

La Seine à l'aval de la station d'épuration d'Achères

Modélisation bi-dimensionnelle du comportement hydraulique et du transport par convection et diffusion

Laurent Martin (Centre d'Informatique géologique, Fontainebleau)

Mustafa Guesmia (Communication Système. CISI, Saclay)

Stéphanie Even (Centre d'Informatique géologique, Fontainebleau)

Michel Poulin (Centre d'Informatique géologique, Fontainebleau)

Soizic Péron (Laboratoire National d'Hydraulique, Chatou)

Depuis neuf ans, un des objectifs du PIREN-Seine a été de comprendre et modéliser le fonctionnement écologique du bassin de la Seine en vue de proposer des solutions pour améliorer la qualité des cours d'eau. La Seine représente, en effet, un cas particulièrement complexe en raison de la concentration d'une importante population dans la mégalopole parisienne, d'une activité agricole et industrielle intense. Il en résulte une demande en eau exceptionnelle alors que les ressources sont limitées en été. C'est la nécessité de programmer de nouveaux aménagements, pour répondre à des objectifs d'amélioration de la qualité de l'eau de la Seine, qui a sous-tendu ces recherches.

L'originalité du programme de recherche PIREN Seine a été d'appréhender le fonctionnement écologique de la Seine de manière quantitative à l'échelle du réseau hydrographique tout entier, en tenant compte des interactions entre le milieu physico-chimique et les compartiments biologiques. La modélisation a été l'outil choisi pour établir le lien entre les processus microscopiques et leurs manifestations macroscopiques à l'échelle de l'écosystème.

C'est dans ce cadre que s'inscrit l'étude suivante, collaboration entre le Groupe Transferts Hydrauliques d'EDF et le Centre d'Informatique Géologique de l'Ecole des Mines de Paris. L'objectif pour l'année 1998 a été de mettre en place un modèle bi-dimensionnel décrivant le comportement hydraulique de la Seine à l'aval de la zone des rejets de la station d'épuration d'Achères. Ce travail constitue un préalable à la modélisation des processus biologiques intervenant dans le fleuve à l'aval des émissaires d'Achères.

Ces simulations préliminaires permettent de simuler avec précision le champ de vitesses de l'eau en Seine et dans les émissaires de la station d'épuration et de suivre la dispersion des effluents jusqu'au barrage d'Andrésy et l'écluse de Dénouval.

1. La zone d'étude et les données hydrauliques

Une modélisation hydrodynamique bi-dimensionnelle a été réalisée à l'aide du système TELEMAC-2D, qui constitue la première phase pour la mise en œuvre d'un modèle de qualité d'eau.

1.1. La zone d'étude

La zone d'étude se situe au nord-ouest de Paris et fait partie de la boucle du fleuve entourant la forêt domaniale de Saint-Germain-en-Laye, entre Maisons-Laffitte et Andrésy [Carte IGN, 1991]. C'est un tronçon d'environ 10 km de long, débutant 1 km en amont des rejets de la station d'épuration

d'Achères, et se terminant par les barrages d'Andrésey et l'écluse de Dénouval. Il inclue deux îles : l'île d'Herblay et l'île de Nancy.

Dans ce secteur, la Seine reçoit les déversements des trois canaux de fuite de la station d'épuration d'Achères¹ ainsi que l'eau de l'Oise à Conflans.

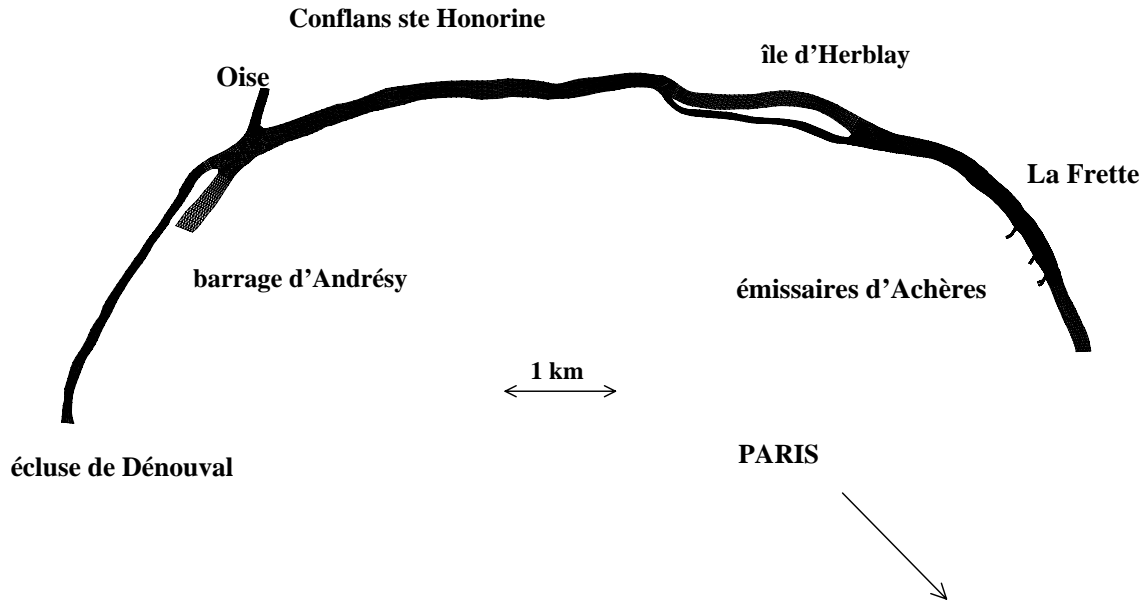


Figure 1.1 : *la zone d'étude.*

1.2. Période étudiée et caractéristiques de l'écoulement

Nous avons retenu la période de début septembre 1991 pour laquelle le secteur de Maisons-Laffitte et Poissy a été particulièrement étudié dans le cadre du PIREN Seine : déplacements des masses d'eau, évolution en Seine des flux liquides et solides issus de la station, dynamique des suspensions et des sédiments [Chesterikoff et al., 1991].

