

Comité Commun d'experts de la CIPR et de la CHR

IKSR/KHR Expertengruppe

Modèle d'alerte pour le Rhin

**Un modèle pour la prévision opérationnelle de
la propagation de produits nocifs dans le Rhin**

Rédaction:

**M. Spreafico
A. van Mazijk**

Avec des contributions de:

**M. Adler
A. Jakob
H. Hanisch
Ch. Leibundgut
A. van Mazijk
M. Spreafico
H. Wiesner**



**Rapport no. I-13 de la CHR
Bericht Nr. I-13 der KHR**

Commission Internationale pour la Protection du
Rhin contre la Pollution

Internationale Kommission für die Hydrologie des
Rheingebietes

Internationale Kommission zum Schutze des Rheins
gegen Verunreinigung

Commission Internationale de l'Hydrologie du bas-
sin du Rhin

Comité Commun d'experts de la CIPR et de la CHR

IKSR/KHR Expertengruppe

Modèle d'alerte pour le Rhin Un modèle pour la prévision opérationnelle de la propagation de produits nocifs dans le Rhin

M. Adler - Bundesanstalt für Gewässerkunde, Coblenz
A. Jakob - Service hydrologique et géologique national, Berne
H. Hanisch - Bundesanstalt für Gewässerkunde, Coblenz
Ch. Leibundgut - Albert-Ludwigs-Universität, Fribourg en Brisgau
A. van Mazijk - Université Technique, Delft
M. Spreafico - Service hydrologique et géologique national, Berne
H. Wiesner - Albert-Ludwigs-Universität, Fribourg en Brisgau



CIPR
Secrétariat
Postfach 309
D - 56003 Coblenz
Allemagne



CHR
Secrétariat
Postbus 17
NL - 8200 AA Lelystad
Pays-Bas

Rapport no. I-13 de la CHR
Langues originales: allemand et néerlandais

©1996, CHR/KHR
ISBN 90-70980-23-1

Préface

Au cours de ces dernières années, à la suite de divers accidents, le Rhin a été pollué à plusieurs reprises, avec pour conséquences des dégâts assez importants à l'écosystème ainsi que des perturbations des installations utilisant l'eau du fleuve. Pour éviter autant que possible de tels accidents ou du moins en réduire les effets nuisibles à un strict minimum, on cherche à diminuer à la source les risques d'accidents, en incitant leurs auteurs potentiels à prendre les précautions appropriées. Comme toutefois les accidents ne peuvent être complètement exclus, la Commission Internationale pour la Protection du Rhin contre la Pollution a mis en place un système d'alerte en cas de déversement de substances nuisibles dans les cours d'eau. Ce système a pour but d'informer à temps les instances responsables dans les différents états riverains du Rhin, et si nécessaire, de leur transmettre l'alerte. Pour pouvoir acquérir les données nécessaires et les transmettre, les centres d'alerte principaux ont besoin d'informations en temps réel sur les paramètres qualitatifs et quantitatifs relevés aux stations de mesure. Il leur est nécessaire aussi de disposer d'un modèle mathématique permettant de calculer le transport de substances nocives dans le Rhin et d'établir des prévisions quant à leur diffusion.

C'est pourquoi, en 1988, les ministres des états rhénans ont chargé la Commission Internationale pour la Protection du Rhin contre la Pollution et la Commission internationale de l'Hydrologie du bassin du Rhin de développer des méthodes et des modèles de prévision, pour le transport de produits nocifs dans le Rhin. A cet effet, sous la direction d'un comité d'experts, des modèles nouveaux ont été développés ou alors des modèles déjà existants ont été adaptés, pour le Rhin et deux de ses affluents, l'Aar et la Moselle. Puis ces modèles ont été mis à la disposition des centres d'alertes principaux, où ils sont maintenant opérationnels.

Le présent rapport final résume les travaux réalisés et donne, à l'intention des spécialistes un aperçu des problèmes rencontrés, de la méthode de calcul des temps d'écoulement selon les lois de l'hydraulique, ainsi que du déroulement des essais de traçage ayant permis de calibrer et de vérifier le modèle d'alerte. On trouvera aussi la description de ce modèle, tel qu'il a été développé.

Que tous les collaborateurs venant de Suisse, d'Allemagne, de France et des Pays-Bas trouvent ici le témoignage de notre reconnaissance. Leur collaboration s'est révélée très fructueuse et elle a eu un effet positif sur les activités individuelles des différents pays, dans les domaines concernés. La coopération de deux commissions de bassin hydrographique a fait ses preuves et peut être considérée comme un exemple à suivre, s'agissant de maîtriser des problèmes communs.

Le président de la CHR
Dr. M. Spreafico

TABLE DES MATIERES

	<i>Préface</i>	3
1.	GENERALITES	7
	M. Spreafico	
1.1	Description	7
1.2	Problématique et objectifs du modèle d’alerte pour le Rhin	11
1.3	Organisation et déroulement des travaux	11
1.4	Le modèle d’alerte pour la prévision de la diffusion des substances dans le Rhin	13
1.5	Evaluation du modèle d’alerte	17
1.6	Bibliographie	18
2.	L’INTEGRATION DU MODELE D’ALERTE DANS LE SYSTEME D’ALERTE DU RHIN	23
	M. Spreafico	
3.	PRINCIPES HYDRAULIQUES	25
	A. Jakob, M. Adler, A. van Mazijk	
3.1	Structure des cours d’eau	25
3.2	Calculs hydrauliques des temps d’écoulement dans le Rhin supérieur et dans l’Aar	25
	3.2.1 Relations hauteur-débit	31
	3.2.2 Programme de calcul des temps d’écoulement FLORIS	32
	3.2.3 Calculs effectués et évaluation	33
	3.2.4 Perspectives d’avenir	35
	3.2.5 Bibliographie	35
3.3	Temps d’écoulement dans le Rhin supérieur, moyen, inférieur et dans la Moselle	36
3.4	Les temps d’écoulement dans les bras néerlandais du Rhin	39
4.	COLLECTE DE DONNEES EN VUE DES ESSAIS DE TRAÇAGE	41
	H. Wiesner, Ch. Leibundgut, H. Hanisch	
4.1	Introduction et méthodologie	41
	4.1.1 Introduction	41
	4.1.2 Essais de traçage et modèle d’alerte pour le Rhin	42
	4.1.3 Déversement de substances	43
	4.1.4 Prélèvements et analyse des échantillons	43
	4.1.5 Débits et flux de traceurs	44
4.2	Essais réalisés en Suisse	46
	4.2.1 Tronçons étudiés	46
	4.2.2 Débits	46
	4.2.3 Vitesses de propagation des substances	46
	4.2.4 Flux de traceurs	48
	4.2.5 Travaux spéciaux	49
4.3	Essais en Allemagne et aux Pays-Bas	49
	4.3.1 Tronçons étudiés	49
	4.3.2 Débits	50
	4.3.3 Vitesses de propagation des substances	51
	4.3.4 Flux de traceurs	54
	4.3.5 Travaux spéciaux	57
4.4	Essais en France	58
	4.4.1 Tronçons étudiés	58
	4.4.2 Débits	58
	4.4.3 Vitesses de propagation des substances	59
	4.4.4 Flux de traceurs	61

4.5	Conclusions, recommandations et perspectives	62
4.6	Bibliographie	63
5.	LE MODELE D'ALERTE POUR LE RHIN	65
	A. van Mazijk	
5.1	Introduction	65
5.2	Développement mathématique du modèle	67
	5.2.1 Modèle Taylor (version 1.0)	67
	5.2.2 Modèle pour les zones d'eaux stagnantes (versions 2.0 et 2.1)	69
5.3	Procédure de vérification et de calibrage	71
	5.3.1 Introduction	71
	5.3.2 Quantités de marqueurs	71
	5.3.3 Calibrage des paramètres	71
5.4	Résultats du calibrage	73
	5.4.1 Calibrage du tronçon du Haut-Rhin	73
	5.4.2 Calibrage des tronçons du Rhin supérieur, moyen et inférieur	77
5.5	Résultats des vérifications	81
	5.5.1 Vérification du tronçon du Rhin supérieur	81
	5.5.2 Vérification des tronçons du Rhin supérieur, moyen et inférieur	84
5.6	Conclusions	90
5.7	Discussion	93
5.8	Liste des abréviations	94
5.9	Bibliographie	94
	REMERCIEMENTS	97
	PUBLICATIONS DE LA CHR	99
	Quelques informations sur la CHR (allemand, français, néerlandais et anglais)	101

1. GENERALITES

M. Spreafico

Service hydrologique et géologique national, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, CH-3003 Berne

1.1 Description

La superficie du bassin du Rhin représente 180 000 km², ce qui le classe parmi les principaux fleuves d'Europe; c'est l'une des voies navigables les plus fréquentées au monde.

Le cours du Rhin, qui mesure 1320 km de long, peut être divisé en six grands tronçons: le Rhin alpin, qui débute au confluent des deux cours qui l'alimentent (Rhin antérieur et postérieur) et se termine à l'embouchure du lac de Constance; le Haut-Rhin entre le lac de Constance et Bâle, le Rhin supérieur jusqu'à Bingen et le Rhin moyen jusqu'à Cologne. De Cologne à Lobith, on parle de Rhin inférieur, rejoint quelques kilomètres plus loin par le delta du Rhin.

Ses principaux affluents sont l'Aar, l'Il, le Neckar, le Main, la Lahn, la Moselle, la Ruhr et la Lippe (figure 1.1.1).

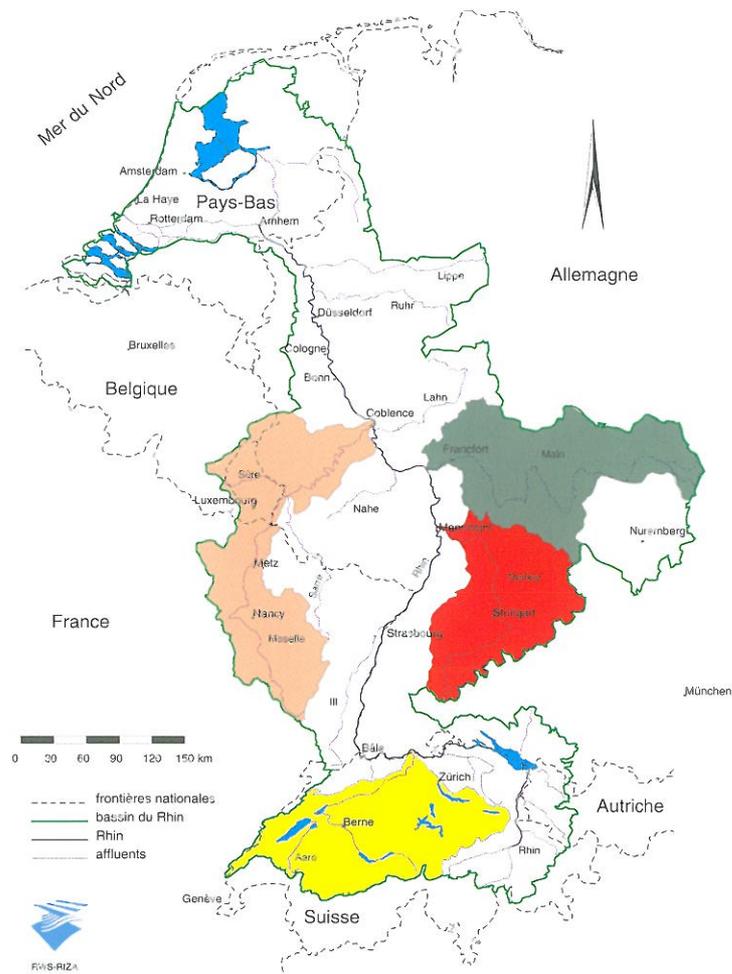


Figure 1.1.1 Bassins versants du Rhin et de ses principaux affluents

Les profils longitudinaux et transversaux du Rhin sont très variés et fortement marqués par le milieu environnant et les interventions de l'homme. Le fleuve a été aménagé pour protéger les populations contre les crues et pour optimiser la gestion des eaux. On citera entre autres mesures importantes la fixation des lits, la rectification du cours afin d'augmenter le débit, les digues contre les inondations, les travaux d'élargissement et de stabilisation des chenaux de navigation fluviale (les

Région à forte activité commerciale, industrielle et agricole et dotée de bonnes infrastructures, le bassin du Rhin compte plus de 50 millions d'habitants. La densité démographique est particulièrement forte dans certaines régions: en Suisse, régions autour de Bâle, de Zurich et de Berne; en France, Mulhouse, Strasbourg, Nancy et Metz; en Allemagne, dans le bassin du Rhin supérieur les régions de Fribourg, Karlsruhe, Ludwigshafen et Mannheim; dans le bassin du Neckar la région de Stuttgart, dans le bassin du Main, la région de Nuremberg-Erlangen, Wurzburg et plus particulièrement le bassin inférieur du Main de Francfort à Wiesbaden; sur la rive gauche du Rhin, la région de Mayence à Bingen ainsi que la zone Bonn-Cologne-Düsseldorf, et la Sarre dans le bassin de la Moselle. La région de la Ruhr, où règnent villes et industries, est très peuplée entre Duisbourg et Dortmund. La partie néerlandaise du bassin du Rhin est elle aussi très fortement peuplée, Arnhem et Nimègue à l'est et les villes portuaires d'Amsterdam et de Rotterdam occupant une place à part (voir figure 1.1.3).

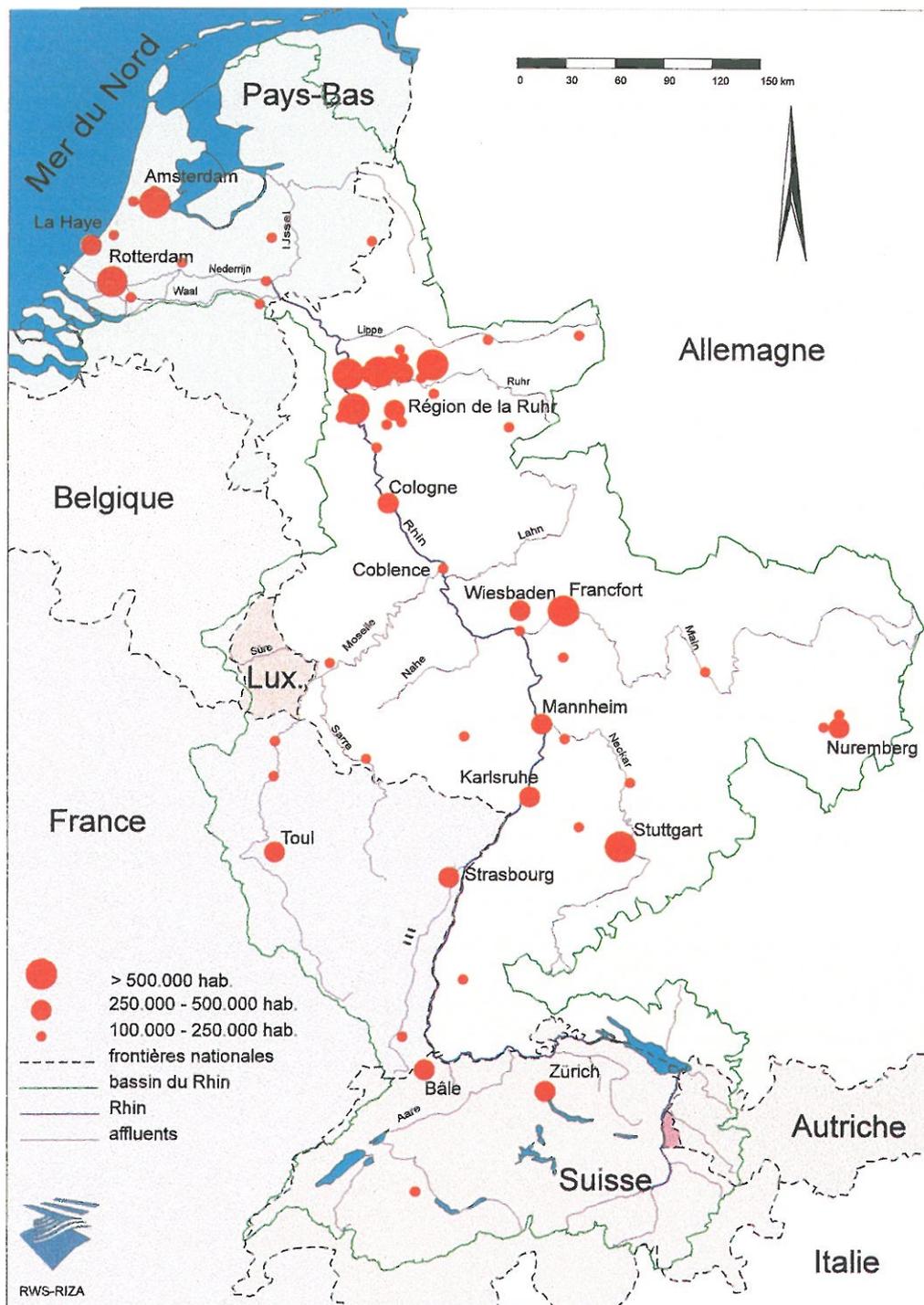


Figure 1.1.3 Carte d'ensemble des zones à forte densité démographique du bassin du Rhin

L'industrie a connu une forte expansion, complétant ainsi l'exploitation agricole et forestière. On citera entre autres les mines de charbon, l'exploitation de minerais, les mines de potasse et de sel. L'industrie chimique, qui a vu le jour au milieu du dix-neuvième siècle, a construit ses plus grandes usines à Bâle, Ludwigshafen, sur le cours inférieur du Main, sur le Rhin inférieur et à l'embouchure du Rhin. Les industries de transformation telles que les usines de fabrication de verre, les papeteries et usines de pâte à bois, les usines textiles, les sucreries et les brasseries s'installèrent en grand nombre. Les secteurs de transformation des métaux, de construction de machines et l'industrie électrique se sont développés à un rythme très rapide. La plupart de ces industries utilisaient l'eau du Rhin à des fins de refroidissement, d'approvisionnement en eau, de production d'énergie, de collecteur, etc.

Le transport s'est développé parallèlement à l'industrie, et le réseau routier et ferroviaire a été étendu. Le Rhin a été transformé en grande voie fluviale entre Bâle et la mer du Nord, et est aujourd'hui la voie la plus fréquentée d'Europe. Voir [CHR 1978] et [CHR 1993] pour plus d'informations sur l'hydrologie et les interventions de l'homme.

L'eau a donc été fortement influencée par l'homme, tant sur les plans qualitatif et quantitatif; à cela s'est ajoutée l'action de plusieurs produits qui ont eu des répercussions sur la qualité des eaux (voir figure 1.1.4).

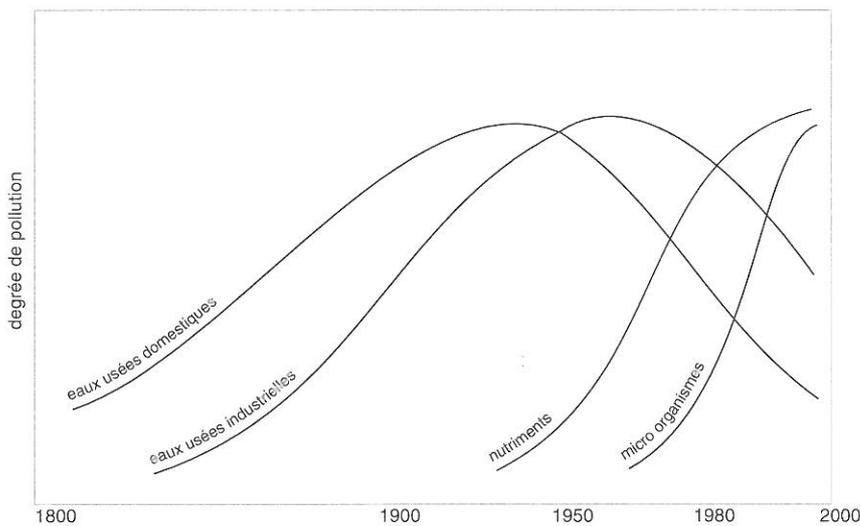


Figure 1.1.4 Courbe de pollution du Rhin par différents groupes de produits

Le Rhin continue à être pollué par des produits toxiques, et n'est toujours pas à l'abri d'incidents, comme on peut le constater à la lecture des rapports d'activité de la Commission Internationale pour la Protection du Rhin contre la Pollution qui font le point sur les pollutions intervenues.

Afin d'éviter de tels incidents, ou tout du moins afin de limiter le plus possible leurs conséquences, des mesures préventives ont été prises pour réduire les risques potentiels d'accident. En Suisse, par exemple, un règlement de prévention des pollutions accidentelles a été adopté. Celles-ci ne pouvant pas être entièrement exclues, les pays riverains ont mis en oeuvre un système d'alerte en cas de pollution des eaux, ce dans le cadre de la Commission Internationale pour la Protection du Rhin contre la Pollution. Ce système a pour objectif d'informer et de prévenir rapidement les services responsables des états riverains.

Lors d'un incendie survenu chez Sandoz à Schweizerhalle en 1986, l'eau ayant servi à éteindre l'incendie a été rejetée dans le Rhin, entraînant avec elle des quantités importantes de produits chimiques qui provoquèrent des dommages considérables sur l'écosystème et eurent des répercussions sur l'utilisation de l'eau. L'analyse des événements a démontré l'insuffisance des instruments existant pour la prévision de la propagation des nappes de pollution sur le Rhin. Les ministres compétents des états riverains du Rhin ont alors chargé la Commission Internationale pour la Protection du Rhin contre la Pollution et la Commission internationale de l'Hydrologie du bassin du Rhin de

développer des méthodes et des modèles permettant de prévoir de façon fiable le temps de parcours et l'évolution de la concentration de produits contaminants dans le Rhin. Le modèle d'alerte actuel est le fruit de ces travaux.

1.2 Problématique et objectifs du modèle d'alerte pour le Rhin

En cas d'incident sur le Rhin, les autorités responsables et les responsables de la gestion des eaux - chargés par exemple de la distribution d'eau sur le Rhin - sont confrontés à plusieurs problèmes, dont la toxicité de l'eau:

- Quand le front de la nappe polluante arrivera-t-il à un tronçon déterminée du fleuve?
- Quelle est la concentration maximum probable en produits toxiques?
- Quand la pollution maximum interviendra-t-elle?
- Pendant combien de temps une valeur de concentration déterminée sera-t-elle dépassée?

Ces informations doivent pouvoir être recueillies pour chaque débit. Il n'est pas nécessaire de savoir quand l'eau peut à nouveau être utilisée - ce qui est fonction de la concentration en produits toxiques - car habituellement, celle-ci est mesurée par les utilisateurs à des points déterminés en cas de pollution.

La collecte et la transmission de ces informations implique que les centres d'alerte disposent en temps réel des données quantitatives et qualitatives stations de mesure, ainsi que de modèles de transport pour le calcul et la prévision de l'écoulement des produits toxiques dans le Rhin. On part de l'hypothèse que les informations relatives aux quantités et au type de produits toxiques déversés, à la répartition dans le temps du flux de produits toxiques, à la régulation du système de gestion des eaux, etc. sont fragmentaires.

Plusieurs conditions ont été définies avant de développer le modèle d'alerte et de prévision de propagation des substances:

- le modèle doit être opérationnel en cas d'incident, ce qui signifie que les résultats doivent être rapidement disponibles.
- le modèle doit s'appuyer sur des données d'entrée que l'on doit pouvoir se procurer en temps réel. Il s'agit dans ce cas d'informations concernant l'incident ou de données sur le niveau d'eau, qui peuvent être obtenues par télétransmission des stations de mesure aux principaux centres d'alerte.
- le modèle doit être le plus simple possible et pouvoir fonctionner sur PC afin de pouvoir être utilisé sans difficulté par toutes les centres d'alerte.

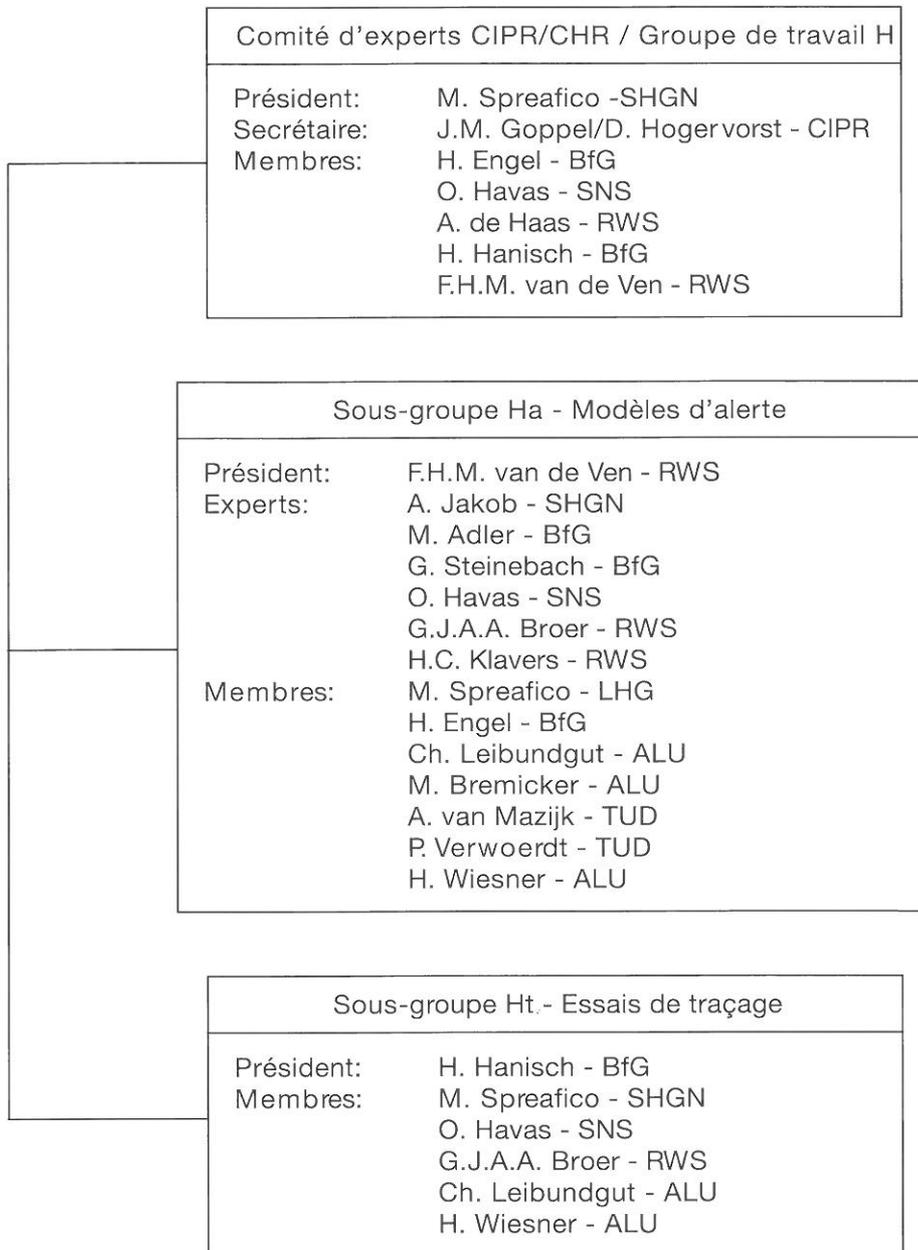
1.3 Organisation et déroulement des travaux

Les travaux ont été lancés à l'initiative des états riverains du Rhin, qui les ont financés, et qui étaient représentés par le groupe de travail K de la CIPR et la conférence de coordination de la CHR.

La CIPR et la CHR ont nommé un comité d'experts commun responsable de la planification et de la coordination.

La planification détaillée a été réalisée par un groupe de travail de spécialistes de la modélisation et un groupe de travail d'experts en traçage (voir figure 1.3.1).

Les travaux ont été réalisés par différents services administratifs ainsi que par des universités et des institutions privées de Suisse, d'Allemagne, de France et des Pays-Bas.



- ALU: Université Albert-Ludwig, Fribourg en Brisgau, Institut de géographie physique, Chaire d'hydrologie
- BfG: Bundesanstalt für Gewässerkunde, Coblenz
- CIPR: Commission Internationale pour la Protection du Rhin contre la Pollution, Coblenz
- SHGN: Service hydrologique et géologique national, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne
- RWS: Institut de l'aménagement des eaux intérieures et de l'épuration des eaux usées, Rijkswaterstaat, Lelystad
- SNS: Service de la Navigation de Strasbourg
- TUD: Université Technique de Delft, Unité d'enseignement et de recherche pour les techniques de santé et la gestion des eaux, Faculté de techniques civiles

Figure 1.3.1 Composition du groupe d'experts CIPR/CHR

Les travaux du groupe ont bénéficié du soutien des secrétariats de la Commission internationale de l'Hydrologie du bassin du Rhin et de la CIPR. La gestion des modèles a été assurée par le secrétariat de la CHR.

Le Service hydrologique et géologique national de l'Office fédéral de l'environnement, des

forêts et du paysage, le Bundesanstalt für Gewässerkunde de Coblenz et le Rijkswaterstaat des Pays-Bas ont aidé les principaux centres d'alerte en faisant appel à leurs experts en modélisation lorsqu'ont surgi des problèmes portant sur l'utilisation du modèle d'alerte. Ces institutions ont une connaissance approfondie de la construction de modèles.

Le modèle d'alerte est opérationnel dans les principaux centres d'alerte.

Les travaux effectués peuvent être résumés de la façon suivante:

- un modèle d'alerte à une dimension a été développé et installé dans les principaux centres d'alerte (voir paragraphe 1.4 et chapitre 2). Une animation graphique permet de visualiser la propagation de la nappe de polluants.
- des études ont été effectuées pour calculer les vitesses d'écoulement du Rhin (voir chapitre 3).
- des essais de traçage à grande échelle ont permis de calibrer et de vérifier le modèle d'alerte (voir chapitre 4).
- on a effectué des analyses de sensibilité et fait des études avec des modèles de transport des substances en deux dimensions [van Mazijk 1989, VAW 1990].
- les personnes travaillant dans les principaux centres d'alerte ont reçu une formation relative à l'utilisation du modèle d'alerte dispensée à l'occasion de deux ateliers.

1.4 Le modèle d'alerte pour la prévision de la propagation des substances dans le Rhin

Lorsqu'une pollution intervient, les données qualitatives s'y rapportant ne sont pas fiables; c'est la raison pour laquelle les phénomènes naturels ont été simplifiés considérablement et modélisés dans une première phase de développement, en tenant compte des contraintes définies au préalable. On est parti de l'hypothèse que la dispersion est longitudinale, que la substance toxique se dissout dans l'eau tout de suite après avoir été déversée, et ce en aval des affluents latéraux, que les conditions d'écoulement sont stationnaires et que la dégradation de la substance toxique est linéaire. La première variante du modèle d'alerte se fonde donc sur une équation de diffusion-advection à une dimension (équation de Taylor), qui décrit la propagation des substances dans les fleuves en fonction de l'écoulement et de la propagation longitudinale. Les temps de parcours de l'eau ne sont pas calculés implicitement dans ce modèle; ils sont fixés en fonction du niveau d'eau et de l'écoulement. Les programmes de régulation de quelques grandes centrales hydroélectriques situées sur le Rhin supérieur ont également été inclus dans le modèle [voir Fischer 1979 et Griffioen 1989].

L'analyse de cette première variante a montré que conformément aux prévisions, les temps de parcours de la nappe de substances polluantes pouvaient être prédits de façon assez exacte, tandis que les calculs des concentrations maxima de polluants n'étaient que rarement satisfaisants, la variation des concentrations au fil du temps ne correspondant pas aux différences observées. Dans la nature, on constate souvent une distribution asymétrique des concentrations en produits polluants, qui n'est pas reproductible avec le modèle à une dimension. La première variante du modèle d'alerte a donc été transformée en modèle quasi bidimensionnel qui tient compte des zones d'eaux stagnantes [CHR 1991]. On ne peut pas résoudre analytiquement l'équation diffusion-advection qui intègre la modélisation des zones d'eaux stagnantes, il a donc fallu utiliser une approximation proposée par Chatwin [1980] qui permet d'obtenir l'équation suivante:

$$\Phi_E(x, t) = \frac{M/Q}{\sqrt{(4\pi D_0 t/c^2)}} \cdot \exp \left[\frac{-(t - x/c)^2}{4D_0 t/c^2} \right] \cdot \left[1 + \frac{G_t}{6} \cdot H_3 \left[\frac{t - x/c}{\sqrt{(2D_0 t/c^2)}} \right] \right] \quad (1.4.1)$$

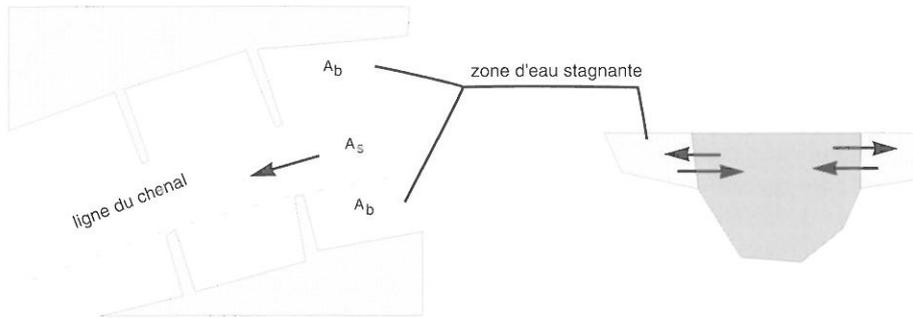
Φ_E	: concentration en substances	(kg/m ³)
x	: ordonnées dans le sens longitudinal du fleuve	(m)
t	: temps	(s)
M	: Quantité de produit nocif	(kg)
Q	: débit de l'écoulement	(m ³)
D_o	: coefficient de dispersion longitudinal	(m ²)
c	: vitesse de transport des substances	(m/s)

$$c = \frac{u_s}{1 + \beta}$$

u_s	: vitesse d'écoulement moyenne dans la partie du fleuve traversée par le courant	(m/s)
β	: quotient de la superficie de zones d'eaux stagnantes A et de la ligne du chenal A (voir figure 1.4.1)	(-)
H_3	: polynôme hermitien ($H_3(z) = z^3 - 3 \cdot z$)	(-)
G_t	: paramètres d'antisymétrie	(-)

Le coefficient de dispersion est obtenu de la façon suivante:

$$D_o = \alpha \cdot \frac{u_s^2 \cdot B_s^2}{a \cdot u_*} \quad (1.4.2)$$



(a) Schéma d'un tronçon du fleuve avec des champs d'épis

(b) Profil en travers du fleuve

Figure 1.4.1 Paramètres de zones d'eaux stagnantes $\beta = A_b / A_s$

α	: paramètre	(-)
B_s	: largeur de la ligne du chenal	(m)
a	: profondeur moyenne de l'eau	(m)
u_*	: vitesse de frottement	(m/s)

$$u_* = (u_s \cdot \sqrt{g}) / C$$

Le coefficient Chezy du modèle est calculé de la façon suivante:

$$C = 25 \cdot (a / k_n)^{1/6}$$

si	k_n = constante de Nikuradse = 0,2 m,
	$C = 25 \cdot (a / 0,2)^{1/6}$
	g = constante gravitationnelle (9,81 m/s ²)

La saisie des données nécessaires aux calculs se fait à l'aide de masques. Un masque permet de saisir les données à caractère général relatives à l'incident et au tronçon prévisionnel (voir figure 1.4.2). On peut soit entrer une valeur pour le coefficient de dispersion, soit faire calculer celui-ci par le programme. Il est possible de prévoir non seulement les substances dissoutes mais également les temps d'écoulement des matières surnageantes, qui se fondent sur l'hypothèse d'un transport en sur-

05-28-1996 CIPR/CHR Modèle d'alerte Rhin V2.1 13:47:52

```

< 1> Titre = rejet 1234
< 2> Tronçon d'introduction= Rhin PK d'intro. = 171
< 3> Type d'introduction = Tableau No. de paires= 24
< 4> Coeff. de dispersion = Défaut
< 5> Temps de demi-vie (j) = Pas de décomposition
< 6> Substance flottante = Non
< 7> Région d'observation = Bassin du Rhin
< 8> Tronçon d'observation = Rhin PK d'observ. = 800
< 9> Date de l'accident = 8811-2712

```

Figure 1.4.2 Paramètres d'entrée du masque de saisie 1

face dans la ligne du chenal et qui ne s'appliquent donc pas à toutes les substances surnageantes.

Comme type d'introduction, on peut entrer une impulsion instantanée ou un signal carré. Lorsqu'on connaît la répartition de la concentration en matières polluantes, on la rentre sous forme de tableau à l'aide d'un deuxième masque. Lors de cette opération, il est préférable d'éliminer les concentrations de base lorsque celles-ci existent.

Le troisième masque permet de saisir les données hydrologiques (niveaux d'eau et régulation des retenues dans la partie néerlandaise du Rhin). Le débit est calculé à l'aide des relations de niveau d'eau-débit incluses dans le modèle et à partir des observations du niveau d'eau faites en temps réel.

On obtient alors une représentation graphique et un tableau du passage des produits polluants dans le tronçon de contrôle choisie (voir figure 1.4.3). Il est également possible de représenter les

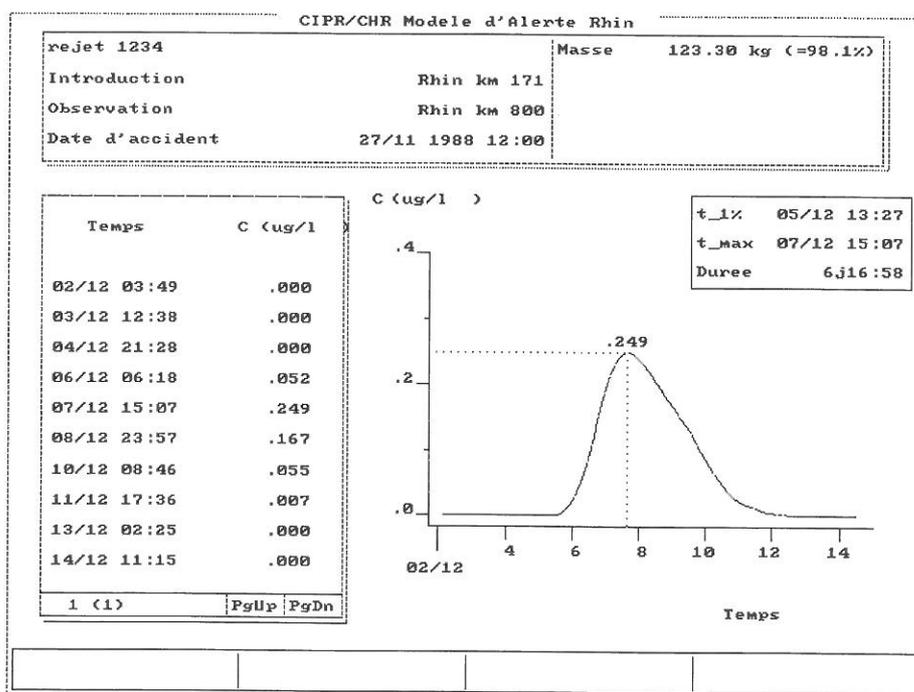


Figure 1.4.3 Concentrations prévisibles en produits polluants dans le tronçon étudié

concentrations maxima en produits polluants prévisibles pour des points importants du cours du Rhin.

Il était nécessaire de connaître les temps de parcours moyens de l'eau pour préparer le modèle. Pour le tronçon suisse du Rhin de Stein am Rhein à Bâle, de l'Aar à partir du lac de Biemme jusqu'à l'embouchure du Rhin, les Laboratoires de Recherches Hydrauliques, Hydrologiques et Glaciologiques ont calculé les temps de parcours moyens grâce au programme informatique FLOORIS. Ce programme simule des écoulements non stationnaires (et le cas échéant également les écou-

lements stationnaires) dans les tronçons. L'équation d'impulsion et de continuité de Saint-Venant est alors résolue avec la méthode des éléments finis [SHGN 1991]. La figure 1.4.4 montre un diagramme de temps de parcours calculés de cette façon. Quant aux calculs des temps de parcours entre Bâle

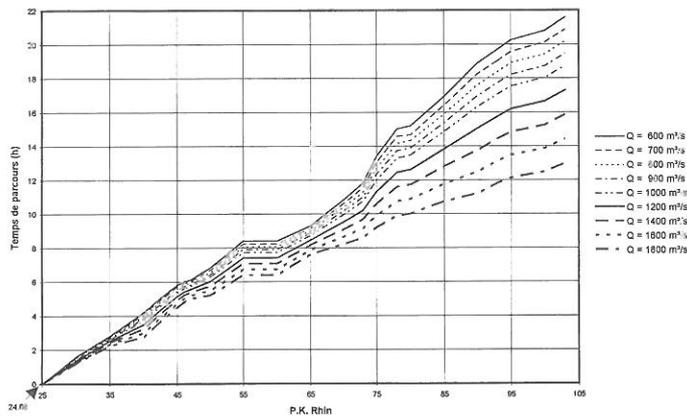


Figure 1.4.4 Temps de parcours sur le Rhin de Stein am Rhein au pk 24,680 jusqu'à l'embouchure de l'Aar au pk 103,000

et Lobith et pour la Moselle, ils se fondent sur des calculs de plan d'eau; en aval de Lobith, on a utilisé le modèle hydrodynamique ZWENDL.

Le calibrage et la vérification du modèle d'alerte ont été effectués avec des essais de traçage [CHR 1991] réalisés en Suisse, en France, en Allemagne et aux Pays-Bas. En Suisse, par exemple, deux essais à grande échelle ont été réalisés, le premier d'Albrück à Bâle et le deuxième de Rhinau à Bâle. L'essai, qui visait principalement à déterminer la durée de la propagation du nuage de traceurs, a également servi à examiner la dispersion des substances dans les réservoirs et à la jonction de l'Aar et du Rhin. Les résultats obtenus lors des essais de traçage ont également permis une comparaison entre les temps de transport des substances dissoutes et les temps de parcours moyens de l'eau déterminés avec le modèle FLORIS. La comparaison montre une bonne concordance des temps de parcours déterminés avec les deux méthodes. La figure 1.4.5 montre la répartition transversale du marqueur dans un tronçon situé à 15 km en aval du point de déversement situé à Albrück. Le marqueur n'apparaît au départ que dans la ligne du chenal. Un quart d'heure plus tard, on peut le mesurer sur tout le tronçon à l'exception de la zone des bords des berges. A 12 h 50, on enregistre la concentration maximum du traceur, les valeurs supérieures étant relevées dans le centre du chenal. Ensuite, la concentration diminue continuellement dans le centre du chenal et à 14 h, la concentration dans la ligne du chenal était 5 fois inférieure à celle observée à proximité des berges.

