

Evaluation de l'hydrodynamique de trois zones de rejet végétalisées par opération de multitraçage

Laboratoire ICube (UMR 7357) - Équipe MécaFlu

Auteurs : J. Laurent, P. Bois, A. Wanko

Juillet 2013



Table des matières

1	Contexte de l'étude	8
1.1	Objectifs	8
1.2	Définition et objectifs des Zones de Rejet Végétalisées	8
1.3	Typologie des ZRV et dimensionnement	9
1.4	Enjeux de la maîtrise de l'hydrodynamique des ZRV	9
1.4.1	Maîtrise de l'hydraulique	10
1.4.2	Maîtrise des temps de séjour	10
1.5	Comment décrire l'hydrodynamique des ZRV ?	11
1.5.1	La Distribution des Temps de Séjour (DTS)	11
1.5.2	Analyse de la DTS modélisation systémique	11
2	Matériel & Méthodes	13
2.1	Sites étudiés	13
2.1.1	Liebsdorf	13
2.1.2	Wahlbach	13
2.1.3	Lutter	13
2.2	Expériences de traçage	15
2.2.1	Injection du traceur	15
2.2.2	Détection du traceur en sortie	15
2.2.3	Limites du protocole proposé	16
3	Résultats	17
3.1	Liebsdorf	17
3.1.1	Débits	17
3.1.2	Concentration du traceur en sortie	18
3.1.3	Distribution des Temps de Séjour (DTS)	20
3.1.4	Paramètres caractérisant l'efficacité hydrodynamique des ZRV	20
3.2	Wahlbach	22
3.2.1	Débits	22
3.2.2	Aspect visuel du traçage	22

3.2.3	Concentration du traceur en sortie	22
3.2.4	Distribution des Temps de Séjour (DTS)	24
3.2.5	Paramètres caractérisant l'efficacité hydrodynamique des ZRV	25
3.3	Lutter	27
3.3.1	Remarque sur le protocole expérimental	27
3.3.2	Débits	27
3.3.3	Aspect visuel du traçage	28
3.3.4	Concentration du traceur en sortie	29
3.3.5	Distribution des Temps de Séjour (DTS)	31
3.3.6	Paramètres caractérisant l'efficacité hydrodynamique des ZRV	32
4	Conclusion	34

Table des figures

1.1	Hydrodynamique d'une zone humide artificielle à écoulement superficiel. Source : [1]	10
1.2	DTS obtenues pour une injection sous forme d'impulsion d'un traceur conservatif. (a) impulsion du traceur en entrée (b) réponse en sortie selon le modèle des réacteurs en cascade pour différents nombres de réacteurs (N) (source : [1] d'après [2])	12
2.1	Evolution de la température et du pH en sortie - ZRV de Lutter	16
3.1	Chronique des débits durant les expériences - ZRV de Liebsdorf. Les couleurs indiquent les durées respectives des 3 expériences : Rose = SRB ; vert : UR ; hachures = sel	17
3.2	Courbe de traçage à la sulforhodamine - ZRV de Liebsdorf	18
3.3	Observation visuelle du traceur dans le regard aval des deux noues	19
3.4	Courbe de traçage à l'uranine - ZRV de Liebsdorf	19
3.5	Courbe de traçage au sel - ZRV de Liebsdorf	20
3.6	Distribution des Temps de Séjour - Traceurs fluorescents - ZRV de Liebsdorf	21
3.7	Chronique des débits durant les expériences - ZRV de Wahlbach. Les couleurs indiquent les durées respectives des 3 expériences : Rose = SRB ; vert : UR ; hachures = sel	22
3.8	Dissipation de la sulforhodamine B dans la ZRV de Wahlbach	23
3.9	Courbe de traçage à la sulforhodamine - ZRV de Wahlbach	23
3.10	Courbe de traçage à l'uranine - ZRV de Wahlbach	24
3.11	Courbe de traçage au sel - ZRV de Wahlbach	24
3.12	Variations de la conductivité de base de l'eau en sortie - ZRV de Wahlbach	25
3.13	Distribution des Temps de Séjour - Traceurs fluorescents - ZRV de Wahlbach	25
3.14	Distribution des Temps de Séjour expérimentale et modélisée par un modèle de réacteur piston à dispersion (nombre de Péclet = 8,6 ; temps de séjour moyen = 0,8 h) - ZRV de Wahlbach	27
3.15	Chronique des débits durant les expériences - ZRV de Lutter. Les couleurs indiquent les durées respectives des 3 expériences : Rose = SRB + UR ; hachures = sel	28
3.16	Dissipation des traceurs fluorescents dans la ZRV de Lutter (a)	28
3.17	Dissipation des traceurs fluorescents dans la ZRV de Lutter (b)	29
3.18	Dissipation des traceurs fluorescents dans la ZRV de Lutter (c)	29

3.19	Courbe de traçage à la sulforhodamine - ZRV de Lutter	30
3.20	Courbe de traçage à l'uranine - ZRV de Lutter	31
3.21	Variations de conductivité en entrée et en sortie - ZRV de Lutter	31
3.22	Distribution des Temps de Séjour - Traceurs fluorescents - ZRV de Lutter	32
4.1	DTS déterminée à partir des traçages à la sulforhodamine pour les 3 ZRV étudiées .	35

Liste des tableaux

2.1	Quantités de traceurs injectées	15
2.2	Paramètres physico-chimiques lors des expériences	15
3.1	Paramètres déterminés à partir des courbes de traçage - ZRV de Liebsdorf	21
3.2	Paramètres déterminés à partir des courbes de traçage - ZRV de Wahlbach	26
3.3	Paramètres déterminés à partir des courbes de traçage - ZRV de Lutter	32

Remerciements Nous souhaitons remercier les membres des collectivités locales de toutes les stations visitées qui nous ont accueillis très chaleureusement lors des sessions de terrain. Cet accueil a grandement participé au bon déroulement de ce travail.

Nous adressons également nos plus vifs remerciements à M. Frédéric TISSERAND du SATESE du Haut-Rhin pour sa disponibilité et sa précieuse assistance lors des expérimentations en ce qui concerne les mesures de débit.

Chapitre 1

Contexte de l'étude

1.1 Objectifs

Dans le cadre de ses travaux sur les Zones de Rejet Végétalisées, l'AERM souhaite des informations concernant les temps de séjour dans 3 ZRV du Haut-Rhin ayant déjà fait l'objet de bilans sur la qualité de leurs effluents. La présente étude a pour objectif d'accéder à un certain nombre de paramètres hydrodynamiques selon les approches systémiques développées en génie des procédés, à savoir la méthode de la Distribution des Temps de Séjour (DTS, méthode de traçage).

1.2 Définition et objectifs des Zones de Rejet Végétalisées

Depuis quelques années, on assiste à l'émergence d'un nouveau type d'ouvrage de traitement complémentaire en aval des filières conventionnelles de traitement des eaux usées. Ces ouvrages relèvent dans leur conception d'une approche davantage liée au génie écologique qu'au génie des procédés. On regroupe ces ouvrages sous le vocable de zones de rejet végétalisées (ZRV). Il est important de noter que les ZRV constituent une application du concept de zone humide artificielle appliqué ici au polissage d'effluent de station d'épuration.

Celles-ci peuvent ainsi se définir comme des espaces aménagés entre la station d'épuration et le milieu récepteur. Elles ne constituent pas une étape propre du dispositif de traitement mais ont pour but de contribuer, dans une certaine mesure, à la réduction des impacts des rejets sur le milieu récepteur. La création de ces milieux humides artificiels est également propice à l'accueil de la biodiversité [3].

Les objectifs attendus d'une ZRV peuvent être décrits par quatre fonctions principales [4] :

- La rétention des boues ou macro-déchets : rétention des MES provenant du by-pass des ouvrages de traitement ou d'un départ de boues accidentel du clarificateur secondaire ;
- La dispersion du rejet : il s'agit de limiter les flux de polluants via une réduction des volumes d'eau rejetés au milieu superficiel. 3 voies sont possibles pour assurer cette réduction de volume : infiltration dans le sol et le sous-sol, évapotranspiration liée aux végétaux, évaporation [5] ;
- Le lissage hydraulique : il s'agit d'atténuer les fortes variations journalières de débit afin d'éviter de perturber l'écoulement du milieu récepteur superficiel (lessivage) ;

- L'abattement complémentaire de la pollution : il s'agit d'affiner l'épuration des eaux traitées. Pour autant, la ZRV ne peut se substituer à un traitement tertiaire conventionnel dans la mesure où les abattements obtenus sont difficiles à quantifier car faibles. Les mécanismes mis en jeu sont les mécanismes de dégradation microbiologique par culture libre et fixée, la rétention et l'exportation de nutriments par les végétaux, la photodégradation, la décantation des matières particulaires... On cherche ainsi à obtenir une réduction des flux de MES, phosphore, azote, germes pathogènes et les substances émergentes et prioritaires (métaux, résidus pharmaceutiques, etc.).

1.3 Typologie des ZRV et dimensionnement

En fonction des objectifs assignés aux ZRV, des surfaces disponibles et des caractéristiques du site d'implantation, les milieux à créer peuvent être très divers. On peut retenir par exemple :

- mare, noue,
- chenal méandreux.

Ces différents types de milieux peuvent être combinés sur un même site et accompagnés d'autres types d'habitats complémentaires tels que des prairies humides, roselières, boisements...[3]. Le document édité par l'Agence Régionale de Protection de l'Environnement PACA [4] propose une méthodologie simple de choix et de conception de ZRV en fonction des mécanismes recherchés.

Cependant, ces recommandations s'appuient essentiellement sur le bon sens et les premiers retours d'expérience observés. Le dimensionnement des ZRV est ainsi à l'heure actuelle limité à une approche empirique, consistant bien souvent à assigner au résiduel d'espace disponible autour de la station le rôle de traiter un flux, plutôt que de déterminer cette surface en fonction des objectifs définis [5]. Par exemple, la brochure éditée par l'Agence de l'Eau Rhin Meuse en 2011 [3] recommande de profiter au maximum des surfaces disponibles ou potentiellement mobilisables (acquisitions foncières possibles). Comme le souligne le point réalisé par [5], la bibliographie, qu'elle soit internationale ou nationale, fournit actuellement encore peu d'éléments quantifiés sur les performances des systèmes : il est impossible de fournir des règles de conception et de dimensionnement précises en fonction des objectifs assignés. La surface ramenée à l'équivalent-habitant constitue le principal paramètre de dimensionnement : selon l'Agence de l'Eau Rhin Meuse [3], les surfaces observées sur différentes ZRV varient de 1 à 3 m² par équivalent-habitant. Il est néanmoins nécessaire d'intégrer dans le dimensionnement de la zone la perméabilité du sol et sous-sol.