Les mesures, réalisées les 9, 10 et 11 septembre, sur neuf profils transversaux consistent en des prélèvements à vitesse constante d'une rive à l'autre, à 50 cm, 2 m et 4 m de profondeur.

Les paramètres hydrauliques utilisés pour la mise en oeuvre du modèle sont résumés dans le tableau 1.2.1.

¹ La station d'épuration d'Achères est alimentée par des eaux usées issues de différents émissaires provenant de l'agglomération parisienne. Elle est constituée de cinq unités de traitement mises en service successivement depuis 1940 jusqu'en 1978. Sa capacité avoisine actuellement 2 200 000 m³/jour.

Tableau 1.2.1 : Caractéristiques hydrauliques de la zone d'étude le 9 septembre 1991

	Débit de la Seine	Débit D'Achères	Débit de l'Oise	Cote de l'eau à l'aval. Cote de l'eau à l'amont
Sources	S.N.S. ¹	S.T.E.P Achères ²	S.N.S	Barragistes ³
Mesures du 9/9/91	83 m ³ /s	Achères 1 : 3.1 m ³ /s	27 m ³ /s	Andrésey : 20.36 m NGF
	à l'amont	Achères 2 : 4.4 m ³ /s	à la confluence	Dénouval : 20.36 m NGF
	de la step	Achères 3 : 9.9 m ³ /s	avec la Seine	Chatou : 20.38 m NGF
	d'Achères	Achères 4 : 7.0 m ³ /s		

2. Système de modélisation d'un cours d'eau : le système TELEMAC

Le système TELEMAC, propriété d'EDF, propose une chaîne de traitement complète pour le calcul des mouvements d'eau, de substances dissoutes et de sédiments dans les domaines fluviaux, côtiers, estuariens et lacustres. Les éléments qui la composent sont les pré- et post- processeurs suivants [Hervouet, 1996] :

* **SINUSX** qui permet à l'aide d'une table à digitaliser de saisir les fonds ainsi que le contour du domaine à modéliser,

* **MATISSE** [Quiquempoix et al.,1998] [Quiquempoix et Boulet, 1998] qui génère des maillages libres bi-dimensionnels. Il interpole la bathymétrie digitalisée dans SINUSX en chacun des noeuds du maillage et prépare les différents calculs de simulation (conditions aux limites) .

* **IDEAS** qui est également un mailleur mais qui possède deux modes de maillage : libre (les mailles se rapprochent le plus possible de triangles équilatéraux) ou réglé (triangles pouvant s'allonger suivant le sens du courant). Il est associé au logiciel **STBTEL**, qui interpole la bathymétrie sur les noeuds du maillage.

* **RUBENS** [Quiquempoix, 1997] qui exploite graphiquement les résultats issus des logiciels de simulation.

Le système comprend également des logiciels de simulation numérique :

- **TELEMAC-2D** calcule les écoulements à surface libre, en milieu peu profond, en supposant le milieu homogène sur la verticale. Il résout les équations de Barré de Saint-Venant à deux dimensions horizontales (longueur et largeur) [Hervouet et Van Haren, 1996]. Ces équations expriment en tout point du domaine de calcul la conservation de la masse d'eau (équation de continuité) et la conservation de la quantité de mouvement dans les deux directions spatiales (équations dynamiques) :

¹ S.N.S : Service de la Navigation de la Seine, Bougival, Mr THOMAS

² S.T.E.P Achères : Station d'épuration, SIAAP, Mme LEROY

³ Barragistes : Barrages d'Andrésey et écluse de Dénouval

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \vec{u} \text{ grad } h + h \text{ div } \vec{u} = S_{ce} \\ \frac{\partial u}{\partial t} + \vec{u} \text{ grad } u = -g \frac{\partial Z}{\partial x} + S_x + \frac{1}{h} \text{div}(h v_t \text{ grad } u) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \vec{u} \text{ grad } v = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + S_y + \frac{1}{h} \text{div}(h v_t \text{ grad } v) \end{cases}$$

avec :

h : hauteur d'eau	(m)
u, v : composantes de la vitesse	(m s ⁻¹)
Z : la côte du fond	(m)
g : la pesanteur	(m s ⁻²)
v _t : le coefficient de diffusion de la vitesse	(m ² s ⁻¹)
S _x , S _y : les termes sources représentant le vent, la force de Coriolis, le frottement sur le fond, une source ou un puits de quantité de mouvement dans le domaine.	(m s ⁻²)
S _{ce} : introduction ou prélèvement de fluide	(m s ⁻¹)

Le terme de diffusion des vitesses représente les effets de la turbulence au sein de l'écoulement. S regroupe les termes sources. Dans le cas présent il s'agit de la force de frottement sur le fond supposée décrite par la loi de Strickler, qui introduit un paramètre, le coefficient de Strickler, qui doit être calé. La méthode de résolution est une méthode d'éléments finis sur des maillages constitués de triangles. La version 4.0 a été utilisée.

• **SUBIEF** utilise les résultats du calcul d'écoulement produits par TELEMAC-2D, simule le transport de substances dissoutes ou particulières, incluant dépôt, érosion et réactions biogéochimiques [Moulin et Gailhard, 1996] :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{u} \text{ grad } C = \text{div}(\vec{K} \text{ grad } C) + \frac{Q_e - Q_d}{h} + \sum_{\text{point sr}}^{\text{sources}} (C_s - C) \frac{Q_L(r)}{\int_{\Omega} h \Psi_r d\Omega} + S$$

avec :

C : concentration en suspension du traceur	(g l ⁻¹)
\vec{K} : coefficient de dispersion	(m ² s ⁻¹)
\vec{u} : vitesse de l'écoulement	(m s ⁻¹)
h : hauteur d'eau	(m)
Q _e : flux d'érosion	(kg m ⁻² s ⁻¹)
Q _d : flux de dépôt	(kg m ⁻² s ⁻¹)
C _s : concentration du traceur au point source r	(g l ⁻¹)
Q _L : débit liquide de la source r	(m ³ s ⁻¹)
S : termes sources quelconques à définir	(g l ⁻¹ s ⁻¹)
Ψ _r : fonction de base (éléments finis) au point source	

Cette équation représente le transport et la dispersion par le courant de plusieurs éléments appelés de façon générale « variables d'état » qui peuvent également interagir et évoluer en fonction de termes sources traduisant des réactions chimiques, des dégradations, l'action de forces extérieures. L'ensemble des variables d'état et la description des termes sources forment un modèle de qualité d'eau.

