



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

Impact qualitatif des crues

1. Relations entre les matières en suspension, les sédiments et les sols

a. Matières en suspension

Les matières en suspension sont d'origine inorganique pour env. 80% à 90 % et organique pour env. 10 % à 20%. Elles rejoignent les eaux par le biais de phénomènes d'érosion, de lessivage, d'usure et de rejets d'eaux usées ou se forment dans les eaux mêmes sous l'effet de l'usure du fond du cours d'eau ou de processus chimiques et biologiques (formation d'algues, déjections animales, etc.)

Dans le Rhin inférieur (Rees), le flux annuel de matières en suspension est d'env. 3 à 4 millions de tonnes (rapport sur l'état du Rhin 1990).

b. Sédiments

Bien que les sédiments proviennent essentiellement des matières en suspension, ils peuvent se distinguer de ces dernières par leur composition spécifique. Alors que les matières en suspension se composent presque exclusivement d'argile et de limon fin, sauf dans le cas d'une onde de crue, les dépôts sédimentaires peuvent présenter toutes les fractions granulométriques. En fonction de la vitesse d'écoulement, on trouve

- essentiellement des dépôts fins (argile et limon) formés à partir des matières en suspension, lorsque la vitesse d'écoulement est faible ou
- essentiellement des dépôts plus grossiers lors d'une onde de crue ou des parts de sable provenant du fond du cours d'eau lorsque la vitesse d'écoulement est plus élevée.

Ainsi, dans les cours d'eau régulés, dans les ports, entre les épis et dans toutes les zones de refoulement des eaux, des dépôts divers se constituent, depuis le sable fin jusqu'à des couches boueuses. Il est fréquent de trouver sur un espace limité toutes les variations entre les fractions sablonneuses, argileuses et limoneuses.

c. Remise en suspension de sédiments

Les quantités de particules solides transportées par un fleuve, et par conséquent la turbidité, augmentent plus rapidement que le débit. Les ondes de crues du Rhin notamment transportent de grandes quantités de matières en suspension.

Les recherches sur la remise en suspension de couches sédimentaires sont restées insuffisantes jusqu'à présent. Les couches fraîches (récentes) de sédiments peuvent facilement être remises en suspension lorsque le courant s'intensifie. Les connaissances sont par contre très hétérogènes sur le comportement des sédiments après les premières phases de consolidation et les suivantes. En cas de poussée brutale de l'écoulement, p.ex. lorsque les barrages sont ouverts en période de crue, un cratère se forme dans le périmètre immédiat de l'ouvrage, l'étendue de ce cratère restant néanmoins très limitée vers l'amont. Sans intervention mécanique, on ne peut mettre en mouvement des surfaces plus importantes. La remise en suspension de sédiments dans les surfaces en avant des digues reste de faible ampleur.

En règle générale, les sédiments vraiment très anciens (plus de 10 ans) sont si fortement consolidés sous l'effet de différents processus qu'ils ne peuvent être remis en suspension en quantité importante par des ondes de crue. Cette thèse est confirmée par des études sur le sujet, notamment celles réalisées sur la chute d'Iffezheim et sur le Neckar (BfG, 1996; bibliographie, annexe I).

d. Dépôts sédimentaires dans les surfaces inondables

Ce n'est que lorsque les crues entraînent des inondations que les matières en suspension sont déposées en grandes quantités sur les sols des forêts, les prairies et les terres cultivées. Les crues en soi occasionnent principalement un apport supplémentaire de sédiments dans les bras morts, les ports, les zones de retenue et d'épis et les zones alluviales. Bien que divers matériaux lâches entraînés par l'onde de crue puissent être remis en suspension, on a en règle générale un apport net sur la surface considérée. L'épaisseur de la couche sur le sol peut aller jusqu'à 1 cm (fraction granulométrique allant de $1\mu\text{m}$ à $1000\mu\text{m}$; env. 10% d'argile, env. 70% de limon fin et env. 20% de sable).

2. Evolution à long terme de la qualité et des flux de sédiments fluviaux pouvant être remis en suspension

2.1 Généralités

a. Quantités de matières en suspension

Depuis les années soixante-dix, la quantité globale de matières en suspension est en baisse dans le Rhin et ses affluents. Avec l'aménagement de stations d'épuration urbaines et industrielles et la mise en place de bassins de rétention pour intercepter les sédiments, les rejets ont diminué. Il existe donc de moins en moins de matériaux susceptibles d'être remis en suspension. Les sédiments fluviaux remis en suspension proviennent habituellement de dépôts récents (moins de 10 ans) qui n'ont pas encore été soumis à un processus de consolidation (BfG, 1996).

Une fois que les sédiments sont consolidés, seuls des travaux de dragage peuvent entraîner leur remise en suspension.

b. Teneurs de polluants dans les matières en suspension, les sédiments et les sols

Les substances nuisibles difficilement solubles s'accumulent principalement dans les minéraux des argiles réfractaires et dans les substances organiques. Les concentrations de polluants dans les matières en suspension, les sédiments et les sols baissent donc à mesure que décroît la fraction granulométrique, c'est-à-dire dans l'ordre suivant: argile (glaise) > loess >> sable (effet granulométrique). Pour une même pollution par les substances nuisibles, la fraction sablonneuse offre la capacité d'adsorption la plus faible et la fraction argileuse la plus forte.

Les concentrations de métaux lourds dans les matières en suspension, les sédiments et les sols se composent d'une part d'origine naturelle (part géogène, voir annexe II, tableau 1) et d'une part ajoutée par les interventions humaines (part anthropogène). L'apport naturel provient de l'érosion des minéraux. La part anthropogène supplémentaire qui rejoint les sols peut être due au traitement industriel de minerais et de métaux, à l'utilisation de métaux et de

produits métalliques, à l'incinération de combustibles fossiles, à la décomposition et au lessivage des ordures et autres déchets solides ainsi qu'à l'épandage d'engrais minéraux et de boues d'épuration.

