



Internationale Kommission zum Schutz des Rheins  
Commission Internationale pour la Protection du Rhin  
Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn

## **Rapport final**

Identification de l'efficacité de mesures de  
réduction des niveaux de crues extrêmes du Rhin  
Mise en œuvre du Plan d'Action contre les Inondations  
jusqu'en 2005

Groupe d'experts Hval de la CIPR  
juin 2006

#### Groupe d'experts Hval de la CIPR

Dr. G. Brahmer,	Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
Dr. M. Braun,	Secrétariat de la CIPR
Dr. M. Bremicker,	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
Ir. H. Buiteveld,	Rijkswaterstaat - RIZA
Dipl.-Met. N. Busch,	Bundesanstalt für Gewässerkunde
Dipl.-Ing. H. Engel,	Bundesanstalt für Gewässerkunde
Dipl.-Ing. M. Hammer,	Bundesanstalt für Gewässerkunde
Dipl.-Ing. H. Hodel,	Office de l'environnement, Suisse
Dipl.-Ing. P. Junod,	Service de la Navigation de Strasbourg, Strasbourg
Dipl.-Ing. B. Kammer,	Landesamt für Umwelt- und Arbeitsschutz, Saarland
Dipl.-Ing. B. Mehlig,	Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen
Dipl.-Ing. D. Meißner,	Bundesanstalt für Gewässerkunde
Dr. A. Meuser,	Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft (président) und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz
Dr. A. Petrascheck	Office de l'environnement, Suisse
Dr. A. Vogelbacher	Bayerisches Landesamt für Umweltschutz

Le présent rapport final du groupe d'experts Hval de la CIPR se fonde sur un projet sommaire global établi par la Bundesanstalt für Gewässerkunde de Coblenz et sur des études de la Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz du Bade-Wurtemberg.

## Sommaire

SOMMAIRE .....	III
INDEX DES ILLUSTRATIONS .....	IV
INDEX DES TABLEAUX .....	IV
ABREVIATIONS ET SYMBOLES UTILISES .....	V
INDEX DES ILLUSTRATIONS .....	IV
SYNTHESE .....	VII
1 INTRODUCTION ET EXPOSE DES TACHES .....	1
2 GENESE DES CRUES DANS LE BASSIN DU RHIN .....	3
3 CRUES UTILISEES ET ECHELLES D'ARRIVEE .....	6
4 PROCEDURE .....	7
4.1 MODELES ET CONDITIONS GENERALES .....	7
4.1.1. Le modèle hydrologique SYNHP .....	8
4.1.2. Le modèle hydraulique SOBEK .....	9
4.1.3. Conditions générales du modèle 'épine dorsale' .....	9
4.2 GENERATION DE CRUES MODELISEES .....	10
4.3 CATEGORIES DE MESURES ET MESURES REALISEES (1995 – 2005) CONFORMEMENT AU PLAN D'ACTION CONTRE LES INONDATIONS .....	12
4.3.1. Mesures de rétention entre Bâle et la mer du Nord .....	12
4.4 ESTIMATION DE L'EFFICACITE DES MESURES DE REDUCTION DES NIVEAUX D'EAU REALISEES SUR LE RHIN SUPERIEUR ENTRE 1977 ET 2005 .....	20
5 VARIANTES DE CALCUL .....	21
6 RESULTATS DE CALCUL .....	25
6.1 ABAISSEMENT DES DEBITS DE CRUE ET DES NIVEAUX DE CRUE .....	25
6.2 ESTIMATION DE LA MODIFICATION DES RECURRENCES A HAUTEUR D'ECHELLES D'ARRIVEE .....	1
BIBLIOGRAPHIE .....	5
GLOSSAIRE .....	8
Annexe 1 Définition de l'expression « crue extrême » en relation avec l'impact des mesures du PAI	
Annexe 2 impact des mesures mises en œuvre entre 1995 et 2005, catégorie 1 « rétention des eaux dans le bassin »).	

## Index des illustrations

Figure 1 :	Débits mensuels moyens (1931/1990) de différents tronçons du Rhin.....	4
Figure 2 :	Tronçons fluviaux du modèle 'épine dorsale' dans le bassin versant du Rhin .....	9
Figure 3 :	Evolution de crues modélisées .....	12
Figure 4 :	Vue d'ensemble des mesures de rétention des eaux réalisées jusqu'en 2005 sur le Rhin .....	15
Figure 5 :	Impact de la mesure Bad Kreuznach illustrée par les hydrogrammes de l'échelle de Grolsheim sur la Nahe .....	19
Figure 6 :	Impact des mesures sur le cours amont de la Lahn et du Kleebach .....	20
Figure 7 :	Nomenclature des opérations de calcul Hval .....	23
Figure 8 :	Hydrogrammes des échelles de Kaub et de Worms .....	27
Figure 9 :	Evaluation des variations de niveau d'eau de toutes les crues modélisées à hauteur de l'échelle de Maxau .....	28
Figure 10 :	Evaluation des variations de niveau d'eau de toutes les crues modélisées à hauteur de l'échelle de Worms .....	28
Figure 11 :	Evaluation des variations de niveau d'eau de toutes les crues modélisées à hauteur de l'échelle de Kaub .....	29
Figure 12 :	Evaluation des variations de niveau d'eau de toutes les crues modélisées à hauteur de l'échelle de Cologne .....	29
Figure 13 :	Evaluation des variations de niveau d'eau de toutes les crues modélisées à hauteur de l'échelle de Lobith .....	30
Figure 14 :	Exemple de détermination graphique de la modification de probabilité à une échelle donnée comme conséquence d'une réduction de débit .....	33

## Index des tableaux

Tableau 1 :	Impacts des mesures de réduction des niveaux d'eau sur les pointes de crue en 2005 par rapport à 1995 .....	VIII
Tableau 2 :	Les neuf débits de pointe les plus importants relevés depuis 1926 à l'échelle de Cologne et les volumes des ondes de crue correspondantes au-dessus des débits de base respectifs .....	5
Tableau 3 :	Mesures de rétention sur le Rhin entre Bâle et la mer du Nord .....	14
Tableau 4 :	Mesures de rétention dans le bassin du Kleebach et de la Lahn en amont de l'échelle de Gießen .....	20
Tableau 5 :	Impact des mesures de réduction des niveaux d'eau sur les pointes de crue en 2005 par rapport à 1977 .....	22
Tableau 6 :	Matrice des 41 variantes de calcul et des 82 opérations de calcul	
Tableau 7 :	Vue générale des résultats des calculs .....	31
Tableau 8 :	Modification de la récurrence ordonnée selon les marges de débit à différentes échelles (et rapportées aux valeurs de pointe) .....	34

## Abréviations et symboles utilisés

BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BW	Bade-Wurtemberg
CHR	Commission internationale de l'Hydrologie du bassin du Rhin
CIPR	Commission Internationale pour la Protection du Rhin
Hiri	Groupe d'experts de la CIPR chargé d'élaborer une méthode d' « identification de la réduction des risques de dommages »
HKV	Bureau d'études néerlandais de la gestion des eaux et de l'hydrologie
HLUG	Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
HQ	Débit de crue [ $m^3/s$ ]
HQ <sub>T</sub>	Débit de pointe une fois atteint ou dépassé dans un intervalle de temps de T années sur une série prolongée d'années consécutives
HSG	Hochwasserstudiengruppe für die Rheinstrecke Kaub- Rolandswerth
HSK	Hochwasser-Studienkommission für den Rhein
Hval	Groupe d'experts de la CIPR : 'Validation des calculs sur les instruments d'identification de l'efficacité des mesures de réduction des niveaux de crue extrêmes
HW	Crue
LfW	Landesamt für Wasserwirtschaft
LUA	Landesumweltamt
LUBW	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (anciennement LfU: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg )
LUWG	Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz
NAXOS	Modèle conceptionnel de transformation pluies-débits mis au point par l'institut Leichtweiß de l'Université de Braunschweig et utilisé pour les mesures prises dans le bassin de la Lahn
NRW	Rhénanie-du-Nord-Westphalie
PAI	Plan d'action contre les inondations
Q	Débit [ $m^3/s$ ]
RWS-RIZA	Rijkswaterstaat – Office public de gestion intégrale des eaux intérieures et d'épuration des eaux usées
SOBEK	Nom du modèle de simulation numérique hydrodynamique unidimensionnel utilisé dans la présente étude
SYNHP	Nom du programme synoptique de déroulement des ondes de crue utilisé dans la présente étude
T	Période de retour (récurrence)

W Niveau d'eau [cm, m + NN]  
Z Etat

## Synthèse

Conformément au Plan d'action contre les inondations de la Commission Internationale pour la Protection du Rhin, il convient d'évaluer régulièrement l'impact des mesures de rétention réalisées sur les niveaux de crue du Rhin. La Bundesanstalt für Gewässerkunde et la Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz (Office chargé de l'environnement, des mesures et de la protection de la nature) du Land de Bade-Wurtemberg ont analysé au sein du groupe d'experts Hval de la CIPR l'efficacité des mesures de réduction des niveaux de crue dans le Rhin jusqu'en 2005 à l'aide de modèles mathématiques de calcul des débits (SYNHP, SOBEK). A cette fin, ils ont utilisé des crues modélisées sur la base des crues de 1978, 1983, 1988, 1995 et 1999. Ces crues modélisées (5 crues sur le Rhin supérieur, 3 crues sur le Rhin moyen et le Rhin inférieur) reproduisent les différentes genèses de crue dans le bassin du Rhin. Elles ont été créées pour répondre à l'objectif de l'étude ( $H_{Q_{\text{extrême}}}$ ). Dans un deuxième temps, des mesures y ont été appliquées par simulation.

Entre les deux dates de référence 1995 et 2005, parallèlement aux mesures prises dans le bassin du Rhin pour réduire les niveaux d'eau, on relève 18 mesures mises en place ou modifiées sur le Rhin même et entre-temps opérationnelles. Elles se répartissent entre la France (1 mesure avec un volume de rétention de 7,8 millions de  $m^3$ ), le Bade-Wurtemberg (1 mesure avec un volume de rétention de 12,0 millions de  $m^3$ ), la Rhénanie-Palatinat (7 mesures avec un volume de rétention de 14,3 millions de  $m^3$ ), la Rhénanie-du-Nord-Westphalie (2 mesures avec un volume de rétention de 18 millions de  $m^3$ ). En procédant à des reculs de digues et des décaissements du lit majeur, les Pays-Bas ont redynamisé environ 17  $km^2$  supplémentaires de surface pour abaisser les niveaux de crue. Pour l'échelle d'arrivée de Lobith, les mesures susceptibles d'être efficaces ne représentent cependant que 2  $km^2$  environ. Les autres mesures sont localisées en aval de Lobith et ont un impact local aux endroits respectifs. Le Land de Hesse et la Fédération allemande sont contractuellement associés au financement de mesures de rétention en France, au Bade-Wurtemberg et en Rhénanie-Palatinat. Par rapport à l'état de référence 1995, le volume de rétention supplémentaire disponible en 2005 équivaut à au moins 55 millions de  $m^3$  répartis sur le Rhin supérieur, avec 34 millions de  $m^3$ , et sur le Rhin inférieur, avec 21 millions de  $m^3$  de volume de rétention supplémentaire.

Dans le cadre de l'évaluation de l'impact des mesures jusqu'en 2005, il convient de prendre en compte l'estimation de l'efficacité des mesures réalisées entre 1977 et 1995, étant donné qu'on disposait déjà à la date de référence 1995 d'env. 110 millions de  $m^3$  de rétention opérationnels sur le Rhin supérieur et de 50 millions de  $m^3$  sur le Rhin inférieur. Les calculs modélisés montrent que les mesures de rétention réalisées entre 1977 et 2005 pour restaurer sur le Rhin supérieur un niveau de protection contre les inondations équivalent à celui qui existait avant la régulation du fleuve permettent d'abaisser d'env. 50 à 60 cm à l'échelle de Maxau et de plus de 10 cm à l'échelle de Lobith un niveau de pointe de crue bicentennale. Ces réductions très sensibles des niveaux d'eau ne se réfèrent pas cependant à la période de référence de 1995-2005 fixée dans le Plan d'action contre les inondations.

D'après le Plan d'action contre les inondations, des réductions de niveau d'eau jusqu'à 30 cm doivent être atteintes d'ici 2005 par rapport à l'état de 1995. L'analyse des crues modélisées fait apparaître des **réductions maximales des pointes de crue** pouvant atteindre jusqu'à **31 cm** à l'échelle de **Maxau**. A l'échelle de **Worms**, les mesures permettent d'abaisser les pointes de crues de **29 cm** au maximum, ceci cependant dans le cas d'une crue décennale, c'est-à-dire à un niveau non critique pour les digues. Dans le cas d'une crue bicentennale, pour laquelle ont été dimensionnées les digues, les réductions de pointe de crue calculées ne sont plus que de **17 cm** au maximum. Elles se traduisent par une baisse de niveau de pointe allant jusqu'à **12 cm** à **Kaub** et atteignent encore jusqu'à **11 cm** à l'échelle de **Cologne**. A l'échelle de **Lobith** située à la frontière germano-néerlandaise, la pointe de crue de la variante reproduite par calcul pour simuler une crue extrême accuse une baisse pouvant atteindre **7 cm** ; dans une situation de débit millénaire, la réduction n'est plus que de **3 cm** (informations supplémentaires dans le tableau 1).

**Tableau 1 : Impacts des mesures de réduction des niveaux d'eau sur les pointes de crue en 2005 par rapport à 1995**

Echelle	Modifications minimales/maximales de la pointe de crue [en cm] en 2005 par rapport à 1995					
	Pour les crues modélisées dans le cadre de l'étude Hval					
	HQ <sub>100</sub>		HQ <sub>200</sub>		HQ <sub>1000</sub>	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Maxau	-7	-20	1	-31	pas de variante Hval	
Worms	-5	-13	-4	-17	pas de variante Hval	
Kaub	0	-12	2	-12	pas de variante Hval	
Cologne	0	-8	-6	-9	-6	-11
Lobith	-1	-7	-2	-7	1	-3

Les réductions de pointe obtenues sont uniquement dues aux mesures réalisées directement sur le Rhin, c'est-à-dire rentrant dans le champ d'analyse de la présente étude. Pour une grande part, les mesures mentionnées dans le PAI comme mesures prises à l'échelle du bassin (restauration écologique, extensification de l'agriculture, reconquête du milieu, boisement et désimperméabilisation) n'ont pas pour objectif premier la protection contre les inondations du Rhin mais déploient surtout leurs effets à un niveau local sur les crues de moindre ampleur provoquées par les affluents rhénans et permettent d'atteindre d'autres objectifs politiques importants.

Les seules catégories de mesures prises dans le bassin versant qui soient susceptibles d'avoir un impact réducteur, limité cependant, sur les crues du Rhin, sont les redynamisations de zones inondables et les rétentions techniques. L'impact des zones inondables redynamisées ne peut cependant se ressentir sur le débit de pointe du Rhin que si les surfaces reconquises aux abords d'un affluent représente un volume de rétention significatif par rapport à la crue du Rhin considérée et si, de plus, elles sont inondées suffisamment longtemps pour qu'après l'apport de débit de l'affluent dans le Rhin un effet de réduction de débit se produise sur la pointe de crue du Rhin. Ces conditions n'existent pas cependant dans le bassin du Rhin, étant donné que les débits des cours d'eau latéraux précèdent généralement la crue du Rhin. Les dispositifs techniques de rétention des crues mis en place sur les affluents du Rhin ne peuvent pas non plus réduire sensiblement le débit de crue du Rhin. Pour toutes ces raisons, on a renoncé à identifier les mesures prises dans le bassin car elles ne contribuent pas pour une part essentielle, à quelques exceptions près, à réduire les niveaux de crues extrêmes sur le Rhin. De ce fait, un tel travail d'identification complexe par modélisation n'apparaît ici ni justifié ni nécessaire.



Les analyses se fondent sur des réductions de pointes de crue, des réductions plus importantes pouvant encore être atteintes avant ou après l'arrivée de la pointe à un endroit donné.

Bien que l'abaissement d'une pointe de crue soit généralement le principal objectif visé, on ne doit pas pour autant négliger les impacts positifs des réductions de niveaux d'eau avant comme après le passage de la pointe. Une réduction des niveaux d'eau sur la courbe ascendante d'une onde de crue peut freiner la vitesse de montée des eaux. Il en résulte une prolongation du temps de préalerte et la possibilité d'agir sur une surexposition défavorable des ondes du Rhin et de ses affluents. Un abaissement du niveau d'eau sur la courbe descendante d'une onde de crue entraîne une régression plus rapide des pressions exercées sur les ouvrages de protection et peut réduire la phase de temps de « niveaux d'eau critiques ».

Dans le cadre de l'objectif de réduction des pointes de crue visé dans le Plan d'action contre les inondations d'ici 2020 et vu les volumes limités de rétention disponibles, il convient en outre de tenir compte du fait qu'à volume égal les mesures manoeuvrables ont un impact nettement plus important sur place que les mesures non manoeuvrables.

Pour une meilleure compréhension des résultats des études d'identification des impacts, il convient de tenir compte des faits suivants :

- Pour des raisons géographiques, les mesures de rétention des crues ne sont applicables dans un ordre de grandeur notable que dans deux tronçons :
  - sur le Rhin supérieur entre Bâle et Bingen
  - sur le Rhin inférieur en aval de Cologne
- Conformément aux conventions franco-allemandes, les rétentions du Rhin supérieur ont essentiellement pour fonction de restaurer le niveau de protection contre les inondations qui existait avant l'aménagement du Rhin supérieur. Les échelles d'arrivée visées par les manoeuvres sont celles de Maxau et de Worms, pour lesquelles l'impact des rétentions est optimisé.
- Une mesure de réduction des pointes de crue ne peut déployer son effet maximal que dans une zone limitée. Ce rayon d'action limité dépend du volume de l'espace de rétention et de l'ampleur de la crue. Il peut toutefois gagner des contours plus précis au travers de mesures « manoeuvrables ».
- Le fonctionnement des mesures « manoeuvrables » sur le Rhin supérieur consiste en un abaissement de la pointe de crue de l'onde du Rhin supérieur avec restitution du volume d'eau retenu après le passage de la pointe. Cette nouvelle répartition du débit, qui est ressentie sur toute la partie aval du Rhin, se caractérise cependant par un étirement dans le temps du volume de pointe à mesure que l'onde se déplace vers l'aval, ce qui permet d'atténuer les différences maximales de débit. Les réductions les plus importantes obtenues au travers des mesures de rétention supplémentaires rendues opérationnelles entre 1995 et 2005 sont de l'ordre de 250 à 400 m<sup>3</sup>/s et s'affaiblissent ensuite, pour les raisons mentionnées plus haut, pour ne plus atteindre que des valeurs de 100 à 200 m<sup>3</sup>/s à la frontière germano-néerlandaise. A ceci s'ajoute le fait qu'une réduction constante de débit se traduit par un abaissement dégressif du niveau d'eau à mesure qu'augmente le profil transversal du fleuve, comme c'est le cas dans le Rhin inférieur par rapport au Rhin supérieur. Toutes ces remarques expliquent que les mesures prises sur le Rhin supérieur ne peuvent avoir d'impact que sur un rayon limité et ne peuvent couvrir qu'en partie les besoins globaux de rétention des crues requis sur le Rhin jusqu'à la mer du Nord.