3. Données du modèle d'écoulement pour la Seine en débit d'étiage

Le modèle d'écoulement constitue la première phase pour la mise en oeuvre d'un modèle de qualité d'eau. Elle a nécessité de nombreuses étapes et fait appel à plusieurs logiciels.

3.1. La saisie du contour et de la bathymétrie

Le logiciel SINUSX, associé à une table à digitaliser, a permis de saisir les contours de la Seine et de l'Oise à partir des planches au 1/2000^{ème} du Service de la Navigation de la Seine (SNS). Le contour de la zone est à la cote 20.35 m NGF, qui correspond à l'intersection des berges et de la surface libre au niveau dit de retenue normale. Les émissaires d'Achères ont été digitalisés à l'aide de plans d'architecte au 1/200^{ème}, fournis par les services techniques de la station d'épuration.

La digitalisation des profils en travers de la Seine (tous les 18 mètres), provenant du SNS, a permis de matérialiser les fonds. Chaque profil est constitué en moyenne d'une vingtaine de points. 560 profils ont été saisis. Le système de repère géographique est le système de coordonnées Lambert zone II étendu. Ne possédant pas de données sur la bathymétrie des bras le long des îles d'Herblay et de Nancy, ceux-ci ont été assimilés à des canaux trapézoïdaux, de pente de berge à 45° et conformes aux tirants d'eau fournis par le Guide de la Navigation Fluviale [Sandrin, 1986].

3.2. Le maillage

La difficulté principale lors de la construction du maillage est d'assurer, à l'aide d'un nombre de mailles optimisé, la meilleure représentation possible de l'ensemble de la zone. De ce point de vue, l'apport des éléments finis est essentiel puisqu'il permet de raffiner le maillage dans les zones complexes (rejets, confluence avec l'Oise, amont des îles) sans que le nombre total d'éléments soit prohibitif. En effet, si le nombre de mailles est trop élevé, les calculs à effectuer sont trop longs, et s'il n'y en a pas assez, le modèle n'est pas suffisamment précis pour qu'on puisse en tirer des conclusions pertinentes, ou alors il faut un pas de temps de calcul trop petit (inférieur à la seconde) pour que l'on respecte la condition de Courant (nombre de Courant inférieur à 1 en chaque maille).

Le maillage a été réalisé avec le logiciel IDEAS, qui permet de construire un maillage réglé ou libre. Le maillage réglé, qui donne la possibilité d'allonger les mailles dans le sens de l'écoulement et donc de diminuer le nombre de mailles d'un facteur 2 ou 3 a été utilisé pour décrire le fleuve dans les zones d'écoulement non perturbées. Au niveau de la station d'épuration, de la confluence avec l'Oise et des îles, nous avons utilisé un maillage libre (maille en triangle équilatéral) qui ne privilégie plus aucune direction et qui permet une description plus fine des zones sensibles (voir figure 3.2.1).

Le maillage ainsi construit possède **8200** noeuds et **15200** éléments.