En raison du manque de connaissances sur la granulométrie des échantillons, on doit renoncer à comparer les pollutions des différents compartiments analysés (matières en suspension, sédiments, sols) et points de prélèvement.

2.2 Résultats d'analyses

a. Métaux lourds

Les concentrations de métaux lourds ont augmenté depuis le début du siècle pour atteindre leur niveau maximal dans les années 70. Depuis, on observe une forte régression. Etant donné que les substances polluantes difficilement solubles s'accumulent dans les matières en suspension/sédiments, les concentrations de la plupart de ces substances augmentent à mesure que l'on se déplace vers l'aval (et que s'étend le bassin versant).

La qualité des sédiments susceptibles d'être remis en suspension correspond en règle générale à la qualité des matières en suspension en situation de débit normal (annexe III, tableau 4 et annexe VI, tableau 11).

b. Hexachlorobenzène (HCB)

L'HCB est un produit de base utilisé pour la fabrication d'adjuvants du caoutchouc et est obtenu comme sous-produit dans la fabrication de perchloroéthène et de pentachlorophénol. Pratiquement tous les rejets industriels d'HCB ont été stoppés dans le bassin du Rhin (inventaire des rejets ponctuels 1992). Les très fortes teneurs résiduelles d'HCB dans les matières en suspension et les sédiments du Rhin proviennent de la production de pentachlorophénol jusqu'en 1986 à Rheinfelden et de la fabrication de chlorosilane qui a suivi. A l'opposé des autres substances nuisibles, les teneurs d'HCB dans les sédiments récents sont en baisse sensible sur le profil longitudinal du Rhin. Le centre de pollution s'est entre-temps déplacé du barrage de Birsfelden (1988) à la chute d'Iffezheim (1990) (rapport sur l'état du Rhin 1990).

c. Polychloro-biphényles (PCB)

En raison de leur extraordinaire stabilité thermique et chimique, les PCB ont été utilisés en grandes quantités dans les transformateurs, condensateurs, appareils caloporteurs et comme fluides hydrauliques. Les rejets ponctuels de PCB dans le bassin du Rhin ont déjà pu être réduits de 92 % jusqu'en 1992 (inventaire des rejets ponctuels de substances prioritaires 1992). La baisse des apports diffus restants de PCB restera un processus très lent du fait de la persistance extrême de cette substance.

Depuis le Rhin supérieur jusqu'au Rhin inférieur, on constate une progression sensible de toutes les teneurs des 6 congénères analysés dans les sédiments (PCB 28, 52, 101, 138, 153, 180). Le PCB 28 et le PCB 52, biphényles faiblement chlorés, ont en moyenne les teneurs les plus faibles. A l'inverse de l'HCB, on ne note pas de grandes variations de concentrations des teneurs de PCB dans les matières en suspension. Les analyses de sédiments réalisées en 1990 sur le profil longitudinal du Rhin ont montré que la pollution des

sédiments récents par les PCB se situait dans le même ordre de grandeur que celle des matières en suspension, ce qui semble indiquer une répartition régulière (ubiquiste) de cette catégorie de substances dans le Rhin. (rapport sur l'état du Rhin 1990).

d. Groupe des DDT

Cet insecticide utilisé jadis dans le bassin du Rhin est très persistant et s'accumule en outre fortement dans le tissu adipeux des organismes. Depuis le début des années 70, il n'est plus produit ni utilisé de DDT dans le bassin du Rhin. Les objectifs de référence pour le groupe des DDT sont atteints dans toutes les stations internationales de mesure. Au sujet du groupe des DDT, une protection suffisante est donc garantie pour tous les biens à protéger fixés dans le cadre des objectifs de référence (comparaison état réel/souhaité 1990-1994).

e. Autres substances synthétiques accumulables

Comme pour le groupe de DDT, les objectifs de référence fixés pour les groupes de substances chloronitrobenzènes (1,2-CNB, 1,3-CNB et 1,4-CNB), trichlorobenzènes (1,2,3-TCB, 1,2,4-TCB, 1,3,5-TCB) et les chlorotoluènes (2-chlorotoluène et 4-chlorotoluène), ainsi que pour les substances individuelles α -hexachlorohexane et β -hexachlorohexane, pentachlorophénol (PCP), hexachlorobutadiène (HCBD) et 3-chloroaniline sont atteints. Au sujet de ces groupes de substances, une protection suffisante est donc garantie pour tous les biens à protéger fixés dans le cadre des objectifs de référence (comparaison état réel/souhaité 1990-1994).

f. Hydrocarbures polycycliques aromatiques (groupe des HPA)

Tout comme les PCB, les HPA sont parmi les composés organo-synthétiques les plus répandus dans l'environnement. Ils naissent de la combustion incomplète des combustibles fossiles, ce qui fait p.ex. que les sols en bordure des routes sont très fortement pollués par ces substances.

Sur le profil longitudinal du Rhin, la somme des 6 HPA de la série Borneff augmente fortement vers l'aval, notamment à hauteur des stations internationales de mesure situées sur la rive droite du fleuve (Augst 1,8 mg/kg, Lobith 5,1 mg/kg, 1990). Sur la rive gauche, les HPA augmentent également (Coblence 3,0 mg/kg), mais on constate une stagnation, voire même un léger recul sur la rive gauche du Rhin inférieur (Keeken-Bimmen 2,5 mg/kg) (rapport sur l'état du Rhin 1990).

3. Substances nuisibles dans les surfaces inondables

3.1 Généralités

Les matières en suspension, sédiments et sols ont un effet tampon sur diverses substances nuisibles, en particulier sur celles qui sont difficilement solubles. Ils retirent par filtration les polluants de l'eau et deviennent à leur tour contaminés. Lorsque leur capacité à retenir les substances nuisibles est épuisée ou que les conditions physico-chimiques externes changent, il arrive que des substances nuisibles rejoignent la chaîne alimentaire par le biais des eaux souterraines ou des plantes et constituent un risque pour l'homme et la faune.

