



Institut Supérieur Industriel de Bruxelles

Rue Royale 150 — 1000 Bruxelles

Rue des Goujons 28 — 1070 Bruxelles

www.isib.be

Enseignement Supérieur de Type Long et de Niveau Universitaire

*Haute Ecole Paul-Henri Spaak
Catégorie Technique*



Optimisation de la décantation primaire par ajout de produits chimiques – Jar-Tests

Mlle Médiatrice MUJAWAMARIYA

Travail de fin d'études

Effectué au sein de l'entreprise :

modelEAU, département de génie civil et de génie des eaux,
Pavillon Adrien-Pouliot, Université Laval, 1065, av. de la médecine
Québec, G1V 0A6, QC, Canada



Présenté en vue de l'obtention du grade
de Master en Sciences de l'Ingénieur Industriel
en Chimie



Année Académique 2011-2012

Numéro : ISIB-Chim-TFE-12/01

Classification : tout public

Résumé

Optimisation de la décantation primaire par ajout de produits chimiques – Jar-tests

Le projet primEAU a pour principal but l'amélioration des connaissances sur la théorie de la décantation primaire dans le traitement des eaux usées afin d'en optimiser les procédés. Le projet tente de développer un nouveau modèle de simulation pour la décantation primaire. Pour ce faire, l'étude de différentes caractéristiques d'un décanteur, dont l'impact d'ajout de produits chimiques est nécessaire. Ces produits améliorent le rendement de l'opération unitaire en rendant la phase de coagulation et floculation plus efficace.

Le coagulant, de l'alun et le floculant, un polymère, sont ajoutés à de l'eau usée, et leurs impacts sur la diminution de la turbidité et des matières en suspension sont étudiés. Cela se fait à travers des jar-tests. Il s'agit d'une manière de simuler, à petite échelle, le processus de coagulation/floculation qui a lieu dans une station de traitement. Les jar-tests ont été utilisés dans l'optimisation du dosage d'alun et de polymère pour augmenter le rendement de la décantation primaire.

Huit facteurs qui influencent la coagulation/floculation ont été considérés. Différents plans d'expérience tels que les carrés latins et les plans composites centrés, ainsi que des analyses de variance (ANOVA) ont été effectuées pour identifier ceux qui étaient significatifs.

Cette étude montre que la phase de coagulation, c'est-à-dire le temps et la vitesse de coagulation ainsi que la concentration de l'alun sont les facteurs les plus importants à prendre en compte lorsque l'on veut paramétrer des jar-tests pour le traitement des eaux usées. Les effets de la phase de floculation, c'est-à-dire le temps d'ajout du polymère, le temps et la vitesse de floculation, ainsi que la concentration du polymère peuvent être considérés comme négligeables. De même, la qualité de l'eau, qui peut être changeante, n'influence pas les résultats des jar-tests, sous certaines règles de stockage et de manipulation lors de ces derniers.

Concernant les facteurs significatifs, il semble que la vitesse optimale de coagulation se situe au voisinage de 90 rotations par minutes. Au-delà de celle-ci, la coagulation n'est pas améliorée. Le temps de coagulation nécessaire est de 7 minutes et la concentration de l'alun se situe aux alentours de 40 mg/l. Augmenter cette concentration n'améliore pas la coagulation/floculation, par contre pour des valeurs de concentration plus basses, il existe un risque de dépasser les normes de rejet pour l'effluent de la station, en terme de matières en suspension, la décantation n'étant pas assez efficace dans ces conditions.

Abstract

Optimisation of primary sedimentation by addition of chemical products through jar-testing

The main goal of the primEAU project is to improve the primary sedimentation knowledge in waste water treatment plants and to optimise this process. In order to develop a new dynamic model describing primary sedimentation, the identification of the main mechanisms taking place inside primary settling tanks is necessary. Studying the impact of the addition of chemicals in the sedimentation process is one of them, because these chemicals enhance settling efficiency as they improve the coagulation and flocculation phase.

Alum and a polymer are used as coagulants and flocculants, respectively. They are added to the waste water, and their impact is studied regarding the turbidity and total suspended solids removal. This is done through jar-tests, that are a small-scale simulation of the coagulation/flocculation process that takes place inside a primary settling tank. They were used to optimise the alum and polymer dosages, in order to increase primary sedimentation efficiency.

Eight factors that influence the coagulation/flocculation phase were considered and their significance was studied through different experimental designs such as Latin squares and Central composite designs. An analysis of variance (ANOVA) was carried out to identify which factors were the most influential.

The study showed that the coagulation phase, that is to say the time and speed of coagulation and the alum concentration are the main factors to consider when one wants to parameter a jar-test experience for waste water treatments. The effects of the flocculation phase implied by the moment the polymer is added, the time and speed of flocculation and the polymer's concentration are negligible. The waste water quality, that can be very variable, does not induce variability in the results of the chemical treatment, as long as certain storage and manipulation rules are followed.

