

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

École Doctorale RP2E, Ressources Procédés Produits Environnement

Laboratoire Réactions et Génie des Procédés

THÈSE

Pour l'obtention du titre de

Docteur de l'Université de Lorraine

Spécialité Génie des Procédés et des Produits

par

Dinh-Huan NGUYEN

OPTIMISATION DE LA CONCEPTION ET DU FONCTIONNEMENT DES STATIONS DE TRAITEMENT DES EAUX USÉES

Soutenue publiquement le 24 mars 2014, devant la commission d'examen

Christophe DAGOT	Professeur, Université de Limoges	<i>Rapporteur</i>
Nicolas ROCHE	Professeur, Université de Marseille	<i>Rapporteur</i>
Benoît CHACHUAT	Professeur, Imperial College, London, UK	<i>Examineur</i>
Olivier POTIER	Maître de Conférences, Université de Lorraine	<i>Examineur</i>
François LESAGE	Maître de Conférences, Université de Lorraine	<i>Examineur</i>
Abderrazak LATIFI	Professeur, Université de Lorraine	<i>Directeur de thèse</i>

Table des matières

Table des matières	i
Table des figures	vii
Table des tableaux	xi
Nomenclature	xiii
Introduction générale.....	1
Chapitre 1 PRÉSENTATION ET MODÉLISATION DES STATIONS DE TRAITEMENT DES EAUX USÉES	7
1.1. Généralités sur le traitement des eaux usées	8
1.1.1. Fondement de l'épuration biologique des eaux usées.....	8
1.1.2. Procédé de traitement par boues activées.....	9
1.1.3. Spécificité des petites stations de traitement.....	11
1.1.4. Spécificité des grandes stations de traitement.....	13
1.2. Généralités sur la modélisation des stations d'épuration	14
1.2.1. Présentation des principaux modèles biologiques.....	14
1.2.2. Modèle ASM1	14
1.2.2.1. Unité de mesure de concentration utilisée	14
1.2.2.2. Processus mis en jeu	15
1.2.2.3. Variables d'état prise en compte dans le modèle ASM1	16
1.3. Station de traitement de petite taille	18
1.3.1. Liste des variables d'état.....	18
1.3.2. Cinétiques des réactions mises en jeu	19
1.3.3. Taux de conversion et valeurs des paramètres	20
1.3.3.1. Taux de conversion	20
1.3.3.2. Valeurs des paramètres biologiques.....	20
1.3.4. Bilan de matière dans le réacteur	22
1.3.5. Bilan de matière dans le décanteur.....	23
1.3.5.1. Modèle réaliste (à couches)	23
1.3.5.2. Modèle simplifié	28
1.3.6. Influent et effluent.....	29
1.3.6.1. Influent	29
1.3.6.2. Effluent.....	29

1.4. Stations d'épuration de grande taille	30
1.4.1. Liste des variables d'état et processus	30
1.4.1.1. Liste des variables d'état.....	30
1.4.1.2. Cinétiques des réactions mises en jeu.....	30
1.4.2. Taux de conversion et valeurs des paramètres.....	31
1.4.2.1. Taux de conversion observés.....	31
1.4.2.2. Valeurs des paramètres biologiques.....	32
1.4.3. Bilan de matière dans le réacteur	32
1.4.4. Bilan de matière dans le décanteur.....	33
1.4.5. Âge des boues dans le système	35
1.4.6. Influent et effluents.....	37
1.4.6.1. Influent	37
1.4.6.2. Effluent.....	38
Chapitre 2 MÉTHODE D'OPTIMISATION DYNAMIQUE	39
2.1. Introduction	40
2.2. Position du problème d'optimisation.....	40
2.2.1. Critère.....	40
2.2.2. Modèle de procédé	40
2.2.3. Contraintes	41
2.3. Méthodes de résolution.....	41
2.3.1. Méthodes directes.....	41
2.3.2. Méthode des sensibilités	42
2.3.2.1. Sensibilités paramétriques	43
2.3.2.2. Description de l'algorithme d'optimisation	45
2.3.2.3. Exemple de détermination des équations de sensibilité.....	47
2.4. Présentation du logiciel gProms	50
Chapitre 3 SIMULATION ET OPTIMISATION DE STATIONS D'ÉPURATION DE PETITE TAILLE.....	51
3.1. Description de la station étudiée.....	52
3.2. Formulation des données d'entrée (identification).....	53
3.2.1. Mesures expérimentales	54
3.2.2. Formulation des données d'entrée	55
3.2.3. Comparaison entre les corrélations et les valeurs réellement utilisées par gProms à partir de la lecture du fichier de données brutes.....	57
3.3. Simulation dynamique pour différents modèles de décanteur	59