En plus de nombreuses substances nuisibles organiques, les métaux lourds entrent pour une part notable dans la pollution des sols.

L'impact écologique des métaux lourds sur les sols dépend principalement des parts mobiles solubles en présence. La mobilité qui caractérise un sol est fonction du pH, de la teneur en carbonate, de la teneur et de la nature de la substance organique ainsi que du type de sol. La solubilité et la mobilité augmente quand le pH décroît. Le carbonate de calcium (CaCO_3) intercepte les ions d'hydrogène libres et stabilise ainsi le pH dans la zone tampon du carbonate (6,2 - 8,6), zone dans laquelle les métaux lourds sont peu solubles et par conséquent peu mobiles.

Les concentrations dans le sol de métaux lourds peuvent entraîner une augmentation de l'accumulation dans les plantes. Le mercure, le plomb et le chrome ne sont absorbés qu'en faible mesure par les plantes (faible transfert); on constate par contre pour le cadmium et le zinc un transfert élevé avec une accumulation maximale dans les plantes vertes. Les experts sont divisés quant à la question de l'absorption de nickel et de cuivre.

On dispose de moins d'informations sur la pollution des matières en suspension, sédiments et sols due aux substances organo-synthétiques que sur celle due aux métaux lourds. En raison de leur toxicité, leur persistance et leur capacité d'accumulation, les substances ou groupes de substances suivants méritent une attention particulière:

- groupe des pesticides chlorés (groupe des DDT, α -HCH, β -HCH et γ -HCH; substances prioritaires)
- groupe des polychloro-biphényles (groupes des PCB; substances prioritaires)
- groupes des hydrocarbures polycycliques aromatiques (groupe des HPA; candidat pour la nouvelle liste des substances prioritaires)
- hexachlorobenzène (HCB; substance prioritaire)

Ces substances sont transportées dans le Rhin essentiellement sous forme de particules liées aux matières en suspension (transport particulaire).

Lorsque surviennent des crues provoquant de fortes inondations, la pollution des matières en suspension par des substances nuisibles est généralement plus basse qu'en situation de débit normal.

3.2 Résultats d'analyses

a. Métaux lourds

Une étude du Land de Rhénanie-Palatinat (Müller et Yahya, 1992) a eu pour objet de comparer la contamination des sols de zones inondables avec celle de surfaces rarement ou non inondées (annexe III).

Les résultats des analyses des sols réalisées entre 1983 et 1991 font apparaître des concentrations de métaux lourds plus élevées dans les sols des surfaces inondables que dans ceux des surfaces rarement ou non inondées (Müller et Yahya, 1992).

Néanmoins, cette augmentation reste faible. Dans les zones inondables, les valeurs limites fixées pour les sols (annexe II, tableau 2) dans les réglementations des Etats riverains du Rhin en matière de boues d'épuration ne sont que ponctuellement dépassées. En moyenne, les concentrations de cadmium, de mercure, de nickel, de cuivre et de chrome sont sensible-

ment inférieures à leur valeur limite respective fixée pour les sols dans les réglementations en matière de boues d'épuration.

Etant donné que les teneurs en métaux lourds des matières en suspension/sédiments augmentent à mesure que s'étend le bassin versant, cette remarque vaut également de manière générale pour l'ensemble du haut Rhin et du Rhin supérieur.

Une étude a été réalisée en Rhénanie-du-Nord-Westphalie sur un total de 10 zones inondables du Rhin et de ses affluents pour déterminer la pollution des sols et des plantes (König & Krämer, 1985).

Entre la zone d'embouchure de la Sieg et la région de Wesel/Bislich (annexe V, tableau 9), les pollutions maximales ont été détectées autour des points kilométriques 720 (Monsheim-Baumberg/Düsseldorf-Urdenbach) et 729 (Düsseldorf-Himmelgeist) ainsi qu'aux points kilométriques 770/777 (Duisbourg) et en partie au point kilométrique 824 (Wesel), avec parfois des dépassements sensibles des valeurs limites fixées par les réglementations des Etats riverains du Rhin en matière de boues d'épuration (annexe II, tableau 2) (König und Krämer, 1985).

Les valeurs moyennes de cadmium (2,67 mg/kg) (valeurs limites pour les sols fixées dans les réglementations en matière de boues d'épuration: 0,8 à 2 mg/kg), plomb (154 mg/kg) (valeurs limites pour les sols fixées dans les réglementations en matière de boues d'épuration: 50 à 100 mg/kg), mercure (1,1 mg/kg) (valeurs limites pour les sols fixées dans les réglementations en matière de boues d'épuration: 0,3 à 1 mg/kg) et zinc (480 mg/kg) (valeurs limites pour les sols fixées dans les réglementations en matière de boues d'épuration: 140 à 300 mg/kg) sont supérieures aux valeurs limites fixées pour les sols dans les réglementations des Etats riverains du Rhin sur les boues d'épuration, alors que les valeurs moyennes de cuivre (74 mg/kg) (valeurs limites pour les sols fixées dans les réglementations en matière de boues d'épuration: 36 à 100 mg/kg) sont proches de ces valeurs et celles du chrome (61 mg/kg) (75 à 150 mg/kg) et du nickel (39 mg/kg) (valeurs limites pour les sols fixées dans les réglementations en matière de boues d'épuration: 35 à 50 mg/kg) sont inférieures à ces valeurs limites réglementaires (annexe V, tableau 9 et annexe II, tableau 2).