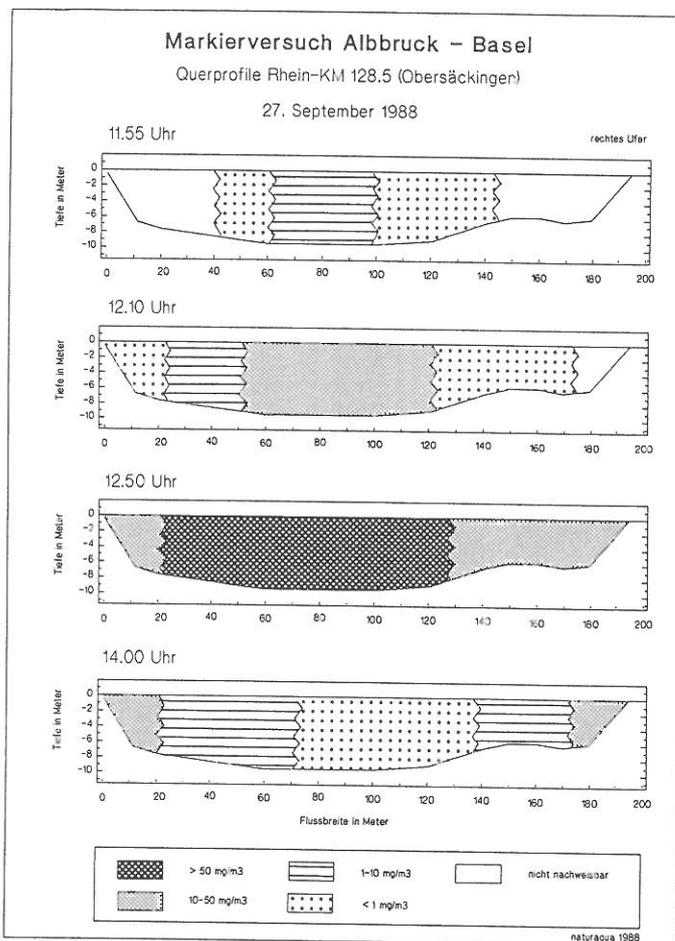


Figure 1.4.5 Répartition des traceurs dans le profil transversal d'Obersäckingen au point kilométrique 128,500

1.5 Evaluation du modèle d'alerte

L'expérience faite dans les principaux centres d'alerte montre que ce modèle est un outil d'alerte utile en cas d'incident sur le Rhin. Les simplifications apportées au modèle ne permettent toutefois pas de reproduire de façon précise tous les processus de dispersion des produits polluants. Les erreurs de prévision qui en résultent sont toutefois négligeables en comparaison des erreurs pouvant découler d'inexactitudes dans les données d'entrée. Souvent en cas d'une pollution accidentelle par exemple, la quantité déversée ne peut être évaluée que très inexactement. C'est la raison pour laquelle on a renoncé provisoirement à améliorer le modèle et que l'on a essayé en priorité d'améliorer les paramètres de saisie. Une station de contrôle de la qualité des eaux est actuellement en cours de construction à Bâle, qui sera en mesure de déterminer à relativement court terme les concentrations de produits polluants dans le Rhin.

Le modèle d'alerte est considéré actuellement comme opérationnel, et une nouvelle version n'est pas envisagée pour l'instant. Il va de soi que nous remédierons aux éventuelles lacunes qui pourraient apparaître lors de son utilisation.

D'autres études sont en cours sur les plans régionaux, nationaux et bilatéraux, qui présentent un intérêt certain pour le modèle d'alerte et qui devraient plus tard permettre d'améliorer, et le cas échéant de compléter celui-ci. On citera entre autres études:

- les essais de traçage dans l'Aar et la Moselle
 Les tronçons des affluents Aar et Moselle sont déjà inclus dans le modèle d'alerte. Le calibrage et la vérification se feront à l'aide des résultats des essais de traçage.

- le développement d'un modèle de propagation des substances bidimensionnel
La Suisse développe en ce moment un modèle bidimensionnel de transport des substances qui permettra un calcul détaillé de la propagation de produits polluants dans des conditions d'écoulement complexes. Ce modèle permet de simuler la diffusion des produits à proximité d'un point de déversement ou d'affluents latéraux. La division de la section d'écoulement en tubes de courant parallèles permet une prévision de la propagation de substances au centre et à proximité des berges. La mise en oeuvre de nouvelles routines de dégradation des substances devrait permettre de décrire plus finement la répartition des produits polluants. Le modèle bidimensionnel n'a pas pour finalité de remplacer le modèle d'alerte mais doit permettre de résoudre les problèmes qu'un modèle d'alerte à une dimension est dans l'impossibilité de trancher, ou bien seulement partiellement [VAW 1990].
- un modèle pour les tronçons de fleuve avec régulation par retenues aux Pays-Bas.
Un modèle détaillé permettant un calcul précis des temps de parcours en période de basses eaux est en cours de développement pour le tronçon du Rhin compris entre Lobith et Hagestein.
- la modélisation détaillée des influences des zones d'eaux stagnantes sur la propagation des substances.
Ce travail de recherche scientifique porte sur les processus physiques entre les zones d'eaux stagnantes et le chenal; son but est de mieux décrire l'influence des différentes zones et des séries de zones sur la propagation des substances.

Le secrétariat de la CHR coordonnera à l'avenir la gestion et la mise à jour des paramètres variables du modèle d'alerte (comme par exemple l'adaptation des courbes clé niveau d'eau/débit des stations de base). Le financement sera assuré par la vente ou le produit du leasing du modèle.

On notera que la coopération des instituts des différents états a été très fructueuse, ce dont nous nous félicitons, et qu'elle a eu une incidence positive sur les activités des pays. La coopération des deux Commissions sur le Rhin a fait ses preuves et illustre la façon dont on peut résoudre des problèmes communs.

1.6 Bibliographie

- Adler, M. (1990) : Fließzeiten in der Mosel aus Wasserspiegellagenberechnungen, BfG - 0532, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Coblenz
- Becker, A. et P. Sosnowski (1969): Eine Impulsantwort für Flussabschnitte zur Surchflussvorherbestimmung, Wasserwirtschaft - Wassertechnik, 19ème année, Cahier 12, pages 410 - 418
- Bremicker, M. (1989) : Verfahren zur Analyse und Simulation der Stoffausbreitung in Fließgewässern, Diplomarbeit am Institut für Physische Geographie, Chaire d'Hydrologie, Université de Fribourg
- Chatwin, P.C. (1980) : Presentation of longitudinal dispersion data, Proc. ASCE J. Hydr. Div. 106 HY1, pages 71 - 83
- CHR (1978) : Le bassin du Rhin, Monographie hydrologique, Staatsuitgeverij Den Haag, ISBN 90-1201-775-0
- CHR (1993) : Alarmmodell Rhein. Rhein Aktuell, Informationsschrift der IKS (bulletin d'informations de la CIPR)
- CIPR (1987) : Internationaler Warn- und Alarmdienst "Rhein". Règlement 87/47 du groupe de travail Pa de la CIPR
- Craenenbroek, W. van, J. Marivoet et P. Stas (1985) : Gestion des eaux et dispersion dans le canal Albert et dans les canaux campinois (en néerlandais), Université Libre de Bruxelles, Service d'Hydrologie

- DVWK (éditeur) (1987) : Eignung und Anwendung von Vorhersagemodellen für einen "Warn- und Alarmplan Rhein", rapport du groupe de travail du DVWK "Warn- und Alarmplan Rhein", Coblenze
- Engel, H., T. Menzel et K. Wander (1988) : Fliesszeiten im Rhein aus Wasserspiegelberechnungen. Rapport BfG-0429 du Bundesanstalt für Gewässerkunde, Coblenze, 19 pages
- Fischer, H.B., E.J. List, R.C.Y. Koh, J. Imberger et N.H. Brooks (1979) : Mixing in inland and coastal waters, Academic Press, New York
- Gelhar, L.W. et M.A. Collins (1971) : General analysis of longitudinal dispersion in non uniform flow, Water Resources Research, Volume 7, n° 6
- Griffioen, P.S. (1989) : Modèle d'alerte pour le Rhin, comité d'experts CHR/CIPR, rapport CHR n° II-2
- Hofstraat, J.W., M. Steendijk, G. Vriezokolk, W. Schreurs, G.J.A.A. Broer et N. Wijnstok (19xx): Sensitive and selective determination of Rhodamine WT water tracer by solid-phase extraction and reversed-phase HPLC with fluorescence detection. Ministère des Transports et des Travaux Publics, La Haye et Lelystad
- Kalweit, H., K.R. Nippes, H. Gerhard, W. Buck, K. Felkel, H. Schmitz, B. Ploeger et J. van Malde (1993) : Der Rhein unter der Einwirkung des Menschen. Rapport CHR n° I-11. ISBN 90-7098-00-88
- Kühne, A., Ch. Leibundgut, J. Petermann, B. Schädler, B. Schudel, G. Schneider et M. Spreafico (1991) : Fliesszeitbestimmung und Stofftransportuntersuchungen im Rhein. Communication n° 13 du Service hydrologique et géologique national de de Berne
- Leibundgut Ch., J. Petermann et B. Schudel (1988) : Markiersuch Rhein "Albbruck-Basel", Beschaffung von Eingabedaten für ein Alarm- und Stofftransportmodell mittels Traceruntersuchungen. Université de Berne, Institut de Géographie, en collaboration avec Naturaqua, Berne, décembre 1988
- Leibundgut Ch., M. Bremicker et H. Wiesner (1990) : Markiersuch Rhein 04/89, Abschlussbericht, Institut de Géographie physique, Chaire d'Hydrologie, Université de Fribourg
- Leibundgut, Ch. et H. Wiesner (1990) : Markiersuch Rhein 09/90, Zwischenbericht der ersten Messergebnisse, Institut de Géographie physique, Chaire d'Hydrologie, Université de Fribourg
- Leibundgut, Ch. et A. van Mazijk (1992) : Investigation of flow and transport parameters in rivers. Proceedings of the 6th international symposium on water tracing, Karlsruhe
- Leibundgut, Ch., A. van Mazijk, J.M.C. van Mierlo et H. Wiesner (1992) : Verifikation des Alarmmodells für den Rhein, Version 2.1. Rapport de l'institut de Géographie physique, Chaire d'Hydrologie, Université de Fribourg et d'U.E.R. Techniques de santé et Gestion des eaux de la Faculté de Techniques Civiles de l'Université de Delft
- Leibundgut Ch. et H. Wiesner (1992) : Markiersuch Rhein 06/91, Abschlussbericht, Institut de Géographie physique, Chaire d'Hydrologie, Université de Fribourg, août 1992
- Mazijk, A. van, R.M. Noppeney, T. van Ellen et P. Verwoerdt (1989) : Analyse de sensibilité du modèle d'alerte pour le Rhin (version néerlandaise), Communication n° 27 d'U.E.R. Techniques de santé et Gestion des eaux de la Faculté de Techniques Civiles de l'Université de Delft en collaboration avec le Rijkswaterstaat, Service des eaux intérieures/RIZA, mai 1989
- Mazijk, A. van (1989a): Analyse de sensibilité du modèle d'alerte pour le Rhin. Faculté de Techniques Civiles de l'Université de Delft, U.E.R. Techniques de santé et Gestion des eaux de la Faculté de Techniques Civiles de l'Université de Delft en collaboration avec le Rijkswaterstaat, Service des eaux intérieures/RIZA, mai 1989

- Mazijk, A. van et P. Verwoerd (1989) : Etalonnage d'un modèle stationnaire d'eaux stagnantes réalisé à partir de l'essai de traçage 07/89 Rhinau-Bâle, U.E.R. Techniques de santé et Gestion des eaux de la Faculté de Techniques Civiles de l'Université de Delft en collaboration avec le Rijkswaterstaat, Service des eaux intérieures/RIZA, octobre 1989
- Mazijk, A. van, P. Verwoerd et J.M.C van Mierlo (1991) : Calibrage du modèle d'alerte pour le Rhin à partir de l'essai de traçage 04/89 Village-Neuf - Pays-Bas. Faculté de Techniques Civiles de l'Université de Delft, U.E.R. Techniques de santé et Gestion des eaux de la Faculté de Techniques Civiles de l'Université de Delft, avril 1991
- Mazijk, A. van et J.M.C. van Mierlo (1991) : Calibrage du modèle d'alerte pour le Rhin à partir de l'essai de traçage 09/88 Albbruck - Bâle. Faculté de Techniques Civiles de l'Université de Delft, U.E.R. Techniques de santé et Gestion des eaux de la Faculté de Techniques Civiles de l'Université de Delft, mars 1991
- Mazijk, A. van, J.M.C. van Mierlo et H. Wiesner (1991) : Vérification du modèle d'alerte pour le Rhin version 2.0. Faculté de Techniques Civiles de l'Université de Delft, U.E.R. Techniques de santé et Gestion des eaux de la Faculté de Techniques Civiles de l'Université de Delft, juin 1991
- Mazijk, A van, P. Verwoerd, J.M.C. van Mierlo, M. Bremicker et H. Wiesner (1991) : Modèle d'alerte pour le Rhin version 2.0, Calibrage et vérification. Comité d'experts CIPR/CHR, Rapport CHR n° II-4
- Mazijk, A van et J.M.C. van Mierlo (1992) : Vérification du calibrage du modèle d'alerte pour le Rhin, version 2.1, effectuée à partir de l'essai de traçage 04/89 Village-Neuf - Pays-Bas, Faculté de Techniques Civiles de l'Université de Delft, U.E.R. Techniques de santé et Gestion des eaux de la Faculté de Techniques Civiles de l'Université de Delft, en collaboration avec l'Institut de Géographie physique, Chaire d'Hydrologie, Université de Fribourg
- Mazijk, A. van (1992) : Nouveau calibrage et vérification du tronçon du Rhin supérieur dans le modèle d'alerte pour le Rhin, version 2.1, U.E.R. Techniques de santé et Gestion des eaux de la Faculté de Techniques Civiles de l'Université de Delft en collaboration avec le Rijkswaterstaat, Institut de l'aménagement des eaux intérieures et de l'épuration des eaux usées, juin 1992
- Mazijk, A. van, J.M.C. van Mierlo, H. Wiesner et Ch. Leibundgut (1992) : Vérification du modèle d'alerte pour le Rhin à partir des essais de traçage 06/91 et 07/91. Faculté de Techniques Civiles de l'Université de Delft, U.E.R. Techniques de santé et Gestion des eaux de la Faculté de Techniques Civiles de l'Université de Delft, en collaboration avec l'Institut de Géographie physique, Chaire d'Hydrologie, Université de Fribourg, décembre 1992
- Mazijk, A. van, H. Wiesner et Ch. Leibundgut (1992) : Le modèle d'alerte pour le Rhin - Théorie et calibrage de la version 2.0. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, Cahier 2, Coblenz
- Nordin, C.F. et B.M. Troutman (1980) : Longitudinal dispersion in rivers: the persistence of skewness in observed data, Wat.Resources Volume 16, n° 1, pages 123-128
- Noppeney, R.M. (1988) : L'influence des zones d'eaux stagnantes sur la dispersion (en néerlandais), communication n° 19 d'U.E.R. Techniques de santé et Gestion des eaux de la Faculté de Techniques Civiles de l'Université de Delft en collaboration avec le Rijkswaterstaat, RIZA
- Noppeney, R.M. (1988) : L'influence des processus "near-field" sur la description des effets "far-field" (en néerlandais), communication n° 22 d'U.E.R. Techniques de santé et Gestion des eaux de la Faculté de Techniques Civiles de l'Université de Delft en collaboration avec le Rijkswaterstaat, RIZA, novembre 1988
- Petermann, J., B. Schudel, Ch. Leibundgut, M. Grossauer et D. Morgenthaler (1989) : Essai de traçage Rhin "Rhinau-Bâle", Beschaffung von Eingabedaten für ein Alarm- und Stofftransportmodell mittels Traceruntersuchungen. Université de Berne, Institut de Géographie, en collaboration avec Naturaqua, Berne, septembre 1989

- Service de la Navigation de Strasbourg (1989) : Essai de traçage de novembre 1988, Strasbourg 1989 (séries de données non publiées)
- Service de la Navigation de Strasbourg (1990) : Essai de traçage sur le Rhin du 15 mai 1990, rapport octobre 1990, Strasbourg
- Spreafico, M. et Ch. Leibundgut (1989) : Travel-time and transport forecasting of dissolved material within the Rhine
- Spreafico, M., Ch. Leibundgut et A. Kühne (1989) : Abschätzung von Fliesszeiten und Konzentrationen von mitgeführten Stoffen im Rhein, Gas-Wasser-Abwasser, Cahier 9 de l'Association Helvétique du gaz et de l'eau, Zurich, pages 559-564
- Spreafico, M. (1992) : Alarmmodell Rhein. Wasser, Energie, Luft, Cahier 11/12, Baden
- Steinebach, G. (1990) : Vergleich einiger Methoden zur Lösung eines einfachen Stofftransportmodelles. Rapport interne du Bundesanstalt für Gewässerkunde, Coblenz
- Teuber, W. et K. Wander (1987) : Fliesszeiten im Rhein aus Flügelmessungen. Rapport BfG-0392 du Bundesanstalt für Gewässerkunde, Coblenz, 32 pages
- Valentine, E.M et I.R. Wood (1977) : Experiments in Longitudinal Dispersion with Dead Zones, Proc. ASCE J. Hydr. Engrg. Volume 105 HY8, pages 999-1016
- Ven, F.H.M van de et G.J.A.A. Broer (1991) : Accidental pollution control for the river Rhine
- VAW (1990) : Stofftransportmodell für Fliessgewässer, Entscheidungsgrundlagen zur Entwicklung und Anwendung numerischer Modelle. Rapport des Laboratoires de Recherches Hydrauliques, Hydrologiques et Glaciologiques (VAW) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich (EPF-Z), 62 pages
- VAW (1990a): Fliesszeiten im Rhein, Berechnung von mittleren Abflussgeschwindigkeiten und Fliesszeiten mit dem hydrodynamischen Modell FLORIS. Rapport des Laboratoires de Recherches Hydrauliques, Hydrologiques et Glaciologiques (VAW) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich (EPF-Z), 96 pages
- VAW (1992) : Fliesszeiten in der Aare, Berechnung von mittleren Abflussgeschwindigkeiten und Fliesszeiten mit dem hydrodynamischen Modell FLORIS. Rapport n° 788 des Laboratoires de Recherches Hydrauliques, Hydrologiques et Glaciologiques (VAW) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich (EPF-Z)
- Verwoerdt, P. et R. Terveer (1990) : Modèle d'alerte pour le Rhin, Description du code Fortran du modèle d'alerte pour le Rhin version 2.0. Rapport 90.058X du Rijkswaterstaat, RIZA et U.E.R. Techniques de santé et Gestion des eaux de la Faculté de Techniques Civiles de l'Université de Delft, 71 pages

2. L'INTEGRATION DU MODELE D'ALERTE DANS LE SYSTEME D'ALERTE DU RHIN

M. Spreafico

Service hydrologique et géologique national, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, 3003 Berne

Les états riverains du Rhin exploitent un système d'information et d'alerte utilisé dans les cas de pollution accidentelle du Rhin, ce dans le cadre de la CIPR et de la Commission Internationale pour la Protection de la Moselle et de la Sarre. Ce système d'alerte a pour but d'annoncer les pollutions soudaines des eaux par des substances nocives qui peuvent, de par leur quantité ou leur volume, nuire à la qualité de l'eau du Rhin. Il permet également d'informer et d'alerter les autorités et services compétents des mesures à prendre pour remédier aux dégradations. Ceux-ci peuvent ainsi organiser la lutte contre la pollution, en déterminer les causes et l'origine et prendre des mesures pour lutter contre dommages et diminuer leur impact ultérieur. En outre, ce système doit permettre de transmettre les informations sur des incidents mineurs, lorsqu'une information de la population est jugée nécessaire pour des raisons psychologiques.

Ce système d'alerte fonctionne avec les huit principaux centres d'alerte du Gewässerschutzamt de la ville de Bâle, de la Préfecture du Bas-Rhin à Strasbourg, de la Wasserschutzpolizeidirektion de Bade-Wurtemberg à Mannheim, de la Wasserschutzpolizeistation de Coblenche, du Regierungspräsidium de Düsseldorf, de la Rijkswaterstaat directie Gelderland d'Arnhem, de la Préfecture de la Moselle à Metz et du Service de la Protection Civile de Luxembourg ainsi que du Secrétariat de la CIPR (voir figure 2.1.1).

L'instauration et la cessation de l'état d'alerte s'effectuent selon une procédure précise comprenant des schémas d'alerte clairement définis. Tout message doit par exemple contenir les informations suivantes:

- mention de la centrale d'alerte ayant émis le message
- identité de la personne ayant émis le message, date et heure
- indication de la centrale ayant déclenché l'alerte
- précisions sur le moment, le lieu, le type d'accident et la substance polluante
- informations sur la quantité de substances déversées et leur durée de déversement
- informations sur le degré de pollution de l'eau constaté (mort de poissons, coloration de l'eau, apparition d'odeurs, longueur et largeur de la nappe surnageante)
- informations sur les mesures déjà prises.

Pour avoir des informations plus détaillées, il est souvent nécessaire de s'adresser à des experts ou de faire des calculs. Voici quelques exemples d'informations pouvant être transmises ultérieurement:

- niveaux d'eau aux échelles (un grand nombre de limnimètres sont équipés de répondeurs interrogeables à distance)
- débits
- vitesse d'écoulement
- concentrations mesurées et calculées de substances polluantes dans l'eau
- impact sur la qualité de l'eau

Le message peut contenir des informations ou mentionner un état d'alerte.

Les annonces du système d'alerte sont transmises aussitôt, aux services locaux et nationaux, qui font le nécessaire.

Le modèle d'alerte implanté aujourd'hui dans tous les centres permet aux autorités compétentes de disposer des données hydrologiques fondamentales sur les niveaux d'eau et les débits ainsi que d'informations relatives à la concentration en substances polluantes et aux probabilités de diffusion. Il s'agit donc d'un élément clé du système d'alerte.

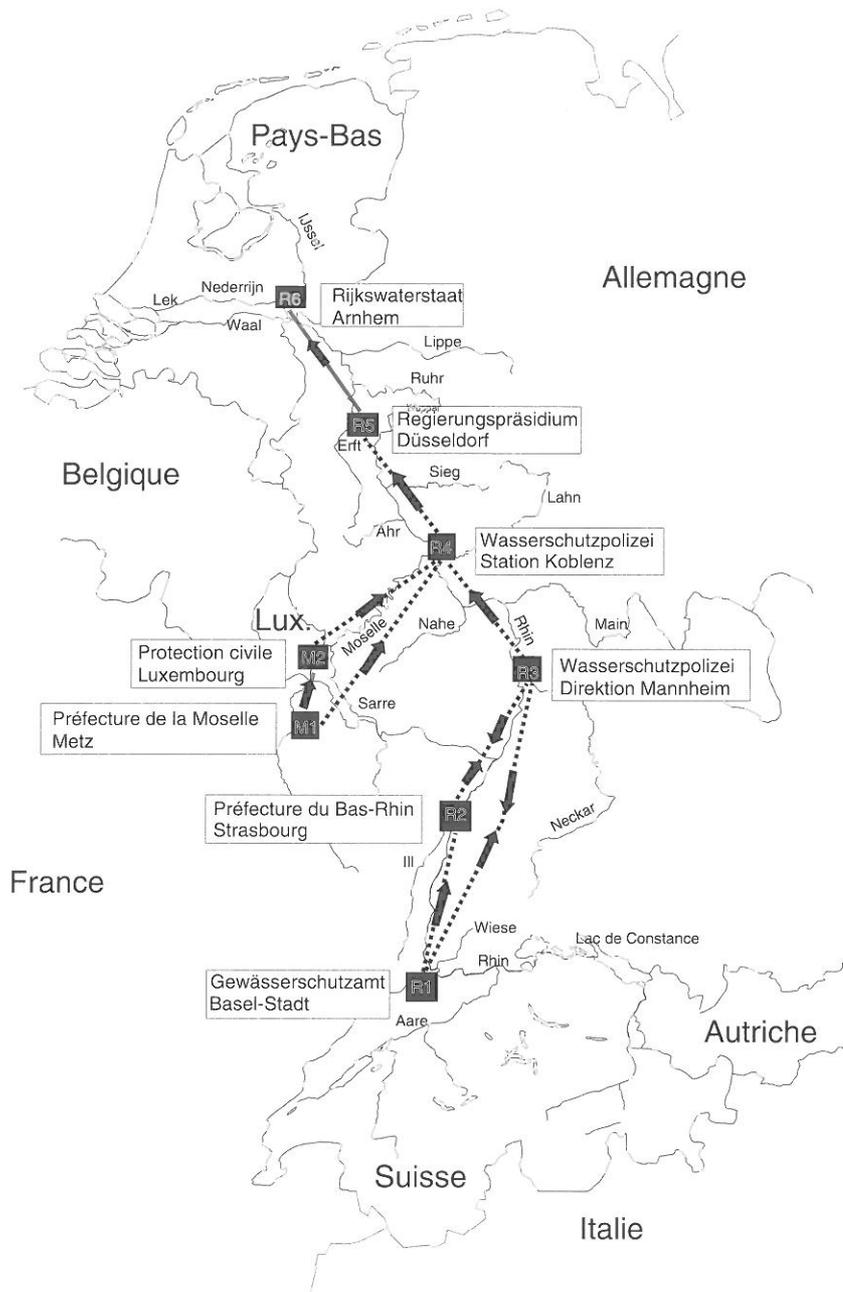


Figure 2.1.1 Système d'alerte international pour les incidents sur le Rhin

Bibliographie

CIPR (1987) : Service international d'alerte pour le Rhin, Règlement 87/47 du groupe de travail Pa de la CIPR

3. PRINCIPES HYDRAULIQUES

M. Adler - Bundesanstalt für Gewässerkunde, Coblenz

A. Jakob - Service hydrologique et géologique national, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, 3003 Berne

A. van Mazijk - Université technique de Delft, Faculté de Techniques Civiles, Unité d'enseignement et de recherche Techniques de santé et Gestion des eaux

3.1 Structure des cours d'eau

Afin de prendre en compte les différences morphologiques du Rhin dans le modèle, on l'a divisé, ainsi que ses principaux affluents (Aar, Neckar, Main et Moselle) et ramifications (Waal et IJssel) en plusieurs *tronçons* allant du lac de Constance (Stein am Rhein) jusqu'au barrage de Hagestein, eux-mêmes divisés en plusieurs *sous-sections* (voir Tableau 3.1.1, 3.1.2 et figure 3.1.1).

Un tronçon est défini comme suit: il s'agit d'une partie longitudinale du fleuve dans laquelle on suppose que **l'écoulement est constant**; les tronçons ont été choisis de façon à ce que l'échelle du tronçon et la relation niveau d'eau-débit donnent un écoulement représentatif pour ce tronçon. Une exception a été faite pour les tronçons néerlandais: le programme de retenues S285 détermine les écoulements de la Waal, de l'IJssel et du Lek à partir d'un pourcentage déterminé de l'écoulement au limnimètre de Lobith, calculé grâce au niveau d'eau qui y est relevé.

Une sous-section est définie comme une partie d'un tronçon dans laquelle la **vitesse d'écoulement longitudinale est supposée constante**. La vitesse d'écoulement moyenne dans une sous-section est le rapport entre le débit actuel et la coupe transversale déterminante traversée par le courant de cette sous-section. En connaissant les longueurs L_i d'une sous-section et la vitesse d'écoulement actuelle u_i , on peut calculer pour chaque niveau d'eau un temps d'écoulement $T_i = L_i/u_i$. Ce modèle d'alerte utilise des tableaux niveau d'eau - temps d'écoulement pour déterminer les temps de transport.

3.2 Calculs hydrauliques des temps d'écoulement dans le haut Rhin et dans l'Aar

Afin de se procurer les données nécessaires au modèle d'alerte pour le Rhin, on a procédé en Suisse à des calculs modélisés pour le Rhin et l'Aar et effectué des expériences de traçage sur le Rhin pour vérifier les résultats et le calibrage du modèle d'alerte. On se référera utilement au travail de [Kühne et al. 1991] pour une description plus détaillée de ces travaux.

Tableau 3.1.1 Tronçons du Rhin et de ses affluents

Tronçon n°	du noeud	au noeud	du pk	au pk	station de mesure	pk	longueur du tronçon (pk)	embouchure (pk)/ division
<u>RHIN</u>								
80	130	131	24,7	64,4	Neuhausen-Flurlingen	45,8	39,7	
81	131	1	64,4	103,0	Reckingen	90,7	38,6	
1-6	1	5	103,0	242,5	Rheinfeldern	149,6	139,5	
7-16	5	12	242,5	309,1	Kehl-Kronenhof	292,2	66,6	
17	12	13	309,1	351,0	Plittersdorf	340,2	41,9	
18	13	14	351,0	376,0	Maxau	362,3	25,0	
19	14	15	376,0	428,5	Spire	400,6	52,5	
20	15	16	428,5	496,8	Worms	443,4	68,3	
21	16	17	496,8	529,0	Mayence	498,3	32,2	
22	17	18	529,0	592,5	Kaub	546,2	63,5	
23	18	19	592,5	605,0	Coblence	593,5 ¹	12,5	
24	19	20	605,0	634,0	Andernach	613,8	29,0	
25	20	21	634,0	671,0	Bonn	654,7	37,0	
26	21	22	671,0	716,0	Cologne	688,8	45,0	
27	22	23	716,0	762,0	Düsseldorf	744,2	46,0	
28	23	24	762,0	797,0	Ruhrort	780,8	35,0	
29	24	25	797,0	827,0	Wesel	814,0	30,0	
30	25	26	827,0	862,0	Rees	837,4	35,0	
31	26	27	862,0	867,2	Lobith	862,2	5,2	
<u>WAAL</u>								
32	27	105	867,2	951,8	Tiel	913,0	84,6	867,2
<u>CANAL DE PANNERDEN</u>								
33	27	28	867,2	878,5	Pannerden	872,0	11,3	867,2
<u>IJSSEL</u>								
34	28	29	878,5	994,5	Deventer	945,0	107,1	878,5
<u>LEK</u>								
35	28	101	878,5	946,5	Hagestein	946,5	66,6	878,5
<u>AAR</u>								
84	132	133	183,3	215,3	Brügg	185,3	32,0	103,0
83	133	134	215,3	292,4	Murgenthal	239,0	77,1	
82	134	1	292,3	306,5	Stilli	294,0	14,1	
<u>NECKAR</u>								
36	30	31	180,0	100,0	Gundelsheim (Neckar)	100,1	80,0	428,5
37	31	15	100,0	0,0	Heidelberg	26,0	100,0	
<u>MAIN</u>								
38	31	33	400,0	200,0	Schweinfurt (Main)	330,0	200,0	496,8
39	33	34	200,0	100,0	Main II	P.M	100,0	
40	34	16	100,0	0,0	Francfort	37,0	100,0	
<u>MOSELLE</u>								
90	140	141	242,5	212,9	Palzem	229,9	29,6	592,5
91	141	142	212,9	123,9	Trèves	195,3	89,0	
92	142	18	123,9	0,0	Cochem	52,0	123,9	

¹ Le limnimètre de Coblence a été déplacé fictivement du point kilométrique fluvial 591,5 au point kilométrique 593,5 pour des raisons liées au programme, car il est représentatif du tronçon 23. Ses données tiennent compte de l'écoulement de la Moselle.

Tableau 3.1.2 Sous-sections du fleuve

Fleuve	Sous-section n°	Pk départ	Longueur (km)	Largueur (m)	Fleuve	Sous-section n°	Pk départ	Longueur (km)	Largueur (m)
RHIN	8001	24,7	22,9	100	RHIN	2703	744,2	17,8	425
	8002	47,6	6,9	100		2801	762,0	18,8	300
	8003	54,5	4,3	100		2802	780,8	16,2	300
	8004	58,8	5,6	100		2901	797,0	17,0	300
	8101	64,4	6,3	150		2902	814,0	13,0	300
	8102	70,7	7,9	150		3001	827,0	24,9	300
	8103	78,6	6,4	150		3002	851,9	10,1	300
	8104	85,0	5,1	150		3101	862,0	5,2	340
	8105	90,1	12,9	150		3201	867,2	17,670	260
	101	103,0	5,8	180		3202	884,870	16,505	260
	102	108,8	4,4	180		3203	901,375	11,875	260
	103	113,2	16,1	180		3204	913,250	12,870	260
	104	129,3	6,1	180		3205	926,120	8,660	273
	105	135,4	8,0	180		3206	934,780	10,545	305
	106	143,4	8,7	180		3207	945,325	6,475	337
	107	152,1	11,7	180		3301	867,2	4,485	135
	108	163,8	6,2	180		3302	871,685	6,815	140
	109	170,0	3,6	180		3401	878,500	12,160	78
	201	173,6	53,0	180		3402	890,660	8,065	81
	301	173,6	53,0	170		3403	902,785	4,005	81
	401	226,6	7,7	136		3404	907,060	17,700	82
	501	234,3	8,2	170		3405	929,340	15,730	93
	601	234,3	8,2	170		3406	951,890	12,095	97
	701	242,5	5,7	136		3407	963,985	7,925	102
	801	248,2	11,9	170		3408	971,910	15,700	122
	901	248,2	11,9	170		3409	987,610	13,750	148
	1001	260,1	7,4	136		3501	878,500	4,000	100
1101	267,5	6,6	170	3502	882,800	8,370	100		
1201	267,5	6,6	136	3503	891,170	8,970	115		
1301	274,1	9,0	170	3504	900,140	7,860	120		
1401	283,1	8,3	170	3505	908,000	4,700	130		
1501	283,1	8,3	136	3506	912,700	5,900	130		
1602	291,4	17,7	170	3507	918,600	3,420	130		
1701	309,1	24,9	170	3508	922,020	5,480	132		
1702	334,0	17,0	170	3509	928,900	10,905	145		
1801	351,0	25,0	315	3510	939,805	6,975	149		
1901	376,0	19,0	315	8401	183,3	9,5	100		
1902	395,0	16,0	315	8402	192,8	10,4	100		
1903	411,0	17,5	315	8403	203,2	9,1	100		
2001	428,5	15,0	285	8404	212,3	3,0	100		
2002	443,5	21,5	360	8301	215,3	1,8	100		
2003	465,0	15,5	335	8302	217,1	11,7	100		
2004	480,5	16,3	385	8303	228,8	5,4	100		
2101	496,8	21,1	495	8304	234,2	11,7	100		
2102	517,9	11,1	705	8305	245,9	1,1	100		
2201	529,0	17,2	425	8306	247,0	7,4	100		
2202	546,2	11,8	245	8307	254,4	8,4	100		
2203	558,0	12,5	325	8308	262,8	2,4	100		
2204	570,5	10,5	405	8309	265,2	3,4	100		
2205	581,0	11,5	280	8310	268,6	0,8	100		
2301	592,5	12,5	330	8311	269,4	2,1	100		
2401	605,0	9,0	315	8312	271,5	3,6	100		
2402	614,0	20,0	310	8313	275,1	2,4	100		
2501	634,0	13,5	310	8314	277,5	5,2	100		
2502	647,5	12,5	445	8315	282,7	4,9	100		
2503	660,0	11,0	450	8316	287,6	1,4	100		
2601	671,0	17,0	390	8317	289,0	1,4	100		
2602	688,0	14,5	410	8318	290,4	2,0	100		
2603	702,5	13,5	395	8201	292,4	5,6	140		
2701	716,0	20,0	365	8202	298,0	1,7	140		
2702	736,0	8,2	325	8203	299,7	5,5	140		

* Dans ces sous-sections, des coupures de méandres ont été effectuées!

** En raison de la présence de centrales hydroélectriques, ces sous-sections présentent des cours parallèles de longueurs différentes!

Tableau 3.1.2 Sous-sections du fleuve (suite)

Fleuve	Sous-section n°	Pk départ	Longueur (km)	Largueur (m)	Fleuve	Sous-section n°	Pk départ	Longueur (km)	Largueur (m)
AAR	8204	305,2	1,3	140	MOSELLE	9203	59,4	18,9	110
NECKAR	3601	0,0	80,0	80		9202	78,3	24,7	110
	3701	80,0	100,0	100		9201	103,0	20,9	110
MAIN	3801	0,0	200,0	70		9104	123,7	17,8	120
	3901	200,0	100,0	100		9103	141,5	25,4	120
	4001	300,0	100,0	150		9102	166,9	29,0	120
MOSELLE	9206	0,0	20,8	110		9101	195,9	17,0	120
	9205	20,8	16,3	110		9002	212,9	17,0	115
	9204	37,1	22,3	110		9001	229,9	12,6	115

Figure 3.1.1 Schéma fluvial retenu pour le modèle d'alerte pour le Rhin

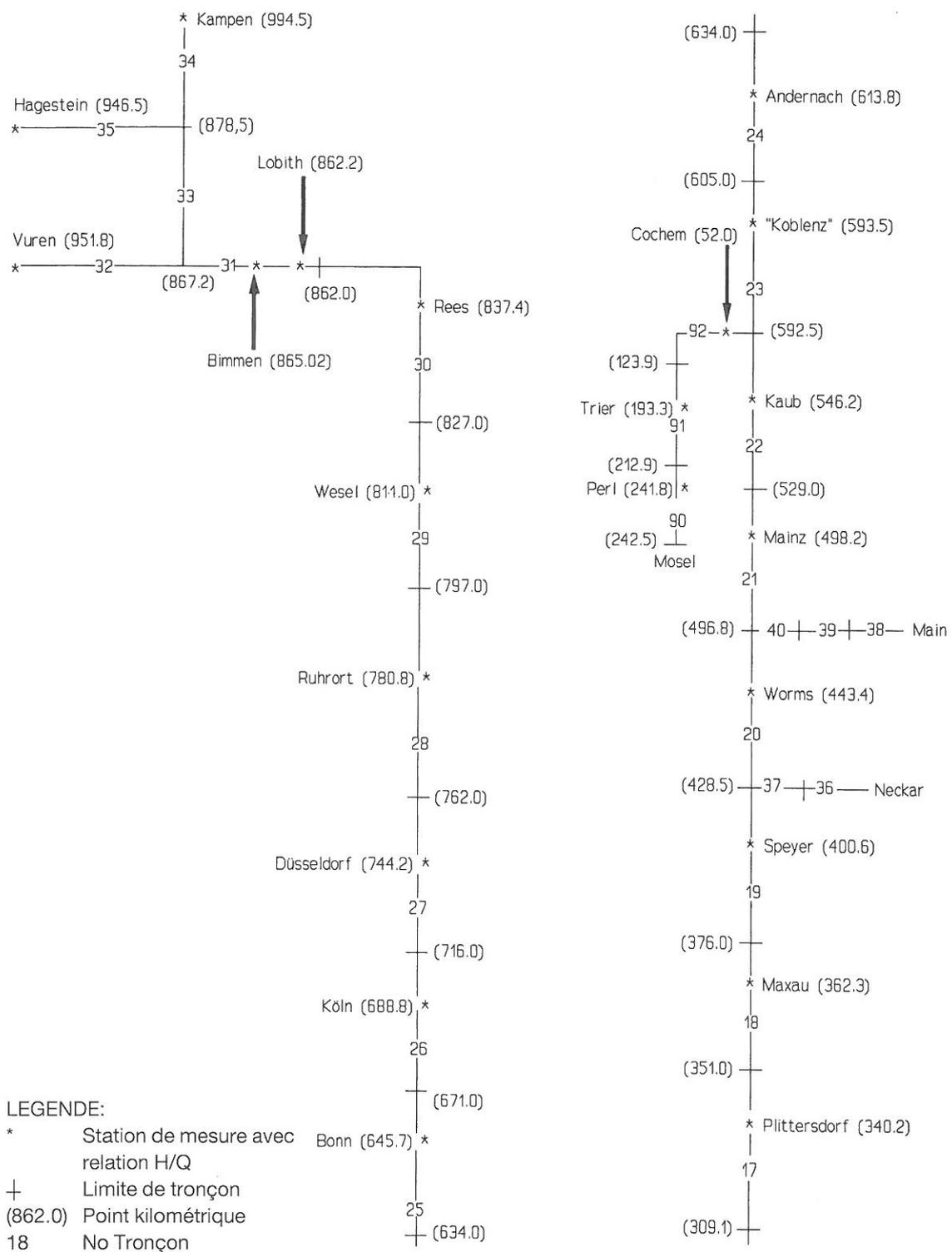
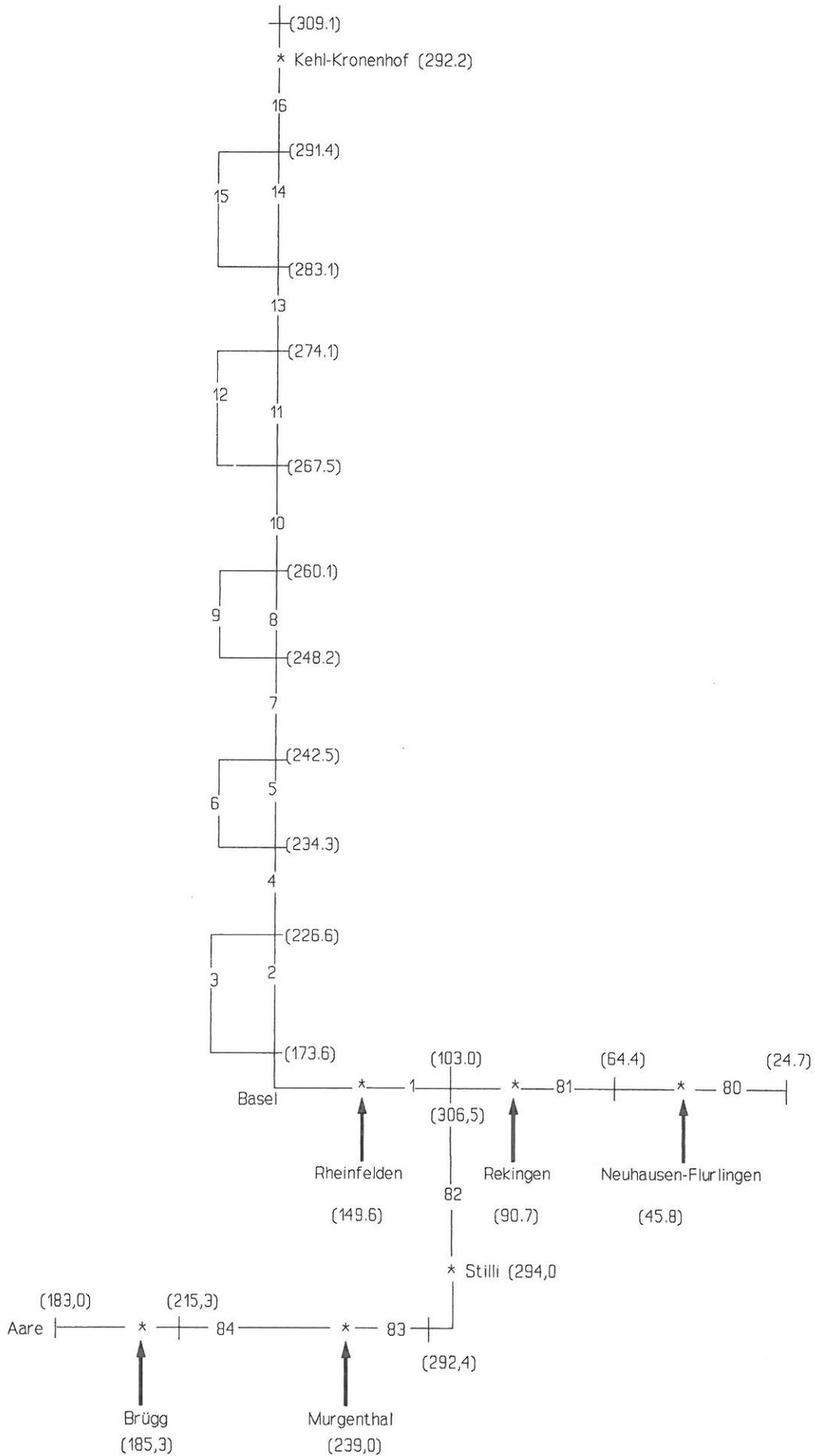


Figure 3.1.1 Schéma fluvial retenu pour le modèle d'alerte pour le Rhin (suite)



3.2.1 Relations hauteur-débit

Les relations hauteur-débit sont intégrées de la façon suivante dans le modèle d'alerte pour le Rhin

Station	Validité
Rhin - Neuhausen	à partir du 01.01.74**
Rhin - Reckingen	à partir du 01.01.74*
Rhin - Rheinfelden	à partir du 01.01.89
Aar - Brügg	à partir du 01.01.90*
Aar - Murgenthal	à partir du 25.09.90
Aar - Untersiggenthal, Stilli	à partir du 31.10.90

* n'est valable qu'accompagné d'un tableau de croissance de la végétation aquatique

** étant donné que la station Rhin - Neuhausen - Flurlingen n'est pas encore équipée d'un système de télétransmission des niveaux d'eau, l'écoulement à cette station est déterminé à l'aide des valeurs de la station Rhin - Reckingen et d'une corrélation.