*On constate en résumé que la réduction visée des niveaux de crues du Rhin jusqu'à 30 cm est atteinte sur le Rhin supérieur au travers des ouvrages de rétention mis en place de 1995 à 2005. Sur le Rhin moyen, cette réduction est d'env. 10 cm. Sur le Rhin inférieur, il ressort des calculs que des réductions de l'ordre de 10 cm sont également atteintes autour de Cologne. Elles sont au maximum de 7 cm à hauteur de la frontière germano-néerlandaise et de 3 cm dans le cas d'une crue théorique. Ces réductions ne sont pas atteintes dans chaque cas de figure analysé. En fonction de la genèse de crue, il arrive dans certains cas qu'aucune réduction ne soit pratiquement constatée sur les niveaux de pointe.*

## Introduction et exposé des tâches

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

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

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

Le Groupe de travail 'Inondations' de la CIPR a mis en place le groupe d'experts Hval et lui a confié le suivi des études requises. Aux termes de son mandat, ce groupe d'experts est chargé entre autres « d'examiner et de confirmer les éléments du modèle 'épine dorsale' (à appliquer) et de vérifier la mise en oeuvre et les performances de la méthode ».

Conformément aux décisions de la CIPR, les analyses portant sur le tronçon du Rhin compris entre Worms et Bâle sont effectuées par l'Office bade-wurtembergeois pour la protection de l'environnement, les mesures et la protection de la nature (LUBW) avec le modèle SYNHP. Les analyses à effectuer sur le tronçon du Rhin en aval de Worms avec le modèle SOBEK et la présentation globale des calculs ont été confiées à la Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG). Le modèle SOBEK mis au point par le Rijkswaterstaat RIZA pour les bras néerlandais du Rhin a été intégré dans le modèle SOBEK de la BfG. Ceci permet d'évaluer également les mesures réalisées aux Pays-Bas.

Résultat de la combinaison des modèles SYNHP et SOBEK, le modèle global couplé (modèle 'épine dorsale') satisfait aux exigences du profil de performance requis pour le modèle global à partir duquel peuvent être simulées les mesures du PAI. Conformément à sa structure, le modèle global dispose de nœuds (c'est-à-dire d'affluents) en nombre suffisant pour que les résultats des études d'identification que produisent éventuellement les Länder avec leurs modèles régionaux puissent trouver place dans le modèle 'épine dorsale' en tant que conditions générales supérieures ou latérales.

Le groupe d'experts Hval, qui se compose de représentants de quatre Etats riverains du Rhin (Suisse, France, Allemagne et Pays-Bas), de six Länder fédéraux allemands (Bade-Wurtemberg, Bavière, Hesse, Rhénanie-Palatinat, Sarre et Rhénanie-du-Nord-Westphalie) ainsi que de la BfG et de la CIPR, a fixé le cadre des études et les conditions hydrologiques et hydrauliques générales des calculs de modélisation. Il a sélectionné cinq crues historiques du Rhin décrivant les multiples genèses des crues dans les différentes régions du bassin du Rhin. Cinq échelles d'arrivée ont été retenues et cinq débits maximaux s'y rapportant ont été définis pour ces régions. Ces débits ne doivent pas être dépassés dans le cadre de la création des crues extrêmes modélisées.

Le présent rapport rédigé sous forme de projet par la BfG et révisé par le groupe d'experts Hval rassemble dans son chapitre 6 les principaux résultats des études sur l'évaluation de la réduction des niveaux d'eau visée à l'horizon 2005 dans l'objectif opérationnel « Réduction des niveaux de crue », cette réduction découlant de l'impact des mesures de rétention réalisées entre 1995 et 2005 dans le Rhin et son bassin. On y trouvera également une estimation des baisses de niveaux d'eau identifiées présentée sous forme de modifications des probabilités de crues.

## Genèse des crues dans le bassin du Rhin

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

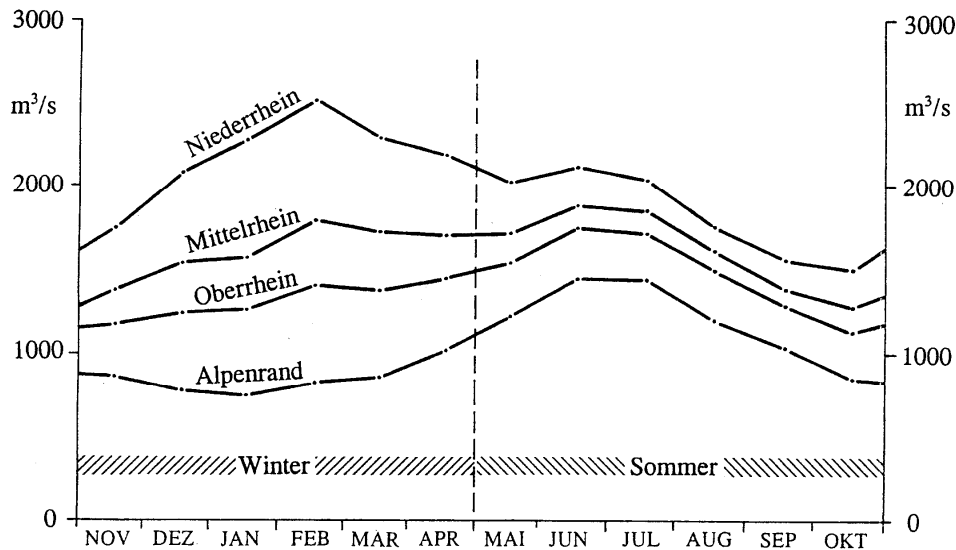
Le bassin du Rhin est dominé toute l'année par des vents soufflant de l'ouest. Des masses d'air atlantiques humides traversent ainsi l'Europe centrale du sud-ouest jusqu'au nord. Les précipitations sont particulièrement abondantes en hiver lorsque les conditions météorologiques sont caractérisées par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

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

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

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

Les modifications du régime d'écoulement du Rhin sont reconnaissables aux débits mensuels moyens de tronçons caractéristiques (figure 1). On voit clairement à quelle saison des crues sont principalement attendues : en été dans la zone à influence alpine, en hiver plus en aval. Le passage du régime caractérisé par des débits maximums en été à un régime où le maximum est en hiver se fait sur le Rhin moyen. Des analyses plus détaillées du régime de crue montrent toutefois que ce passage (crues plus fréquentes en hiver qu'en été) se fait plus au sud, alors que ce n'est pas le cas pour les débits moyens. A hauteur de Maxau sur le Rhin supérieur, le régime de crue est sous l'influence prédominante des crues du semestre d'hiver.



**Figure 1 : Débits mensuels moyens (1931/1990) de différents tronçons du Rhin**

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

- La zone du Rhin alpin et du haut Rhin avec les éléments caractéristiques du régime glacio-nival de haute montagne
- Les trois zones du Neckar, du Main et de la Moselle caractérisée par le régime pluvial des hautes terres centrales

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

Sur le haut Rhin, les crues extrêmes se produisent normalement entre mai et juillet. A cette époque de l'année, il n'y a pas d'apport important venant des hautes terres centrales, raison pour laquelle de telles ondes estivales ne sont en général exceptionnelles que sur la partie méridionale du Rhin supérieur jusqu'à l'embouchure du Neckar et sans importance particulière plus en aval. Une exception très rare s'est produite avec la crue de fin 1882/début 1883 avec les débits les plus élevés jamais atteints sur l'ensemble du Rhin supérieur à partir de Bâle, générant de nombreuses ruptures de digues. Malgré ces débordements, cette crue compte parmi les dix plus fortes crues enregistrées depuis 1870 dans le Rhin inférieur.

A partir du Rhin supérieur moyen et plus en aval, les crues extrêmes apparaissent généralement en hiver avec différents apports des bassins du Neckar, du Main et de la Moselle. Le Neckar et la Moselle génèrent des ondes plutôt courtes et abruptes, alors que le Main produit des ondes étirées avec des pointes moins élevées. La forme des ondes correspond aux zones de précipitation correspondantes. Sur le Neckar et la Moselle, celles-ci suivent de manière synchrone l'évolution de l'onde respective, sur le Main par contre, elles se déplacent dans le sens opposé, ce qui dans un cas entraîne une augmentation continue de l'onde et dans l'autre cas un étirement de l'onde. En ce sens, les pointes du Neckar et de la Moselle peuvent passer avant ou après la pointe du Rhin, alors qu'en général les pointes du Main et du Rhin se chevauchent. Ce n'est pas le cas

lorsque des précipitations très abondantes venant de l'est s'abattent sur le bassin du Main, par ex. dans le cas de dépression du type V b s'étendant largement vers l'ouest. Dans un tel cas, les périodes de précipitations sont longtemps stationnaires, intenses et donnent naissance à des crues extrêmes – uniquement en été toutefois (comme en 1342 par ex.) lorsque les concomitances avec les crues du Rhin et de la Moselle sont assez improbables.

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

Le tableau 2 fait état des neuf crues majeures survenues à Cologne depuis 1925 avec leurs débits de pointe et leur ampleur dépassant les débits de base. On peut déduire des données que le volume de la crue la plus importante relevé à Cologne en 1988 ne correspond qu'au huitième débit de pointe, alors que la crue présentant le plus haut débit de pointe (1925/26) ne vient qu'en 3<sup>ème</sup> position au niveau du volume. Le débit global significatif en termes de crue était en 1988 supérieur de 15 % à celui de 1925/26 et même de 35% à celui de 1995.

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

**Tableau 2 : Les neuf débits de pointe les plus importants relevés depuis 1926 à l'échelle de Cologne et les volumes des ondes de crue correspondantes au-dessus des débits de base respectifs\***

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

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

## Crués utilisées et échelles d'arrivée

La méthode utilisée pour identifier l'efficacité des mesures de réduction des niveaux de crue extrêmes dans le Rhin en 2005 se base sur des calculs d'écoulement d'ondes à l'aide de deux modèles de débit mathématiques pour le Rhin et ses principaux affluents (voir chapitre 0). Ces modèles impliquent que l'on connaisse les hydrogrammes d'apport sur tous les bords du modèle pour chaque crue à simuler. Pour ce faire, on a eu recours à un collectif de crués historiques du Rhin et il a été tenu compte dans le choix des crués des particularités régionales et des variations saisonnières des crués du Rhin signalées au chapitre 0. Le groupe d'experts Hval au sein de la CIPR a sélectionné les crués historiques suivantes pour les cadre des calculs d'identification de l'efficacité des mesures :

### Tronçon du Rhin entre Bâle et la mer du Nord :

- |                     |      |   |
|---------------------|------|---|
| ▪ mai / juin        | 1983 | (période de calcul : 22.05.83 – 06.06.83) |
| ▪ mars / avril      | 1988 | (période de calcul : 10.03.88 – 10.04.88) |
| ▪ janvier / février | 1995 | (période de calcul : 21.01.95 – 06.02.95) |

Pour le tronçon du Rhin supérieur compris entre Bâle et Worms, l'étude a été complétée par deux crués significatives pour ce secteur :

### Tronçon du Rhin entre Bâle et Worms (en plus)

- |              |      |   |
|--------------|------|---|
| ▪ mai / juin | 1978 | (période de calcul : 22.05.78 – 04.06.78) |
| ▪ mai        | 1999 | (période de calcul : 10.05.99 – 30.05.99) |

Les trois ou cinq crués sélectionnées donnent un aperçu des différentes genèses de crue dans le bassin du Rhin. Alors que les crués de 1978 et 1999 ont été très prononcées sur le Rhin supérieur, celle de 1988 a eu un fort impact sur le Rhin moyen. La crue de 1983 s'est étendue de manière relativement régulière sur le bassin et n'a pas eu d'impact significatif sur un tronçon particulier. La crue survenue en 1995 a principalement touché le nord du bassin du Rhin, notamment la Moselle et la Sieg.

En raison de la gestion basée sur des débits extrêmes ou sur le débit  $HQ_{200}$  et de l'efficacité des mesures, il convient d'utiliser dans le cadre des calculs d'identification des crués entraînant si possible des débits extrêmes dans l'ensemble du bassin versant du Rhin. Le 2<sup>ème</sup> objectif opérationnel du PAI (CIPR, 1998) se réfère également à des crués ayant une période de récurrence de plus de 100 ans (pour la définition de l'expression « crue extrême, se reporter à l'annexe 1). De tels niveaux extrêmes n'ont guère été mesurés dans le Rhin (et seulement sur certains tronçons) et ne peuvent pas être représentés par les crués mentionnées ci-dessus. Vient s'y ajouter le fait que l'effet à démontrer en 2005 doit se faire par analyse à l'aide de simulations de débits mathématiques et non stationnaires. Il ne suffit donc pas de définir des débits de pointe individuels à l'aide de statistiques (par ex.  $HQ_{200}$ ) sur certaines échelles pour effectuer de tels calculs. Il faut disposer d'hydrogrammes de crue continus. Face à cette situation, on a tout d'abord généré des crués dites modélisées dont la méthode de mise au point est développée au chapitre 4.2 ; ces crués modélisées servent de base aux calculs d'identification.

Bien que l'écoulement d'ondes de crue le long d'un cours d'eau soit un processus continu, il est nécessaire, pour évaluer les résultats, de disposer d'un nombre restreint de points d'appui discrets, appelés par la suite échelles d'arrivée.



Le groupe d'experts Hval de la CIPR a choisi cinq échelles hydrologiques du Rhin, chacune représentative d'un tronçon donné, aux fins d'évaluation des résultats :

Rhin supérieur :

- échelle de Maxau [PK 362,3 du Rhin] (en amont du débouché du Neckar)
- échelle de Worm Main [PK 443,4 du Rhin] (entre le débouché du Neckar et celui du Main)

Rhin moyen :

- échelle de Kaub [PK 546,2 du Rhin] (entre le débouché du Main et celui de la Moselle)

Rhin inférieur :

- échelle de Cologne [PK 688,0 du Rhin] (en aval du débouché de la Moselle)
- échelle de Lobith [PK 862,2 du Rhin] (en amont des bras néerlandais du Rhin)

Les échelles d'arrivée susmentionnées ont également une grande importance dans le cadre de la génération de crues modélisées (chapitre 4.2).

## Procédure

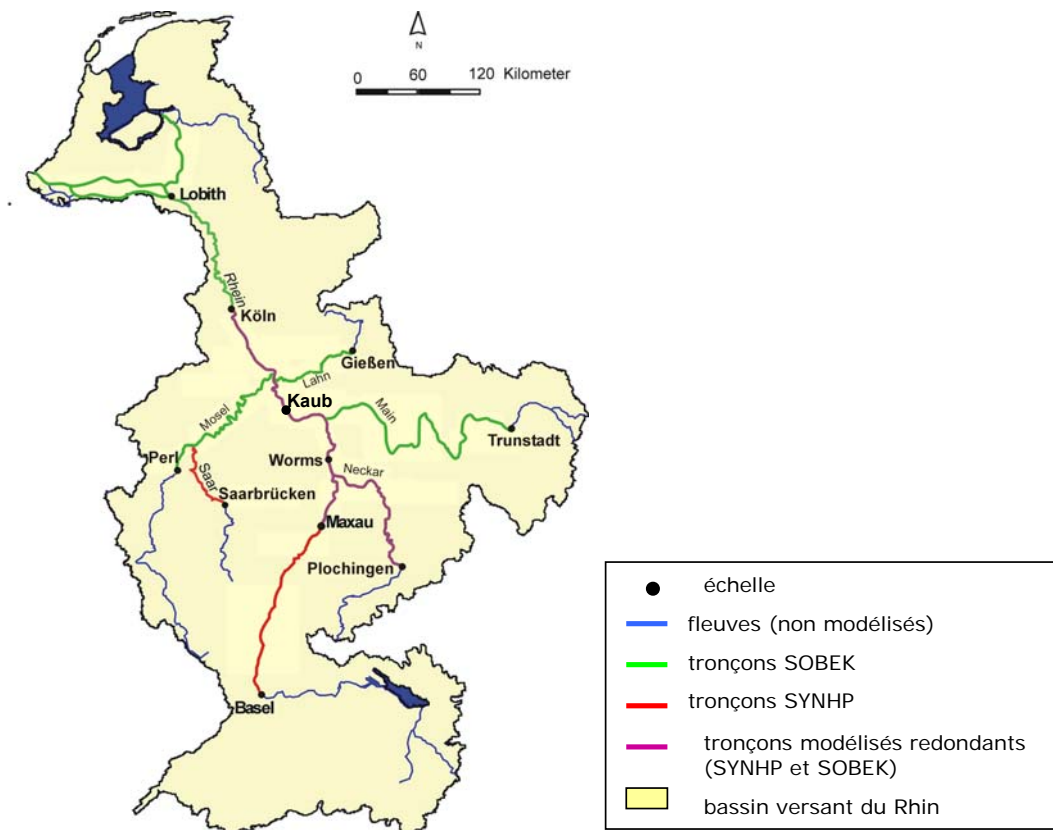
### 1. Modèles et conditions générales

Conformément à la recommandation émise par la 70<sup>ème</sup> Assemblée plénière de la CIPR des 8 et 9 juillet 2004 (CIPR, 2004), deux modèles d'écoulement d'ondes de crue sont utilisés comme modèle 'épine dorsale' dans le cadre de l'identification de l'efficacité des mesures de réduction des niveaux de crue extrêmes en 2005 dans le Rhin.

Le **modèle hydrologique SYNHP** calcule l'écoulement de l'onde entre les échelles de Bâle (PK 165 du Rhin) et Worms (PK 443 du Rhin) sur un tronçon de quelque 280 km. Ce modèle tient compte des principaux affluents, de surfaces inondables supplémentaires, d'espaces de rétention manœuvrables et des manœuvres exceptionnelles des usines du Rhin. L'hydrogramme calculé à hauteur de Worms par le modèle SYNHP est la donnée d'entrée du bassin amont pour le modèle hydrodynamique SOBEK (Worms – Pays-Bas). La LUBW est responsable de l'identification des effets de Bâle jusqu'à Worms.

L'écoulement des ondes entre Worms et les Pays-Bas a été calculé par la BfG à l'aide du **modèle hydrodynamique SOBEK**. Ce modèle simule le Rhin et ses principaux affluents, soit un linéaire de plus de 1500 km au total : 419 km sur le Rhin, 378 km sur le Main, 141 km sur la Lahn, 242 km sur la Moselle, 124 km sur le Nederrijn/Lek, 119 km sur l'IJssel et 92 km sur le Waal. Le tronçon de la Sarre long de 90 km dont tient compte le modèle SOBEK en tant qu'affluent de la Moselle n'a pas été simulé à l'aide du modèle SYNHP de la BfG. Au lieu de cela, le modèle Moselle a utilisé les hydrogrammes de l'échelle de la Sarre au débouché le plus proche. Le modèle SOBEK reproduit les effets non stationnaires des dispositifs de rétention (manœuvrables/non manœuvrables) et les impacts de remous des affluents (Main, Lahn, Moselle).

Les tronçons modélisés respectifs sont représentés dans la **Figure 2**. Les modèles SYNHP et SOBEK sont tous deux de bons instruments performants pour simuler les crues du Rhin. Les divergences significatives et/ou incertitudes portent presque exclusivement sur les valeurs de pointe (et non sur la forme de l'onde) et se situent dans l'ordre de grandeur des incertitudes des méthodes de mesure. Pour l'évaluation de ces résultats, il est indispensable de pouvoir comparer les états ACTUELS et SOUHAITES calculés à l'aide des modèles pour l'identification de l'efficacité des mesures de réduction des niveaux de crue. Dans le cadre d'une telle approche, les imprécisions entre simulation et données historiques ne jouent fondamentalement qu'un rôle secondaire.



**Figure 2: Tronçons fluviaux du modèle 'épine dorsale' dans le bassin versant du Rhin**

## Le modèle hydrologique SYNHP

Le modèle synoptique d'écoulement d'ondes de crue SYNHP a été mis au point par la Landesanstalt du Bade-Wurtemberg au début des années 80 pour le Rhin supérieur (Homagk, 1995). La BfG a ensuite développé d'autres modèles SYNHP pour les voies navigables fédérales.