Les pollutions les plus élevées mesurées dans les sols pour le cadmium, le plomb, le cuivre et le mercure ont été constatées dans la zone d'expansion des crues de la Wupper, alors qu'on enregistre les valeurs maximales pour le chrome et le nickel dans les zones inondables du Rhin. Les sédiments de la Wupper, la Ruhr et la Lippe sont plus pollués dans les zones d'embouchure que les sédiments du Rhin même (König et al 1985).

Au cours des trois dernières décennies, on a prélevé dans les zones inondables du Rhin inférieur néerlandais des échantillons de sédiments récents. Ces échantillons ont ensuite été conservés et analysés pour déterminer leurs teneurs en zinc, cuivre, chrome, plomb, nickel, mercure et arsenic, ainsi que les concentrations d'HPA, de PCB, de DDT et métabolites. Des échantillons de sol ont été prélevés et leurs teneurs en métaux lourds analysées dans 13 surfaces, en partie protégées par des digues d'été, et dans des zones inondables non protégées. On constate après 1970/72 une forte baisse de toutes les teneurs en métaux lourds, à l'exception du nickel. Les teneurs en nickel (env. 54 mg/kg) restent constantes pendant toute la période d'analyse, ce qui indique très probablement une origine géogène. Les surfaces protégées par des digues d'été présentent la pollution la plus faible (Japenga et al. 1990) (annexe VI, tableau 10).

Les tendances à long terme observées dans les zones inondables correspondent à celles mesurées dans les sédiments de la Ketelmeer (Beurskens et al. 1992).

Les valeurs moyennes (1981) du zinc (656 mg/kg) (valeurs limites pour les sols fixées dans les réglementations en matière de boues d'épuration: 140 à 300 mg/kg), le cuivre (104 mg/kg) (valeurs limites pour les sols fixées dans les réglementations en matière de boues d'épuration: 36 à 100 mg/kg), le chrome (214 mg/kg) (valeurs limites pour les sols fixées dans les réglementations en matière de boues d'épuration: 75 à 150 mg/kg), le plomb (173 mg/kg) (valeurs limites pour les sols fixées dans les réglementations en matière de boues d'épuration: 50 à 100 mg/kg), le cadmium (7,5 mg/kg) (valeurs limites pour les sols fixées dans les réglementations en matière de boues d'épuration: 0,8 à 2 mg/kg), le nickel (53 mg/kg) (valeurs limites pour les sols fixées dans les réglementations en matière de boues d'épuration: 35 à 50 mg/kg), le mercure (1,2 mg/kg) (valeurs limites pour les sols fixées dans les réglementations en matière de boues d'épuration: 0,3 à 1 mg/kg) sont supérieures aux valeurs limites fixées pour les sols par la réglementation des Etats riverains du Rhin sur les boues d'épuration; les valeurs moyennes d'arsenic (24 mg/kg) (valeurs limites pour les sols fixées dans les réglementations en matière de boues d'épuration: 29 mg/kg) sont par contre inférieures aux valeurs limites réglementaires (annexe VI, tableau 10 et annexe II, tableau 2).

b. Substances nuisibles organo-synthétiques

On peut dire dans l'ensemble qu'en Rhénanie-Palatinat la pollution des sols des zones inondables du Rhin est hétérogène et dépend des conditions particulières de la surface considérée (épandage de boues d'épuration, de produits phytopharmaceutiques, etc.). Pour tous les sites analysés (à l'exception de Boppard), les échantillons contenaient moins de 100 µg/kg de pesticides organochlorés et de polychloro-biphényles. Dans tous les échantillons prélevés dans les surfaces inondables du tronçon du Rhin situé en Rhénanie-Palatinat, à l'exception de Boppard, les teneurs en PCB étaient inférieures à 100 µg/kg. Les teneurs mesurées dans les zones inondables étaient parfois plus élevées que celles constatées dans les surfaces de contrôle. Les plus fortes concentrations de DDT et de ses produits de dégradation ont été détectées dans les surfaces de contrôle. Les concentrations de ce groupe de substances mesurées dans les zones inondables ne dépassaient que dans de rares cas celles des surfaces de contrôle (Müller & Yahya 1992; annexe IV, tableau 8).

Les concentrations d'HPA dans les sédiments des zones inondables du Rhin situées en territoire néerlandais sont en baisse continue avec 16,8 mg/kg en 1958, 12,0 mg/kg en 1972 et 7,2 mg/kg en 1981 (Japenga et al. 1990).

La baisse des concentrations d'HCB sur le profil longitudinal du Rhin se reflète également dans les zones inondables du Rhin.

Dans les échantillons prélevés dans les zones inondables, les teneurs en HCB étaient supérieures (jusqu'à Eich) à celles mesurées dans les zones de contrôle. On a constaté en 1988 une augmentation marquante d'HCB dans la zone inondable située près de Worth avec 488 µg/kg Ts. En 1987, il n'avait été mesuré que 16 µg/kg au même endroit (Müller & Yahya 1992; annexe IV, tableau 8).

4. Apports sédimentaires des ondes de crue de 1993/94 et de 1995

4.1 Généralités

La qualité des matières en suspension d'une onde de crue dépend entre autres du bassin versant (Rhin supérieur ou zone des bassins hautement industrialisés du Neckar, du Main et

de la Wupper) où l'onde de crue prend principalement son origine. (Schleichert 1975).

Pendant la crue d'amplitude moyenne d'avril 1994, quelques stations internationales de mesure ont prélevé journalièrement des échantillons de matières en suspension pour en analyser les teneurs en substances nuisibles. On a pu ainsi constater que la pollution spécifique des matières en suspension baissait en général lorsque le débit était élevé, en raison du phénomène de dilution avec des matériaux moins pollués (granulométrie supérieure). Cependant, les jours de grands débits, les flux de matières en suspension transportés sont également importants. Comparé aux flux transportés en situation de débit normal, cet apport supplémentaire ne peut s'expliquer que par la remise en suspension de sédiments contaminés, du moins pour les éléments-traces organiques comme l'HCB ou le groupe de PCB (cercle d'experts "Monitoring", document non publié).