Les tableaux de croissance de la végétation aquatique tiennent compte des écarts observés par rapport à la relation hauteur-débit provoqués par la croissance saisonnière de plantes dans le lit du fleuve. Le tableau, ou courbe, indique la différence entre le niveau d'eau et la valeur à prendre en compte dans la conversion. La courbe utilisée pour figurer la relation hauteur-débit de la station de Reckingen est inchangée depuis 1974. Tous les écarts observés sont intégrés dans les courbes annuelles de croissance de végétation. C'est la raison pour laquelle on a déterminé les valeurs mensuelles de correction du niveau d'eau en faisant une moyenne des courbes de croissance de la végétation des années 1981 à 1989 (figure 3.2.1).

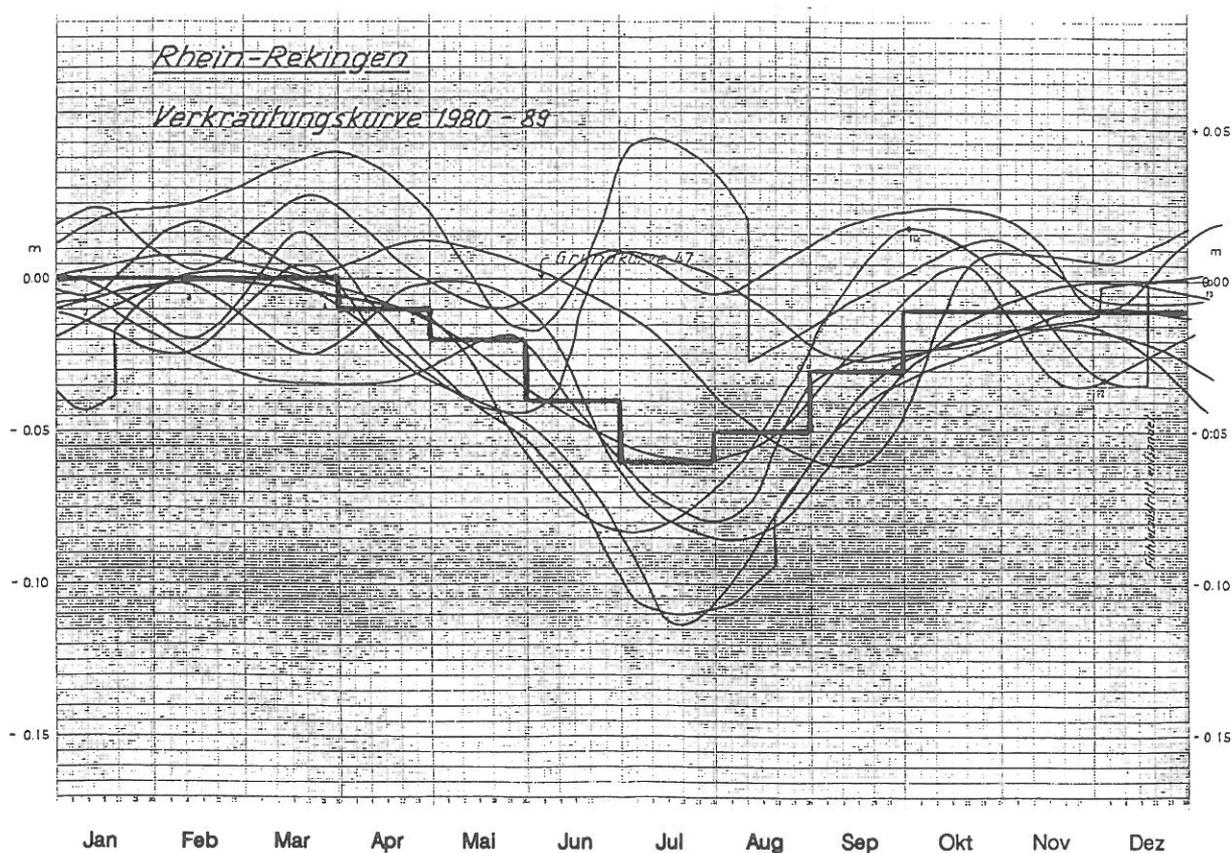


Figure 3.2.1 Courbes de croissance de la végétation aquatique de 1980 à 1989 pour la station de Reckingen. Ecarts par rapport à la courbe H/Q et par rapport aux valeurs mensuelles intégrées dans le modèle d'alerte.

En juillet, mois où l'on observe les plus grandes différences dans les courbes annuelles de croissance de végétation, une différence de niveau d'eau de 6 cm pour un débit moyen Q donne un écart de débit d'environ 4%. La croissance de végétation peut provoquer dans des années exceptionnelles des différences de niveau d'eau par rapport à la courbe de la relation hauteur-débit de 20 cm maximum, ce qui correspond approximativement à 12% du débit. Les stations avec des tableaux de croissance de végétation aquatique peuvent comporter des erreurs dont l'importance peut varier au fil du temps.

Par contre, les stations de Murgenthal et Rheinfelden ont des relations hauteur-débit plus stables, l'écart entre les différentes courbes hauteur-débit des dernières années étant de respectivement 5% et 2%.

3.2.2 Programme de calcul des temps d'écoulement FLORIS

Les calculs de temps d'écoulement ont été effectués avec le modèle hydrodynamique FLORIS des Laboratoires de Recherches Hydrauliques, Hydrologiques et Glaciologiques (VAW) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich (EPF-Z). Les écoulements à une dimension stationnaires et non stationnaires des cours d'eaux ont été calculés à l'aide de l'équation de continuité (3.2.1) et de l'équation (3.2.2) de De Saint Venant avec la méthode des éléments finis [VAW, 1990a].

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (3.2.1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial a}{\partial x} + g \cdot J = 0 \quad (3.2.2)$$

- g: accélération due à la gravité
- a: profondeur des eaux
- x: longueur de parcours
- t: temps
- u: vitesse d'écoulement
- A: surface de la section transversale
- J: pente
- Q: écoulement

Le réseau fluvial est divisé en plusieurs bras (ces sections ne concordent pas forcément avec les tronçons du modèle d'alerte) pour faciliter les calculs (figure 3.2.2). Les limites des tronçons, que l'on appelle noeuds, forment des points fluviaux, comme par exemple les confluent ou les usines hydroélectriques, qui ne peuvent pas être calculés avec les équations déjà mentionnées. Les calculs spéciaux nécessaires pour ces emplacements sont fonction des calculs des sections modélisées.

La géométrie du fleuve est prise en compte dans le programme qui intègre les profils en travers. Ces données et les niveaux d'eau permettent de calculer la surface traversée et la vitesse moyenne de chaque profils en travers. L'intégration des profils en travers permet d'obtenir les temps d'écoulement; lorsqu'on les additionne, on obtient le temps d'écoulement total entre deux points du cours d'eau.

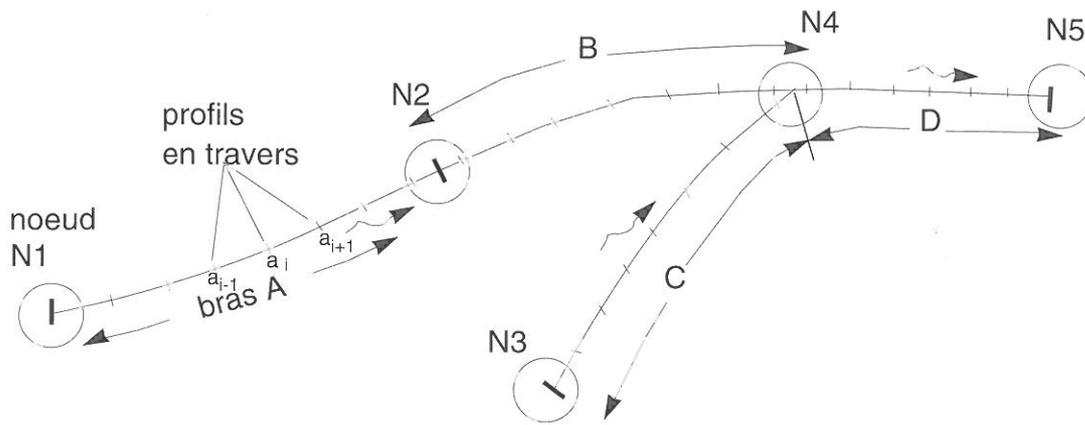


Figure 3.2.2 Noeuds, bras du fleuve et profils en travers permettant de décrire le bassin d'un fleuve avec le modèle FLORIS [de VAW, 1990]

3.2.3 Calculs effectués et évaluation

Afin de calculer les temps d'écoulement du Rhin entre le lac de Constance et Bâle, on a distingué deux tronçons principaux, eux-mêmes subdivisées en un grand nombre de sous-sections. Le tronçon supérieur s'étend du point kilométrique 24,680 du Rhin (Stein am Rhein) jusqu'au point kilométrique 103,000 (embouchure de l'Aar), tandis que le tronçon inférieur va du point kilométrique 103,000 au point kilométrique 173,600 (retenue de Kembs). Les débits d'écoulement sont déterminés aux stations de Reckingen en amont et de Rheinfelden en aval.

Le profil longitudinal du tronçon amont (figure 3.2.3) montre clairement où définir les noeuds et bras dans le modèle (figure 3.2.4).

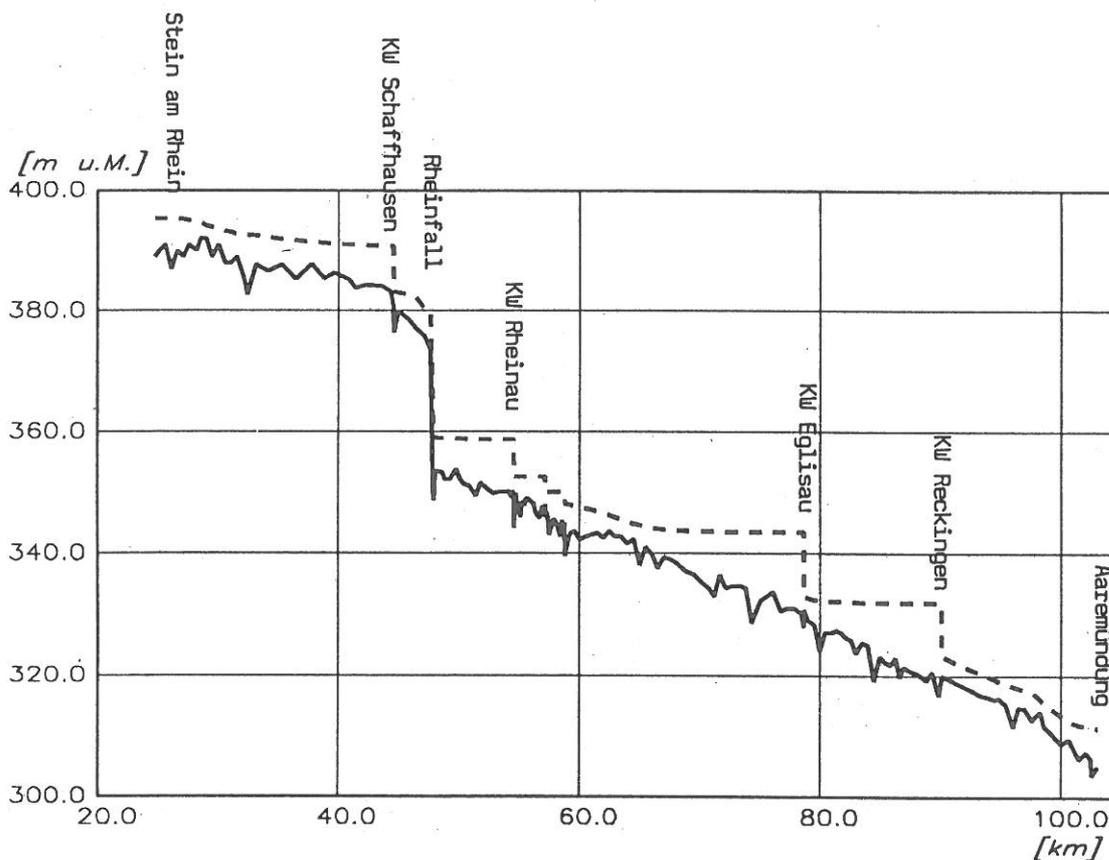


Figure 3.2.3 Profil longitudinal dans le tronçon amont du Rhin

—— Lit du fleuve

----- Plan d'eau stationnaire, $Q_{Reckingen} = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ [de VAW 1990]

Trois cent soixante treize coupes transversales ont ainsi été définies dans 27 sous-sections entre Stein am Rhein et la retenue de Kembs.

Les temps d'écoulement ont été calculés pour des débits de 200 à 1800 m³ à Reckingen et de 400 à 4000 m³ à Rheinfelden [VAW 1990, Kühne et al. 1991]. Les résultats partiels de la figure 3.2.5 montrent nettement que les aménagements ont eu une incidence sur les temps d'écoulement.

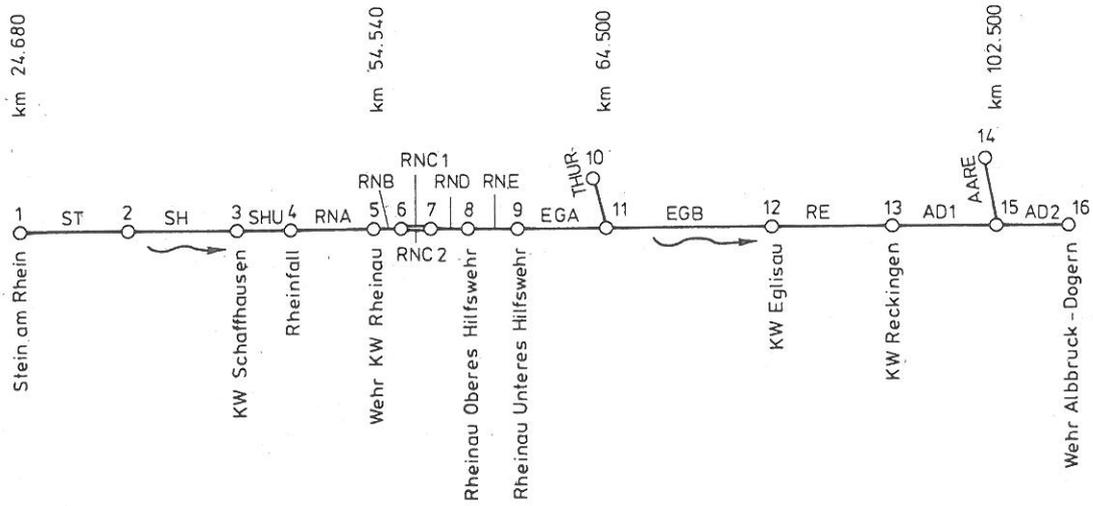


Figure 3.2.4 Réseau de modélisation du tronçon amont [VAW 1990]

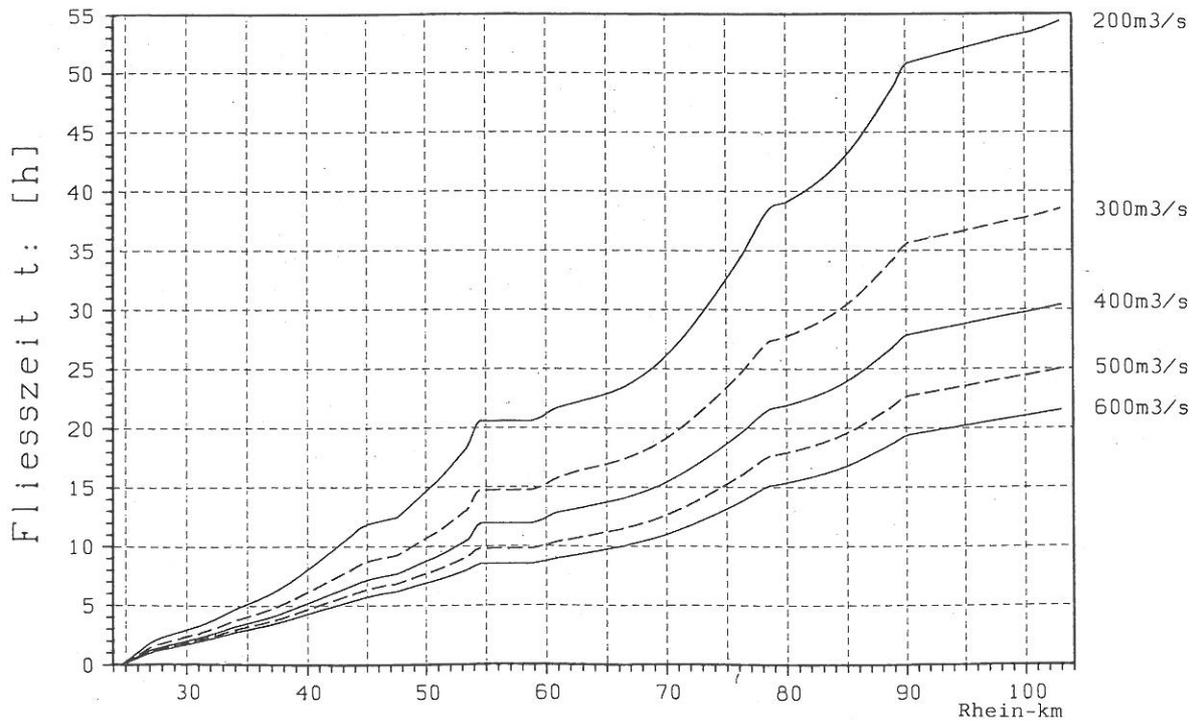


Figure 3.2.5 Temps d'écoulement moyen du tronçon amont du Rhin à Stein am Rhein (point kilométrique 24,68) jusqu'à l'embouchure de l'Aar (point kilométrique 103,00); débit à Reckingen: 200 - 600 m³/s [VAW 1990].

L'Aar a été divisée en trois tronçons pour faciliter les calculs analogiques du lac de Bienne jusqu'à l'embouchure dans le Rhin: tronçon 1 du barrage de Port (point kilométrique de l'Aar 183,32) jusqu'à l'embouchure de l'Emme (point kilométrique 215,15), la station de mesure du débit de Brügg étant la station de référence; tronçon 2 de l'embouchure de l'Emme jusqu'à l'embouchure de la Limmat (point kilométrique 292,43), la station de mesure du débit étant Murgenthal; tronçon 3 de l'embouchure de la Limmat jusqu'au point où elle se jette dans le Rhin (au point kilométrique 306,52), la station de mesure du débit étant Untersiggenthal-Stilli [VAW 1992].

Les données sur les profils en travers de l'Aar sont incomplètes et parfois anciennes, contrairement aux données sur les profils en travers du Rhin; le calcul des temps d'écoulement de l'Aar est rendu encore plus difficile par le fait que l'on y dénombre sept tronçons parallèles à des centrales, alors qu'il n'y en a que deux pour le Rhin. L'eau s'écoule dans les turbines des centrales et également dans le tronçon restant [Margot et al. 1992].

A cela s'ajoute le fait que deux trajets sont envisageables à proximité des centrales: le cours de la centrale et le cours naturel de l'Aar. Etant donné que l'intégration des deux tronçons parallèles dans le programme est un processus trop long, le modèle ne tient compte que des temps d'écoulement les plus courts en fonction des débits des échelles représentatives. Comme parcours de référence, on a retenu le cours naturel de l'Aar.

La comparaison des résultats des calculs du modèle FLORIS pour le Rhin [VAW 1990] et des essais de traçage réalisés en 1988 et 1989 [Leibundgut et al. 1988, Petermann et al. 1989] est très satisfaisante. La différence du premier essai sur 50 km est de 33 minutes (2,3%), et de 41 mn (2,1%) dans le deuxième essai, réalisé sur une distance de 105 km. On n'observe nulle part une différence supérieure à 20 mn, la moitié environ pouvant être imputée à des imprécisions méthodologiques (choix du site d'échantillonnage, calcul de la vitesse moyenne d'écoulement, résolution temporelle de l'essai, des traceurs) [Kühne et al. 1991].

Les résultats des calculs pour l'Aar n'ont pas pu être vérifiés pour l'instant, étant donné qu'il n'y a pas eu encore d'essai de traçage.

3.2.4 Perspectives d'avenir

Les modifications du lit du fleuve dues à l'érosion et à la sédimentation dans les tronçons du Rhin et de l'Aar étudiés sont négligeables pour le modèle de calcul. Ceci est entre autres dû au fait que les sédiments des confluent sont stockés dans des collecteurs dans la Thur et dans la Thöss [Jakob et Geissel, 1992] ou se déposent naturellement dans l'Emme avant de se déposer dans le Rhin. Des travaux de dragage sont effectués régulièrement à ces endroits.

Les interventions humaines peuvent modifier de façon considérable le lit du fleuve, ce qui peut se répercuter sur les temps d'écoulement. On procède encore à des dragages à grande échelle, et il est prévu de construire ou de transformer plusieurs centrales. Après plusieurs incidents, il paraît hautement souhaitable d'actualiser les calculs des modèles et, le cas échéant, de tenir compte des résultats obtenus dans le modèle d'alerte pour le Rhin.

Il sera peut-être nécessaire de vérifier les calculs pour l'Aar au cas où les données seraient améliorées par de nouveaux profils en travers. Il est prévu de contrôler les résultats à l'aide d'un essai de traçage, mais rien n'a encore été arrêté à ce jour.

3.2.5 Bibliographie

Jakob, A. et A. Geissel (1992) : Messnetze chemischer und physikalischer Parameter. Atlas hydrologique de la Suisse, tableau 7.1, Service hydrologique et géologique national, Berne

Kühne, A., Ch. Leibundgut, J. Petermann, B. Schädler, B. Schudel, G. Schneider et M. Spreafico (1991) : Fliesszeitbestimmung und Stofftransportuntersuchungen im Rhein, Communication du Service hydrologique et géologique national, Berne

Leibundgut, Ch., J. Petermann et B. Schudel (1988) : Essai de traçage sur le Rhin "Albbruck - Bâle", Beschaffung von Eingabedaten für ein Alarm- und Stofftransportmodell mittels Traceruntersuchungen. Rapport de l'Institut de Géographie de l'université de Berne, unité Géographie Physique, et de Naturaqua, Berne, 30 pages

Margot, A., B. Schädler, R. Sigg et R. Weingartner (1992) : Beeinflussung der Fließgewässer durch Kraftwerke und Seen. Atlas hydrologique de la Suisse, tableau 5.3, Service hydrologique et géologique national, Berne

Petermann, J., B. Schudel, Ch. Leibundgut, M. Gossauer et D. Morgenthaler (1989) : Essai de traçage sur le Rhin "Rhinau - Bâle", Beschaffung von Eingabedaten für ein Alarm- und Stofftransportmodell mittels Traceruntersuchungen. Rapport de l'Institut de Géographie de l'université de Berne, unité Géographie Physique, et de Naturaqua, Berne, 31 pages

VAW (1990a): Fließzeiten im Rhein. Berechnung von mittleren Abflussgeschwindigkeiten und Fließzeiten mit dem hydrodynamischen Modell FLORIS, rapport n° 767 des Laboratoires de Recherches Hydrauliques, Hydrologiques et Glaciologiques (VAW) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich, 96 pages

VAW (1992) : Fließzeiten in der Aare. Berechnung von mittleren Abflussgeschwindigkeiten und Fließzeiten mit dem hydrodynamischen Modell FLORIS, rapport n° 788 des Laboratoires de Recherches Hydrauliques, Hydrologiques et Glaciologiques (VAW) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich, 66 pages

3.3 Temps d'écoulement dans le Rhin supérieur, moyen, inférieur et dans la Moselle

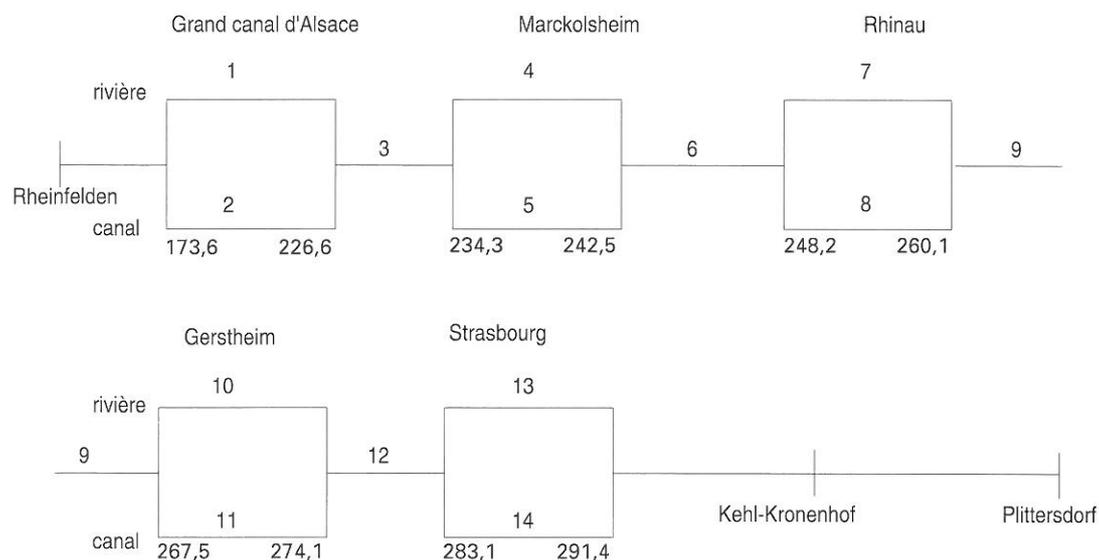
Entre Village-Neuf/Kembs (Rhin supérieur, point kilométrique 173,6) et Plittersdorf (Rhin supérieur, point kilométrique 349,2), le Rhin est doté sur une grande partie de canaux parallèles. L'écoulement dans les canaux sur territoire français et dans le reste du Rhin a été déterminé par une convention entre la République Fédérale d'Allemagne et la France, qui prévoit que le débit maximum dans les canaux sera de 1400 m³/s et que le débit résiduel minimum dans le Rhin sera de 30 m³/s. Le rapport des écoulements qui est effectivement utilisé par le modèle dans les calculs, est déterminé en fonction du débit à Rheinfelden. La régulation se fait d'ailleurs en se fondant sur les débits de cette même station.

Lorsque l'on met en oeuvre le modèle d'alerte pour le Rhin, il faut savoir que le maximum déjà mentionné de 1400 m³/s est très souvent dépassé en pratique. En outre, la régulation du débit jusqu'aux environs de 1400 m³/s dépend de la production d'énergie d'Electricité de France (EDF), qui, dans la règle, est un mode d'exploitation du type «par éclusées». Cela signifie que, jusqu'à un débit d'environ 1200 m³/s, de l'eau est retenue la nuit pour être ensuite relâchée au cours de la journée, à des moments où la demande d'énergie est plus forte. Ainsi donc, sur les tronçons de fleuve et de canal affectés par la retenue, on n'a pas affaire à un débit constant, ni par conséquent à des temps d'écoulement constants.

Dans le modèle d'alerte, le niveau d'eau de l'échelle Kehl-Kronenhof est estimé à partir du niveau à Rheinfelden, en se basant sur des relations établies préalablement entre ces deux échelles (voir figure 3.3.1).

En ce qui concerne le tronçon du Rhin non régulé Iffezheim-Emmerich/Lobith, on a 14 stations de mesures de débit, et 5 stations supplémentaires pour les affluents Neckar, Main et Moselle. Le tableau 3.3.1 donne la liste de ces stations avec les dates de validité de leurs relations hauteur/débit.

Sur base de mesures de vitesse d'écoulement, des relations entre niveau d'eau et vitesse moyenne d'écoulement ont été développés. Ces relations servent de base pour la détermination de temps d'écoulement. La précision des calculs de temps d'écoulement a été améliorée grâce à un relevé méticuleux de la géométrie fluviale entre les points de mesure du débit. On a utilisé pour ce faire des calculs de plan d'eau, qui se fondent sur les profils fluviaux mesurés (sur le Rhin tous les 500 m, sur la Moselle tous les 300 m).



Répartition des débits

Canal latéral du Rhin	$QRF \leq 1400: QF = 30, QK = QRF$ $QRF > 1400: QK = 1400, QF = QRF - 1370$
Marckolsheim	$QRF \leq 1395: QF = 30, QK = QRF + 5$ $QRF > 1395: QK = 1400, QF = QRF - 1365$
Rhinau	$QKK \leq 1475: QF = 30, QK = QKK - 75$ $QKK > 1475: QK = 1400, QF = QKK - 1445$
Gerstheim	$QKK \leq 1455: QF = 30, QK = QKK - 55$ $QKK > 1455: QK = 1400, QF = QKK - 1425$
Strasbourg	$QKK \leq 1430: QF = 30, QK = QKK - 30$ $QKK > 1430: QK = 1400, QF = QKK - 1400$

QRF = Débit à Rheinfelden
 QKK = Débit à Kehl-Kronendorf
 QF = Débit fluvial
 QK = Débit dans le canal

Figure 3.3.1 Représentation schématique du Rhin supérieur avec la régulation par retenues

Tableau 3.3.1 Points de mesure du débit

Station	Validité des relations hauteur-débit
Plittersdorf	depuis 01.02.77
Maxau	01.09.85
Spire	01.09.85
Worms	01.11.86
Mayence	01.11.86
Kaub	01.11.86
Coblence	01.11.86
Andernach	01.11.86
Bonn	01.07.86
Cologne	01.07.86
Düsseldorf	01.07.86
Ruhrort	01.07.86
Wesel	01.07.86
Rees	01.11.84
Gundelsheim (Neckar)	01.11.84
Oberau (Main)	01.05.83
Perl (Moselle)	01.11.82
Trêves (Moselle)	01.11.82
Cochem (Moselle)	01.11.82

Les vitesses d'écoulement moyennes sont calculées à partir des valeurs connues Q et A et la condition de continuité.

$$Q = u \cdot A$$

Pour u , on a choisi l'expression de Manning-Strickler

$$u = k_{st} \cdot r_h^{2/3} \cdot J^{1/2}$$

où r_h est le rayon hydraulique et où le coefficient de rugosité k_{st} varie dans des limites hydrauliquement raisonnables, suivant le tronçon concerné. On utilise même jusqu'à trois valeurs de k_{st} dans une même section transversale = des valeurs différenciées pour les francbords gauche et droit et pour la travée principale. Les tronçons de profils qui empiètent sur des champs d'épis ont été éliminés car n'ayant pas d'incidence sur le débit. Afin de calculer les temps d'écoulement par rapport au niveau d'eau, plusieurs tronçons présentant des similitudes sur le plan hydraulique ont été regroupés. Les temps d'écoulement T_i de ces tronçons ont été calculés ponctuellement pour les niveaux d'eau des plans d'eau calculés. En reliant les points ainsi obtenus avec une ligne égalisatrice, on obtient la fonction du tronçon $T_i = f(W)$.

Les calculs mentionnés ci-dessus ont été également effectués sur le Rhin pour les zones de retenue situées entre Kembs et Iffezheim ainsi que pour la partie allemande de la Moselle. Ils ne donnent toutefois que des temps d'écoulement moyens (pas de temps d'écoulement donnés pour des corps d'eau proches de la surface).

Les calculs de plan d'eau effectués et les temps d'écoulement déterminés à l'aide de ces calculs supposent des débits stationnaires et homogènes par tronçon. Ces conditions ne sont toutefois que rarement réunies. En général, les conditions sont non stationnaires. En choisissant des tronçons les plus courts possibles, on peut toutefois observer dans un tronçon des conditions quasi stationnaires. La prise en compte d'un grand nombre de limnimètres de référence et de petits tronçons pour lesquels le niveau d'eau est déterminant permet également de calculer les temps d'écoulement pour des conditions non stationnaires (niveaux d'eau montant et/ou descendant).

La Moselle se caractérisant par une succession de retenues, il n'est pas toujours possible de faire des calculs de temps d'écoulement et de débit à partir des niveaux d'eau, étant donné que la relation entre niveau d'eau et débit n'apparaît pas toujours de façon évidente. C'est la raison pour laquelle les prévisions dans le modèle sont effectuées à partir des débits actuels sélectionnés.

Les affluents Neckar et Main ne sont que provisoirement intégrés, étant donné que l'on ne dispose pas encore de calculs de temps d'écoulement détaillés.

Bibliographie

Adler, M. (1990) : Fließzeiten in der Mosel aus Wasserspiegellagenberechnungen, BfG - 0532, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Coblenz

Engel, H., T. Menzel et K. Wander (1988) : Fließzeiten im Rhein aus Wasserspiegelberechnungen. Rapport BfG-0429 Bundesanstalt für Gewässerkunde, Coblenz, 19 pages et 15 annexes

Teuber, W. et K. Wander (1987) : Fließzeiten im Rhein aus Flügelmessungen. Rapport BfG-0392 Bundesanstalt für Gewässerkunde, Coblenz, 32 pages

3.4 Les temps d'écoulement dans les bras néerlandais du Rhin

Les débits des bras néerlandais du Rhin Waal, Nederrijn-Lek et IJssel sont déterminés grâce au débit mesuré au limnimètre de Lobith (voir figure 3.4.1). On peut donc prévoir un débit de 2000 m³/s à Lobith avec un débit de 300 m³/s dans l'IJssel, de 320 m³/s dans le Nederrijn et de 1380 m³/s dans la Waal. Ces chiffres s'expliquent par la mise en oeuvre d'un programme de retenue pour les barrages de Driel, Amerongen et Hagestein. L'objectif est de garantir un débit minimum pour l'IJssel, tandis que l'on maintiendrait un débit de 25 m³/s pour le Rhin inférieur (figure 3.4.1).

Les calculs de temps d'écoulement ont été réalisés avec le modèle hydrodynamique à une dimension ZWENDL de la Rijkswaterstaat. Ce modèle est tout à fait comparable, tant de par sa structure que par les équations utilisées (voir équation 3.2.1 et 3.2.2) au modèle FLORIS des Laboratoires de Recherches Hydrauliques, Hydrologiques et Glaciologiques de l'EPF de Zurich.

Les données utilisées dans le modèle d'alerte pour le Rhin datent du 1.07.1990.

Lors de l'évaluation de ces données, il convient de ne pas oublier que les écoulements définis en période d'étiage pour le Nederrijn et l'IJssel ne sont pas toujours respectés, étant donné que la régulation des barrages ne se fait pas à l'aide de mesures de débit mais de mesures de niveaux d'eau. Pour certains débits, on observe ainsi des différences de temps d'écoulement considérables [van Mazijk et al. 1992]. Pour les étiages (écoulement Lobith < 1 400 m³/s), on ne doit donc pas tenir compte uniquement de l'échelle de Lobith mais également des niveaux d'eau entre Arnhem et Hagestein, et des débits mesurés quotidiennement aux retenues de Driel, Amerongen et Hagestein. Les débits de l'IJssel à Deventer et Kampen doivent aussi être intégrés.

Bibliographie

Mazijk, A. van, S. Wuijts et H. Th. Reitsma (1992) : Amélioration de la détermination du temps d'écoulement sur le tronçon Lobith - Hagestein (en néerlandais). Groupe de travail sur la prévision de qualité de l'eau du Rhin de l'Association des services des eaux du Rhin et de la Meuse (RIWA). Secrétariat du RIWA, BP 8169, NL-1005 AD Amsterdam, juin 1992

Valk, H.W.J., van der (1989) : Evaluation du modèle de prévision FLOOD pour le Rhin à l'échelle de Lobith (en néerlandais). Document de travail DBW/RIZA n° 89.013X. Rijkswaterstaat, Service des eaux intérieures/RIZA, Lelystad

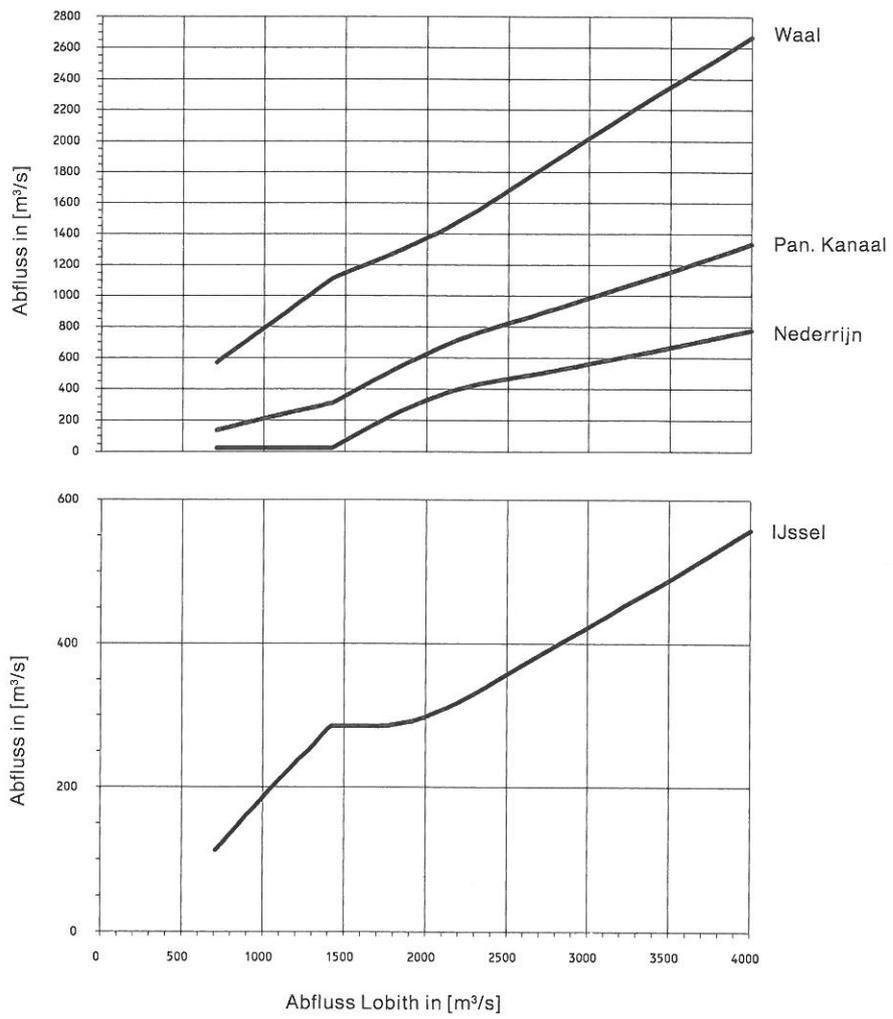


Figure 3.4.1 Débits dans les bras du Rhin, en fonction du débit à l'échelle de Lobith

4. COLLECTE DE DONNEES EN VUE DES ESSAIS DE TRAÇAGE

H. Wiesner et Ch. Leibundgut, Chaire d'hydrologie à l'Université de Fribourg en Brisgau
H. Hanisch, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Coblenz

4.1 Introduction et méthodologie

4.1.1 Introduction

Le présent chapitre décrit les essais de traçage réalisés avec des produits de marquage fluorescents sur le Rhin entre 1988 et 1991, qui ont permis de définir les paramètres d'entrée du modèle d'alerte pour le Rhin. Après une introduction générale relative à la mise en oeuvre et à l'évaluation des essais de traçage, les principaux résultats sont présentés sous forme de tableaux et de graphiques mentionnant les pays qui effectuent des essais de traçage. On y trouve entre autres informations les calculs par tronçons des vitesses moyennes de transport des substances et les calculs des flux de traceurs. Pour le calibrage et la vérification du modèle d'alerte, on a effectué des essais de marquage détaillés avec des traceurs fluorescents.

Les essais de traçage avec déversement momentané ou injection d'une substance de marquage pendant une période déterminée permettent de simuler sans danger les incidents dûs au déversement accidentel de substances toxiques dans les eaux. Ces essais permettent d'analyser directement les phénomènes de mouvement, de répartition et de dispersion dans les eaux superficielles et souterraines. Les essais de marquage dans les eaux superficielles peuvent être réalisés dans les lacs, les fleuves et dans des eaux côtières. Les questions généralement étudiées sont les suivantes: analyse des dynamiques de courant, constitution de couches, étude d'affluents et d'écoulements naturels et artificiels. La méthode des traceurs est de plus en plus fréquemment utilisée dans les eaux vives depuis une dizaine d'années, et s'est étendue à de nombreux domaines grâce à l'amélioration des techniques de mesure in situ. Etant donné qu'il n'existe que peu de publications sur les essais quantitatifs sur de longues distances d'écoulement comparables aux grands fleuves, les expériences sur le terrain réalisées entre 1988 et 1991 sur le Rhin ont en partie un caractère pilote.

L'eau du Rhin est constamment polluée par les centres urbains à forte densité de population et les régions industrielles, et est également menacée par de très graves accidents ponctuels. L'expérience de ces dernières années a amené le comité d'experts CIPR/CHR à poser pour hypothèse dans le modèle d'alerte pour le Rhin que la principale menace pour le biotope rhénan et les usagers du Rhin situés en aval est le déversement accidentel de substances solubles.

Le transport des substances dissoutes dans l'eau est déterminé au premier chef par le courant qui les transporte et la vitesse moyenne d'écoulement du fleuve (convection). A la suite de la diffusion, des turbulences et des différences de vitesse dans la coupe transversale du fleuve, il s'opère également des mélanges. Par ailleurs, en raison de la présence le long du lit et de la berge du fleuve de zones d'eaux stagnantes artificielles ou naturelles réparties aléatoirement, provoquées par exemple par des champs d'épis, des zones de retenue et des croissances de végétation aquatique, une partie des substances peut être transportée avec un certain retard. Dans ces processus dynamiques de dispersion, la répartition des substances est relativement régulière sur la largeur et la profondeur du fleuve après des distances relativement courtes, tandis que le processus de propagation longitudinale se poursuit.

Le modèle d'alerte pour le Rhin étant un modèle de propagation des substances à une dimension, on en a tenu compte dans les mesures des essais de traçage, qui sont utilisés pour le calibrage et la vérification du modèle d'alerte pour le Rhin. Ce chapitre présente entre autres nombreuses informations recueillies lors des essais les flux de traceurs et les vitesses de transport des substances moyennes calculées par tronçon, qui sont les principales grandeurs de dispersion des substances à une dimension avec les coefficients de dispersion longitudinale décrits au chapitre 5. Pour plus de détails, entre autres sur les séries de données, on se référera utilement aux rapports sur les essais de marquage et aux procédures de calibrage et de vérification.

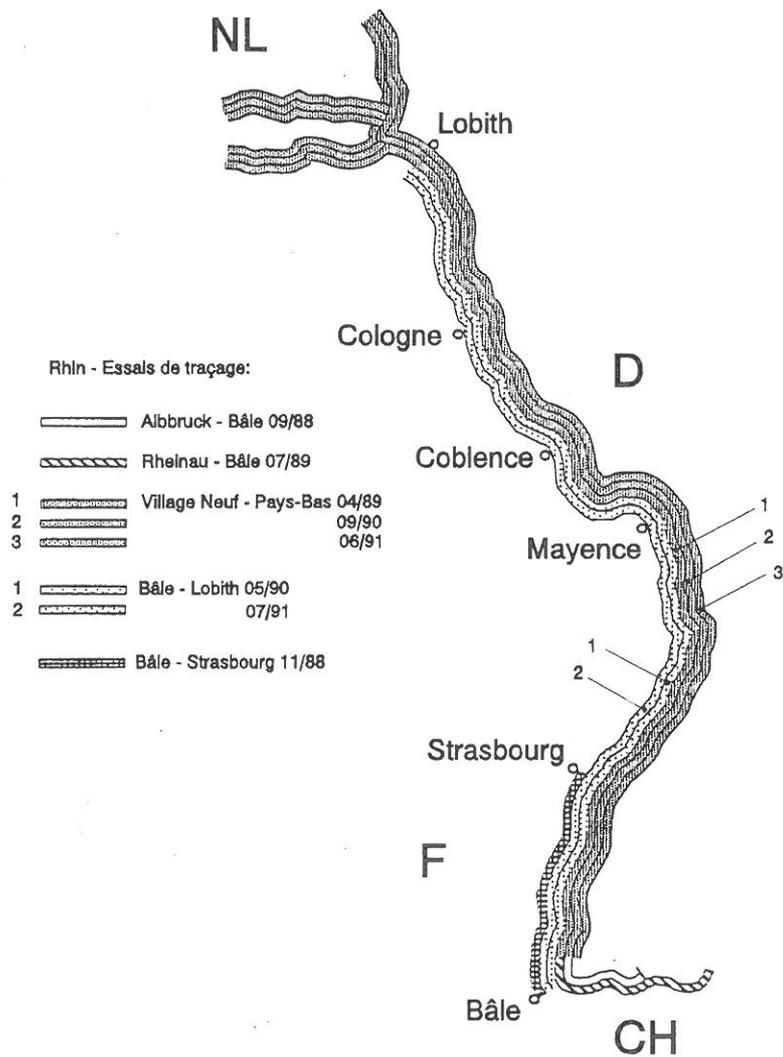


Figure 4.1.1 Essais de traçage sur le Rhin 1988 - 1991

4.1.2 Essais de traçage et modèle d'alerte pour le Rhin

L'élaboration de la version 2.0 du modèle d'alerte pour le Rhin, qui intègre la constante de proportionnalité α et le paramètre des zones d'eaux stagnantes β (voir chapitre 5) a tout d'abord permis l'étalonnage de l'ensemble des sous-sections du Rhin pour faciliter les calculs réalisés avec le modèle d'alerte. Un grand nombre de simulations d'accidents liés au déversements de produits nocifs ont été réalisées avec des traceurs fluorescents, l'objectif étant de collecter des données pour dessiner des courbes de passage des traceurs pour le modèle d'alerte pour le Rhin et pour le modèle de dissémination des substances pour eaux vives SAMF [Bremicker 1989] de l'université de Fribourg, dont on se sert pour évaluer les essais de traçage. Une première détermination des paramètres α et β a

donc été faite pour le Rhin supérieur à l'aide des résultats des calculs suisses; les vitesses moyennes de transport des substances calculées par tronçons avec SAMF et les coefficients de dispersion longitudinale ont été utilisés pour le tronçon suivante.

