, d'env. 380 m<sup>3</sup>/s sur le Rhin moyen et d'env. 300 m<sup>3</sup>/s sur le Rhin inférieur
- C) Crue de janv. 1995: réductions comprises entre 0 et 50 m<sup>3</sup>/s

En convertissant ces volumes en niveau d'eau, on obtiendrait les abaissements figurant dans le tableau 3. Sont également prises en compte pour l'échelle de Lobith les baisses supplémentaires dues aux modifications du profil transversal aux Pays-Bas (5,6).

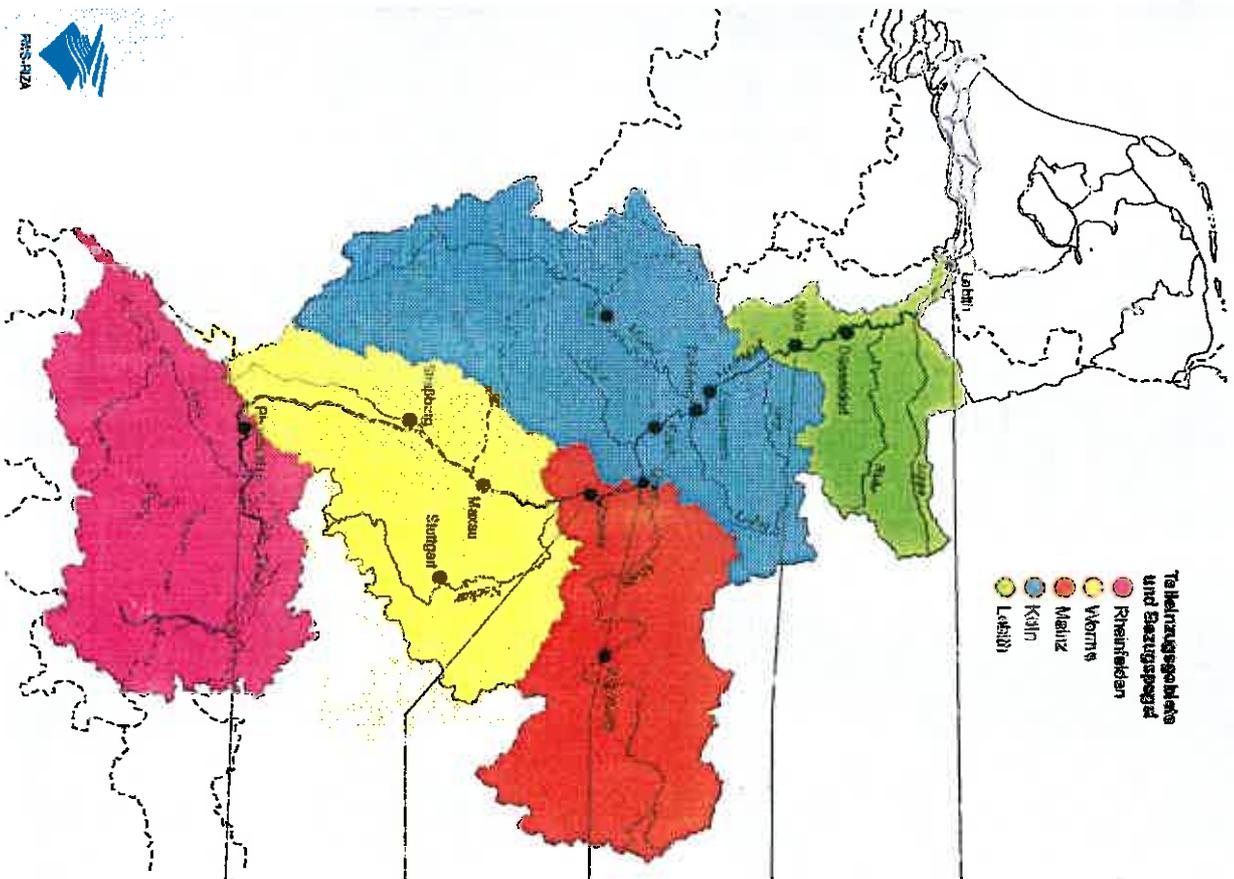
**Tableau 3: estimation arithmétique des abaissements cumulés possibles des pointes de débit en cm**