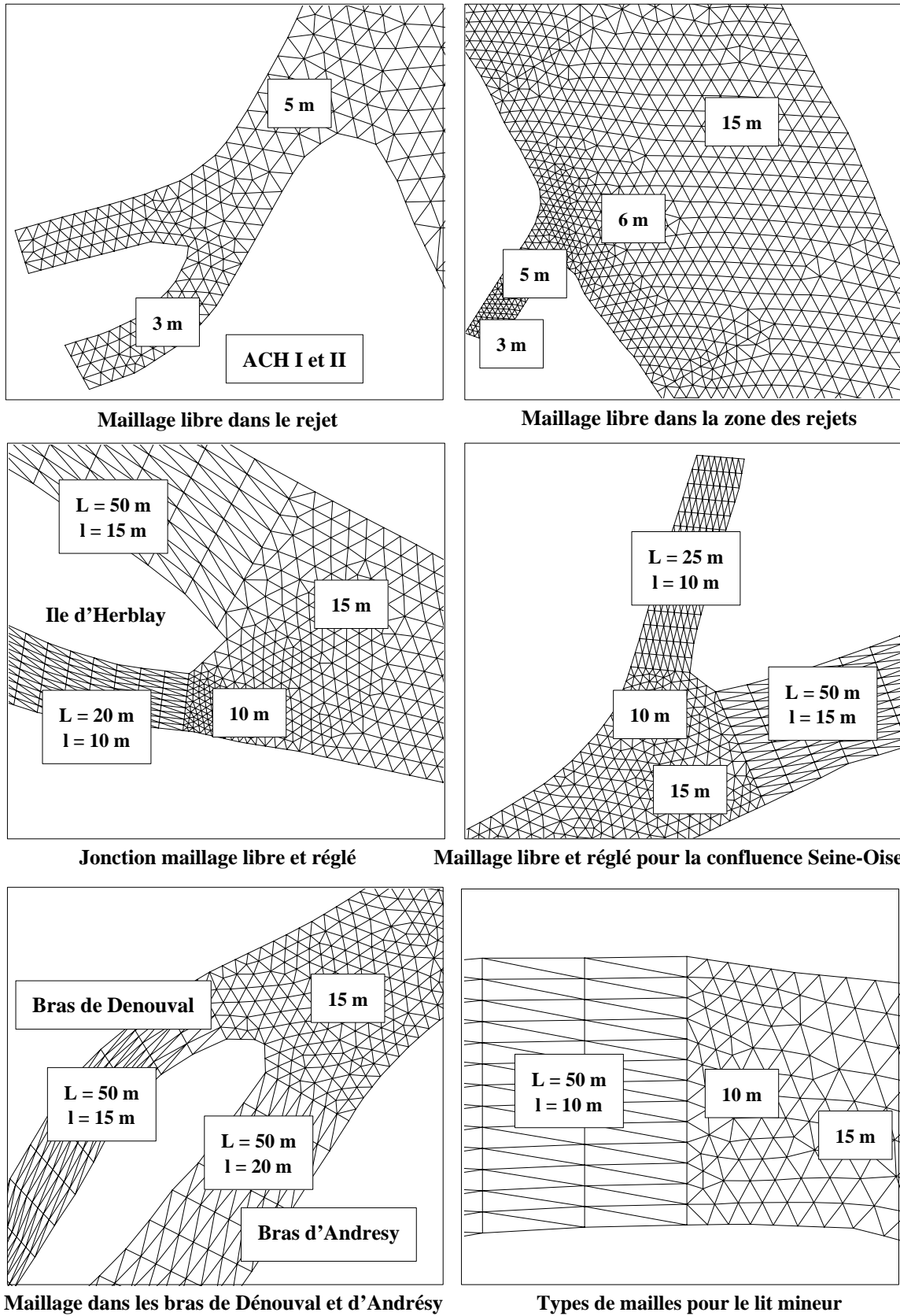


Figure 3.2.1 : Les différents types de mailles générées par IDEAS pour décrire le fleuve

3.3. Les paramètres de calcul

Le pas de temps, fixé par le critère « nombre de Courant inférieur à l'unité » est égal à une seconde. L'écoulement permanent dans la Seine est obtenu par convergence vers un état stationnaire après 100 000 pas de temps.

Le coefficient de diffusion des vitesses, ayant une influence faible, est affecté d'une valeur classique de $0.01 \text{ m}^2/\text{s}$ [Even, 1995].

La discrétisation quasi-bulle [Hervouet et Van Haren, 1996] qui évite les oscillations parasites de la surface libre apparaissant dans les cas où la vitesse de l'écoulement est faible a été choisie. Le schéma de convection pour la hauteur est le schéma SUPG qui assure une bonne conservation de la masse [Moulin et Gailhard, 1996].

4. Calcul de l'écoulement permanent

Une fois les données bathymétriques introduites, il nous reste à préciser les conditions aux limites, ainsi qu'à caler le coefficient de Strickler, avant de calculer correctement l'état hydraulique du système.

4.1. Les conditions aux limites

A partir du maillage a été généré un fichier géométrique reprenant les caractéristiques des noeuds et un fichier des conditions aux limites, permettant d'imposer des débits aux points d'entrées (amont de la Seine et de l'Oise, et au niveau des quatre rejets d'Achères) et des hauteurs en sortie (barrages d'Andrésey et Dénouval), et de définir les limites de la zone (voir tableau 1.2.1).

4.2. Le calage du coefficient de Strickler

Pour caler le coefficient de Strickler, nous avons utilisé les cotes amont et aval des barrages qui délimitent la zone d'étude. Nous cherchons à reproduire le dénivelé observé entre les deux ouvrages de navigation, en supposant que le coefficient de Strickler est constant sur tout le bief (nous considérons un fond de rugosité homogène sur les dix kilomètres de rivière).

Trois valeurs ont été considérées : 30, 35, et 40, valeurs habituelles caractéristiques des rivières telle que la Seine [Even, 1995]. Les meilleurs résultats sont obtenus avec un Strickler de 30.

Nous calculons alors, pour chaque noeud du maillage, les vitesses longitudinales et transversales, la hauteur d'eau et le débit scalaire. Le modèle calcule également en chaque noeud le nombre de Courant et le nombre de Froude.

4.3. Résultats et discussions

La figure 4.3.1 résume les vitesses moyennes en Seine depuis l'amont jusqu'au barrage d'Andrézy et l'écluse de Dénouval.

A l'amont des émissaires d'Achères, la vitesse est de l'ordre de 0.14 m/s. Elle augmente progressivement jusqu'à 0.17 m/s après les déversements d'Achères jusqu'à la fin de l'île d'Herblay. Les deux premiers rejets couplés (Achères I et II) ont une influence sensible sur l'écoulement en Seine : la vitesse d'entrée de l'eau des rejets est six fois supérieure à celle de la Seine (figure 4.3.2). En effet, ces deux émissaires sont très peu profonds (environ 1 mètre de profondeur). Le différentiel des vitesses persiste en rive gauche sur plusieurs centaines de mètres. L'homogénéité transversale n'est atteinte qu'à l'amont de l'île d'Herblay avec une vitesse moyenne de 0.16 m/s (figure 4.3.2). Au niveau de l'île d'Herblay, l'écoulement est deux fois plus rapide dans le bras droit (bras navigable) que dans le bras gauche (figure 4.3.1). La vitesse diminue au niveau de Conflans-Ste-Honorine pour revenir à 0.13 m/s à l'amont de la confluence avec l'Oise du fait d'une augmentation de la section mouillée. L'apport du débit de l'Oise fait augmenter les vitesses en Seine qui varient de 0.13 m/s à 0.14 m/s. Nous constatons en suivant avec attention les lignes de courant que toute l'eau de l'Oise se retrouve dans le bras de Dénouval (bras droit). Ce résultats ne concerne que les situations où les températures de la Seine et de l'Oise sont peu différentes. Dans le cas contraire, des écarts de densité peuvent conduire à une configuration différente du panache de l'Oise. Le bras de Dénouval coule très lentement avec des vitesses de l'ordre de 8 cm/s. Il se comporte en étiage pratiquement comme un bras mort. Enfin, l'eau arrive au barrage d'Andrézy avec une vitesse moyenne de 0.16 m/s.

Pour toute la zone d'étude, le nombre de Courant en chaque noeud est toujours inférieur à 1 (de l'ordre de 0.01) ainsi que le nombre de Froude, y compris dans les rejets d'Achères ce qui caractérise un écoulement fluvial.

5. Modélisation du transport en Seine, dimensions longitudinale et transversale

Nous nous intéressons dans cette dernière partie à la modélisation du transport diffusif et convectif des effluents d'Achères en aval de la station d'épuration. Une démarche originale est proposée qui consiste à utiliser comme traceur la conductivité du milieu. En effet, même si elle n'est pas un élément chimique à proprement parler (la conductivité mesure la charge électrique due aux ions dissous dans l'eau), elle se comporte comme un traceur passif et conservatif et permet ainsi d'appréhender les termes de diffusion turbulente et de dispersion par convection différentielle.