Les données des huit essais de marquage réalisés entre 1988 et 1991 ont été utilisés pour le calibrage et la vérification du modèle d'alerte pour le Rhin (voir figure 4.1.1). Alors que les essais de traçage suisses et germano-néerlandais avaient été effectués pour se procurer des données pour le modèle d'alerte pour le Rhin, les essais de marquage français (MV 11/88, MV 05/90, MV 07/91) ont été effectués au premier chef dans un cadre régional et n'ont donc pu être utilisés que partiellement pour le modèle d'alerte.

4.1.3 Injection de substances

Le modèle d'alerte pour le Rhin ayant servi aux calculs de transport des substances dissoutes dans l'eau, on s'est efforcé de déterminer les substances de marquage les plus appropriées pour ces essais "naturels". Trois groupes de substances de marquage ont été retenues: les traceurs fluorescents, les sels et les substances radioactives. Lorsque l'on opte pour les sels, on doit en utiliser de grandes quantités; il faut également savoir que les déversements des mines de potasse alsaciennes font apparaître d'importantes concentrations de ce produit; quant aux substances de marquage radioactives, elles ne sont pas fréquemment utilisées car soumises à autorisation. On emploie donc généralement des substances fluorescentes pour les essais de marquage réalisés à des fins de calibrage et de vérification du modèle d'alerte pour le Rhin. De faibles quantités de ces produits suffisent pour marquer d'importants volumes d'eau, et elles restent quantifiables même lorsqu'il n'en reste plus que de faibles traces. Les traceurs fluorescents ne sont pas des substances de marquage idéales en raison de leurs caractéristiques d'absorption et de leur instabilité chimique. Les Suisses, quant à eux, ont opté pour le traceur universel Uranine (fluorescéine de sodium, $C_{20}H_{10}O_5Na_2$). Les essais de marquage germano-néerlandais ont été réalisés avec de la rhodamine WT (acid red 388, $C_{29}H_{29}O_5N_2Na_2Cl$) étant donné les distances d'essais et les temps d'écoulement nettement plus longs et compte tenu de la propension relativement forte du uranine à la décomposition photolytique (demi-vie 11 heures). Lors des essais réalisés avec une lumière du jour artificielle, la demi-vie de la rhodamine était 100 fois plus élevée (1300 heures). Les substances utilisées pour les essais de marquage français ont été la rhodamine WT en 1988 et la rhodamine B en 1990 et 1991 (demi-vie 780 heures).

4.1.4 Prélèvements et analyse des échantillons

Les déversements de traceurs étaient momentanés lors de tous les essais de marquage. Les durées effectives d'injection étaient comprises entre 1,5 et 6 minutes pour les essais suisses et germano-néerlandais, et sont allées jusqu'à 70 minutes pour l'expérience de traçage réalisée en novembre 1988 en France, des dépôts difficilement solubles s'étant formés dans quelques récipients de colorants.

Exception faite de quelques sites où les échantillonnages ont été faits manuellement et de certains cas où l'on a fait des mesures in situ, les concentrations ont généralement été calculées par des appareils de prélèvement automatiques. Ces appareils ont été installés pendant la durée des essais à certains points des sections transversales. Avant le début des essais, les intervalles pour les prélèvements d'eau, qui peuvent varier de quelques minutes à quelques heures, ont été calculés en fonction de la distance entre le point de déversement et le point d'observation. Afin que les résultats soient le plus exacts possible, on a placé les échantillons dans des bouteilles de verre brun, qui ont ensuite été analysées en laboratoire.

On a constaté lors de tous les essais de marquage que le choix du site de prélèvement était primordial. En partant de l'hypothèse qu'une fois déversées, les substances se répartissent assez rapidement de façon homogène sur la profondeur et la largeur du fleuve, les prélèvements doivent pouvoir se faire en principe à n'importe quel endroit d'une section du fleuve. En pratique, il peut se produire des écarts très importants, par exemple en cas d'apparition d'affluents non marqués. Lors des essais suisses et germano-néerlandais effectués pour le modèle d'alerte pour le Rhin, on s'est généralement efforcé d'installer les points de mesure dans le centre du chenal. Les résultats obtenus en prélevant

les échantillons directement en aval des centrales, où le traceur est bien mélangé après le passage de la turbine, étaient également bons. Dans les quelques cas où le prélèvement ne pouvait pas être effectué d'une centrale ou d'un pont, les appareils de prélèvement ont été installés sur des points surélevés à proximité des berges. Les prélèvements des essais français ont généralement été effectués à partir de la berge.

Etant donné que le choix du site de prélèvement est primordial pour la représentativité des données des sections transversales, toute courbe de passage des traceurs ne peut être évaluée qu'à partir de ces informations.

L'analyse des échantillons d'eau obtenus avec les appareils automatiques de prélèvement a en règle générale été effectuée avec des fluorimètres spectraux par procédé Synchronscan, à l'exception de l'analyse des échantillons prélevés lors de l'essai d'avril 89 (04/89) entre Karlsruhe et Bimmen. Les concentrations de traceurs de ces échantillons ont été analysées par la Bundesanstalt für Gewässerkunde de Coblenz avec un fluorimètre à filtre. Quelques échantillons prélevés dans les bras néerlandais du Rhin ont été choisis au hasard et analysés par le Rijkswaterstaat avec le procédé HPLC. Cette méthode d'analyse, employée depuis peu pour l'hydrologie des traceurs, se distingue par sa sensibilité élevée (10 pg/l pour la rhodamine WT pour des eaux claires). Malheureusement, le procédé HPLC est relativement onéreux et assez long par rapport aux autres, ce qui limite son utilisation aux expériences de traçage comportant un grand nombre de prélèvements. Lorsque l'on compare les analyses HPLC et les résultats des mesures obtenus avec la fluorimétrie spectrale, on observe une bonne concordance des résultats.

Les limites de détection s'appliquant aux analyses par fluorimétrie spectrale avec le procédé Synchronscan sont de 0,002 mg/m³ pour l'Uranine et de 0,006 mg/m³ pour la rhodamine WT dans des eaux claires.

4.1.5 Débits et flux de traceurs

Le calcul des flux de traceurs pour calibrer et vérifier le modèle d'alerte pour le Rhin suppose que l'on détermine le plus précisément possible le tracé de l'écoulement pendant l'essai. La détermination du débit moyen pour les différents tronçons du Rhin se fait sur la base de la vitesse de transport des substances de marquage mesurée (rapportée à la concentration maximum). A l'aide de ces vitesses, on peut calculer pour chaque site le temps de propagation des substances à partir du point de déversement jusqu'au point kilométrique d'observation. La figure 4.1.2 représente ces durées de parcours pour l'essai de marquage 04/89 (point de déversement Village-Neuf, point kilométrique 174,1). A partir du tracé, on peut déterminer le moment où la plus grande partie de la substance de marquage a traversé une sous-section du Rhin. Les débits de tronçons moyens à intégrer dans le modèle sont calculés à partir des valeurs moyennes journalières de débit pondérées par tronçon et pour la durée du passage d'un marqueur dans un tronçon; voir entre autres [Leibundgut & Wiesner, 1992]. On part de l'hypothèse que le débit observé à une station de mesure du niveau d'eau est représentatif d'une section donnée. Le critère retenu pour l'entrée ou la sortie dans un tronçon de passage est la concentration maximum.

Les retenues des centrales influent de façon artificielle sur l'écoulement dans le Haut-Rhin et le Rhin supérieur. Par exemple, la régulation de l'eau motrice des centrales dans le Rhin supérieur entre Bâle et Karlsruhe s'effectue jusqu'à un débit d'environ 1200 m³/s en régime seuil. Ce débit permet la production d'énergie de pointe même dans les cas où la production naturelle d'énergie est limitée en période d'étiage. Les retenues des centrales sont augmentées à cette fin de 20 cm et atteignent ainsi 50 cm, afin de pouvoir produire à court terme des quantités d'énergie plus importantes. Etant donné que les centrales sont conçues pour des débits maxima de 1400 m³/s, les quantités excédant ce chiffre sont déversées dans le Rhin. En période de basses eaux, une quantité d'eau minimale de 30 m³/s est garantie pour cette portion du Rhin.

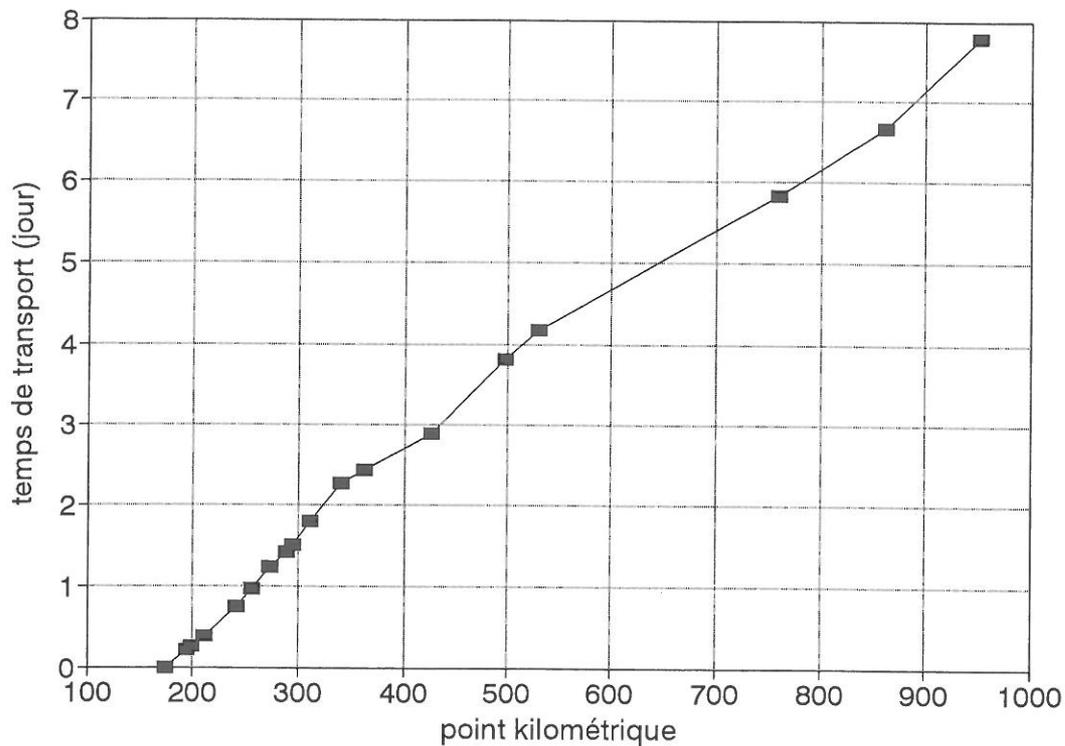


Figure 4.1.2 Durées de transport des substances (par rapport aux concentrations maxima), essai de marquage 04/89

Ces régulations de débits ont un fort impact sur la dissémination des substances dans les tronçons, dont il faut tenir compte pour les paramètres de transport relevés lors des essais de marquage effectués dans ces conditions.

La détermination du passage des traceurs M mesurée par les stations a été effectuée avec la formule suivante :

$$M = Q \cdot \sum_{i=1}^n \Phi_i \cdot dt_i \quad (4.1.1)$$

- Q = débit moyen du tronçon
- Φ_i = concentration mesurée au moment t_i
- dt_i = intervalle entre deux valeurs successives
- n = nombre de mesures

Afin de déterminer de façon précise les passages des traceurs, il faut que les échelles aient collecté toutes les données sur ces passages, ce qui n'est pas toujours le cas pour les essais décrits ci-après. Les extrémités des courbes de passage sont différentes d'un essai à l'autre en fonction des enregistrements et des limites de détection ou des concentrations (charge de base).

On observe également sur les tronçons du Rhin dotés de retenues un phénomène qui se retrouve, bien qu'il soit de bien moins grande ampleur, dans les petites zones d'eaux stagnantes. Les substances de marquage restent dans les zones où le courant est faible et ne se mélangent qu'avec un certain retard aux eaux qui s'écoulent plus rapidement. Il y a ainsi dilution, ce qui, en particulier lorsque ce processus se répète à plusieurs reprises dans les séries de centrales, peut avoir pour conséquence qu'une certaine quantité de traceurs passe les stations de mesure sans être détectée.

La disparition de traceurs peut être provoquée par l'infiltration d'eau fluviale dans les eaux souterraines, ou par l'absorption des sédiments, qui est fonction des caractéristiques de la substance de marquage utilisée, ainsi que par la destruction physico-chimique et photochimique du traceur.

Les autres imprécisions des flux de traceurs sont provoquées par la variation des débits au cours de la journée, car les calculs ne tiennent compte que des valeurs moyennes journalières de débit.

4.2 Essais réalisés en Suisse

4.2.1 Tronçons étudiés

Deux essais de marquage ont été réalisés en 1988 et 1989 sur le tronçon du Haut-Rhin compris entre le lac de Constance et Bâle [Leibundgut et al. 1988 et Peterman et al. 1989] par le Service hydrologique et géologique national, Berne, en collaboration avec l'institut géographique de l'université de Berne et la société Naturaqua de Berne. L'essai en date du 27 septembre 1988 a porté sur le tronçon d'Albbruck (point kilométrique 113,5) à Kembs (point kilométrique 179,8), tandis que l'essai de marquage du 18 juillet 1989 a porté sur le tronçon aval de Rhinau (point kilométrique 58,8) à Kembs (point kilométrique 179,8); voir figure 4.1.1.

Lors du premier essai, on a déversé 235 kilogrammes de traceurs pré-dissous de fluorescéine de sodium à la sortie de la station d'épuration d'Albbruck. Le deuxième marquage a été effectué avec 200 kilogrammes de substances de marquage dans un délai de 1,5 mn à la sortie de la station d'épuration de Rhinau.

Tableau 4.2.1 Déversement, tronçon étudié, écoulement et traceurs des essais de marquage 09/88 et 07/89

Essai de traçage/ Date de déversement	Tronçon étudié (pk)	Débit moyen lors du déversement (m ³ /s) Limnimètre	Quantité déversée (kg) Traceur employé
MV 09/88 27.09.88	Albbruck-Bâle 113,5 - 179,8	712 Rheinfelden	235 Uranine
MV 07/89 18.07.89	Rheinau-Bâle 58,8 - 179,8	490 Rhinau	200 Uranine

4.2.2 Débits

Lors de l'expérience de traçage réalisée en septembre 1988, le débit du Rhin mesuré au limnimètre de Rheinfelden (point kilométrique 148,26) est passé de 712 à 679 m³/s pendant l'expérience, ce qui représente une légère tendance à la baisse sans grandes fluctuations. Un débit de 712 m³/s correspond pour cette station de mesure à un niveau d'eau de 213 centimètres.

Lors du déversement pendant l'essai de traçage 07/89 réalisé le 18 juillet 1989, le débit moyen journalier du Rhin à Rhinau était de 555 m³/s. Le débit de l'Aar était sensiblement le même à cette période; on a observé au limnimètre de Rheinfelden après la jonction du Rhin et de l'Aar des débits moyens journaliers compris entre 1086 et 1025 m³/s qui n'ont pas beaucoup changé pendant l'essai.

4.2.3 Vitesses de transport des substances

Le tableau 4.2.2 montre les vitesses moyennes de transport des substances déterminées pour les différents tronçons pendant l'essai de traçage 09/88 d'Albbruck à Bâle. Seuls les points de mesure les plus représentatifs ont été pris en compte: on n'a donc pas retenu les courbes de passage des traceurs à proximité des berges [Schudel/Petermann, 1991]. Etant donné qu'aucune mesure détaillée du débit n'a été faite le long du tronçon expérimental, on a indiqué un débit moyen de 700 m³/s pour la durée de l'essai.

Tableau 4.2.2 Vitesses moyennes de transport des substances (c) (par tronçon) lors de l'essai de marquage 09/88 Albbbruck/Bâle

Tronçon	Point kilométrique	Q	c
Albbbruck - Laufenburg	113,5 - 122,0	700	0,82
Laufenburg - Stein	122,0 - 130,2	700	0,62
Stein - Riburg	130,2 - 143,5	700	0,49
Riburg - Augst/Wyhlen	143,5 - 155,9	700	0,68
Augst/Wyhlen - Birsfelden	155,9 - 163,8	700	0,48
Birsfelden - Kembs	163,8 - 179,8	700	0,61

c : vitesse moyenne de transport des substances [m/s]
 Q : débit moyen [m³/s]

Les vitesses moyennes de transport des substances sont comprises entre 0,48 et 0,82 m/s. La vitesse moyenne de transport sur tout le tronçon expérimental est de 0,59 m/s.

Comme pour toutes les tronçons dotées de retenues de régulation, les résultats des mesures peuvent être influencés par le fonctionnement des centrales. Sans mesures de débit détaillées pendant les essais, il est généralement difficile d'appréhender ou de calculer ces variations artificielles qui sont souvent de courte durée. Toutefois, on pourrait les envisager en cas de fortes variations des mesures moyennes de transport observées. Par ailleurs, il est possible que pendant un passage de traceurs, certaines turbines de retenue ne fonctionnent pas. Il peut donc se produire un nouveau "déversement" ponctuel, qui peut avoir une incidence sur la vitesse moyenne de transport des substances en fonction de l'emplacement des turbines en fonctionnement dans le tronçon du fleuve et de la longueur du tronçon de mesure postérieure.

Tableau 4.2.3 Vitesses moyennes de transport des substances (c) (par tronçon) lors de l'essai de marquage 07/89 Rhinau-Bâle

Tronçon	Point pk	Q	c
Rhinau - Rüdlingen	58,8 - 67,1	490	1,59
Rüdlingen - Pont Eglisau	67,1 - 74,5		0,68
Pont Eglisau - Centrale Eglisau	74,5 - 78,7		0,49
Cent. Eglisau - Reckingen	78,7 - 90,1	555	0,68
Reckingen - Zurzach	90,1 - 93,5		1,39
Zurzach - Coblenz	93,5 - 101,6		1,52
Coblenz - Albbbruck	101,6 - 108,9		0,66
Albbbruck - Laufenburg	108,9 - 122,0		1,81
Laufenburg - Säckingen	122,0 - 129,3		0,88
Säckingen - Riburg	129,3 - 143,5		0,73
Riburg - Augst	143,5 - 155,9	1068	0,99
Augst - Birsfelden	155,9 - 163,8		0,79
Birsfelden - Kembs	163,8 - 179,8		0,85

c : vitesse moyenne de transport des substances [m/s]
 Q : débit moyen [m³/s]

Le tableau 4.2.3 montre les vitesses de transport des substances pour les différents tronçons obtenues lors de l'essai de marquage de Rhinau à Bâle en septembre 1989. Les valeurs varient entre 0,49 et 1,59 m/s selon les compartiments. La vitesse d'écoulement moyenne sur l'ensemble du tronçon fluvial est de 0,89 m/s.

On observe que les vitesses moyennes de transport des substances sont relativement élevées dans trois zones. Il s'agit des tronçons du Rhin aval de Rhinau à Rüdlingen (1,59 m/s), de Reckingen à Coblenze (1,49 m/s) et d'Albbruck à Laufenburg (1,81 m/s), dans lesquelles le Rhin peut s'écouler librement, alors qu'il existe un grand nombre de régulations par retenue dans le reste de la section.

L'évaluation détaillée de l'essai [Petermann et al., 1989] a mis à jour un phénomène: pour les tronçons entre Albbruck et Laufenburg et entre Augst et Birsfelden, on a noté des vitesses de transport des substances maxima situées dans la moyenne supérieure. Cela implique, que le centre du nuage de traceurs est transporté plus rapidement que le front. Pour le tronçon d'Albbruck à Laufenburg, on peut probablement expliquer ce phénomène par le fait que jusqu'à la station de mesure d'Albbruck, l'eau de l'Aar non marquée ne s'est pas encore complètement mélangée avec l'eau du Rhin marquée. Ce mélange ne s'effectue qu'après passage par les turbines à la centrale d'Albbruck. Les résultats pour le tronçon entre Augst et Birsfelden ne peuvent pas être entièrement expliqués.

4.2.4 Flux de traceurs

Le tableau 4.2.4 montre deux tronçons où les pertes de traceurs sont plus élevées que la moyenne pour l'essai de marquage 09/88. Pour le tronçon de Laufenburg à Riburg, on peut penser qu'en raison du temps ensoleillé, le traceur a été dégradé photochimiquement par la lumière solaire. La diminution irrégulière des passages de traceurs de Birsfelden à Kembs pourrait être due à la dégradation physico-chimique de la fluorescéine de sodium dans la région de Bâle.

Tableau 4.2.4 Flux de traceurs pour l'essai de marquage 09/88 Albbruck - Bâle

Station de mesure	Point pk	Quantité de traceurs (kg)
Albbruck	113,5	235 (déversement)
Laufenburg	122,0	246,8
Stein	130,2	188,0
Riburg	143,5	145,2
Augst/Wyhlen	155,9	137,5
Birsfelden	163,8	126,0
Kembs	179,8	79,2

Le tableau 4.2.5 montre les flux de traceurs de l'essai de marquage 07/89, d'où l'on peut déduire que la diminution n'est pas non plus régulière dans ce cas. On observe des pertes relativement importantes de traceurs dans la première partie du tronçon d'essais jusqu'à Albbruck. Celles-ci peuvent être expliquées par la destruction de la fluorescéine de sodium par les rayons du soleil. Ce phénomène est suivi d'une phase de stabilisation des pertes sur le tronçon de Laufenburg jusqu'à Augst. Ce tronçon a été traversé pendant la nuit par le nuage de traceurs, ce qui exclut toute influence photochimique. Les pertes importantes en aval d'Augst sont probablement liées à la destruction chimique par des substances exogènes dans le Rhin à proximité de Bâle.

Tableau 4.2.5 Flux de traceurs pour l'essai de marquage 07/89 Rhinau-Bâle

Station de mesure	Point kilométrique	Quantité de traceurs (kg)
Rhinau	58,8	200 (déversement)
Rüdlingen	67,1	200,0
Pont Eglisau	74,5	200,0
Centrale Eglisau	78,7	200,0
Reckingen	90,1	164,2
Zurzach	93,5	140,0
Coblence	101,6	123,6
Albbruck	108,9	120,0
Laufenburg	122,0	105,6
Säckingen	129,3	96,2
Riburg	143,5	98,8
Augst	155,9	94,6
Birsfelden	163,8	79,6
Kembs	179,8	32,8

4.2.5 Travaux spéciaux

Les expériences de traceurs ont permis de déterminer les concentrations grâce aux échantillons d'eau stationnaires et de faire des mesures in situ du nuage de substances de marquage. On a utilisé pour ce faire des chaînes d'arpenteur subaquatiques équipées de fluorimètres à filtre, qui permettent d'observer des profils verticaux ou horizontaux d'entraînement. Pendant l'essai d'Albbruck à Bâle en septembre 1988, on a tout d'abord déterminé le front et la première montée du nuage de traceurs sur des sections transversales déterminées. On a ainsi pu montrer précisément la diminution successive des vitesses au fur et à mesure que l'on se rapprochait des retenues.

Lors de l'essai de marquage réalisé en 1989 de Rhinau à Bâle, on a étudié précisément la dégradation d'uranine par le soleil. Les pertes de traceurs étaient d'environ 32 % par jour (par ciel couvert) pour un profil moyen; les valeurs enregistrées étaient étonnamment élevées.

4.3 Essais en Allemagne et aux Pays-Bas

4.3.1 Tronçons étudiés

La Bundesanstalt für Gewässerkunde de Coblence a réalisé trois essais de traçage sur la section allemande du Rhin de 1988 à 1991, en collaboration avec la Chaire d'Hydrologie de l'Université de Fribourg. Le Rijkswaterstaat, qui a fourni à l'occasion le produit de marquage, a ensuite procédé à des mesures dans les bras néerlandais du Rhin.

Lors de l'essai de marquage, le tronçon du Rhin aval allant du point de déversement à Village-Neuf (début de dérivation du Rhin, point kilométrique 174,1) aux sites des derniers prélèvements aux Pays-Bas sur la Waal (Vuren, point kilométrique 951,8), Nederrijn-Lek (Hagestein, point kilométrique 946,5) et IJssel (Kampen, point kilométrique 994,5) (voir figure 4.1.1 et Tableau 4.3.1).

Par comparaison avec les essais de marquage suisses sur le tronçon du Haut-Rhin qui comptait deux points de déversement, les expériences de traceurs germano-néerlandaises permettent pour un même tronçon d'étude de comparer directement les résultats obtenus avec des débits différents.

Tableau 4.3.1 Déversement, tronçon étudié, débit et traceurs des essais de marquage 04/89, 09/90, 07/89

Essai de traçage/ Date de déversement	Tronçon (point pk)	Débit moyen lors du déversement (m ³ /s) Limnimètre	Quantité (kg) Traceur employé
MV 04/89 26.04.89	174,1-994,5	1170 Rheinfelden	100 Rhodamine WT
MV 09/90 11.09.90	174,1-951,8	663 Rheinfelden	100 Rhodamine WT
MV 06/91 25.06.91	174,1-951,8	1820 Rheinfelden	100 Rhodamine WT

4.3.2 Débits

Afin de calibrer et de vérifier le modèle d'alerte pour le Rhin, il était prévu d'effectuer des essais de marquage entre Bâle et les Pays-Bas pour un débit du Rhin faible, moyen et plus élevé.

Le débit pour l'essai de marquage 09/90 réalisé en période de basses eaux a débuté à 663 m³/s (Rheinfelden) et a correspondu à un débit d'étiage au cours de l'essai (voir figure 4.3.1); par contre, l'inverse s'est produit pour les expériences de traçage sur le Rhin 04/89 et 06/91. L'essai de marquage prévu pour un débit moyen et commencé au limnimètre de Rheinfelden avec un débit de 1170 m³/s s'est transformé à hauteur de Mayence environ (point kilométrique 498,5) en essai à débit élevé. Par contre, l'essai de marquage 06/91 qui avait commencé à Rheinfelden avec un débit élevé de 1820 m³/s n'a enregistré qu'une très faible augmentation du débit, qui est resté moyen jusqu'à Mayence.

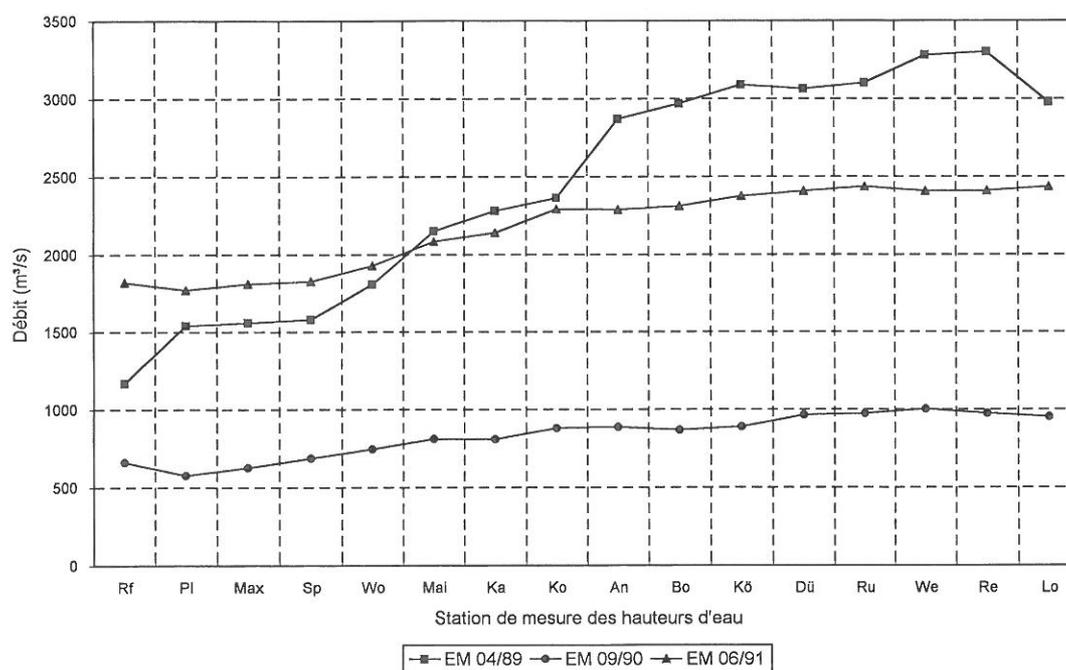


Figure 4.3.1 Débits pendant les essais de marquage 04/89, 09/90 et 06/91

R = Rheinfelden, P = Plittersdorf, Mx = Maxau, S = Spire, W = Worms, M = Mayence, K = Kaub, Ko = Coblenz, A = Andernach, B = Bonn, C = Cologne, D = Düsseldorf, Ru = Ruhrort, W = Wesel, Re = Rees, L = Lobith

4.3.3 Vitesses de transport des substances

Le tableau 4.3.2 montre les vitesses de transport des substances calculées par tronçons avec SAMF à partir des courbes de passage des traceurs de l'essai 04/89 [Leibundgut et al. 1990/1]. A titre d'exemple, les passages de substances marquées des six premières stations de mesure Ottmarsheim jusqu'à Gerstheim (point kilométrique 194,4 - 272,55) sont repris dans la figure 4.3.2. Ils montrent la diminution relativement forte des concentrations maximales, liées à l'extension des passages de traceurs.

Tableau 4.3.2 Vitesses moyennes de transport des substances (c) (par tronçon) pour l'essai de marquage 04/89

Tronçon	Point pk	Q	c
Village-Neuf - Ottmarsheim	174,1 - 194,4	1170	1,09
Ottmarsheim - Neuenburg	194,4 - 199,25	1170	1,09
Neuenburg - Fessenheim	199,25 - 211,1	1170	1,08
Fessenheim - Marckolsheim	211,1 - 241,05	1170	0,98
Marckolsheim - Rhinau	241,05 - 256,6	1170	0,80
Rhinau - Gerstheim	256,6 - 272,55	1170	0,68
Gerstheim - Strasbourg	272,55 - 288,2	1170	0,96
Strasbourg - Kehl	288,2 - 294,15	1170	0,87
Kehl - Gamsheim	294,15 - 310,5	1540	0,65
Gamsheim - Plittersdorf	310,5 - 340,03	1540	0,74
Plittersdorf - Maximiliansau	340,3 - 362,0	1560	1,53
Maximiliansau - Mannheim	362,9 - 426,2	1581	1,61
Mannheim - Mayence	426,2 - 498,5	2150	0,90
Mayence - Bingen	498,5 - 530,1	2280	1,04
Bingen - Düsseldorf	530,1 - 759,6	3064	1,60
Düsseldorf - Lobith	759,6 - 862,2	2979	1,43
Lobith - Hagestein	862,2 - 946,5	557 N	0,71
Lobith - Vuren	862,2 - 951,8	1998 W	0,92
Lobith - Kampen	862,2 - 994,5	426 I	0,88

(c) vitesse moyenne de transport des substances [m/s]

Q: débit moyen dans le tronçon du modèle d'alerte pour le Rhin pendant le passage des traceurs [m³/s]

N, W, I: débits partiels du Nederrijn-Lek, de la Waal et de l'IJssel après ramification du Rhin. Les débits partiels sont calculés par des courbes de relation (entre niveaux d'eau) pour l'échelle de Lobith.

Conformément aux prévisions, les vitesses de transport des substances dans le cours latéral du Rhin sont supérieures aux vitesses des boucles et des parties aménagées du fleuve. Dans la portion du Rhin non régulée, les tronçons situés directement après la partie aménagée entre Plittersdorf et Mannheim (point kilométrique 340,3 - 426,2) et la portion Rhin moyen - Rhin inférieur de Bingen à Lobith (point kilométrique 530,1 - 862,2) sont des zones où les vitesses de transport sont élevées.

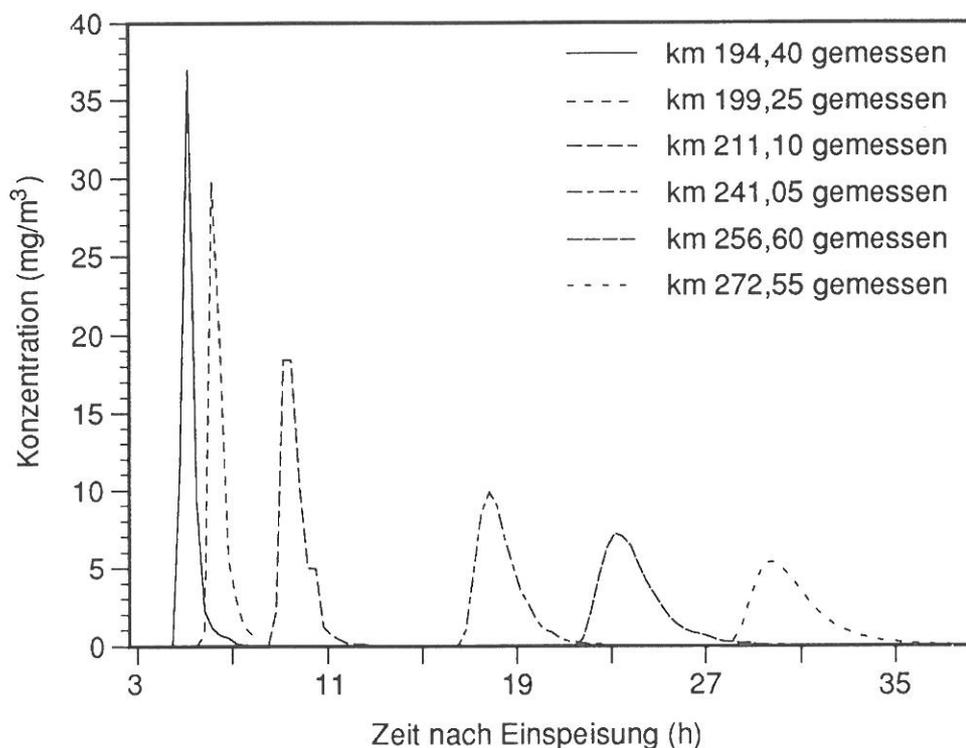


Figure 4.3.2 Passage des traceurs de l'essai de marquage 04/89 d'Ottmarsheim à Gerstheim (point kilométrique 194,4 - 272,55)

Tableau 4.3.3 Vitesses moyennes de transport des substances (c) (par tronçon) pour l'essai de marquage 09/90

Tronçon	Point pk	Q	c
Village-Neuf - Ottmarsheim	174,1 - 194,4	663	0,57
Ottmarsheim - Vogelgrun	194,4 - 224,9	663	0,57
Vogelgrun - Marckolsheim	224,9 - 241,05	663	0,46
Marckolsheim - Rhinau	241,05 - 256,6	663	0,37
Rhinau - Gerstheim	256,6 - 272,55	663	0,38
Gerstheim - Kehl	272,55 - 294,15	663	0,38
Kehl - Maximiliansau	294,15 - 362,0	578	0,45
Maximiliansau - Ludwigshafen	362,0 - 426,2	659	0,99
Ludwigshafen - Mayence	426,2 - 498,5	748	0,82
Mayence - Bad Honnef	498,5 - 640,0	848	0,92
Bad Honnef - Düsseldorf	640,0 - 759,6	909	1,05
Düsseldorf - Bimmen	759,6 - 865,02	984	0,91
Bimmen - Arnhem	865,02 - 876,9	199 P	0,44
Bimmen - Nimwege	865,02 - 884,73	755 W	0,99
Nimègue - Vuren	884,73 - 951,8	755 W	0,71
Bimmen - Kampen	865,02 - 994,5	174 I	0,56

(c) vitesse moyenne de transport des substances [m/s]

Q: débit moyen dans le tronçon du modèle d'alerte pour le Rhin pendant le passage des traceurs [m³/s]

P, W, I: débits partiels du canal de Pannerden, de la Waal et de l'IJssel après ramification du Rhin. Les débits partiels sont calculés par des courbes de relation (entre niveaux d'eau) pour l'échelle de Lobith.

Le tableau 4.3.3 indique les vitesses de transport des substances par tronçon calculées à l'aide des courbes de passage des traceurs de l'essai de marquage 09/90. A quelques exceptions près, les valeurs observées pour la section du Rhin non régulée (point kilométrique 334 - 870 environ) ne varient que faiblement, ce qui pourrait être dû aux conditions d'écoulement stationnaires si on compare ces résultats avec l'essai de marquage 04/89 (voir figure 4.3.1).

Le tableau 4.3.4 montre les vitesses de transport des substances par tronçon calculées à partir des courbes de passage des traceurs de l'essai de marquage réalisé en juin 1991.

Tableau 4.3.4 Vitesses moyennes de transport des substances (c) (par tronçon) de l'essai de marquage 06/91

Tronçon	Point pk	Q	c
Village-Neuf - Ottmarsheim	174,1 - 194,4	1820	1,36
Ottmarsheim - Vogelgrun	194,4 - 224,9	1820	1,50
Vogelgrun - Marckolsheim	224,9 - 241,05	1820	0,97
Marckolsheim - Rhinau	241,05 - 256,6	1820	1,00
Rhinau - Gerstheim	256,6 - 272,55	1820	1,03
Gerstheim - Kehl	272,55 - 294,15	1820	1,12
Kehl - Plittersdorf	294,15 - 340,3	1772	0,85
Plittersdorf - Karlsruhe	340,3 - 359,2	1811	1,58
Karlsruhe - Spire	359,2 - 400,0	1827	1,45
Spire - Mannheim	400,0 - 424,7	1827	1,52
Mannheim - Worms	424,7 - 443,5	1929	1,01
Worms - Mayence	443,5 - 498,5	2084	1,15
Mayence - Coblenche	498,5 - 590,35	2140	1,20
Coblenche - Bad Honnef	590,35 - 640,0	2312	1,43
Bad Honnef - Cologne	640,0 - 689,5	2375	1,53
Cologne - Düsseldorf	689,5 - 759,6	2408	1,47
Düsseldorf - Wesel	759,6 - 814,0	2407	1,24
Wesel - Bimmen	814,0 - 865,02	2383	1,29
Bimmen - Nimègue	865,02 - 884,73	1602 W	1,10
Nimègue - Vuren	884,73 - 951,8	1602 W	1,04
Bimmen - Hagestein	865,02 - 946,5	442 N	0,71

(c) vitesse moyenne de transport des substances [m/s]

Q: débit moyen dans le tronçon du modèle d'alerte pour le Rhin pendant le passage des traceurs [m³/s]

W, N: débits partiels du Nederrijn-Lek et de la Waal après ramification du Rhin. Les débits partiels sont calculés par des courbes de relation (entre niveaux d'eau) pour l'échelle de Lobith.

Dans ce cas également, on arrive parfaitement à différencier le cours latéral du Rhin où l'on a une vitesse moyenne de 1,44 m/s (point kilométrique 174,0 - 225,0) et la portion où le fleuve a été aménagé, où la vitesse est de 0,98 m/s (point kilométrique 225,0 - 335,0) à l'aide des vitesses de transport des substances connues. Ensuite, les vitesses augmentent sur la portion du Rhin qui s'écoule librement jusqu'à la frontière germano-néerlandaise de 1,5 m/s, à l'exception du tronçon de Mannheim à Coblenche.

Tableau 4.3.5 Comparaison des vitesses moyennes de transport des essais de marquage 09/90, 04/89 et 06/91

Tronçon (pk)	09/90		04/89				06/91			
	Q	c	Q	Qf	c	cF	Q	Qf	c	cF
174-194	663	0,57	1170	(1,8)	1,09	(1,9)	1820	(2,7)	1,36	(2,4)
194-241	663	0,53	1170	(1,8)	1,02	(1,9)	1820	(2,7)	1,32	(2,5)
241-257	663	0,37	1170	(1,8)	0,80	(2,2)	1820	(2,7)	1,00	(2,7)
257-273	663	0,38	1170	(1,8)	0,68	(1,8)	1820	(2,7)	1,03	(2,7)
273-294	663	0,38	1170	(1,8)	0,94	(2,5)	1820	(2,7)	1,12	(2,9)
294-361	578	0,45	1546	(2,7)	0,97	(2,2)	1811	(3,1)	1,06	(2,4)
361-425	659	0,99	1581	(2,4)	1,61	(1,6)	1827	(2,7)	1,48	(1,5)
425-499	748	0,82	2150	(2,9)	0,90	(1,1)	2084	(2,8)	1,11	(1,4)
499-760	876	0,98	2969	(3,4)	1,53	(1,6)	2408	(2,7)	1,44	(1,5)

- Q : débit moyen sur le tronçon du Rhin mentionné [m³/s]
 QF : facteur indiquant dans quelle mesure le débit est supérieur au débit observé lors de l'essai de marquage 09/90
 c : vitesse moyenne de transport des substances [m/s]
 cF : facteur indiquant dans quelle mesure la vitesse de transport des substances est supérieure à celle observée lors de l'essai de marquage 09/90

Le tableau 4.3.5 fait une comparaison des vitesses moyennes de transport des substances par tronçon relevées lors des essais de marquage 09/90, 04/89 et 06/91. Les tronçons du Rhin retenus pour les trois expériences de traçage disposaient de stations de jaugeage similaires ou identiques. La comparaison des données est facilitée par le fait que le tableau indique les débits et vitesses de transport moyens sur ces tronçons ainsi que les facteurs QF et cF. Ils indiquent dans quelle mesure les valeurs de débit et de vitesse des expériences de traçage 04/89 et 06/91 sont supérieures aux valeurs de l'essai de marquage en période d'étiage 09/90.

En ce qui concerne les débits, les comparaisons montrent une relation presque linéaire entre l'augmentation du débit et de la vitesse de transport des substances à partir du début du cours latéral du Rhin (point kilométrique 174) jusqu'à la fin de la partie aménagée du fleuve (point kilométrique 330 à peu près). Cette relation disparaît à partir de Karlsruhe (point kilométrique 361). Dans le tronçon aval jusqu'à Düsseldorf (point kilométrique 760), une multiplication du débit par trois n'entraîne qu'une augmentation de 1,5 de la vitesse de transport.

4.3.4 Flux de traceurs

Le tableau 4.3.6 indique les flux de traceurs calculés pour l'essai de marquage réalisé en avril 1989 à l'aide de l'équation 4.1.1 sur la base des débits moyens par tronçon.