Regarding the significant factors, the study shows that the optimum coagulation speed is around 90 revolutions per minute. Higher speeds do not improve the coagulation/flocculation process. Coagulation should take place during at least 7 minutes and the alum concentration must be around 40 mg/l. Higher concentrations do not induce better sedimentation. However, using lower concentrations of alum may jeopardise meeting the discharge requirements of total suspended solids, sedimentation being thus insufficient.

Remerciements

En préambule à ce travail, je souhaiterais adresser mes sincères remerciements à ceux qui ont permis la réalisation de mon stage dans cette belle ville qu'est le Québec.

Ces remerciements vont tout d'abord à mon promoteur industriel, Mr Peter Vanrolleghem, à la tête du projet modelEAU, pour m'avoir accueilli au sein de son équipe et surtout pour sa disponibilité et la confiance qu'il m'a accordée en me proposant ce sujet de stage. L'expérience que j'en tire reste inestimable.

Je remercie Sovanna Tik, étudiante à la maîtrise à l'Université Laval et membre de l'équipe, pour m'avoir guidée et conseillée tout au long du stage et répondu à mes nombreuses questions. Ses connaissances dans le traitement des eaux usées, les plans d'expériences et les jar-tests m'ont été précieuses dans ces domaines dont je n'avais que quelques notions. Mes remerciements vont également à Ludiwine Clouzot, Giulia Bachis, Sylvie Leduc, Denis Dufour et Michel Bisping pour l'aide et le soutien qu'ils m'ont apporté dans l'organisation du stage, à la station d'épuration et au laboratoire, Virginie Lauret, Nicolas Decool, Mathias Fraccaroli et Thomas Bouichet, stagiaires dans la même équipe, avec qui j'ai découvert la ville de Québec.

J'exprime ma gratitude à l'IRISIB, Institut de Recherche de l'Institut Supérieur Industriel de Bruxelles, en collaboration avec l'unité chimie de l'ISIB, qui m'ont soutenue financièrement pendant quatre mois, Mme Isabelle Windal et Mme Hélène Stievenart, sans qui je n'aurais jamais pu entreprendre un stage de fin d'études au Canada.

Un grand merci à Mme Licour, Audrey Donceel et Sophie Petteau, qui ont pris le temps de lire et corriger ce travail. Leur regard critique et constructif m'a été d'une grande aide.

Je n'oublie pas ma famille et mes amis, ceux de Québec et ceux en Belgique, qui m'ont soutenues et encouragées dans ce projet.

Liste des figures

Figure 1 - La ville de Québec.....	- 2 -
Figure 2 - Station Est et Ouest.....	- 3 -
Figure 3 - Le traitement des eaux usées : 5 opérations	- 8 -
Figure 4 - Dessableur	- 8 -
Figure 5 - Décanteur lamellaire	- 9 -
Figure 6 - Fonctionnement des lamelles	- 9 -
Figure 7 - Biofiltre en filtration	- 9 -
Figure 8 - Flowsheet filière eau et boue.....	- 10 -
Figure 9 - Mélange et épaissement des boues.....	- 11 -
Figure 10 - Système de traitement d'air/gaz.....	- 11 -
Figure 11 - Évolution de la décantation dans une éprouvette.....	- 13 -
Figure 12 - Aspect de la courbe de décantation.....	- 13 -
Figure 13 - Structure des colloïdes.....	- 14 -
Figure 14 - Résultante de l'interaction entre deux particules	- 15 -
Figure 15 - Répartition des produits d'hydrolyse du sulfate d'aluminium selon le pH.....	- 17 -
Figure 16 - Agglomération des colloïdes sous l'action du flocculant	- 19 -
Figure 17 - Influence du dosage de flocculant.....	- 19 -
Figure 18 - Banc de jar-test.....	- 20 -
Figure 19 - Domaine d'étude d'un plan d'expérience de deux facteurs à deux niveaux	- 23 -
Figure 20 - Visualisation de la réponse y dans l'espace de dimension 3.....	- 24 -
Figure 21 - Carré latin.....	- 24 -
Figure 22 - Plan composite	- 25 -
Figure 23 - Illustration d'un box-plot.....	- 31 -
Figure 24 - Interface du logiciel FLOC2000	- 32 -
Figure 25 - Banc de jar-test.....	- 33 -
Figure 26 - Exemple de filtres MeS	- 35 -
Figure 27 - Floccs formés dans l'eau traitée	- 37 -
Figure 28 - Diminution des MeS et de la turbidité.....	- 38 -
Figure 29 - Série 4 : Diminution des MeS et turbidité	- 39 -
Figure 30 - Carré latin 1 : Box-plots	- 42 -
Figure 31 - Mode opératoire.....	- 43 -
Figure 33 - Évolution du pH, de la turbidité et des MeS pour les 6 essais du Carré latin 2.....	- 44 -
Figure 32 - Évolution des MeS (a) et de la turbidité (b) au cours du temps.....	- 44 -
Figure 34 - Carré Latin 2 : Box-plots.....	- 45 -
Figure 35 - Construction des points de plan composite centré.....	- 47 -
Figure 36 - Évolution des MeS et de la turbidité au cours du temps	- 48 -
Figure 37 - Plan composite 1 : Résidus en fonction de la réponse pour les MeS et la turbidité-	51 -
Figure 38 - Plan composite 1 : Comparaison Q-Q plot MeS et turbidité.....	- 52 -
Figure 39 - Plan composite 1 : Box-plots	- 55 -
Figure 40 - Plan composite 2 : Box-plots	- 60 -
Figure 41 - Plan composite 2 : Évolution de la turbidité et des MeS au cours du temps.....	- 61 -