1.4 Enjeux de la maîtrise de l'hydrodynamique des ZRV

Les objectifs majeurs d'une ZRV décrits précédemment soulignent l'importance d'une maîtrise des écoulements au sein de ces aménagements :

- Il est évident que les objectifs de lissage des débits et à la réduction des volumes sont directement dépendants des capacités hydrauliques et des flux sortants (capacité d'infiltration du sol, évaporation, évapotranspiration).
- L'optimisation de l'abattement des polluants passe, outre une maîtrise des processus physico-chimiques de leur dégradation et rétention, par une optimisation du temps de séjour de ces composés dans le système.

1.4.1 Maîtrise de l'hydraulique

Les apports en eau sont parfois tellement rapides du fait des débits instantanés apportés qu'ils conduisent à des ravinements localisés au sein même de la zone de dissipation ou dans les berges adjacentes à l'exutoire que l'on envisageait de protéger. Il est nécessaire d'établir des règles de conception pour y remédier [5].

1.4.2 Maîtrise des temps de séjour

Afin d'obtenir une évolution favorable de la qualité des eaux, il est conseillé d'accroître les temps de contact et de séjour en favorisant un écoulement lent et tout en évitant les zones « mortes ». Dans la mesure où les mécanismes de dégradation, d'adsorption et d'absorption des polluants au sein des zones humides artificielles sont régis par des cinétiques réactionnelles, le devenir des polluants sera dépendant du temps de séjour hydraulique (TSH) au sein des ouvrages [1]. Le TSH d'une particule correspond au temps durant lequel celle-ci va demeurer dans le système considéré. Ce paramètre constitue dès lors un paramètre critique pour le dimensionnement des ZRV. Ainsi, au sein de zones humides artificielles utilisées pour le traitement des eaux usées, le temps de séjour hydraulique est corrélé avec les abattements obtenus [6, 7, 6].

Dans la pratique, le dimensionnement des zones humides artificielles est alors le plus souvent basé sur le temps de séjour théorique défini par le rapport volume/débit d'alimentation. Cette approche sous-entend que l'écoulement est uniforme sur l'ensemble du bassin, ce qui est rarement le cas. En raisonnant d'après des concepts et équations de la mécanique des fluides, les conditions d'écoulements au sein des zones humides artificielles à écoulement superficiel peuvent être schématisées comme sur la figure 1.1.

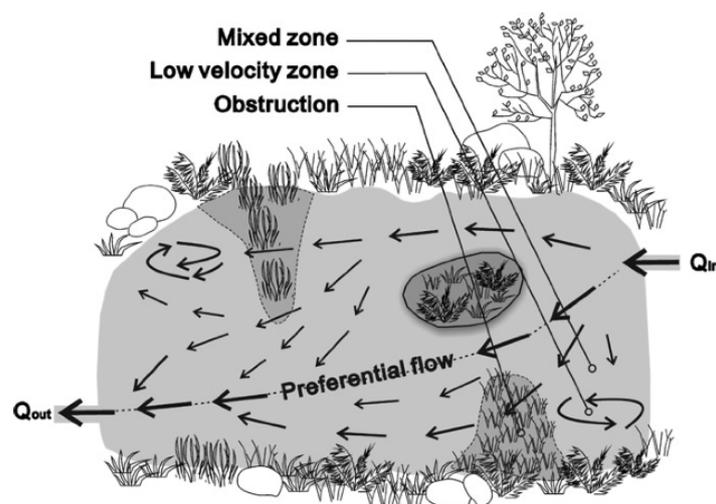


FIGURE 1.1 – Hydrodynamique d'une zone humide artificielle à écoulement superficiel. Source : [1]

En raison de l'écoulement non uniforme, on voit ainsi apparaître des chemins préférentiels, des zones agitées, des zones mortes, des recirculations internes, etc. Dans la mesure où les transferts de matière sont limités entre les zones mortes et le reste de l'ouvrage, l'efficacité de ce dernier peut être affectée [1].

De manière générale, les facteurs conduisant aux écoulements non-idéaux sont variés. On peut principalement citer [8] :

- Différences de température : quand l'eau pénétrant dans le réacteur est significativement plus froide ou plus chaude que l'eau déjà présente dans le système, une portion de l'eau peut se diriger directement vers la sortie du réacteur sans se mélanger complètement ;
- Recirculations dues au vent : dans les réacteurs peu profonds (par exemple, lagunage naturel), les frottements de surface liés au vent peuvent conduire au transport rapide d'une portion de l'eau entrante vers la sortie ;
- Mélange inadapté : sans un apport d'énergie suffisant, des zones mortes peuvent apparaître ;
- Conception inadaptée : la position des entrées et sorties et la géométrie (rapports largeur / longueur / hauteur) du réacteur sont autant de facteurs pouvant conduire à des zones mortes ;
- Dispersion : au sein des réacteurs, le mouvement d'un composé est du à l'advection (transport du composé avec le liquide) et à la dispersion. Ce dernier terme est utilisé pour décrire le transport axial et longitudinal de matière du à la fois à des différences de vitesse, à la turbulence et à la diffusion moléculaire.

1.5 Comment décrire l'hydrodynamique des ZRV ?

Si très peu de données sont disponibles dans la littérature concernant les ZRV, des ouvrages au fonctionnement hydraulique relativement similaire ont été étudiés depuis une trentaine d'années. Il s'agit des zones humides artificielles à écoulement superficiel, des systèmes de lagunage (en anglais : « free surface flow constructed wetlands », « waste stabilization ponds », « lagoons »), etc. Il est alors envisageable d'adapter et d'améliorer les approches utilisées au cas spécifique des ZRV.

1.5.1 La Distribution des Temps de Séjour (DTS)

Une méthodologie d'étude fondée sur les concepts du génie de la réaction chimique permet d'obtenir des informations importantes sur le comportement hydrodynamique des zones humides artificielles. Ainsi, en traitant ces dernières comme des réacteurs, il est possible d'y décrire et modéliser les écoulements [2]. L'injection sous forme d'impulsion d'un traceur conservatif (rhodamine, chlorure de lithium. . .) à l'entrée de l'ouvrage permet, via la mesure de la réponse en sortie à cette impulsion, d'obtenir la Distribution des Temps de Séjour (DTS). Les conditions d'écoulement dans la zone humide artificielle sont alors décrites par cette DTS. La Figure 1.2 montre des DTS théoriquement obtenues pour une zone humide artificielle pouvant être représentée par une cascade de réacteurs parfaitement agités.

1.5.2 Analyse de la DTS modélisation systémique

La DTS présente la distribution des temps qu'une particule fluide peut mettre pour traverser le réacteur, de l'entrée à la sortie. La distribution de temps de séjour est un paramètre caractéristique d'un réacteur et, plus généralement, de tout aménagement au sein duquel se déroulent des réactions chimiques, physiques ou biologiques. L'analyse de la DTS permet de diagnostiquer/quantifier :

- Le temps de séjour moyen ;
- La variance de la distribution ;
- La dispersion au sein du réacteur ;

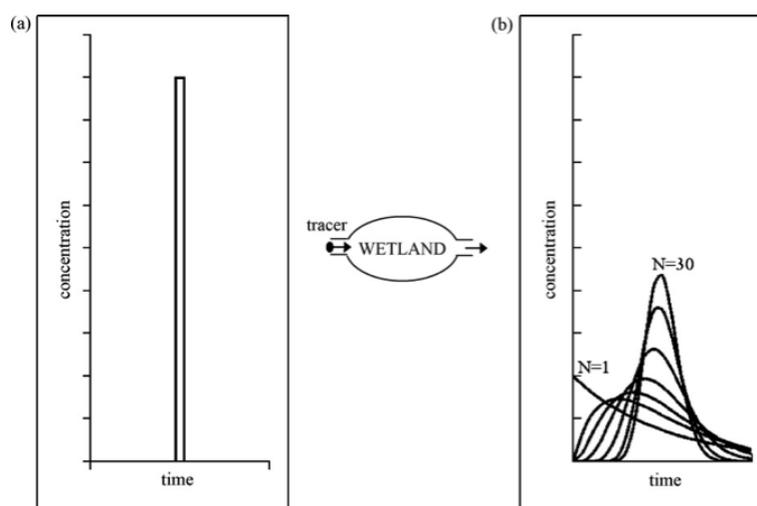


FIGURE 1.2 – DTS obtenues pour une injection sous forme d'impulsion d'un traceur conservatif. (a) impulsion du traceur en entrée (b) réponse en sortie selon le modèle des réacteurs en cascade pour différents n ombres de réacteurs (N) (source : [1] d'après [2])

- Les courts-circuits hydrauliques ;
- Les zones mortes ;
- Les recirculations internes.

La plupart des réacteurs peuvent alors être modélisés par un assemblage, en série et en parallèle, de réacteurs idéaux (réacteurs parfaitement agités (RPA) et réacteurs piston (RP)) [9] : c'est ce qu'on appelle la modélisation systémique. Une fois le modèle systémique construit, il est aisé d'y greffer le module décrivant les diverses cinétiques réactionnelles identifiées au sein du système étudié (ici la ZRV).

Le RPA représente un réacteur dans lequel toutes les grandeurs sont homogènes au sein du volume réactionnel alors que le RP représente un réacteur dans lequel il n'y a aucun mélange. Les DTS de ces deux types de réacteurs sont connues et s'expriment en fonction du temps de séjour théorique (rapport volume/débit).

Les réacteurs réels ont le plus souvent un comportement se situant entre ces deux réacteurs idéaux. Deux modèles de réacteurs non-idéaux sont possibles :

- Le modèle piston à dispersion axiale : ce modèle est fondé sur l'équation de transport par advection et dispersion (mélange longitudinal et/ou axial). Les deux paramètres des DTS issues de ce modèle sont le temps de séjour moyen et le coefficient de dispersion. Le rapport entre transport par advection et dispersion est usuellement décrit par un nombre adimensionnel caractéristique du réacteur : le nombre de Péclet.
- Le modèle de cascade de réacteurs parfaitement agités : ce modèle considère une série de RPA, ce qui permet d'approcher le caractère non homogène du mélange. Deux paramètres caractérisent les DTS issues de ces réacteurs : le temps de séjour moyen et le nombre de RPA en cascade. Une équivalence entre le nombre de Péclet du modèle à dispersion axiale et le nombre de RPA en cascade est possible lorsque la dispersion est assez faible [9].

Chapitre 2

Matériel & Méthodes

2.1 Sites étudiés

2.1.1 Liebsdorf

Cette ZRV est constituée de deux noues aux dimensions identiques en parallèle. La ZRV a été réalisée en déblais. L'étanchéité du fond est assurée par le sol en place. Le débit arrivant aux noues est divisé grâce à un regard de répartition situé à l'aval. Il se répartit *a priori* (constatation visuelle) de la façon suivante : un tiers pour la noue la plus éloignée du rejet et deux tiers pour la noue la plus proche du rejet. La ZRV a été construite en profitant du sol initialement en place. Les vitesses d'écoulement sont *a priori* inférieures à 0,3 m/s et les berges sont sinueuses. Des plantes locales et adaptées aux milieux humides ont été plantées. Le volume estimé des deux noues est de 50 m³ [10].