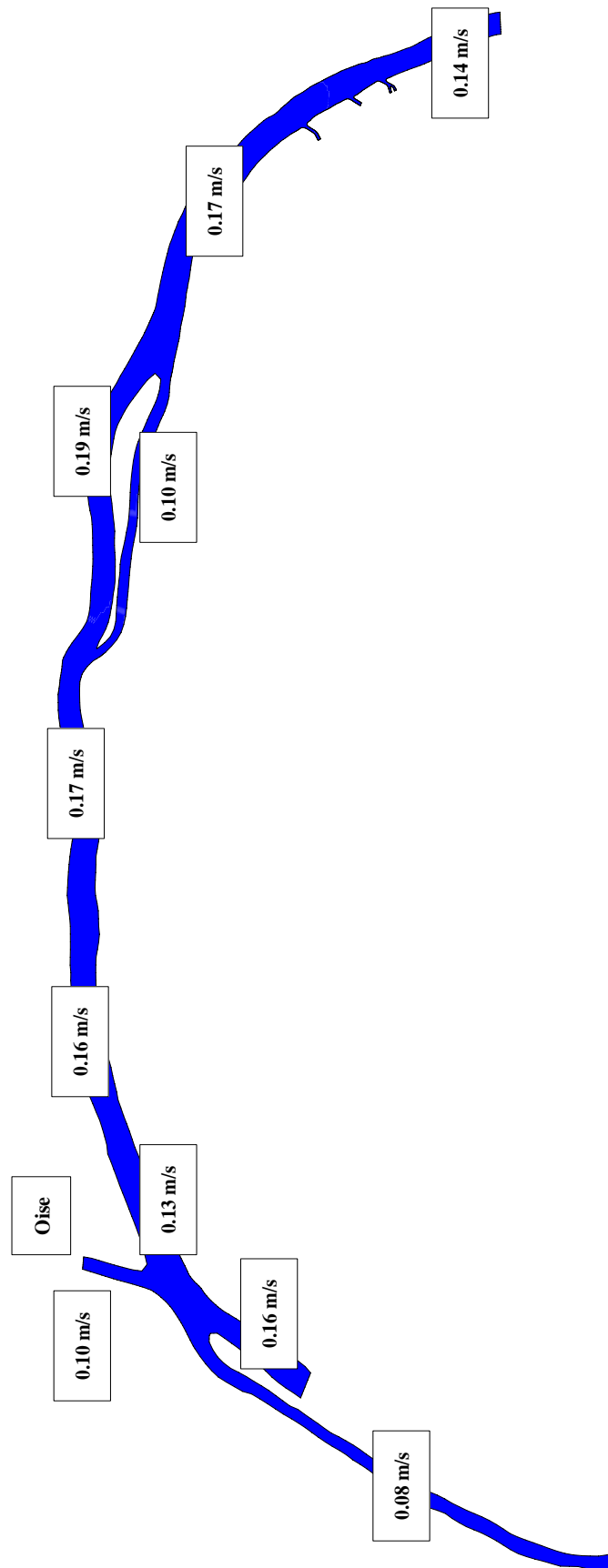


Figure 4.3.1 : Valeurs des vitesses moyennes en Seine d'amont en aval

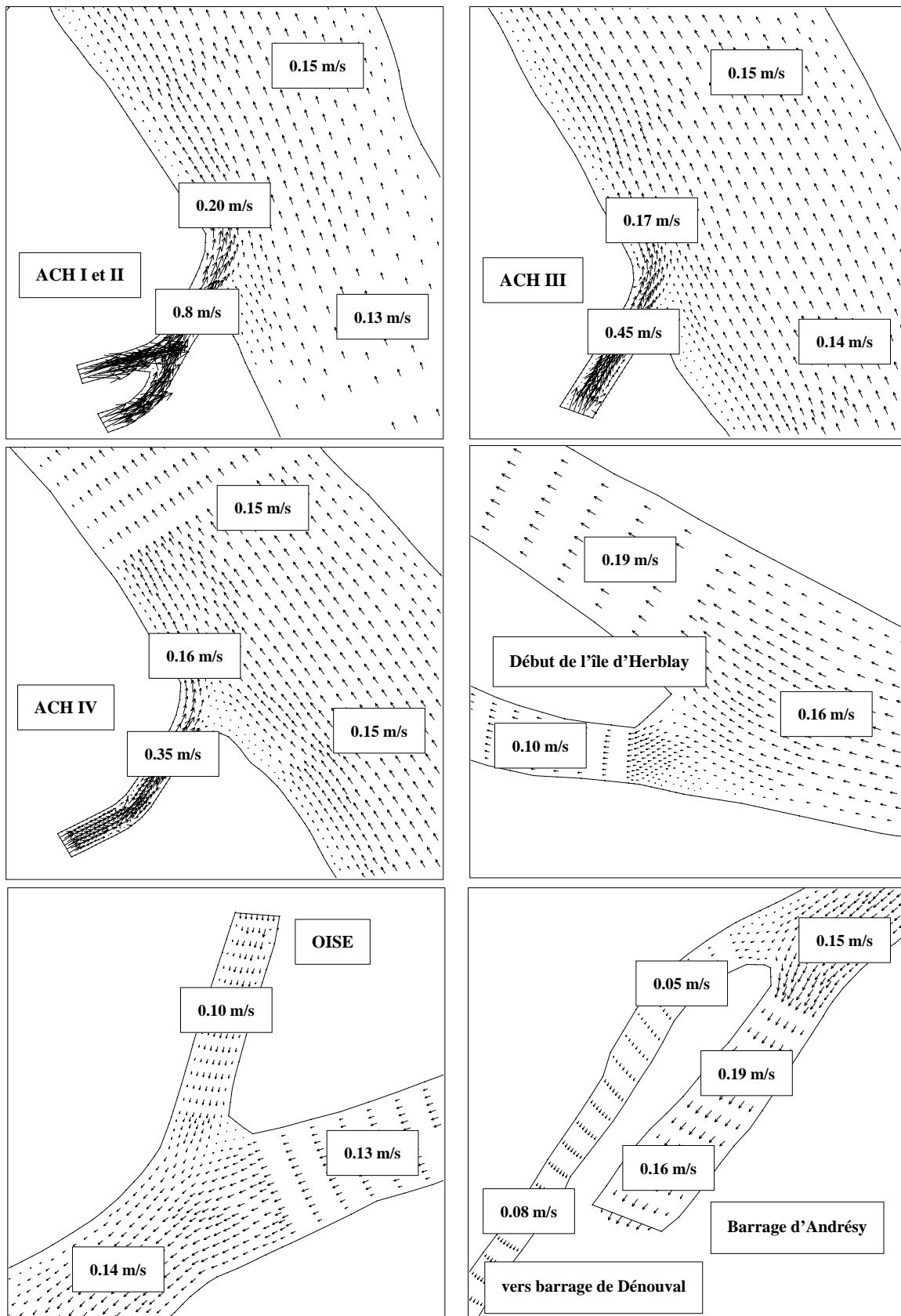


Figure 4.3.2 : Champ des vitesses dans les zones sensibles pour l'écoulement

5.1. Les mesures disponibles

Une étude détaillée a été menée les 8, 9, 10 et 11 septembre 1991 entre Maisons-Laffitte et Poissy sur 9 profils transversaux répartis le long de la rivière [Chesterikoff et al., 1991]. Nous nous intéressons aux six profils qui se situent dans notre zone d'étude (figure 5.1.1).

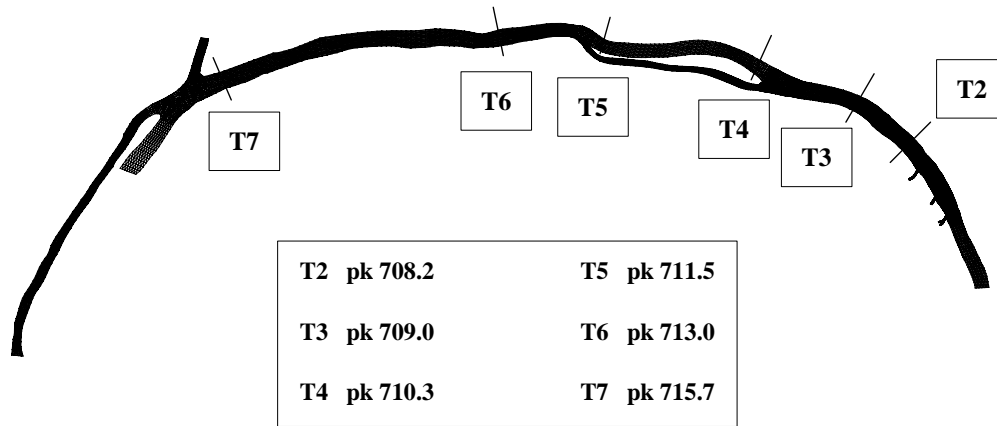


Figure 5.1.1 : Positionnement des profils transversaux pour la campagne de mesures de septembre 1991. Le système de positionnement est celui de l'Agence de l'Eau Seine Normandie.

En se déplaçant à vitesse constante d'une rive à l'autre, la conductivité a été mesurée simultanément à 50 cm, 2 m, et 4 m de profondeur pour les six profils.

