



ECOLE DES MINES

THÈSE

présentée à

L'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris

par

Laurent Martin

pour l'obtention du titre de

Docteur

en

Hydrologie et Hydrogéologie Quantitatives

Sujet de la thèse :

**Fonctionnement écologique de la Seine
à l'aval de la station d'épuration d'Achères :
données expérimentales et modélisation bidimensionnelle**

Soutenu le 06 décembre 2001 devant le jury composé de :

Rapporteurs : F. BRISSAUD
B. CAUSSADE

Autres membres : J.M. HERVOUET
E. LEDOUX
J.M. MOUCHEL
M. POULIN



Table des matières

Liste des figures	I
Liste des tableaux.....	VII
Chapitre 1. Introduction générale	1
1.1 Le contexte	1
1.2 Le PIREN-Seine	2
1.3 Les objectifs de la thèse.....	3
1.4 Organisation du document.....	6
Chapitre 2. Impacts de rejets urbains et transport de sédiments : le cas de la Seine	9
2.1 Le contexte	9
2.2 Dynamique du panache des rejets d’Achères en Seine	11
2.2.1 Dispersion transversale des effluents.....	11
2.2.2 Différences de comportement entre la phase dissoute et la phase particulaire	12
2.3 Caractérisation et dynamique des matières en suspension	13
2.3.1 Principales classes de matières	13
2.3.2 Séparation dissous/particulaire pour la modélisation.....	13
2.3.3 Granulométrie de la phase particulaire	13
2.3.4 Masses volumiques et teneur en eau	14
2.3.5 Vitesse de chute des particules	15
2.3.6 Dynamique des suspensions à l’étéage.....	15
2.3.7 Première caractérisation des sédiments en Seine et à l’aval d’Achères.....	17
2.4 Pollution organique et désoxygénations.....	20
2.4.1 La pollution organique.....	20
2.4.2 Désoxygénations.....	23
2.5 Autres pollutions	24
2.6 État de l’art de la modélisation en rivière.....	25
2.6.1 Hydraulique et transport de polluants.....	25
2.6.2 Modélisation du transport de sédiments cohésifs	28
2.6.3 Complexité fonctionnelle biologique.....	32
2.6.4 Synthèse	38
2.7 Choix de la structure du modèle pour le reste de l’étude	39

2.8	Conclusions du chapitre 2	41
Chapitre 3. Modélisation d'un cours d'eau : le système TELEMAC 2D		43
3.1	Introduction	43
3.2	Les pré et post processeurs	44
3.2.1	SINUSX : digitalisation de la bathymétrie	44
3.2.2	MATISSE ET IDEAS : les maillages	45
3.2.3	RUBENS : le traitement des fichiers résultats	48
3.3	Le code de calcul hydraulique TELEMAC 2D	48
3.3.1	Introduction.....	48
3.3.2	Des équations de Navier Stokes aux équations de Saint Venant	49
3.3.3	Termes sources et forces volumiques	53
3.3.4	Conditions aux limites	54
3.3.5	Modélisation de la turbulence.....	55
3.4	Les éléments finis et les méthodes de résolution numérique dans le système TELEMAC.....	57
3.5	Le code de calcul du transport SUBIEF 2D	57
3.5.1	Introduction.....	57
3.5.2	Aspects théoriques	58
3.5.3	Gestion des fonds dans la version 5.0.....	58
3.5.4	Paramétrage de la dispersion dans SUBIEF 2D	59
3.5.5	Paramétrages numériques	60
3.5.6	Remarques sur la conservation de la masse du traceur.....	61
3.6	Conclusions du chapitre 3	61
Chapitre 4. Développements dans SUBIEF 2D		65
4.1	Introduction	65
4.2	Modèle énergétique pour le transport en suspension mis en oeuvre dans SUBIEF 2D	66
4.3	Transport et navigation.....	68
4.3.1	Phénomènes hydrauliques liés aux passages des bateaux	69
4.3.2	Puissance dissipée par la navigation	76
4.3.3	Dispersion induite par la navigation	76
4.3.4	Données relatives à la navigation	77
4.3.5	Description du chenal de navigation en fonction du maillage	78
4.3.6	Résultats types sur un canal	81
4.4	Le modèle multi-classes	82

4.4.1	Notations utilisées.....	82
4.4.2	Équations programmées dans SUBIEF 2D.....	83
4.5	Traceurs radioactifs	85
4.6	Le module biologique.....	86
4.6.1	Introduction.....	86
4.6.2	Schéma conceptuel biologique	86
4.6.3	Les variables biologiques.....	90
4.6.4	Les paramètres biologiques externes	91
4.6.5	Les paramètres biologiques internes.....	92
4.6.6	Les fonctions de forçage	93
4.6.7	Les processus biologiques.....	93
4.7	Résolution par pas fractionnaires	100
4.8	Conclusions du chapitre 4	102
Chapitre 5. Hydraulique et transport dissous à l'étiage dans le bief Seine-Aval Andrésey.....		105
5.1	Introduction	105
5.2	Calcul de l'écoulement permanent pour l'étiage de septembre 1991.....	106
5.2.1	Les conditions aux limites	106
5.2.2	Calcul avec le maillage raffiné	107
5.2.3	Calcul avec le maillage simplifié.....	113
5.2.4	Discussion.....	115
5.3	Modélisation du transport dissous en Seine. Dimensions longitudinale et transversale	117
5.3.1	Les mesures disponibles	117
5.3.2	Détermination des coefficients de dispersion adimensionnels	119
5.3.3	Dispersion dans le secteur Achères-Andrésey.....	120
5.3.4	Déformation du panache de conductivité au passage des bateaux.....	124
5.3.5	Traçages de temps sec.....	128
5.4	Conclusions du chapitre 5	129
Chapitre 6. Transport solide en Seine à l'étiage : Données expérimentales et modélisation		131
6.1	Introduction	131
6.2	Suivi tri-dimensionnel du panache d'Achères le 21 et 22 juillet 1999.....	131
6.2.1	Méthodologie mise en place	131
6.2.2	Difficultés techniques et améliorations possibles	133
6.2.3	Isocourbes obtenues.....	134