	abaissement en cm des pointes de débit aux échelles de			
	Worms	Kaub	Cologne	Lobith
mai 1983	29	30	28	40-60
mars 1988	19	28	19	35-55
janvier 1995	0-5	4	3	35-55

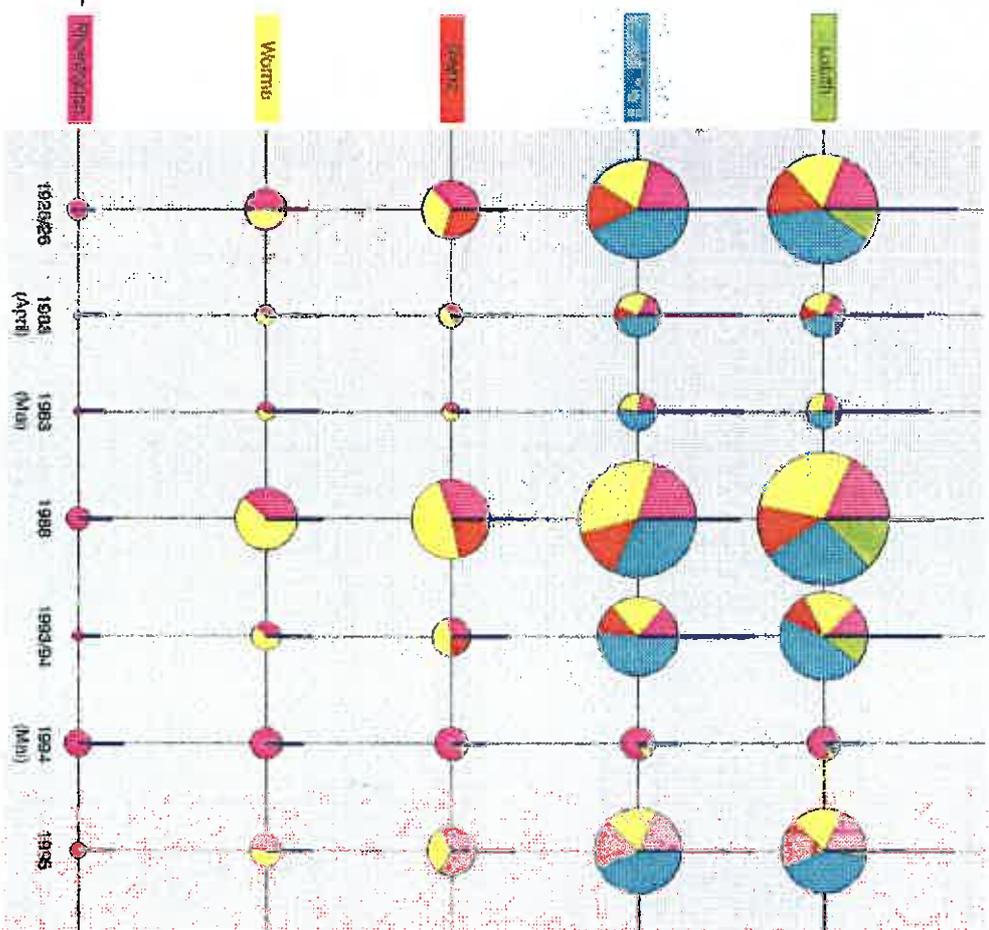
Il ressort des résultats que les réductions ayant un impact sur les crues du Rhin supérieur agissent généralement sur le Rhin inférieur. Parmi les trois crues considérées, l'onde de mai 1983 était déjà très développée au sud de l'embouchure du Neckar. C'est pourquoi dans cette zone et vers l'aval la réduction maximale du débit de pointe a été obtenue sur cette crue de 1983 et non sur une des deux autres. En 1988, l'onde s'est formée en aval du Neckar; en 1995, elle n'est survenue qu'en aval du Main, ce qui aurait eu pour conséquence d'affaiblir l'effet de réduction des mesures prévues sur le Rhin supérieur. Il est clair en outre que les impacts les plus significatifs aux Pays-Bas sont ceux qu'il est possible d'obtenir sur le terrain. On peut en déduire de plus que même dans le cas de débits de pointe compa-