3.3.1. Rappels des modèles du décanteur.....	59
3.3.2. Résultats de simulation	60
3.4. Influence du modèle du décanteur sur la performance optimale.....	61
3.4.1. Formulation du problème d'optimisation.....	62
3.4.2. Résultats d'optimisation.....	63
3.4.3. Conclusion	65
3.5. Optimisation dynamique de l'énergie d'aération continue	65
3.5.1. Formulation du problème d'optimisation.....	66
3.5.2. Résultats d'optimisation.....	66
3.5.3. Comparaison avec le fonctionnement actuel.....	67
3.6. Amélioration de la station d'épuration	68
3.6.1. Optimisation de la structure proposée.....	69
3.6.1.1. Cas de non-recyclage interne ($Q_a = 0$)	69
3.6.1.2. Cas du recyclage interne ($Q_a > 0$)	71
3.6.2. Conclusion	73
3.7. Influence de la méthode de réduction de l'azote (alternée ou continue) sur la performance optimale.....	73
3.7.1. Introduction	73
3.7.2. Formulation du problème d'optimisation.....	74
3.7.2.1. Cas d'un seul bassin avec aération alternée	74
3.7.2.2. Cas de deux bassins avec aération continue	74
3.7.3. Résultats d'optimisation.....	74
3.7.3.1. Cas d'un seul bassin avec aération alternée	74
3.7.3.2. Cas de deux bassins avec aération continue	75
3.7.3.3. Comparaison de la consommation énergétique	75
3.8. Conclusion.....	76
Chapitre 4 SIMULATION ET OPTIMISATION DE STATIONS D'ÉPURATION DE GRANDE TAILLE	77
4.1. Description de la station d'épuration étudiée	78
4.2. Simulation dynamique de la station d'épuration	79
4.2.1. Introduction	79
4.2.2. Simulation	80
4.3. Optimisation de l'énergie d'aération	83
4.3.1. Introduction	83
4.3.2. Problème d'optimisation	84

4.3.3. Résultats de l'optimisation	85
4.3.4. Conclusions	87
4.4. Optimisation du coût total	88
4.4.1. Introduction	88
4.4.2. Critère d'optimisation	88
4.4.2.1. Coût d'investissement (CI)	88
4.4.2.2. Coût de fonctionnement (CO).....	89
4.4.3. Simulation	91
4.4.4. Formulation du problème d'optimisation.....	91
4.4.4.1. Cas des variables de décision k_{La_i} et Q_a	92
4.4.4.2. Cas d'utilisation de toutes les variables de décision sans contrainte sur l'âge des boues	94
4.4.4.3. Cas d'utilisation de toutes les variables de décision avec contrainte sur l'âge des boues	98
4.4.5. Conclusions	100
4.5. Optimisation multicritère.....	101
4.5.1. Introduction	101
4.5.2. Méthodes utilisées en optimisation multicritère	101
4.5.3. Formulation du problème d'optimisation.....	104
4.5.4. Résultats d'optimisation.....	106
4.5.4.1. Cas d'un seul intervalle de temps	106
4.5.4.2. Cas de plusieurs intervalles de temps	107
4.5.5. Conclusions	109
4.6. Optimisation de la conception et du dimensionnement.....	109
4.6.1. Introduction	109
4.6.2. Revue bibliographique	109
4.6.3. Approche proposée.....	110
4.6.4. Validation de l'approche proposée.....	110
4.6.5. Coûts de la station d'épuration.....	111
4.6.6. Structure et dimensions optimales	112
4.6.6.1. Cas d'un seul bassin.....	113
4.6.6.2. Cas de 2 bassins	115
4.6.6.3. Cas de 3 bassins	118
4.6.6.4. Cas de 4 bassins	120

4.6.6.5. Cas de 5 bassins	122
4.6.7. Conclusions	124
4.7. Conclusions	125
Chapitre 5 IDENTIFICATION ET OPTIMISATION D'UNE STATION D'ÉPURATION INDUSTRIELLE	127
5.1. Introduction	128
5.2. Modélisation du procédé	128
5.2.1. Choix du modèle	128
5.2.2. Modélisation du procédé	128
5.2.2.1. Modélisation du réacteur biologique	128
5.2.2.2. Modélisation du décanteur	129
5.3. Station d'épuration considéré	129
5.3.1. Configuration de la station de traitement	129
5.3.2. Données expérimentales	130
5.3.3. Bilans global et partiel de matière	130
5.3.3.1. Bilan de matière dans le décanteur primaire	130
5.3.4. État initial de la station d'épuration	132
5.3.4.1. Détermination des coefficients de transfert d'oxygène	132
5.3.4.2. Détermination des concentrations initiales	132
5.4. Identification paramétrique du modèle	132
5.4.1. Analyse d'estimabilité	133
5.4.2. Procédure d'identification paramétrique	137
5.4.2.1. Jeu de paramètres par défaut	137
5.4.2.2. Calcul et analyse d'estimabilité	137
5.4.3. Résultats de l'identification	139
5.4.3.1. Identification avec les données simulées par WEST	139
5.4.3.2. Identification avec les données mesurées	140
5.5. Simulation dynamique	141
5.6. Optimisation dynamique de l'énergie d'aération	144
5.6.1. Problème d'optimisation	144
5.6.2. Résultats de l'optimisation	144
5.6.2.1. Cas d'un intervalle	145
5.6.2.2. Cas de 7 intervalles	146
5.7. Comparaison des configurations des stations BSM1 et Verulam	147