2.1.2 Wahlbach

Cette ZRV est constituée de deux noues. Le débit issu du second étage de filtration est divisé en deux parties *a priori* égales pour alimenter les deux noues. Les berges sont sinueuses[10].

Les expériences de traçage ont été réalisées le 10 juillet 2013. A cette date, la morphologie de la ZRV était encore très impactée par une inondation importante qui a eu lieu le 9 juin 2013 : suite à un orage violent, le cours d'eau dans lequel les effluents de la station sont rejetés (le Steinbach) a débordé et submergé l'ensemble de la ZRV. Cela a modifié de manière considérable le couvert végétal et provoqué un dépôt très important de limon. Ce dernier a provoqué un comblement partiel de l'entrée d'une des deux noues, y empêchant de manière quasi-totale tout écoulement. Les résultats présentés dans ce rapport concernent dès lors l'hydrodynamique d'une seule des deux noues recevant l'ensemble du débit.

2.1.3 Lutter

La ZRV est constituée d'une mare artificielle. Elle a été réalisée en déblais. L'étanchéité du fond (nécessaire pour obtenir un milieu en eau de façon permanente) a été assurée par la mise en place d'une couche d'argile compte tenu d'une perméabilité du sol en place relativement importante. La zone a été construite avec des berges à pente douce. Le sol a été imperméabilisé avec de l'argile et le fond de la mare a été plantée avec des plantes adaptées aux milieux humides. Les berges sont sinueuses et la profondeur est variée. Ces aménagements ont eu pour effets observables quelques

mois après les travaux, la mise en place de milieux diversifiés avec des zones sèches de haut de berge, des milieux humides de transition en suivant le profil en pente douce des berges et des zones aquatiques au centre de la zone [10].

2.2 Expériences de traçage

2.2.1 Injection du traceur

Les expériences de traçage se sont déroulées les 3-4 juillet (Liebsdorf), 10 juillet (Wahlbach) et 31 juillet-1er août (Lutter).

Pour chaque site, 3 traceurs différents ont été utilisés :

- la fluorescéine ou uranine (UR, $C_{20}H_{10}Na_2O_5$)
- la sulforhodamine B (SRB, $C_{27}H_{29}N_2NaO_7S_2$)
- le chlorure de sodium ($NaCl$)

Pour chaque expérience, l'injection de traceur est réalisée sous forme d'impulsion (injection de toute la quantité de traceur pendant un temps très court). Pour toutes les ZRV étudiées, cette injection a été réalisée au niveau du regard amont juste en aval du Venturi.

Pour chaque ZRV, les quantités de traceurs injectées sont reportées dans le tableau 2.1. L'uranine, la sulforhodamine B et le sel ont été préalablement dilués dans respectivement 1L, 10L et 150L d'eau du réseau (Wahlbach) ou de sortie de la ZRV (Liebsdorf).

	Liebsdorf	Wahlbach	Lutter
UR (g)	0,99	0,99	15
SRB (g)	10	8	100
NaCl (kg)	25	25	25

TABLE 2.1 – Quantités de traceurs injectées

2.2.2 Détection du traceur en sortie

Pour détecter les traceurs en sortie, le choix de mesures in-situ via des capteurs de terrains a été réalisé. La conductivité a été mesurée à l'aide de conductimètres YSI 6-series ou WTW Multiline P4 et reliée à la concentration en NaCl. Les analyses des traceurs fluorescents ont été réalisées à l'aide d'un fluorimètre de terrain GGUN-FL 30 [11]. L'étalonnage du fluorimètre de terrain a systématiquement été réalisé sur site en diluant des quantités connues de traceurs dans l'eau de sortie de la ZRV, ceci afin de tenir compte de l'influence des caractéristiques physico-chimiques des eaux étudiées (pH, température...). La constance du pH et de la température de l'eau durant l'expérience a été vérifiée par des mesures en continu durant l'expérience (tableau 2.2).

	Liebsdorf	Wahlbach	Lutter
pH	7,19 ± 0,03	7,42 ± 0,16	7,04 ± 0,09
Température (°C)	13,3 ± 0,4	19,2 ± 2,1	21,7 ± 2,4

TABLE 2.2 – Paramètres physico-chimiques lors des expériences

La configuration de la ZRV de Lutter (surface importante, long temps de séjour) en fait un ouvrage sujet aux variations thermiques liées à l'ensoleillement. Ainsi, des variations journalières corrélées aux heures les plus chaudes de la journée ont été constatées avec une amplitude allant de 17,9 à 26,4 °C (2.1) :

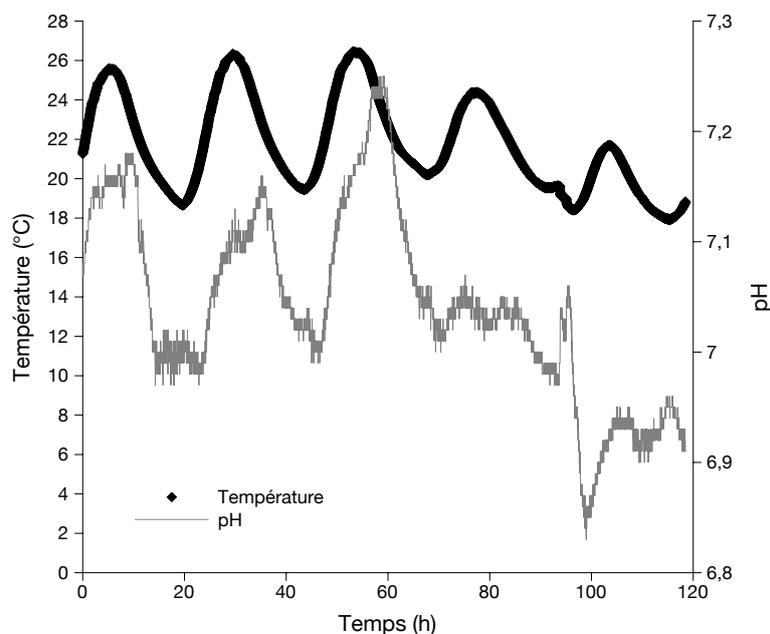


FIGURE 2.1 – Evolution de la température et du pH en sortie - ZRV de Lutter

2.2.3 Limites du protocole proposé

Pour des études de traçages sur sites réels comme celles présentées dans ce document, il convient d'avoir conscience des limites posées par les conditions expérimentales. La théorie de l'hydrodynamique des réacteurs [2, 9] suppose la constance du débit d'alimentation et le caractère conservatif de l'écoulement. Dans le cas des zones de rejet végétalisées étudiées, il est important d'examiner et avoir conscience de ces limites pour l'interprétation des résultats de traçages :

- en entrée de ZRV, le débit est relativement lissé par le passage de l'effluent à travers les deux premiers étages de filtres plantés de roseaux. Pour chaque expérience, les chroniques des débits seront présentés (voir sections 3.1.1 et 3.2.1). La validité relative de l'hypothèse de constance du débit a été vérifiée par calculs respectifs des taux de restitution du traceurs prenant en compte le débit variant au cours du temps et prenant en compte le débit moyen : dans tous les cas, la différence est inférieure à 5%. l'hypothèse de constance du débit a donc été considérée comme validée.
- l'hypothèse de conservation du débit n'est pas validée dans la mesure où des apports d'eau significatifs (10 à 13% du débit sortant des ZRV) ont été constatés sur les ZRV de Liebsdorf et Wahlbach. Cependant, dans la mesure où il s'agit d'un apport d'eau, il n'y a pas de perte de traceur mais simplement une dilution, le bilan masse des traceurs fluorescents est d'ailleurs toujours proche de 100%. Pour le sel, les bilans ne sont pas bouclés systématiquement mais pour d'autres raisons qui sont évoquées dans les résultats.
- lors d'un traçage, la récupération d'un traceur conservatif doit être totale pour assurer la validité des résultats présentés. Les incertitudes et biais introduits par les expériences de terrain ont amené des taux parfois inférieurs mais toujours supérieurs à 80%. Les valeurs calculées à partir des courbes de traçage et DTS correspondantes sont par conséquent valables pour la fraction totale de traceur récupérée en fin d'expérience.

Chapitre 3

Résultats

3.1 Liebsdorf

3.1.1 Débits

Le débit moyen mesuré en amont de la ZRV est de $3 \text{ m}^3/h$. Celui en aval est de $3,4 \text{ m}^3/h$. Il y a donc une augmentation du débit en sortie de la ZRV. Ce phénomène est observé de façon récurrente sur cette ZRV par le SATESE 68. Vu la topographie du site, une exfiltration d'eau est supposée.

La figure 3.1 présente la chronique des débits en sortie de la ZRV durant les expériences de traçages.

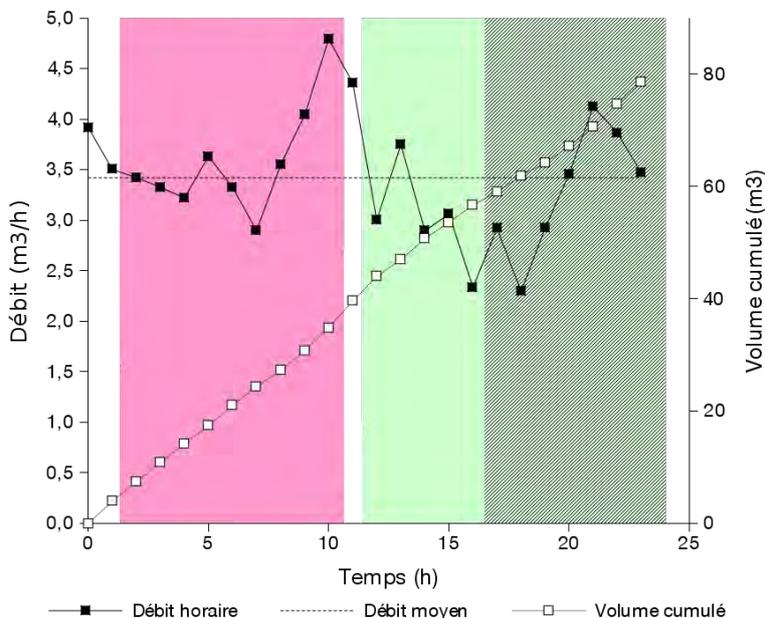


FIGURE 3.1 – Chronique des débits durant les expériences - ZRV de Liebsdorf. Les couleurs indiquent les durées respectives des 3 expériences : Rose = SRB ; vert : UR ; hachures = sel

Les débits moyens durant les expériences sont respectivement de $3,6 \text{ m}^3/h$, $3,27 \text{ m}^3/h$ et $3,17 \text{ m}^3/h$ pour les expériences à la sulforhodamine, à l'uranine et au sel respectivement.