Le modèle SYNHP est un modèle dit hydrologique dans lequel l'équation de mouvement est remplacée par l'approche de stockages individuels quasi-linéaires. Les stockages correspondent à des tronçons fluviaux spécifiques. Des rapports volume-débit, qui dépendent du débit, sont déterminés pour chaque ouvrage de stockage dans le cadre de l'élaboration du modèle. SYNHP requiert les débits comme donnée d'entrée et calcule ensuite par intervalle de temps (de manière synoptique) le débit de tronçons fluviaux choisis. Le modèle de cascades de stockage SYNHP (Bâle – Worms) est utilisé pour analyser les modifications de l'écoulement de la crue par suite de la mise en œuvre des espaces de rétention. Il est ainsi possible de prendre en compte les mesures de rétention actuelles et celles qui sont planifiées ou envisagées dans le futur. C'est le modèle de la Commission Permanente pour l'Aménagement du Rhin supérieur, utilisé pour déterminer les règlements de manœuvre. Il est géré par la LUBW. Si les débits d'une onde dépassent les conditions limites de « capacité de rétention du Rhin entre les digues », le modèle permet de limiter le débit de transit.

## Le modèle hydraulique SOBEK

Le modèle de débit hydrodynamique unidimensionnel SOBEK a été mis au point par WL/Delft Hydraulics et le Rijkwaterstaat - RIZA.

Dans le modèle SOBEK, les équations de Saint-Venant complètes sont résolues. L'équation de continuité et l'équation de mouvement sont résolues sous forme numérique dans ces équations différentielles partielles permettant de déterminer la ligne d'eau. Dans le modèle SOBEK, la méthode différentielle spécifique est utilisée selon la méthode Preissmann-Box (WL / Delft Hydraulics 2001). Le calcul des inconnues se fait de manière implicite. Le modèle SOBEK permet de déterminer les débits, les niveaux d'eau et les vitesses d'écoulement. Les mesures de réduction des niveaux de crue peuvent être prises en compte par le biais d'un propre module de rétention. Il permet de calculer les modifications non stationnaires du déroulement de l'onde, dues par exemple au remplissage d'un polder de rétention. On dispose également d'un module d'eaux souterraines pour tenir compte des processus d'échange entre les eaux fluviales et les eaux souterraines. Le modèle SOBEK utilisé pour le tronçon du Rhin entre Worms et les Pays-Bas est géré ici comme modèle combinant le modèle Rhin et les modèles partiels du Main, de la Lahn, de la Moselle et des cours d'eau néerlandais (Nederrijn, Lek, IJssel et Waal).

### Conditions générales du modèle 'épine dorsale'

Parmi les données générales, on fait la distinction dans les deux modèles SYNHP et SOBEK entre les conditions amont et latérales, étant entendu que celles-ci doivent être spécifiées sous forme d'hydrogrammes pour les calculs instationnaires qu'il convient de réaliser. Le modèle SOBEK exige comme condition aval une relation niveau d'eau/débit (tableau d'écoulement).

Les données des bassins latéraux représentent les apports et les écoulements rejoignant et/ou quittant le modèle 'épine dorsale' de manière ponctuelle ou diffuse (c'est-à-dire sous forme d'apport de débit par mètre courant de linéaire fluvial). Il s'agit ici d'apports d'affluents (cours d'eau avec nœud; prise en compte ponctuelle), d'apports d'eau de surface (bassins intermédiaires ; en général apport diffus) et de l'échange d'eau avec la nappe souterraine dont il est tenu compte dans un propre module de calcul (prise en compte diffuse).

Les hydrogrammes des affluents et/ou les nœuds d'affluent sont déterminés par le biais de l'échelle la plus proche de l'embouchure (échelle de référence), dans la mesure où l'on dispose de données. Dans les cours d'eau modélisés, il est tenu compte de la distance entre l'échelle et l'embouchure, dans la mesure où ceci est jugé important, sous forme de décalage du temps d'écoulement dans l'hypothèse d'une vitesse moyenne de l'onde de 1,5 – 2,0 m/s. Par ailleurs, on peut tenir compte du bassin versant d'un affluent non saisi par l'échelle de référence, à savoir entre le site de l'échelle et l'embouchure (par ex. par le biais d'un facteur d'amplification). D'autres apports d'affluents et de surfaces importantes en termes de débit, qui ne sont pas saisis par des échelles, sont intégrés au modèle par le biais de bassins dits intermédiaires. Ici aussi, pour pouvoir fournir des hydrogrammes, on utilise par ex. des hydrogrammes mesurés d'échelles voisines caractéristiques comme base de répartition / de forme. L'échange d'eau avec la nappe s'est avéré être un facteur non négligeable en cas de crue pour le tronçon modélisé entre Andernach et Lobith ; il en est donc tenu compte dans le modèle 'épine dorsale' comme condition générale supplémentaire (module 'eaux souterraines' interne à SOBEK).

Les données de tous les nœuds d'affluents proviennent des services hydrologiques des Länder fédéraux respectifs, de la France et de la Suisse. Elles sont fournies à la LUBW et à la BfG en différents formats et à des résolutions variables dans le temps. Pour les crues utilisées antérieures à 1995, les données n'étaient en partie disponibles que sous forme de valeurs moyennes journalières, notamment pour les tributaires de petite taille. Pour

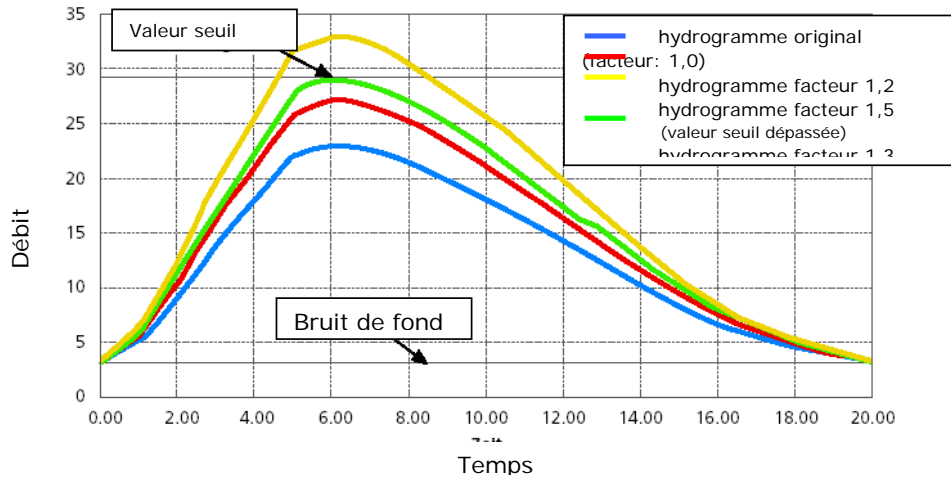
pouvoir tenir compte de manière adéquate dans le modèle 'épine dorsale' de l'impact sur le déroulement de l'onde de mesures de rétention réduisant le niveau de crue, il est nécessaire de disposer d'une résolution élevée (au moins horaire). Pour cette raison, toutes les données de débit disponibles sous forme de moyennes journalières ont été décomposées en valeurs horaires avant d'être introduites dans le modèle.

## 2. Génération de crues modélisées

Les crues modélisées devaient être définies avant que soient réalisés les calculs d'identification afin que l'on puisse générer synthétiquement un nombre suffisant de crues extrêmes dans le Rhin. La génération des crues modélisées s'est basée sur les crues historiques mentionnées dans le chapitre 3. Dans le processus de la génération, tous les hydrogrammes historiques des affluents du modèle 'épine dorsale' ainsi que les hydrogrammes des bassins amont du modèle ont été amplifiés par un facteur homogène pour chaque crue de manière à ce que le débit de pointe de la crue respective atteigne la valeur de pointe requise dans une station définie (échelle d'arrivée). La concomitance des différents hydrogrammes reste inchangée dans cette méthode itérative. Il convenait d'atteindre sur les cinq échelles d'arrivée les valeurs de pointe suivantes qui s'orientent sur les objectifs existants de protection contre les inondations :

- échelle de Maxau       $Q = 5200 \text{ m}^3/\text{s}$
- échelle de Worm       $Q = 6200 \text{ m}^3/\text{s}$
- échelle de Kaub       $Q = 8090 \text{ m}^3/\text{s}$
- échelle de Cologne     $Q = 12900 \text{ m}^3/\text{s}$  (avec en plus  $HQ_{100} = 12000 \text{ m}^3/\text{s}$ )
- échelle de Lobith     $Q = 16000 \text{ m}^3/\text{s}$

Pour ne pas générer de cas de figure aberrant en termes hydrologiques et hydrauliques, il a fallu respecter quelques conditions générales supplémentaires. En aval de l'échelle de Worms, on a retiré de l'amplification du débit les débits les plus faibles d'un hydrogramme comme charge de base spécifique (ou base de débit) afin de ne pas générer de débits irréalistes. Par ailleurs, des valeurs seuils ont été fixées pour délimiter les débits de manière judicieuse. Ceci signifie que, dans le cadre de la génération d'une crue modélisée, l'amplification du débit historique pour le cours d'eau concerné est terminée dès qu'est atteint ce débit maximal. Dans la mesure où la valeur de pointe requise n'est pas encore atteinte à l'échelle d'arrivée à ce stade itératif, seuls sont augmentés les facteurs des cours d'eau dont le débit maximal jugé possible n'est pas encore atteint. Pour les autres cours d'eau, le facteur reste constant au niveau maximal.



**Figure 3 :** Evolution de crues modélisées

Les crues modélisées et les facteurs d'amplification ont été déterminés pour l'état de référence 1995, c'est-à-dire compte tenu de tous les dispositifs de rétention réalisés jusque-là conformément aux dispositions du groupe Hval. Les facteurs issus de ces calculs s'appliquent sans modification à l'état 2005.

Pour les bras néerlandais du Rhin, on n'a pas déterminé les apports latéraux des différentes crues modélisées sur la base de facteurs d'amplification constants, mais on a utilisé une méthode de calcul mise au point par RIZA. Elle se base sur l'hydrogramme à l'échelle de Lobith et vise pour l'essentiel à garantir une répartition du débit dans les différents bras qui soit judicieuse au niveau hydrologique / hydraulique. La méthode (van der Veen et al., 2002 ; Schutte, 2001) se compose de trois étapes essentielles :

- Déterminer les deux principaux apports latéraux (Oude IJssel et canal de Twente) sur la base du contexte historique avec le débit à hauteur de Lobith
- Déterminer les autres apports latéraux sur la base de la superficie de leurs sous-bassins par rapport à la superficie des bassins de l'Oude IJssel et du canal de Twente
- Estimer la capacité d'écoulement et de prélèvement sur la base du débit à Lobith pour les différentes sources de prélèvement latérales.

Les hydrogrammes des affluents-nœuds néerlandais déterminés de cette manière représentent des états hydrologiques moyens pour le tronçon néerlandais du Rhin. Les calculs ont été effectués par RIZA et repris par la BfG dans le modèle 'épine dorsale' pour les différentes crues modélisées.

Les calculs de simulation aux fins de génération des crues modélisées ont été effectués intégralement par la BfG, c'est-à-dire également pour le tronçon modélisé SYNHP entre Bâle et Worms. Le modèle SYNHP utilisé pour l'état 1995 a été mis au point par la LUBW et remis au LUWG de Rhénanie-Palatinat et à la BfG.

### **3. Catégories de mesures et mesures réalisées (1995 – 2005) conformément au Plan d'action contre les inondations**

Dans le cadre des calculs d'identification de l'efficacité des mesures, il convient de considérer les catégories suivantes dans la mesure où leurs effets sur le débit de crue du Rhin sont quantifiables :

1. Rétention des eaux dans le bassin versant du Rhin (renaturer les cours d'eau, redynamiser les zones alluviales, extensifier l'agriculture, développer la nature et reboiser, désimperméabiliser, mettre en place des dispositifs techniques de rétention des crues)
2. Rétention des eaux dans le corridor fluvial (redynamiser les zones alluviales, mettre en place des dispositifs techniques de rétention des crues)

De par nature, le modèle 'épine dorsale' ne peut tenir compte directement que des mesures de la 2<sup>ème</sup> catégorie. L'effet des mesures faisant partie de la 1<sup>ère</sup> catégorie doit d'abord être déterminé par les Länder/Etats, par ex. à l'aide des modèles de bassin versant disponibles. Ces hydrogrammes influencés en conséquence sont mis à la disposition du modèle 'épine dorsale' aux nœuds sous forme de données d'entrée. On peut ainsi démontrer l'impact des deux catégories sur le déroulement d'une onde de crue dans le Rhin.

La BfG a mis à la disposition des Länder/Etats les hydrogrammes non influencés (état 1995) aux nœuds respectifs du modèle. Les Länder/Etats ont utilisé ces hydrogrammes pour démontrer l'impact des cours d'eau qui ne figurent pas dans le modèle 'épine dorsale' ou de mesures situées dans le bassin versant. Les hydrogrammes influencés par les mesures, fournis par les Länder/Etats, ont été repris par la BfG dans le modèle 'épine dorsale' afin que l'on puisse tenir compte également de l'impact de ces mesures.

Pour une grande partie des mesures entrant dans la catégorie 1, les évaluations réalisées par un sous-groupe de travail mis en place à l'initiative des Länder fédéraux impliqués ont montré que ces mesures ne contribuaient pas pour une part essentielle à la réduction des niveaux d'eau extrêmes du Rhin et qu'il n'était ni judicieux ni nécessaire d'identifier leur efficacité à l'aide de modèles techniques onéreux (voir annexe 2). De nombreuses études scientifiques (CHR, 2003, CIPR, 2005) montrent que les mesures visant à renaturer les cours d'eau, extensifier l'agriculture, développer la nature / reboiser et désimperméabiliser notamment ont uniquement de faibles impacts réducteurs à proximité immédiate de cours d'eau de petite taille. Ceci vient d'ailleurs étayer les estimations figurant dans le Plan d'action contre les inondations qui attribue à la catégorie de mesures « Rétention des eaux dans le bassin du Rhin » un impact relativement faible sur la réduction des niveaux de crue dans le Rhin (CIPR, 1999). Pour les deux catégories de mesures dans le bassin du Rhin « Redynamiser les zones alluviales » et « Mettre en place des dispositifs techniques de rétention des crues », les Länder ont tenté d'identifier sous forme mathématique l'efficacité de mesures importantes réalisées sur de grands affluents du Rhin. Dans l'ensemble, les mesures de rétention réalisées entre 1995 et 2005 et présentées dans le chapitre 4.3.1. suivant ont été prises en compte dans les calculs.

#### **Mesures de rétention entre Bâle et la mer du Nord**

Pour le tronçon du Rhin reliant Bâle à la mer du Nord, les mesures de rétention indiquées dans le tableau 3 et la figure 4 ont été prises en compte dans les calculs effectués à l'aide du modèle 'épine dorsale'. Il s'agit ici à la fois de mesures manœuvrables (polders, „manœuvres » des usines – par répartition du débit entre le Rhin et les canaux latéraux

et par rétention des eaux dans les zones de retenue au travers d'une commande optimisée des barrages) et de mesures non manoeuvrables (recul de digues, abaissement de la crête de digue) qui ont pour effet de remplir ou de vider les espaces de rétention en fonction du niveau des eaux du Rhin.

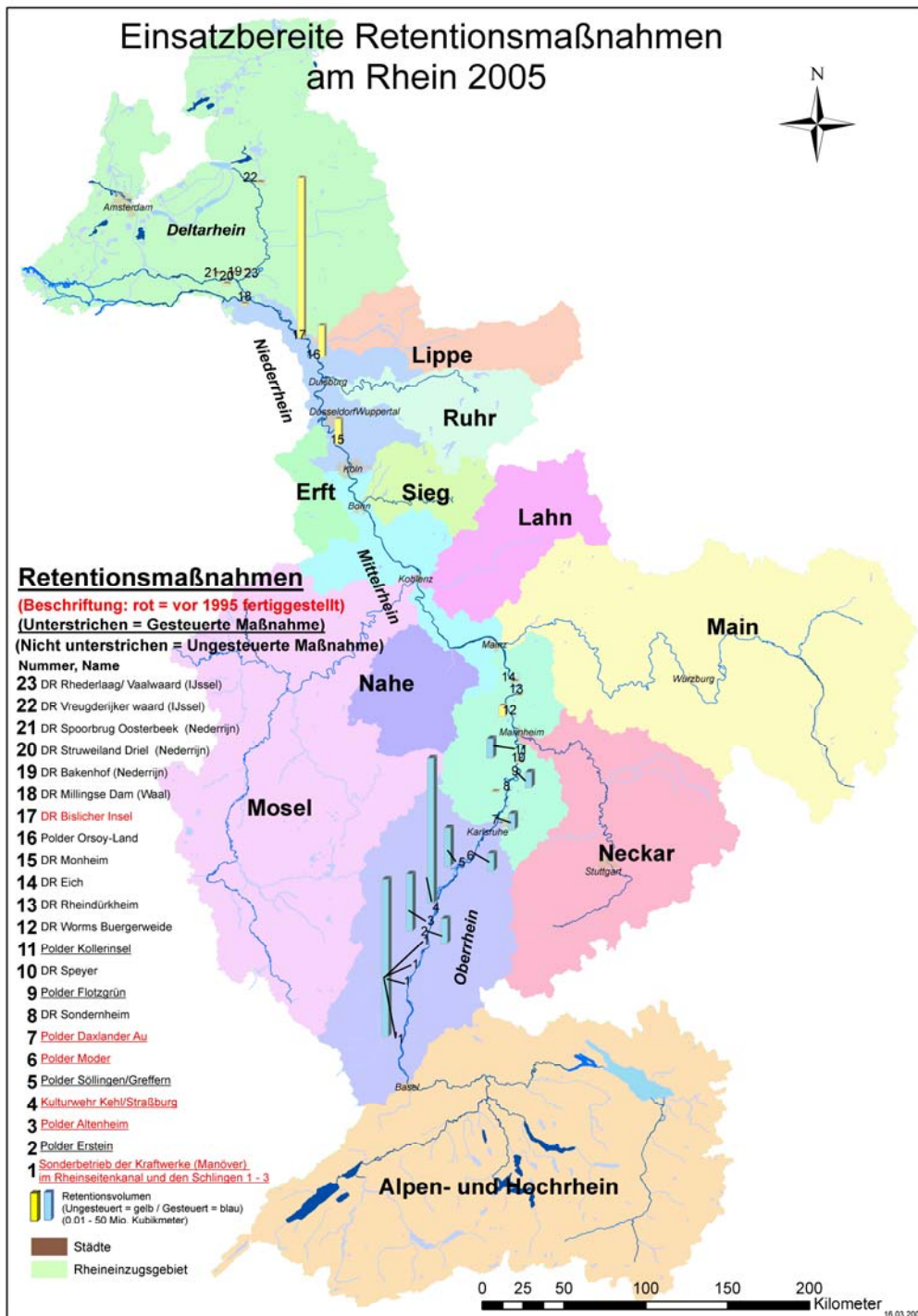
**Tableau 3 : Mesures de rétention sur le Rhin entre Bâle et la mer du Nord**

N°	PK du Rhin	Zone	Pays/ Land	Mesure	Type de mesure	Volume opérationnel [millions de m <sup>3</sup> ]	
						1995	2005
1	174,0	Rhin supérieur	F	Grand Canal d'Alsace	Manoeuvres exceptionnelles des usines du Rhin	45	45
	234 - 274		F	Feston 1 à 3	Manoeuvres exceptionnelles des usines du Rhin		
2	276,0		F	Erstein	Polder de rétention		7,8
3	278,4		D-BW	Altenheim	Polder de rétention	17,6	17,6
4	290,3		D-BW	Barrage agricole de Strasbourg/Kehl	Barrage agricole	13,0 / 37,0 <sup>1)</sup>	37,0
5	317,4		D-BW	Söllingen/Greffern	Polder de rétention		12,0
6	330,0		F	Moder	Polder de rétention	5,6	5,6
7	357,5		D-RP	Daxlander Au	Polder de rétention	5,1	5,1
8	379,6		D-RP	Sondernheim	Recul de digues		0,3
9	392,6		D-RP	Flotzgrün	Polder de rétention		5,0
10	403,2		D-RP	Speyer	Recul de digues		0,5
11	409,9		D-RP	Ile de Koller	Polder de rétention		6,1
12	440,2		D-RP	Worms Bürgerweide	Recul de digues		2,0
13	453,3		D-RP	Rheindürkheim	Recul de digues		0,01
14	467,3	D-RP	Eich	Recul de digues		0,41	
15	707,5	Rhin inférieur	D-NRW	Monheim	Recul de digues		8,0
16	797,5		D-NRW	Orsoy Land	Recul de digues		10,0
17	818,5		D-NRW	Ile de Bislich	Recul de digues	50,0 <sup>2)</sup>	50,0
18-23			NL	Mesures d'élargissement du lit fluvial sur env. 2 km <sup>2</sup> au total <sup>3)</sup>	Recul de digues, décaissement du lit majeur		~ 3
SOMME						136 / 160 <sup>1)</sup>	215

<sup>1)</sup> Barrage agricole de Kehl opérationnel jusqu'en 2002 enrégime régulier pour 13 millions de m<sup>3</sup>. 24 millions de m<sup>3</sup> supplémentaires utilisables uniquement en cas exceptionnel.