Notre modèle ne prenant pas en compte la dimension verticale, nous avons calculé une valeur moyennée sur la verticale en pondérant les mesures disponibles aux trois profondeurs.

Nous obtenons finalement un profil de conductivité pour chaque transversale mesurée (figure 5.1.2).

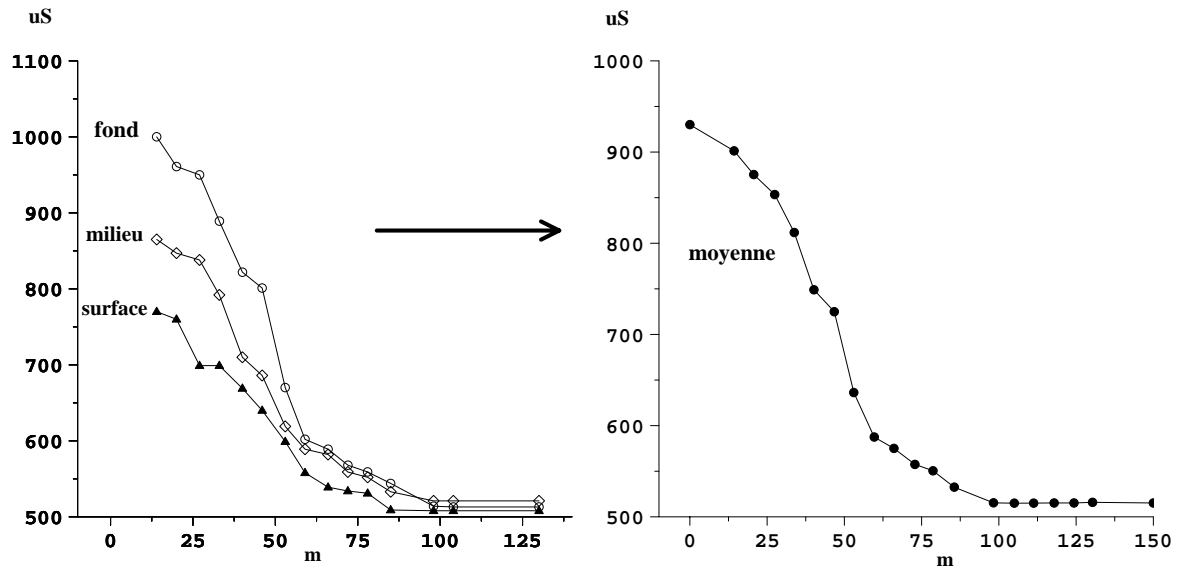


Figure 5.1.3 : Transformation des profils de conductivité en un profil moyenné sur la colonne d'eau

5.2. Utilisation du logiciel SUBIEF-2D, conditions aux limites

Le logiciel SUBIEF-2D version 4.0 utilise les résultats du calcul d'écoulement produit par TELEMAC-2D et effectue une simulation du transport de substances dissoutes et de matières en suspension. Pour faire tourner le modèle, nous lui imposons comme conditions aux limites les valeurs de conductivité mesurées lors de la campagne de septembre 1991, à l'amont du domaine (518 μS), dans les rejets d'Achères (1070 μ) et dans l'Oise (664 μS) [Chesterikoff et al., 1991].