3.1.2 Concentration du traceur en sortie

Traçage à la sulforhodamine B

La courbe de traçage présentée sur la figure 3.2 présente plusieurs caractéristiques :

- le temps au bout duquel le traceur est détecté pour la première fois en sortie est de 41 min ;
- elle présente un seul pic relativement étroit caractéristique d'un écoulement assimilable à un réacteur piston avec dispersion axiale ;
- peu avant un temps de 2h suivant l'injection, on observe sur le pic un épaulement. Cet épaulement correspond en fait à un deuxième pic confondu avec le premier. On a donc deux flux en parallèle résultant du partage inégal du débit à l'entrée des deux noues. Les constatations visuelles au niveau du regard aval des deux noues (figure 3.3) ont en effet montré que le traceur sortait de la noue la plus éloignée de la sortie après la noue la plus en aval.
- une trainée relativement importante est observée. Cette trainée est significative d'échanges lents (à caractère plutôt diffusif) entre différentes zones des noues étudiées. Parmi les causes potentielles, on peut citer : présence de zones stagnantes (par exemple à proximité des berges), impact de la végétation, etc.

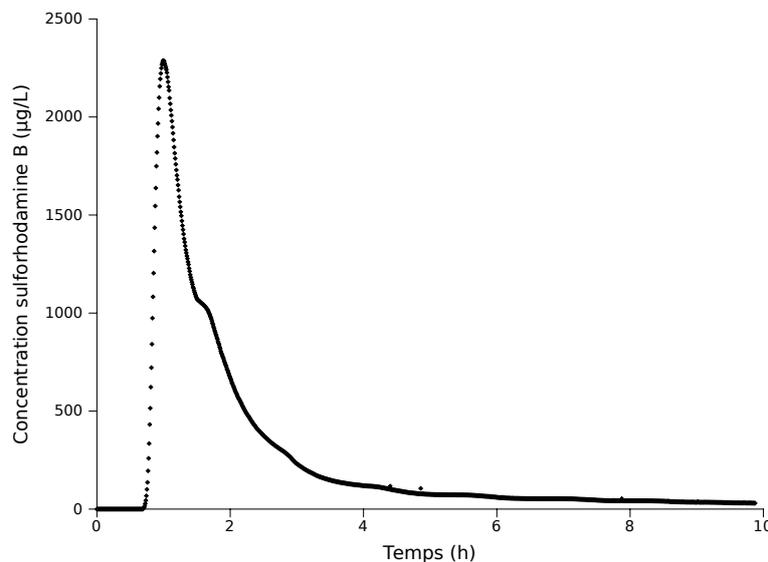


FIGURE 3.2 – Courbe de traçage à la sulforhodamine - ZRV de Liebsdorf

Traçage à l'uranine

La courbe de traçage présentée sur la figure 3.4 présente plusieurs caractéristiques :

- le temps au bout duquel le traceur est détecté pour la première fois en sortie est de 50 min ;
- elle présente un seul pic relativement étroit caractéristique d'un écoulement assimilable à un réacteur piston avec dispersion axiale ;
- on observe de manière beaucoup plus limitée que pour la sulforhodamine B l'épaulement sur la courbe correspondant à l'arrivée du pic lié à la noue la moins alimentée. Le débit d'alimentation des deux noues lors de l'expérience avec l'uranine étant plus faible que lors de l'expérience à la sulforhodamine B, on peut supposer que la répartition du débit d'entrée entre les deux noues est variable dans une certaine mesure avec le débit d'entrée ;



FIGURE 3.3 – Observation visuelle du traceur dans le regard aval des deux noues

- le haut du pic est légèrement "coupé" à son extrémité supérieure, cela est dû à une saturation temporaire de la gamme de mesure du fluorimètre ;
- une trainée relativement importante est observée. Cette trainée est significative d'échanges lents (à caractère plutôt diffusif) entre différentes zones des noues étudiées. Parmi les causes potentielles, on peut citer : présence de zones stagnantes (par exemple à proximité des berges), impact de la végétation, etc.

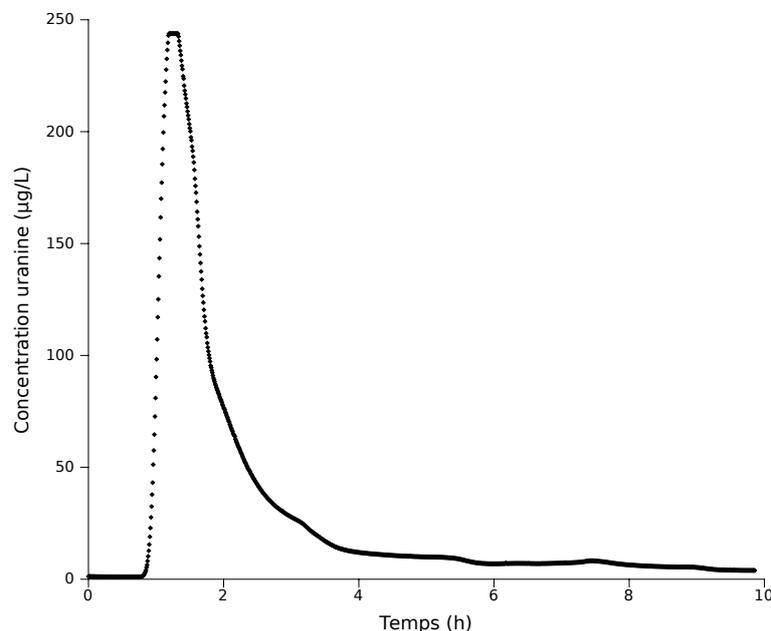


FIGURE 3.4 – Courbe de traçage à l'uranine - ZRV de Liebsdorf

Traçage au chlorure de sodium

Comme pour les deux traceurs fluorescents, on observe un pic relativement étroit comportant un léger épaulement suivi d'une trainée (figure 3.5). Cependant, on observe plusieurs différences majeurs : le temps d'apparition du premier traceur est beaucoup plus élevé (5400 s au lieu de 2500

à 3000 s). Le débit plus faible lors de l'expérience au sel ne suffit pas à expliquer cette observation. De plus, la trainée est bien plus longue que pour les deux autres expériences et conduit à un temps de séjour moyen de 7h. L'expérience a du être interrompue alors que la trainée était encore en cours, expliquant le faible taux de récupération observé (tableau 3.1). L'extrapolation de la courbe n'est pas satisfaisante. On peut expliquer ces problèmes par des effets bien connus du sel lors des expériences de traçages : problèmes de dissolution (tout le sel n'ayant pas été dissous de manière satisfaisante dans les 150L de solution) et surtout problèmes de densité de l'eau salée : celle-ci étant plus dense que l'eau alimentant la noue, les propriétés de l'écoulement s'en trouvent avec très probablement une stagnation dans les zones profondes ou à faible vitesse.

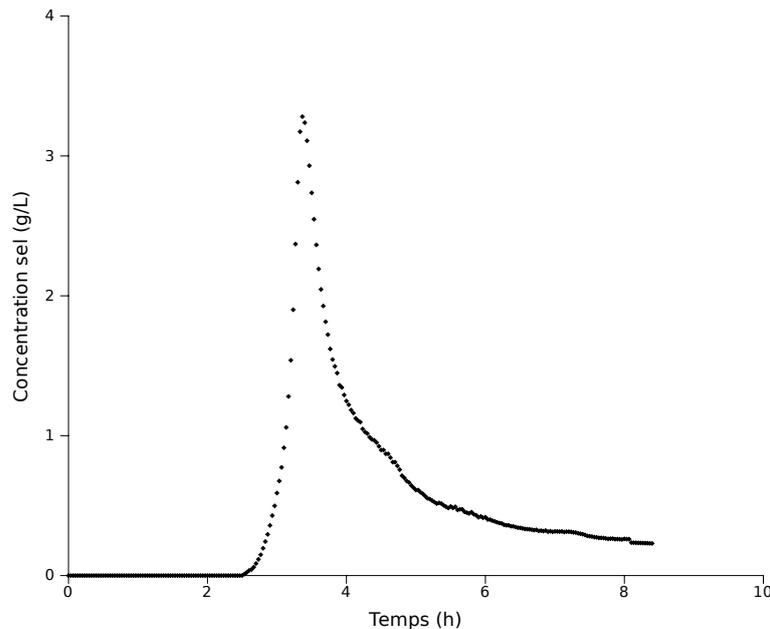


FIGURE 3.5 – Courbe de traçage au sel - ZRV de Liebsdorf

3.1.3 Distribution des Temps de Séjour (DTS)

Traceurs fluorescents

Les DTS calculées pour les deux traceurs fluorescents sont présentées sur la figure 3.6. Afin de comparer les signaux entre eux, les valeurs ont été adimensionnalisées selon :

$$\theta = \frac{t}{\bar{t}} \quad (3.1)$$

$$E(\theta) = E(t) \cdot \bar{t} \quad (3.2)$$

avec θ le temps adimensionnalisé ; t le temps (s) ; \bar{t} le temps de séjour moyen ; $E(t)$ la DTS (s^{-1}) et $E(\theta)$ la DTS adimensionnalisée.

3.1.4 Paramètres caractérisant l'efficacité hydrodynamique des ZRV

A partir des courbes de traçage et des DTS, les paramètres présentés dans le tableau 3.1 ont pu être calculés.