<sup>2)</sup> L'île de Bislich était déjà une zone inondable en période de crue du Rhin avant achèvement de la mesure.

<sup>3)</sup> D'autres mesures s'étendant sur env. 15 km<sup>2</sup> ont pour fonction primordiale de rehausser la capacité d'écoulement dans le delta du Rhin et n'ont aucun impact sur l'échelle d'arrivée de Lobith, ce qui explique pourquoi elles ne sont pas prises en compte dans le total du volume de rétention.



**Figure 4 :** Vue d'ensemble des mesures de rétention des eaux réalisées jusqu'en 2005 sur le Rhin

Dans le cas de mesures manoeuvrables, leur commande a été intégrée dans le modèle SYNHP conformément au règlement international respectif en vigueur dans les versions



de 1995 et de 2005 (LUBW, 2005, Homagk, 2000). La LUBW a mis en oeuvre le règlement et les mesures en concertation avec les Etats/Länder associés. C'est également elle qui a procédé pour le tronçon du Rhin compris entre Bâle et Worms à l'évaluation de la réduction des niveaux d'eau représentée dans le chapitre 6. Les hydrogrammes modifiés en conséquence pour l'état 2005 ont été transmis et utilisés à l'échelle de Worms comme conditions générales premières.

## **Mesures sur le cours principal du Rhin**

Sur le tronçon du Rhin compris entre l'échelle de Bâle et la mer du Nord, les mesures de rétention achevées depuis 1995 et en partie décrites sommairement dans les paragraphes suivants ont été introduites dans le modèle 'épine dorsale'.

### Polder d'Erstein :

Le polder d'Erstein situé sur territoire français au sud de Strasbourg à hauteur du PK 276 du Rhin a été rendu opérationnel fin 2004. Il s'étend sur les communes d'Erstein, de Plobsheim et de Nordhouse et couvre une superficie d'environ 600 ha. Son volume de rétention s'élève à 7,8 millions de m<sup>3</sup>. Sa mise en eau est manœuvrées mais des inondations écologiques sont également possibles.

### Barrage agricole de Kehl :

La barrage agricole de Kehl, situé en Bade-Wurtemberg est déjà entré en service en 1998. Avec un volume de rétention de 37 millions de m<sup>3</sup>, il représente la plus grande mesure individuelle de rétention manœuvrable des crues sur le Rhin supérieur. Jusqu'en 2002, il n'était prévu en régime régulier qu'une rétention maximale de 13 millions de m<sup>3</sup> des eaux de crue, le règlement franco-allemand alors en vigueur stipulant que les 24 millions de m<sup>3</sup> restants devaient être exclusivement réservés aux débits de crues extrêmes. Etant donné que les crues modélisées par Hval pour les variantes retenues à l'échelle de Maxau correspondent à ces critères, on a introduit dans les calculs des analyses de Hval pour l'état 1995 un volume de rétention de 37 millions de m<sup>3</sup> pour le barrage agricole de Kehl. les calculs effectués reposent donc sur des bases solides. Depuis 2002, les mesures constructives prises sur territoire français font que le barrage agricole de Kehl peut être activé, le cas échéant, avec son volume total de rétention.

### Polder de Söllingen/Greffern:

Entre les PK 317,4 et 329,5 du Rhin, il a été créé un volume de rétention de 12,0 millions de m<sup>3</sup> sur une surface de 580 ha. Les mesures partielles les plus importantes se composent de quatre ouvrages de prise d'eau du Rhin dans le polder et de trois stations de pompage. Au total, on dénombre environ 100 nouvelles mesures constructives, ponts et digues ainsi qu'un poste central de commande pour l'exploitation du polder. Le polder a été inauguré en novembre 2005. Une opération de rétention manœuvrée est déclenchée en situation de crue importante ; sont prévues en outre des « inondations écologiques (régulières) » en période de débits surélevés du Rhin.

### Recul de digue à hauteur de Sondernheim (PK 379,6 du Rhin) :

Une opportunité de recul de digue s'est présentée à hauteur de Sondernheim dans le cadre de la consolidation des digues principales du Rhin. La digue en retrait a été mise en place sur une longueur d'env. 0,6 km. L'ancienne digue, quant à elle, a été retirée sur env. 250 m. Le gain en volume de rétention est d'env. 290.000 m<sup>3</sup>.

### Polder de Flotzgrün:

L'espace de rétention est situé sur une île née de la correction du Rhin de Tulla. Cette île est au sud de Speyer à hauteur du PK 392 du Rhin. L'espace de rétention a été inauguré en septembre 2002. Ce polder, d'un volume de 5,0 millions de m<sup>3</sup> compte parmi les mesures contractuelles de restauration du niveau de protection contre les inondations antérieur à l'aménagement du Rhin supérieur. La mise en eau de l'espace de rétention passe par deux ouvrages de prise d'eau indépendants respectivement placés au nord et

au sud de l'île. En exploitation, les ouvrages sont maintenus ouverts en permanence, de sorte que le polder se vide à mesure que décroît l'onde de crue.

Recul de digue à hauteur de Speyer (PK 403,2 du Rhin) :

Une digue rejoignant la levée de l'autoroute A 61 a été mise en retrait au nord de Speyer. La nouvelle digue est longue d'env. 1,1 km. La surface de rétention obtenue représente env. 22 ha et son volume avoisine les 450.000 m<sup>3</sup>.

Polder de l'île de Koller :

L'espace de rétention est situé sur une île née de la correction du Rhin de Tulla. Cette île est au sud d'Altrip à hauteur du PK 410 du Rhin. L'espace de rétention a été inauguré en juillet 2005. Ce polder, d'un volume de 6,1 millions de m<sup>3</sup> compte parmi les mesures contractuelles de restauration du niveau de protection contre les inondations antérieur à l'aménagement du Rhin supérieur. La mise en eau de l'espace de rétention est commandée par un double ouvrage de prise d'eau. En exploitation, les ouvrages sont maintenus ouverts en permanence, de sorte que le polder se vide à mesure que décroît l'onde de crue. Les parties basses de l'île de Koller peuvent être submergées plusieurs fois par an par des inondations écologiques.

Recul de digues à Worms-Bürgerweide (PK 440,5 du Rhin) :

Une opération de recul de digue a eu lieu dans les cadre des mesures de protection contre les inondations au sud de Worms. La digue a été ouverte sur env. 1,2 km et remplacée par une digue placée en retrait sur une longueur d'env. 3 km. Le gain de volume de rétention est de l'ordre de 2 millions de m<sup>3</sup>.

Adaptation des digues à hauteur de Rheindürkheim (PK 453,3 du Rhin) :

Dans le périmètre communal d'Ibersheim, la digue des hautes eaux a été déplacée vers le fleuve sur env. 1,2 km de longueur. La perte d'espace de rétention (51.000 m<sup>3</sup>) consécutive au rapprochement de la digue vers le fleuve a été compensée par un gain de volume de 63.000 m<sup>3</sup> obtenu grâce au recul d'une digue plus en amont sur 620 m de long. On obtient donc un gain net d'espace de rétention d'env. 12.000 m<sup>3</sup>.

Abaissement de la crête de digue à hauteur d'Eich (PK 467,3 du Rhin) :

La crête de la digue des hautes eaux a été abaissée sur env. 50 m (au PK 467) au niveau de la digue d'été (env. 88,10 m + NN). Il en résulte un gain de volume de 410.000 m<sup>3</sup>.

Adaptation des digues à hauteur de Monheim (PK 707,5 du Rhin) :

A hauteur de Monheim (entre les PK 707,5 et 711,5 du Rhin), l'ancienne digue principale a été transformée en digue de guidage avec une crête de digue de 42,77 m + NN). L'ancienne digue principale a été retirée du PK 711,5 au PK 713,5). L'eau s'écoule à présent dans l'espace de rétention de 185 ha (env. 8 millions de m<sup>3</sup>) constitué au niveau de la digue de guidage retirée à partir d'une hauteur d'env. 37,30 m + NN. Quand le niveau des eaux atteint 42,77 m + NN au PK 708,5 (limite amont de l'ouvrage de Monheim), un processus hydraulique supplémentaire entre en action avec la submersion de la nouvelle digue de guidage, ce qui se traduit par l'inondation de toute la zone.

Recul de digues à hauteur de Orsoy Land (PK 797,5 du Rhin) :

Au niveau de la boucle du Rhin à Orsoy, la digue d'hiver en place a été reculée entre les PK 797,5 et 803,5 du Rhin. La digue de guidage avec ses niveaux définis d'entrée et de sortie des eaux a été conservée. L'espace de rétention ainsi obtenu est rempli et vidé en fonction du niveau d'eau du Rhin.

Mesures dans les bras néerlandais du Rhin :

A la suite de la crue de 1995, les Pays-Bas ont élaboré le « Deltaplan Grote Rivieren » (plan delta pour les grands fleuves) dans le but de consolider les digues et d'ajuster le niveau de protection. Les mesures ont été réalisées en partie sous forme de recul de digues. Seules les mesures effectuées dans la zone de Lobith pour élargir le lit fluvial ont été intégrées à la demande du RIZA dans le modèle SOBEM appliqué aux bras du Rhin (HKV, 2005) et pris en compte dans les calculs. Les mesures mises en oeuvre aux Pays-Bas sont de reculs de digues, des décaissements du lit majeur et des élargissements du profil d'écoulement. Ces mesures ont intégralement été prises en compte comme modifications du profil transversal.

**Mesures dans le bassin versant**

Entre 1995 à 2005, le bassin de rétention 'Mittleres Kinzigtal' (RMK) a été mis en place dans la partie bade-wurtembergeoise du bassin du Rhin supérieur. On attend de cette mesure un certain impact, même s'il reste faible, sur la crête de l'onde de crue du Rhin. L'analyse du collectif de crues (chapitre 3) montre cependant qu'il n'y a eu en aucun cas de crue de la Kinzig susceptible d'entraîner la mise en eau du bassin RMK. Le Bade-Wurtemberg ne va donc pas effectuer de modifications quantitatives des hydrogrammes des débits entrants au niveau des affluents raccordés (nœuds) au modèle 'épine dorsale' du fait des mesures entrant dans la catégorie 1.

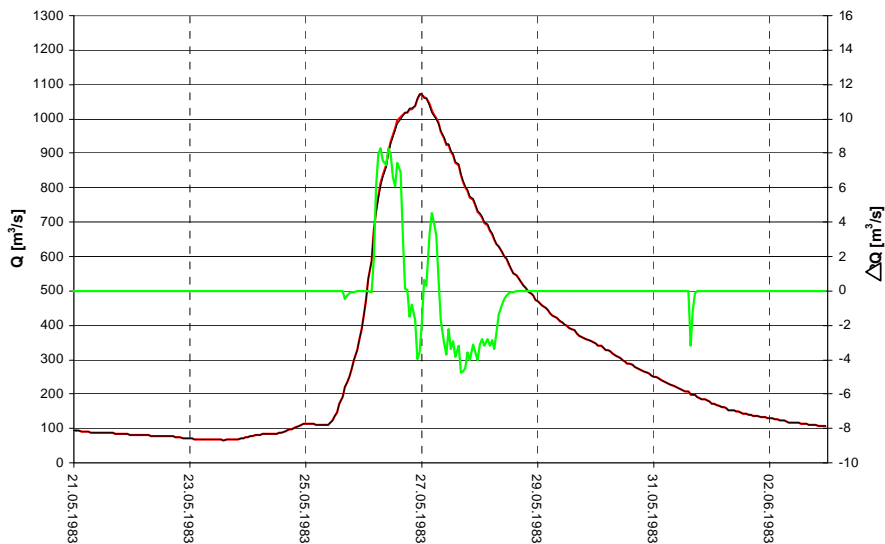
La Suisse, la France, la Rhénanie-Palatinat et la Hesse n'ont pas non plus mentionné, pour la zone allant jusqu'à Worms, de mesures de réduction des crues prises dans le bassin susceptibles d'avoir un impact décelable sur l'évolution des crues du Rhin. En amont de Worms, les hydrogrammes des affluents nœuds de l'état 1995 sont donc identiques à ceux de l'état 2005.

Nahe :

Le Land de Rhénanie-Palatinat a fait rapport d'une mesure importante sur la Nahe (débouché au PK 529,1 du Rhin). Il s'agit d'une mesure visant à protéger la ville de Bad Kreuznach (située à env. 20 km en amont du débouché de la Nahe dans le Rhin) contre les inondations. Cette mesure a été accompagnée entre 1995 et 2005 d'aménagements hydrauliques du profil d'écoulement de la Nahe et d'adaptations apportées aux murs de protection contre les inondations (travaux achevés en 2004). Les mesures réalisées font que la ville est protégée contre les crues jusqu'à un débit d'env. 1000 m<sup>3</sup>/s. Les débits dépassant ce niveau continueront cependant à s'écouler dans « l'espace de rétention de la ville de Bas Kreuznach ».

Pour identifier l'impact hydraulique de cette mesure sur les hydrogrammes de crue pour l'état 2005, le LUWG a mis en place un modèle de stockage « quasiment non linéaire » de Bad Kreuznach à l'échelle de référence de Grolsheim afin de prendre en compte le comportement de l'hydrosystème avant et après les aménagements. Pour déterminer l'hydrogramme de la Nahe à hauteur de son débouché dans le Rhin, on a simulé l'état 1995 à contre-courant de l'échelle de Grolsheim à Bad Kreuznach. On a ensuite à nouveau effectué les calculs en sens inverse de Bad Kreuznach à l'échelle de Grolsheim avec des paramètres modifiés pour obtenir les hydrogrammes correspondant à l'état 2005. D'après les calculs, la mesure de « protection contre les inondations Bad Kreuznach » fait que la perte « d'espace de rétention » de 650 m<sup>3</sup>/s à 1000 m<sup>3</sup>/s se traduit sur le Rhin par une légère accélération de l'onde et une légère hausse de débit dans la Nahe (< 5 m<sup>3</sup>/s en débit de pointe). En revanche, les débits supérieurs à 1000 m<sup>3</sup>/s sont à nouveau légèrement atténués (de 3 m<sup>3</sup>/s au maximum en débit de pointe).

Pour illustrer cet impact, on renverra à la figure 5 reproduisant les effets de la mesure prise à Bad Kreuznach au travers des hydrogrammes de l'échelle de Grolsheim sur la Nahe ainsi que de l'hydrogramme résultant de la différence entre les deux états (variante de crue modélisée Hw83\_KB\_A).



**Figure 5 :** Impact de la mesure Bad Kreuznach illustrée par les hydrogrammes de l'échelle de Grolsheim sur la Nahe (en noir : état 1995, en rouge : état 2005, en vert : hydrogramme de différence de débit; Hw83\_KB\_A)

#### Cours supérieur de la Lahn et Kleebach

Les mesures rapportées par le Land de Hesse dans le bassin du cours amont de la Lahn (en amont de l'échelle de Gießen) et au niveau du débouché du Kleebach dans la Lahn (à env. 3 km en aval de l'échelle de Gießen) ont été réalisées à partir de 1998 dans le cadre du projet 'Lahn' (Tönsmann, Lang, 2002).

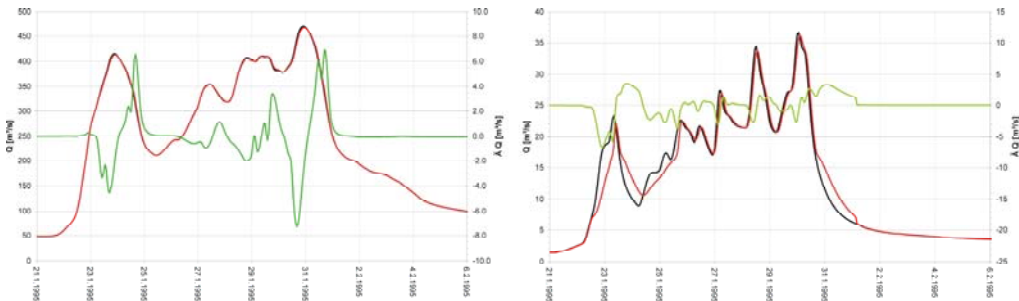
Un volume de rétention d'env. 287 000 m<sup>3</sup> a ainsi été créé dans le bassin du Kleebach en septembre 2001 au travers de la construction d'un bassin de rétention sur le territoire de la localité d'Allendorf. S'étendant sur 161 km<sup>2</sup>, ce bassin couvre pratiquement tout le bassin versant du Kleeblatt (165 km<sup>2</sup>). En plus d'améliorer la situation de protection contre les inondations, cette mesure a permis de restaurer le segment de rivière concerné et de valoriser son caractère écologique. Sur le cours supérieur de la Lahn, les 5 mesures mentionnées dans le tableau 4 ont été réalisées entre 1995 et 2005.

A l'exception de la mesure n° 3 (mise en place d'espaces de rétention dans le bassin de la Lumda), tous les projets sont directement reliés à la Lahn. Il s'agit ici tout particulièrement de la redynamisation d'anciens bras et de mesures de recul de digues permettant d'agrandir les capacités d'emmagasinement de ce cours d'eau. Comparée aux actions sur le Kleebach, la mesure réalisée sur la Lumda consiste en la construction de petits espaces de rétention. Au total, on obtient un gain de volume de rétention d'env. 680 000 m<sup>3</sup> en amont de l'échelle de Gießen par rapport à l'état 1995.

**Tableau 4 : Mesures de rétention dans le bassin du Kleebach et de la Lahn en amont de l'échelle de Gießen**

n° courant	Responsable des mesures	Description	Volumes de rétention
1	Commune de Lahntal	Restauration du milieu alluvial sur la rive gauche de la Lahn entre Sterzhausen et Caldern par redynamisation du régime de crue	200 000 m <sup>3</sup>
2	Commune de Fronhausen	Raccordement de l'ancien bras de la Lahn à hauteur de Belnhausen	10 000 m <sup>3</sup>
3	Communauté de communes de Lumda	Mise en place d'espaces de rétention dans le bassin de la Lumda	134 000 m <sup>3</sup>
4	Ville de Marburg	Recul des digues de la Lahn à hauteur de Wehrda	160 000 m <sup>3</sup>
5	Commune de Fronhausen	Recul de digues et raccordement de l'ancien bras „Schenkenwäldchen“ à l'hydrosystème de la Lahn	176 000 m <sup>3</sup>
			<b>Σ 680 000 m<sup>3</sup></b>

Pour évaluer l'efficacité hydraulique des mesures mentionnées (achèvement en 2001/2002) à hauteur de l'échelle de Gießen et au débouché du Kleebach dans la Lahn, le Leichtweiss-Institut für Wasserbau de l'université technique de Braunschweig a effectué à la demande du HLOG sur la base de la crue de 1995 une série de calculs comparatifs de l'état 1995 et l'état 2005 pour les crues modélisées en utilisant le modèle en place du bassin de la Lahn (modèle de transformation pluies-débits NAXOS). Pour les 8 crues modélisées, les calculs ont débouché sur 5 paires d'hydrogrammes différentes (1995-2005), les hydrogrammes du Kleebach et de la Lahn étant identiques pour quelques crues modélisées. La figure 6 montre de manière exemplaire les résultats des calculs effectués par le Leichtweiss-Institut pour la crue modélisée à partir de la crue de 1995 et amplifiée à l'échelle d'arrivée de Lobith.