5.8. Conclusions	150
Conclusions générales et perspectives	152
Bibliographie	156
Annexe A Données de petite station d'épuration	162
Annexe B Données et résultats de la station du Benchmark (BSM1)	163
Annexe C Données expérimentales et résultats de la station Verulam	180
Annexe D Comparaison du coût total entre ASM3 et BSM1	187

Table des figures

Figure 1.1. Étapes du processus de dégradation biologique	8
Figure 1.2. Configuration du procédé de traitement par boues activées	9
Figure 1.3. Étapes du processus de dégradation biologique de l'azote	10
Figure 1.4. Schéma conceptuel du modèle ASM1	15
Figure 1.5. Décomposition de la DCO en variables du modèle ASM1	17
Figure 1.6. Décomposition de l'Azote en variables du modèle ASM1	18
Figure 1.7. Bilans de matière dans les couches du décanteur	25
Figure 1.8. Station du Benchmark	30
Figure 1.9. Numérotation des couches et position de l'alimentation	32
Figure 1.10. Variabilité des données d'entrée par temps sec, pluvieux et orageux	37
Figure 2.1. Représentation schématique de l'algorithme de résolution	46
Figure 2.2. Cas de deux intervalles de temps ($N = 2$)	48
Figure 3.1. Configuration de la station de traitement biologique étudiée	52
Figure 3.2. Configuration des cycles d'aération (commande par horloges)	53
Figure 3.3. Données expérimentales	55
Figure 3.4. Comparaison des prédictions de la corrélation et des mesures moyennes de la DCO	56
Figure 3.5. Comparaison des prédictions de la corrélation et des mesures moyennes du débit de l'influent Q_0	56
Figure 3.6. Comparaison des prédictions de la corrélation et des mesures moyennes des MES	56
Figure 3.7. Comparaison des prédictions de la corrélation et des mesures moyennes de NTK	56
Figure 3.8. Modèle de simulation gProms	57
Figure 3.9. Comparaison entre les mesures expérimentales corrélées du débit Q_0 et les valeurs utilisées directement par gProms	58
Figure 3.10. Comparaison entre les mesures expérimentales corrélées de DCO et les valeurs utilisées directement par gProms	58
Figure 3.11. Décanteur avec les modèles simplifié et réaliste	59
Figure 3.12. Comparaison des modèles du décanteur : concentration en DCO	60
Figure 3.13. Comparaison des modèles du décanteur : concentration en DBO_5	60
Figure 3.14. Comparaison des modèles du décanteur : concentration en NGL	61
Figure 3.15. Comparaison des modèles du décanteur : concentration en MES	61
Figure 3.16. Séquence d'aération et définition des paramètres d'optimisation	62

Figure 3.17. Énergie d'aération minimale en fonction du nombre de cycles.....	63
Figure 3.18. Profils d'aération après optimisation	64
Figure 3.19. Concentrations en NGL de l'effluent.....	64
Figure 3.20. Profil d'aération optimal.....	66
Figure 3.21. Concentrations optimales de l'effluent.....	67
Figure 3.22. Comparaison entre la réalité et l'optimisation.....	68
Figure 3.23. Station d'épuration avant et après amélioration ($V = V_1 + V_2$).....	69
Figure 3.24. Résultats d'optimisation (cas de $Q_a = 0$).....	70
Figure 3.25. Concentrations optimales sur l'effluent (cas de $Q_a = 0$).....	70
Figure 3.26. Comparaison entre le fonctionnement actuel et optimisé (cas de $Q_a = 0$).....	71
Figure 3.27. Résultats de l'optimisation (cas de $Q_a > 0$).....	72
Figure 3.28. Concentrations optimales de l'effluent (cas de $Q_a > 0$).....	72
Figure 3.29. Comparaison entre le fonctionnement actuel et optimisé (cas de $Q_a > 0$).....	72
Figure 3.30. Profil optimal d'aération dans le cas d'un seul bassin.....	74
Figure 3.31. Profil optimal d'aération cas de deux bassins.....	75
Figure 3.32. Comparaison des performances des fonctionnements réels, avec aération alternée et aération continue	75
Figure 4.1. Station d'épuration du Benchmark	78
Figure 4.2. Comparaison entre le débit expérimental et le débit traité de gProms	80
Figure 4.3. Concentrations de l'effluent (temps sec)	82
Figure 4.4. Concentrations de l'effluent (temps pluvieux)	82
Figure 4.5. Concentrations de l'effluent (temps orageux)	83
Figure 4.6. Âge des boues dans le système	83
Figure 4.7. Influence du nombre d'intervalles sur le critère d'optimisation.....	85
Figure 4.8. Profils d'aération avant et après optimisation.....	85
Figure 4.9. Énergie consommée dans la station d'épuration.....	86
Figure 4.10. Concentrations des effluents après optimisation	87
Figure 4.11. Âge des boues après optimisation.....	87
Figure 4.12. Répartition des coûts avant optimisation (dynamique).....	91
Figure 4.13. Coûts optimaux et leur répartition	93
Figure 4.14. Coût total avant et après optimisation.....	93
Figure 4.15. Concentrations de l'effluent après optimisation	94
Figure 4.16. Âge des boues après optimisation.....	94
Figure 4.17. Coûts optimaux et leur répartition	96
Figure 4.18. Coût total avant (Benchmark) et après optimisation	96
Figure 4.19. Concentrations de l'effluent après optimisation	97
Figure 4.20. Âge des boues après optimisation.....	97