Tout comme pour le calcul de l'hydraulique, nous supposons le régime permanent pour la conductivité, à savoir un flux constant apporté au modèle pendant toute la simulation. Les erreurs imputables à cette hypothèse sont négligeables car les horaires de prélèvement aux différents profils transversaux correspondent au suivi de la même masse d'eau si on considère une vitesse moyenne en Seine de l'ordre de 0.16 m/s, ce qui est le cas pour notre simulation hydraulique en période d'étiage [Chesterikoff et al., 1992].

5.3. Le calage des coefficients de dispersion

Des traçages en Seine nous ont permis d'estimer la distance de mélange transversal sur la largeur à une dizaine de kilomètres [Simon, 1992], [Thery et al., 1993a]. Ces traçages justifient l'utilisation d'un modèle bi-dimensionnel dans le champ proche (inférieur à 10 km) des rejets de la station d'épuration car l'homogénéité transversale n'est pas atteinte.

Les coefficients de dispersion transversale et longitudinale sont calculés dans le modèle par les expressions suivantes, valable en rivière naturelle :

$$\begin{cases} K_t = \alpha_t u^* h \\ K_l = \alpha_l u^* h \end{cases}$$

avec :

u^* : vitesse de cisaillement sur les bords ($m s^{-1}$)

h : hauteur d'eau (m)

Des études en laboratoire dans des sections régulières et avec un profil de vitesses logarithmique conduisent à une valeur de 5.93 pour α_l [Fischer et al., 1979]. Concernant le coefficient de dispersion transversale dû à la diffusion turbulente (α_t), une valeur de 0.6 est généralement employée. Nous avons cependant effectué plusieurs simulations avec différents jeux de paramètres α_l et α_t afin de caler les courbes de conductivité simulées sur celles effectivement mesurées pour les six profils. Les valeurs $\alpha_l = 6$ et $\alpha_t = 1.5$ ont finalement été retenues.

5.4. Résultats et discussions

Nous présentons sur la figure 5.4.1 la comparaison, pour les six profils transversaux, des conductivités mesurée et simulée par le système TELEMAC-2D.

Nous simulons correctement l'évolution du panache des effluents d'Achères sur les dix kilomètres de rivière étudiée pour la période d'étiage des 9 et 10 septembre 1991. Seul le premier profil, 200 mètres après le dernier rejet n'est pas très bien corrélé car nous ne tenons pas compte de la dispersion verticale dans le modèle. Or, les mesures de conductivité pour ce profil montrent une forte hétérogénéité sur la verticale : un modèle tridimensionnel serait plus approprié pour représenter ce genre de phénomène. En effet, il apparaît très nettement que les rejets arrivant en Seine plongent au fond de la rivière leur densité étant plus forte que celle de l'eau de la Seine (matières en suspension et grosses bactéries en concentration plus élevée dans les rejets que dans l'eau de la rivière, température des rejets plus basse que celle de la Seine) [Chesterikoff et al., 1991]. Quant au profil T4, il nous semble difficile d'interpréter et de simuler l'évolution quasi constante de la conductivité sur les 100 premiers mètres depuis la rive gauche. Le passage d'une péniche au moment des mesures ou l'effet des vitesses hélicoïdales sur le panache pourraient expliquer ce phénomène.