Tableau 4.3.6 Flux de traceurs de l'essai de marquage 04/89

Station de mesure	Point pk	Quantité de traceurs (kg)
Village-Neuf	174,1	100,0 (déversement)
Ottmarsheim	194,4	85,1
Neuenburg	199,25	84,1
Fessenheim	211,1	86,7
Marckolsheim	241,05	79,5
Rhinau	256,6	80,0
Gerstheim	272,55	68,3
Strasbourg	288,2	62,6
Kehl	294,15	56,0
Gambsheim	310,5	87,4
Plittersdorf	340,3	77,5
Maximiliansau	362,0	72,0
Mannheim	426,2	73,2
Mayence	498,5	68,2
Bingen	530,15	83,9
Düsseldorf	759,6	81,0
Lobith	862,2	55,1
Hagestein	946,5	9,3 N
Vuren	951,8	29,0 W
Kampen	994,5	5,9 I

N, W, I: flux partiel du Nederrijn-Lek, de la Waal et de l'IJssel après ramification du Rhin

(Note: les flux des stations Maximiliansau à Düsseldorf ont été calculés à l'aide des courbes de passage des traceurs corrigées [van Mazijk et al., 1991])

Après des pertes relativement importantes jusqu'à la première station de mesure, les valeurs des flux de traceurs se stabilisent puis diminuent légèrement jusqu'à Kehl. Un nouveau maximum a été relevé à Gambsheim, ce qu'on ne s'explique pas encore. Ce paramètre a ensuite diminué de façon relativement constante jusqu'à Lobith, exception faite des valeurs trop élevées des stations de Bingen et de Düsseldorf. Les faibles valeurs des trois derniers points de mesure néerlandais peuvent être expliquées par la diminution des quantités de traceurs après ramification du Rhin dans la Waal et le canal de Pannerden, qui se ramifie à son tour en Nederrijn-Lek et IJssel.

Le tableau 4.3.7 montre les flux de traceurs de l'essai de marquage réalisé en septembre 1990. Après les nouvelles pertes significatives entre le déversement et la première station de prélèvement, on constate que les quantités de traceurs restent relativement constantes jusqu'à Kehl à l'exception de Vogelgrün. En ce qui concerne ce site, il se pourrait que le faible taux de récupération soit dû à un changement de régime des turbines, le dispositif installé en aval de la centrale ne prélevant plus ses échantillons dans la zone de passage principal. Après la station de Kehl, on observe une forte diminution des passages de traceurs calculés lors de l'essai de marquage 09/90, ce qui est un phénomène inverse de celui constaté pendant l'essai 04/89.

Tableau 4.3.7 Flux de traceurs de l'essai de marquage 09/90

Station de mesure	Point pk	Quantité de traceurs (kg)
Village-Neuf	174,1	100,0 (déversement)
Ottmarsheim	194,4	88,7
Vogelgrün	224,9	65,8
Marckolsheim	241,05	82,1
Rhinau	256,6	84,1
Gerstheim	272,55	87,5
Kehl	294,15	80,4
Maximiliansau	362,0	59,2
Ludwigshafen	426,2	50,8
Mayence	498,5	38,4
Bad Honnef	640,0	65,5
Düsseldorf	759,6	62,0
Bimmen	862,2	46,3
Nimègue	884,73	37,9 W
Vuren	951,8	41,0 W
Kampen	994,5	7,5 I

W, I: flux partiel de la Waal et de l'IJssel après ramification du Rhin

Tableau 4.3.8 Flux de traceurs de l'essai de marquage 06/91

Station de mesure	Point pk	Quantité de traceurs (kg)
Village-Neuf	174,1	100,0 (déversement)
Ottmarsheim	194,4	104,8
Vogelgrün	224,9	46,1
Marckolsheim	241,05	75,2 (98,9)
Rhinau	256,6	105,7 (140,2)
Gerstheim	272,55	70,2 (94,2)
Kehl	294,15	96,9
Plittersdorf	340,3	73,7
Karlsruhe	359,2	67,2
Spire	400,0	71,6
Mannheim	424,7	77,4
Worms	443,5	62,4
Mayence	498,5	67,8
Coblence	590,35	71,4
Bad Honnef	640,0	69,5
Cologne	689,5	69,8
Düsseldorf	759,6	68,2
Wesel	814,0	54,6
Bimmen	865,02	61,8
Nimègue	884,73	33,5 W
Vuren	951,8	27,2 W
Hagestein	946,5	7,9 N

W, N: flux partiel de la Waal et du Nederrijn-Lek après ramification du Rhin

Les doses de traceurs des 21 stations de jaugeage du tableau 4.3.8 ont été calculées à partir des concentrations et des débits moyens des tronçons mesurés en juin 1991 [van Mazijk et al., 1993]. Ces valeurs obtenues correspondent au taux de récupération (exprimé en %) pour la quantité de produits déversée (100 kilogrammes). Pour les stations de Marckolsheim (point kilométrique 241,05), Rhinau (point kilométrique 256,6) et Gerstheim (point kilométrique 272,55), il faut tenir compte du fait qu'il ne s'est écoulé que 1 400 m³/s (puissance maximale des centrales) dans les canaux de la centrale, en raison du débit qui y prévaut (voir paragraphe 4.1.5). Le débit supplémentaire a été transféré sur les tronçons parallèles du Rhin. Les flux de traceurs de ces stations figurant dans le tableau 4.3.8 ne représentent donc que 75 % environ du passage total à ces points kilométriques. Les valeurs extrapolées à 100 pour cent sont indiquées en italique.

Sur le tronçon du cours latéral du Rhin et le tronçon aménagé (point kilométrique 194,4 - 272,55), les quantités de traceurs fluctuent nettement. Bien qu'il soit possible que les centrales aient une influence sur le débit, les variations observées pour cet essai ne devraient pas atteindre cette amplitude, étant donné qu'il n'est pas nécessaire de passer en régime seuil lorsque le débit est relativement important.

4.3.5 Travaux spéciaux

De même que les essais de traçage suisses réalisés sur le tronçon du Haut-Rhin, les expériences germano-néerlandaises ont permis de mesurer directement la fluorescence à partir de bateaux de mesure. Le dispositif consistait en des chaînes d'arpenteur in situ équipées de fluorimètres à filtre et lumière d'impulsion permettant un enregistrement direct des concentrations des traceurs sans échantillonnage. Ces enregistrements, associés aux relevés de profondeur et de température, permettent de déterminer avec une résolution temporelle élevée le passage d'un nuage de traceurs sous forme de profils verticaux ou horizontaux, qui sont ensuite évalués sur l'ordinateur portable raccordé au système. Plus on s'éloigne du point de déversement, plus les besoins en matériel, temps et personnel augmentent.

La méthode de mesure directe permet de faire des études détaillées dont les résultats ne sont pas toujours intégrés dans le modèle d'alerte pour le Rhin, mais qui sont très utiles pour l'interprétation et l'évaluation des résultats de mesure stationnaires à une dimension. C'est ainsi que l'on a mesuré quantitativement les concentrations de traceurs dans des sections transversales comportant des champs d'épis et dans des zones de retenue. Les mesures in situ peuvent être utilisées pour adapter les programmes de mesures en cours et pour planifier les sites de prélèvement des prochains essais de traçage.

La figure tridimensionnelle 4.3.3 montre la répartition du marqueur dans une section du Rhin située à Nonnenweier (point kilométrique 268,3) pendant l'essai de traçage réalisé en septembre 1990. Ce profil de mesure, situé à environ quatre kilomètres de la centrale, se trouvait en amont de la retenue de Gerstheim, juste avant la ramification centrale - reste du Rhin. Les concentrations figurant sur le schéma ont été enregistrées à une profondeur de 0,5 mètre.

Le passage principal du nuage de traceurs s'est effectué sur la largeur du canal des centrales suivant le profil de mesure (largeur du fleuve 600 - 750). Après le passage de la concentration maximum, le colorant s'est répandu encore plus dans la zone de retenue précédant le barrage (largeur du fleuve 0 - 600), où on pouvait encore le détecter longtemps après le passage du nuage dans la ligne du chenal (largeur du fleuve environ 675).

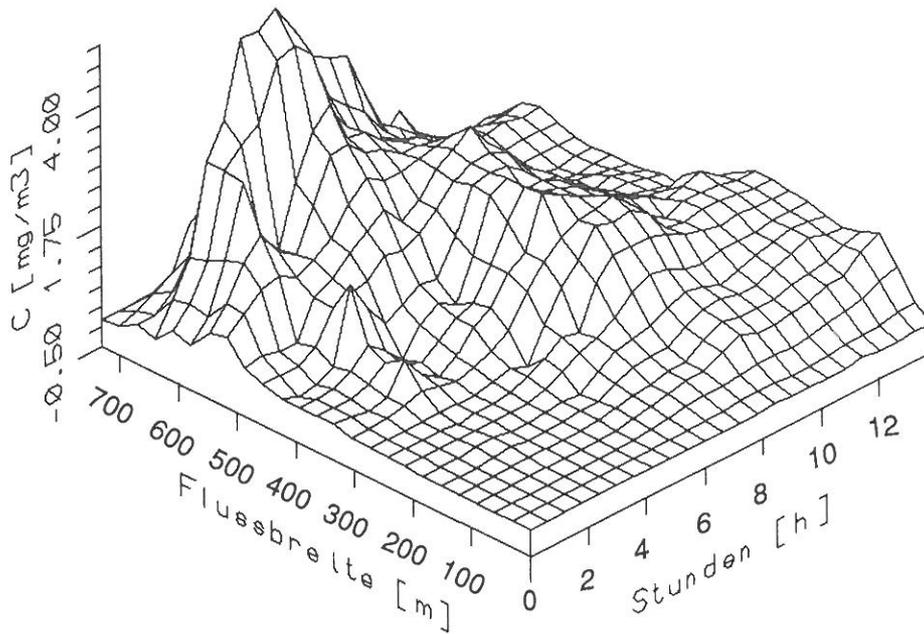


Figure 4.3.3 Mesures de concentrations in situ MV 09/90, Nonnenweier (point kilométrique 268,3; profondeur 0,5 m)

4.4 Essais en France

4.4.1 Tronçons étudiés

Le Service de la Navigation de Strasbourg a chargé la Société Générale des Eaux de Paris de réaliser trois essais de traçage sur le Rhin de 1988 à 1991. Les données de ces expériences de traçage, réalisées pour étalonner les modèles régionaux alsaciens, ont été utilisées pour vérifier le modèle d'alerte pour le Rhin. Etant donné que les questions posées différaient, les déversements français, contrairement aux essais de traçage germano-néerlandais destinés exclusivement au modèle d'alerte pour le Rhin, ont été effectués à partir de la berge gauche et non du milieu du fleuve. Les distances devaient donc être plus grandes pour que le colorant se répartisse de façon homogène sur la section transversale. En France, les prélèvements stationnaires ont généralement été effectués à partir de la rive gauche.

Etant donné que ces essais de traçage étaient motivés par des considérations régionales, les tronçons étudiés par la France ne comprenaient que les sections du Rhin supérieur de Huningue (point kilométrique 169,1) à Gerstheim (point kilométrique 273,3). Lors des essais de traçage réalisés en mai 1990 et juillet 1991, la Bundesanstalt für Gewässerkunde de Coblenz a effectué des mesures complémentaires sur le tronçon du Rhin postérieure jusqu'à Bimmen (point kilométrique 865,02).

4.4.2 Débits

Le tableau 4.4.1 indique le débit journalier moyen au moment du déversement et contient des indications sur tous les tronçons du Rhin mesurés, ainsi que sur le type et la quantité de colorant utilisé.

Tableau 4.4.1 Déversement, tronçon étudié, débit et traceurs des essais de marquage 11/88, 05/90, 07/91

Essai de traçage/ Date de déversement	Tronçon (point pk)	Débit moyen lors du déversement (m ³ /s) Limnimètre	Quantité déversée (kg) Traceur employé
MV 11/88 18.11.88	169,1-273,3	550 Rheinfelden	74,5 Rhodamine WT
MV 05/90 15.05/90	169,0-865,02	1008 Rheinfelden	80 Rhodamine B
MV 07/91 02.07.91	169,0-865,02	1722 Rheinfelden	80 Rhodamine B

4.4.3 Vitesses de transport des substances

Le tableau 4.4.2 montre les vitesses de transport des substances calculées par tronçon à partir des tracés de concentration de l'essai de marquage 11/88. Il ne mentionne que les stations de mesure retenues ultérieurement pour la vérification du modèle d'alerte pour le Rhin. A titre d'exemple, on n'a pas évalué les courbes de passage qui ont été enregistrées dans le reste du Rhin parallèlement au canal latéral du Rhin (idem pour les essais 05/90 et 07/91). Dans cette partie du Rhin, le débit minimum défini contractuellement était de 30 m³/s pendant toute la période d'essai.

Tableau 4.4.2 Vitesses moyennes de transport des substances (c) (par tronçon) pour l'essai de marquage 11/88

Tronçon	Point kilométrique	Q	c
Huningue - Kembs	169,66 - 180,5	550	0,33
Kembs - Kembs-Niffer	180,5 - 185,5	550	0,32
Kembs-Niffer - Ottmarsheim	185,5 - 194,5	550	0,38
Ottmarsheim - Marckolsheim Sud	194,5 - 234,66	550	0,44
Marckolsheim Sud - Marckolsheim Nord	234,66 - 241,95	550	0,48
Marckolsheim Nord - Rhinau Sud	241,95 - 249,0	552	0,48
Rhinau Sud - Rhinau Nord	249,0 - 258,5	552	0,47
Rhinau Nord - Gerstheim Sud	258,5 - 268,5	552	0,44
Gerstheim Sud - Gerstheim Nord	268,5 - 273,3	552	0,45

c: vitesse moyenne de transport [m/s]
 Q: débit moyen dans le tronçon pour le modèle d'alerte pour le Rhin pendant le passage des traceurs [m³/s]

Les débits indiqués sont tirés des calculs du modèle d'alerte pour le Rhin et ont été déterminés sur la base du débit journalier moyen de l'échelle de Rheinfelden. Ils ne correspondent donc pas forcément aux débits de ce tronçon du Rhin supérieur régulée par retenues. Par exemple, une phase de refoulement pendant le régime seuil normal pour ces conditions de débit pourrait être à l'origine des vitesses moyennes de transport relativement faibles dans le cours latéral du Rhin.

Le débit journalier moyen relevé au limnimètre de Rheinfelden était de 1008 m³/s le jour du déversement de l'essai de marquage 05/90. Les débits moyens calculés pour le passage des traceurs pour les différentes stations et les vitesses moyennes de transport sont indiqués au tableau 4.4.3.

Tableau 4.4.3 Vitesses moyennes de transport (c) (par tronçon) de l'essai de marquage 05/90

Tronçon	Point kilométrique	Q	c
Huningue - Kembs	169,1 - 180,5	1008	0,89
Kembs - Kembs-Niffer	180,5 - 185,5	1008	0,96
Kembs-Niffer - Ottmarsheim	185,5 - 194,5	1008	0,95
Ottmarsheim - Marckolsheim Nord	194,5 - 241,95	1008	0,86
Marckolsheim Nord - Gerstheim-Sud	241,95 - 268,5	1008	0,64
Gerstheim Sud - Gerstheim Nord	268,5 - 273,1	1008	0,67
Gerstheim - Maximiliansau	273,1 - 362,0	1129	0,75
Maximiliansau - Mannheim	362,0 - 424,7	1118	1,48
Mannheim - Mayence	424,7 - 498,5	1289	0,82
Mayence - Coblenche	498,5 - 590,35	1330	1,11
Coblenche - Bad Honnef	590,35 - 640,0	1428	1,15
Bad Honnef - Krefeld	640,0 - 763,7	1517	1,19
Krefeld - Bimmen	763,7 - 865,0	1518	1,05

c: vitesse moyenne de transport [m/s]

Q: débit moyen dans le tronçon pour le modèle d'alerte pour le Rhin pendant le passage des traceurs [m³/s]

Les vitesses de transport des substances calculées par tronçon pendant l'essai de marquage de juillet 1991, qui a été réalisé dans la foulée de l'essai germano-néerlandais 06/91, sont représentées dans le tableau 4.4.4. La série des stations de mesure fait apparaître une grande lacune entre les points kilométriques 248,3 et 443,5, compte tenu du fait que la dernière courbe de passage des traceurs susceptible d'être évaluée en France vient de la station Rhinau, tandis que la première courbe émane de la station de Worms placée sous l'autorité de la Bundesanstalt für Gewässerkunde.

Tableau 4.4.4 Vitesses moyennes de transport (c) par tronçon pour l'essai de marquage 07/91

Tronçon	Point kilométrique	Q	c
Huningue - Kembs	169,1 - 174,1	1722	0,54
Kembs - Kembs-Niffer	174,1 - 185,5	1722	1,99
Kembs-Niffer - Ottmarsheim	185,5 - 194,5	1722	1,38
Ottmarsheim - Fessenheim	194,5 - 212,1	1722	1,39
Fessenheim - Marckolsheim Sud	212,1 - 234,66	1722	1,04
Marckolsheim Sud - Rhinau	234,66 - 248,3	1722	1,08
Rhinau - Worms	248,3 - 443,5	1717	1,11
Worms - Mayence	443,5 - 498,5	1833	1,01
Mayence - Rüdeshheim	498,5 - 526,5	1833	1,31
Rüdeshheim - Coblenche	526,5 - 590,35	1814	1,09
Coblenche - Bad Honnef	590,35 - 640,0	1869	1,38
Bad Honnef - Düsseldorf	640,0 - 759,6	1974	1,66
Düsseldorf - Bimmen	759,6 - 865,02	1887	0,96

c: vitesse moyenne de transport [m/s]

Q: débit moyen dans le tronçon pour le modèle d'alerte pour le Rhin pendant le passage des traceurs [m³/s]

L'origine de la très faible vitesse de transport (0,54 m/s) sur le tronçon de Huningue à Kembs (point kilométrique 169,1 - 174,1) pourrait s'expliquer par le fait que le nuage de substances de marquage s'est écarté de la berge gauche après le déversement, sans se mélanger au courant principal du chenal beaucoup plus fort. Ceci s'est produit après le premier passage par la turbine dans la centrale de Kembs, qui a été suivi par une forte augmentation de la vitesse de transport.

4.4.4 Flux de traceurs

Selon le protocole d'essai du Service de la Navigation de Strasbourg, la quantité de traceurs prévue pour l'essai de marquage 11/88 n'a pas été entièrement déversée. Une partie de la substance s'était déposée dans les récipients et s'était solidifiée, ce qui pourrait être à l'origine de la durée de déversement assez longue (70 minutes). Les résultats mentionnés au tableau 4.4.5 des calculs relatifs aux flux de traceurs doivent être interprétés avec précaution, car le canal de Huningue, qui se trouve à 600 m en aval du point de déversement sur la rive gauche du Rhin, était ouvert. Une partie de l'eau du Rhin et une partie non négligeable des traceurs ont emprunté cette voie et n'ont donc pas marqué le Rhin supérieur.

Tableau 4.4.5 Flux de traceurs de l'essai de marquage 11/88

Station de mesure	Point kilométrique	Quantité de traceurs (kg)
Huningue	169,1	74,5 (déversement)
Kembs	180,5	75,7
Kembs-Niffer	185,5	63,8
Ottmarsheim	194,5	56,4
Marckolsheim Sud	234,66	36,8
Marckolsheim Nord	241,95	43,3
Rhinau Sud	249,0	52,2
Rhinau Nord	258,5	45,8
Gerstheim Sud	268,5	43,4
Gerstheim Nord	273,3	59,9

Le tableau 4.4.6 contient les valeurs calculées pour les flux de traceurs pour l'essai de marquage de mai 1991. Les résultats théoriquement trop élevés des stations Kembs à Ottmarsheim sont probablement dûs au fait que le déversement a de nouveau eu lieu de la rive gauche et que le nuage de traceurs s'est surtout étiré à cet endroit sur le premier kilomètre. L'eau du Rhin qui est parvenue aux stations mentionnées ci-dessus n'était donc pas mélangée de façon homogène, mais contenait de fortes concentrations de rhodamine. Les valeurs élevées aberrantes dans le reste du fleuve ne sont pas explicables sans données de concentration détaillées sur les tronçons du fleuve concernés.

Tableau 4.4.6 Flux de traceurs de l'essai de marquage 05/90

Station de mesure	Point kilométrique	Quantité de traceurs (kg)
Huningue	169,0	80,0 (déversement)
Kembs	180,5	168,8
Kembs-Niffer	185,5	135,6
Ottmarsheim	194,5	110,5
Marckolsheim Nord	241,95	76,4
Gerstheim Sud	268,5	72,1
Gerstheim Nord	273,3	93,3
Maximiliansau	362,0	139,7
Mannheim	424,7	66,6
Mayence	498,5	43,8
Coblence	590,35	122,7
Bad Honnef	640,0	91,7
Krefeld	763,7	38,2
Bimmen	865,02	17,7

Le tableau 4.4.7 montre les flux déterminés à partir des courbes de passage des traceurs de l'essai 07/91. On doit tenir compte également, comme cela a été le cas pour les résultats de l'expérience de traçage 06/91 pour les stations Kembs à Rhinau, qu'il ne s'est écoulé que 1 400 m³/s environ dans les canaux des centrales (voir figure 4.1.5). Les débits supérieurs ont été dérivés sur le vieux Rhin. Les flux de traceurs mentionnés pour ces stations dans le tableau 4.4.7 ne représentent donc que 80 pour cent environ de la charge totale ayant effectué ce parcours. Les valeurs extrapolées à 100 pour cent sont indiquées en italique.

Pour cette expérience française de traçage, on observe sur une portion non négligeable du fleuve (au moins jusqu'à la station de Marckolsheim) un mélange incomplet en raison du déversement à partir de la berge, avec un prélèvement simultané à partir de la même berge.

Les valeurs de traceurs se stabilisent à environ 26,5 kilogrammes de Worms à Bimmen (à l'exception de Worms). La faible moyenne des valeurs sur ce tronçon pourrait être due d'une part au fait que la rhodamine B est plus sensible à la dégradation photochimique (voir paragraphe 4.1.3), et d'autre part au fait que les échantillons de Kembs à Rhinau et de Worms à Bimmen ont été analysés dans deux laboratoires différents. Bien que les matériels d'étalonnage aient été les mêmes, il se peut que la transition importante soit le résultat.

Tableau 4.4.7 Flux de traceurs de l'essai de marquage 07/91

Station de mesure	Point kilométrique	Quantité de traceurs (kg)
Huningue	169,1	80,0 (déversement)
Kembs	174,1	346,1 (454,2)
Kembs-Niffer	185,5	131,6 (163,3)
Ottmarsheim	194,6	109,0 (135,2)
Fessenheim	212,1	105,4 (130,7)
Marckolsheim Sud	234,66	80,8 (102,5)
Rhinau	248,3	73,4 (94,4)
Worms	443,5	14,0
Mayence	498,5	26,3
Rüdesheim	526,5	25,9
Coblence	590,35	26,5
Bad Honnef	640,0	26,2
Düsseldorf	759,6	27,0
Bimmen	865,02	28,0

4.5 Conclusions, recommandations et perspectives

Au fur et à mesure du développement mathématique du modèle d'alerte pour le Rhin, il est apparu souhaitable d'avoir des données naturelles pour l'étalonnage, ce qui doit permettre d'améliorer les résultats de prévisions du parcours de passage de produits toxiques. Les essais de traçage employant des substances de marquage fluorescentes inoffensives sont particulièrement bien adaptés à l'étude de la propagation des substances et des processus de propagation dans l'eau.

Les résultats obtenus lors des essais réalisés entre 1988 et 1991 constituent une bonne base de données pour calibrer et vérifier le modèle d'alerte pour le Rhin à une dimension. Les expériences ont toutefois également mis en évidence les lacunes en matière d'information.

L'un des problèmes les plus urgents à régler pour améliorer la mise en oeuvre et l'évaluation des essais de marquage reste la saisie détaillée des débits. La détermination du débit parallèlement aux mesures de concentration, qui peuvent être effectuées à partir d'un bateau de mesure, serait utile pour expliquer des résultats incompréhensibles obtenus lors du calcul des vitesses de transport des substances et des flux de traceurs. Il serait également possible d'étudier l'influence des débits non

stationnaires sur la répartition des substances. Afin de mieux comprendre les paramètres imprévisibles de régulation des débits dans le régime seuil des centrales sur le tronçon régulé du Rhin supérieur, il faudrait pouvoir obtenir directement des informations sur le débit actuel auprès des centrales dans le cadre des essais de marquage qui seront réalisés ultérieurement, ce qui permettrait d'améliorer les prévisions faites avec le modèle d'alerte.

Les essais de marquage à grande échelle effectués jusqu'à présent portaient sur des tronçons pouvant faire plusieurs centaines de kilomètres; il paraît nécessaire de les compléter et de les vérifier à l'avenir par des essais de marquage à plus petite échelle et plus détaillés. On peut citer entre autres points intéressants les études à deux dimensions, telles que la dispersion des substances après déversement à partir de la berge et la répartition de la concentration après l'arrivée de grands affluents. Ces études portant sur la répartition des concentrations dans le tronçon du fleuve permettraient de juger de la représentativité des points de mesure stationnaires, ce qui pourrait améliorer la qualité de tous les paramètres obtenus, en particulier pour les flux de traceurs.

Lors des futurs essais de marquage, il serait bon de renoncer à l'emploi de la rhodamine B comme substance de traçage fluorescente parce qu'elle est polluante. Pour les prélèvements stationnaires, il est préférable de charger un seul laboratoire d'analyser tous les échantillons prélevés lors d'un essai de marquage. Ce n'est que de cette façon que l'on pourra éliminer les sources potentielles d'erreur découlant de la différence des procédés d'analyse, de la méthodologie du personnel du laboratoire et de l'utilisation de solutions d'étalonnage qui ne sont pas toujours identiques. Il serait par ailleurs souhaitable de vérifier ponctuellement les résultats, par exemple avec le procédé HPLC.

On citera encore deux essais sur la Moselle en cours actuellement qui peuvent présenter un intérêt pour le plan d'alerte pour le Rhin. Ces expériences de traçage réalisés au printemps et à l'automne 1992 ont eu lieu en période d'étiage et de crue de la Moselle. Les résultats de cette étude seront également intégrés dans le modèle d'alerte pour le Rhin à des fins de calibrage et de vérification.

4.6 Bibliographie

- Behrens, H. et G. Teichmann (1982) : Neue Ergebnisse über den Lichteinfluss aus Fluoreszenztracer. In: Beiträge zur Geologie der Schweiz-Hydrologie, n° 28, Partie I, Berne
- Bremicker, M. (1989) : Verfahren zur Analyse und Simulation der Stoffausbreitung in Fließgewässern, Diplomarbeit am Institut für Physische Geographie, Chaire d'Hydrologie, Université de Fribourg
- Hofstraat, J.W., M. Steendijk, G. Vriezokolk, W. Schreurs, G.J.A.A. Broer et N. Wijnstok: Sensitive and selective determination of Rhodamine WT water tracer by solid-phase extraction and reversed-phase HPLC with fluorescence detection. Ministère des Transports et des Travaux Publics, La Haye et Lelystad
- Leibundgut Ch., M. Bremicker et H. Wiesner (1989): Markiersuch Rhein 04/89, tronçon Rhin supérieur, résultats de mesures: Institut de Géographie physique, Chaire d'Hydrologie, Université de Fribourg, juillet 1989
- Leibundgut Ch., M. Bremicker et H. Wiesner (1990): Markiersuch Rhein 04/89, Abschlussbericht, Institut de Géographie physique, Chaire d'Hydrologie, Université de Fribourg, juillet 1990
- Leibundgut, Ch. et H. Wiesner (1990) : Markiersuch Rhein 09/90, tronçon Rhin supérieur de Weil à Plittersdorf, Zwischenbericht der ersten Messergebnisse, Institut de Géographie physique, Chaire d'Hydrologie, Université de Fribourg, novembre 1990
- Leibundgut Ch. et H. Wiesner (1992) : Markiersuch Rhein 06/91, Abschlussbericht, Institut de Géographie physique, Chaire d'Hydrologie, Université de Fribourg, août 1992
- Leibundgut Ch., J. Petermann et B. Schudel (1988) : Markiersuch Rhein "Albbruck-Basel", Beschaffung von Eingabedaten für ein Alarm - und Stofftransportmodell mittels Traceruntersu-

- chungen. Université de Berne, Institut de Géographie, en collaboration avec Naturaqua, Berne, décembre 1988
- Mazijk, A. van, P. Verwoerd et J.M.C van Mierlo (1991) : Calibrage du modèle d'alerte pour le Rhin à partir de l'essai de traçage 04/89 Village-Neuf - Pays-Bas. Université de Delft, U.E.R. Techniques de santé et Gestion des eaux de la Faculté de Techniques Civiles de l'Université de Delft, mars 1991
- Mazijk, A. van et J.M.C. van Mierlo (1992) : Vérification du calibrage du modèle d'alerte pour le Rhin version 2.1 à partir de l'essai de traçage 04/89 Village-Neuf - Pays-Bas. Faculté de Techniques Civiles de l'Université de Delft, U.E.R. Techniques de santé et Gestion des eaux, et l'Université de Fribourg, Institut de Géographie physique, Chaire d'Hydrologie, décembre 1992
- Mazijk, A. van, J.M.C. van Mierlo, H. Wiesner et Ch. Leibundgut (1992) : Vérification du modèle d'alerte pour le Rhin à partir des essais de traçage 06/91 et 07/91. U.E.R. Techniques de santé et Gestion des eaux de la Faculté de Techniques Civiles de l'Université de Delft, en collaboration avec l'Institut de Géographie physique, Chaire d'Hydrologie, Université de Fribourg, décembre 1992
- Petermann, J., B. Schudel, Ch. Leibundgut, M. Grossauer et D. Morgenthaler (1989) : Essai de traçage Rhin "Rhinau-Bâle", Beschaffung von Eingabedaten für ein Alarm- und Stofftransportmodell mittels Traceruntersuchungen. Université de Berne, Institut de Géographie, en collaboration avec Naturaqua, Berne, septembre 1989
- Schudel, B. et J. Petermann (1991) : Tracerexperimente im Hochrhein. In: Fliesszeitbestimmung und Stofftransportuntersuchungen im Rhein, Communication n° 13 du Service hydrologique et géologique national, Berne
- Schudel, B. et J. Petermann (1991) : Fliesszeitbestimmung mittels Tracerexperimenten. In: Fliesszeitbestimmung und Stofftransportuntersuchungen im Rhein, Communication n° 13 du Service hydrologique et géologique national, Berne
- Service de la Navigation de Strasbourg (1989) : Essai de traçage de novembre 1988, Strasbourg (séries de données non publiées)
- Service de la Navigation de Strasbourg (1990) : 15 mai 1990, Traçage sur le Rhin, rapport; Strasbourg
- Steinebach, G. et H. Hanisch (1991) : Tracerversuche und mathematische Modelle zur Beschreibung des Stofftransportes im Rhein; Bundesanstalt für Gewässerkunde, BfG0626, Coblenz

5. LE MODELE D'ALERTE POUR LE RHIN

A. van Mazijk

Université technique de Delft, faculté de techniques civiles, Unité d'enseignement et de recherche pour les Techniques de santé et Gestion des eaux.

5.1 Introduction

Le Rijkswaterstaat, Institut de l'aménagement des eaux intérieures et de l'épuration des eaux usées RIZA situé à Lelystad, a développé le modèle d'alerte pour le Rhin en s'aidant du modèle de temps d'écoulement élaboré par le Waterloopkundig Laboratorium de Delft [Griffioen, 1989]. Cette version 1.0 permet de calculer l'évolution de la concentration à un endroit donné en tenant compte des données d'entrée suivantes:

- déversement momentané
- déversement continu
- évolution de la concentration.

La dégradation de la substance déversée a été étudiée avec un coefficient de dégradation. L'étiement longitudinal du nuage de substances a été reproduit grâce à une formule de dispersion provisoire et non calibrée. Le modèle considère le Rhin du limnimètre de Kembs (point kilométrique 173,6) jusqu'aux échelles de Vuren (Waal, point kilométrique 951,8), Hagestein (Lek, point kilométrique 946,5) et Kampen (IJssel, point kilométrique 994,5). Les affluents Neckar, Main et Moselle ont été intégrés provisoirement. La version non calibrée 1.0 a été achevée à la fin 1988 et installée dans les stations d'alerte le long du Rhin.

Une analyse de sensibilité de la version 1.0 [van Mazijk et al., 1989] a permis d'améliorer les prévisions de l'évolution de la concentration. Il a été principalement suggéré d'adapter les procédés de calcul afin d'intégrer l'incidence des zones d'eaux stagnantes sur l'évolution des concentrations. Les zones d'eaux stagnantes sont définies comme des zones où l'eau est pratiquement immobile ou sans courant net, phénomène que l'on observe dans les cours d'eau naturels. Ces eaux stagnantes sont réparties le long du lit et des berges. Elles peuvent être naturelles (méandres du fleuve, végétation, etc.) ou dues à une intervention humaine (par exemple des champs d'épis) (figure 5.1.1). En raison de l'échange de substances entre la partie traversée par le courant et la partie stagnante de la section transversale, l'onde de pollution est aplanie et circule plus lentement, la concentration devenant alors asymétrique (asymétrie) (figure 5.1.2)

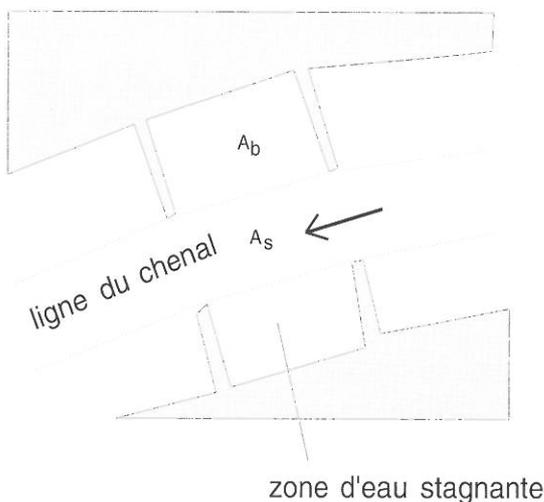


Figure 5.1.1 Zones d'eaux stagnantes provoquées par des champs d'épis

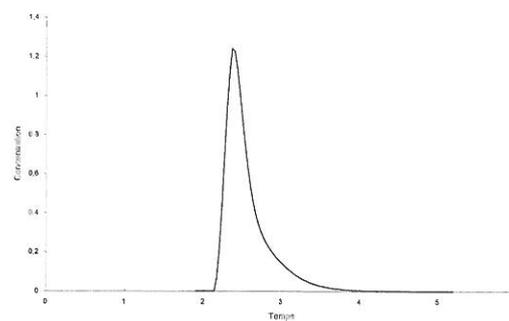


Figure 5.1.2 Asymétrie de concentration

L'analyse de sensibilité a étudié l'influence des variations de débit sur le moment d'arrivée et la répartition de la concentration d'une vague de pollution, et est arrivée à la conclusion qu'il faut connaître le débit effectif au lieu de passage des substances polluantes pour prévoir de façon optima-

le le moment d'arrivée. Cette condition est remplie par le modèle, car la saisie des données hydrologiques est effectuée sur la base des points de mesure du niveau d'eau installés le long du Rhin. Il faut toutefois actualiser en permanence les données pendant la propagation.

La version 2.0 diffère de la version 1.0 sur les points suivants:

- adaptation du procédé de calcul pour tenir compte de l'influence des zones d'eaux stagnantes sur les concentrations
- formulation élargie du coefficient de dispersion
- prise en compte par le modèle de la section du Haut-Rhin jusqu'à Stein am Rhein (point kilométrique 24,7) et intégration provisoire de l'Aar
- remplacement de l'intégration provisoire de la Moselle par un tronçon de Moselle allemande modifié à partir de calculs de temps d'écoulement réalisés par la Bundesanstalt für Gewässerkunde [Adler, 1990]
- possibilité d'entrée des données permettant de préciser si la substance déversée est surnageante

La version 2.0 a été calibrée en 1990 sur la base des données des essais de marquage suivants:

- 04/89 Village-Neuf - Pays-Bas
- 09/88 Albruck - Bâle
- 07/89 Rhinau - Bâle

La vérification du modèle d'alerte pour le Rhin Version 2.0 a été effectuée au printemps 1991 à l'aide des essais de marquage suivants:

- 09/90 Village-Neuf - Pays-Bas
- 11/88 Bâle - Strasbourg
- 05/90 Bâle - Pays-Bas

La version 2.0 a été installée au printemps 1991 sur les différentes stations d'alerte le long du Rhin et décrite en détail dans le rapport "Modèle d'alerte pour le Rhin version 2.0, calibrage et vérification" [van Mazijk et al., 1991].

La version 2.1 contient les améliorations et modifications suivantes:

- les erreurs de programme détectées lors de la mise en oeuvre de la version 2.0 ont été supprimées
- les données relatives aux largeurs de fleuve sur la partie allemande du Rhin ont été mises à jour grâce aux mesures de profil en travers effectuées par la Bundesanstalt für Gewässerkunde de Coblenze
- les relations hauteur-débit des points de mesure du niveau d'eau de Rheinfelden et Lobith ainsi que la répartition des débits sur les sections néerlandaises du Rhin, de la Waal, de l'IJssel et du Lek ont été à nouveau calculées en tenant compte du point de mesure de Lobith.

Le calibrage a ensuite fait l'objet d'une nouvelle vérification dans le cadre de l'essai de traçage Village-Neuf - Pays-Bas (04/89). Ce contrôle a débouché sur quelques corrections mineures des paramètres de dispersion et d'eaux stagnantes.

Les résultats du calibrage pour la section du Haut-Rhin de la version 2.1 ont été analysés, et il a été décidé d'adapter la schématisation de cette section et de procéder à un nouveau calibrage [van Mazijk, 1992]. Celui-ci a été effectué à l'aide des données de l'essai 07/89 et la vérification a été effectuée avec les données de l'essai 09/88.

Les modifications suivantes ont ensuite été apportées à la version 2.1:

- en raison des calculs de temps d'écoulement des Laboratoires de Recherches Hydrauliques, Hydrologiques et Glaciologiques (VAW) de l'Ecole Polytechnique fédérale de Zurich, qui en avait été chargé par le Service hydrologique et géologique national de Berne [1992], l'intégration provisoire de l'Aar a été remplacée par un modèle valable pour la section allant du lac de Bienne à l'embouchure du Rhin
- la représentation des calculs de concentrations pour un point d'observation indique le moment auquel intervient la concentration maximum, le début et la durée de la courbe de passage
- en cas de modification de la courbe de concentration, il est possible de stocker dans un fichier distinct les séries de données sur les concentrations, assorties des facteurs temps
- la propagation d'une substance déversée dans le Rhin peut être représentée sous forme d'une animation graphique en mouvement. Une carte du tracé du Rhin et des affluents intégrés dans le

modèle d'alerte apparaît sur l'écran, ce qui permet de suivre le mouvement et l'évolution de la nappe de substances.

La vérification de la version 2.1 du modèle d'alerte pour le Rhin s'est faite avec les données de deux essais de marquage:

- 06/91 Village-Neuf - Pays-Bas
- 07/91 Bâle - Bimmen

En outre, la version 2.1 a fait l'objet d'une vérification supplémentaire avec les données de l'essai de marquage 09/90 Village-Neuf - Pays-Bas.

5.2 Développement mathématique du modèle

5.2.1 Modèle Taylor (version 1.0)

Dans la version 1.0, les calculs de concentrations sont effectués à l'aide de la solution analytique Taylor. Pour un courant stationnaire et homogène (la vitesse d'écoulement u_s , le débit Q et la section traversée par le courant A étant constants), cette solution est la suivante pour un déversement momentané d'une quantité de substances M :

$$\Phi_o(L,t) = \frac{M/Q}{\sqrt{(4 \cdot \pi \cdot D_o \cdot t/u_s^2)}} \cdot \exp \left[-\frac{(t - L/u_s)^2}{4 \cdot D_o \cdot t/u_s^2} \right] \quad (5.2.1)$$

Φ_o	= concentration	[kg/m ³]
t	= temps	[s]
L	= distance entre le point de déversement et le point de calcul ou d'observation	[m]
u_s	= vitesse moyenne d'écoulement dans la partie de la section transversale traversée par un courant effectif	[m/s]
D_o	= coefficient de dispersion longitudinale	[m ² /s]
Q	= $A_s \cdot u_s$	

La dégradation des substances sujettes à altération est calculée en multipliant l'équation (5.2.1) avec l'exposant $(-k \cdot t)$, k étant le coefficient de dégradation. Dans les formules suivantes, ce terme de dégradation disparaît.

Fischer et al. [1979] déduit la formule semi-empirique suivante pour le coefficient de dispersion D_o dans les fleuves naturels:

$$D_o = \alpha \cdot \frac{u_s^2 \cdot B_s^2}{a \cdot u_*} \quad (5.2.2)$$

α	= constante de proportionnalité sans dimension	[-]
B_s	= largeur de la ligne du chenal	[m]
a	= profondeur moyenne de l'eau du fleuve	[m]
u_*	= vitesse de frottement	[m/s]

La vitesse de frottement u_* se calcule comme suit:

$$u_* = \frac{u_s \cdot \sqrt{g}}{C} \quad (5.2.3)$$

avec g	= accélération de la gravité	[m/s ²]
C	= coefficient de Chézy	[m ^{1/2} /s]

Dans le modèle d'alerte pour le Rhin, le coefficient de Chézy C est calculé à l'aide de la formule suivante:

$$C = 25 \cdot \left(\frac{a}{k_n} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (5.2.4)$$

k_n = constante de Nikuradse (pour le Rhin $k_n = 0,2 \text{ m}^2$)

Dans la version 1.0, la fonction du débit et de la vitesse d'écoulement [Griffioen, 1989] est une description et non une formulation du coefficient de dispersion selon Fischer (équation 5.2.2):

$$D_o = \Omega \cdot u_s \cdot Q \quad (5.2.5)$$

Ω = constante (= 0,075) [-]

La formulation du coefficient de dispersion selon Fischer est intégrée dans le modèle d'alerte pour le Rhin à partir de la version 2.0.

Il serait toutefois trop approximatif de considérer le Rhin et ses affluents comme un fleuve ayant un débit et un profil en travers constants. Gelha & Collins [1971] décrivent une méthode analytique permettant d'employer l'équation 5.2.1 dans le cas d'une division du fleuve en tronçons, comme cela est décrit au chapitre 3. La méthode qu'ils emploient se fonde sur une transformation des coordonnées, qui permet d'obtenir une seule valeur moyenne pour la vitesse d'écoulement \bar{u}_s et le coefficient de dispersion \bar{D}_o . Même lorsque les valeurs des vitesses d'écoulement et des coefficients de dispersion sont différentes d'une sous-section à l'autre, ces valeurs sont représentatives de tout le tronçon étudié. Le résultat de la transformation est obtenu grâce à deux intégrales:

* pour le temps d'écoulement $L/u_s = T(x)$, $x = L$

* le coefficient de dispersion sous la forme composée $D_o \cdot t / u_s^2 = \bar{D}(t)$

Le temps d'écoulement du point de déversement x_o jusqu'à un point d'observation ou de calcul arbitraire x est défini de la façon suivante:

$$T(x) = \int_{x_o}^x \left(\frac{1}{u(x)} \right) dx \quad (5.2.6)$$

Coefficient de dispersion :

$$\bar{D}(t) = \int_{x_o}^{x_c(t)} \left(\frac{D_o(x)}{[u(x)]^3} \right) dx \quad (5.2.7)$$

$x_c(t)$ étant la coordonnée du lieu, qui correspond à la valeur moyenne ($= \mu_t$) de la concentration jusqu'au point t:

$$x_c(t) = x_o + \int_0^t u [x_c(\tau)] d\tau \quad (5.2.8)$$

Lorsque l'on emploie les équations 5.2.6 à 5.2.8, on obtient avec l'équation 5.2.1:

²⁾ les calculs de plan d'eau effectués par la Bundesanstalt für Gewässerkunde de Coblenz ont permis de constater que $k_n \approx 0,35 \text{ m}$. D'après l'équation 5.2.4, ceci ne représente qu'une modification de 10 % de la valeur C, la valeur k_n n'ayant pas été modifiée dans le modèle.

$$\Phi_o(x,t) = \frac{M/Q}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot \bar{D}(t)}} \cdot \exp \left[-\frac{(t - T(x))^2}{4 \cdot \bar{D}(t)} \right] \quad (5.2.9)$$

$T(x)$ et $\bar{D}(t)$ sont définis comme intégrale dans les équations 5.2.6 et 5.2.7. Comme on l'indique au chapitre 3, le Rhin et ses affluents sont divisés en plusieurs sous-sections. Les intégrales doivent donc être approchées par la somme de ces sous-sections. $T(x)$ et $\bar{D}(t)$ sont fonction du débit et sont déterminés par la vitesse d'écoulement et le coefficient de dispersion.