Figure 4.21. Coûts optimaux et leur répartition	99
Figure 4.22. Coût total avant et après optimisation.....	99
Figure 4.23. Concentrations de l'effluent après optimisation	100
Figure 4.24. Âge des boues après optimisation.....	100
Figure 4.25. Méthode d'agrégation	102
Figure 4.26. Influence de la valeur ω sur l'optimisation (cas d'un intervalle)	106
Figure 4.27. Profils d'aération pour le point correspond au coût total pondéré minimal	107
Figure 4.28. Influence de la valeur ω sur l'optimisation (cas de 7 intervalles)	108
Figure 4.29. Profils d'aération pour le point qui correspond au coût total pondéré minimal	108
Figure 4.30. Répartition des coûts de la station BSM1 en fonctionnement (statique).....	111
Figure 4.31. Concentrations de l'effluent (statique) avant optimisation.....	112
Figure 4.32. Superstructures pour une station de traitement des eaux usées	112
Figure 4.33. Superstructure initiale de la station (cas de 1 bassin)	113
Figure 4.34. Structure optimale de la station (cas de 1 bassin).....	114
Figure 4.35. Répartition des coûts optimaux (cas de 1 bassin).....	115
Figure 4.36. Concentration en NGL de l'effluent après optimisation.....	115
Figure 4.37. Superstructure initiale de la station (cas de 2 bassins).....	115
Figure 4.38. Superstructure optimale de la station (cas de 2 bassins).....	117
Figure 4.39. Répartition des coûts optimaux (cas de 2 bassins)	117
Figure 4.40. Superstructure initiale de la station (cas de 3 bassins).....	118
Figure 4.41. Superstructure optimale de la station (cas de 3 bassins).....	119
Figure 4.42. Répartition des coûts optimaux (cas de 3 bassins)	119
Figure 4.43. Superstructure initiale de la station (cas de 4 bassins).....	120
Figure 4.44. Superstructure optimale de la station (cas de 4 bassins).....	121
Figure 4.45. Répartition des coûts optimaux (cas de 4 bassins)	121
Figure 4.46. Superstructure initiale de la station (cas de 5 bassins).....	122
Figure 4.47. Superstructure optimale de la station (cas de 5 bassins).....	123
Figure 4.48. Répartition des coûts optimaux (cas de 5 bassins)	123
Figure 5.1. Schéma de la station d'épuration de Verulam	129
Figure 5.2. Bilan de matière dans le décanteur primaire.....	131
Figure 5.3. Bilan de matière global dans le système	131
Figure 5.4. Résultats de l'analyse de sensibilité sous Matlab	138
Figure 5.5. Résultats après l'identification.....	140
Figure 5.6. Comparaison des mesures expérimentales et des prédictions du modèle obtenues à l'aide des valeurs par défaut et identifiées des paramètres	141
Figure 5.7. Profils d'aération de la station en fonctionnement statique.....	142

Figure 5.8. Concentrations simulées de l'effluent en utilisant les valeurs identifiées des paramètres	144
Figure 5.9. Profils optimaux d'aération	145
Figure 5.10. Énergie consommée dans l'aération de la station d'épuration dans le cas d'un seul intervalle	145
Figure 5.11. Concentrations de l'effluent après optimisation dans le cas d'un seul intervalle	146
Figure 5.12. Profils optimaux d'aération (cas de 7 intervalles)	146
Figure 5.13. Énergie consommée dans la station d'épuration (cas de 7 intervalles)	147
Figure 5.14. Concentrations de l'effluent après optimisation (cas de 7 intervalles)	147
Figure B.1. Concentrations dans le bassin (temps sec)	164
Figure B.2. Concentrations dans le décanteur (temps sec)	166
Figure B.3. Concentrations de l'effluent (temps sec)	166
Figure B.4. Concentrations dans le bassin (temps pluvieux)	168
Figure B.5. Concentrations dans le décanteur (temps pluvieux)	169
Figure B.6. Concentrations de l'effluent (temps pluvieux)	170
Figure B.7. Concentrations dans le bassin (temps orageux)	171
Figure B.8. Concentrations dans le décanteur (temps orageux)	173
Figure B.9. Concentrations de l'effluent (temps orageux)	173
Figure C.1. Débit d'entrée	180
Figure C.2. Concentrations en S_I et S_S d'entrée	180
Figure C.3. Concentrations en X_I et X_S d'entrée	180
Figure C.4. Concentrations en S_{NH} et S_{ND} d'entrée	181
Figure C.5. Concentrations en X_{ND} et S_O d'entrée	181
Figure C.6. Données expérimentales sur l'effluent	182
Figure C.7. Résultats des concentrations de l'effluent après l'identification	185
Figure C.8. Concentration en DCO sur l'effluent après l'identification	185
Figure C.9. Concentration en DBO_5 sur l'effluent après l'identification	186
Figure C.10. Concentration en NGL sur l'effluent après l'identification	186
Figure C.11. Concentration en MES sur l'effluent après l'identification	186