4.2 Résultats d'analyses

Lors de la crue survenue entre fin 1993 et début 1994, la BfG a prélevé et analysé au total 26 couches sédimentaires (annexe III, tableau 3) déposées par les hautes eaux en bordure du Rhin (2 points de prélèvement), de la Moselle (2 points de prélèvement), de la Sarre (3 points de prélèvement) et du Main (11 points de prélèvement).

On retient les résultats suivants:

Comparée aux objectifs de référence, la pollution par le mercure (tous les échantillons sont inférieurs à 0,5 mg/kg, valeur maximale mesurée dans le Main: 0,49 mg/kg) et par le chrome (valeur maximale mesurée dans la Sarre: 91 mg/kg) ne pose plus problème aujourd'hui.

Suivent en ordre décroissant le nickel avec un maximum de 64 mg/kg (Sarre) et le cuivre avec un maximum de 102 mg/kg (Main).

Des concentrations élevées de plomb ont été observées, avec un max. de 180 mg/kg (Sarre), de zinc avec un max. de 695 mg/kg (Sarre) et de cadmium avec un max. de 3,8 mg/kg (Sarre).

Les échantillons de la Sarre recelaient également de fortes concentrations de PCB, alors que les teneurs de PCB mesurées dans les échantillons des autres bassins restaient basses à très basses. La présence d'HCB n'a été constatée que dans les couches sédimentaires du Rhin, et ce avec des concentrations légèrement supérieures (30 à 60 $\mu\text{g}/\text{kg}$) aux valeurs limites fixées. Ces observations sur les micropolluants organiques se basent cependant sur un nombre moins important de résultats d'analyse que pour les métaux lourds (BfG 1996).

Mis à part l'HCB, les centres de pollution sont donc situés dans les affluents du Rhin suivants: Sarre, Main, Moselle.

Il a été procédé aux Pays-Bas à l'analyse de la composition des matériaux déposés par la crue de 1995. Il en ressort que la qualité de ces matériaux était comparable, et parfois même meilleure, à celle d'anciennes couches du sol. D'après cette étude, la crue n'a pas eu d'impact négatif supplémentaire sur la qualité des produits d'origine végétale ou animale et n'a pas renforcé, ou uniquement dans une mesure négligeable, les risques écotoxicologiques auxquels sont exposées actuellement la flore et la faune dans le lit majeur du fleuve. On estime que la quantité totale des apports sédimentaires est de l'ordre de 100 000 à 200 000 tonnes (RIVM & RIZA 1995).

5. Conséquences et recommandations

La pollution des matières en suspension, des sédiments récents et des sols des surfaces inondables par des substances nuisibles a sensiblement baissé sur l'ensemble du bassin du Rhin depuis le milieu des années 70.

Les sédiments anciens fortement contaminés (plus de 10 ans) accumulés à hauteur des barrages, dans les bras morts, les ports et les zones d'épis ne sont plus remis en suspension par les crues et ne peuvent donc plus avoir d'impact négatif sur la qualité des surfaces inondables. Les anciens sédiments contaminés peuvent être remis en suspension par des activités de dragage. C'est pourquoi il convient de contrôler les teneurs de polluants dans les matériaux de dragage et prohiber le déplacement de ces matériaux dans le fleuve lorsque la pollution constatée est trop élevée.

Pour toutes les substances considérées, exceptés l'HCB et le groupe de DDT, les teneurs en substances nuisibles de ces compartiments augmentent à mesure que l'on va vers l'aval. La contamination résiduelle d'HCB provient d'anciens rejets non encore consolidés qui se déplacent progressivement vers l'aval. L'objectif de référence étant atteint pour les DDT et ses produits de dégradation, la pollution résiduelle des sédiments du Rhin par les DDT n'est plus considérée comme critique.

Comme pour le groupe des DDT, les objectifs de référence sont atteints pour les groupes de substances chloronitrobenzènes (1,2-CNB, 1,3-CNB et 1,4-CNB), trichlorobenzènes (1,2,3-TCB, 1,2,4-TCB, 1,3,5-TCB) et chlorotoluènes (2-chlorotoluène et 4-chlorotoluène), de même que pour les substances individuelles α -hexachlorohexane et β -hexachlorohexane, pentachlorophénol (PCP), hexachlorobutadiène (HCBD) et 3-chloroaniline. Au sujet de ces substances et groupes de substances, une protection suffisante est donc garantie pour tous les biens à protéger fixés dans le cadre des objectifs de référence (comparaison état réel/souhaité 1990-1994).

Etant donné d'une part que les teneurs en substances nuisibles dans les sédiments récents et les actuelles matières en suspension sont comparables et d'autre part que les apports sédimentaires des crues contiennent des particules sablonneuses plus grossières et non contaminées, la pollution des apports sédimentaires des crues reste inférieure à la pollution actuelle des matières en suspension. En se basant sur la pollution actuelle des matières en suspension par des substances nuisibles à hauteur de la station de mesure la plus proche située en amont, on peut donc estimer la pollution maximale que les futures crues seront susceptibles d'occasionner. Eu égard au niveau actuel de pollution et des améliorations escomptées sur le Rhin (à l'exception de la contamination par l'HCB), on doit s'attendre à une contamination plus forte des sols et des plantes dans les futures surfaces qui seront éventuellement plus fréquemment inondées sur le Rhin supérieur et le Rhin moyen que dans les surfaces non ou rarement inondées, cette contamination ne dépassant néanmoins pas le niveau de pollution constaté dans les surfaces inondables existantes et restant en deçà des valeurs limites et des valeurs d'orientation. Dans les surfaces rarement inondées, il n'est constaté aucune modification notable de la pollution des sols par rapport aux surfaces non inondées. Pour toutes les substances nuisibles (excepté l'HCB), des pollutions importantes sont observées en aval de la confluence du Rhin et de ses affluents.