Liste des tableaux

Tableau 1 - Caractéristiques des stations Est et Ouest	- 7 -
Tableau 2 - Temps de sédimentation pour différentes particules selon Stokes	- 12 -
Tableau 3 - Formes prédominantes des hydroxydes selon le pH	- 18 -
Tableau 4 - Identification des facteurs influençant la coagulation/floculation.....	- 21 -
Tableau 5 - Table ANOVA	- 30 -
Tableau 6 - Les 8 facteurs influençant la coagulation/floculation	- 32 -
Tableau 7 - Conditions opératoires	- 35 -
Tableau 8 - Série 1 : Résultats.....	- 36 -
Tableau 9 - Série 2 : Résultats.....	- 36 -
Tableau 10 - Série 3 : Résultats.....	- 37 -
Tableau 11 - Série 3 : MeS et turbidité	- 38 -
Tableau 12 - Série 4 : Résultats.....	- 38 -
Tableau 13 - Série 4 : MeS et turbidité	- 39 -
Tableau 14 - Les 3 facteurs du carré latin	- 40 -
Tableau 15 - Carré latin 1	- 41 -
Tableau 16 - Carré latin 1 : Table ANOVA	- 42 -
Tableau 17 - Carré latin 2 : Table ANOVA	- 45 -
Tableau 18 - Les 5 facteurs du plan composite centré.....	- 46 -
Tableau 19 - Paramètres du plan composite centré	- 47 -
Tableau 20 - Valeurs de points expérimentaux du plan composite centré.....	- 47 -
Tableau 21 - Plan composite 1 : Table ANOVA.....	- 49 -
Tableau 22 - Plan composite centré : Coefficients du modèle	- 49 -
Tableau 23 - Plan composite centré 1 : Table ANOVA avec interactions	- 53 -
Tableau 24 - Plan composite 1 : Coefficients du modèle avec interactions	- 53 -
Tableau 25 - Plan composite centré 2 : Table ANOVA avec interactions	- 58 -
Tableau 26 - Plan composite 2 : Coefficients du modèle avec interactions	- 59 -
Tableau 27 - Récapitulatif des résultats.....	- 63 -

Liste des abréviations

°C	Degrés Celsius
ADM	Anaerobic Digestion Model
ADN	Acide désoxyribonucléique
ANOVA	Analysis Of Variance
ASM	Activated Sludge Model
CCE	Plan Composite Extérieur
CCI	Plan Composite Intérieur
DDL	Degrés De Liberté
Emax	Energie d'activation ou barrière énergétique
FAU	Formazine Attenuation Unit
FNU	Formazine Nephelometric Unit
FTU	Formazine Turbidity Unit
MeS	Matières en Suspension
mg/l	Concentration exprimée en milligrammes par litre
mol/l	Concentration exprimée en moles par litre
NTU	Nephelometric Turbidity Unit
Q1, Q2, Q3	1 ^{er} , 2 nd et 3 ^{ème} Quartiles
rpm	Rotations par minute
SCE	Somme des Carrés des Ecart
STEP	Station d'Épuration
TAC	Titre Alcalin Complet

Nomenclature

Al^{3+}	Ion trivalent d'Aluminium
$Al(OH)_3$	Hydroxyde d'Aluminium
$Al(SO_4)_3$	Sulfate d'Aluminium (Alun)
Fe^{3+}	Ion trivalent de Fer
$Fe(OH)_3$	Hydroxyde de Fer
H^+	Proton
$NaClO$	Hypochlorite de sodium (Eau de Javel)
SO_4^{2-}	Ion Sulfate