Table des tableaux

Tableau 1.1. Variables d'état du modèle de dégradation biologique	18
Tableau 1.2. Paramètres stœchiométriques	21
Tableau 1.3. Paramètres cinétiques	21
Tableau 1.4. Paramètres du modèle de décantation	24
Tableau 1.5. Concentrations dans l'effluent traité	28
Tableau 1.6. Concentrations dans le recyclage	28
Tableau 2.1. Comparaison des méthodes de calcul du gradient.....	46
Tableau 3.1. Paramètres du débit et des concentrations entrantes	57
Tableau 3.2. Paramètres identifiés	62
Tableau 3.3. Résultat d'aération pour le modèle réaliste après optimisation (heure)	65
Tableau 3.4. Résultat d'aération pour le modèle simplifié après optimisation (heure)	65
Tableau 3.5. Valeurs optimales de $k_L a$ dans le cas d'un seul bassin (h^{-1}).....	75
Tableau 4.1. Valeurs du système.....	78
Tableau 4.2. Débits moyens	79
Tableau 4.3. Données moyennes d'entrée du système.....	80
Tableau 4.4. Valeurs des variables de fonctionnement de la station.....	81
Tableau 4.5. Valeurs d'aération après optimisation.....	86
Tableau 4.6. Paramètres pour le coût d'investissement	89
Tableau 4.7. Limites maximales pour les variables de l'opération (Alex et al., 2001).....	90
Tableau 4.8. Coefficients des coûts de fonctionnement (Alasino et al., 2007).....	90
Tableau 4.9. Résultat des coûts avant optimisation	91
Tableau 4.10. Estimation initiale des variables de décision.....	92
Tableau 4.11. Profils optimaux des variables de décision	92
Tableau 4.12. Répartition des coûts après optimisation.....	93
Tableau 4.13. Résumé des coûts avant et après optimisation	93
Tableau 4.14. Variables d'état au début	95
Tableau 4.15. Valeurs optimales des variables de décision	95
Tableau 4.16. Coûts du système après optimisation	95
Tableau 4.17. Résumé des coûts avant et après optimisation	96
Tableau 4.18. Profils optimaux des variables de décision	98
Tableau 4.19. Coûts du système après optimisation	99
Tableau 4.20. Résumé des coûts avant et après optimisation	99
Tableau 4.21. Coefficients des coûts (Alasino et al., 2007).....	105

Tableau 4.22. Valeurs des B_i	105
Tableau 4.23. Variables optimales (cas d'un intervalle)	107
Tableau 4.24. Valeurs des variables de décision après optimisation	108
Tableau 4.25. Résultats après optimisation (cas de 1 bassin)	114
Tableau 4.26. Résultats après optimisation (cas de 2 bassins)	116
Tableau 4.27. Résultats après optimisation (cas de 3 bassins)	118
Tableau 4.28. Résultats après optimisation (cas de 4 bassins)	121
Tableau 4.29. Résultats après optimisation (cas de 5 bassins)	123
Tableau 4.30. Comparaison des coûts avant et après optimisation	124
Tableau 5.1. Dimensions moyennes de la station	130
Tableau 5.2. Concentrations initiales dans les bassins	132
Tableau 5.3. Algorithme utilisé pour l'analyse de l'estimabilité	136
Tableau 5.4. Paramètres et leurs limites dans le modèle (ASM1)	137
Tableau 5.5. Rangement des paramètres dans l'ordre décroissant d'estimabilité	138
Tableau 5.6. Résultats des paramètres identifiés	139
Tableau 5.7. Résultats des paramètres identifiés	141
Tableau 5.8. Concentrations initiales dans les bassins	142
Tableau 5.9. Comparaison des performances des stations de BSM1 et Verulam	148
Tableau A.1. Débit et charge incidents moyens sur 24 heures (4/09 - 10/09/1996)	162
Tableau A.2. Débit et charge incidents moyens sur 2 heures (journée du 10/09/1996)	162
Tableau B.1. Variables de fonctionnement (cas d'un intervalle)	174
Tableau B.2. Profils d'aération (cas de 7 intervalles)	174
Tableau B.3. Coefficients k_{L,a_i} dans les bassins (cas de 7 intervalles)	178