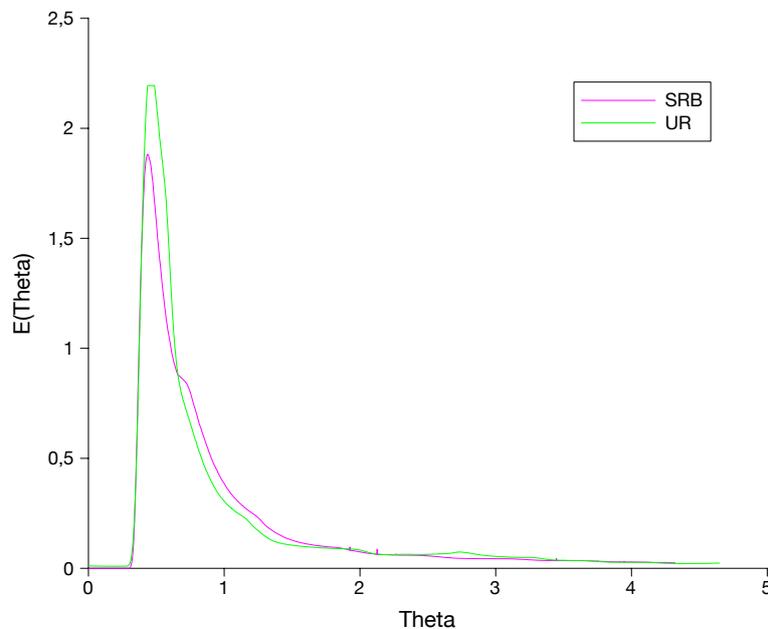


FIGURE 3.6 – Distribution des Temps de Séjour - Traceurs fluorescents - ZRV de Liebsdorf

	Sulforhodamine B	Uranine
Récupération durant expérience (%)	86,1	92,6
Temps de 1ère apparition du traceur (s)	2490	3000
Indice de court-circuit (%)	5,0	5,5
Temps de passage (h)	13,9	15,3
Temps de séjour moyen (h)	2,3	2,7
Temps de séjour au bout duquel 50 % du traceur est sorti (h)	1,7	1,8
Fraction de traceur récupérée au temps de séjour moyen (%)	63,7	69,8
Volume accessible au fluide (m ³)	8,2	8,9
Volume mort (m ³)	41,8	41,0
Variance (s ²)	4,4.10 ⁷	7,4.10 ⁷
Nombre de Péclet	1,5	0,9

TABLE 3.1 – Paramètres déterminés à partir des courbes de traçage - ZRV de Liebsdorf

On constate un temps de séjour moyen très inférieur au temps de passage calculé à partir du volume estimé de la ZRV (50 m³). Le volume accessible au fluide est par conséquent très inférieur à ce volume supposant un volume mort très important (plus de 80%) : le volume géométrique réel de la ZRV est très probablement très inférieur aux 50 m³ prévus lors de la conception. Plusieurs raisons peuvent être avancées : comblement de la ZRV, encombrement de la végétation, etc. Le nombre de Péclet très faible suppose des transferts diffusifs dominants, en cohérence avec la longue trainée observée sur les courbes de traçages (figures 3.2 et 3.4). Le pic très net observé sur les courbes suppose lui un écoulement préférentiel de type piston avec dispersion.

Les taux de récupération très importants pour les deux traceurs suggèrent l'absence de phénomènes de sorption et de photodégradation significatifs (à noter que l'injection d'uranine a été réalisée de nuit).

Pour chaque noue, on peut donc proposer le modèle d'écoulement suivant : un écoulement de type piston avec dispersion (représentant l'écoulement préférentiel probablement au centre de la noue) échangeant avec des zones stagnantes situées sur les côtés.

3.2 Wahlbach

3.2.1 Débits

Le débit moyen mesuré en amont de la ZRV est de $11,0 \text{ m}^3/\text{h}$. Celui en aval est de $12,3 \text{ m}^3/\text{h}$. Au regard des débits minimaux et maximaux, on voit que la noue absorbe la charge hydraulique et linéarise le débit. En outre, d'après les courbes, le volume minimal se situe à la même heure d'où un temps de séjour probablement très court qui devra être confirmé par le traçage. De manière inhabituelle sur ce site, on retrouve 30 m^3 de plus en sortie. On peut supposer qu'il s'agit d'une conséquence de l'inondation avec des infiltrations d'eau via le système de drainage du champ voisin. C'était un terrain très humide avant la construction de la STEP et même si la surface semblait relativement sèche, il est probable que le sous sol était encore gorgé d'eau.

La figure 3.7 présente la chronique des débits en sortie de la ZRV durant les expériences de traçages.

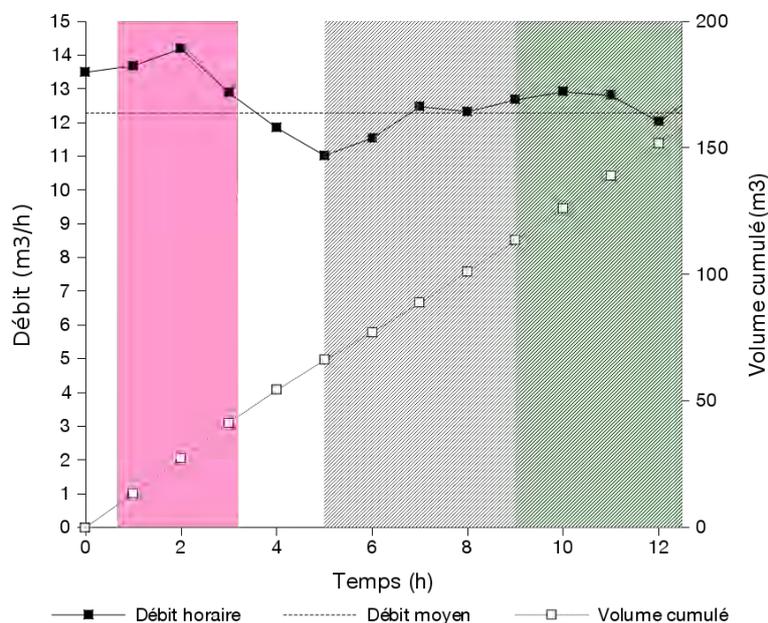


FIGURE 3.7 – Chronique des débits durant les expériences - ZRV de Wahlbach. Les couleurs indiquent les durées respectives des 3 expériences : Rose = SRB ; vert : UR ; hachures = sel

Les débits moyens durant les expériences sont respectivement de $13,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $12,8 \text{ m}^3/\text{h}$ et $12,3 \text{ m}^3/\text{h}$ pour les expériences à la sulforhodamine, à l'uranine et au sel respectivement.

3.2.2 Aspect visuel du traçage

Les figures suivantes montrent la répartition des traceurs fluorescents dans les premières dizaines de minutes suivant l'injection :

3.2.3 Concentration du traceur en sortie

Traçage à la sulforhodamine B

La courbe de traçage présentée sur la figure 3.9 est caractérisée par un pic unique caractéristique de l'écoulement au sein d'un réacteur piston avec dispersion.



FIGURE 3.8 – Dissipation de la sulforhodamine B dans la ZRV de Wahlbach

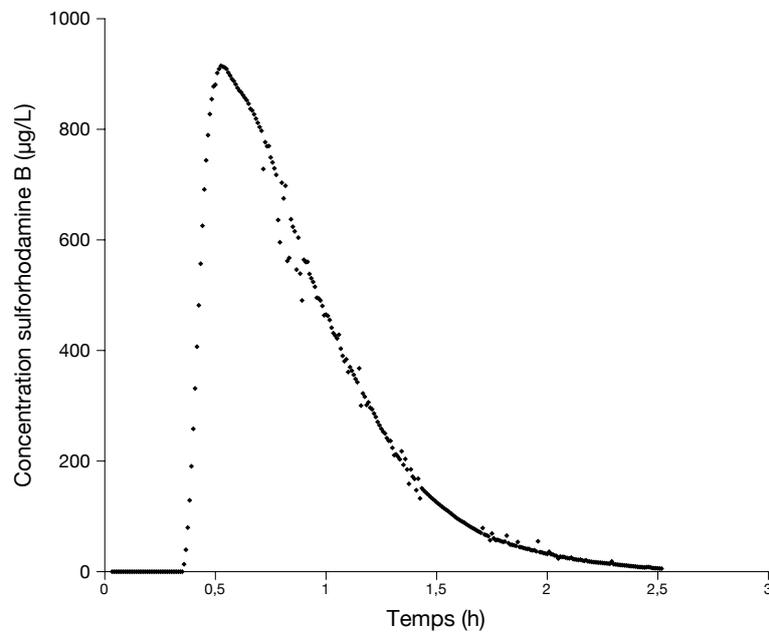


FIGURE 3.9 – Courbe de traçage à la sulforhodamine - ZRV de Wahlbach

Traçage à l'uranine

La courbe de traçage présentée sur la figure 3.10 est caractérisée par un pic unique caractéristique de l'écoulement au sein d'un réacteur piston avec dispersion avec cependant une trainée un peu plus longue que celle observée avec la SRB.

Traçage au chlorure de sodium

La courbe de traçage au sel est présentée sur la figure 3.11. Malheureusement, la courbe est inexploitable : le bilan masse ne serait bouclé qu'à un peu plus de 50%. On constate que la conductivité initiale était en cours de variation (diminution importante) au moment de l'arrivée du pic. Le

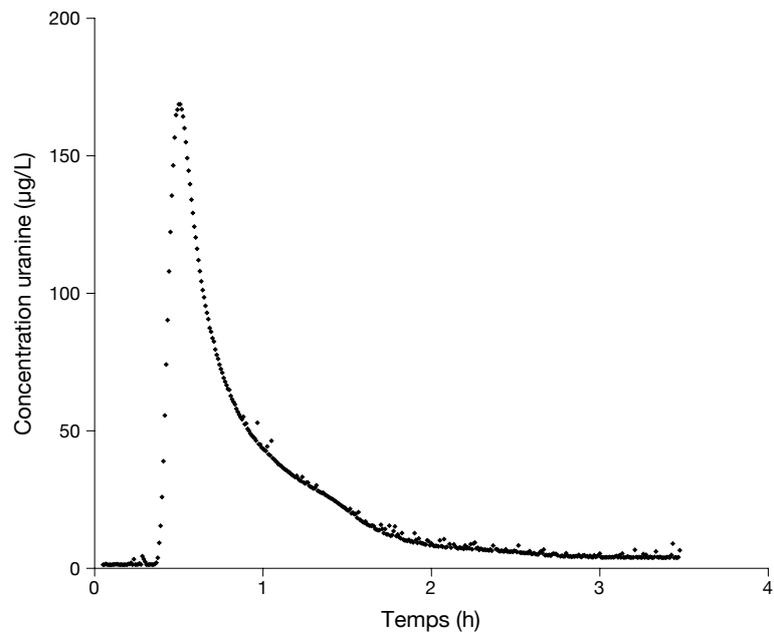


FIGURE 3.10 – Courbe de traçage à l'uranine - ZRV de Wahlbach

sui de la conductivité de base de l'eau de sortie indique en effet d'importantes fluctuations rendant impossible le calcul (figure 3.12).