pointe comparativement plus faibles ( $HQ_{10}$  jusqu'à  $< HQ_{50}$ ), la réglementation mise en place sur le Rhin supérieur pour les crues extrêmes ( $HQ_{200}$ ) peut laisser espérer à l'avenir un impact de l'ordre de 25 à 35 % (sur le Rhin supérieur) et de 20 à 30 % (plus en aval) de l'effet maximal de toutes les mesures envisageables.

# Hochwasserentwicklung (Scheitelablauf und Fulle) in Bezug auf die Größe der Teileinzugsgebiete des Rhein zwischen Rheinfeldern und Lobith



- Teileinzugsgebiete und Dazugspeizd**
- Rheinfelden
  - Worms
  - Mainz
  - Köln
  - Lobith



**Legende**

Fulle (5 Mid.m<sup>3</sup>)  
 Gebietsanteil

0 10.000  
 Scheitelablauf (m<sup>3</sup>/s)



Evaluation de l'impact sur les crues des mesures de rétention dans le bassin du Rhin		impact dans la																	
		zone rapprochée sur les								zone éloignée (Rhin)									
		faibles				fortes				faibles				fortes					
		crues																	
impact:		tps de passage	volume	niveau	durée	tps de passage	volume	niveau	durée	tps de passage	volume	niveau	durée	tps de passage	volume	niveau	durée		
de la végétation	forêt / friche / prairie		-	-	-														
	pacage intensif / champ labouré		(+)	+	-			(+)	(-)										
du sol	surfaces imperméabilisées et consolidées		+	+	-			+	(+)	(-)			(+)	(+)					
	gel		+	+	-			+	+	(-)					(+)	+			
	gestion écologique		-	-	-			(-)	-	+			(-)	(-)					
du terrain	implantations humaines		+	+	-								+	+	-				
	dépérissement des forêts (à grande échelle)		+	+	+			+	+	+			+	+	+		(+)	(+)	(+)
	désimperméabilisation / infiltration des eaux pluviales		-	-	-														
du réseau hydrographique	petits espaces de rétention		+		(-)	+		!				!							
	renaturation		+		-	+	+	(-)	(+)	(-)		(-)	(+)						
	protection locale contre les inondations		-		(+)	(-)	-	(+)	!	(-)		!					!		
	élargissement de la section transversale d'écoulement				(-)			(-)											
	mesures techniques de rétention sur les affluents		(-)	(-)	(-)		(-)		(+)	(-)		(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)	(+)	
mise en retrait des digues. - digue d'hiver - digue d'été																			
	polders d'été					+	-	-						(-)	-	(-)			
mesures techniques de rétention (barrages et espaces de rétention)			+	(-)	-	(+)	(-)	(-)	-	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(+)	
	abaissement des épis				-			-			(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)		
	suppression de goulots d'étranglement locaux; mise en place de ramifications latérales				-			-			(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)		
	agrandissement de l'ancien lit majeur				-			-			(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)		
	décaissement de l'ancien lit majeur				(-)			-				(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)		

+ renforcement, prolongation, rehaussement

( ) sous certaines conditions

- diminution, atténuation

cases vides: impact nul ou incertain

! risque à considérer en particulier

 amélioration de la situation de crue