**Figure 6 : Impact des mesures sur le cours amont de la Lahn (à gauche) et du Kleebach (à droite) (en noir : état 1995, en rouge : état 2005, en vert : hydrogramme des différences de niveau d'eau ; HW95\_LOB)**

En l'absence de données de précipitations, le Leichtweiss-Institut n'a pas pu effectuer de calculs de modélisation pour les crues modélisées à partir des crues de 1983 et de 1988. En accord avec le HLOG, la BfG a donc mis au point une méthode permettant d'estimer de manière simplifiée l'impact des mesures sur les crues modélisées de 1983 et de 1988 en se fondant sur les résultats de calcul de la crue de 1995. Cette méthode se fonde pour

l'essentiel sur des déductions analogiques et des corrélations sur la réduction du débit de pointe, l'amplitude de la crue et le retard des temps de passages du débit de pointe.

La Suisse, la France, le Bade-Wurtemberg, la Rhénanie-Palatinat, la Sarre, la Hesse, la Bavière et la Rhénanie-du-Nord-Westphalie, de même que les Pays-Bas, n'ont pas non plus mentionné, pour la période comprise entre 1995 et 2005, d'autres mesures de réduction des crues mises en œuvre dans le bassin que celles déjà signalées et susceptibles d'avoir un impact décelable sur l'évolution des crues du Rhin. A l'exception des exceptions signalées, les hydrogrammes des affluents noeuds de l'état 1995 sont donc identiques à ceux de l'état 2005.

#### **4. Estimation de l'efficacité des mesures de réduction des niveaux d'eau réalisées sur le Rhin supérieur entre 1977 et 2005**

Bien que le PAI mentionne 1995 comme année de référence pour les quatre objectifs opérationnels (CIPR 1998), on retient que des mesures avaient déjà été réalisées sur le Rhin supérieur entre 1977 (fin de l'aménagement du Rhin supérieur sans encore aucune mesure de rétention) et 1995. Les mesures de rétention réalisées sur le Rhin ont été mises à l'épreuve avec succès pour la première fois lors de la crue de mars 1988. Les trois-quarts du volume de rétention disponible en 2005 jusqu'à Worms étaient déjà opérationnels en 1995 (voir tableau 3). Ces mesures déjà mises à contribution en 1995 ne sont logiquement pas prises en compte dans le cadre des présentes études examinant des différences survenues entre les états 1995 et 2005.

En regard de ce fait non négligeable, on a estimé à l'aide de crues modélisées sélectionnées quel était, en termes d'efficacité, l'effet des mesures déjà réalisées avant 1995 sur la réduction de crues extrêmes dans le Rhin. La LUBW a calculé l'état 1977 en ne tenant pas compte/annulant toutes les mesures dans le modèle SYNHP entre Bâle et Worms. L'état 1995 dans le modèle SOBEK (Worms - Pays-Bas) est pratiquement équivalent à l'état 1977 étant donné qu'exception faite de l'« île de Bislich » aucune mesure ayant un impact sensible n'a été réalisée en aval de Worms entre 1977 et 1995.

Les crues modélisées qu'il convient d'utiliser aux fins de continuité peuvent entraîner pour l'état 1977 (pas de mesures ayant un impact réducteur sur le niveau d'eau) un dépassement des valeurs seuils fixées par Hval. Eu égard à l'interprétation des résultats, il convient de garder à l'esprit que les conditions à la base de la comparaison n'ont pas été complètement homogénéisées. Toutefois, les restrictions mentionnées dans le cadre de « l'estimation » réalisée dans le présent cas sont jugées négligeables.

Le volume de rétention créé entre 1977 et 1995 correspond à quelque 110 millions de m<sup>3</sup> sur le Rhin supérieur. Est venu s'y ajouter au cours des 10 années suivantes entre 1995 et 2005 un volume de rétention supplémentaire de 34 millions de m<sup>3</sup>. LUBW a effectué des calculs à l'aide du modèle SYNHP pour le tronçon du Rhin supérieur reliant Bâle et Worms. Ces calculs correspondent à l'état 1977, c'est-à-dire sans mesures de rétention. La comparaison entre 1977 et 2005 montre que l'impact global de toutes les mesures de rétention réalisées jusqu'en 2005 peut réduire la pointe de crue de 61 cm au plus à l'échelle de Maxau et de 40 cm au plus à l'échelle de Worms (voir tableau 5).

Pour le Rhin moyen et le Rhin inférieur, on a calculé l'écoulement de l'onde pour 6 crues modélisées (variante Maxau\_A et Worms\_A des crues de 1983, 1988 et 1995) à l'aide du modèle SOBEK. Les calculs ont montré que les mesures réalisées sur le Rhin supérieur entre 1977 et 2005 avaient des impacts correspondants jusque dans le Rhin inférieur. En 2005, les réductions maximales du niveau d'eau atteintes par rapport à 1977 vont ainsi jusqu'à 56 cm à l'échelle de Kaub, 36 cm à celle de Cologne et 13 cm à l'échelle de Lobith.

**Tableau 5 : Impacts des mesures de réduction des niveaux d'eau sur les pointes de crue en 2005 par rapport à 1977**

Echelle	Modifications minimales/maximales de niveau d'eau [en cm] entre l'état 1997 et l'état 2005 pour les crues modélisées analysées par Hval					
	pour un HQ <sub>100</sub>		pour un HQ <sub>200</sub>		pour un HQ <sub>1000</sub>	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Maxau	-25	-61	-49	-56	pas de variante Hval	
Worms	-30	-40	-23	-40	pas de variante Hval	
Kaub	-52	-56	-26	-33	pas de variante Hval	
Cologne	-21	-36	-20	-20	pas de variante Hval	
Lobith	pas de variante Hval		-13	-13	pas de variante Hval	

## Variantes de calcul

Les calculs effectués pour évaluer l'efficacité des mesures de réduction des crues extrêmes dans le Rhin se fondent, comme présenté dans le chapitre 4.2, sur l'utilisation de crues modélisées. Le groupe d'experts Hval de la CIPR a déterminé les variantes de calcul suivantes :

Les crues de 1983, 1988, 1995 sont analysées sur l'ensemble de la zone étudiée depuis l'échelle de Bâle jusqu'à la mer du Nord. Conformément à la méthode décrite, on obtient ainsi un groupe de 15 crues modélisées ((3 crues (1983, 1988, 1995) x 5 échelles d'arrivée (Maxau, Worms, Kaub, Cologne, Lobith)). Par ailleurs, ces crues doivent également être intégrées dans les calculs d'efficacité conformément à leur déroulement historique, c'est-à-dire sans amplification (3 variantes supplémentaires). Pour obtenir des résultats fiables pour le tronçon du Rhin moyen également, il a été décidé d'ajouter le HQ<sub>100</sub> (12000 m<sup>3</sup>/s) comme variante de calcul supplémentaire pour l'échelle d'arrivée de Cologne. En effet, la ville de Neuwied dispose depuis 1931 de dispositifs de protection contre les crues d'une récurrence de 100 ans ; en cas de crues rares, la protection ne serait plus assurée. Ceci entraîne 3 variantes de calcul supplémentaires (1 variante par crue). Par ailleurs, il a été décidé de distinguer fondamentalement deux variantes de crues modélisées : Une variante A dans laquelle l'amplification des affluents se fait uniquement jusqu'à l'échelle d'arrivée et tous les affluents en aval sont intégrés dans le modèle par le biais de leurs hydrogrammes historiques, et une variante B avec un facteur d'amplification constant pour tous les affluents modélisés (également en aval de l'échelle d'arrivée). Cette différenciation n'a pas été faite pour le débit de pointe HQ<sub>100</sub> à l'échelle de Cologne (seul est intéressant dans ce cas le tronçon du Rhin moyen situé en amont) et à l'échelle la plus en aval, celle de Lobith, ce qui fait augmenter de 12 le nombre de variantes (3 crues x 4 échelles d'arrivée : Maxau, Worms, Kaub, Cologne).

Par ailleurs, pour le Rhin supérieur entre les échelles de Bâle et Worms, on a également pris en compte les crues de 1978 et 1999. De manière similaire à ce qui a été présenté plus haut, on obtient de ce fait 6 autres variantes de calcul (2 crues x 2 échelles d'arrivée : Maxau, Worms + 2 crues historiques). Ici aussi, à l'exception de l'échelle d'arrivée la plus en aval, soit Worms, on a différencié les variantes A et B, ce qui a fait augmenter de 2 le nombre de variantes (2 crues x 1 échelle d'arrivée : Maxau). On en arrive ainsi à un total de **41 variantes de calcul**. Pour chacune de ces crues, la BfG ou la LUBW a effectué une comparaison arithmétique entre l'état de référence 1995 et l'état 2005, ce qui a rendu nécessaire **82 opérations de calcul**.

Pour pouvoir manier plus facilement et documenter durablement ce grand nombre de calculs et les résultats en découlant, on a élaboré la nomenclature présentée dans la

figure 7. Celle-ci indique précisément les différentes variantes de calcul et le nombre de calculs nécessaires.



**Figure 7 :**                    **Nomenclature des opérations de calcul Hval**



Dans le cadre des calculs d'efficacité, le groupe d'experts Hval de la CIPR a décidé en principe de renoncer à la prise en compte dans le modèle technique des effets de submersion de digues. Si les valeurs seuils sont respectées aux cinq échelles d'arrivée, on suppose, dans le cadre des calculs effectués ici, que le débit peut s'écouler entre les digues (si elles existent) sur le tronçon situé entre ces échelles. En cas de submersion de digues ou de dépassement sensible des valeurs seuils à l'une des échelles d'arrivée, il a été décidé de ne pas tenir compte de cette variante de calcul dans l'évaluation de l'efficacité des mesures de réduction des niveaux d'eau. Si une digue est submergée, on ne peut en principe séparer les effets de rétention dus à la submersion des effets engendrés par les autres mesures de réduction des crues. C'était pourtant le but précis des analyses réalisées.

L'échelle de Cologne est particulière. Pour pouvoir atteindre techniquement le débit visé de 16000 m<sup>3</sup>/s à l'échelle de Lobith, on a décidé d'amplifier la valeur seuil réelle à l'échelle de Cologne (valeur théorique de 12900 m<sup>3</sup>/s) (en s'écartant ici de la règle générale qui stipule qu'il ne faut pas dépasser la valeur seuil à l'échelle) à 15000 m<sup>3</sup>/s. Si la valeur seuil du débit a été dépassée à certaines échelles d'arrivée, elle est signalée en rouge (dans le tableau 7) et il n'a pas été tenu compte de la variante dans les travaux d'identification de l'efficacité des mesures.

On a renoncé ici à affecter l'efficacité des mesures de réduction des niveaux d'eau aux catégories « dans le bassin du Rhin » et « dans le corridor fluvial », telles qu'elles sont mentionnées dans le PAI. Aucun pays/Land n'a déclaré pour le tronçon reliant Bâle et Worms de mesures dans le bassin versant dont l'impact est décelable mathématiquement (chapitre 4.3) – la seule exception étant le bassin de rétention de la Kinzig qui ne joue cependant aucun rôle dans le cadre des conditions applicables aux crues modélisées. Les mesures déclarées et prises en compte dans les calculs modélisés, à savoir sur les trois rivières (nœuds du modèle) Nahe, Lahn / échelle de Gießen et Kleebach (chapitre 4.3) ont une efficacité jugée faible sur le niveau d'eau dans le Rhin. Le tableau 6 présente la matrice complète des variantes de calcul convenue au sein du groupe Hval. Y figurent les différents calculs réalisés par la BfG et la LUBW conformément à la nomenclature définie.

**Tableau 6 : Matrice des 41 variantes de calcul et des 82 opérations de calcul**

	Zielpegel	historisch	Maxau		Worms		Kaub		Köln			Lobith
Hochwasser		keine Vergrößerung	Vergrößerung bis zum Zielpegel (Var. A)	Vergrößerung im Gesamtmodell (Var. B)	Vergrößerung bis zum Zielpegel (Var. A)	Vergrößerung im Gesamtmodell (Var. B)	Vergrößerung bis zum Zielpegel (Var. A)	Vergrößerung im Gesamtmodell (Var. B)	Vergrößerung bis zum Zielpegel (Var. A)	Vergrößerung im Gesamtmodell (Var. B)	Vergrößerung auf HQ100 am Zielpegel	Vergrößerung auf Zielpegel
HW 1983	Zustand 1995	HW83_HIS_Z95	HW83_MAX_Z95_A	HW83_MAX_Z95_B	HW83_WO_Z95_A	HW83_WO_Z95_B	HW83_KB_Z95_A	HW83_KB_Z95_B	HW83_K_Z95_A	HW83_K_Z95_B	HW83_K_Z95_HQ100	HW83_LOB_Z95
	Zustand 2005	HW83_HIS_Z05	HW83_MAX_Z05_A	HW83_MAX_Z05_B	HW83_WO_Z05_A	HW83_WO_Z05_B	HW83_KB_Z05_A	HW83_KB_Z05_B	HW83_K_Z05_A	HW83_K_Z05_B	HW83_K_Z05_HQ100	HW83_LOB_Z05
HW 1988	Zustand 1995	HW88_HIS_Z95	HW88_MAX_Z95_A	HW88_MAX_Z95_B	HW88_WO_Z95_A	HW88_WO_Z95_B	HW88_KB_Z95_A	HW88_KB_Z95_B	HW88_K_Z95_A	HW88_K_Z95_B	HW88_K_Z95_HQ100	HW88_LOB_Z95
	Zustand 2005	HW88_HIS_Z05	HW88_MAX_Z05_A	HW88_MAX_Z05_B	HW88_WO_Z05_A	HW88_WO_Z05_B	HW88_KB_Z05_A	HW88_KB_Z05_B	HW88_K_Z05_A	HW88_K_Z05_B	HW88_K_Z05_HQ100	HW88_LOB_Z05
HW 1995	Zustand 1995	HW95_HIS_Z95	HW95_MAX_Z95_A	HW95_MAX_Z95_B	HW95_WO_Z95_A	HW95_WO_Z95_B	HW95_KB_Z95_A	HW95_KB_Z95_B	HW95_K_Z95_A	HW95_K_Z95_B	HW95_K_Z95_HQ100	HW95_LOB_Z95
	Zustand 2005	HW95_HIS_Z05	HW95_MAX_Z05_A	HW95_MAX_Z05_B	HW95_WO_Z05_A	HW95_WO_Z05_B	HW95_KB_Z05_A	HW95_KB_Z05_B	HW95_K_Z05_A	HW95_K_Z05_B	HW95_K_Z05_HQ100	HW95_LOB_Z05
HW 1978	Zustand 1995	HW78_HIS_Z95	HW78_MAX_Z95_A	HW78_MAX_Z95_B	HW78_WO_Z95	-	-	-	-	-	-	-
	Zustand 2005	HW78_HIS_Z05	HW78_MAX_Z05_A	HW78_MAX_Z05_B	HW78_WO_Z05	-	-	-	-	-	-	-
HW 1999	Zustand 1995	HW99_HIS_Z95	HW99_MAX_Z95_A	HW99_MAX_Z95_B	HW99_WO_Z95	-	-	-	-	-	-	-
	Zustand 2005	HW99_HIS_Z05	HW99_MAX_Z05_A	HW99_MAX_Z05_B	HW99_WO_Z05	-	-	-	-	-	-	-

## Résultats de calcul

### 5. Abaissement des débits de crue et des niveaux de crue

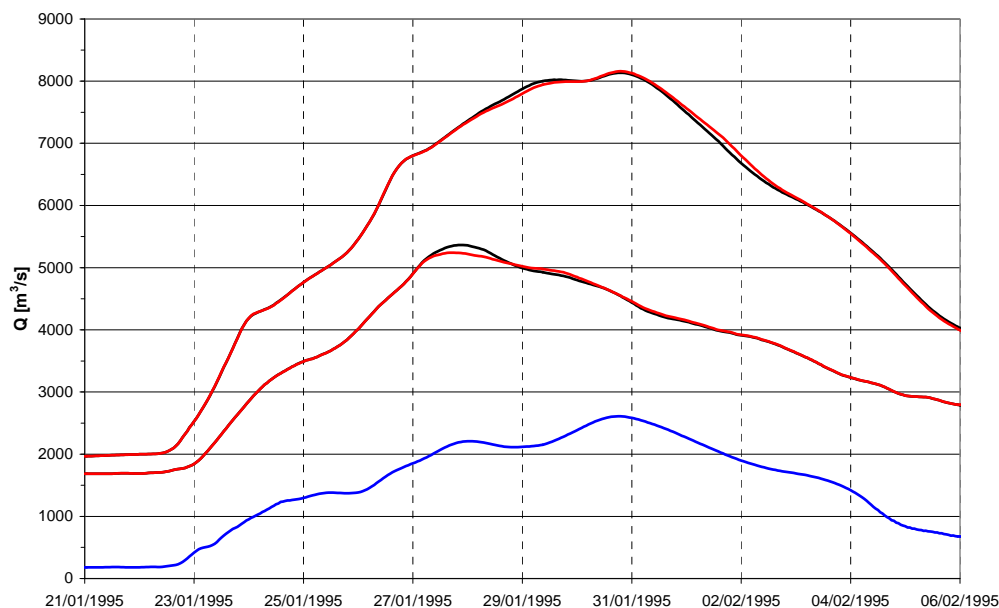
Alors que les débits de toutes les échelles d'arrivée correspondent directement aux résultats de calcul des deux modèles mathématiques de débit (SYNHP, SOBEK) utilisés, ce n'est pas toujours le cas pour les niveaux d'eau en résultant. La raison en est la technique de modélisation différente. Les modèles hydrologiques, comme le modèle SYNHP utilisé pour le tronçon du Rhin supérieur reliant Bâle à Worms, calculent essentiellement les hydrogrammes et non pas les niveaux d'eau. Lorsqu'on applique ce type de modèle, les débits calculés doivent donc être convertis en niveaux d'eau dans une deuxième phase de calcul à partir d'hydrogrammes d'échelles données. Dans le cadre de la présente étude, ce travail de conversion, qui concerne les deux échelles de Maxau et de Worms sur le Rhin supérieur, a été effectué par le LfU de Bade-Wurtemberg. Pour l'échelle de Maxau, on a utilisé l'hydrogramme 16, car celui-ci couvre une plage de débit allant jusqu'à 5500 m<sup>3</sup>/s. Pour l'échelle de Maxau, on a utilisé l'hydrogramme de 1991, car celui-ci couvre une plage de débit allant jusqu'à 6500 m<sup>3</sup>/s. Pour les débits supérieurs à 6500 m<sup>3</sup>/s, l'hydrogramme a été extrapolé (LUBW, 2005). Pour les échelles d'arrivée de Kaub, Cologne et Lobith, les indications de niveaux d'eau proviennent également du modèle numérique hydrodynamique SOBEK qui, à l'opposé des hydrogrammes, reproduit aussi ce qu'on appelle l'hystérèse (à débit constant, les niveaux d'eau de l'onde ascendante sont moins élevés que ceux de l'onde descendante). Les mesures réalisées entre 1995 et 2005 pour réduire les niveaux de crues extrêmes du Rhin abaissent la pointe de crue aux échelles d'arrivée de Maxau, Worms, Kaub, Cologne et Lobith. On note dans ce contexte à l'échelon régional et en fonction de la genèse de la crue (crue modélisée ou variante de calcul) des impacts nettement variables.