5.2.2 Modèle pour les zones d'eaux stagnantes (versions 2.0 et 2.1)

Afin de pouvoir tenir compte de l'influence des zones d'eaux stagnantes dans le calcul des concentrations à un point donné $x = L$, on utilise une approximation pour les concentrations, comme Chatwin [1980] le propose sur la base du moment 0 à 3 d'un tracé de concentration. Le développement des moments d'un tracé de concentrations selon Nordin & Troutman [1980] montre que l'on peut décrire cette approximation de la façon suivante [van Mazijk et al., 1991]:

$$\Phi_E(L, t) = \frac{M/Q}{\sqrt{(4 \cdot \pi \cdot D_o \cdot t/c^2)}} \cdot \exp \left[-\frac{(t - L/c)^2}{4 \cdot D_o \cdot t/c^2} \right] \cdot \left[1 + \frac{G_t}{6} \cdot H_3 \left(\frac{t - L/c}{\sqrt{(2 \cdot D_o \cdot t/c^2)}} \right) \right] \quad (5.2.10)$$

Avec : $H_3(z) = z^3 - 3 \cdot z$ (3e polynôme hermitien) [-]

$$\text{avec } z = (t - L/c) / \left(\sqrt{2 \cdot D_o \cdot t/c^2} \right)$$

c = vitesse de transport des substances [m/s]

G_t = coefficient d'asymétrie ($G_t = |g_t| / |\sigma_t^3|$) [-]

Avec:

σ_t^2 = variable (moment 2) [s²]

g_t = moment 3 [s³]

La caractéristique de cette reconstruction est que les moments du tracé effectif de concentration $\Phi(L,t)$ et de l'approximation $\Phi_E(L,t)$ sont de même taille. Pour avoir une bonne concordance entre $\Phi(L,t)$ et $\Phi_E(L,t)$, il faut que la valeur absolue du coefficient d'asymétrie G_t soit égale ou très légèrement supérieure à 1. La courbe chronologique effective de la concentration sera ici la solution des deux équations différentielles, solution définie par le modèle pour zones en eaux stagnantes [voir Nordin & Troutman, 1980].

La vitesse de transport des substances c est définie comme suit:

$$c = \frac{u_s}{1 + \beta} \quad (5.2.11)$$

où: β = partie de la zone d'eaux stagnantes marquée, qui s'échange avec la section du fleuve traversée par le courant (voir figure 5.2.1)

$$\beta = \kappa \cdot \frac{A_b}{A_s} \quad (5.2.12)$$

où: A_b = profil en travers du fleuve avec stockage (zone d'eaux stagnantes) [m²]

A_s = profil en travers avec courant effectif [m²]

Lorsqu'il se produit un échange total entre la zone d'eaux stagnantes et la partie du fleuve traversée par le courant et que toute l'incidence s'est reportée sur la propagation des substances, $\kappa = 1$.

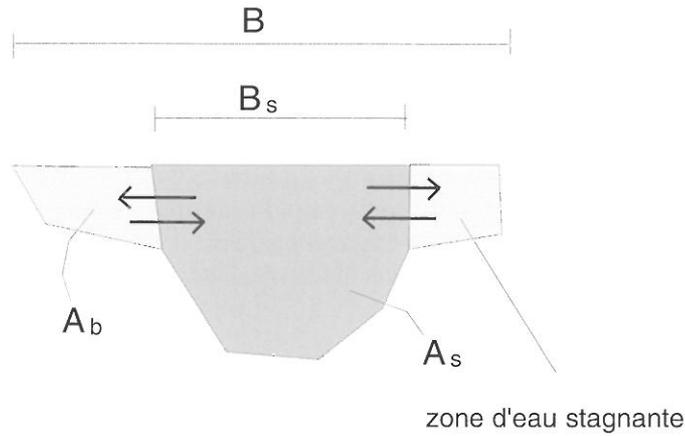


Figure 5.2.1 Section transversale d'un fleuve

Dans l'équation 5.2.10, l'influence de la zone d'eaux stagnantes sur la grandeur du coefficient de dispersion (selon l'équation 5.2.13 pour le coefficient de dispersion D_s du modèle de zone d'eaux stagnantes) est intégrée comme suit:

$$D_s = (1 + \beta)^2 \cdot D_o = (1 + \beta)^2 \cdot \alpha \cdot \frac{u_s^2 \cdot B_s^2}{a \cdot u_*} \quad (5.2.13)$$

Une comparaison de la solution analytique exacte selon l'équation 5.2.1 et de l'approximation d'un tracé de concentration selon l'équation 5.2.10 montre que cette dernière est identique à la solution exacte, dans la mesure où il n'y a pas de zones d'eaux stagnantes ($\beta = 0$) et qu'on ne présuppose par une asymétrie ($g_t = 0$).

En tenant compte de l'équation 5.2.10, l'équation 5.2.9 change de la façon suivante dans le cas d'un modèle de zones d'eaux stagnantes:

$$\Phi_E(x, t) = \frac{M/Q}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot \bar{D}_s(t)}} \cdot \exp \left[-\frac{(t - T_s(x))^2}{4 \cdot \bar{D}_s(t)} \right] \cdot \left[1 + \frac{1}{6} \cdot H_3 \left(\frac{t - T_s(x)}{\sqrt{2 \cdot \bar{D}_s(t)}} \right) \right] \quad (5.2.14)$$

- Φ_E = concentration selon le modèle de zones d'eaux stagnantes
- T_s = temps de transport des substances
- \bar{D}_s = coefficient de dispersion composite pour zones d'eaux stagnantes

Lors du calibrage des versions 2.0 et 2.1, on n'a pas déterminé de façon plus précise le facteur d'asymétrie G_t . En partant d'une bonne concordance entre le tracé de concentration effectif Φ et l'approximation Φ_E on a conservé la valeur 1 pour G_t dans l'équation 5.2.14.

Lors de l'élaboration de la solution analytique pour le modèle de zones d'eaux stagnantes d'après l'équation 5.2.14 (comme dans la version 1.0), l'intégrale pour le temps de transport des substances est définie de la façon suivante:

$$T_s(x) = \int_{x_0}^x \left(\frac{1}{c(x)} \right) dx \quad (5.2.15)$$

et le coefficient de dispersion composé comme suit:

$$\bar{D}_s(t) = \int_{x_0}^{x_s(t)} \left(\frac{D_o(x)}{[c(x)]^3} \right) dx \quad (5.2.16)$$

Les explications fournies au paragraphe 5.2.1 s'appliquent également à $T_s(x)$ et $\bar{D}_s(t)$

5.3 Procédure de vérification et de calibrage

5.3.1 Introduction

Le calibrage du modèle d'alerte pour le Rhin implique que l'on définisse deux paramètres pour chaque sous-section:

- le paramètre de zones d'eaux stagnantes β , défini d'après l'équation 5.2.11
- la constante de proportionnalité α exprimée sous forme de coefficient de dispersion d'après les équations 5.2.2 et 5.2.13.

Le modèle d'alerte pour le Rhin est adapté au calibrage du point de déversement au point d'observation. Etant donné qu'il faut définir les paramètres cités ci-dessus pour chaque sous-section, la première estimation s'est fondée sur des résultats du modèle de dispersion des substances pour eaux courantes SAMF [Bremicker, 1989] et les données de l'essai de marquage 04/89. Ce modèle permet de calculer les vitesses de transport des substances et les coefficients de dispersion du point d'observation au point d'observation. Les résultats des calculs de l'Université de Berne et du bureau d'études Naturaqua ont été utilisés comme premières estimations de l'essai de marquage suisse 07/89 [Leibundgut et al., 1989].

Le calibrage peut être décomposé en deux phases:

- (1) première évaluation des valeurs α et β à l'aide des vitesses de transport des substances calculées par section (c) et des coefficients de dispersion (D_s).
- (2) détermination plus précise des valeurs α et β grâce à une comparaison des tracés de concentration mesurés et des tracés calculés par le modèle d'alerte.

La vérification comprend la comparaison des tracés de concentration mesurés et calculés à partir des valeurs α et β déterminées lors du calibrage.

5.3.2 Quantités de marqueurs

Il est nécessaire d'avoir une estimation précise du débit du Rhin pendant l'essai de marquage lorsque l'on procède au calibrage et à la vérification. La détermination des débits journaliers moyens par tronçon au moment du passage des traceurs a été expliquée dans le chapitre 4, où figurent également les calculs des flux de traceurs. Afin de faciliter la comparaison du tracé de concentration mesuré et du tracé calculé lors du calibrage ou de la vérification, les quantités de marqueurs intégrées doivent être identiques dans les deux cas, car le modèle fait abstraction de la dégradation des substances (équation 5.2.14). L'équation 4.1 est donc utilisée pour calculer les flux de traceurs.

En cas de mélange incomplet de l'eau marquée et non marquée, ce qui peut se produire en aval des affluents, les taux de récupération peuvent fortement varier en fonction de l'emplacement du point de mesure. En principe, la détermination de la récupération des traceurs ne devrait donc tenir compte d'une partie du débit seulement. Le modèle d'alerte pour le Rhin étant un modèle à une dimension, on doit pourtant utiliser tout le débit dans le tronçon du fleuve concerné, le flux de traceurs déterminé avec l'équation 4.1 étant la quantité déversée à intégrer dans le modèle.

5.3.3 Calibrage des paramètres

Les tableaux de temps d'écoulement utilisés dans le modèle d'alerte pour le Rhin permettent de déterminer la vitesse d'écoulement u_s . Lors de l'évaluation des essais de marquage, on a calculé les vitesses de transport des substances c . L'équation 5.2.11 est utilisée pour calculer à l'aide de ces données le paramètre de zones d'eaux stagnantes β :

$$\beta = \frac{u_s}{c} - 1 \quad (5.3.1)$$

Les coefficients de dispersion D_s permettent d'avoir un autre résultat d'évaluation des essais de marquage. Le coefficient de dispersion D_0 du modèle d'alerte est calculé avec l'équation 5.2.2. A l'aide des valeurs D_s , on peut calculer les valeurs pour α avec les équations 5.2.3, 5.2.11 et 5.2.13:

$$\alpha = \frac{D_s}{(1 + \beta)^2} \cdot \frac{a \cdot u_*}{u_*^2 \cdot B_s^2} = \frac{D_s}{(1 + \beta)^3} \cdot \frac{a \cdot \sqrt{g}}{c \cdot B_s^2 \cdot c} \quad (5.3.2)$$

En ce qui concerne les tronçons se trouvant entre deux points d'observation successifs d'un essai de marquage, les équations 5.3.2 et 5.3.3 permettent de faire une première estimation des valeurs α et β (phase de calibrage 1). Après entrée de ces données dans les fichiers des sous-sections du modèle d'alerte pour le Rhin, on prévoit le tracé de concentration pour un essai de marquage avec déversement momentané.

Le résultat de ces calculs est ensuite comparé au tracé de concentration mesuré (phase de calibrage 2). Cette comparaison est effectuée d'une part visuellement, grâce à la représentation des paramètres de concentration (voir figure 5.3.1) et d'autre part par la quantification:

- de la différence des temps de transport calculés et mesurés (par rapport à la concentration maximum)
- de l'écart moyen entre la concentration calculée et mesurée.

La différence (exprimée en pourcentage) entre les temps de transport mesurés et calculés (par rapport aux temps mesurés) est déterminée de la façon suivante:

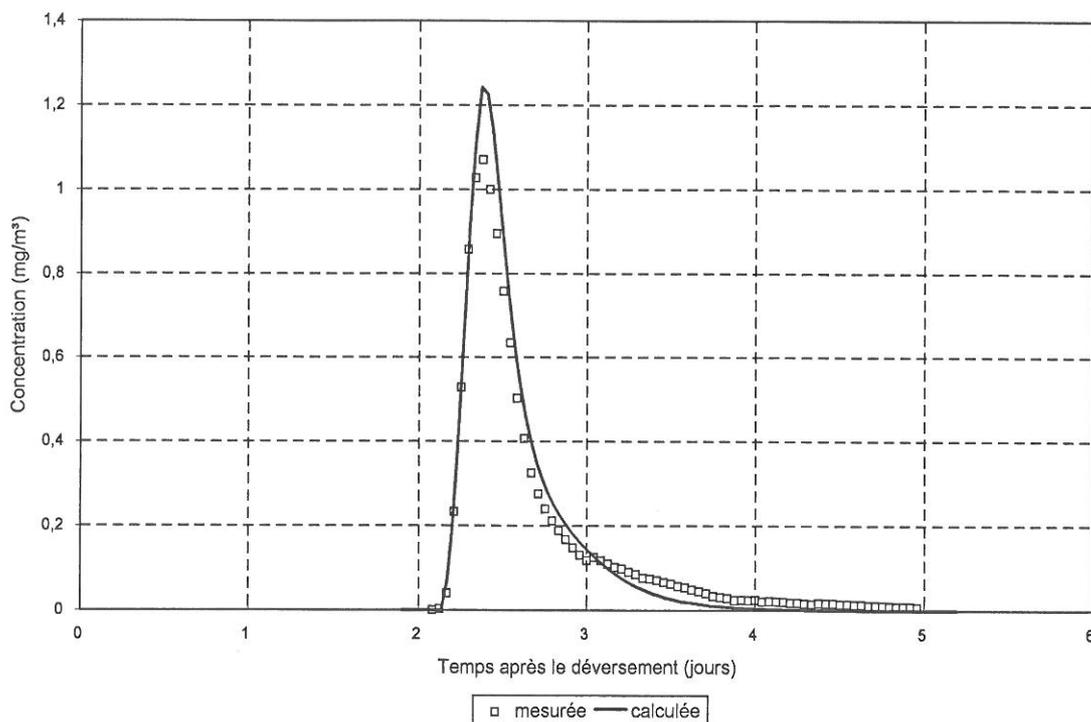


Figure 5.3.1 Comparaison des concentrations calculées et mesurées au point d'observation (point kilométrique 362), essai de marquage 04/89 après calibrage

$$T_d = \frac{T_{gem} - T_{ber}}{T_{gem}} \cdot 100\% \quad (5.3.3)$$

T_{gem} = temps de transport mesuré du déversement au point d'observation [s]
 T_{ber} = temps de transport calculé du déversement au point d'observation [s]

L'écart moyen entre la concentration calculée et mesurée est déterminé de la façon suivante:

$$\sigma = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\Phi_{bi} - \Phi_{mi}}{\Phi_{bi}} \right)^2}{n} \right)^{1/2} \quad (5.3.4)$$

σ = écart moyen [-]
 Φ_{bi} = concentration calculée au moment t_i [kg/m³]
 Φ_{mi} = concentration mesurée au moment t_i [kg/m³]
 n = nombre de mesures comparées [-]

Etant donné que le front et le maximum du nuage de traceurs sont déterminants pour cette comparaison, on n'a pris en considération que les valeurs de concentration Φ_{mi} supérieures à $0,3 \cdot (\Phi_{bi})_{max}$ pour déterminer la valeur σ , $(\Phi_{bi})_{max}$ étant la concentration maximum calculée. De cette façon, on néglige l'extrémité du passage de traceurs mesuré.

L'optimisation des paramètres α et β a été faite par minimisation de la dérivation de σ d'après α ou β ($d\sigma/d\alpha$ ou $d\sigma/d\beta$). Une limite supérieure de 5% - par rapport à la concentration maximum - a été fixée pour la minimisation de l'écart du temps de transport du traceur calculé et mesuré.

Afin d'optimiser la valeur α et étant donné qu'on ne tient pas compte de la dégradation des substances, les quantités de marqueurs calculées et mesurées doivent être identiques. La comparaison des concentrations calculées et mesurées est faite à partir d'un déversement déterminé de traceurs, la quantité étant déterminée sur la base des concentrations mesurées selon l'équation 4.1. L'intégralité des valeurs de la courbe de passage doit être reproduite. Lorsque cette condition n'est pas remplie, la quantité déversée entrée dans le modèle est modifiée jusqu'à ce que la courbe calculée reproduise de façon optimale les valeurs mesurées. Cette opération ayant une incidence sur la forme de la courbe calculée, l'optimisation quantitative a été effectuée de façon itérative avec optimisation de la valeur α .

Les valeurs calibrées du paramètre β des zones d'eaux stagnantes contiennent implicitement les imprécisions des tableaux de temps d'écoulement, de débits et de niveaux d'eau utilisés dans le modèle. On peut donc obtenir des valeurs β négatives à partir des vitesses de transport des substances (c) déterminées. Ceci signifie que la vitesse "mesurée" de transport des substances est supérieure à la vitesse moyenne d'écoulement. Ceci n'est envisageable sur le plan physique que si le marqueur ne s'est pas entièrement répandu sur la section transversale du fleuve et qu'il se trouve principalement dans la ligne du chenal. En cas de mélange intégral, une valeur β négative peut correspondre à des erreurs de données de temps d'écoulement et/ou de débits. Dans de tels cas, on maintient la valeur zéro dans la deuxième phase de calibrage lors de l'optimisation en raison du manque d'informations sur β .

5.4 Résultats du calibrage

5.4.1 Calibrage de la section du Haut-Rhin

Le tableau 5.4.1 contient les valeurs déterminées pour le coefficient de proportionnalité (facteur de dispersion) α et le paramètre de zones d'eaux stagnantes β pour les sous-sections. La figure 5.4.1 montre les résultats en fonction du point kilométrique sous forme de graphique. Les valeurs β négatives apparaissant immédiatement après le déversement indiquent que le mélange ne s'est pas bien opéré. Apparemment, le marqueur se trouve encore en grande partie au milieu du chenal et est transporté à une vitesse de courant supérieure à la moyenne.

Tableau 5.4.1 Constante de proportionnalité α du coefficient de dispersion et paramètre de zones d'eaux stagnantes β

Fleuve	Sous-section n°	Valeur α	Valeur β	Fleuve	Sous-section n°	Valeur α	Valeur β	
RHIN	8004	0,00140	-0,040	RHIN	2301	0,01000	0,150	
	8101	0,00140	-0,040		2401	0,01000	0,150	
	8102	0,00120	-0,030		2402	0,01000	0,150	
	8103	0,00160	0,000		2501	0,00900	0,000	
	8104	0,00160	0,000		2502	0,00900	0,000	
	8105	0,00160	0,000		2503	0,00900	0,000	
	101	0,00100	0,280		2601	0,00900	0,000	
	102	0,00100	-0,250		2602	0,00900	0,000	
	103	0,00100	-0,100		2603	0,00900	0,000	
	104	0,00300	0,100		2701	0,00900	0,000	
	105	0,00300	0,100		2702	0,00900	0,000	
	106	0,00020	0,000		2703	0,00900	0,000	
	107	0,00020	-0,050		2801	0,00990	0,000	
	108	0,00400	0,050		2802	0,00990	0,000	
	109	0,00400	0,060		2901	0,00990	0,000	
	201	0,00300	0,100		2902	0,00990	0,000	
	301	0,00090	0,065		WAAL	3001	0,00990	0,000
	401	0,00300	0,100			3002	0,00990	0,000
	501	0,00330	0,100			3101	0,01100	0,100
	601	0,00090	0,065			3201	0,02300	0,180
	701	0,00350	0,200			3202	0,02300	0,180
	801	0,00330	0,100			3203	0,02300	0,180
	901	0,00090	0,065			3204	0,02300	0,180
	1001	0,00160	0,270			3205	0,02300	0,180
	1101	0,00330	0,100			3206	0,02300	0,180
1201	0,00090	0,065	3207	0,02300		0,180		
1301	0,00400	-0,030	CANAL DE	3301		0,02200	0,200	
1401	0,00330	0,100		PANNERDEN		3302	0,02200	0,200
1501	0,00090	0,065	IJSSEL	3401		0,02150	0,000	
1602	0,01200	0,100		3402		0,02150	0,000	
1701	0,01700	0,120		3403		0,02150	0,000	
1702	0,01700	0,120		3404	0,02150	0,000		
1801	0,01300	0,000		3405	0,02150	0,000		
1901	0,01300	0,000		3406	0,02150	0,000		
1902	0,01300	0,000		3407	0,02150	0,000		
1903	0,01300	0,000		3408	0,02150	0,000		
2001	0,00250	0,340		3409	0,02150	0,000		
2002	0,00250	0,340		LEK	3501	0,02000	0,290	
2003	0,00250	0,340	3502		0,02000	0,290		
2004	0,00250	0,340	3503		0,02000	0,290		
2101	0,00400	0,115	3504		0,02000	0,290		
2102	0,00400	0,115	3505		0,02000	0,290		
2201	0,00900	0,000	3506		0,02000	0,290		
2202	0,00900	0,000	3507		0,02000	0,290		
2203	0,00900	0,000	3508		0,02000	0,290		
2204	0,00900	0,000	3509		0,02000	0,290		
2205	0,00900	0,000	3510		0,02000	0,290		

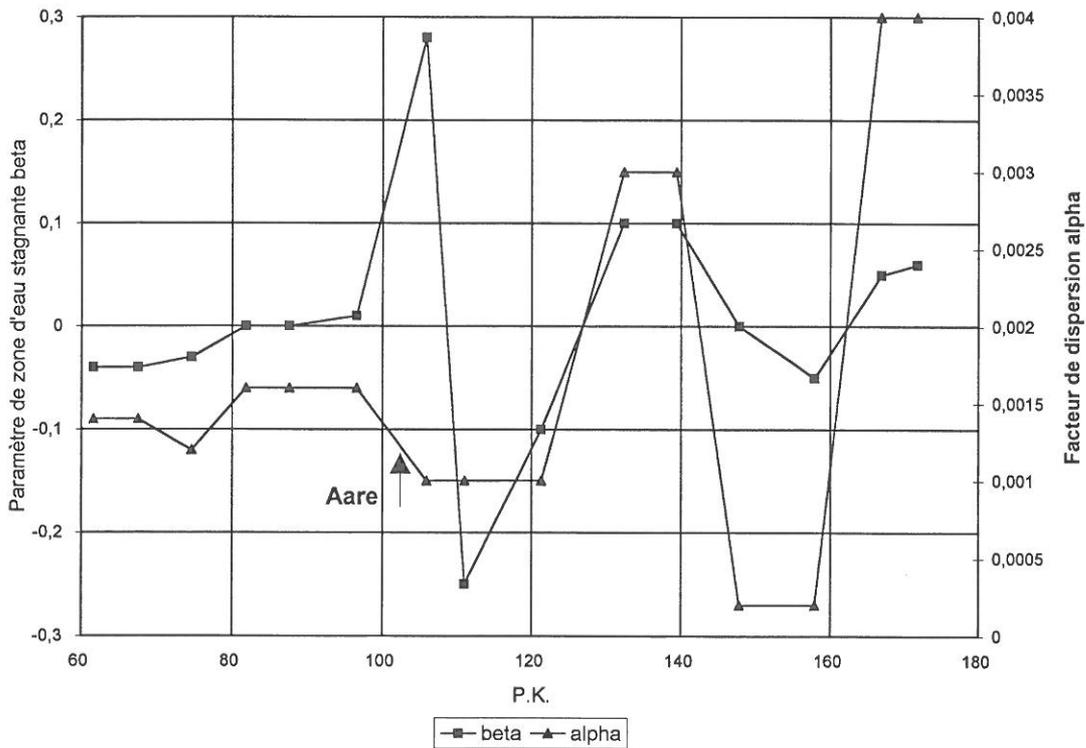


Figure 5.4.1 Tracé des valeurs α et β entre Rhinau et Bâle

Directement en aval de l'embouchure de l'Aar, la vitesse de transport des substances diminue considérablement et la valeur β augmente. En aval de l'embouchure de l'Aar jusqu'à la centrale d'Albrück, le traceur se trouve surtout sur la berge droite [Leibundgut et autres, 1989]. Il est également possible, comme pour le Neckar, le Main et la Moselle, que ce phénomène explique que le produit de marquage ait été transporté à une vitesse plus faible que celle prévisible en raison de la vitesse moyenne du courant (voir également par. 5.4.2).

Les valeurs β négatives plus en aval pourraient signifier que le nuage de traceurs se trouve à nouveau au milieu du fleuve après le passage dans les centrales, la vitesse de transport étant à nouveau plus élevée que la vitesse moyenne du courant.

Le graphique de la figure 5.4.2 représente l'écart en pourcentage entre les temps de transport calculés et mesurés. Les temps de transport calculés, par rapport à la concentration maximum aux points d'observation, peuvent être reproduits avec une précision élevée (moins de 2 % d'erreur en moyenne).

La figure 5.4.3 montre sous forme de graphique le coefficient de dispersion calculé du point de déversement au point d'observation. L'étude de ces résultats fait apparaître une légère augmentation du coefficient de dispersion au fur et à mesure que l'on s'éloigne du point de déversement (de 65 à 95 m²/s environ). Les variations du coefficient pourraient être dues à la présence de centrales, mais il est impossible actuellement d'analyser plus précisément ces paramètres.

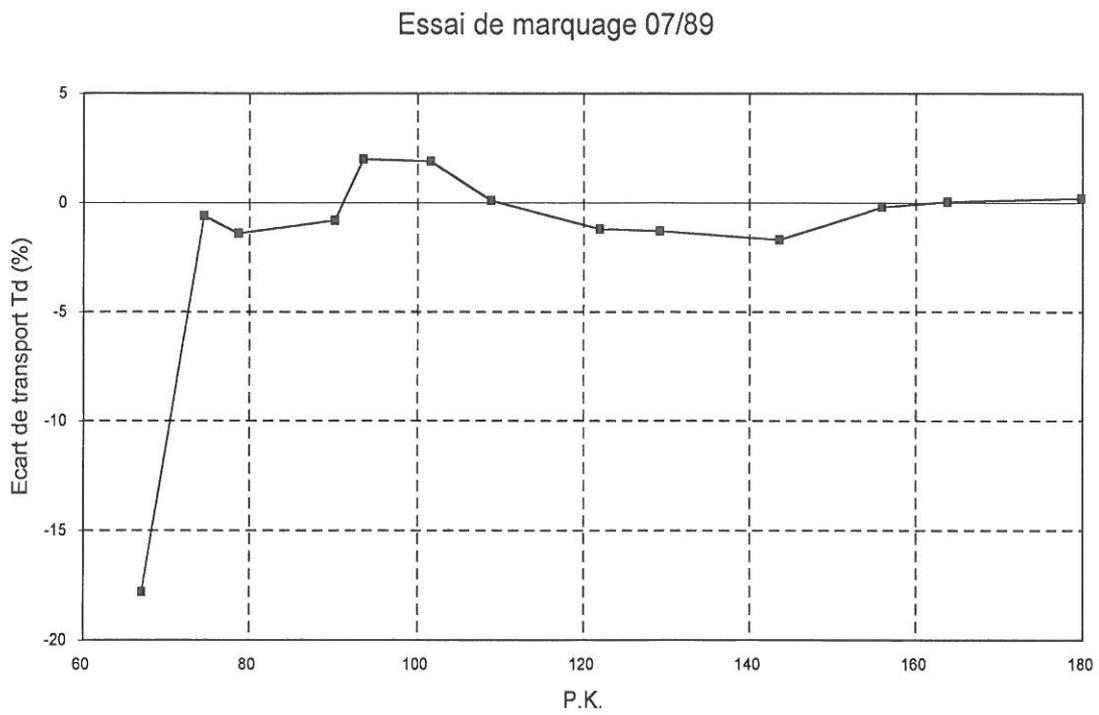


Figure 5.4.2 Ecart en pourcentage entre les durées de transport T_d mesurés et calculés d'après l'équation 5.3.3

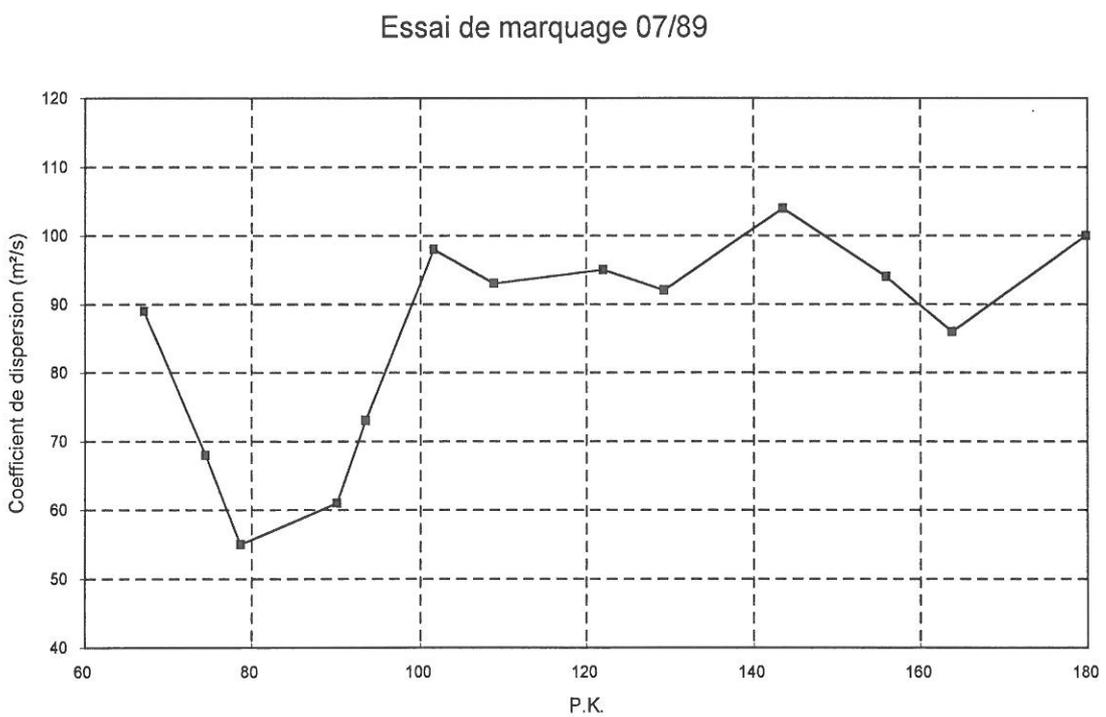


Figure 5.4.3 Evolution du coefficient de dispersion entre Rhinau et Bâle

La figure 5.4.4 montre le calibrage des valeurs α et β qui s'effectue à partir de la comparaison des courbes de concentration des points d'observation des centrales d'Eglisau (point kilométrique 78,7), de Reckingen (point kilométrique 90,1), de Laufenburg (point kilométrique 122,0), de Riburg (point kilométrique 143,5) et de Birsfelden (point kilométrique 163,8).

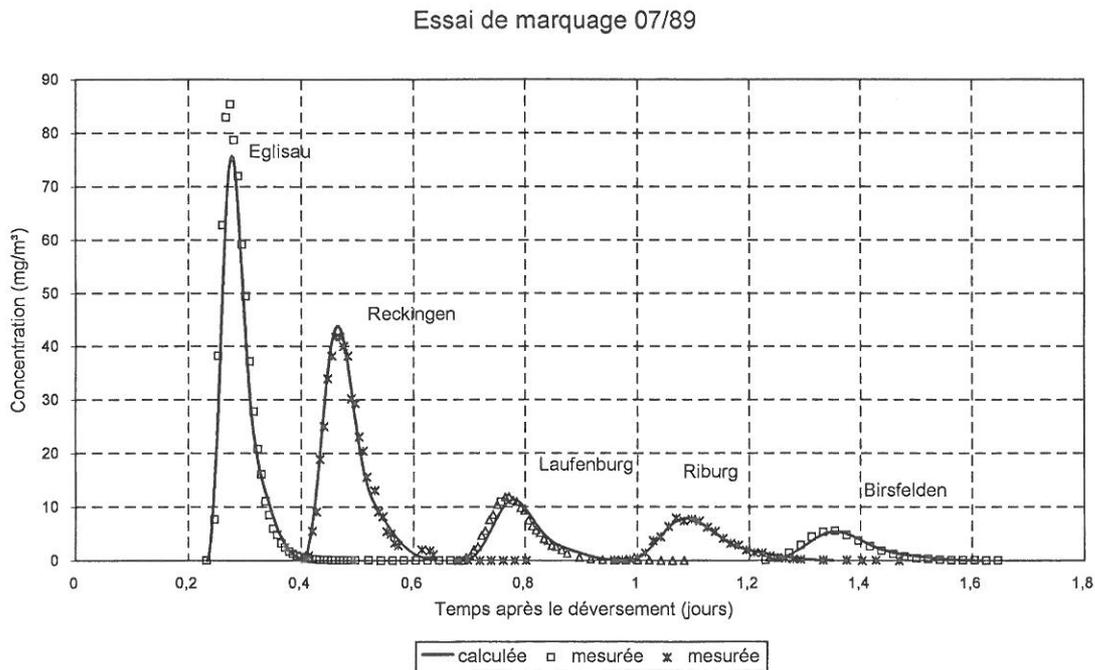


Figure 5.4.4 Comparaison des tracés de concentration calculés et mesurés

Les graphiques comparatifs montrent que le front du nuage de marqueurs est bien reproduit aux différents points d'observation.

5.4.2 Calibrage des sections du Rhin supérieur, moyen et inférieur

L'essai de marquage 04/89 utilisé pour le calibrage des sections du Rhin supérieur, moyen et inférieur sur la section de Village-Neuf aux Pays-Bas a eu lieu avec un débit moyen. Le jour du déversement, le débit journalier moyen au limnimètre de Rheinfelden (point kilométrique 148,26) était de 1 170 m³/s. Après une faible augmentation du débit au deuxième jour de l'essai, les valeurs ont commencé à diminuer légèrement. A l'échelle de Lobith (point kilométrique 862,2), le débit moyen au moment du passage du maximum de traceurs était de 2979 m³/s (voir également figure 5.5.4).

Le tableau 5.4.1 montre les valeurs calculées pour le coefficient de proportionnalité (facteur de dispersion) α et le paramètre β d'eaux stagnantes pour les différentes sous-sections. La figure 5.4.5 est un graphique illustrant les résultats en fonction du point kilométrique. Pour les ramifications néerlandaises du Rhin, les résultats obtenus sur la Waal ont été choisis à titre d'exemple.

Les valeurs α étaient comprises entre 0,0009 dans le canal latéral du Rhin et 0,023 dans les bras néerlandais. La valeur α pour un canal ou un fleuve canalisé est dix fois inférieure à la valeur de 0,011 indiquée par Fischer et al. [1979], et il y a concordance avec les résultats obtenus par Van

Cranenbroeck [1984]. Les valeurs calculées pour le Rhin lorsque l'écoulement est libre se situent dans la fourchette mentionnée dans des travaux déjà parus [Fischer et al. 1979].

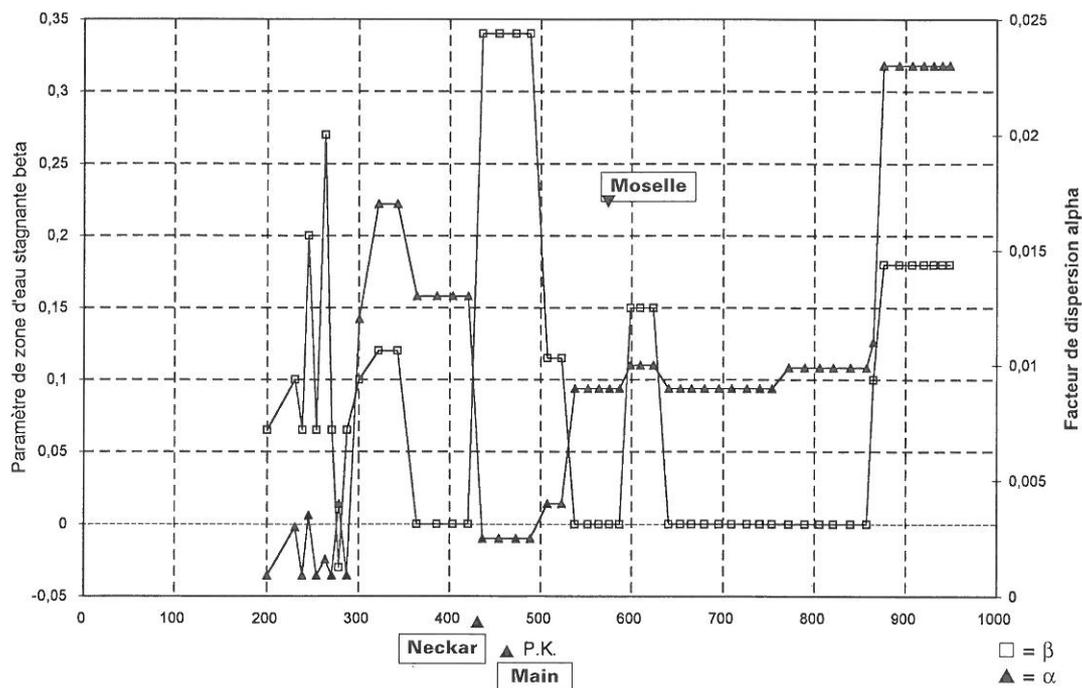


Figure 5.4.5 Tracé des valeurs α et β entre Bâle (Village-Neuf) et les Pays-Bas (Vuren)

Les valeurs des paramètres β déterminés pour les zones d'eaux stagnantes sont comprises entre 0 et 0,35. Les valeurs plus élevées sont généralement calculées dans des sections fluviales comportant des champs d'épis, comme par exemple la Waal, le canal de Pannerden et le Lek. On ne rencontre des valeurs élevées dans les champs d'épis que lorsqu'il y a eu échange total entre la zone d'eaux stagnantes et la partie à écoulement libre du fleuve ($\kappa = 1$ dans l'équation 5.2.12). L'influence des champs d'épis sur la vitesse de transport des substances rapportée à la concentration maximum est nettement moins grande ($\kappa \ll 1$) dans le Rhin moyen et inférieur jusqu'à Lobith, où les valeurs β moyennes sont égales à zéro. Une analyse détaillée de la propagation des substances dans ce bras du Rhin devrait permettre de savoir si ceci s'applique également à l'IJssel.

En outre, le faible nombre des points d'observation utilisables pour le calibrage entre Bingen (point kilométrique 530,15) et Düsseldorf (point kilométrique 759,6) pourrait être l'une des causes des valeurs zéro déterminées pour β sur cette section. C'est ainsi que lors de la vérification du modèle à l'aide des données de l'essai de marquage 06/91, où se trouvaient les points d'observation de Coblenz (point kilométrique 590,35), Bad Honnef (point kilométrique 640) et Cologne (point kilométrique 689,5), on a constaté qu'il y avait une meilleure concordance entre les courbes de passage mesurées et calculées lorsqu'on entrait une valeur β de 0,15 et non de zéro entre les points kilométriques 592,5 et 634,0 (le calcul avait été effectué sur la base du calibrage et de l'essai de marquage 04/89). Cette valeur plus élevée n'a qu'une très faible incidence sur la concordance entre les courbes de passage mesurées et calculées de l'essai de marquage 04/89. Les valeurs β ont donc été utilisées dans le calibrage pour la section aval du point kilométrique 592,5 au point kilométrique 634,0.

Lorsque l'on regarde le tracé de la valeur β , on constate que c'est surtout en aval des affluents Neckar, Main et Moselle que la vitesse de transport diminue considérablement (valeurs β plus élevées, voir figure 5.4.5). Il est possible qu'à la suite d'un mélange incomplet directement en aval des

affluents, qui est fonction du profil de vitesse d'écoulement, le produit de marquage ait été transporté moins rapidement que la vitesse moyenne du courant ne l'avait laissé prévoir.

Les valeurs β négatives n'apparaissent qu'à la suite d'un mélange incomplet, le traceur se trouvant alors principalement au milieu de la ligne du chenal et étant transporté à une vitesse supérieure à la vitesse moyenne du courant, comme par exemple peu de temps après l'opération de déversement ou après une centrale.

La figure 5.4.6 montre que les durées de transport des substances mesurées lors de l'essai de traçage 04/89 peuvent être reproduites avec une précision élevée (moins de 2% en moyenne) par calibrage des paramètres α et β par rapport à la concentration maximum aux points d'observation. D'après l'équation 5.3.3, une valeur négative signifie que les durées de transport des substances calculées sont supérieures aux durées mesurées.

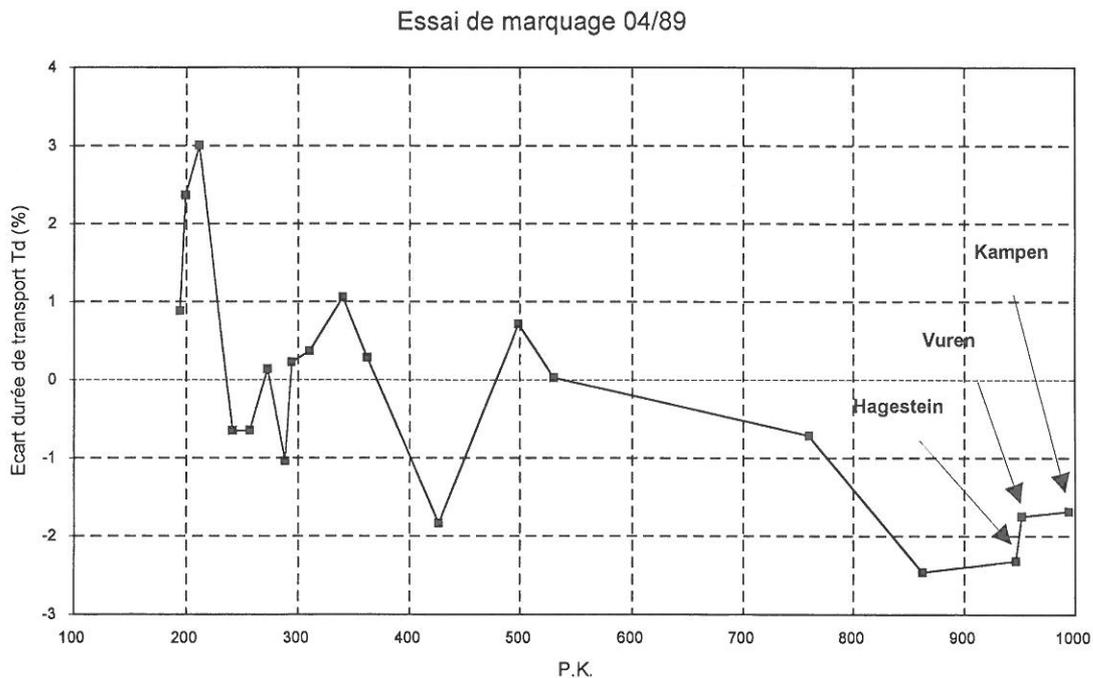


Figure 5.4.6 Ecart en pourcentage entre les durées de transport T_d mesurées et calculées d'après l'équation 5.3.3

La figure 5.4.7 montre sous forme de graphique les coefficients de dispersion à partir du point de déversement jusqu'au point d'observation. Pour les bras du Rhin aux Pays-Bas, seule la Waal a été indiquée à partir du point kilométrique 867,2. Le graphique montre que ce coefficient reste faible dans la section canalisée du Rhin supérieur et qu'il augmente en même temps que la longueur.