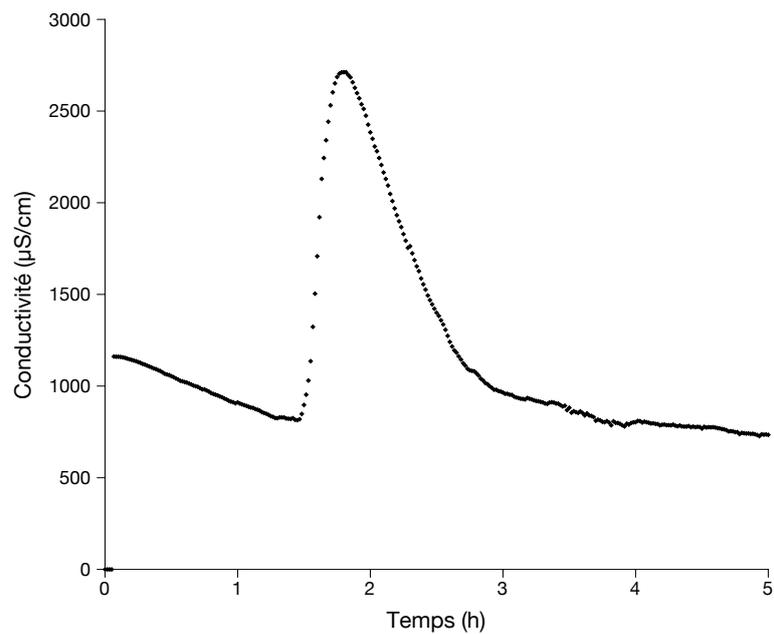


FIGURE 3.11 – Courbe de traçage au sel - ZRV de Wahlbach

3.2.4 Distribution des Temps de Séjour (DTS)

Traceurs fluorescents

Les DTS calculées pour les deux traceurs fluorescents sont présentées sur la figure 3.13. Afin de comparer les signaux entre eux, les valeurs ont été adimensionnalisées selon :

$$\theta = \frac{t}{\bar{t}} \quad (3.3)$$

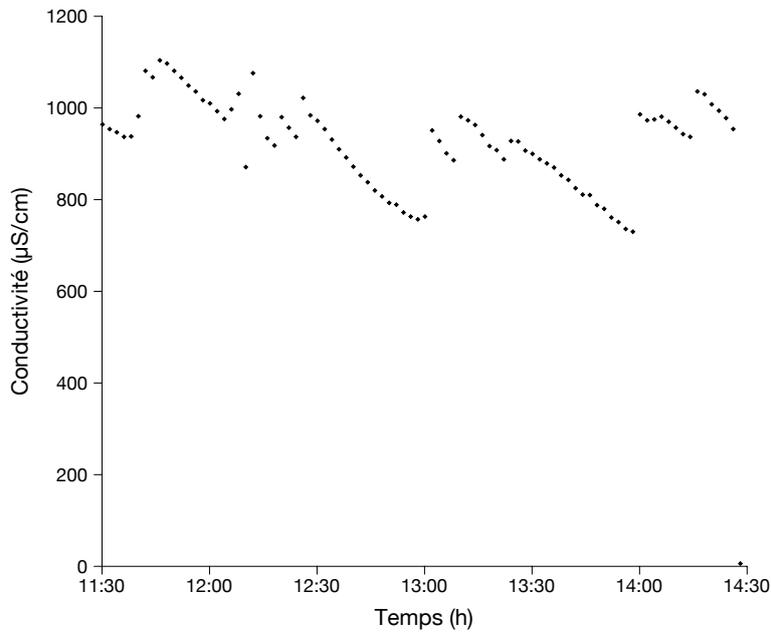


FIGURE 3.12 – Variations de la conductivité de base de l'eau en sortie - ZRV de Wahlbach

$$E(\theta) = E(t) \cdot \bar{t} \tag{3.4}$$

avec θ le temps adimensionnalisé ; t le temps (s) ; \bar{t} le temps de séjour moyen ; $E(t)$ la DTS (s^{-1}) et $E(\theta)$ la DTS adimensionnée.

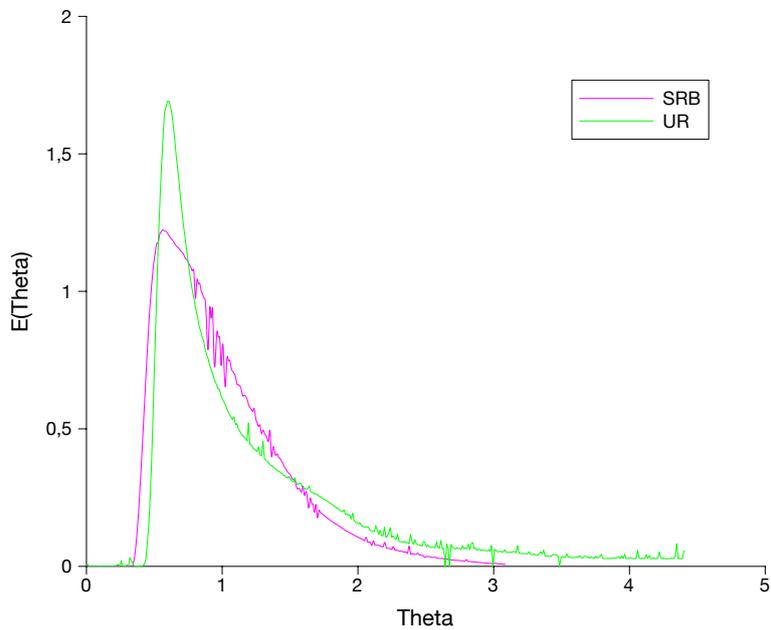


FIGURE 3.13 – Distribution des Temps de Séjour - Traceurs fluorescents - ZRV de Wahlbach

3.2.5 Paramètres caractérisant l'efficacité hydrodynamique des ZRV

A partir des courbes de traçage et des DTS, les paramètres présentés dans le tableau 3.2 ont pu être calculés.

La récupération est totale pour les deux traceurs fluorescents (bilan légèrement supérieur à 100%

	Sulforhodamine B	Uranine
Récupération durant expérience (%)	104,1	104,3
Temps de 1ère apparition du traceur (s)	990	1200
Indice de court-circuit (%)	10,4	11,8
Temps de passage (h)	2,7	2,8
Temps de séjour moyen (h)	0,8	0,8
Temps de séjour au bout duquel 50 % du traceur est sorti (h)	0,7	0,7
Fraction de traceur récupérée au temps de séjour moyen (%)	62,0	57,7
Volume accessible au fluide (m ³)	10,7	10,0
Volume mort (m ³)	25,3	26,0
Variance (s ²)	1,8.10 ⁶	1,5.10 ⁷
Nombre de Péclet	7,9	9,4

TABLE 3.2 – Paramètres déterminés à partir des courbes de traçage - ZRV de Wahlbach

en raison des incertitudes de mesure liées notamment à la forte turbidité des eaux en sortie). Cela suggère l'absence de phénomènes de sorption et de photodégradation significatifs (à noter que l'injection d'uranine a été réalisée de nuit).

Le temps de séjour dans la ZRV est environ 3 fois plus court que le temps de passage théorique : il est important de rappeler ici que toute une portion de la noue n'est pas alimentée en raison des modifications topographiques liées à l'inondation de juin 2013. Le volume mort est ainsi très important. Le temps de 1ère apparition du traceur est également très court (entre 13 et 20 min).

Le nombre de Péclet calculé pour les deux traceurs indique une dispersion assez modérée, en cohérence avec les observations visuelles et les paramètres précédents : l'écoulement dans la noue est rapide avec par conséquent une composante advective du transport du traceur relativement importante.

On peut donc proposer le modèle d'écoulement suivant pour la noue disponible dans les conditions de l'expérimentation : un réacteur piston avec dispersion (Pe compris entre 7,9 et 9,4) ou cascade de réacteurs parfaitement agités (nombre de réacteurs en cascade compris entre 4 et 5) (figure 3.14).

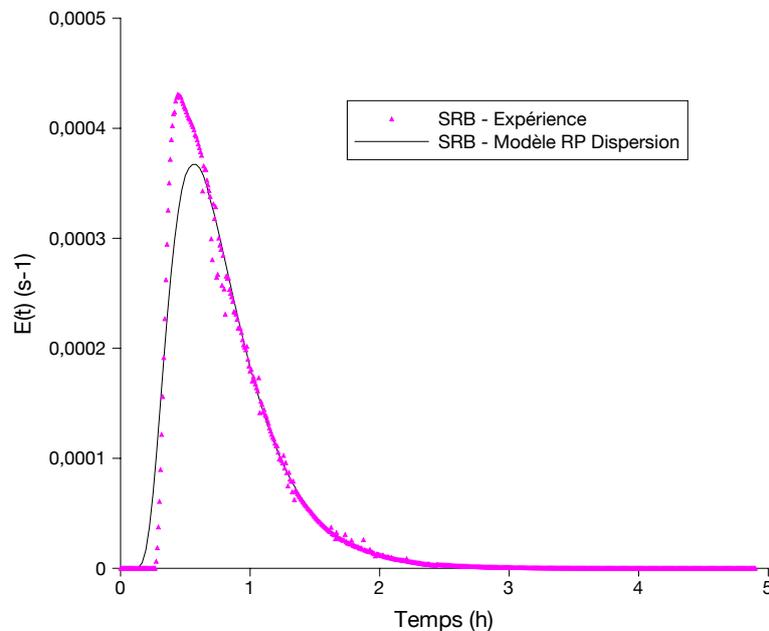


FIGURE 3.14 – Distribution des Temps de Séjour expérimentale et modélisée par un modèle de réacteur piston à dispersion (nombre de Péclet = 8,6 ; temps de séjour moyen = 0,8 h) - ZRV de Wahlbach

3.3 Lutter

3.3.1 Remarque sur le protocole expérimental

Pour la ZRV de Lutter, le protocole d'injection des traceurs fluorescents a été modifié. En effet, le temps de séjour attendu est beaucoup plus long que pour les ZRV de Liebsdorf et Wahlbach (temps de passage théorique de plus de 40h). Pour des raisons logistiques et afin de limiter la durée des expériences, il a été décidé de procéder à une injection simultanée de la sulforhodamine B et de la fluorescéine. Cette décision n'a été prise qu'après vérification sur site de la bonne séparation des signaux acquis pour les deux traceurs par le fluorimètre [11].

3.3.2 Débits

Sur la première période de 24h de mesures, le débit moyen mesuré en amont de la ZRV est de $4,1 \text{ m}^3/\text{h}$. Celui en aval est de $3,9 \text{ m}^3/\text{h}$. Au regard des débits minimaux et maximaux, on voit que la noue absorbe la charge hydraulique et linéarise le débit. Sur ces mêmes 24h, on retrouve $5,2 \text{ m}^3$ de moins en sortie soit une perte d'environ 5 % du débit entrant sur la ZRV. Il est très probable que cela soit dû à l'effet combiné de l'évaporation (probablement importante étant donné l'ensoleillement et les fortes températures durant les expériences) et de l'infiltration.

Il est à noter qu'en fin d'expérience (une centaine d'heures après l'injection des traceurs fluorescents), un événement pluvieux d'intensité importante a induit des débits très importants à l'amont et en aval de la ZRV (débit maximum horaire de $55,65 \text{ m}^3/\text{h}$). Cependant, cet événement, qui aurait pu fortement perturber les expériences, est intervenu alors que le taux de récupération pour la sulforhodamine B était de 83,7 %, ce qui est tout à fait satisfaisant pour l'interprétation. Celle-ci a donc été réalisée sur la portion de courbe située avant cette pluie.