Comme prévu, on note qu'en ordre d'importance, les modifications de niveau d'eau les plus sensibles sont atteintes, comme d'ailleurs la répartition géographique et les caractéristiques (manœuvrable/non manœuvrable) des volumes de rétention, à hauteur de l'échelle de Maxau et diminuent généralement ensuite vers l'aval. Les réductions des pointes des crues modélisées peuvent ainsi atteindre à Maxau jusqu'à 423 m<sup>3</sup>/s, c'est-à-dire 31 cm. A l'échelle de Worms, les réductions peuvent atteindre jusqu'à 334 m<sup>3</sup>/s ou 29 cm. Les réductions susceptibles d'être obtenues à l'échelle de Kaub sur les pointe de crue vont jusqu'à 147 m<sup>3</sup>/s ou 12 cm : à Cologne elle peuvent atteindre jusqu'à 189 m<sup>3</sup>/s ou 11 cm et enfin à Lobith 171 m<sup>3</sup>/s ou 7 cm. En outre, le tableau montre clairement que les mesures n'ont pas toujours un impact positif (de réduction) sur le débit et le niveau d'eau, mais qu'elles peuvent également se traduire par un effet négatif (augmentation). On identifie par ex. pour l'échelle de Kaub une amplification du débit et/ou du niveau d'eau, où les impacts négatifs des mesures peuvent occasionner en cas défavorable une augmentation du niveau d'eau pouvant atteindre 2 cm. Par rapport à l'état 1977, les impacts déterminés des mesures de rétention sur les pointes de crue sont cependant tous positifs (abaissements ; voir chapitre 4.4).

Les résultats des opérations de simulation effectuées sur la crue de 1995, variante Kaub\_A montrent de manière exemplaire que la mise en œuvre de mesures de rétention peut également provoquer des hausses de niveau d'eau.

Le Main a eu un impact déterminant sur l'onde de crue du Rhin de 1995. A l'échelle de Worms (en amont du débouché du Main), on relève encore une réduction de 9 cm du niveau de la pointe de crue (124 m<sup>3</sup>/s) et les mesures n'ont pas non plus d'effets négatifs à hauteur de Rheindürkheim et d'Eich. Le volume d'eau retenu en amont de Worms s'écoule avec un certain décalage dans le temps et amplifie les débit de la courbe descendante de l'onde du Rhin (effet de vidange). Le Main imprime au Rhin un nouveau pic de crue qui vient se superposer à la courbe initialement descendante de l'onde

amplifiée. L'impact positif constaté à l'échelle de Worms est encore perceptible à Kaub dans la courbe ascendante de l'onde de crue mais n'atteint pas la pointe. La figure 8 montre le niveau atteint à Kaub de l'onde issue de la superposition des ondes du Rhin et du Main et les modifications occasionnées par les mesures qui en découlent. En aval de l'échelle de Kaub, la comparaison entre les états 1995 et 2005 fait apparaître à nouveau des effets positifs sur la pointe de crue (Cologne :  $-5 \text{ m}^3/\text{s}$ , Lobith :  $-19 \text{ m}^3/\text{s}$ ).



**Figure 8 :** Hydrogrammes des échelles de Kaub et de Worms (état 1995 : en noir ; état 2005 : en rouge), et hydrogramme du Main à l'échelle de Francfort (en bleu)

En principe, on ne devrait pas considérer uniquement la pointe de la crue mais l'onde dans son ensemble. Les hydrogrammes permettent de mieux comprendre pourquoi l'évolution positive de la crue au niveau de sa pointe peut avoir des répercussions négatives dans la courbe descendante de l'onde.

Les figures 9 à 13 ci-après montrent individuellement pour toutes les échelles et toutes les variantes de calcul les impacts des mesures mises en œuvre entre 1995 et 2005. Les graphiques sont conçus de manière identique et comportent des informations sur trois paramètres pour chaque crue modélisée :

- le débit de pointe à hauteur de l'échelle (colonne rouge foncé)
- la différence de niveau d'eau à la pointe de l'onde (colonne turquoise) et
- la différence maximale de niveau d'eau sur l'ensemble du déroulement de l'onde (points bleu foncé).

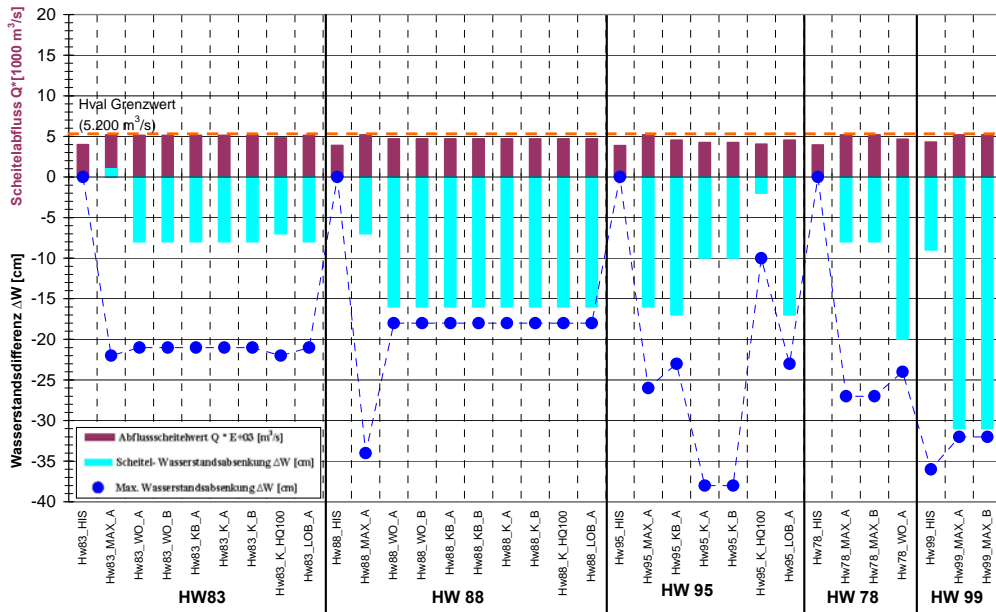


Figure 9 : Evaluation des variations de niveau d'eau de toutes les crues modélisées à hauteur de l'échelle de Maxau

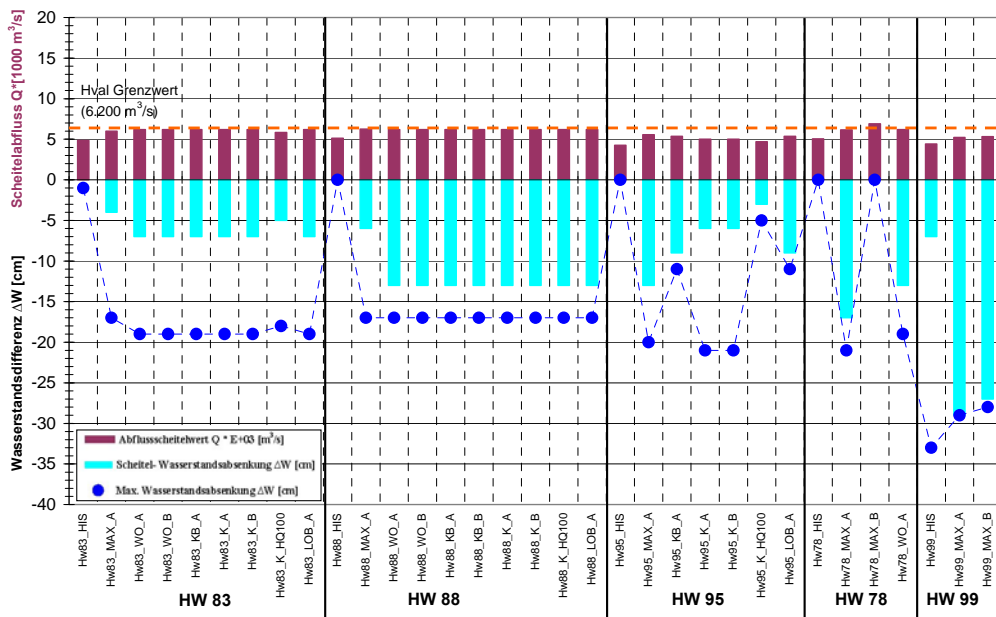
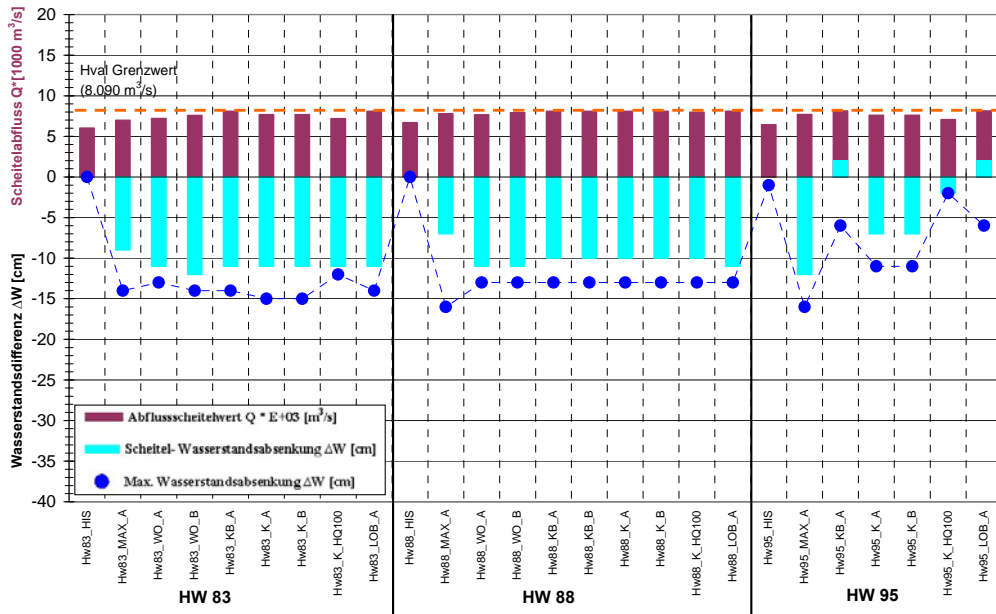
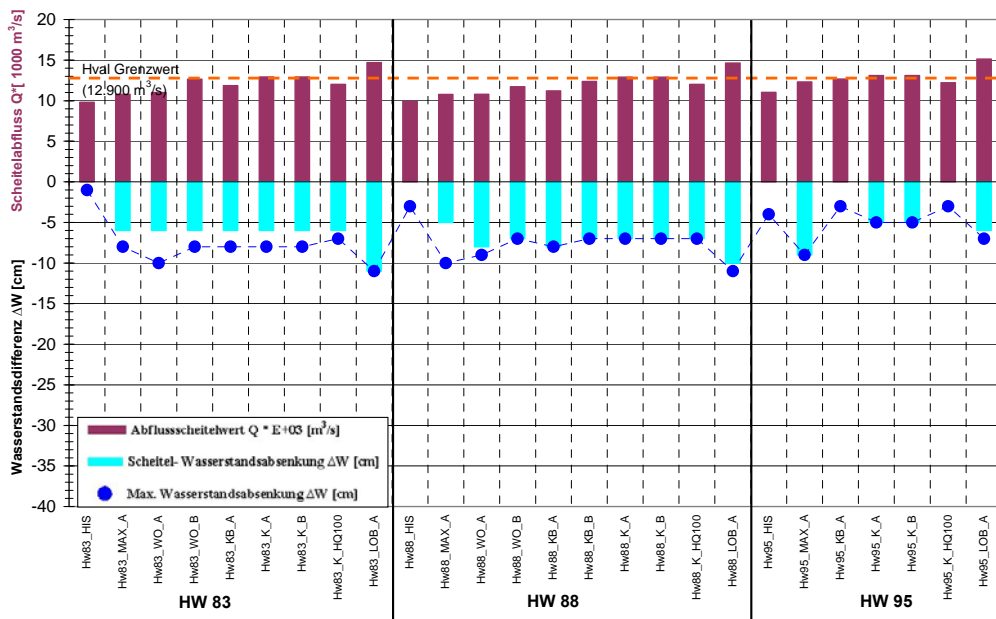


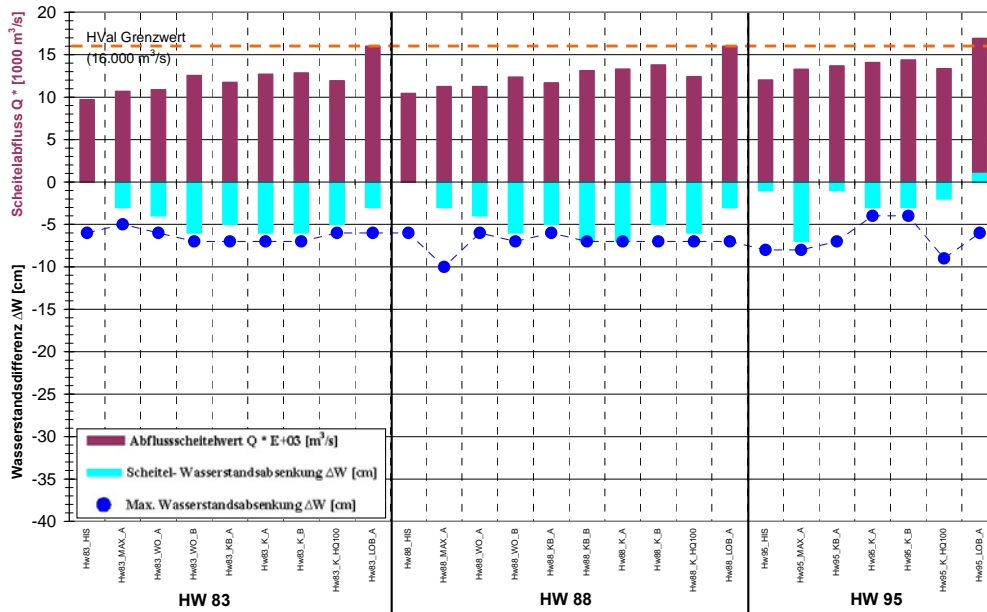
Figure 10 Evaluation des variations de niveau d'eau de toutes les crues modélisées à hauteur de l'échelle de Worms



**Figure 11 :** Evaluation des variations de niveau d'eau de toutes les crues modélisées à hauteur de l'échelle de Kaub



**Figure 12 :** Evaluation des variations de niveau d'eau de toutes les crues modélisées à hauteur de l'échelle de Cologne



**Figure 13 : Evaluation des variations de niveau d’eau de toutes les crues modélisées à hauteur de l’échelle de Lobith**

Les figures 9 à 13 mettent à nouveau en évidence la très grande diversité des impacts des mesures de rétention en fonction du lieu, de la genèse de crue et de l’ampleur du débit. On constate qu’à Maxau et Worms les baisses de niveau d’eau les plus importantes n’ont pas toujours lieu au niveau de la pointe de crue. A hauteur des échelles de Kaub, Cologne et Lobith en revanche, la réduction de niveau d’eau la plus prononcée se rapproche fréquemment des pointes de crue

Le tableau 7 présente sous forme chiffrée une vue synoptique des résultats de calcul, toutes les indications de débits et de différences de niveaux d’eau se rapportant à la valeur de la pointe de la crue respective

Aux échelles de Maxau et de Worms, caractéristiques du Rhin supérieur, les réductions maximales de niveau d’eau de la pointe de crue sont respectivement de 31 et de 29 cm. Avec 38 et 33 cm, les réductions maximales de niveau d’eau sont encore supérieures à la barre des 30 cm. On constate cependant sur le tronçon du Rhin moyen et du Rhin inférieur en aval de Worms que les mesures réalisées jusqu’en 2005 n’ont d’effet réducteur sur les pointes de crues que dans un ordre de grandeur égal ou inférieur à 10 cm. Des réductions sont également obtenues au travers des ouvrages de rétentions du Rhin supérieur. En outre, les mesures non manœuvrables prises sur le Rhin inférieur ont un impact positif supplémentaire perceptible sur la situation de crue.





**Tableau 7 : Vue générale des résultats des calculs (se référant à la pointe de crue ; X\* = non utilisé en raison du dépassement de la valeur seuil)**

Hochwasserereignis	Berechnungsvariante											Berechnungsergebnisse																											
	Hist.	Maxau			Worms		Kaub		Köln			Lobith	Maxau [5200 m³/s]			Worms [6200 m³/s]			Kaub [6090 m³/s]			Köln [12900 m³/s]			Lobith [16000 m³/s]														
		A	B		A	B	A	B	A	B	HQ <sub>100</sub>		A	Q (Z 95) [m³/s]	Δ Q [m³/s]	Δ W [cm]	Q (Z 95) [m³/s]	Δ Q [m³/s]	Δ W [cm]	Q (Z 95) [m³/s]	Δ Q [m³/s]	Δ W [cm]	Q (Z 95) [m³/s]	Δ Q [m³/s]	Δ W [cm]	Q (Z 95) [m³/s]	Δ Q [m³/s]	Δ W [cm]											
HW 1983	x												4003	0	0	4863	0	0	6010	-4	0	9609	-3	0	9702	-8	0												
		x											5201	7	1	5998	-57	-4	6982	-113	-9	10787	-105	-6	10683	-97	-3												
			x*										5201	7	1	6388	-	-	8091	-	-	14647	-	-	16001	-	-												
				x									5124	-113	-8	6204	-103	-7	7220	-138	-11	11006	-123	-6	10875	-112	-4												
					x								5124	-113	-8	6204	-103	-7	7580	-144	-12	12640	-124	-6	12561	-113	-6												
						x							5124	-113	-8	6204	-103	-7	8099	-140	-11	11870	-129	-6	11726	-115	-5												
							x*						5124	-103	-8	6204	-103	-7	8099	-	-	13559	-	-	13660	-	-												
								x					5124	-113	-8	6204	-103	-7	7677	-143	-11	12905	-127	-6	12707	-116	-6												
									x				5124	-113	-8	6204	-103	-7	7677	-143	-11	12905	-127	-6	12855	-116	-6												
										x			4814	-96	-7	5856	-80	-5	7188	-132	-11	12004	-117	-6	11929	-101	-5												
HW 1988											x	5124	-113	-8	6204	-103	-7	8099	-140	-11	14697	-143	-11	16009	-133	-3													
	x											3891	0	0	5134	-1	0	6695	-1	0	9935	-3	0	10428	-9	0													
		x										5198	-99	-7	6255	-88	-6	7796	-91	-7	10764	-96	-5	11250	-94	-3													
			x*									5198	-99	-7	6663	-	-	8583	-	-	12605	-	-	13311	-	-													
				x								4706	-208	-16	6201	-201	-13	7652	-139	-11	10781	-146	-8	11252	-124	-4													
					x							4706	-208	-16	6201	-201	-13	7900	-129	-11	11717	-147	-7	12349	-123	-6													
						x						4706	-208	-16	6201	-201	-13	8091	-125	-10	11219	-150	-8	11884	-130	-5													
							x					4706	-208	-16	6201	-201	-13	8091	-124	-10	12362	-148	-7	13110	-127	-7													
								x				4706	-208	-16	6201	-201	-13	8091	-125	-10	12901	-148	-7	13291	-130	-7													
									x			4706	-208	-16	6201	-201	-13	8091	-125	-10	12901	-148	-7	13810	-140	-5													
HW 1995											x	4706	-208	-16	6201	-201	-13	7981	-126	-10	11999	-148	-7	12416	-124	-6													
												4706	-208	-16	6201	-201	-13	8091	-124	-11	14647	-138	-10	16001	-126	-3													
	x											3868	0	0	4279	-1	0	6435	0	0	11018	0	0	12022	0	-1													
		x										5204	-223	-16	5583	-176	-13	7706	-147	-12	12297	-189	-9	13280	-171	-8													
			x*									5203	-223	-16	6290	-219	-14	9217	-	-	16173	-	-	18011	-	-													
				x*								5182	-235	-17	6203	-225	-14	8234	-	-	12812	-	-	13819	-	-													
					x*							5182	-235	-17	6203	-225	-14	9175	-	-	16091	-	-	17918	-	-													
						x						4553	-218	-17	5365	-124	-9	8136	22	2	12669	-5	0	13673	-19	-1													
							x*					4553	-218	-17	5365	-124	-9	8136	-	-	13988	-	-	15389	-	-													
	HW 1978								x				4252	-120	-10	5006	-61	-6	7599	-87	-7	13110	-109	-5	14086	-92	-3												
									x			4252	-120	-10	5006	-61	-6	7599	-87	-7	13110	-109	-5	14374	-90	-3													
										x		4055	-30	-2	4693	-40	-3	7057	-20	-2	12197	-9	0	13368	-15	-2													
											x	4553	-218	-17	5365	-124	-9	8136	22	2	15116	-1	-6	18936	-12	1													
HW 1999	x											3964	0	0	5047	-3	0																						
		x										5203	-121	-8	6162	-262	-17																						
			x*									5203	-121	-8	6908	-	-																						
				x								4674	-261	-20	6204	-202	-13																						
HW 1999	x											4309	-116	-9	4416	-77	-7																						
		x										5203	-423	-31	5229	-334	-29																						
			x									5203	-423	-31	5325	-334	-27																						
				x*								5680	-	-	6205	-	-																						
maximale Reduzierung der Abfluss- / Wasserstandsschettel												-423	-31	-334	-29	-147	-12	-189	-11	-171	-7																		

\* La valeur de niveau d'eau à l'échelle de Lobith pour la variante de calcul HW1995 Max\_A n'est pas prise en compte dans l'évaluation du fait du manque de plausibilité du résultat.