Essai de marquage 04/89

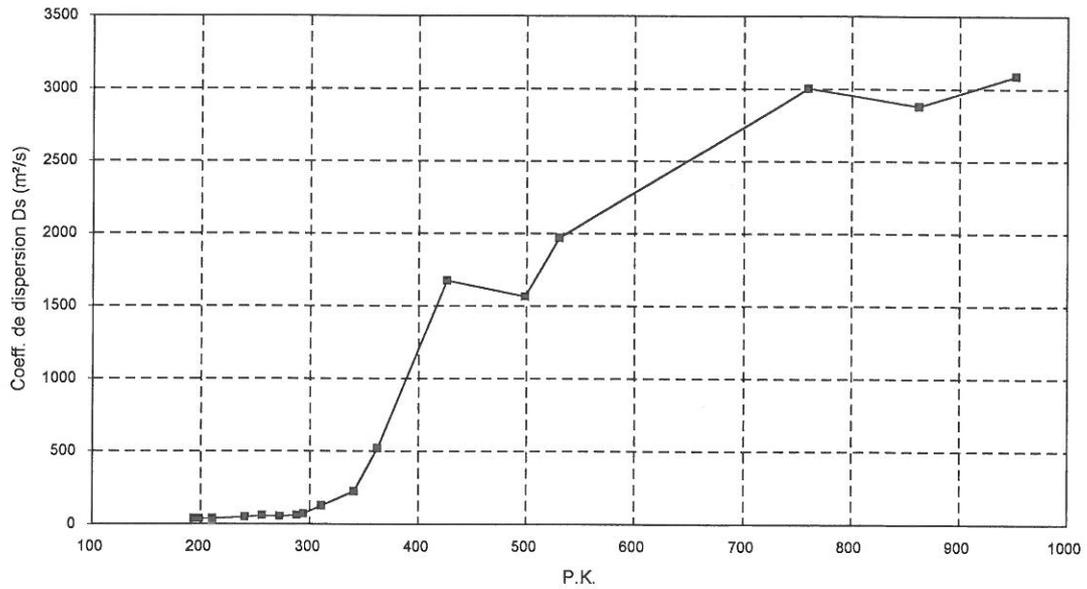


Figure 5.4.7 Evolution du coefficient de dispersion entre Bâle et les Pays-Bas

La figure 5.4.8 compare les tracés de concentration mesurés et calculés pour les points d'observation Maximiliansau (point kilométrique 362,0), Bingen (point kilométrique 530,15), Düsseldorf (point kilométrique 759,6) et Lobith (point kilométrique 862,2) après calibrage ou optimisation des paramètres α et β . Ces comparaisons données à titre d'exemple montrent que le front du nuage de marqueurs est bien reproduit aux différents points d'observation.

Note: les courbes de passage mesurées aux points d'observation Bingen et Düsseldorf laissent supposer une charge de base de $0,05 \mu/l$. Les valeurs mesurées s'y rapportant n'ont pas été corrigées lors du calibrage.

Essai de marquage 04/89

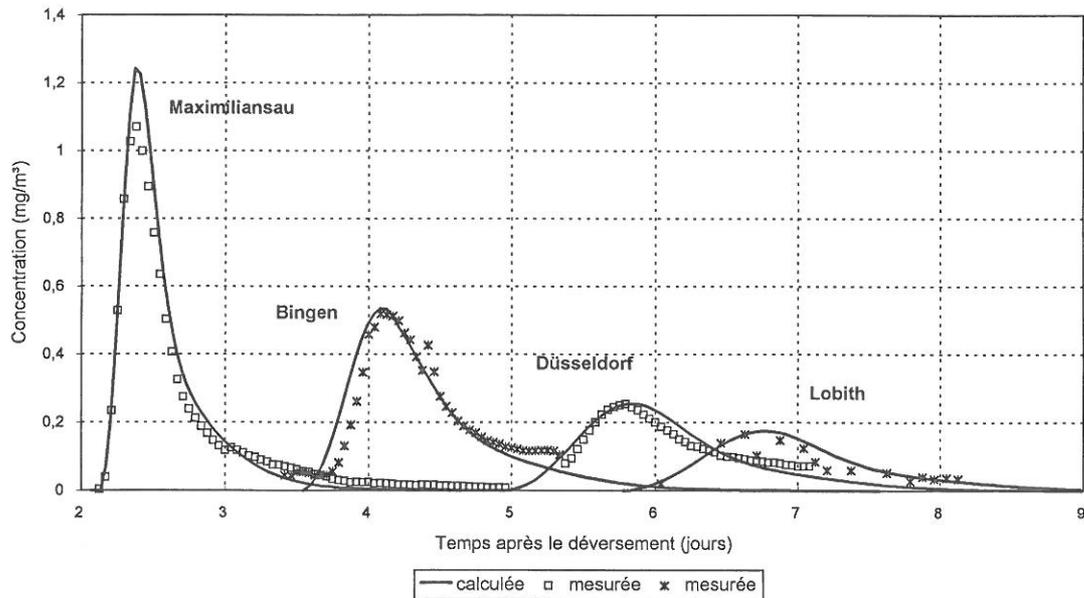


Figure 5.4.8 Comparaison des tracés de concentration mesurés et calculés

5.5 Résultats des vérifications

5.5.1 Vérification de la section du Rhin supérieur

La vérification de la section du Rhin supérieur a été effectuée avec les données de l'essai de marquage 09/88 Albruck-Bâle. Pendant cet essai, le débit accusait une légère baisse. Le jour du déversement, le 27 septembre, le débit journalier moyen au limnimètre de Rheinfelden était de $712 \text{ m}^3/\text{s}$, et atteignait $697 \text{ m}^3/\text{s}$ le 28 septembre. La vérification a donc été effectuée pour les débits compris entre 712 et $700 \text{ m}^3/\text{s}$.

La figure 5.5.1 montre l'écart en pourcentage entre les durées de transport pour deux débits, 712 et $700 \text{ m}^3/\text{s}$, selon l'équation 5.3.3. Ces résultats permettent de conclure que la diminution du débit survenue pendant l'essai de traçage, qui est passé de 712 à $700 \text{ m}^3/\text{s}$, correspond à une diminution de l'écart de durée de transport de 1 à 2 %. L'écart moyen est inférieur à 2 % (à l'exception du point d'observation situé au point kilométrique 122).

Etant donné la diminution du débit pendant l'essai, on constate que les différences entre les tracés de concentration calculés et mesurés pour un débit de $700 \text{ m}^3/\text{s}$ sont moins importantes aux points d'observation situés plus en aval du lieu de déversement.

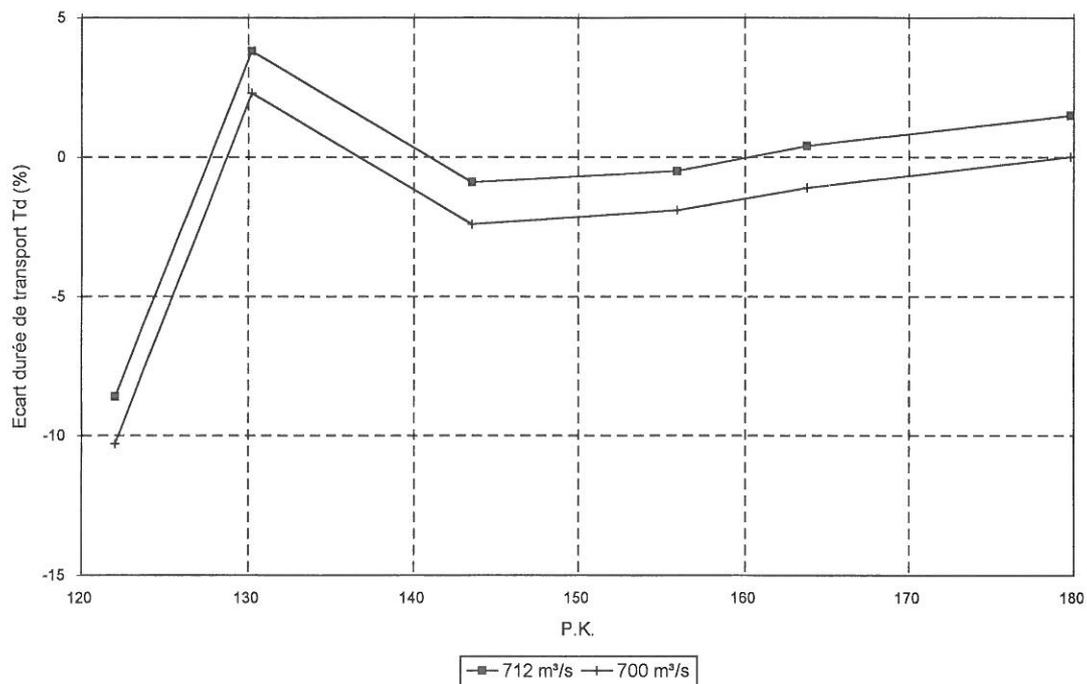


Figure 5.5.1 Ecart en pourcentage entre les durées de transport mesurées et calculées T_d selon l'équation 5.3.3

Dans le cas de l'écart de temps de transport le plus important (8,6% au point kilométrique 122), il s'agit de l'arrivée du maximum de concentration avec une avance d'environ 15 minutes par rapport au temps calculé, et ceci pour un temps de transport de 2,8 heures. Le fait que le produit de marquage se situe au début principalement dans la ligne du chenal et qu'il est donc transporté à une vitesse supérieure à la vitesse de courant moyenne pourrait expliquer la différence sur cette distance relativement courte.

Lors de la vérification, on a constaté que les débits de 700 et 712 m^3/s n'ont qu'une faible influence sur le coefficient de dispersion. La figure 5.5.2 montre l'évolution du coefficient à partir d'Albbruck. La valeur moyenne sur la section étudiée est d'environ 65 m^3/s , c'est-à-dire inférieure d'un tiers par rapport à l'essai de traçage 07/89 où le débit journalier moyen était de 1068 m^3/s à l'échelle de Rheinfelden. En raison de la relation linéaire entre le coefficient de dispersion et la vitesse d'écoulement (voir équation 5.2.13), celle-ci semble augmenter linéairement avec le débit.

La figure 5.5.3 compare les tracés de concentration mesurés et calculés pour les points d'observation de Holzbrücke Stein-Säckingen (point kilométrique 130,2), et des centrales de Riburg-Schwörstadt (point kilométrique 143,5), d'Augst (point kilométrique 155,9) et de Birsfelden (point kilométrique 163,8) pour un débit de 712 m^3/s à l'échelle de Rheinfelden.

Essai de marquage 09/88

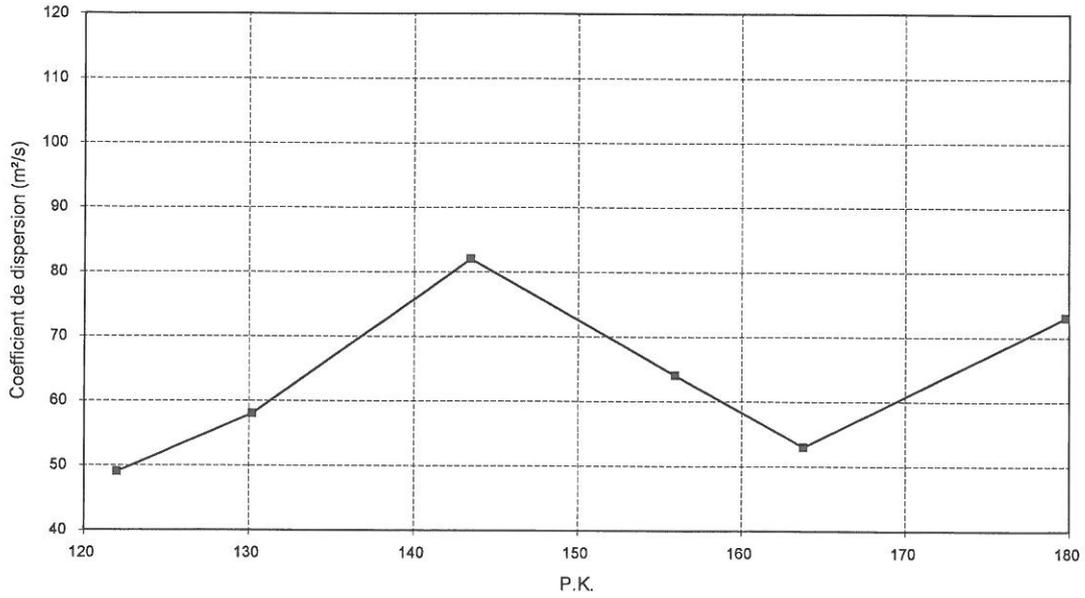


Figure 5.5.2 Evolution du coefficient de dispersion entre Albruck et Bâle pour un débit à Rheinfelden de $712 \text{ m}^3/\text{s}$

Essai de marquage 09/88

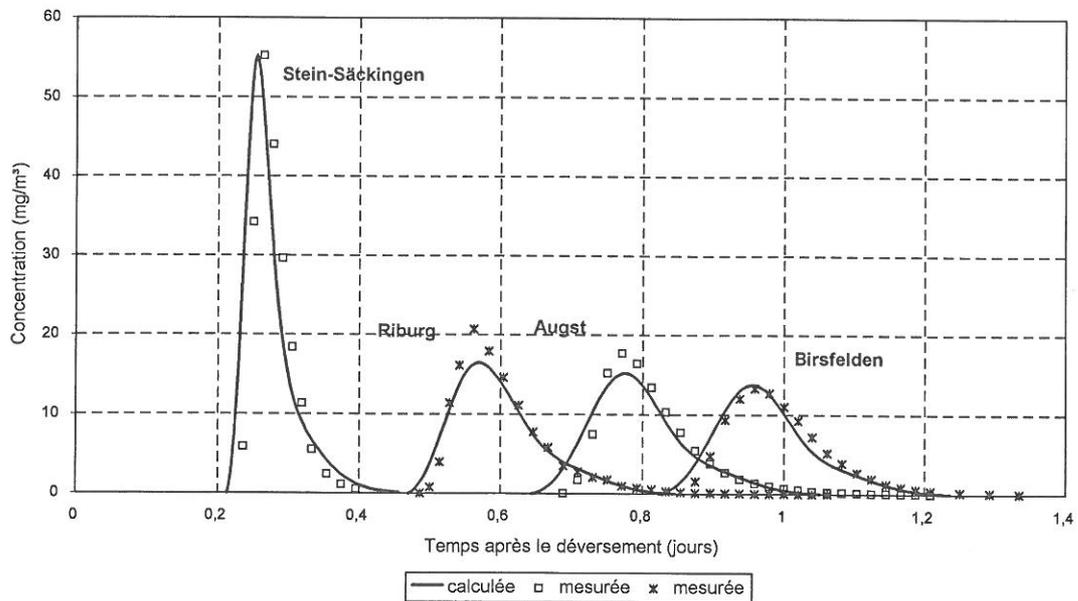


Figure 5.5.3 Comparaison des tracés de concentration mesurés et calculés

5.5.2 Vérification des tronçons du Rhin supérieur, moyen et inférieur

La vérification du modèle d'alerte pour le Rhin en aval de Bâle a été effectuée à l'aide des données de cinq essais de traçage:

- novembre 1988 de Bâle à Strasbourg
- mai 1990 de Bâle aux Pays-Bas
- septembre 1990 de Village-Neuf aux Pays-Bas
- juin 1991 de Village-Neuf aux Pays-Bas
- juillet 1991 de Village-Neuf à Strasbourg

Cette vérification a fait l'objet du plus grand soin, étant donné la quantité de données disponibles et compte tenu du fait que lors des essais de septembre 1990 et juin 1991, le déversement des marqueurs s'était fait dans le milieu du canal latéral du Rhin et non à partir de la berge comme pour les essais 11/88, 05/90 et 07/91. Le déversement dans la ligne du chenal est impératif, le mélange s'opérant plus rapidement, afin d'obtenir des résultats de prévisions réalistes sur des distances relativement courtes avec le modèle d'alerte unidimensionnel.

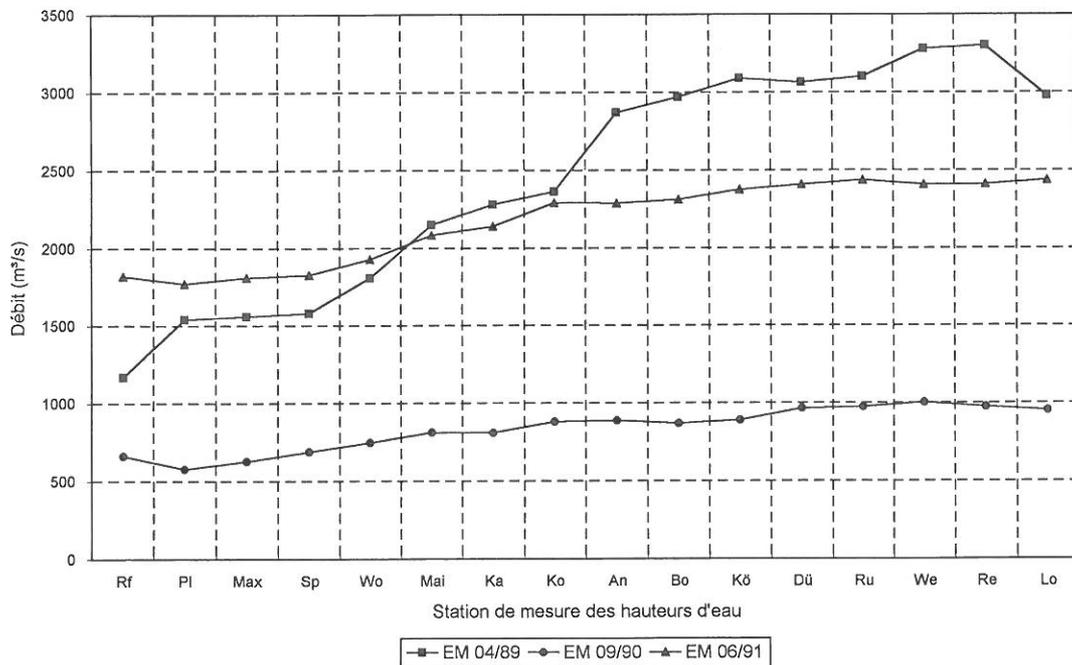


Figure 5.5.4 Débits le long du Rhin pendant les essais de marquage 04/89, 09/90 et 06/91

La figure 5.5.4 compare les débits du Rhin pendant ces deux essais (09/90 et 06/91) et de l'essai de marquage 04/89 utilisé pour le calibrage. La comparaison avec une situation d'eaux hautes, moyennes et basses sur le Rhin (figure 5.5.5) montre que l'essai de calibrage 04/89 sur la section du Rhin supérieur a eu lieu avec un débit moyen et avec un débit situé dans la moyenne supérieure pour les sections du Rhin moyen et inférieur. Lors de l'essai de traçage 06/91, les débits sur les sections du Rhin moyen et supérieur sont considérés comme eaux moyennes légèrement supérieures à la normale. Le débit observé pendant l'essai 09/90 est comparable à des conditions d'étiage.

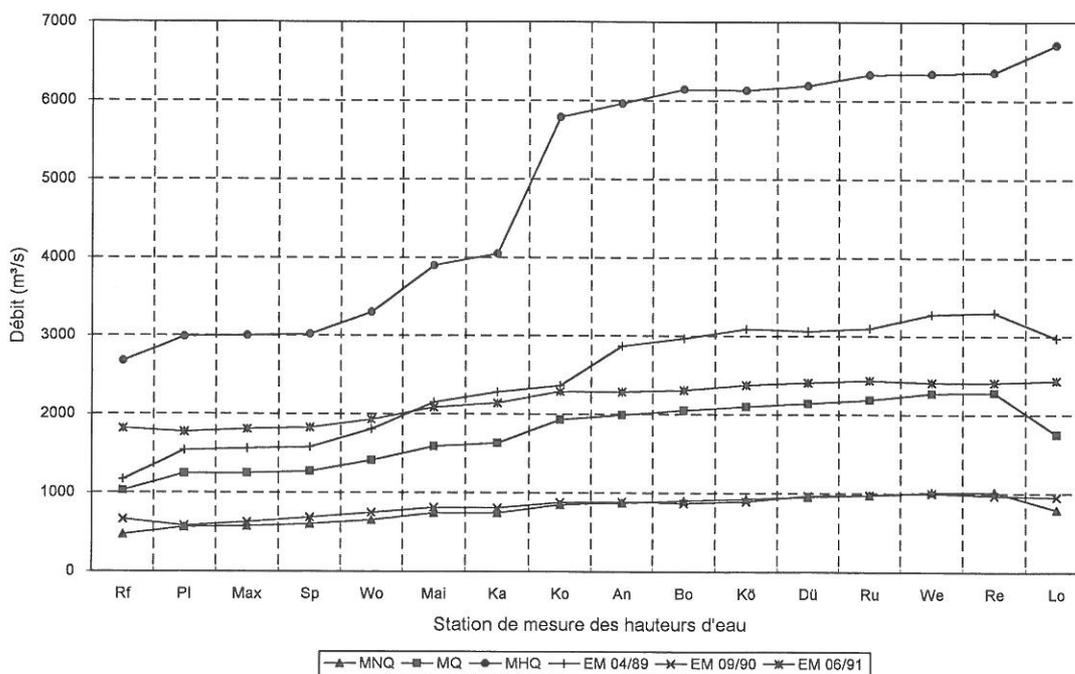


Figure 5.5.5 Débits le long du Rhin en période de hautes eaux, d'étiage et d'eaux moyennes par comparaison aux débits pendant les essais de marquage 04/89, 09/90 et 06/91

Le premier critère d'évaluation lors de la vérification du modèle d'alerte pour le Rhin a été la durée de transport des substances (paramètre de zones d'eaux stagnantes β) ainsi que l'écart entre les durées de transport mesurées et calculées T_d .

La figure 5.5.6 montre sous forme de graphique les écarts relatifs de temps de transport, calculés selon la formule 5.3.3, pour les essais de marquage 09/90 et 06/91 selon l'équation 5.3.3. Les résultats de vérification montrent une concordance des prévisions du moment d'arrivée du pic de traceurs d'environ + 5% pour l'essai 09/90 et de - 5% pour l'essai 06/91. L'écart positif continu pour l'essai de marquage 09/90 signifie que les durées de transport calculées par le modèle d'alerte étaient systématiquement inférieures aux durées de transport mesurées, tandis que les valeurs négatives de l'essai 06/91 représentent une durée de transport calculée plus importante.

Lors des deux essais, on a noté des différences supérieures à 5% entre les points kilométriques 400 et 600. Les différences de durées de transport de l'essai 09/90 pour les points kilométriques 426,2 (Ludwigshafen) et 443,4 (Worms), directement en amont et en aval de l'embouchure du Neckar (point kilométrique 428,5) pourraient avoir été provoquées par l'apparition de cet affluent et de ses épiphénomènes (courants et problèmes ponctuels de mélange du traceur). L'augmentation de la différence lors de l'essai 06/91 pour le point kilométrique 498,5 (Mayence), directement en aval de l'embouchure du Main (point kilométrique 496,8) pourrait également être due à l'affluent.

La figure 5.5.7 compare les courbes de concentration mesurées et calculées de l'essai de marquage 09/90 pour les points d'observation Maximiliansau (point kilométrique 362,0), Mayence (point kilométrique 498,5), Bad Honnef (point kilométrique 640,0) et Lobith (point kilométrique 863,3). La figure 5.5.8 établit cette comparaison pour les points d'observation de Karlsruhe (point kilométrique 359,2), Mayence (point kilométrique 498,5), Bad Honnef (point kilométrique 640,0) et Lobith (point kilométrique 863,3) pour l'essai de traçage 06/91.

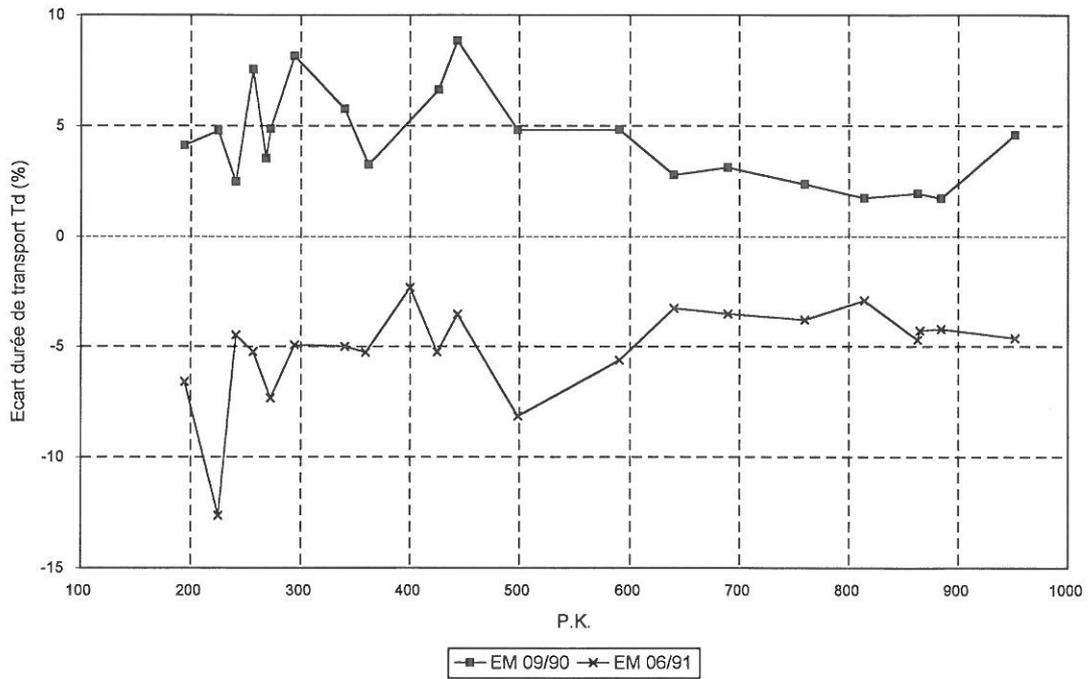


Figure 5.5.6 Ecart en pourcentage entre les durées de transport mesurées et calculées T_d selon l'équation 5.3.3 pour les essais de marquage 09/90 et 06/91

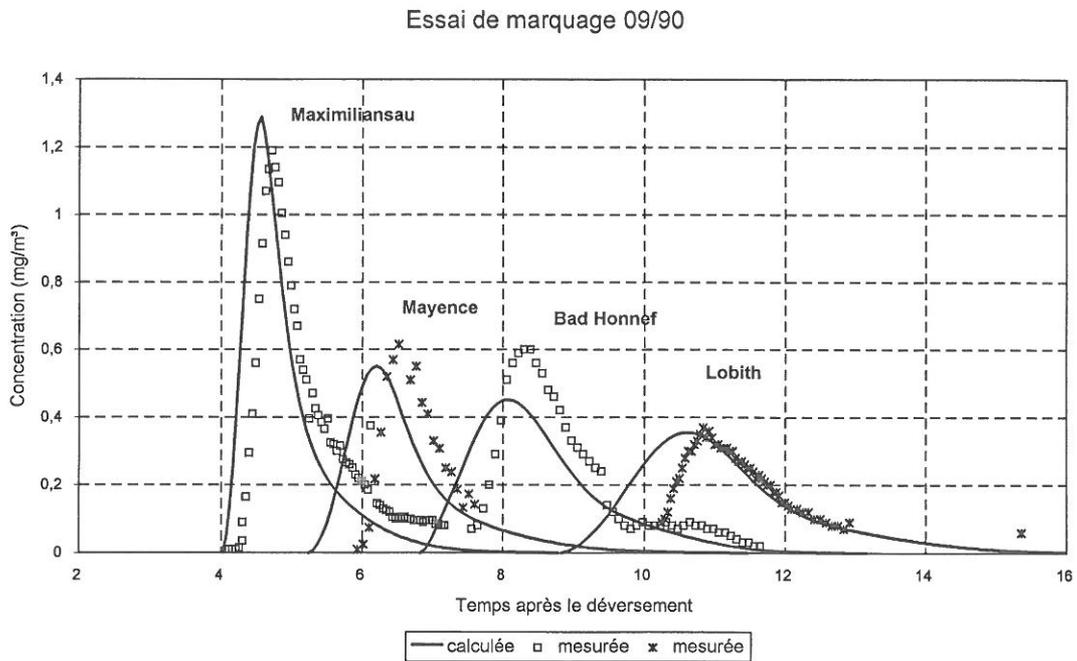


Figure 5.5.7 Comparaison des tracés de concentration calculés et mesurés

Essai de marquage 06/91

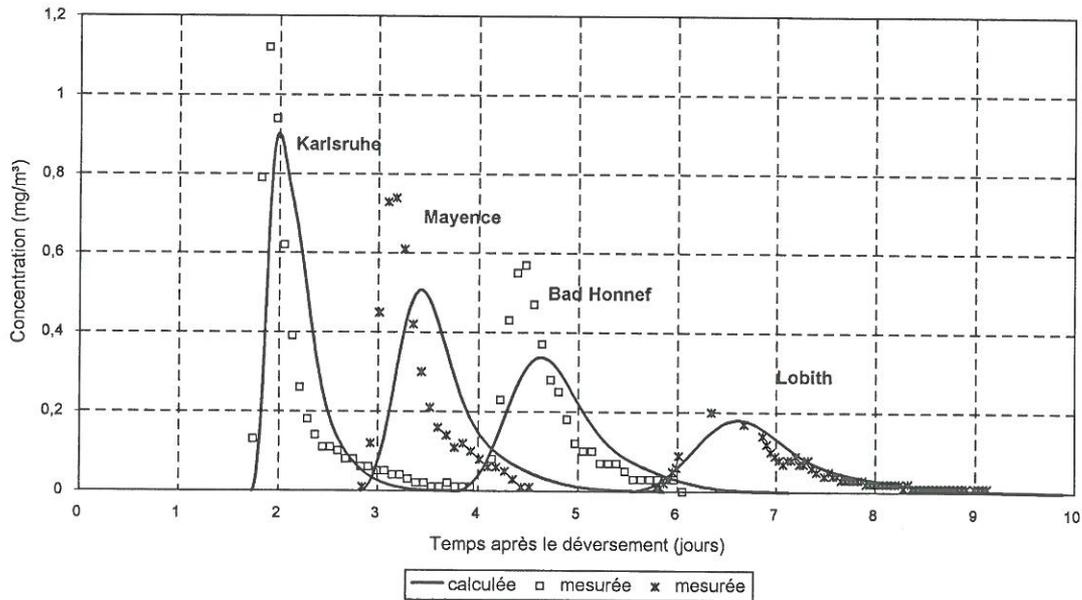


Figure 5.5.8 Comparaison des tracés de concentration calculés et mesurés

Ces comparaisons de tracés de concentration mesurés et calculés montrent que l'on peut relativement bien reproduire la forme des courbes mesurées. On note toutefois que pour les points d'observation Mayence et Bad Honnef, les tracés mesurés sont un peu plus compacts que les tracés calculés. Ceci pourrait signifier que les coefficients de dispersion du modèle sont légèrement trop élevés.

Les valeurs mesurées des points d'observation de Karlsruhe à Bimmen (point kilométrique 362,0 - 865,02) de l'essai de marquage 04/89 utilisé pour le calibrage n'ont pas tenu compte de la charge de base (voir paragraphe 5.4.1). Il conviendrait de vérifier à nouveau le calibrage pour déterminer si cette omission a fait augmenter les valeurs du facteur de dispersion α lors du calibrage.

La figure 5.5.9 montre les coefficients de dispersion pour les points d'observation des essais de marquage 09/90 et 06/91 à partir du point de déversement.

Par comparaison avec les coefficients de dispersion déterminés lors du calibrage à l'aide de l'essai de marquage 04/89, les différences sont minimales, tandis que l'évolution des coefficients est identique. Ceci pourrait signifier que la vitesse d'écoulement ne se modifie pas autant que le débit en raison des relations linéaires entre le coefficient de dispersion D_s et la vitesse d'écoulement u_s selon l'équation 5.2.13 et l'équation 5.2.3.

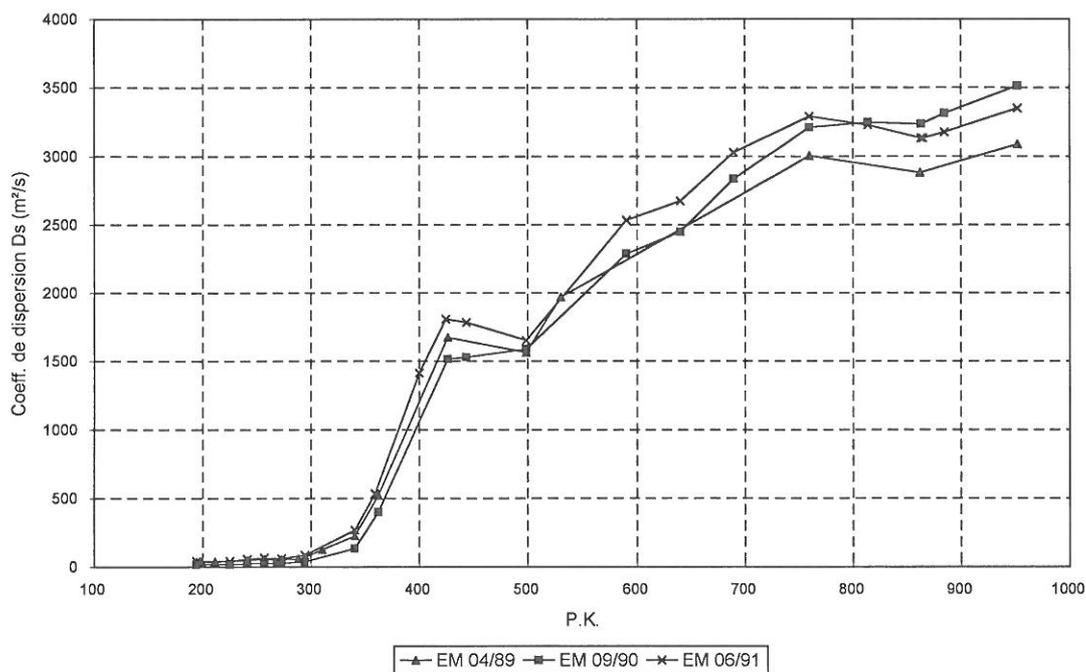


Figure 5.5.9 Évolution du coefficient de dispersion entre Bâle et les Pays-Bas pour les essais de marquage 09/90 et 06/91, par comparaison avec l'essai de marquage 04/89

La figure 5.5.10 représente sous forme d'un graphique les écarts entre durées de transport des substances mesurées et calculées des essais de marquage réalisés en mai 1990 et juillet 1991. On constate que le traceur n'était pas encore complètement mélangé sur toute la section transversale au point kilométrique 169 dans le canal latéral du Rhin, à une distance d'environ 50 km après le déversement effectué à partir de la berge. Les résultats obtenus pour la section étudiée d'Ottmarsheim (point kilométrique 194,4) ne peuvent donc être évalués que partiellement. Les écarts de durée de transport des substances de l'essai 05/90, par exemple, sont de 25% à une distance de 10 km après le point de déversement et se réduisent à environ 10% après un parcours d'environ 30 kilomètres. Quant à la section aval de Gerstheim (point kilométrique 268,5) à Bimmen (point kilométrique 865,0), les écarts entre durées de transport calculées et mesurées sont généralement inférieurs à trois pour cent.

Lors de l'essai de marquage 07/91, les écarts se réduisent à environ 5% après un parcours d'à peu près 30 kilomètres, tandis que pour la section aval de Worms (point kilométrique 443,5) à Bimmen (point kilométrique 865,0), les écarts entre durées de transport des substances mesurées et calculées s'élèvent à environ -5%, comme pour l'essai de marquage 06/91.

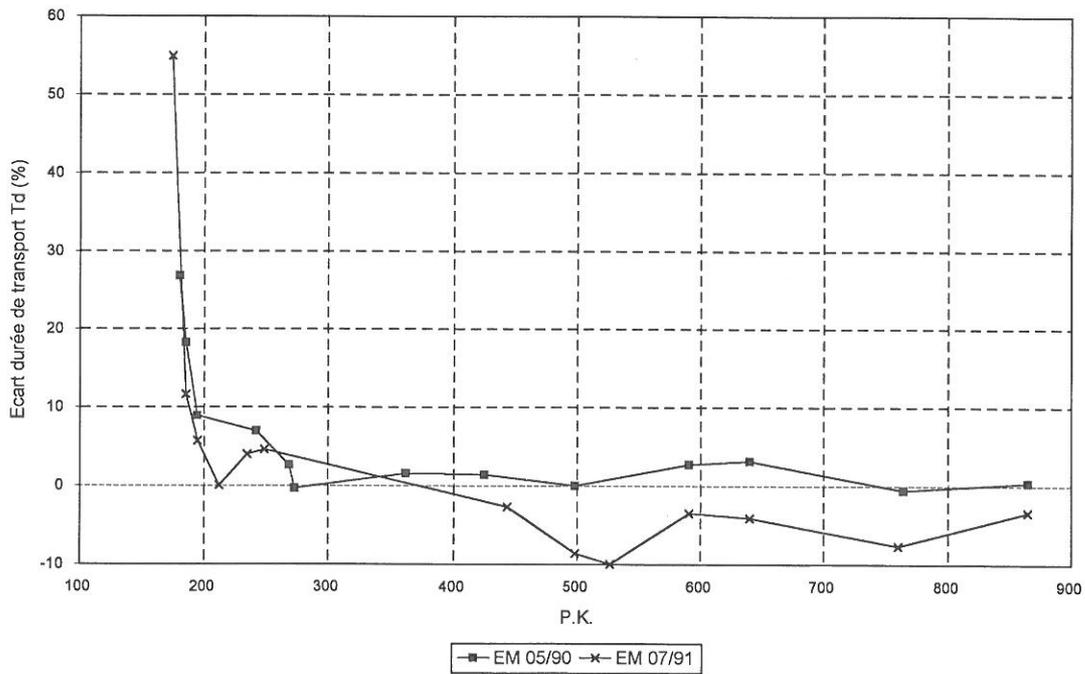


Figure 5.5.10 Ecart en pourcentage entre les durées de transport mesurées T_d selon l'équation 5.3.3 pour les essais de marquage 05/90 et 07/91

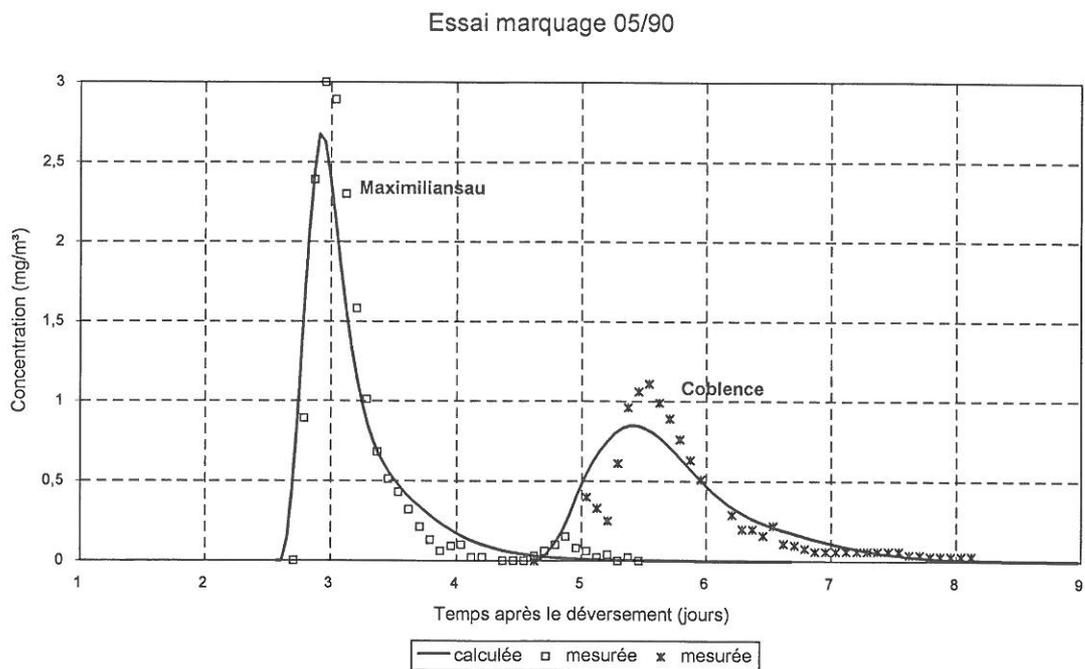


Figure 5.5.11 Comparaison des tracés de concentrations mesurés et calculés. Essai de marquage 05/90

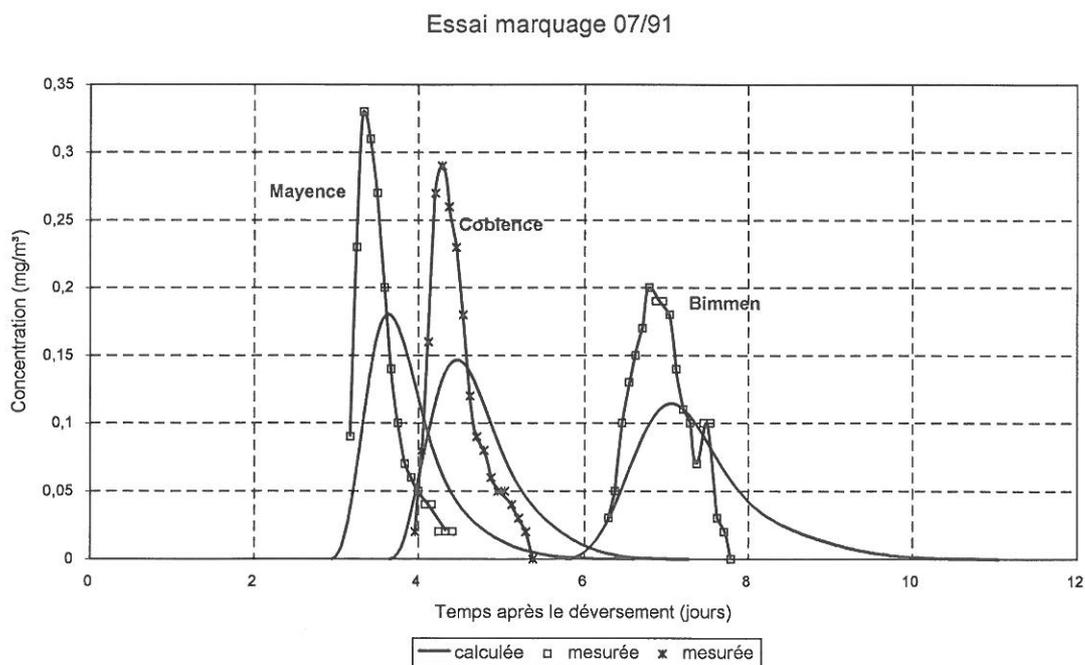


Figure 5.5.12 Comparaison des tracés de concentrations mesurés et calculés

Les figures 5.5.11 et 5.5.12 montrent les concentrations mesurées et calculées pour quelques points d'observation des essais 05/90 et 07/91.

Etant donné que lors de l'essai 05/90, on n'avait que peu de courbes de passage entièrement mesurées, seuls les points d'observation Maximiliansau (point kilométrique 362,0) et Coblenz (point kilométrique 590,35) sont reproduits. Les deux comparaisons montrent que la reproductibilité des courbes mesurées est assez bonne.

L'essai de marquage 07/91 a retenu pour points d'observation Mayence (point kilométrique 498,5), Coblenz (point kilométrique 590,35) et Bimmen (point kilométrique 865,02). On constate que comme lors des essais 09/90 et 06/91, les tracés de concentrations mesurés sont plus compacts que les tracés calculés.

Les résultats des vérifications effectuées à l'aide des données de l'essai de marquage de novembre 1988 montrent qu'en raison du déversement à partir de la berge et de la brièveté de la section étudiée (Huningue, point kilométrique 169,1 - Gerstheim, point kilométrique 273,3), cet essai n'est pas adapté à une vérification du modèle d'alerte pour le Rhin à une dimension.

5.6 Conclusions

Les valeurs pour le paramètre d'eaux stagnantes β obtenues par le calibrage du modèle d'alerte pour le Rhin sont comprises entre 0 et 0,1. Dans les sections comportant des champs d'épis, comme par exemple le Lek, ces valeurs peuvent atteindre 0,3. Sur la section du Haut-Rhin, on a également déterminé des valeurs β négatives (en moyenne jusqu'à - 0,10) en raison de la présence de centrales, qui font que le produit de marquage se trouvait surtout au milieu du chenal et qu'il était donc transporté à une vitesse d'écoulement supérieure à la moyenne.