La figure 3.15 présente la chronique des débits en sortie de la ZRV durant l'expérience de traçage. Le débit moyen durant les expériences (avant l'évènement pluvieux) est de $3,76 \text{ m}^3/\text{h}$.

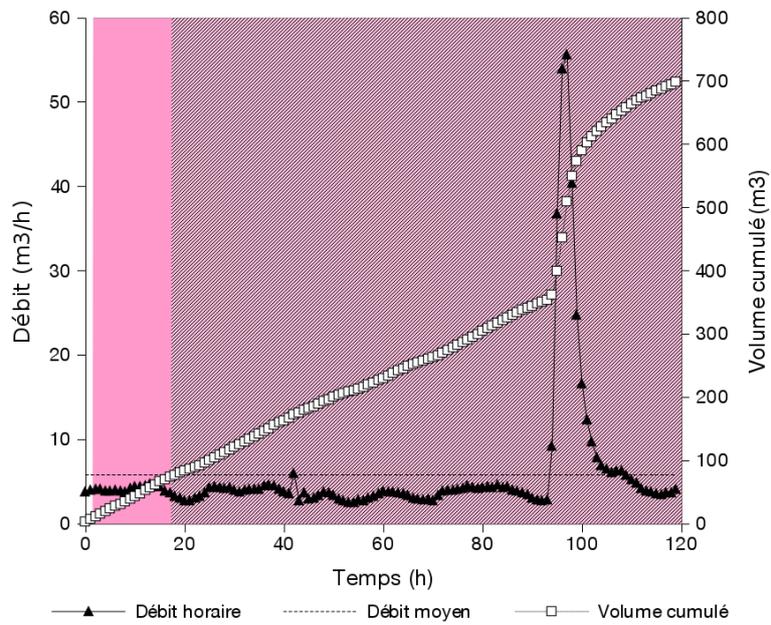


FIGURE 3.15 – Chronique des débits durant les expériences - ZRV de Lutter. Les couleurs indiquent les durées respectives des 3 expériences : Rose = SRB + UR ; hachures = sel

3.3.3 Aspect visuel du traçage

Les figures suivantes montrent la répartition des traceurs fluorescents dans les premières dizaines de minutes suivant l'injection :



FIGURE 3.16 – Dissipation des traceurs fluorescents dans la ZRV de Lutter (a)



FIGURE 3.17 – Dissipation des traceurs fluorescents dans la ZRV de Lutter (b)



FIGURE 3.18 – Dissipation des traceurs fluorescents dans la ZRV de Lutter (c)

3.3.4 Concentration du traceur en sortie

Traçage à la sulforhodamine B

La courbe de traçage présentée sur la figure 3.19 est caractérisée par des pics successifs décroissants avec une périodicité régulière d'environ 20 h. Cette allure est caractéristique de lentes recirculations internes. Plusieurs hypothèses peuvent être formulées pour expliquer cette observation :

- la topographie de la mare induit une recirculation sur un plan horizontal ;
- un effet de stratification thermique variable selon les cycles jour/nuit induit un mélange irrégulier sur la verticale de la colonne d'eau ;

Pour valider l'une ou l'autre des hypothèses, une modélisation en mécanique des fluides numériques comprenant un module de thermique serait *a priori* indiquée mais nécessiterait des données précises concernant la bathymétrie de la ZRV au moment du traçage, une mesure du rayonnement solaire corrélée à la température de l'eau, etc. Il serait également intéressant de procéder à des mesures de profils verticaux de température à des heures variables de la journée.

Le taux de récupération en fin d'expérience est de 87,1 % (83,7 % jusque l'événement pluvieux). Cela suggère l'absence de phénomène de sorption significatif.

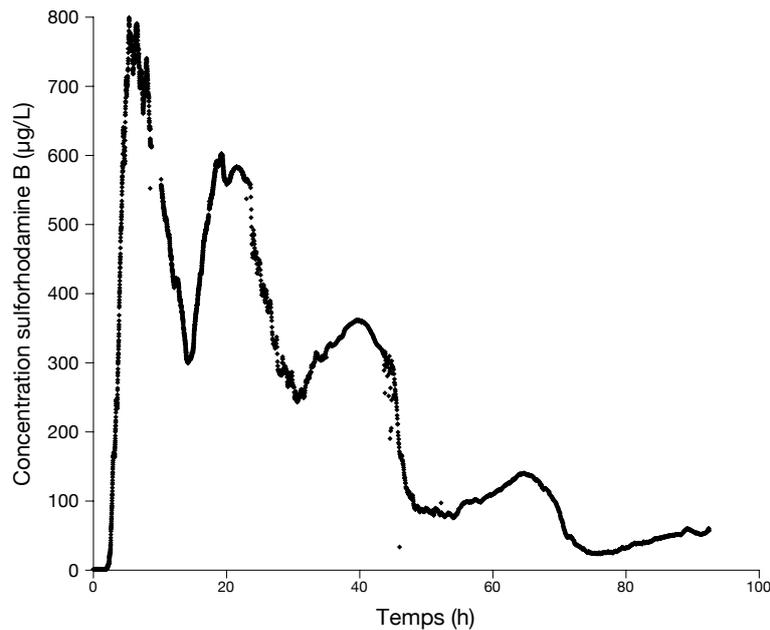


FIGURE 3.19 – Courbe de traçage à la sulforhodamine - ZRV de Lutter

Traçage à l'uranine

La courbe de traçage présentée sur la figure 3.20 est comme celle de la sulforhodamine B caractérisée par des pics successifs décroissants avec une périodicité régulière d'environ 20 h.

Traçage au chlorure de sodium

Le traçage au NaCl n'a pu être interprété pour cette ZRV. En effet, la quantité de sel injectée (25 kg) n'a pas été suffisante pour induire des variations significatives de conductivité en sortie, au regard des variations du bruit de fond (qui sont impactées par les traceurs fluorescents). Cela n'est pas surprenant dans la mesure où les calculs préliminaires de la quantité de sel à injecter compte tenu du volume de l'ouvrage et des débits avait donné une masse de 250 kg environ. Cette masse aurait été impossible à injecter avec la logistique employée (il aurait fallu diluer cette quantité dans au moins $1,5 \text{ m}^3$ d'eau) et sans perturber de manière importante l'hydrodynamique de l'ouvrage.

Sur la figure 3.21, on peut observer le pic de conductivité en entrée lié à l'injection du sel sous forme d'impulsion. Ce pic dure un peu plus de 2 h : le positionnement du capteur en entrée de ZRV et non au lieu même de l'injection (juste en aval du canal Venturi d'entrée) a induit une mesure au

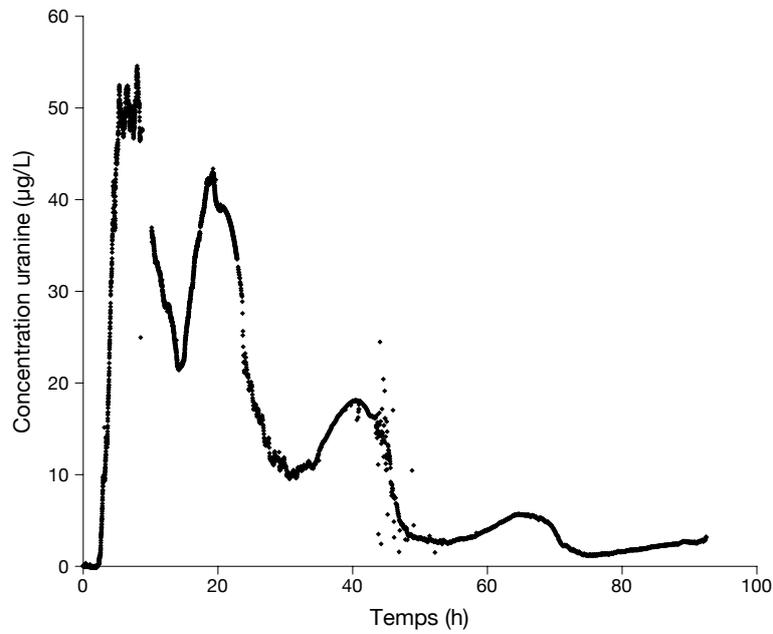


FIGURE 3.20 – Courbe de traçage à l'uranine - ZRV de Lutter

sein d'une zone de rétro mélange local immédiatement à l'aval de l'arrivée des effluents. Cela avait été observé visuellement lors de l'injection des traceurs fluorescents.

On observe également, un peu avant un temps de 100 h après l'injection des traceurs fluorescents, la diminution de conductivité consécutive à l'évènement pluvieux.

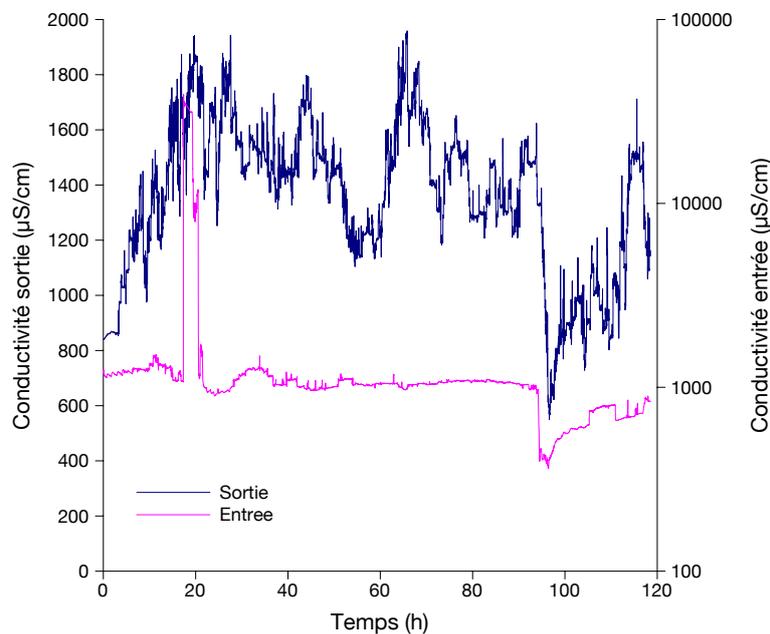


FIGURE 3.21 – Variations de conductivité en entrée et en sortie - ZRV de Lutter

3.3.5 Distribution des Temps de Séjour (DTS)

Traceurs fluorescents

Les DTS calculées pour les deux traceurs fluorescents sont présentées sur la figure 3.22. Afin de comparer les signaux entre eux, les valeurs ont été adimensionnalisées selon :

$$\theta = \frac{t}{\bar{t}} \quad (3.5)$$

$$E(\theta) = E(t) \cdot \bar{t} \quad (3.6)$$

avec θ le temps adimensionnalisé ; t le temps (s) ; \bar{t} le temps de séjour moyen ; $E(t)$ la DTS (s^{-1}) et $E(\theta)$ la DTS adimensionnalisée.