Nomenclature

A_o	Apport d'oxygène		Iteration
AE^*	Paramètre de normalisation de l'AE	c_i	Constantes qui mettent à la même échelle les différents objectifs
AE	Aération énergétique	CVI	Control Vector Iteration
AG	Algorithme Génétique	CVP	Control Vector Parametrization
$ASM1$	Activated Sludge Model n°1		
$ASM2$	Activated Sludge Model n°2	C_{EQ}	Coût de la qualité de l'effluent
$ASM2D$	Activated Sludge Model n°2D	C_{CO}	Coût de fonctionnement
$ASM3$	Activated Sludge Model n°3	C_{EQ}^*	Paramètre de normalisation de l'EQ
a^k	Durée d'aération au cours du $k^{ème}$ cycle d'aération	C_{CO}^*	Paramètre de normalisation de l'CO
a_k, b_k	Coefficients de fonction du débit entrée	DBO_5	Demande biochimique en oxygène
B_{DBO5}	Poids de la concentration en DBO_5 dans EQ	DCO	Demande chimique en oxygène
B_{DCO}	Poids de la concentration en DCO dans EQ	EQ	Effluent quality
B_{NO}	Poids de la concentration en NO dans EQ	$f^{(1)}$	Période de fonctionnement des turbines
B_{Nkj}	Poids de la concentration en Nkj dans EQ	$f^{(2)}$	Périodes d'arrêt des turbines
B_{SS}	Poids de la concentration en SS dans EQ	f_i	Objectif d'optimisation
B	Coefficient d'aération	$f_i(x^*)$	Solution optimale associée à la fonction objectif f_i
$BSM1$	Benchmark Simulation Model n°1	f_i^*	Paramètre de normalisation de l'objectif f_i
b_A	Taux de mortalité des bactéries autotrophes	f_{ns}	Fraction non décantable de composés particuliers en suspension
b_H	Taux de mortalité des bactéries hétérotrophes	f_p	Fraction de DCO inerte issue du décès de la biomasse
b_a, δ_a	Paramètres de l'aérateur	H_2O	Eau
b_{ips}, δ_{ips}	Paramètres des pompes	H	Hauteur du décanteur
b_{set}, δ_{set}	Paramètres du décanteur	CI	Coût d'investissement
b_{sr}, δ_{sr}	Paramètres de recyclage	$CI_{aérateur}$	Coût d'investissement de l'aérateur
b_t, δ_t	Paramètres du volume		
BCI	Boundary Conditions		

$CI_{\text{décanteur}}$	Coût d'investissement du décanteur	K_X	Constante d'affinité en substrat particulaire pour l'hydrolyse
CI_i^T	Coût d'investissement	$k_L a$	Coefficient de transfert d'oxygène dissous
CI_{pompe}	Coût d'investissement des pompes entrées	κ_h	Taux maximal spécifique d'hydrolyse
$CI_{\text{réacteur}}$	Coût d'investissement du réacteur	κ_a	Taux d'ammonification
$CI_{\text{recyclage}}$	Coût d'investissement du recyclage	ℓ^k	Durée du k ^{ème} cycle d'aération
CI_{total}	Coût total d'investissement	MES	Matières en suspension
id	Taux d'intérêt (taux d'actualisation)	$MIDO$	Mixed Integer Dynamic Optimization
CO	Coût de fonctionnement	$MINLP$	Mixed Integer Non-Linear Programming
$CO_{\text{aérateur}}$	Coût de fonctionnement du réacteur	MVS	Matière Volatiles en Suspension
CO_{boue}	Coût de fonctionnement des boues	NGL	Azote total
CO_{pompe}	Coût de fonctionnement des pompes	NTK	Azote dit de Kjeldahl
CO_{total}	Total des coûts de fonctionnement	N_2	Azote gaz
CT	Coût Total	NH_4^+	Azote ammoniacal
$ICRS$	Integrated Controlled Random Search	NO_2^-	Nitrite
IVP	Initial Value Problem	NO_3^-	Nitrate
IDP	Itérative Dynamique Programming	N_a	Indice de la couche d'alimentation
J_s	Flux solide dans le décanteur	N_c	Nombre de cycles
$K_{NH,A}$	Constante d'affinité en ammoniacale des autotrophes	N_{cc}	Nombre de couches du décanteur
$K_{NH,H}$	Constante d'affinité en ammoniacale des hétérotrophes	NLP	Non-Linear Programming
K_{NO}	Constante d'affinité en nitrate des hétérotrophes dénitrifiant	O_2	Oxygène
$K_{O,A}$	Constante d'affinité en oxygène des autotrophes	$ODEs$	Ordinary Differential Equations
$K_{O,H}$	Constante d'affinité en oxygène des hétérotrophe	PAO	Polyphosphate Accumulating Organisms
K_S	Constante d'affinité en substrat des hétérotrophes	PE	Energie des pompes
		POM	Optimisation multicritère
		POM_ω	Optimisation monocritère
		PIC	Proportional Integral Derivative
		P_s^{dec}	Fraction des différents composés solubles par