Table des matières

Liste des figures	ii
Liste des tableaux	iii
Liste des abréviations	iv
Nomenclature	iv
1 Introduction	- 1 -
1.1 Stage de recherche	- 1 -
1.2 Québec et la gestion des eaux usées.....	- 2 -
1.3 Université de Laval.....	- 2 -
1.4 modelEAU	- 3 -
1.4.1 Programme.....	- 3 -
1.4.2 Quelques projets en cours.....	- 4 -
1.4.3 Les partenaires de modelEAU.....	- 6 -
2 Traitement des eaux usées.....	- 7 -
2.1 Stations Est et Ouest de la ville de Québec.....	- 7 -
2.1.1 Filière eau.....	- 8 -
2.1.2 Filière boue.....	- 11 -
2.1.3 Traitement de l'air et des gaz	- 11 -
3 La décantation primaire.....	- 12 -
3.1 Généralités	- 12 -
3.2 Vitesse de sédimentation	- 12 -
4 Coagulation et floculation	- 14 -
4.1 Les particules en suspension	- 14 -
4.1.1 Structure.....	- 14 -
4.2 Phénomène de coagulation	- 15 -
4.2.1 La coagulation.....	- 15 -
4.2.2 Forces mises en jeu	- 15 -
4.2.3 Déstabilisation des colloïdes.....	- 16 -
4.3 Le phénomène de floculation	- 17 -
4.3.1 La floculation	- 17 -
4.3.2 Principe.....	- 17 -
4.3.3 Rôle du pH.....	- 18 -
4.3.4 Influence du Titre Alcalin Complet (TAC)	- 18 -
4.3.5 Les flocculants	- 18 -
5 Méthodologie.....	- 20 -
5.1 Jar-tests.....	- 20 -

5.2	Facteurs influents.....	- 21 -
5.3	Les plans d'expérience	- 22 -
5.3.1	Espace expérimental	- 23 -
5.4	Les carrés latins	- 24 -
5.5	Plan composite centré.....	- 25 -
5.5.1	Construction d'un plan composite	- 26 -
5.6	Analyse de variance ANOVA.....	- 27 -
5.6.1	Conditions d'application	- 27 -
5.6.2	Modèle sous H_0 : homogénéité des données.....	- 27 -
5.6.3	Modèle sous H_1 : hétérogénéité des données.....	- 28 -
5.6.4	Régression linéaire multiple	- 28 -
5.6.5	Analyse des résidus.....	- 28 -
5.6.6	Analyse des résultats	- 29 -
6	Expérimentation.....	- 32 -
6.1	Jar-tests.....	- 32 -
6.1.1	Objectif.....	- 32 -
6.1.2	Instrumentation	- 32 -
6.1.3	Méthodologie d'échantillonnage	- 34 -
6.1.4	Turbidité	- 34 -
6.1.5	Analyse MeS.....	- 34 -
6.2	Temps d'ajout du polymère.....	- 35 -
6.2.1	Conditions opératoires	- 35 -
6.2.2	Résultats.....	- 36 -
6.2.3	Conclusion.....	- 39 -
6.3	Carrés Latins.....	- 40 -
6.3.1	Conditions opératoires	- 40 -
6.3.2	Carré latin 1	- 41 -
6.3.3	Résultats Carré latin 1	- 41 -
6.3.4	Box-plots Carré latin 1.....	- 42 -
6.3.5	Conclusion Carré latin 1	- 43 -
6.3.6	Carré latin 2.....	- 43 -
6.3.7	Étude de l'évolution de la caractéristique de l'eau.....	- 43 -
6.3.8	Résultats Carré latin 2.....	- 45 -
6.3.9	Box-plots carré latin 2.....	- 45 -
6.3.10	Conclusion Carré latin 2.....	- 46 -
6.4	Plans composites centrés.....	- 46 -
6.4.1	Construction du plan	- 46 -
6.5	Plan composite 1.....	- 48 -
6.5.1	Conditions opératoires	- 48 -
6.5.2	Étude de la caractéristique de l'eau.....	- 48 -

6.5.3	Résultats Plan composite 1	- 49 -
6.5.4	Analyse des résidus : graphiques de diagnostics	- 50 -
6.5.5	Table ANOVA	- 53 -
6.5.6	Box-plots	- 55 -
6.5.7	Conclusion Plan composite 1	- 57 -
6.6	Plan composite 2.....	- 58 -
6.6.1	Analyse des résidus : Graphiques de diagnostic.....	- 58 -
6.6.2	Résultats Plan composite 2	- 58 -
6.6.3	Box-plots	- 60 -
6.6.4	Étude de la caractéristique de l'eau.....	- 61 -
6.6.5	Conclusion Plan composite 2	- 62 -
7	Conclusion générale.....	- 64 -
	Bibliographie	- 65 -
A	Annexes	- 66 -
A.1	Carré latin 1	- 66 -
A.1.1	Valeurs des MeS.....	- 66 -
A.1.2	Diminution des MeS et de la turbidité.....	- 67 -
A.2	Carré latin 2	- 67 -
A.2.1	Etude de l'évolution des caractéristiques de l'eau	- 67 -
A.2.2	Table randomisée du carré latin 2	- 68 -
A.2.3	Valeurs des MeS.....	- 68 -
A.2.4	Diminution des MeS et turbidité	- 69 -
A.3	Plan composite centré 1	- 70 -
A.3.1	Conditions opératoires.....	- 70 -
A.3.2	Valeurs des MeS.....	- 71 -
A.3.3	Diminution des MeS et de la turbidité.....	- 72 -
A.3.4	Caractéristique de l'eau.....	- 72 -
A.4	Plan composite centré 2	- 73 -
A.4.1	Analyse des résidus : graphiques des diagnostics.....	- 73 -
A.4.2	Valeur des MeS.....	- 75 -
A.4.3	Diminution des MeS et turbidité	- 76 -
A.4.4	Caractéristique de l'eau.....	- 76 -

1 Introduction

1.1 Stage de recherche

Ce travail concerne un stage de recherche, effectué au sein du programme model*EAU* à l'Université Laval, située dans la ville de Québec au Canada.