Références bibliographiques

- 1 BEURSKENS, I.E.M., MOL GE.A.I., BARREVELD, H.L., MUNSTER VAN B, (1992); Geochronology of priority pollutants in a sedimentation area of the Rhine river; Environ. Toxicol & Chem., November 1992
- 2 CIPR (1993); rapport sur l'état du Rhin; analyses physico-chimiques et biologiques jusqu'en 1991; comparaison état réel 1990 - objectifs de référence
- 3 CIPR (1994); inventaire des rejets ponctuels de substances prioritaires 1992
- 4 CIPR (1995); comparaison entre l'état réel du Rhin de 1990 à 1993 et les objectifs de référence
- 5 JAPENGA, K.H., ZSCHUPPE, A.J., DE GROOT & SALOMONS W. (1990); Heavy metals and organic micropollutants in floodplains of the river Waal, a distributary of the river Rhine 1958-1981. Netherlands journal of agricultural science 38, 381-397
- 6 KÖNIG, W & KRÄMER, F (1985); Schwermetallbelastung von Böden und Kulturpflanzen in Nordrhein-Westfalen, Schriftenreihe LÖLF NRW, 10, 160 S., 34 Abb., 63 Tab., 20 Fotos, 1 Karte
- 7 KÖNIG, W., HEMBROCK-HEGER, A., WILKENS, M. (1991); Persistente organische Chemikalien im Boden, UWSE-2. Umweltchem. Ökotox. 3 (1), 33-30
- 8 MÜLLER G. & YAHYA A. (1992); Schadstoffbelastung in Böden von Hochwasserüberflutungsflächen des Rheins, Literaturstudie und Zusammenstellung vorhandener Untersuchungen; Institut für Sedimentforschung der Universität Heidelberg
- 9 RIVM & RIZA (1995); Rapport nr. 609021006; Hoogwater januari en februari 1995: Kwaliteit en risico's van het door Rijn en Maas aangevoerde rivierslib
- 10 BfG (1996); Questions relatives à la qualité des matières en suspension et des sédiments en relation avec les problèmes liés aux crues, Bundesanstalt für Gewässerkunde
- 11 SCHLEICHERT (1975); Schwermetallgehalte der Schwebstoffe des Rheins bei Koblenz im Jahresverlauf - Eine gewässerkundliche Interpretation, Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen (1975), H-6, S. 150-157

Fixation de valeurs concrètes pour les concentrations naturelles des matières en suspension en métaux lourds

Les concentrations naturelles des matières en suspension en métaux lourds sont fixées conventionnellement de la manière suivante (fraction < 20 μm):

Tableau 1: teneurs conventionnelles géogènes en métaux lourds dans les matières en suspension du Rhin (fraction < 20 μm)

Substance	Teneur	
Plomb	25	mg/kg
Cadmium	0,3	mg/kg
Chrome	80	mg/kg
Cuivre	20	mg/kg
Nickel	30	mg/kg
Mercure	0,2	mg/kg
Zinc	100	mg/kg

Remarque: Les concentrations naturelles en métaux lourds varient considérablement en fonction de l'origine des matières en suspension; par ailleurs, les résultats d'analyse publiés dans la documentation dépendent beaucoup de la méthode d'analyse utilisée. Il est cependant nécessaire de fixer des valeurs concrètes afin de pouvoir évaluer les résultats de mesures et planifier les actions à engager. Toutes les informations actuellement disponibles portant sur les teneurs géogènes des sédiments et matières en suspension ont été évaluées pour pouvoir fixer ces valeurs. Etant donné que la marge de variation des teneurs géogènes pour le Rhin n'est pas suffisamment documentée, elle n'a pas pu être prise en considération.

Valeurs limites nationales pour l'épandage à terre de boues d'épuration

Tableau 2: valeurs limites nationales pour l'épandage à terre de boues d'épuration et objectifs de référence de la CIPR en mg/kg

Substance	CH ¹⁾	D ²⁾	F	NL ³⁾	objectifs de référence de la CIPR
Hg	0,8	1	1	0,3	0,5
Ni	50	50	50	35	50
Zn	200	200	300	140	200
Cu	50	60	100	36	50
Cr	75	100	150	100	100
Pb	50	100	100	85	100
Cd	0,8	1,5	2	0,8	1,0
As	-	-	-	29	40

¹⁾ Valeurs de référence pour les teneurs de substances nuisibles dans les sols (Ordonnance sur les substances nuisibles dans les sols)

²⁾ Valeurs fixées pour les sols aux termes de l'ordonnance sur les boues d'épuration

³⁾ Valeurs limites standardisées fixées pour les sols dans le cadre de l'épandage à terre de boues d'épuration

Analyses de la BfG

Tableau 3: Apports sédimentaires des ondes de crue (décembre 1993/janvier 1994) sur les rives du Rhin, de la Moselle, de la Sarre et du Main (teneurs totales dans la fraction <2000 µm) (BfG 1996)