	rapport aux composés solubles totaux S_t	S_O	Oxygène dissous
P_x^{dec}	Fraction des différents composés particulaires par rapport aux composés particulaires totaux X_t	S_O^{sat}	Concentration en oxygène dissous à saturation
		S_S	Substrat facilement biodégradable
Q_o	Débit entrée du réacteur	S_t^{dec}	Concentration soluble totale dans le décanteur
Q_a	Débit de recyclage interne	s_{ij}	Matrice des coefficients de sensibilité de paramètres
Q_e	Débit effluent	SQP	Successive Quadratic Programming
Q_f	Débit entrée dans le décanteur	T	Temps de calcul
Q_{in}	Débit entrant au décanteur primaire	t_0	Temps au début
Q_k	Débit du k ^{ème} bassin	t_b	Temps d'arrêt de l'aération
Q_r	Débit de recyclage externe	t_c	Temps du début de l'aération
Q_{rec}	Débit de recyclage	t_f	Temps à la fin
Q_{s1}	Débit d'extraction du décanteur primaire	t_{min}^{OFF}	Durée d'arrêt minimale de l'aérateur
Q_{s2}	Débit d'extraction du décanteur secondaire	t_{min}^{ON}	Durée de fonctionnement minimale de l'aérateur
Q_u	Débit sous le décanteur	$TPBVP$	Two Point Boundary Value Problem
Q_w	Débit d'extraction de boues	v_s	Vitesse de sédimentation
RPA	Réacteur Parfaitement Agité	V	Volume
r_h	Paramètre de sédimentation pour les suspensions fortement concentrées	V^r	Volume réactionnel
r_i	Taux de conversion	v_{dn}	Vitesse du flux descendant
r_p	Paramètre de sédimentation pour les suspensions faiblement concentrées	v_{up}	Vitesse du flux ascendant
\mathcal{R}_i	Taux de conversion de chaque composé	v_0	Vitesse maximale théorique de sédimentation
S_{ALK}	Alcalinité	v_0'	Vitesse maximale effective de sédimentation
S_I	Matière organique soluble inerte	$VEGA$	Vector Evaluated Genetic Algorithm
S_{ND}	Azote organique soluble biodégradable	$X_{B,A}$	Biomasse active autotrophe
S_{NH}	Azote sous forme d'ammoniaque	$X_{B,H}$	Biomasse active hétérotrophe
S_{NO}	Azote sous forme de nitrate et de nitrite	X_I	Matière organique particulaire inerte
		X_{ND}	Azote organique particulaire biodégradable

X_P	Productions particulières viennent de biomasse décomposée	Z_w	Concentration d'extraction
X_S	Substrat lentement biodégradable	z_a	Profondeur de l'alimentation du décanteur
X_f	Concentration MES entrant au décanteur	z	Épaisseur d'une couche de décanteur
X_m	Concentrations particulières dans le décanteur	$WWTPs$	WasteWater Treatment Plants
X_{min}	Concentration en MES minimale	α_E	Coefficient de coût de fonctionnement
X_t	Concentration des solides en suspension	α_{EQ}	Coefficient du coût de la qualité de l'effluent
X_t^{dec}	Concentration particulière dans le décanteur	α_{SLD}	Paramètre du coût de traitement des boues
X_t^{max}	Concentration limite des solides en suspension	η_h	Facteur de correction pour l'hydrolyse en phase anoxie
x^{ba}	Concentrations dans le bassin	μ_A	Taux de croissance spécifique maximal des autotrophes
x^{dec}	Concentrations dans le décanteur	μ_H	Taux de croissance spécifique maximal des hétérotrophes
x^{rec}	Concentrations du recyclage	ρ_i	Cinétique du modèle de dégradation
x^{rej}	Concentrations de l'effluent	ω_i	Poids de l'objectif
Y_A	Rendement de conversion des autotrophes	Φ	Flux particulière total
Y_H	Rendement de conversion des hétérotrophes	Γ	Coefficient pour la valeur actuelle
Z_a	Concentration de recyclage interne	ϑ	Taux de compression des boues dans le décanteur
Z_f	Concentration entrant au décanteur	Φ_s	Flux particulière de sédimentation
Z_i	Concentrations dans le bassin	Φ_t	Flux particulière associé au flux de liquide
Z_m	Concentrations solubles dans le décanteur		
Z_r	Concentration du recyclage		

OPTIMISATION DE LA CONCEPTION ET DU FONCTIONNEMENT DES STATIONS DE TRAITEMENT DES EAUX USÉES

Mots clés : traitement des eaux usées, boues activées, modélisation et simulation, optimisation dynamique, conception et fonctionnement optimaux.