Le programme est spécialisé dans la recherche de méthodologies de modélisation et d'outils pour le traitement des eaux usées. Il se divise en plusieurs projets, qui englobent entre autres les travaux de recherche d'étudiants doctorants et à la maîtrise.

L'étude de la floculation/coagulation entre dans le cadre du projet prim*EAU*. Il s'agit de la thèse de Giulia Bachis, doctorante en génie environnemental. Cette thèse s'oriente vers la création d'un nouveau modèle dynamique pour la décantation primaire, en vue d'acquies plus d'informations sur ce sujet, souvent négligé et dont les connaissances restent générales.

Dans un souci d'améliorer la décantation primaire, la station d'épuration de la ville de Québec ajoute aux usées de l'alun comme floculant, couplé à un polymère, qui est le coagulant. Une étude avait préalablement été faite, dans le projet al*EAU*, pour évaluer les concentrations nécessaires de coagulant et de floculant qui permettraient d'optimiser la décantation primaire.

Pour affiner cette étude, et fournir plus d'informations qui serviront au nouveau modèle de la décantation primaire du projet prim*EAU*, plusieurs facteurs qui influencent la coagulation/floculation vont être considérés. Des jar-tests vont servir à évaluer l'impact qu'ont l'alun et le polymère sur de l'eau usée provenant de la station d'épuration de la ville de Québec. Ces informations vont ensuite passer par une analyse de variance, qui permettra d'identifier les facteurs les plus importants à prendre en compte, lorsqu'il s'agit de paramétrer les jar-tests, pour traiter les eaux usées avec un coagulant et un floculant.

Une fois les facteurs significatifs identifiés, il sera possible d'attribuer des valeurs aux facteurs non significatifs, et d'étudier avec plus de précisions ceux qui sont significatifs, pour en optimiser l'utilisation.

Le travail qui suit reprend tous les essais qui ont été réalisés, les méthodologies développées pour faire l'analyse de variance, ainsi que les résultats obtenus.

1.2 Québec et la gestion des eaux usées

La ville de Québec est la capitale nationale d'une des provinces de l'est du Canada du même nom (Figure 1). Elle est également le chef-lieu de l'agglomération québécoise, de sa communauté métropolitaine et de la région administrative de la Capitale-Nationale. Comptant près de 516 622 habitants en 2011 et plus de 765 000 habitants dans l'agglomération, il s'agit de la 7ème ville la plus peuplée du Canada.

Le territoire est parcouru par plusieurs cours d'eau, et la vie de la ville a été façonnée par la présence du fleuve Saint-Laurent, particulièrement au niveau économique, car il permettait l'établissement d'un port commercial et touristique important. L'aménagement des berges du fleuve a fait l'objet d'investissements majeurs pour y permettre un accès et un usage récréotouristique aux citoyens.

La ville assainit les eaux usées de son territoire depuis 1992. Auparavant, et ce depuis les années 60, un réseau d'égout régional assurait le contrôle des déversements dans le fleuve Saint-Laurent. Avec l'entrée en fonction des stations de traitement, c'est l'équivalent d'un train de 100 km de long de matières indésirables qui évite chaque année de se mêler aux eaux du fleuve.

Les eaux usées de la ville de Québec sont acheminées vers deux stations de traitement, lesquelles assainissent chaque jour quelque 400 millions de litres d'eau. Avant d'atteindre l'une ou l'autre de ces usines, les eaux usées parcourent plus de 3 000 km à travers les conduites ensevelies sous la ville. Elles subissent ensuite cinq opérations successives visant à éliminer les particules solides et autres substances polluantes : un processus d'une durée globale de 45 minutes. Une fois le traitement complété, l'eau est déversée dans le fleuve Saint-Laurent.

Près de 50 tonnes de matières sont ainsi extraites quotidiennement des eaux usées grâce à ces deux usines, dont la capacité de traitement est de 28 200 mètres cubes à l'heure. Lors de pluies très abondantes, le débit augmente toutefois démesurément, outrepassant la capacité de traitement des stations et engendrant occasionnellement des débordements.



Figure 1 - La ville de Québec
(Source : Google Maps)

1.3 Université de Laval

En Amérique, l'Université Laval est la toute première université francophone à voir le jour. Le premier évêque de la colonie, Mgr François de Montmorency-Laval fonde, en 1663, le premier établissement d'enseignement de la Nouvelle-France : le Séminaire de Québec. Près de 200 ans plus tard, en 1852, cet établissement crée l'Université Laval, chargée de tout l'enseignement supérieur de langue française au Québec, au Canada et en Amérique.