Fleuve	PK	Localité	Date	Cd	Hg	Pb	Zn	Cu	Ni	Cr
				(mg/kg)						
Rhin	595,5	Niederwerth	28.12.93	1.20	0.33	49	161	45	26	105
Rhin	595,5	Niederwerth	28.12.93	1.79	0.38	63	243	66	46	133
Rhin	780,60; gauche	Ram. Duis- bourg	30.12.93	1.99	0.47	168	385	74	51	163
Rhin	788,50; droite	Ram. Duis- bourg	30.12.93	2.00	0.23	80	258	46	37	134
Moselle	124,0; gauche	Zettlingen	30.12.93	1.85	0.28	137	497	67	53	122
Moselle	124,0; droite	Zettlingen	30.12.93	2.53	0.24	138	528	74	53	280
Moselle	1,0; gauche	Ecluse Co- blence	28.12.93	1.21	0.17	107	345	47	50	120
Moselle	1,0; milieu	Ecluse Co- blence	28.12.93	2.12	0.20	115	362	54	53	110
Moselle	1,0; droite	Ecluse Co- blence	28.12.93	1.29	0.19	132	396	57	45	119
Sarre	gauche	Ecluse Völ- klingen	20.1.94	1.62	0.21	101	323	49	30	127
Sarre	droite	Ecluse Völ- klingen	20.1.94	3.80	0.30	143	416	74	48	107
Sarre	17	Serrig	30.12.93	0.47	0.07	44	163	33	22	71
Sarre		UW Kan- zem	30.12.93	2.48	0.35	180	695	87	64	131
Main	8,8; gauche		30.12.93	2.26	0.49	50	264	65	46	99
Main	12,2; gauche		30.12.93	0.21	0.34	22	77	27	18	65
Main	18,65; gauche		30.12.93	1.82	0.26	54	273	71	56	112
Main	24,8; gauche		30.12.93	0.22	0.11	33	148	43	30	217

Fleuve	PK	Localité	Date	Cd	Hg	Pb	Zn	Cu	Ni	Cr
				(mg/kg)						
Main	26,4; gauche		30.12.93	0.29	0.03	21	75	24	21	83
Main	55,7; droite		30.12.93	0.28	0.21	25	92	32	19	354
Main	77,3; gauche		30.12.93	1.61	0.06	71	723	77	41	110
Main	93,0; droite	Obernau	4.1.94	0.84	0.08	370	2336	41	18	103
Main	112,9; gauche	Ecluse Klingenberg		0.09	0.02	4	32	21	5	114
Main	113,2; gauche	Ecluse Klingenberg		1.66	0.18	88	298	76	44	57
Main	121,9; droite	Ecluse Heubach	4.1.94	0.49	0.04	26	66	27	12	173
Main	151,0; droite	Ram. Haßloch		1.84	0.27	71	343	102	49	110
Main	152,0; gauche	Ram. Haßloch		1.72	0.23	65	293	92	50	103

Tableau 4: Baisse de la pollution du Rhin par les métaux lourds à hauteur de Coblenz

Paramètre	Unité	MES 1974 153 échantillons BfG	MES 1994 23 échantillons CIPR	Sédiments 1976 Rheinlache BfG	Sédiments 1990 Rheinlache CIPR
Arsenic	[mg/kg]		15,5	20,7	15
Cadmium	[mg/kg]	8,4	1,0	9,7	1,7
Chrome	[mg/kg]	599	74	450	71
Cuivre	[mg/kg]	371	71	244	79
Fer	[g/kg]		30,3	28,9	27,6
Mercure	[mg/kg]		0,26	4,4	0,7
Manganèse	[mg/kg]		1389	704	732
Nickel	[mg/kg]	84	50	79	54
Plomb	[mg/kg]	199	56	170	79
Zinc	[mg/kg]	1086	264	950	324
Phosphore	[mg/kg]	3943	1691	4000	1690

**Analyses en Rhénanie-Palatinat
(Müller G. & YAHYA; 1992)**

Tableau 5: Moyenne des concentrations de métaux lourds (mg/kg) dans les zones inondables et dans les zones de contrôle non ou rarement inondées en Rhénanie-Palatinat

Eléments	Zones inondables		Zones de contrôle	
	moyenne arithmétique	Médiane	moyenne arithmétique	Médiane
Cadmium	0,875	0,650	0,637	0,510
Mercure	0,51	0,29	0,22	0,13
Nickel	24,3	22,5	20,3	22,3
Cuivre	35,7	29,0	23,8	19,2
Zinc	529	112	109	72,5
Plomb	254	49,0	113	40,5
Chrome	37,2	29,5	33,1	27,7
Arsenic	9,1	8,5	9,1	7,9

Tableau 6: Moyennes arithmétiques des concentrations de métaux lourds (mg/kg) dans la zone inondable (zone "I") et dans la zone de contrôle non inondée (zone "C") des stations de prélèvement de Speyer, Ingelheim et Boppard; profondeur de prélèvement 0-35 cm (1987)

	Speyer		Ingelheim		Boppard	
	I	C	I	C	I	C
Arsenic	7,9	7,4	8,9	7,8	9,9	12
Plomb	36	25	53	34	542	284
Cadmium	0,5	0,3	0,7	0,5	1,2	1,2
Chrome	32	22	41	27	41	46
Cuivre	24	13	29	14	48	44
Nickel	28	17	17,5	10,5	24,6	34,3
Mercure	0,3	0,1	0,4	0,2	0,8	0,4
Zinc	90	58	122	52	1105	218

Tableau 7: Moyenne arithmétique des pH et des concentrations de métaux lourds (mg/kg) dans les stations de prélèvement de Wörth, Eich, Gaulsheim, Niederwerth et Sinzig dans la zone inondable (zone "I") et dans la zone de contrôle non ou rarement inondée (zone "C"); profondeur de prélèvement 0-10 cm (1987/88/89).