## 6. Estimation de la modification des récurrences à hauteur d'échelles d'arrivée

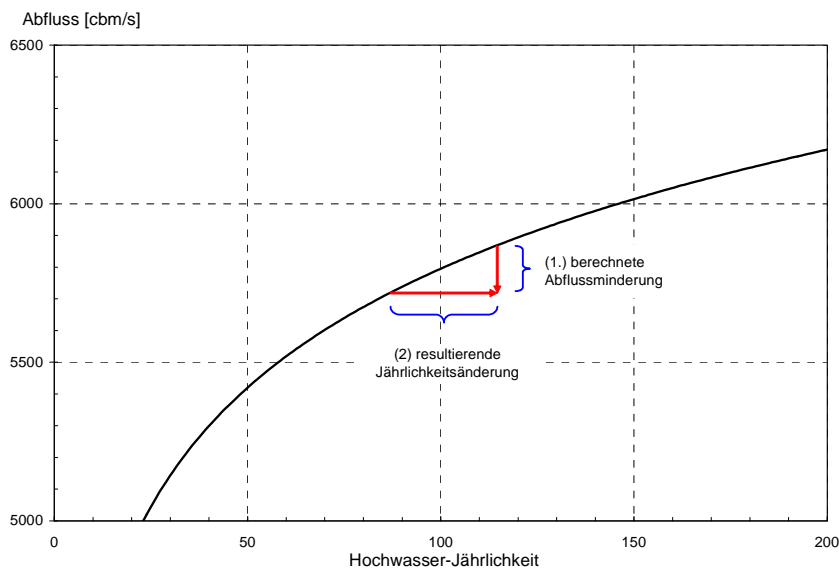
Afin de mettre à la disposition du groupe d'experts Hiri les bases de données permettant de calculer les risques de dommages dans les surfaces potentiellement inondables le long du Rhin, les abaissements de niveau d'eau et les réductions de débit ont été convertis en valeurs de père pour la modification des récurrences à hauteur des échelles d'arrivée.

Pour étayer les déclarations sur les modifications de probabilité et/ou de récurrence, on a fait appel aux statistiques relatives à l'état d'aménagement du Rhin supérieur après 1977 dans lesquelles est pris en compte l'impact d'aggravation des crues consécutif à l'aménagement du Rhin supérieur entre 1955 et 1977 et à la perte des surfaces de rétention qui l'a accompagné. Le groupe de travail franco-allemand 'Statistiques' a mis au point ces statistiques en reproduisant par conversion l'impact de crues historiques survenues dans le Rhin supérieur entre 1901 et 1977 sur l'état d'aménagement actuel du Rhin supérieur et en les analysant par rapport aux statistiques des crues survenues de 1978 à 1999 dans le Rhin supérieur aménagé (GT 'Statistiques' 2001).

Pour les échelles situées en aval de Worms, on note un abaissement progressif de l'impact aggravant de l'aménagement du Rhin supérieur sur les crues, de sorte qu'il a été décidé dans le cadre de la présente étude, par mesure de simplification, de calculer la probabilité de crue à partir des pointes de crues historiques sans homogénéiser auparavant les valeurs mesurées par rapport à l'état d'aménagement du Rhin ou à l'intervention de mesures de rétention. A cette fin, la BfG a généré pour l'échelle de Kaub des statistiques de valeurs extrêmes à partir de débits de pointe mesurés de 1900 à 2003. Le RWS-RIZA a mis à disposition les statistiques pertinentes correspondantes pour l'échelle de Lobith.

En s'inspirant d'une méthode fortement simplifiée proposée par le groupe d'experts Hiri de la CIPR (2005), on s'est basé sur ces statistiques de crues et sur les modifications de débit calculées par Hval (tableau 7) pour obtenir sous forme graphique les modifications découlant des probabilités de crue à hauteur des échelles sélectionnées par Hval. Cette méthode est reproduite dans la figure 14 : Pour la zone de crue considérée (ici à l'exemple d'une crue centennale à une échelle fictive), on soustrait des valeurs statistiques de crues, dans un premier temps, la réduction de débit obtenue par calcul (1., flèche verticale). La modification de récurrence qui en résulte est déterminée sous forme graphique, dans un deuxième temps, comme différence entre les valeurs des statistiques de crues et le point final des valeurs abaissées de la crue (2., ligne horizontale).

Internationale Kommission zum Schutz des Rheins  
 Commission Internationale pour la Protection du Rhin  
 Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn



**Figure 14 :** Exemple de détermination graphique de la modification de probabilité à une échelle donnée comme conséquence d'une réduction de débit

Etant donné que les réductions de débit obtenues par calcul sont d'ampleur variable en fonction de la crue modélisée, il n'est pas possible de tirer des enseignements passablement fiables pour un nombre limité de crues modélisées (3 à 5 tout au plus) sur les modifications moyennes de récurrence attendues aux échelles. C'est pourquoi les modifications de récurrence obtenues sont communiquées sous forme de plages indiquant les réductions minimales et maximales de niveaux d'eau et de débits.

Ces plages ou marges de variation ainsi obtenues ne fournissent qu'un premier aperçu des modifications de probabilité. Il convient de souligner que ces résultats n'ont pas de fondement statistique très fiable. Il aurait été plus opportun de procéder à un travail d'homogénéisation pour toutes les échelles traitées, d'une part à partir de niveaux d'aménagement précis et d'autre part à partir de phases données de réalisation des différentes mesures de rétention. Un tel travail aura cependant supposé de traiter beaucoup plus de crues que les 3 ou 5 retenues. En outre le mandat Hval ne prévoyait pas d'homogénéisation. La méthode appropriée à suivre est détaillée, entre autres, dans le rapport final de la Commission d'Etudes des Crues du Rhin (HSK, 1978) et celui du groupe d'études des crues pour le tronçon du Rhin compris entre Kaub et Rolandswerth (HSG Kaub – Rolandswerth, 1993). En vue d'éventuelles évaluations ultérieures, des méthodes correspondantes sont à prévoir et à exposer en détail. Les résultats graphiques obtenus indiquent les marges de variation suivantes pour les modifications de récurrence attendues dans le cas d'une crue bicentennale.

A l'échelle de Maxau, l'occurrence d'une crue plus ou moins bicentennale varie, selon la variante Hval retenue, dans une plage comprise entre un minimum de 0 et un maximum de 130 années. à l'échelle de Worms, on obtient des modifications d'occurrence comprises entre 5 ans au moins et 80 ans au plus. Les modifications d'occurrence à



Internationale Kommission zum Schutz des Rheins  
 Commission Internationale pour la Protection du Rhin  
 Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn

l'échelle de Kaub sont de 5 ans au minimum et de 15 ans au maximum. Elles sont comprises entre 0 et 20 ans au maximum à l'échelle de Cologne. L'occurrence d'une crue environ bicentennale varie également de 0 à 20 ans maximum. Les modifications de récurrence d'autres crues figurent également dans le tableau 8.

**Tableau 8 : Modification de la récurrence ordonnée selon les marges de débit à différentes échelles (et rapportée aux valeurs de pointe)**

Echelle		Modification Q/T (état 2005-1995) selon les marges de débit de crue (HQ)			
		HQ 10	HQ 100	HQ 200	HQ 1000 / HQ 1250
Maxau	minimum	+/- 0	+ 15	+/- 0	-
	maximum	+ 2	+ 45	+ 130	-
Worms	minimum	+/- 0	+ 10	+ 20	-
	maximum	+ 5	+ 30	+ 80	-
Kaub	minimum	+/- 0	+/- 0	- 5	-
	maximum	+/- 0	+ 15	+ 15	-
Cologne	minimum	+/- 0	+/- 0	+/- 0	+/- 0
	maximum	+/- 0	+ 10	+ 20	+ 35
Lobith	minimum	+/- 0	+/- 0	+/- 0	+/- 0
	maximum	+/- 0	+ 10	+ 20	+ 120

Les modifications de récurrence indiquées à hauteur des échelles d'arrivée peuvent être reportées sous forme simplifiée à différents tronçons du Rhin :

- Lac de Constance – Bâle : Aucune modification des récurrences
- Bâle-Iffezheim : Aucune modification des récurrences
- Iffezheim – débouché du Neckar : Les modifications de récurrence sont à déterminer à partir des indications fournies pour l'échelle de Maxau.
- Débouché du Neckar – débouché du Main : Les modifications de récurrence sont à déterminer à partir des indications fournies pour l'échelle de Worms.
- Débouché du Main – débouché de la Moselle : Les modifications de récurrence sont à déterminer à partir des indications fournies pour l'échelle de Kaub.
- Débouché de la Moselle – débouché de la Ruhr : Les modifications de récurrence sont à déterminer à partir des indications fournies pour l'échelle de Cologne.
- Débouché de la Ruhr – mer du Nord : Les modifications de récurrence sont à déterminer à partir des indications fournies pour l'échelle de Lobith.

**Les modifications de probabilité indiquées ont été obtenues sur la base des mesures achevées entre 1995 et 2005 dans le bassin du Rhin et doivent être évaluées compte tenu des conditions générales mentionnées ci-après :**

- **Des appréciations statistiques reposant sur un collectif de 3 (5) crues historiques et de 26 crues déduites ne peuvent pas déboucher sur des**



---

Internationale Kommission zum Schutz des Rheins  
Commission Internationale pour la Protection du Rhin  
Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn

**déclarations absolument fiables dans le cadre de récurrences d'un ordre de grandeur bicentennal.**

- **Bien qu'elles prennent en compte des crues et des genèses de crue historiques, les modifications indiquées se fondent sur des crues *modélisées*. Au sens général, les statistiques de valeurs extrêmes reposent exclusivement sur des relevés historiques et éventuellement sur des relevés homogénéisés d'échelles. Par conséquent, les modifications de récurrence estimées dans la présente étude ne peuvent ni ne doivent être utilisées aux fins de modification des données statistiques actuelles sur les valeurs extrêmes.**



Internationale Kommission zum Schutz des Rheins  
Commission Internationale pour la Protection du Rhin  
Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn

## Bibliographie

- AG Statistik, 2001: Ausschuss der Ständigen Kommission, AG Manöver, Unterarbeitsgruppe Statistik: Hochwasserabflüsse ausgewählter Jährlichkeiten an den Rheinpegeln Maxau und Worms, ermittelt aus Scheitelabflüssen der Winterhalbjahre 1901 bis 1999, homogenisiert auf den Gerinnezustand des Rheins „1977 ohne Retention“. Mainz, 2001.
- CIPR, 1998 : Plan d'action contre les inondations Commission Internationale pour la Protection du Rhin, 1998
- CIPR, 1999 : Estimation de l'impact de la rétention des eaux dans le bassin du Rhin. Commission Internationale pour la Protection du Rhin, 1999
- CIPR, 2001 : Mise en œuvre du Plan d'action contre les inondations jusqu'en 2000, Commission Internationale pour la Protection du Rhin, 2001
- CIPR, 2004 : Recommandation sur les instruments d'identification de l'efficacité des mesures de réduction des niveaux de crue extrêmes Rapport CIPR n° 145, 2004
- CIPR, 2005 : Impact des mesures mises en œuvre entre 1995 et 2005, catégorie 1 « rétention des eaux dans le bassin », Hval 17-05, 2005
- HKV, 2005: SOBEK-model evaluatie actieplan Rijn – Onderzoek effect van zes uiterwaardprojecten, 2005
- Homagk, 1995: Simulation des Hochwassergeschehens am Oberrhein. Wasserbaumitteilungen der TU Darmstadt Nr. 40, 1995
- Homagk, 2000: Das integrierte Rheinprogramm in Baden-Württemberg und die Vor- und Nachteile von gesteuerter Hochwasserrückhaltung. 3. Internationales Rheinsymposium Köln, IKSR, Hochwassernotgemeinschaft e.V. und Stadt Köln, 15.-17. Juni 2000.
- HSG Kaub-Rolandswerth, 1993:  
Der Einfluß des Oberrheinausbaus und der am Oberrhein vorgesehenen Retentionsmaßnahmen auf die Hochwasser am Mittelrhein von Kaub bis Köln – Auswirkungen der Rückhaltmaßnahmen am Oberrhein nach dem deutsch-französischen Vertrag von 1982
- HSK, 1978: Schlussbericht der Hochwasser-Studienkommission für den Rhein / Rapport Final de Commission d' Etude des Crues du Rhin, 1978.
- KHR, 1995: Rekonstruktion der Witterungsverhältnisse im Mittelrheingebiet von 1000 n. Chr. Bis heute anhand historischer Ereignisse – Bericht Nr. II-9 der KHR, 1995



Internationale Kommission zum Schutz des Rheins  
Commission Internationale pour la Protection du Rhin  
Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn

KHR, 2003:

Quantifizierung des Einflusses der Landoberfläche und der Ausbaumaßnahmen am Gewässer auf die Hochwasserbedingungen im Rheingebiet – Bericht Nr. II-18 der KHR, 2003



---

Internationale Kommission zum Schutz des Rheins  
Commission Internationale pour la Protection du Rhin  
Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn

- Lammersen, 2004: Grenzüberschreitende Auswirkungen von extremem Hochwasser am Niederrhein, Abschlussbericht, 2004
- LUBW, 2005: Untersuchungen zur Minderung der Hochwasserstände im Oberrhein zwischen Iffezheim und Worms durch die zwischen 1995 und 2005 zusätzlich geschaffenen Retentionsmaßnahmen. Hval 25-05, 2005
- Schutte, 2001: RIJNLAT, Preprocessing ten behoeve van SOBEK. RIZA-Arbeitsdokument 2001.106.X, 2001
- Tönsmann, Lang, 2002:  
Handbuch Vorbeugender Hochwasserschutz im Einzugsgebiet der hessischen Lahn, Kasseler Wasserbau-Forschungs-berichte und -materialien, 2002
- van der Veen et al., 2002:  
Bouw en calibratie SOBEK-rijn: Version 2000.1 t/m 2000.3. RIZA-Bericht 2002.039, 2002
- WL | Delft Hydraulics, 2001:  
SOBEK River/Estuary, Technical Reference Manual, 2001





## Glossaire

### Affluents nœuds

Affluents des cours d'eau modélisés dans le *modèle épine dorsale de la CIPR*. A l'embouchure de ces affluents latéraux (nœuds modélisés), les modifications de débit calculées à l'aide de modèles régionaux sous l'effet de mesures décentralisées de réduction des niveaux d'eau sont importées dans le modèle 'épine dorsale' et évaluées en fonction de leur impact global sur les niveaux d'eau du Rhin.

### Bassin versant intermédiaire

Surface dont l'écoulement n'est pas directement recensé par une échelle. Il peut être pris en compte dans des *modèles mathématiques*. Les caractéristiques d'un tel bassin sont généralement déterminées par transposition d'une échelle caractéristique voisine. Le débit entrant est ici le plus souvent diffus et s'exprime en mètre courant de tronçon fluvial.

### Courbe hauteur-débit ou courbe de tarage

Courbe de référence entre les niveaux d'eau et les débits correspondants pour un profil fluvial donné (généralement établie pour des échelles). Elle est également désignée relation W-Q/courbe W-Q. La courbe de débit se fonde sur des mesures périodiques de débit dans différentes conditions d'écoulement.

### Crue

Etat d'un cours d'eau de surface dont le niveau d'eau ou l'écoulement atteint ou dépasse une valeur spécifique (valeur seuil)

### Crue extrême

Selon la définition du groupe d'experts Hval de la CIPR, une *crue* du Rhin est considérée comme extrême quand son débit de pointe dépasse au moins d'env. 10% à 30% un débit  $HQ_{100}$  (voir *réurrence*)

### Crues modélisées

*Crues* générées de manière synthétique et dont les débits de pointe correspondent généralement à des récurrences extrêmes. Sur la base de calculs de simulation effectués à l'aide de modèles mathématiques de débit, les crues modélisées permettent par ex. d'estimer l'impact de mesures d'aménagement et/ou de rétention dans des conditions hydrauliques non mesurées jusqu'à présent.

### Echelles d'arrivées

Echelle fluviale sélectionnées du fait de leur représentativité pour des tronçons définis du Rhin. Elles sont utilisées dans l'évaluation et l'analyse détaillées des réductions de débit et de niveau d'eau requises pour évaluer le 2<sup>ème</sup> objectif opérationnel du PAI de la CIPR ainsi que pour générer des *crues modélisées* extrêmes, pour autant que ces dernières soient mises au point pour une échelle d'arrivée. A cette fin, une crue historique est amplifiée jusqu'à ce que soit atteint un débit de pointe défini (par ex.  $HQ_{200}$ ) à hauteur de l'échelle d'arrivée correspondante.

### Echelle hydrologique

Installation servant à mesurer le niveau des eaux de surface. Les données d'échelles hydrologiques sont soumises à des statistiques hydrologiques et sont requises pour la caractérisation hydrologique d'un cours d'eau.



Internationale Kommission zum Schutz des Rheins  
Commission Internationale pour la Protection du Rhin  
Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn

### Mesures de rétention

Mesure à caractère artificiel ou naturel visant à entraver ou à différer le débit ; on distingue différents types de mesures :

- o débordement par-dessus les digues d'été (rétention non manœuvrée)
- o recul / élimination des digues en présence (rétention non manœuvrée)
- o transformation de digues principales en digues d'été pour permettre un débordement (rétention non manœuvrée)
- o modification de l'occupation des sols, restauration de cours d'eau, infiltration (rétention non manœuvrée)
- o polder (rétention manœuvrée ou non manœuvrée selon la conception de l'ouvrage de prise d'eau)
- o bassin de rétention des crues, lacs de retenue (rétention manœuvrée)
- o barrages fluviaux, par ex. barrage agricole de Kehl/Strasbourg (rétention manœuvrée)
- o réglage de l'écoulement dans des canaux latéraux, par ex. manœuvres (exceptionnelles) des usines du Rhin (rétention manœuvrée)

### Modèle 'Epine dorsale' pour le Rhin

*Modèle mathématique de débit* du Rhin et de ses principaux affluents (Neckar, Main, Moselle, Sarre, Lahn) entre l'échelle de Bâle et la mer du Nord, à l'aide duquel est évalué si le 2<sup>ème</sup> objectif opérationnel du Plan d'action contre les inondations est atteint en 2005. Il se compose des deux systèmes de modélisation SYNHP (*modèle hydrologique* ; Bâle-Worms) et SOBEK (*modèle hydraulique* ; Worms-mer du Nord) et est géré et exploité par la LUBW (SYNHP) et la BfG (SOBEK).