L'histoire de l'Université Laval est liée à celle de la province du Québec. Cet établissement d'enseignement supérieur a longtemps formé la population intellectuelle québécoise francophone et son influence reste marquante. Aujourd'hui, l'Université Laval est considérée comme une des principales représentantes de la conservation du fait français en Amérique du Nord.

L'Université Laval compte 17 facultés qui couvrent tous les domaines du savoir, dont la Faculté des sciences et de génie.

1.4 modelEAU

1.4.1 Programme

Le groupe de recherche modelEAU appartient au département de Génie Civil et Génie des Eaux de la Faculté des Sciences et de Génie de l'Université Laval, situé sur les rives de la rivière Saint-Laurent. Ce département, fondé en 1950, a développé une expertise en la matière et offre depuis 2010 le seul programme au Québec en génie des eaux.

Le programme modelEAU travaille en collaboration avec la ville de Québec sur les stations d'épuration Est et Ouest de cette dernière (Figure 2).

La Chaire canadienne de recherche dans la modélisation de la qualité de l'eau, décernée au Professeur Peter Vanrolleghem en février 2006, lui a permis de mettre en place le programme modelEAU. Son équipe est composée de professeurs, de postdoctoraux, d'étudiants en doctorat et en maîtrise, ainsi que de stagiaires. Les thèmes de recherche du programme s'articulent autour du développement et de l'utilisation de méthodologies quantitatives. Basées sur la modélisation, elles permettent de supporter la prise de décision en considérant le milieu

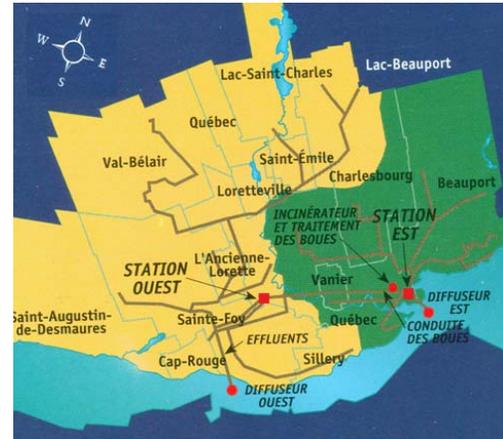


Figure 2 - Station Est et Ouest

récepteur comme critère important, par exemple, la simulation d'un système de rivière et de sa charge polluante (diffuse et ponctuelle) permet de déterminer l'option qui servirait le mieux les améliorations durables de la qualité chimique et écologique de la rivière.

Les recherches de modelEAU tentent de répondre à six questions :

1. Jusqu'à où la dynamique des eaux usées urbaines influence-t-elle la qualité de l'eau ? Une compréhension plus approfondie grâce à des données de qualité est acquise par le développement de nouvelles générations de stations de surveillance.
2. Comment garantir la fiabilité et l'exactitude des données recueillies en ligne ? Fort de son expérience dans ce domaine, modelEAU développe de nouveaux outils d'évaluation de la qualité des données pour une utilisation pratique de celles-ci.
3. Comment modéliser le transport et le traitement des eaux usées urbaines ? Comment choisir le modèle complexe le plus adéquat ? Comment coupler différents sous-modèles ? Comment mettre en place des campagnes de mesure ? Qu'est-ce qu'une bonne utilisation de la modélisation ?
4. Comment les résultats obtenus par la modélisation peuvent-ils être utilisés pour optimiser le système d'eau urbain tout en réduisant les impacts sur l'urbanisme et l'agriculture qui reçoivent cette eau ? Par des stratégies novatrices et de contrôle ?
5. Comment de nouvelles technologies durables peuvent-elles améliorer les systèmes futurs du traitement et de transport des eaux usées ?
6. Comment gérer les incertitudes sur la compréhension des systèmes actuels et leurs développements futurs lors de la simulation des différentes options, pour maximiser la qualité des eaux des rivières ?

Ainsi, modelEAU est axé sur les thèmes de recherche suivants :

- La qualité de l'eau des rivières ;
- Le transport et le traitement des eaux urbaines ;
- Une bonne utilisation de la modélisation ;
- La réduction des impacts de ces eaux sur l'urbanisme et l'agriculture ;
- Les technologies durables ;
- Les modèles mathématiques ;
- La compréhension et la prédiction de ces systèmes ;
- Les recherches méthodologiques ;
- Les défis des méthodologies de modélisation et le traitement des données.

Les recherches méthodologiques sont faites sur :

- Des stations de surveillance ;
- Des outils d'évaluation de la qualité des données recueillies ;
- Le choix du modèle complexe le plus adapté ;
- L'optimisation ;
- Les stratégies de contrôle ;
- La gestion des incertitudes.