Directement en aval de l'embouchure d'affluents où il n'y a pas de champs d'épis, tels l'Aar, le Neckar, le Main et la Moselle, on a calculé des valeurs β comprises entre 0,11 et 0,34. Le retard enregistré dans la propagation des substances pourrait être dû à un mélange imparfait lié au profil de la vitesse d'écoulement. Une analyse détaillée du processus de mélange et du courant pourrait expliquer cet état de choses.

Les valeurs de la constante de proportionnalité α du coefficient de dispersion sont d'environ 0,01 pour les sections où le Rhin coule librement. Pour les bras néerlandais, on a déterminé que ce paramètre α est d'environ 0,02. Ces résultats sont ainsi comparables aux résultats obtenus par Fischer et al. [1979]. Pour les sections canalisées ou comparables à un canal, les valeurs α sont d'environ 0,002, c'est-à-dire dix fois moins élevées que pour les sections où le Rhin coule librement.

Les données des expériences de traçage utilisées pour le calibrage permettent de reproduire avec une précision en moyenne inférieure à 2% les durées de transport des substances mesurées lors de ces essais. Les heures d'arrivée à Kampen, Hagestein et Vuren, pour un trajet effectué à partir de Bâle d'une durée approximative de 200 heures, ne diffèrent en moyenne que de quatre heures par rapport aux valeurs mesurées. L'heure d'arrivée du front de traceurs est reproduit avec à peu près la même exactitude.

Etant donné que la dégradation du traceur et les pertes par infiltration dans les eaux souterraines ou par absorption ne sont pas quantifiables, on ne peut indiquer de valeur plus précise pour la reproduction des concentrations maxima mesurées. Ceci vaut également pour la précision des coefficients de dispersion déterminés.

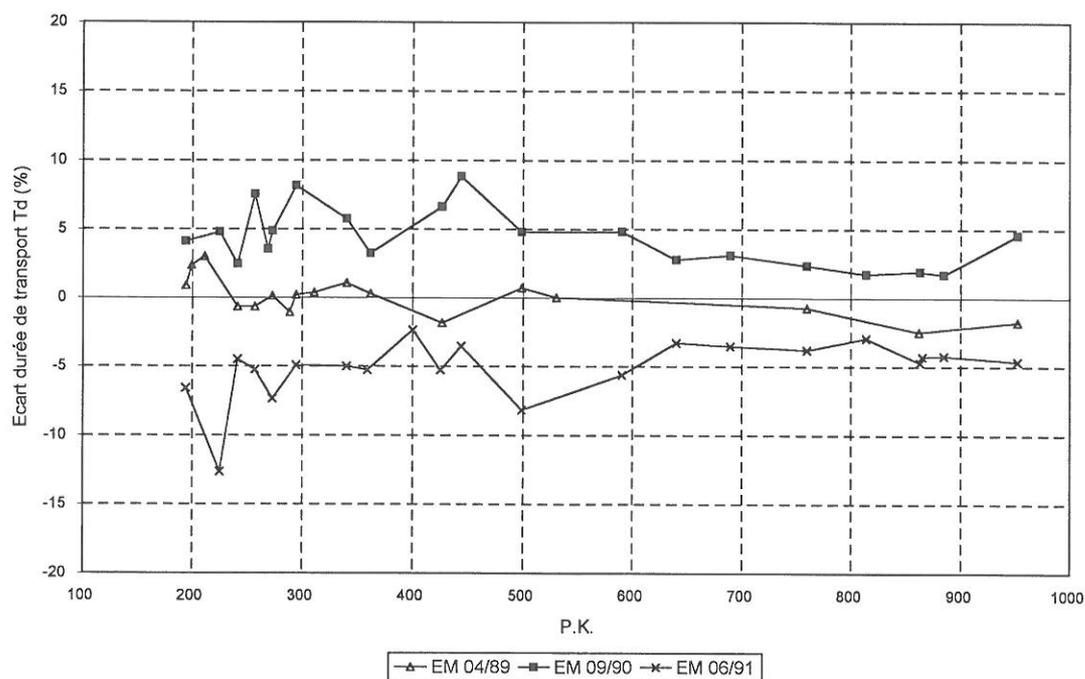


Figure 5.6.1 Ecart en pourcentage des durées de transport mesurées et calculées T_d selon l'équation 5.3.3 pour les essais de marquage 04/89 (calibrage), 09/90 et 06/91

Les essais de traçage de septembre 1990 et juin 1991, portant sur le parcours Village-Neuf - Pays-Bas, sur lesquels s'appuie principalement la vérification du cours *supérieur, moyen et inférieur du Rhin*, ont eu lieu en période de basses eaux ou parfois avec des niveaux moyens à peine plus élevées que d'habitude. La concordance de la prévision du modèle d'alerte pour le Rhin quant au moment d'arrivée du pic de traceurs et de l'ensemble du tracé de la courbe est en moyenne de cinq pour cent à partir d'environ 50 km après le déversement (figure 5.6.1). Les écarts T_d sont toutefois constamment positifs pour l'essai de marquage de septembre 1990; les durées de transport des substances calculées par le modèle d'alerte sont donc systématiquement plus courtes que les durées de transport mesurées (voir équation 5.3.3), tandis que les écarts observés pour l'essai de traçage de juin 1991 étaient toujours négatifs.

Les différences mentionnées ci-dessus entre les durées de transport mesurées et calculées sont dûes entre autres à la présence de zones d'eaux stagnantes. L'influence de celles-ci sur la propagation des substances se traduit par l'augmentation des durées de transport, ce qui signifie que le stockage temporaire des traceurs dans les zones d'eaux stagnantes retarde le processus de transport des substances. Etant donné qu'on tient compte de l'influence des zones d'eaux stagnantes dans le modèle grâce au paramètre β , l'entrée d'une valeur β supérieure a pour corollaire une augmentation de la durée de la propagation.

L'essai de traçage utilisé pour la vérification de la section du *Haut-Rhin* réalisé en septembre 1988, qui portait sur une section aval d'Albbruck à Bâle, a eu lieu en période de débit relativement faible (712 m³/s à Rheinfelden). La concordance des prévisions du modèle d'alerte pour le Rhin quant au moment d'arrivée du pic de traceurs est comprise ici entre 1 et 2 % à partir d'une distance de 20 km environ après le déversement à Albbruck (figure 5.6.2).

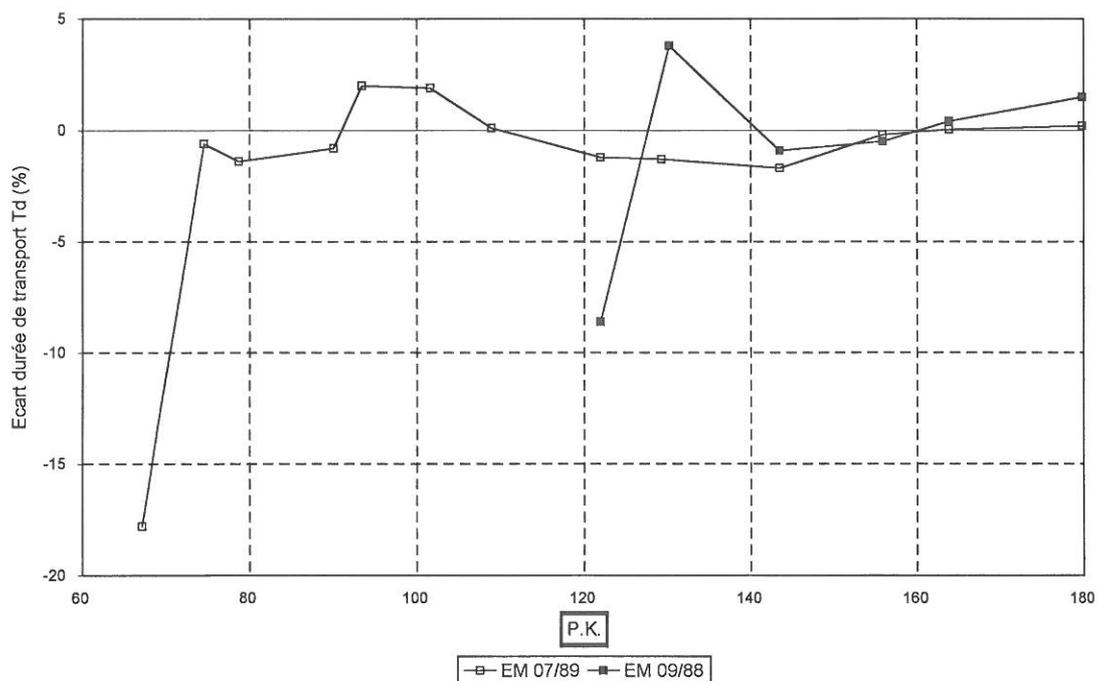


Figure 5.6.2 Ecart en pourcentage entre les durées de transport T_d mesurées et calculées selon l'équation 5.3.3 pour les essais de marquage 09/88 et 07/89 (calibrage)

Etant donné que les écarts de durées de transport sont inférieurs à +/- 5 % pour les débits des essais de marquage utilisés à des fins de vérification, il n'apparaît pas nécessaire pour l'instant de faire un nouveau calibrage et d'adapter le paramètre β .

La vérification a également montré que la forme - entre autres - des tracés de courbes mesurés pouvait assez bien être reproduite. On peut en conclure que les valeurs des constantes de proportionnalité α du coefficient de dispersion entrées actuellement dans le modèle d'alerte pour le Rhin sans tenir compte de la dégradation, n'ont pas besoin d'être adaptées pour l'instant.

En ce qui concerne les essais de marquage pour lesquels on a prévu des mesures de concentrations relativement près du point de déversement, il faudrait procéder aux déversements des substances de traçage dans le milieu du fleuve ou du canal ou sur toute la section transversale. Ceci est démontré par les écarts de durée de transport des substances des essais de marquage de mai 1990 et juillet 1991, qui sont compris entre 5 et 55 % sur les soixante-dix premiers kilomètres après le déversement, et se stabilisent à des valeurs comprises entre - 5 et + 5 % sur la section suivante jusqu'à la frontière néerlandaise.

5.7 Discussion

L'analyse des valeurs déterminées pour le paramètre β de zones d'eaux stagnantes a montré que pour bien évaluer ce paramètre, il est impératif de parfaitement connaître les débits dans les sections concernées. Cette condition n'est pas toujours remplie, en particulier pour la section du Rhin supérieur régulée entre Bâle et Plittersdorf. Le modèle d'alerte pour le Rhin a une limite: en effet, les débits sur cette section sont rapportés au débit de l'échelle de Rheinfelden, ce qui conditionne les temps d'écoulement. On pourrait nettement améliorer le modèle d'alerte en entrant directement les débits sur cette sous-section (par exemple les débits de l'échelle Kehl-Kronenhof).

Les écarts entre durées de transport mesurées et calculées déterminés pour l'essai de marquage 09/90 montrent que le paramètre β doit être supérieur en cas de basses eaux, alors que le modèle d'alerte a été calibré pour des eaux moyennes. Les différences déterminées lors de l'essai de marquage 06/91 montrent d'autre part que le paramètre β doit être inférieur en cas d'augmentation du débit sur la section du Rhin supérieur, et sur toute la section aval de Bâle aux Pays-Bas. Ceci est vrai même lorsque le débit sur les sections du Rhin moyen et inférieur est inférieur au débit utilisé à des fins de calibrage dans l'essai de marquage. Il paraît envisageable de faire une analyse détaillée pour déterminer si les écarts de durée de transport des substances sur la section du Rhin supérieur ont également une incidence sur les écarts constatés en aval de Plittersdorf.

Sur la section du canal latéral du Rhin, le temps d'écoulement est influencé non seulement par des zones d'eaux stagnantes, mais aussi par le régime seuil en cas de faibles débits. En période de basses eaux, le régime seuil retarde plus la propagation des traceurs qu'en période d'eaux moyennes, ce qui correspond à une valeur β plus élevée pour des basses eaux. Seule l'analyse d'informations détaillées sur les débits pendant les essais de traçage permettra de savoir si le régime seuil est le seul responsable des écarts sur la section du Rhin supérieur jusqu'à Plittersdorf.

Pour les bras du Rhin néerlandais, on est parti de l'hypothèse d'une répartition fixe des débits sur la Waal, l'IJssel et le Lek par rapport à l'échelle de Lobith. Pour cette section également, il est recommandé de partir des stations de mesure du niveau d'eau dans les sections du fleuve étudiées. Les tableaux de temps d'écoulement ne devraient non plus être basés sur le niveau d'eau à Lobith, mais sur le niveau d'eau de l'échelle concernée. Pour la Waal, il est possible d'opter pour la station de mesure de Tiel, de Deventer et/ou Kampen pour l'IJssel, et d'Hagestein pour le Lek.

La mise en oeuvre du modèle appelle encore la remarque suivante:

1. Lorsque l'on déverse une substance dans un fleuve, le tracé de la courbe chronologique de la concentration est partiellement déterminé à une distance relativement courte du point de déversement par le mode de déversement et l'emplacement du point de déversement sur la section (zone de forts courants ou d'eaux stagnantes). Ceci - entre autres particularités naturelles et artificielles - a une incidence sur l'évolution des concentrations de traceurs. On distingue la plupart du temps ces effets "near-field" des effets "far-field". On parle d'effets "far-field" lorsque le coefficient de dispersion a été élaboré au moins approximativement selon le modèle de dispersion de Taylor (paragraphe 5.2). Dans le modèle d'alerte, on part de l'hypothèse que cette condition "far-field" s'applique immédiatement après le déversement. Les résultats du modèle ne sont donc que partiellement utilisables pour cette section directement en aval du point de déversement.

2. En cas de débits non stationnaires, les prévisions de concentration du modèle d'alerte ne sont valables que pour de courtes périodes.
3. En cas de substances dégradables, la précision de prévision des concentrations maxima est très limitée.

5.8 Liste des abréviations

Station de mesure du niveau d'eau

Rf	:	Rheinfelden
Pl	:	Plittersdorf
Max	:	Maxau
Sp	:	Spire
Wo	:	Worms
Ma	:	Mayence
Ka	:	Kaub
Ko	:	Coblence
An	:	Andernach
Bo	:	Bonn
Koe	:	Cologne
Due	:	Düsseldorf
Ru	:	Ruhrort
We	:	Wesel
Re	:	Rees
Lo	:	Lobith

Débits

MNQ	:	Débit moyen de basses eaux
MQ	:	Débit moyen ou module hydrologique
MHQ	:	Débit moyen de hautes eaux

Essais de marquage

MV 09/88	:	Essai de marquage septembre 1988 (Albbruck - Bâle)
MV 11/88	:	Essai de marquage novembre 1988 (Bâle - Strasbourg)
MV 04/89	:	Essai de marquage avril 1989 (Village Neuf - Pays-Bas)
MV 07/89	:	Essai de marquage juillet 1989 (Rhinau - Bâle)
MV 05/90	:	Essai de marquage mai 1990 (Bâle - Pays-Bas)
MV 09/90	:	Essai de marquage septembre 1990 (Village Neuf - Pays-Bas)
MV 06/91	:	Essai de marquage juin 1991 (Village Neuf - Pays-Bas)
MV 07/91	:	Essai de marquage juillet 1991 (Bâle - Bimmen)

5.9 Bibliographie

- Adler, M. (1990) : Fließzeiten in der Mosel aus Wasserspiegellagenberechnungen, BfG - 0532, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Coblence
- Bremicker, M. (1989) : Verfahren zur Analyse und Simulation der Stoffausbreitung in Fliessgewässern, Diplomarbeit am Institut für Physische Geographie, Chaire d'Hydrologie, Université de Fribourg
- Chatwin, P.C. (1980) : Presentation of longitudinal dispersion data, Proc. ASCE J. Hydr. Div. 106 HY1, pages 71 - 83
- Craenenbroek, W. van, J. Marivoet et P. Stas (1985) : Gestion des eaux et dispersion dans le canal Albert et dans les canaux campinois (en néerlandais), Université Libre de Bruxelles, Service d'Hydrologie

- Fischer, H.B., E.J. List, R.C.Y. Koh, J. Imberger et N.H. Brooks (1979) : Mixing in inland and coastal waters, Academic Press, New York
- Gelhar, L.W. et M.A. Collins (1971) : General analysis of longitudinal dispersion in non uniform flow, Water Resources Research, Volume 7, n° 6
- Griffioen, P.S. (1989) : Modèle d'alerte pour le Rhin, comité commun d'experts CHR/CIPR, rapport CHR n° II-2
- Leibundgut, Ch., J. Petermann, B. Schudel, M. Gossauer et D. Morgenthaler (1989) : Markiersversuch Rhein "Rheinau - Basel", Université de Berne, Institut de Géographie, en collaboration avec Naturaqua
- Mazijk, A. van, R.M. Noppeney, T. van Ellen et P. Verwoerd (1989) : Analyse de sensibilité du modèle d'alerte pour le Rhin (version néerlandaise), Communication n° 27 de l'U.E.R. Techniques de santé et Gestion des eaux de la Faculté de Techniques Civiles de l'Université de Delft en collaboration avec le Rijkswaterstaat, Service des eaux intérieures/RIZA, mai 1989
- Mazijk, A. van (1989): Analyse de sensibilité du modèle d'alerte pour le Rhin. Faculté de Techniques Civiles de l'Université de Delft, U.E.R. Techniques de santé et Gestion des eaux de la Faculté de Techniques Civiles de l'Université de Delft en collaboration avec le Rijkswaterstaat, Service des eaux intérieures/RIZA, mai 1989
- Mazijk, A. van, P. Verwoerd et J.M.C van Mierlo (1991) : Calibrage du modèle d'alerte pour le Rhin à partir de l'essai de traçage 04/89 Village-Neuf - Pays-Bas. Faculté de Techniques Civiles de l'Université de Delft, U.E.R. Techniques de santé et Gestion des eaux de la Faculté de Techniques Civiles de l'Université de Delft et Rijkswaterstaat, Institut de l'aménagement des eaux intérieures et de l'épuration des eaux usées RIZA, mars 1991
- Mazijk, A. van et J.M.C. van Mierlo (1991) : Calibrage du modèle d'alerte pour le Rhin à partir de l'essai de traçage 09/88 Albruck - Bâle. Faculté de Techniques Civiles de l'Université de Delft, U.E.R. Techniques de santé et Gestion des eaux de la Faculté de Techniques Civiles de l'Université de Delft et Rijkswaterstaat, Institut de l'aménagement des eaux intérieures et de l'épuration des eaux usées RIZA, mars 1991
- Mazijk, A. van et J.M.C. van Mierlo (1991) : Calibrage du modèle d'alerte pour le Rhin à partir de l'essai de traçage 07/89 Rhinau - Bâle. Faculté de Techniques Civiles de l'Université de Delft, U.E.R. Techniques de santé et Gestion des eaux de la Faculté de Techniques Civiles de l'Université de Delft et Rijkswaterstaat, Institut de l'aménagement des eaux intérieures et de l'épuration des eaux usées RIZA, avril 1991
- Mazijk, A. van, J.M.C. van Mierlo et H. Wiesner (1991) : Vérification du modèle d'alerte pour le Rhin version 2.0. Faculté de Techniques Civiles de l'Université de Delft, U.E.R. Techniques de santé et Gestion des eaux de la Faculté de Techniques Civiles de l'Université de Delft, juin 1991
- Mazijk, A van, P. Verwoerd, J.M.C. van Mierlo et H. Wiesner (1991) : Modèle d'alerte pour le Rhin version 2.0, Calibrage et vérification. Groupe d'experts CIPR/CHR, Rapport CHR n° II-4
- Mazijk, A. van (1992) : Nouveau calibrage et vérification de la section du Rhin supérieur dans le modèle d'alerte pour le Rhin, version 2.1, U.E.R. Techniques de santé et Gestion des eaux de la Faculté de Techniques Civiles de l'Université de Delft en collaboration avec le Rijkswaterstaat, Institut de l'aménagement des eaux intérieures et de l'épuration des eaux usées RIZA, juin 1992
- Mazijk, A van et J.M.C. van Mierlo (1992) : Vérification du calibrage du modèle d'alerte pour le Rhin, version 2.1, effectuée à partir de l'essai de traçage 04/89 Village-Neuf - Pays-Bas, Faculté de Techniques Civiles de l'Université de Delft, U.E.R. Techniques de santé et Gestion des eaux de la Faculté de Techniques Civiles de l'Université de Delft, en collaboration avec l'Institut de Géographie physique, Chaire d'Hydrologie, Université de Fribourg

- Mazijk, A. van, J.M.C. van Mierlo, H. Wiesner et Ch. Leibundgut (1992) : Vérification du modèle d'alerte pour le Rhin à partir des essais de traçage 06/91 et 07/91. Faculté de Techniques Civiles de l'Université de Delft, U.E.R. Techniques de santé et Gestion des eaux de la Faculté de Techniques Civiles de l'Université de Delft, en collaboration avec l'Institut de Géographie physique, Chaire d'Hydrologie, Université de Fribourg, décembre 1992
- Nordin, C.F. et B.M. Troutman (1980) : Longitudinal dispersion in rivers: the persistence of skewness in observed data, *Wat.Resources* Volume 16, n° 1, pages 123-128
- Service de la Navigation de Strasbourg (1988) : Essai de traçage du 18 novembre 1988, protocole des données de mesure, Strasbourg
- Service de la Navigation de Strasbourg (1990) : 15 mai 1990, Traçage sur le Rhin, rapport octobre 1990, Strasbourg
- VAW: Laboratoires de Recherches Hydrauliques, Hydrologiques et Glaciologiques de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich (1992): Berechnung von Fliesszeiten in der Aare. Rapport provisoire contenant des résultats partiels, réalisé à la demande du Service hydrologique et géologique national, Berne, 15.3.1992

REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer nos remerciements aux organes dirigeants de la CIPR et de la CHR ainsi qu'aux directeurs des instituts ayant participé à nos travaux, ainsi qu'aux personnes nommées ci-après, qui ont contribué au succès de notre entreprise:

Secrétariats

J.M. Goppel	CIPR
D. Hogervorst	CIPR
F.H.M. van de Ven	CHR
E. Sprokkereef	CHR

Suisse

J. Bichsel R. Bigler A. Geissel A. Jakob B. Schädler	Service hydrologique et géologique national, Office fédéral de l'environnement, de la forêt et du paysage, Berne
--	--

A. Kühne G. Schneider	Laboratoires de Recherches Hydrauliques, Hydrologiques et Glaciologiques de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich
--------------------------	---

J. Petermann B. Schudel	Naturaqua, Berne
----------------------------	------------------

A. Gees M. Gossauer D. Morgenthaler	Groupe d'hydrologie, Institut de Géographie de l'Université de Berne
---	---

Allemagne

M. Bremicker Ch. Leibundgut J.M.C. van Mierlo U. Speidel H. Wiesner	Chaire d'Hydrologie, Institut de Géographie Physique, Université de Fribourg en Brisgau
---	--

M. Adler H. Engel H. Hanisch G. Steinebach	Bundesanstalt für Gewässerkunde, Coblenz
---	--

France

P. Fournaise O. Havas	Service de la Navigation de Strasbourg
--------------------------	--

Pays-Bas

G.J.A.A. Broer P.S. Griffioen A. de Haas H. Klavers	Institut de l'aménagement des eaux intérieures et de l'épuration des eaux usées, Rijkswaterstaat, Lelystad
--	---

J. van Malde

Service des marées, Rijkswaterstaat

A. van Mazijk

Université Technique de Delft, Faculté de Techniques Civiles, Unité d'enseignement et de recherche techniques de santé et gestion des eaux

PUBLICATIONS DE LA CHR

CHR/KHR (1978): Das Rheingebiet, Hydrologische Monographie. Staatsuitgeverij, Den Haag/
Le bassin du Rhin. Monographie Hydrologique. Staatsuitgeverij, La Haye.
ISBN 90-120-1775-0

Rapports de la CHR

- I-1 GREBNER, D. (1982): Objektive quantitative Niederschlagsvorhersagen im Rheingebiet. Stand 1982 (nicht mehr lieferbar)/
Prévisions objectives et quantitatives des précipitations dans le bassin du Rhin. Etat de la question en 1982 (édition épuisée)
- I-2 GERHARD, H.; MADE, J.W. VAN DER; REIFF, J.; VREES, L.P.M. DE (1983): Die Trocken- und Niedrigwasserperiode 1976. (2. Auflage 1985)/
La sécheresse et les basses eaux de 1976 (2ème édition, 1985). ISBN 90-70980-01-0
- I-3 HOFIUS, K. (1985): Hydrologische Untersuchungsgebiete im Rheingebiet/
Bassins de recherches hydrologiques dans le bassin du Rhin. ISBN 90-70980-02-9
- I-4 BUCK, W.; KIPGEN, R.; MADE, J.W. VAN DER; MONTMOLLIN, F. DE; ZETTL, H.; ZUMSTEIN, J.F. (1986): Berechnung von Hoch- und Niedrigwasserwahrscheinlichkeit im Rheingebiet/
Estimation des probabilités de crues et d'étiages dans le bassin du Rhin. ISBN 90-70980-03-7
- I-5 TEUBER, W.; VERAART, A.J. (1986): Abflußermittlung am Rhein im deutsch-niederländischen Grenzbereich/
La détermination des débits du Rhin dans la région frontalière germano-hollandaise.
ISBN 90-70980-04-5
- I-6 TEUBER, W. (1987): Einfluß der Kalibrierung hydrometrischer Meßflügel auf die Unsicherheit der Abflußermittlung. Ergebnisse eines Ringversuchs/
Influence de l'étalonnage des moulinets hydrométriques sur l'incertitude des déterminations de débits. Résultats d'une étude comparative. ISBN 90-70980-05-3
- I-7 MENDEL, H.G. (1988): Beschreibung hydrologischer Vorhersagemodelle im Rheineinzugsgebiet/
Description de modèles de prévision hydrologiques dans le bassin du Rhin. ISBN 90-70980-06-1
- I-8 ENGEL, H.; SCHREIBER, H.; SPREAFICO, M.; TEUBER, W.; ZUMSTEIN, J.F. (1990): Abflußermittlung im Rheingebiet im Bereich der Landesgrenzen/
Détermination des débits dans les régions frontalières du bassin du Rhin. ISBN 90-70980-01-x
- I-9 CHR/KHR (1990): Das Hochwasser 1988 im Rheingebiet/
La crue de 1988 dans le bassin du Rhin. ISBN 90-70980-11-8
- I-10 NIPPES, K.-R. (1991): Bibliographie des Rheingebietes/
Bibliographie du bassin du Rhin. ISBN 90-70980-13-4
- I-11 BUCK, W.; FELKEL, K.; GERHARD, H.; KALWEIT, H.; MALDE, J. VAN; NIPPES, K.-R.; PLOEGER, B.; SCHMITZ, W. (1993): Der Rhein unter der Einwirkung des Menschen – Ausbau, Schifffahrt, Wasserwirtschaft/
Le Rhin sous l'influence de l'homme – Aménagement, navigation, gestion des eaux.
ISBN 90-70980-17-7
- I-12 ADLER, M.; JAKOB, A.; HANISCH, H.; LEIBUNDGUT, CH.; MAZIJK, A. VAN; SPREAFICO, M.; WIENER, H. (1993): Alarmmodell Rhein. Ein Modell für die operationelle Vorhersage des Transportes von Schadstoffen im Rhein. ISBN 90-70980-18-5
- I-13 ADLER, M.; JAKOB, A.; HANISCH, H.; LEIBUNDGUT, CH.; MAZIJK, A. VAN; SPREAFICO, M.; WIENER, H. (1996): Modèle d'alerte pour le Rhin. Modèle pour la prévision opérationnelle de la propagation de produits nocifs dans le Rhin. ISBN 90-70980-23-1
- Katalog/Catalogue 1 SPROKKEREEF, E. (1989): Verzeichnis der für internationale Organisationen wichtigen Meßstellen im Rheingebiet/
Tableau de stations de mesure importantes pour les organismes internationaux dans le bassin du Rhin. ISBN 90-70980-08-8

Rapports sous l'égide de la CHR

- II-1 MADE, J.W. VAN DER (1982): Quantitative Analyse der Abflüsse (nicht mehr lieferbar)/
Analyse quantitative des débits (édition épuisée)
- II-2 GRIFFIOEN, P.S. (1989): Alarmmodell für den Rhein/
Modèle d'alerte pour le Rhin. ISBN 90-70980-07-x
- II-3 SCHRÖDER, U. (1990): Die Hochwasser an Rhein und Mosel im April und Mai 1983/
Les crues sur les bassins du Rhin et de la Moselle en avril et mai 1983. ISBN 90-70980-09-6
- II-4 MAZIJK, A. VAN; VERWOERDT, P.; MIERLO, J. VAN; BREMICKER, M.; WIESNER, H. (1991):
Rheinalarmmodell Version 2.0 – Kalibrierung und Verifikation/
Modèle d'alerte pour le Rhin version 2.0 – Calibration et vérification. ISBN 90-70980-12-6
- II-5 MADE, J.W. VAN DER (1991): Kosten-Nutzen-Analyse für den Entwurf hydrometrischer
Meßnetze/
Analyse des coûts et des bénéfices pour le projet d'un réseau hydrométrique. ISBN 90-70980-14-2
- II-6 CHR/KHR (1992): Contributions to the European workshop Ecological Rehabilitation of
Floodplains, Arnhem, The Netherlands, 22-24 September 1992. ISBN 90-70980-15-0
- II-7 NEMEC, J. (1993): Comparison and selection of existing hydrological models for the simulation
of the dynamic water balance processes in basins of different sizes and on different scales.
ISBN 90-70980-16-9
- II-8 MENDEL, H.G. (1993): Verteilungsfunktionen in der Hydrologie. ISBN 90-70980-19-3
- II-9 WITTE, W.; KRAHE, P.; LIEBSCHER, H.J. (1995): Rekonstruktion der Witterungsverhältnisse im
Mittelrheingebiet von 1000 n. Chr. bis heute anhand historischer hydrologischer Ereignisse.
ISBN 90-70980-20-7
- II-10 WILDENHAHN, E.; KLAHOLZ, U. (1996): Große Speicherseen im Einzugsgebiet des Rheins.
ISBN 90-70980-21-5
- II-11 SPREAFICO, M.; LEHMANN, C.; SCHEMMER, H.; BURGDORFFER, M.; KOS, T.L. (1996):
Feststoffbeobachtung im Rhein, Beschreibung der Messgeräte und Messmethoden.
ISBN 90-70980-22-3

Einige Informationen über die:

**INTERNATIONALE KOMMISSION FÜR
DIE
HYDROLOGIE DES RHEINGEBIETES
(KHR)**

Gründung

1970 Im Rahmen der Internationalen Hydrologischen Dekade (IHD) der UNESCO.

1975 Fortsetzung der Arbeiten im Rahmen des Internationalen Hydrologischen Programms (IHP) der UNESCO und des Operationellen Hydrologie-Programms (OHP) der WMO.

1978 Unterstützung der Arbeiten der Kommission durch Austausch einer Verbal-Note zwischen den mitarbeitenden Ländern.

Aufgaben

- Förderung der Zusammenarbeit hydrologischer Institutionen und Dienste im Einzugsgebiet des Rheins.
- Durchführung von Untersuchungen über die Hydrologie des Rheingebietes und Austausch der Ergebnisse diesbezüglicher Studien.
- Förderung des Austausches von hydrologischen Daten und Informationen im Rheingebiet (z.B. aktuelle Daten, Vorhersagen).
- Entwicklung von standardisierten Verfahren für die Sammlung und Bearbeitung hydrologischer Daten in den Rheinanliegerstaaten.

Mitarbeitende Länder

Schweiz, Österreich, Bundesrepublik Deutschland, Frankreich, Luxemburg, Niederlande

Arbeitsprachen

Deutsch und Französisch

Organisation

Ständige Vertreter (Sitzungen 2mal pro Jahr) unterstützt von einem ständigen Sekretariat. Die Bearbeitung von Projekten wird von Rapporteurs und internationalen Arbeitsgruppen durchgeführt.

Quelques informations sur la:

**COMMISSION INTERNATIONALE DE
L'HYDROLOGIE DU BASSIN DU RHIN
(CHR)**

Institution

1970 Dans le cadre de la Décennie Hydrologique Internationale (DHI) de l'UNESCO.

1975 Poursuite des travaux dans le cadre du Programme Hydrologique International (PHI) de l'UNESCO et du Programme d'Hydrologie Opérationnelle (PHO) de l'OMM.

1978 Appui des travaux de la Commission par l'échange d'une note verbale entre les pays concernés.

Tâches

- Encourager la coopération entre les instituts et les services actifs dans le bassin du Rhin.
- Réalisation d'études hydrologiques dans le bassin du Rhin et échange de résultats des études concernées.
- Encourager l'échange de données et d'informations hydrologiques dans le bassin du Rhin (p.ex. données actuelles, prévisions).
- Elaboration de méthodes standardisées pour la collecte et le traitement des données hydrologiques dans les Etats riverains du Rhin.

Pays participants

la Suisse, l'Autriche, la République Fédérale d'Allemagne, la France, le Luxembourg, les Pays-Bas

Langues de travail

allemand et français

Organisation

Les représentants permanents (réunions deux fois par an) sont soutenus par le secrétariat permanent. Les études sont réalisées par des rapporteurs et des groupes de travail internationaux.

Auswahl der laufenden Arbeiten

»Änderungen im Abflußregime«

- Beschreibung des Einflusses der menschlichen Aktivitäten auf die Rheinabflüsse.
- Bestimmung der Auswirkungen von Bodennutzungs- und Klimaänderungen auf das Abflußregime des Rheins.
- Untersuchungen über Auswirkungen des Waldes auf den Wasserhaushalt.

»Fließzeiten«

- Ermitteln von Fließzeiten und Stofftransport im Rhein zur Verbesserung des Rheinalarmmodells (in Zusammenarbeit mit der IKS).

»Sediment«

- Verbesserung und Standardisierung der Verfahren zur Messung von Schwebstoffgehalten und Bodentransport des Sediments.
- Beschreibung des Sedimenthaushaltes im Fluß.

»Fortschreibung der Monographie«

- Übersicht hydrologischer Daten über die Perioden 1971-1980 und 1981-1990 als Fortsetzung der im Jahre 1978 veröffentlichten Monographie »Das Rheingebiet«.

Fertiggestellte Arbeiten

sie Publikationsliste, Seite 99

Principaux thèmes en cours

«Changements dans le régime des débits»

- Description de l'impact des activités humaines sur le débit du Rhin.
- Détermination des effets des changements du climat et de l'utilisation du sol sur le régime des débits du Rhin.
- Etude de l'influence du forêt sur l'hydrologie.

«Temps d'écoulement»

- Détermination des temps d'écoulement et de transport des substances dans le Rhin pour l'amélioration du modèle d'alerte du Rhin (en collaboration avec la CIPR).

«Sédiments»

- Amélioration et standardisation des méthodes pour la mesure des matières en suspension et du charriage de fond.
- Description de la situation de la sédimentation dans le fleuve.

«Actualisation de la Monographie»

- Données hydrologiques sur les périodes 1971-1980 et 1981-1990 complétant celles de la monographie hydrologique «le Bassin du Rhin» publiée en 1978.

Travaux effectués

voir la liste de publications, page 99

Enige gegevens betreffende de:

Some information on the:

INTERNATIONALE COMMISSIE VOOR DE HYDROLOGIE VAN HET RIJNGEBIED (CHR)

INTERNATIONAL COMMISSION FOR THE HYDROLOGY OF THE RHINE BASIN (CHR)

Oprichting

Foundation

1970 In het kader van het Internationaal Hydrologisch Decennium (IHD) van de UNESCO.

1970 Within the framework of UNESCO's International Hydrological Decade (IHD).

1975 Voortzetting van de werkzaamheden in het kader van het Internationaal Hydrologisch Programma (IHP) van de UNESCO en het Operationeel Hydrologisch Programma (OHP) van de WMO.

1975 Continuation of activities in the framework of UNESCO's International Hydrological Programme (IHP) and the Operational Hydrology Programme (OHP) of WMO.

1978 Ondersteuning van het werk van de Commissie door een nota-uitwisseling tussen de samenwerkende landen.

1978 Support of the Commission's activities by exchange of a verbal note between the participating countries.

Taken

Tasks

- Bevordering van samenwerking tussen hydrologische instituten en diensten in het stroomgebied van de Rijn.
- Uitvoeren van hydrologische studies in het Rijngebied en uitwisseling van de onderzoeksresultaten.
- Bevorderen van de uitwisseling van hydrologische gegevens en informatie in het Rijngebied (bijv. actuele gegevens, voorspellingen).
- Ontwikkeling van standaardmethoden voor het verzamelen en bewerken van hydrologische gegevens in de Rijnsoeverstaten.

- Support of co-operation between hydrological institutes and services active in the catchment area of the Rhine.
- Executing hydrological studies in the Rhine basin and exchange of research results.
- Promoting the exchange of hydrological data and information in the Rhine basin (e.g. current data, forecasts).
- Development of standardized methods for collecting and processing hydrological data in the Rhine riparian states.

Deelnemende landen

Participating countries

Zwitserland, Oostenrijk, Bondsrepubliek Duitsland, Frankrijk, Luxemburg, Nederland

Switzerland, Austria, Federal Republic of Germany, France, Luxemburg, the Netherlands

Voertalen

Working languages

Duits en Frans

German and French

Organisatie

Organization

Vaste vertegenwoordigers (vergaderingen tweemaal per jaar) ondersteund door een permanent secretariaat. Onderzoeken worden door rapporteurs en internationale werkgroepen uitgevoerd.

Permanent representatives (meetings twice a year) supported by a permanent secretariat. Studies are carried out by rapporteurs and international working groups.

Belangrijkste lopende onderzoeken

„Veranderingen in het afvoerregime”

- Beschrijving van de invloed van menselijke activiteiten op de Rijnafoeren
- Bepaling van de invloed van veranderingen in bodemgebruik en klimaat op het afvoerregime van de Rijn.
- Onderzoek naar de invloed van bos op de waterhuishouding.

„Stroomtijden”

- Bepaling van de stroomtijden en stoftransport in de Rijn ter verbetering van het alarmmodel voor de Rijn (in samenwerking met de IRC).

„Sediment”

- Verbetering en standaardisering van meetmethoden voor gehalten aan zwevend materiaal en bodemtransport.
- Beschrijving van de sedimenthuishouding in de rivier.

„Voortzetting Monografie”

- Overzicht van hydrologische gegevens over de perioden 1971-1980 en 1981-1990 als voortzetting van de in 1978 uitgegeven hydrologische monografie „Het stroomgebied van de Rijn”.

Afgesloten onderwerpen

zie lijst van publikaties, blz. 99

Selection of current subjects

‘Changes in the discharge regime’

- Description of the impact of human activities on the Rhine discharges.
- Determination of the effect of changes in land use and climate on the discharge regime of the Rhine.
- Research into the effects of forest on the hydrology of the basin.

‘Travel times’

- Determination of the travel times and constituent transport in the Rhine for the improvement of the alarm model for the Rhine (in cooperation with CIPR/IKSR).

‘Sediment’

- Improvement and standardization of methods to measure suspended load and bed-load transport.
- Description of sediment characteristics of the river.

‘Continuation of the Monograph’

- Hydrological data for the periods 1971-1980 and 1981-1990 as a continuation of the hydrological monograph ‘The Rhine basin’ published in 1978.

Completed projects

see list of publications, p. 99

COLOPHON

Traductions: Isabelle Bonnefond, traductrice, Versailles
E.S. Dykmann, Secrétariat de la CHR
F. de Montmollin, Service hydrologique et géologique national, Berne

Imprimerie: Veenman Drukkers, Wageningen

Papier: Sans chlore

ISBN: 90-70980-23-1

Tableau 4.3.1 Déversement, tronçon étudié, débit et traceurs des essais de marquage 04/89, 09/90, 07/89

Essai de traçage/ Date de déversement	Tronçon (point pk)	Débit moyen lors du déversement (m ³ /s) Limnimètre	Quantité (kg) Traceur employé
MV 04/89 26.04.89	174,1-994,5	1170 Rheinfelden	100 Rhodamine WT
MV 09/90 11.09.90	174,1-951,8	663 Rheinfelden	100 Rhodamine WT
MV 06/91 25.06.91	174,1-951,8	1820 Rheinfelden	100 Rhodamine WT

4.3.2 Débits

Afin de calibrer et de vérifier le modèle d'alerte pour le Rhin, il était prévu d'effectuer des essais de marquage entre Bâle et les Pays-Bas pour un débit du Rhin faible, moyen et plus élevé.

Le débit pour l'essai de marquage 09/90 réalisé en période de basses eaux a débuté à 663 m³/s (Rheinfelden) et a correspondu à un débit d'étiage au cours de l'essai (voir figure 4.3.1); par contre, l'inverse s'est produit pour les expériences de traçage sur le Rhin 04/89 et 06/91. L'essai de marquage prévu pour un débit moyen et commencé au limnimètre de Rheinfelden avec un débit de 1170 m³/s s'est transformé à hauteur de Mayence environ (point kilométrique 498,5) en essai à débit élevé. Par contre, l'essai de marquage 06/91 qui avait commencé à Rheinfelden avec un débit élevé de 1820 m³/s n'a enregistré qu'une très faible augmentation du débit, qui est resté moyen jusqu'à Mayence.

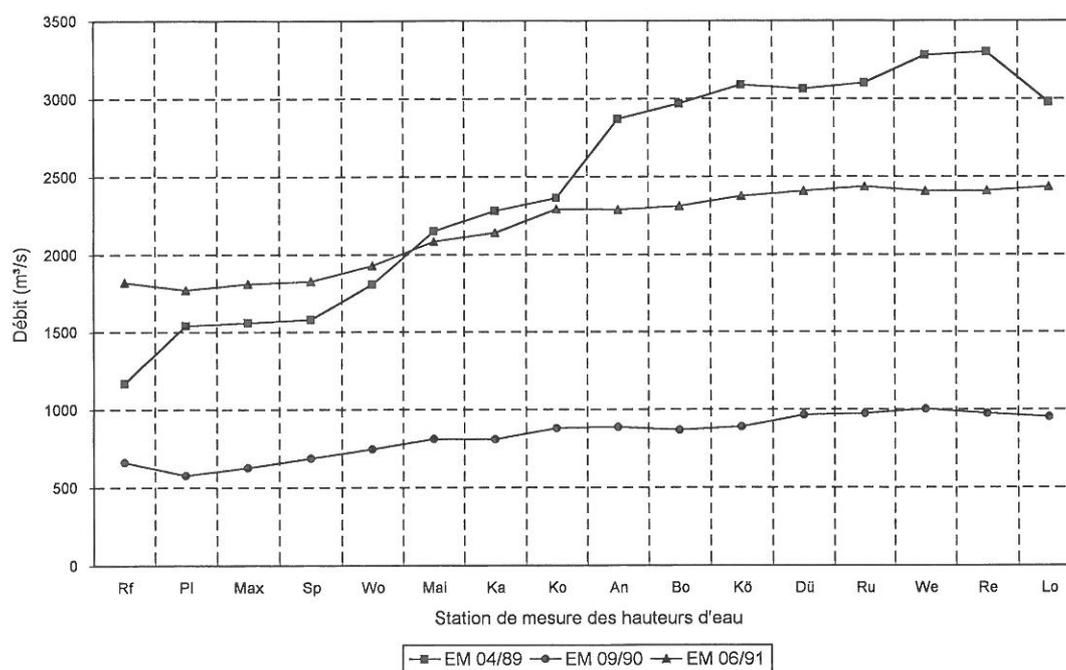


Figure 4.3.1 Débits pendant les essais de marquage 04/89, 09/90 et 06/91

R = Rheinfelden, P = Plittersdorf, Mx = Maxau, S = Spire, W = Worms, M = Mayence, K = Kaub, Ko = Coblenz, A = Andernach, B = Bonn, C = Cologne, D = Düsseldorf, Ru = Ruhrort, W = Wesel, Re = Rees, L = Lobith