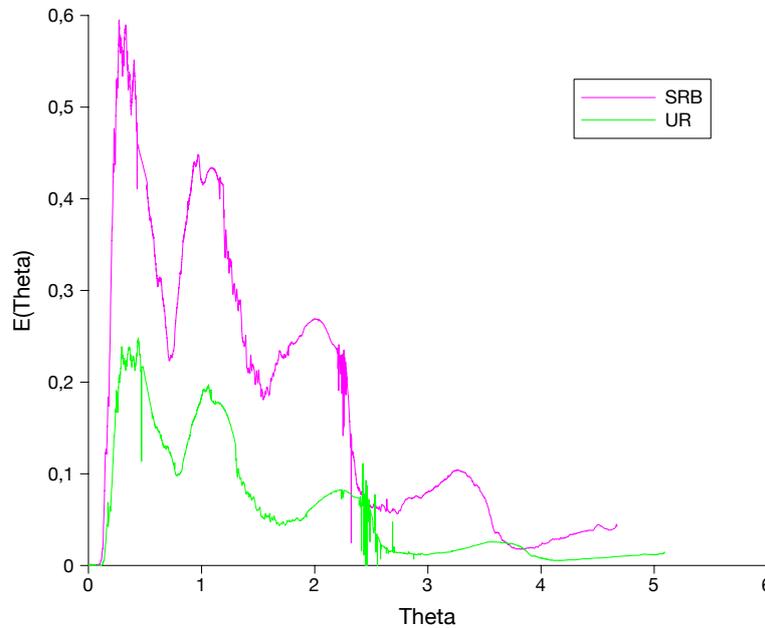


FIGURE 3.22 – Distribution des Temps de Séjour - Traceurs fluorescents - ZRV de Lutter

3.3.6 Paramètres caractérisant l'efficacité hydrodynamique des ZRV

A partir des courbes de traçage et des DTS, les paramètres présentés dans le tableau 3.3 ont pu être calculés.

	Sulforhodamine B	Uranine
Récupération durant expérience (%)	83,7	31,1
Temps de 1ère apparition du traceur (s)	8160	8160
Indice de court-circuit (%)	2,0	2,0
Temps de passage (h)	113	113
Temps de séjour moyen (h)	19,8	18,2
Temps de séjour au bout duquel 50 % du traceur est sorti (h)	29,8	/
Fraction de traceur récupérée au temps de séjour moyen (%)	33,3	13,7
Volume accessible au fluide (m ³)	74,4	68,3
Volume mort (m ³)	350,6	356,8
Variance (s ²)	3,3.10 ⁹	3,0.10 ⁹
Nombre de Péclet	1,4	1,17

TABLE 3.3 – Paramètres déterminés à partir des courbes de traçage - ZRV de Lutter

Le temps de séjour moyen dans la ZRV est beaucoup plus court que le temps de passage théorique : le volume réel de l'ouvrage est très probablement en deçà du volume lors de la conception

(envasement, comblement par les végétaux, etc.).

Le taux de récupération de l'uranine est ici très faible (32,9 %) : en effet, l'uranine est un composé photosensible. L'injection a ici été réalisée de jour et l'expérience a duré 5 jours avec un ensoleillement important. Il est donc très probable que l'uranine a subi un phénomène de photodégradation durant son transit dans la ZRV. Ce phénomène a préalablement été observé avec des ordres de grandeur similaires lors d'expérimentations menées au sein de réacteurs batch au sein de notre équipe [12]. Si ce résultat rend difficile l'interprétation de cette courbe de traçage du point de vue de l'hydrodynamique, il est tout à fait intéressant du point de vue de la quantification du potentiel de dégradation de composés photosensibles au sein de l'ouvrage [13].

Le nombre de Péclet calculé pour les deux traceurs indique une dispersion forte, avec des transferts majoritairement diffusifs compatibles avec les faibles vitesses observées dans l'ouvrage (observations visuelles).

Chapitre 4

Conclusion

L'hydrodynamique des 3 ZRV de Liebsdorf, Wahlbach et Lutter a été étudiée via l'utilisation de 3 traceurs : la sulforhodamine B, l'uranine et le chlorure de sodium. La sulforhodamine B a permis de caractériser de manière relativement précise la Distribution des Temps de Séjour (DTS) dans la mesure où le taux de récupération a toujours dépassé les 80 %. Dans le cas de l'uranine, la récupération a été très faible dans le cas de la ZRV de Lutter, soulignant le potentiel de dégradation de polluants photosensibles dans cet ouvrage. La même conclusion ne peut être émise dans le cas de Liebsdorf et Wahlbach dans la mesure où l'uranine y a été injectée de nuit.

Pour les 3 ZRV étudiées, les temps de séjour moyens relevés sont toujours très inférieurs au temps de passage théorique déterminé à partir du volume de conception des ouvrages. Cela laisse supposer un comblement partiel des ZRV et/ou la présence de zones mortes très importantes. A des fins de comparaison, la figure 4.1 présente les 3 DTS adimensionnalisées déterminées à partir de la sulforhodamine B.

Les ZRV de Liebsdorf et Wahlbach (noues) ont un comportement proche de réacteurs piston avec dispersion. A Liebsdorf, la dispersion (nombre de Péclet très faible) est plus importante en raison de la présence d'une importante trainée. Cette dernière est probablement générée sous l'influence de zones stagnantes proches des berges des noues et du couvert végétal beaucoup plus dense qu'à Wahlbach.

La ZRV de Lutter présente un comportement très différent des 2 précédentes ZRV. La géométrie de l'ouvrage constitué d'une lagune induit un comportement typique de réacteur très peu agité avec recirculation interne lente mais d'amplitude importante.

Dans le futur, des modélisations de type systémique ou mécanique des fluides numérique devront permettre de valider ou pas certaines hypothèses émises dans ce rapport (influence des transferts thermiques à Lutter par exemple). Un modèle de type mécanique des fluides numériques validé pourrait permettre d'extrapoler le comportement des ouvrages pour différents débits. Enfin, il serait intéressant de reproduire ces expériences pour des débits caractéristiques de temps de pluie et évaluer l'impact d'un coup de charge hydraulique.

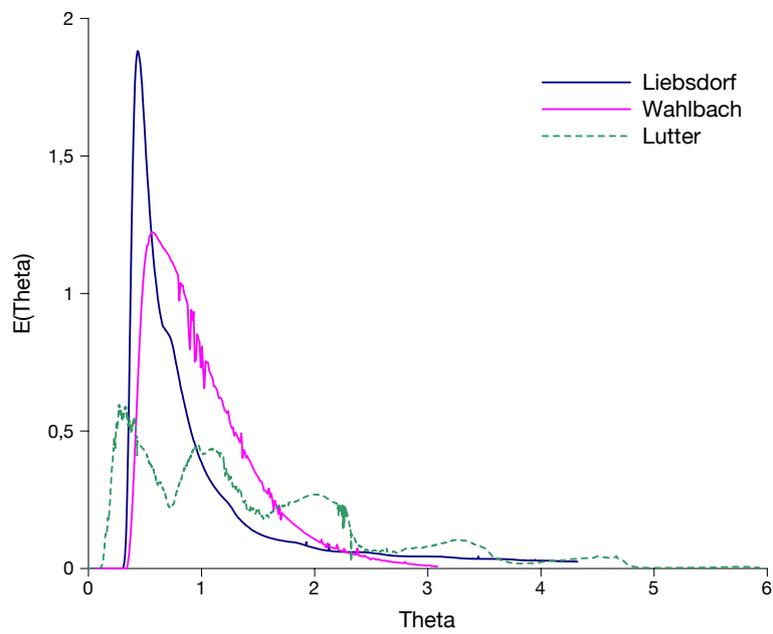


FIGURE 4.1 – DTS déterminée à partir des traçages à la sulforhodamine pour les 3 ZRV étudiées

Bibliographie

- [1] T.-M. Su, S.-C. Yang, S.-S. Shih, H.-Y. Lee, Optimal design for hydraulic efficiency performance of free-water-surface constructed wetlands, *Ecological Engineering* 35 (8) (2009) 1200–1207.
- [2] O. Levenspiel, *Chemical Reaction Engineering*, 3rd Edition, 3rd Edition, Wiley, 1998.
- [3] Agence de l'Eau Rhin Meuse, Aménagements des milieux naturels en aval de station d'épuration - zone de rejet végétalisée, Tech. rep., Agence de l'Eau Rhin-Meuse (2011).
- [4] G. Malamaire, GUIDE : Les zones de rejets intermédiaires - des procédés naturels pour réduire l'impact du rejet des stations d'épuration sur les milieux aquatiques, Tech. rep., Agence Régionale Pour l'Environnement - PACA (2009).
- [5] C. Boutin, A. Iwema, C. Lagarrigue, Point sur les zones de dissipation végétalisées : Vers une protection supplémentaire du milieu récepteur de surface ?, Tech. rep., CEMAGREF - ONEMA (2010).
- [6] F. E. Dierberg, J. J. Juston, T. A. DeBusk, K. Pietro, B. Gu, Relationship between hydraulic efficiency and phosphorus removal in a submerged aquatic vegetation-dominated treatment wetland, *Ecological Engineering* 25 (1) (2005) 9–23.
- [7] R. Kadlec, Detention and mixing in free water wetlands, *Ecological Engineering* 3 (4) (1994) 345–380.
- [8] G. Tchobanoglous, F. L. Burton, I. Metcalf & Eddy, H. D. Stensel, *Wastewater engineering : treatment and reuse*, McGraw-Hill, 2004.
- [9] J. Villiermaux, *Génie de la réaction chimique, conception et fonctionnement des réacteurs*, Tec et Doc, 1995.
- [10] M. Nuel, Présentation et étude comparative de trois zones de rejet végétalisées (zrv), Tech. rep., Agence de l'Eau Rhin-Meuse - ENGEES (2012).
- [11] P. A. Schnegg, An inexpensive field fluorometer for hydrogeological tracer tests with three tracers and turbidity measurement, *Groundwater and Human Development* 3 (2002) 1484–1488.
URL <http://www-geol.unine.ch/GEOMAGNETISME/mardelp.pdf>
- [12] M. S. Mota, Modélisation hydrodynamique de réacteurs : expériences de traçages utilisant des traceurs non conservatifs (2013).
- [13] J. Lange, T. Schuetz, C. Gregoire, D. Elsässer, R. Schulz, E. Passeport, J. Tournebize, Multi-tracer experiments to characterise contaminant mitigation capacities for different types of artificial wetlands, *International Journal of Environmental Analytical Chemistry* 91 (7-8) (2011) 768–785.