6.2.4	Suivi du panache de conductivité : localisation précise du panache d'Achères en Seine.....	145
6.2.5	Suivi du panache de turbidité : processus d'érosion et de sédimentation en période de basses eaux ; influence de la navigation	146
6.2.6	Flux de MES pour les différents transects	147
6.3	Auscultation des fonds de Seine au sonar latéral	151
6.3.1	Objet de l'étude.....	151
6.3.2	Méthodologie du sonar latéral	152
6.3.3	Résultats des mesures	152
6.3.4	Commentaires	153
6.4	Simulation du transport des matières en suspension à l'aval d'Achères le 21 et 22 juillet 1999	159
6.4.1	Conditions aux limites	159
6.4.2	Conditions initiales pour l'épaisseur de dépôt	159
6.4.3	Résultats.....	159
6.5	Estimation de l'âge moyen des particules en transit et des dépôts en période d'étiage	167
6.5.1	estimation de l'âge moyen des particules sortant du bief à l'aide d'un traçage théorique de MES	167
6.5.2	Deuxième méthode d'estimation de l'âge moyen des particules sorties du bief	171
6.5.3	Cartes des âges des dépôts en fonction des caractéristiques physiques des particules simulées	174
6.6	Simulation de deux classes de particules.....	180
6.7	Modélisation de différents scénarios concernant la navigation.....	181
6.8	Temps de transit des particules pour l'étiage de juin et juillet 2000	183
6.8.1	Conditions hydrauliques transitoires de l'été 2000.....	183
6.8.2	Temps de transit des particules.....	185
6.9	Conclusions du chapitre 6	191
Chapitre 7. Applications de SUBIEF 2D à la qualité d'eau de la Seine à l'étiage.....		193
7.1	Intercomparaison des modèles de qualité d'eau	193
7.1.1	Introduction.....	193
7.1.2	ProSe 1D et ProSe à tubes (Even, 1995 ; Even et Poulin, 2001)	193
7.1.3	Différences des schémas conceptuels adoptés dans SUBIEF et dans ProSe	194
7.1.4	Données d'entrées hydrauliques et conditions aux limites pour l'intercomparaison des modèles de qualité d'eau.....	195
7.1.5	Résultats.....	198
7.2	Suivi bidimensionnel de l'oxygène le 22 juillet 1999 et modélisation pour un régime d'étiage permanent	215

7.2.1	Campagne du 21 et 22 juillet 1999	215
7.2.2	Les données d'entrée du modèle pour le régime permanent.....	218
7.2.3	Comparaison mesures/simulation	219
7.3	Analyse de sensibilité.....	224
7.4	Conclusions du chapitre 7	227
Conclusions et perspectives.....		229
Bibliographie.....		233
Annexe A. Méthodes numériques pour résoudre l'équation de Barré de Saint-Venant dans sa formulation « hauteur-vitesse »		247
A.1	Convection de u et v par la méthode des caractéristiques.....	247
A.2	Propagation, diffusion, termes sources des équations de Barré de Saint Venant	248
A.2.1	Discrétisation en temps	248
A.2.2	Discrétisation en espace : résolution en éléments finis.....	249
A.2.3	Formulation variationnelle.....	250
A.2.4	Traitement des conditions aux limites	251
A.3	Formulation matricielle des équations obtenues.....	252
A.4	Résolution du système linéaire	252
Annexe B. Module d'évolution de traceurs radioactifs de faible période demi-vie développé dans SUBIEF 2D		253
B.1	Introduction.....	253
B.2	Choix des traceurs radioactifs	253
B.3	Échanges de radioactivité entre la phase dissoute et la phase particulaire.....	255
B.3.1	Notations utilisées.....	255
B.3.2	Le K_D : un coefficient de partage à l'équilibre	255
B.3.3	Les équations programmées.....	256
B.3.4	Les paramètres du modèle	257
B.3.5	Les hypothèses du modèle	257
Annexe C. Application du modèle SUBIEF 2D au calcul des hauteurs de dépôt. Mesures d'isotopes radioactifs <i>in situ</i>		259
C.1	Introduction.....	259
C.2	Échantillonnage.....	259
C.3	L'entrée du système (amont).....	260

C.4 L'aval immédiat des rejets de la station d'Achères.....	262
C.5 L'aval du bras droit de l'île d'Herblay.....	264
C.6 L'entrée du bras gauche de l'île d'Herblay.....	264
C.7 Le bras gauche de l'île d'Herblay.....	265
C.8 Conclusions.....	266
Annexe D. Suivi tridimensionnel du panache des effluents d'Achères ; compléments	267