### Modèle hydraulique

*Modèle mathématique de calcul de débit* fondé sur des équations hydrodynamiques de base (bilan de masse, bilan d'impulsion) et résolvant ces équations à l'aide de processus numériques d'approximation, raison pour laquelle il est également appelé modèle numérique hydrodynamique. En raison de sa description mathématique plus poussée, un modèle hydraulique a un caractère conceptuel plus prononcé qu'un *modèle hydrologique*.

### Modèle hydrologique

Modèle mathématique de débit dont la description mathématique néglige l'équation d'impulsion. Il lui substitue, parallèlement au bilan de masse, une relation simplifiée volume-débit pour des tronçons de cours d'eau.

### Modèle mathématique de débit

Modèle simplifié conservant néanmoins les caractéristiques principales d'un système réel et en reproduisant les processus d'écoulement (régime d'écoulement des cours d'eau 'ouverts' sur la base d'équations mathématiques. On différencie fondamentalement les modèles mathématiques sur la base de leur processus de résolution et de la prise en compte du comportement systémique dans le temps.

### Nœuds de débit entrant

Egalement appelés nœuds de modélisation ; voir *affluents nœuds*

### Récurrence

Période moyenne de temps séparant un événement de grandeur donné d'un second événement d'une grandeur égale ou supérieure. La récurrence est également appelée période ou intervalle de retour.



Internationale Kommission zum Schutz des Rheins  
Commission Internationale pour la Protection du Rhin  
Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn

**Régime d'écoulement ou régime hydrologique**

Chronologie caractéristique du débit d'un cours d'eau conditionné par les facteurs déterminants de son régime (conditions climatiques et caractéristiques du bassin versant)



Internationale Kommission zum Schutz des Rheins  
Commission Internationale pour la Protection du Rhin  
Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn

Les définitions susmentionnées sont en partie tirées des publications suivantes :

- DIN: DIN-Taschenbuch 211 – Wasserwesen, Begriffe, 3. Auflage, 1996
- DVWK: DVWK-Schriften 127 – Numerische Modelle von Flüssen, Seen und Küstengewässern, 1999
- Patt, H.: Hochwasserhandbuch – Auswirkungen und Schutz, 2001



## Annexe 1 Définition de l'expression « crue extrême » en relation avec l'impact des mesures du PAI

(tiré de : document Hval 15-05f rev.30.05.05)

Formatiert: Nummerierung und Aufzählungszeichen

### Introduction et motif

Dans le cadre de sa réunion du 25.02.05, le GT H a prié le GE Hval de préciser l'expression « crue extrême » en relation avec l'impact des mesures visées par le PAI.

Le 2<sup>ème</sup> objectif opérationnel se référant à la mise en œuvre des mesures jusqu'en 2005 se présente comme suit :

- **Réduire les niveaux de crue** – réduire les niveaux de crue extrêmes jusqu'à 30 cm d'ici 2005 et jusqu'à 70 cm d'ici 2020 en aval du tronçon régulé.

Cette déclaration se fonde sur l'« Estimation de l'impact de la rétention des eaux dans le bassin du Rhin » (publiée par la CIPR en 1999) dans laquelle il est mentionné au premier chapitre :

« 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 (par ex. 12 m à l'échelle de Cologne = HQ<sub>280</sub> au lieu de 13 m = HQ<sub>1000</sub>)**

L'explication fournie dans le deuxième tiret donne une indication de l'ordre de grandeur statistique supposé correspondre à l'époque à celui de niveaux de crue extrêmes.

### Précision de l'expression « crue extrême »

En se fondant sur les séries historiques des relevés d'échelles du Rhin, il est possible de déterminer avec une bonne fiabilité statistique les crues de récurrence centennale. Du point de vue hydrologique, les crues dépassant cet ordre de grandeur peuvent être considérées comme des crues extrêmes, notamment en regard du fait que quelques rares crues de plus grande ampleur nous sont rapportées dans les annales.

En outre, les crues extrêmes ont toujours un rapport avec les usages et avec le degré de tolérance de la société vis-à-vis des dommages dus aux inondations. Ainsi, les riverains du Rhin supérieur et du Rhin inférieur, et du Rhin moyen dans une moindre mesure, ont mis en place des digues pour pouvoir exploiter la plaine alluviale du Rhin avec un certain niveau de sécurité. Le dimensionnement des digues se référait généralement à la dernière grande crue connue plus une marge de sécurité. A une époque plus récente, on a attribué a posteriori une période de retour à la hauteur des digues en place. Ces valeurs varient sensiblement de région à région. En règle générale, les niveaux d'eau théoriques à déterminer correspondent à une protection suffisante pour retenir au moins une crue centennale. Dans les faits, cette protection est souvent bien supérieure.



---

Internationale Kommission zum Schutz des Rheins  
Commission Internationale pour la Protection du Rhin  
Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn

**(Compte tenu de ces précisions)**, on entend par crue extrême pour le Rhin une crue d'un débit de pointe dépassant au moins d'env. 10 % à 30% un HQ100.

**Les membres du GE Hval recommandent d'adopter cette définition de l'expression « crue extrême » en relation avec l'impact des mesures du PAI.**

*Références bibliographiques sur l'annexe 1*

- Commission Internationale pour la Protection du Rhin (1998) : Plan d'Action contre les Inondations, Coblenz
- Commission Internationale pour la Protection du Rhin (1999) : Estimation de l'impact de la rétention des eaux dans le bassin du Rhin, Coblenz



## **Annexe 2 impact des mesures mises en œuvre entre 1995 et 2005, catégorie 1 « rétention des eaux dans le bassin »).**

(tiré de : document Hval 17-05f)

mis au point par le sous-groupe de travail « Länder » du groupe d'experts Hval, mise à jour du 11.04.2005

Membres du sous-groupe de travail « Länder » du GE Hval :

Dr. G. Brahmer, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie  
Dr. M. Bremicker, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg  
Dipl.-Ing. B. Mehlig, Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen  
Dr. A. Meuser, Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz

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

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

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

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

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

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

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

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

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



Internationale Kommission zum Schutz des Rheins  
Commission Internationale pour la Protection du Rhin  
Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn

type sont appliquées dans les bassins des affluents du Rhin, elles devraient être quantifiées, pour autant que les moyens à mettre en œuvre restent raisonnables.

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

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

### Catégorie de mesures 1 a : Restauration écologique

Comme il est mentionné dans la publication CIPR (1999), les mesures de restauration des cours d'eau consistant à rallonger le tracé (notamment par la mise en place de méandres) permettent de réduire la pente et par conséquent d'abaisser en tendance les pointes de crue pour les tronçons directement situés en aval. Il faut cependant conserver à l'esprit que le cours d'eau peut, en période de crue, éventuellement réutiliser l'ancien lit antérieur aux mesures de restauration pour évacuer ses eaux. En règle générale, les tronçons restaurés sont plus rugueux, dans le champ d'inondation également, et ont donc un effet de rétention, ce qui ralentit l'arrivée de la pointe de crue d'un cours d'eau au niveau de son embouchure dans l'hydrosystème auquel il est directement subordonné. Notamment dans le cas d'une restauration étendue à tout l'hydrosystème d'un affluent, on peut obtenir des réductions sensibles de pointes de crue, ceci s'accompagnant cependant d'un ralentissement de l'onde. Comme les ondes de crue des affluents précèdent souvent celle du Rhin, par exemple sur le Rhin moyen (MINISTERIUM FÜR UMWELT RHEINLAND-PFALZ 1993), il peut en résulter un rehaussement tendanciel de l'onde du Rhin sans que cette hausse ne se répercute toutefois de manière notable sur la crête.

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

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





Internationale Kommission zum Schutz des Rheins  
Commission Internationale pour la Protection du Rhin  
Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn

de tracé dans un état (relativement) proche du naturel. Plus de 300 km de bandes riveraines ont été acquis depuis 1995, 25 km restaurés dans le cadre de projets d'aménagement écologique. L'effet des mesures de restauration réalisées entre 1995 et 2005 à hauteur du débouché dans le Rhin paraît donc arithmétiquement quasi impossible à démontrer.

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

La conclusion que l'on peut tirer de toutes ces études est que les mesures de restauration de 3.500 km dans les affluents du Rhin visées dans le Plan d'action contre les inondations d'ici 2005 ne contribueront pas de manière déterminante à réduire les crues extrêmes dans le bassin du Rhin. Le Plan d'action contre les inondations ne concède d'ailleurs à ces mesures de renaturation qu'un faible effet local sur de petites rivières, sans impact de réduction notable pour les grandes crues du Rhin.

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

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

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

Une rétention des eaux peut avoir lieu dans le lit mineur sous forme de rétention dynamique ou dans les surfaces inondables sous forme de rétention statique. La rétention dans le lit mineur se ressent sur les crues de brève durée avec des pointes élevées (faible volume de débit) dans les cours fluviaux dont la pente est inférieure à 1%. L'atténuation de la pointe de crue par submersion du lit majeur peut être nettement plus importante que dans le cas d'une rétention dans le lit mineur. On obtient un effet de rétention dynamique dans le lit majeur par subdivision du cours en sections transversales et formation consécutive de différentes vitesses de courant dans le lit mineur et dans le lit majeur. En raison de la faible profondeur d'eau et de l'effet de friction renforcé dans le lit majeur, l'eau s'y écoule plus lentement que dans le lit mineur. Quand le ralentissement de l'onde dans le lit majeur est tel que celle-ci ne se superpose plus à l'onde du lit mineur à la fin du tronçon, on obtient alors une atténuation sensible de l'onde. Si la différence entre les vitesses d'écoulement est faible, il faut que le tronçon d'écoulement soit suffisamment long ou la durée de la crue suffisamment courte pour produire une modification notable des hydrogrammes. Si l'on a par exemple une différence de 1 m/s entre les deux vitesses, la durée de la crue doit être inférieure à trois heures sur un tronçon d'écoulement de 10 km pour que la rétention dynamique fasse réellement effet. Pour ce qui est de la rétention statique, elle survient quand les eaux



Internationale Kommission zum Schutz des Rheins  
Commission Internationale pour la Protection du Rhin  
Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn

atteignent le lit majeur et y sont retenues ou s'écoulent avec une vitesse négligeable. L'élément déterminant pour l'impact de la rétention statique est le moment où se produit la submersion du lit majeur. Lorsque la capacité du lit mineur est si faible qu'une submersion se produit dès le début de la crue, le volume de rétention peut déjà être épuisé sur un tronçon donné avant que la pointe de crue n'atteigne ce dernier et l'effet d'atténuation de la pointe est alors nul. En plus du moment de la submersion, le rapport entre le volume de l'espace de rétention et le volume d'eau s'écoulant dans le lit majeur est également important. Si le volume de rétention est supérieur au volume des eaux débordantes, la pointe de la crue sera alors fortement écrêtée.

Les mesures consistant à redynamiser les surfaces inondables le long des affluents du Rhin portent essentiellement sur les surfaces séparées du fleuve par des digues. On les trouve principalement dans le cours aval des fleuves et parfois également dans leur cours moyen, pour autant que ces zones aient une faible pente, comme par ex. sur la Lahn. La longueur des digues est souvent de plusieurs kilomètres et les zones protégées derrière celles-ci peuvent s'étendre sur plusieurs centaines de mètres. En règle générale, les digues ne sont certainement pas totalement abandonnées. Pour une estimation approximative du volume, on partira de l'hypothèse d'une mise en retrait des digues sur une longueur de 500 mètres, de manière à reconquérir un volume supplémentaire de rétention de 100 mètres de large et de 2 mètres de haut. On obtiendrait ainsi un volume de rétention supplémentaire de 100.000 m<sup>3</sup>. En supposant qu'il s'agisse d'une rétention plus ou moins statique, ce volume d'eau serait soustrait de l'onde. Si l'on attribuait (incorrectement) ce volume uniquement à la pointe de crue, on obtiendrait pour la crue de décembre 1993 par ex. une réduction de tout juste 10 cm à l'échelle de Grolsheim/Nahe proche du débouché dans le Rhin. L'effet d'emménagement des eaux démarrant cependant avec le débordement, l'effet d'atténuation ne serait plus généré au passage de la pointe de la crue. En phase de décrue, le volume stocké est rendu au fleuve et rehausse l'onde d'autant, ce qui peut se traduire par une légère augmentation de débit dans le Rhin. On peut dire globalement que la crête de crue ne serait pas touchée. D'après une étude de l'ETH (université technique) de Zurich (1998), il a été procédé - sur un tronçon d'env. 10 km du cours moyen de la Nahe avec possibilité de débordement d'env. 200 mètres sur les deux rives - au calcul de l'effet de rétention du lit majeur et de son impact sur le débit à l'aide d'un modèle d'écoulement bi-dimensionnel. On s'est fondé ici sur les crues de décembre 1993 et de janvier 1995 (la crue la plus forte consignée pour ce tronçon de la Nahe). Pour quantifier l'impact d'une submersion du lit majeur, on a supposé, par calcul, la présence de digues à proximité immédiate du cours d'eau, ceci pour empêcher tout débordement. Les hydrogrammes ainsi obtenus ont été comparés aux hydrogrammes historiques. En raison de la rétention dynamique de la Nahe pour les grandes crues, les résultats montrent que la réduction de débit attendue sur ce tronçon reste minime (de l'ordre de 0 à deux pour cent à l'échelle de Grolsheim) et que l'on obtient uniquement un décalage de l'onde de quelques heures. Des atténuations plus importantes ne sont envisageables que sur des crues de moindre ampleur et n'ayant pas les caractéristiques de celles de 1993 et 1995. Les débordements se produisant à proximité du passage de la pointe de crue ont un effet écrêteur sensible.

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

Le Plan d'action contre les inondations n'attribue aux mesures de redynamisation de zones inondables qu'un faible impact (de réduction de pointe de crue) sur le Rhin. Si de



Internationale Kommission zum Schutz des Rheins  
Commission Internationale pour la Protection du Rhin  
Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn

telles mesures de redynamisation sont mises en œuvre à grande échelle sur des affluents importants du Rhin, on visera à en démontrer l'effet par calcul.

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

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

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

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

Alors que les crues extrêmes survenant dans les très petits bassins sont le plus souvent dues à des précipitations orageuses locales très intenses et relativement brèves, la formation de zones de précipitations abondantes et prolongées est nécessaire à grande échelle pour donner lieu aux grandes crues du Rhin surviennent. S'y ajoute éventuellement l'impact d'un phénomène simultané de fonte des neiges.

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

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

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



Internationale Kommission zum Schutz des Rheins  
 Commission Internationale pour la Protection du Rhin  
 Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn

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

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

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

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

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

Etude	Bassin	Superficie [km²]	% actuel de forêts	% de forêts scénario	Baisse de pointe de crue (ΔQ) [%]	Pointe Δ par % Δ de forêt	Type de crue
LAHoR *	Nahe	4013	48	100	14	0,27	Déc. 91
LAHoR*	Lippe	4783	21,5	100	29	0,37	Mai 83
LANG & TÖNS-MANN(2002)	Lahn	5964	41,83	45,99	2,3	0,55	HQ100
MÜLLER(1987)	Dreisam	257	0	55	50	0,91	Mai 83
LAHoR (KHR, 2003)	Körsch	127	12	18	n.n.	n.n.	Déc. 93
KOEHLER (1993)	Rhin sup./ Worms	68827	0	37	17	0,46	4 jours
LAHoR*	Rhin/Worms	68827	37	100	7	0,11	1988
LAHoR*	Rhin/Worms	68827	37	100	20	0,32	1993

Les baisses relatives des débits de pointe de crue en fonction de l'augmentation du pourcentage forestier dans le bassin sont comprises entre 0, 27 et 0,9% pour les affluents du Rhin et entre 0,11 et 0,45% pour le bassin du Rhin jusqu'à l'échelle de Worms. Il n'est cependant pas judicieux de transposer de telles déclarations, fondées à l'origine sur l'hypothèse d'une couverture forestière totale ou d'une disparition intégrale



---

Internationale Kommission zum Schutz des Rheins  
Commission Internationale pour la Protection du Rhin  
Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn

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

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



Internationale Kommission zum Schutz des Rheins  
Commission Internationale pour la Protection du Rhin  
Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn

### Catégorie de mesures 1 e : désimpermeabiliser

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

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

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

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

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

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



Internationale Kommission zum Schutz des Rheins  
Commission Internationale pour la Protection du Rhin  
Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn

mesures de désimperméabilisation des surfaces en termes d'abaissement des pointes de crues du Rhin.

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

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

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

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

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

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

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

Dans le cadre de l'étude sur la Lahn (LANG & TÖNSMANN 2002), un examen a porté, entre autres, sur les espaces de rétention dans les vallées voisines. Le modèle s'est fondé sur une simulation englobant 47 bassins fictifs de rétention des crues localisés dans la zone de transition entre le cours moyen et le cours aval du cours d'eau et représentant un volume total de 13 à 19 millions de m<sup>3</sup>. Les apports en eau ont été définis dans une marge comprise entre un HQ 2 et un HQ 50. On a ainsi atteint les



Internationale Kommission zum Schutz des Rheins  
Commission Internationale pour la Protection du Rhin  
Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn

principales réductions, jusqu'à 17% au maximum, à partir d'un HQ 10 à l'aval immédiat des mesures. Cet effet disparaît toutefois rapidement plus en aval, allant même jusqu'à provoquer parfois de légères augmentations de pointe, de l'ordre d'env. 1 % dans la Lahn même, en raison d'une superposition défavorable avec l'onde de crue de la Lahn.

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

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

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

### **Conclusions pour la procédure à suivre dans le cadre des études d'efficacité**

Afin estimer sur le Rhin l'impact de réduction des débits de pointe qu'ont les mesures de rétention des eaux prises dans le bassin, il n'est pas recommandé de se fonder sur les impacts visés dans les affluents et sur leurs crues de référence. Il est au contraire déterminant de partir d'événements sélectionnés pour le Rhin et des hydrogrammes des affluents subordonnés à ces événements. Il convient alors d'identifier pour ces hydrogrammes la rétention des eaux dans le bassin et de les superposer correctement dans le temps à l'hydrogramme du Rhin. Cette remarque ne s'applique cependant qu'aux mesures susceptibles d'avoir un impact suprarégional. Il s'agit, comme signalé plus haut, de quelques mesures des catégories 1 b (redynamiser les zones inondables) et 1 f (dispositifs techniques de rétention).

### **Références bibliographiques sur l'annexe 2**

CHR (2003) : Commission Internationale de l'Hydrologie du bassin du Rhin, rapport n° II-18 : LAHOR - Quantifizierung des Einflusses der Landoberfläche und der Ausbaumaßnahmen am Gewässer auf die Hochwasserbedingungen im Rheingebiet. 77 Seiten und CD.

CIPR, 1998 : Plan d'action contre les inondations Commission Internationale pour la Protection du Rhin 30 pages, Coblenz.





Internationale Kommission zum Schutz des Rheins  
Commission Internationale pour la Protection du Rhin  
Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

PIK (2001): Quantifizierung des Einflusses der Landnutzung und -bedeckung auf den Hochwasserabfluss in Flussgebieten. Final report des Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung. Enthalten in der CD zu KHR, 2003: Quantifizierung des Einflusses der Landoberfläche und der Ausbaumaßnahmen am Gewässer auf die Hochwasserbedingungen im Rheingebiet.



Internationale Kommission zum Schutz des Rheins  
Commission Internationale pour la Protection du Rhin  
Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn

## 7.