Année	Site		pH	Pb	Cd	Cr	Cu	Ni	Hg	Zn	As
1987	Wörth	I	7,6	27	<0,3	32	17	21	0,23	69	8,2
		C	7,6	20	<0,3	27	13	19	0,07	49	6,7
1988		I	7,5	49	0,8	46	43	34	0,34	133	12
		C	-	22	0,4	26	12	20	0,05	-	7,3
1989		I	7,5	46	0,4	45	48	32	0,28	137	-
		C	7,3	20	0,3	26	11	19	0,09	48	-
1987	Eich	I	7,3	43	0,8	46	24	19	0,42	98	14
		C	7,5	35	<0,3	26	10	19	0,05	46	7,6
1988		I	-	43	1,5	54	37	25	0,45	120	14
		C	-	13	<0,3	23	9,1	19	0,03	32	6,8
1989		I	7,4	19	<0,3	27	9,4	16	0,13	50	-
		C	7,3	14	<0,3	25	7	18	0,06	39	-
1987	Gaulsheim	I	7,5	51	1,0	57	36	30	0,51	132	18
		C	7,0	17	<0,3	26	12	19	0,05	45	6
1988		I	-	56	1,1	56	38	30	0,47	124	18
		C	-	20	0,3	30	11	22	0,05	50	7
1989		I	7,5	44	0,8	48	37	29	0,41	116	-
		C	7,1	17	<0,3	28	10	21	0,05	44	-
1987	Niederwerth	I	7,4	26	0,4	28	14	14	0,20	75	5
		C	7,4	49	0,8	36	24	18	0,44	144	8
1988		I	-	48	0,6	30	20	18	0,28	110	8
		C	-	43	0,4	19	14	15	0,17	72	6
1989		I	7,0	34	0,4	33	25	18	0,27	97	-
		C	7,2	46	0,3	19	15	15	0,16	71	-
1987	Sinzig	I	7,1	79	0,8	34	32	20	0,56	220	9
		C	5,7	79	0,6	56	45	44	0,22	130	5
1988		I	-	42	<0,3	25	15	19	0,18	121	5
		C	-	74	0,6	47	40	46	0,17	129	13
1989		I	7,3	73	0,6	45	38	30	0,35	238	-
		C	6,9	85	0,4	49	44	46	0,21	142	-

Tableau 8: Moyennes arithmétiques des concentrations de HCB, Σ DDT et Σ PCB (congénères de "Ballschmit") en $\mu\text{g}/\text{kg}$ sur différents sites de Rhénanie-Palatinat, MF = masse fraîche, MS = masse sèche, n.d. = non détecté, I = zone inondable, C = zone de contrôle non ou rarement inondée

1987		Speyer		Ingelheim		Boppard	
		MF	MS	MF	MS	MF	MS
HCB	I	3	4	n.d.	n.d.	128	157
	C	2	3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Σ DDT	I	3	5	54	66	83	103
	C	34	39	28	34	319	486
Σ PCB	I	2	4	5	7	84	99
	C	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	16	19

1987		Wörth		Eich		Gaulsheim		Niederwerth		Linz	
		MF	MS	MF	MS	MF	MS	MF	MS	MF	MS
HCB	I	12	16	8	11	5	7	5	6	14	16
	C	3	4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	18	23	7	10
Σ DDT	I	3	4	14	19	11	16	10	12	29	34
	C	23	30	n.d.	n.d.	181	207	20	25	11	15
Σ PCB	I	10	14	14	20	20	28	14	17	92	94
	C	2	2	2	2	2	2	32	41	24	34
1988											
HCB	I	353	488	36	37	4	7	7	8	12	15
	C	2	2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	6	8
Σ DDT	I	14	19	9	12	10	17	19	23	16	21
	C	28	35	n.d.	n.d.	132	151	1	1	2	3
Σ PCB	I	31	43	18	24	17	30	19	24	47	59
	C	2	2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	2	2	8	11

**Analyses en Rhénanie-du-Nord-Westphalie
(König & Krämer 1985)**

Tableau 9: Teneurs en métaux lourds dans les sols de la zone inondable du Rhin (ppm)

Élément	659 (droite)		720 (droite)		729 (droite)		736 (droite)		749 (droite)		764 (droite)		770 (gauche)		777 (gauche)		809 (droite)		824 (droite)	
	Point kilométrique	Nombre d'échantillons																		
Cadmium		2,7		3,9		3,4		0,9		1,8		2,5		4,5		5,4		2,0		6,4
Plomb		136		199		174		43		75		136		266		292		145,6		165
Zinc		378		632		457		119		199		402		747		909		470,1		515
Cuivre		50		118		60		20		28		49		102		128		56,4		80
Nickel		41		96		41		27		25		29		50		68		39,9		51
Chrome		59		411		67		22		34		54		166		213		58,8		80
Mercure		0,6		2,3		1,2		0,1		0,4		0,9		2,1		2,2		1,0		1,8

1. Japenga et al 1990

Tableau 10: Concentrations moyennes de métaux lourds dans les sédiments de la zone inondable du Waal, données exprimées en mg/kg

Prélèvement	n	Zn	Cu	Cr	Pb	Cd	Ni	Hg	As
1958	11	1151	146	428	303	6,4	55	5,2	87
1970	122	870	157	373	259	11,8	54	6,3	51
1972	30	1147	185	404	336	14,9	54	6,5	35
1981	114	656	104	214	173	7,5	53	1,2	24

2. RIZA 1995, Rapport no. 609021006 (crues de janvier et février 1995)

Tableau 11: Qualité des matières en suspension du Rhin à hauteur de Lobith

Année	1988-1990		1993		Crue 1993		Crue 1995	
		moyenne		moyenne		moyenne		moyenne
Arsenic mg/kg		20						15
Cadmium mg/kg		3.1	2.2		1.6		1.1	
Zinc mg/kg		592	529		405		330	
Mercuré mg/kg		1.0	1.0		0.4		0.7	
Cuivre mg/kg		112	77		64		60	
Plomb mg/kg		138	112		90		80	
Chrome mg/kg		103	87		78		72	
Nickel mg/kg		53	46		54		47	
HPA(10) mg/kg		7.8	5.3		4.3		5.6	
PCB(7) mg/kg		104	70		44		83	
Hexachlorobenzène mg/kg		30	18		-		14	
Substance organique %		10.9	10.7		6.5		8.3	
Argile %		30.1	27.6		38.6		40.3	