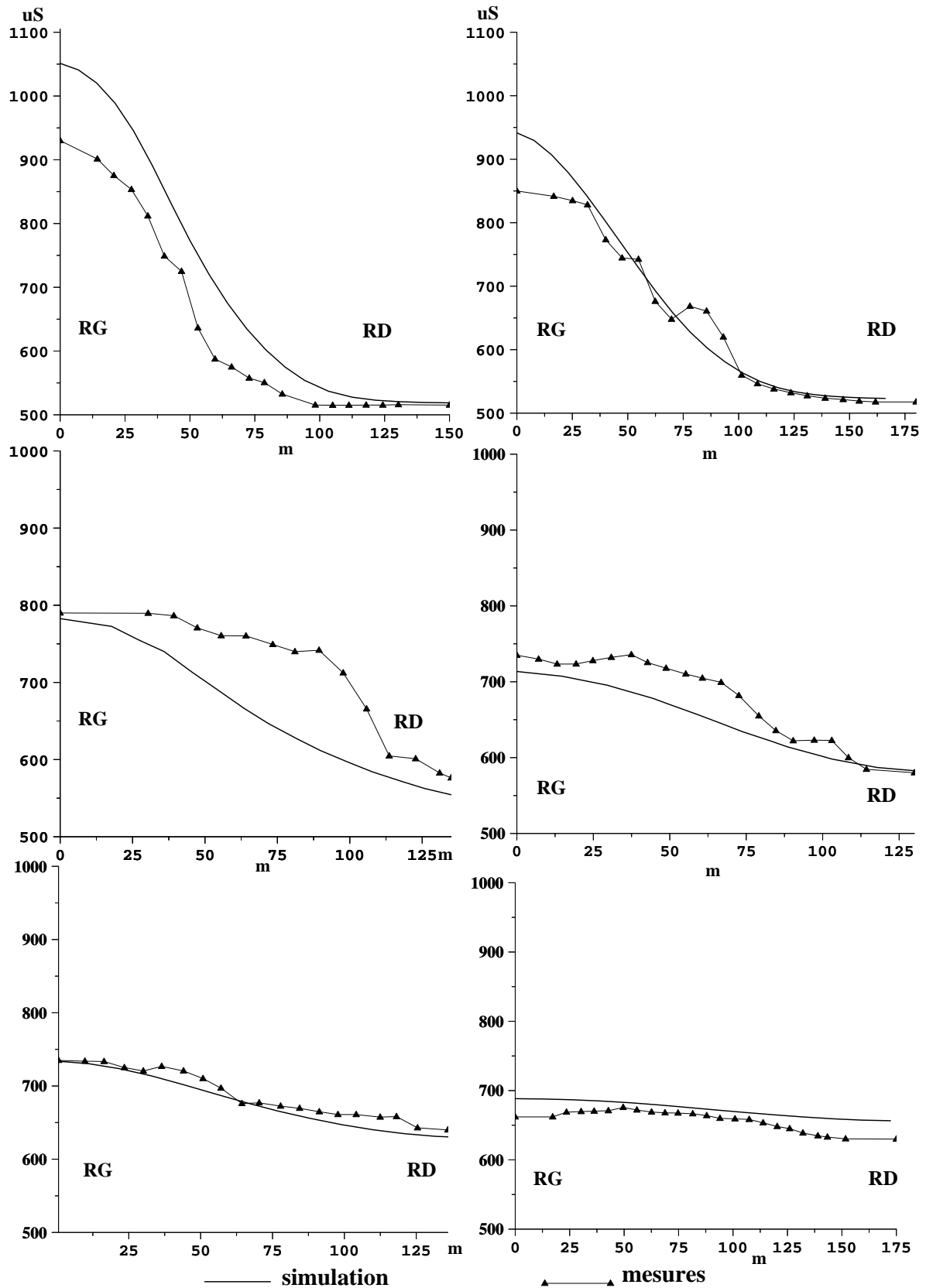


Figure 5.4.1 : Evolution spatiale de la conductivité depuis la Frette jusqu'à la confluence avec l'Oise pour la journée du 9 septembre 1991. Comparaison entre les résultats du modèle et les mesures du PIREN Seine

Conclusion

Pour étudier finement l'impact de la station d'épuration d'Achères sur le fleuve Seine, la première étape a consisté à mettre en place un modèle de simulation du comportement hydraulique et du transport bi-dimensionnel, modèle qui s'est avéré capable de représenter de façon précise l'évolution du panache provenant des effluents d'Achères. La période d'étiage de septembre 1991, précédemment étudiée dans le cadre du PIREN Seine, nous a paru approprié pour cette étude car, d'une part l'influence de la station d'épuration sur le fleuve est importante (1/5^{ème} du débit provient de la station d'épuration) et d'autre part des mesures précises réalisées pendant cette période nous ont permis de valider le modèle. Le couplage du modèle de qualité d'eau RIVE avec SUBIEF constitue la deuxième étape du travail. Il contribuera à la compréhension des processus fins intervenant dans ce tronçon de la Seine : transport, sédimentation et érosion des matières en suspension, dégradation de la matière organique par les différents groupes bactériens, développement algal, consommation d'oxygène...

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'une collaboration entre le Groupe Transferts Hydrauliques d'Electricité De France et le Centre d'Informatique Géologique de l'Ecole des Mines de Paris.

Remerciements

Nous remercions Monsieur Magarian du Service de la Navigation de la Seine, Les Mureaux, pour la fourniture et la préparation des données bathymétriques du secteur étudié.

Références

Carte IGN 1/25 000 2313 OT : Forêts de Montmorency, de l'Isle-Adam et de Carnelle, collection Top 25, Paris, 1991. Cité page 3.

Chesterikoff A., Garban B., Ollivon D. (1991). Qualité et dynamique des matières en suspension et des sédiments en aval de Paris en relation avec la station d'épuration d'Achères, *rapport technique du PIREN-SEINE I/91/05*.

Chesterikoff A., Garban B., Ollivon D. (1992). Dynamique et bilan des suspensions et des sédiments en Seine à l'aval de Paris, leur rôle dans le transfert de la pollution carbonée, azotée et phosphorée (période de Basses Eaux), *rapport technique du PIREN-SEINE*, Paris.

Even S. (1995). Modélisation d'un écosystème fluvial : la Seine - Le modèle PROSE, *thèse présentée pour obtenir le grade de docteur en sciences hydrologie et hydrogéologie quantitatives de l'Ecole des Mines de Paris*, Centre d'Informatique Géologique.

Fischer H.B, List E.J., Koh R.C.Y., Imberger J., Et Brooks N.H. (1979). Mixing in Inland and Coastal Waters. *Academic press*.

Hervouet J.M. (1996). Présentation du système TELEMAC, EDF DER, Chatou

Hervouet J.M., Van Haren L. (1996). TELEMAC-2D Version 3.0 Note de principe, EDF DER, Chatou.

Moulin C., Gailhard J. (1996). SUBIEF Version 3.1 Manuel de l'utilisateur, EDF DER, Chatou.

Quiquempoix O., Boulet T., Hervouet J-M. (1998). MATISSE Version 1.0 Manuel de l'utilisateur, EDF DER, Chatou

Quiquempoix O. (1997). RUBENS Version 4.1 Manuel de l'utilisateur, EDF DER, Chatou

Quiquempoix O., Boulet T. (1998). MATISSE Version 1.1 Manuel de référence, EDF DER, Chatou

Sandrin M. (1986). Carte guide de navigation fluviale : La Seine aval du Havre à Paris, navicarte 1, éditions cartographiques maritimes, port autonome de Paris

Simon L., 1992. Dispersion des rejets en Seine. 1^{ère} phase d'exploitation des traçages du 7/7 et du 8/9/92. Rapport technique PIREN Seine

They L., Simon L. & Poulin M. (1993a). Simulation numérique du transport de substances dissoutes en rivière à l'aide d'un modèle à tubes de courant. Rapport final. Rapport technique, SEDIF-CGE-CERGRENE-CIG.

Sommaire  général

Introduction du thème : Particules

Transfert des MES à l'aval de Paris

**La Seine à l'aval de la station d'épuration d'Achères
Modélisation bi-dimensionnelle du comportement hydraulique et
du transport par convection et diffusion**

Marqueurs radioactifs et matières en suspension (+ Annexe)