1.4.2 Quelques projets en cours

- *primEAU* : Modèle dynamique pour un décanteur primaire. Ce projet s'articule principalement autour de la thèse de Giulia Bachis. L'objectif est la modélisation du décanteur primaire par la création d'un modèle faisant le lien entre les modèles ADM (Anaerobic Digester Model) et ASM (Activated Sludge Model) qui existent déjà. Pour ce faire, un des partenaires, l'entreprise John Meunier (filiale québécoise de Veolia) a fait construire un pilote de décantation primaire au sein même de la station Est. Ce pilote, qui reçoit le même effluent que la station permettra de modéliser la décantation qui y a lieu.
- *alEAU* : Contrôle de l'ajout d'alun dans le traitement primaire de la station d'épuration Est de la ville de Québec. Ce projet fait l'étude de la coagulation et floculation, par ajout d'alun et de polymère avant le traitement primaire. Il s'agit de la thèse de Sovanna Tik, en collaboration avec l'équipe des stations de traitement des eaux usées de la Ville de Québec. Le projet consiste à modéliser le comportement des décanteurs primaires et de proposer une stratégie de contrôle pour opérer le système d'injection de coagulant/floculant nouvellement installé.
- *rivEAU* : Intégration de l'écohydraulique des rivières dans la gestion des eaux pluviales en zones urbaines.
- *mictEAU* : Englobe les travaux de recherche de modelEAU associés à la problématique des micropolluants dans l'environnement.
- *monEAU* : Station de mesure *in situ* mesurant les dynamiques de la qualité de l'eau d'un ruisseau urbain qui est fortement influencé par un réseau d'égouts pluviaux.
- *respirEAU* : Réspirométrie avancée pour la calibration d'un modèle de boue activée.
- *retEAU* : Apporte de nouvelles connaissances quant aux processus physico-chimiques en jeu dans les bassins de rétention grâce à des observations *in situ*.

- OED : Élaboration d'une procédure itérative visant la minimisation de l'incertitude sur les variables décisionnelles dans la modélisation des stations d'épuration.
- UDOUT: Désigne les travaux en cours dans le domaine de l'incertitude et de l'analyse des risques pour la conception et le fonctionnement des stations de traitement des eaux usées.
- TECC: Traitement des eaux de changements climatiques à travers l'élaboration d'un nouveau modèle pour simuler les gaz à effet de serre (GES) provenant des usines de traitement des eaux usées et de proposer des stratégies de contrôle basées sur la simulation.
- LCA : Analyse comparative du cycle de vie de plusieurs options de traitement des boues, générées par les stations d'épuration de la ville de Québec.

1.4.3 Les partenaires de modelEAU

Ville de Québec



John Meunier



Conseil recherches Sciences Naturelles
Génie (CRSNG)



Veolia Environnement



Institut Supérieur des Ingénieurs de
Bruxelles (ISIB)



Fonds Québécois de recherche Nature
Technologies (FQRNT)

Université de Winnipeg



Primodal



Université de Guelph



CH2M HILL



Université de Nouveau-brunswick (UNB)



District of Columbia Water and Sewer
Authority (DC Water)



Université de Victoria (UVic)



Waterboard De Dommel



Université de Waterloo



Université Aix-Marseille III



Université de Trent



Université de Montréal



Université de Colombie-britannique (UBC)



BPR



Ministère de l'Environnement de l'Ontario
(MOE)



CIRAIG



Université de Gand (UGent)



Ville Sainte-Marie



Environnement Canada



Ecole polytechnique



2 Traitement des eaux usées

2.1 Stations Est et Ouest de la ville de Québec

La ville de Québec dispose de deux stations d'épuration (STEP) : les stations Est et Ouest, qui traitent les eaux de deux bassins de drainages indépendants, d'une superficie totale de 625 km.

Dans les années 1940, la rivière Saint-Charles est un collecteur d'égouts à ciel ouvert. Pour la soulager, un réseau commence à voir le jour avec la création de diffuseurs pour amener une partie de cette charge vers le fleuve Saint-Laurent. Jusqu'en 1970, on compte sur la dilution dans le fleuve pour se débarrasser des eaux usées.

Vers les années 1980, le plan d'assainissement du Québec a pour objectif l'assainissement des eaux usées. Cela consistait à réduire la contamination bactériologique des rivières, des lacs et du fleuve Saint-Laurent. C'est à cette époque qu'on commence à construire les stations d'épurations. Les deux stations ont été conçues suite aux consultations publiques conduites auprès de la population québécoise pendant cette période. Les trois aspects les plus importants qui en sont ressortis étaient :

- Retourner les effluents au fleuve Saint-Laurent en lui conservant ses utilisations (baignade, sports aquatiques, etc). Une étape de désinfection supplémentaire était donc nécessaire ;
- Limiter les nuisances de voisinage liées aux odeurs, ce qui a mené à la conception de stations entièrement couvertes disposant d'un système de traitement de l'air ;
- Une taille minimale des installations, ce qui a conduit vers le choix de décanteurs lamellaires.

Les stations Est et Ouest sont équipées du même type de traitement pour la filière eau, seul le nombre d'équipements diffère. Le traitement des boues des deux stations étant effectué à la station Est, une conduite de près de 12 km y achemine les boues mixtes de la station Ouest.