Ce travail de thèse constitue le prolongement direct des travaux de thèse Chachuat (2001) sur l'optimisation dynamique et la commande optimale des stations de traitement de petite taille. L'objectif est d'aller plus loin en s'intéressant au dimensionnement et au fonctionnement optimaux des stations de traitement des eaux usées de toute taille. Ainsi, dans une première étape, l'optimisation des stations de traitement de petite taille a été abordée. Contrairement à ce qui a été fait jusqu'à maintenant : (i) l'aération n'est plus alternée, mais continue, (ii) le décanteur n'est plus considéré comme parfait, mais son fonctionnement est modélisé à l'aide d'une série de 10 couches de décantation, (iii) la méthode d'optimisation développée est fondée sur la méthode des sensibilités implémentée au sein du logiciel de simulation et d'optimisation dynamique gProms, utilisé dans toute la thèse. L'influence du modèle du décanteur sur la minimisation de l'énergie d'aération a été particulièrement analysée. Dans une deuxième étape, les stations de traitement de grande taille sont considérées. Plus spécifiquement, le modèle benchmark développé par le réseau européen COST a été utilisé pour décrire leur fonctionnement. Un « foreignobject » a été développé pour que la simulation et l'optimisation du fonctionnement de ces stations soient possibles sous gProms. L'optimisation a notamment montré que la consommation d'énergie d'aération pouvait être réduite d'au moins de 30% par rapport au fonctionnement actuel de ces stations. Dans une troisième étape, l'optimisation du dimensionnement des stations de traitement de grande taille a été étudiée. Une superstructure a ainsi été définie avec plusieurs (cinq) réacteurs et un décanteur. Toutes les possibilités de recyclage et de court-circuit entre les réacteurs d'une part et entre les réacteurs et le décanteur d'autre part sont prises en compte. L'objectif était de déterminer la meilleure structure et les valeurs optimales des volumes des réacteurs qui permettent de minimiser le coût total tout en respectant les contraintes réglementaires sur les rejets. Par ailleurs, une optimisation multicritère de la station optimale résultante a été réalisée. Elle a permis de déterminer l'ensemble de Pareto des solutions qui minimisent la consommation énergétique (d'aération et de pompage) et maximisent la qualité de l'effluent. La quatrième et dernière partie de ce travail s'intéresse à la modélisation, simulation et optimisation de la station de traitement de Verulam près de Durban en Afrique du Sud. Des mesures expérimentales ont été réalisées sur cette station et le modèle ASM1 a été utilisé pour décrire son fonctionnement. Une analyse d'estimabilité des paramètres a été d'abord réalisée pour déterminer les paramètres du modèle qui peuvent être estimés à partir des mesures expérimentales disponibles. Les paramètres estimables ont ensuite été identifiés à l'aide de gProms. Le modèle ainsi identifié a été validé et ensuite utilisé pour optimiser le fonctionnement énergétique de cette station.

OPTIMIZATION OF THE DESIGN AND OPERATION OF WASTEWATER TREATMENT PLANTS

Keywords: wastewater treatment, activated sludge, modeling and simulation, dynamic optimization, optimal design and operation.

This work is a direct extension of the PhD thesis of Chachuat (2001) on dynamic optimization and optimal control of small size wastewater treatment plants. The objective is to go further by focusing on optimal design and operation of wastewater treatment plants of any size. Thus, in a first part, optimization of small size wastewater treatment plants was studied. Contrary to what has been done so far: (i) the aeration is no longer alternating, but continuous, (ii) the settler is not considered perfect, but its operation is modeled using a series of 10 sedimentation layers, (iii) the optimization approach developed is based on the method of sensitivities implemented within the dynamic simulation and optimization software gProms, used throughout this work. The influence of the settler model on the minimization of aeration energy was particularly investigated. In a second part, the large size treatment plants are considered. More specifically, the benchmark model developed by the European network COST was used to describe their operation. A "foreign object" was developed in order to make the simulation and optimization of these plants possible using gProms. The optimization showed that the aeration energy consumption could be reduced by at least 30 % compared to the current operation of these plants. In a third part, the optimization of the design of the wastewater treatment plant was studied. A superstructure has been defined with several (five) reactors and a settler. All the possibilities of recycling and by-passes between the reactors on the one hand and between the reactors and the settler on the other are considered. The objective was to determine the best structure and the optimal values of the reactor volumes that minimize the net present value while respecting the regulatory constraints. On the other hand, a multi-objective optimization problems of the treatment plant was carried out. It allowed to determine the Pareto set of solutions that minimize the energy consumption (pumping and aeration) and maximize the effluent quality. The fourth and last part of this work focuses on modeling, simulation and optimization of the treatment plant of the city of Verulam in the area of Durban in South Africa. Experimental measurements were carried out on the plant and the ASM1 model was used to describe its operation. An estimability analysis was first performed in order to determine the model parameters that can be estimated from the available experimental measurements. The estimable parameters were then identified using gProms. The identified model was validated and then used to optimize the energy function of this plant.