Une seule salle de contrôle, située à la station Est, pilote l'ensemble du réseau et les deux stations. Elle est munie d'un logiciel de gestion dynamique en temps réel, qui prend les décisions pour l'acheminement des eaux usées. La ville de Québec est la première ville qui utilise ce logiciel, fourni par BPR.

Les caractéristiques générales des deux stations sont décrites dans le Tableau 1 :

	Localisation	Date de réalisation	Capacité de prétraitement	Capacité de la décantation primaire	Débits traités au total	Population desservie (2009)
STEP Est	Baie de Beauport	1990	30 000 m ³ /h	15 000 m ³ /h	400 000 m ³ /j	540 000 habitants
STEP Ouest	Secteur St-Foy	1990	21 000 m ³ /h	12 600 m ³ /h		

Tableau 1 - Caractéristiques des stations Est et Ouest

Même si les deux stations ont le même type de traitement, la station Est, qui réalise 60 % du travail, abrite aussi un banc d'essai du Centre de recherche industriel du Québec. Les eaux traitées sont rejetées dans le fleuve Saint-Laurent.

2.1.1 Filière eau

Un total de 125 postes de pompage amènent l'eau aux deux stations. Pour atteindre les objectifs d'assainissement, cinq opérations unitaires principales sont nécessaires, comme décrites dans la Figure 3.



Figure 3 - Le traitement des eaux usées : 5 opérations [1]

1 Dégrillage : Chaque station est équipée de 4 dégrilleurs à nettoyage mécanique. Les barres des dégrilleurs sont espacées de 1,9 centimètre, et 500 tonnes de déchets sont extraits annuellement. Les dégrilleurs permettent l'élimination des matières solides, grossières, comme le papier, le gravier ou tout autre objet de dimension supérieure à l'espacement entre les barres. Cette opération sert surtout à protéger les équipements et la tuyauterie de la station. Les déchets ainsi recueillis sont acheminés vers l'incinérateur de la ville de Québec.

2 Dessablage, déshuilage et dégraissage : La station Est possède cinq dessableurs aérés, tandis que la station Ouest n'en compte que quatre. 95 % des grains de sable d'un diamètre de 0,2 millimètre ou plus, ainsi que toutes les particules de densité équivalente sont éliminées par gravité, toujours dans un souci de protection de l'équipement.

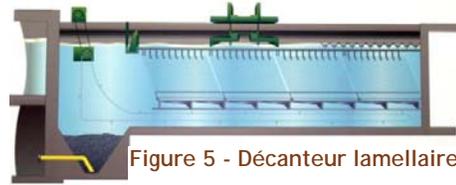


Figure 4 - Dessableur [1]

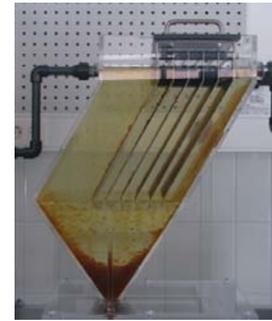
Respectivement, 800 tonnes et 1500 tonnes de flottant et de sables sont extraits annuellement. De l'air est injecté dans l'eau des bassins, comme le montre la Figure 4, pour recueillir les flottants qui remontent alors à la surface. Ces flottants sont constitués d'huiles, de graisses et d'écumes, qui sont récupérées à l'aide de racleurs à la surface. Les sables sont alors acheminés vers un site d'enfouissement, tandis que les flottants sont brûlés à l'incinérateur.

Au-delà d'un débit de 15 600 m³/h, 2 % du flux est dérivé vers le milieu du fleuve Saint-Laurent. Cela a lieu dans 6 % du temps d'opération, en période de fonte des neiges et pendant la période de pluie où le débit est alors supérieur à la capacité de prétraitement.

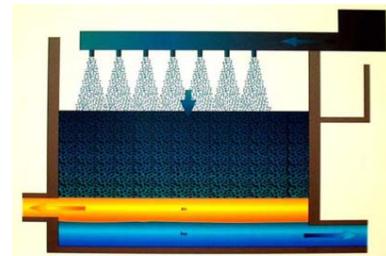
3 **Décantation primaire :** Le décanteur reçoit les eaux provenant des opérations unitaires qui le précèdent. L'excédent d'huiles, graisses et écumes, ainsi que la majeure partie des matières solides sont extraites dans un décanteur lamellaire (Figure 5). L'eau qui y est acheminée circule lentement parmi les plaques lamellaires qui retiennent les particules. Les boues récupérées dans le fond du bassin, dites primaires, sont pompées vers un épaisseur tandis que les flottants sont pompés vers un concentrateur d'écumes.



Le choix d'un décanteur primaire lamellaire permet de diminuer de trois fois la dimension des bassins de décantation et permet d'augmenter la surface de contact, donc la surface de décantation, tout en assurant une bonne répartition du fluide dans l'appareil. L'eau à clarifier remonte entre des plaques parallèles inclinées à 55° et espacées de 10 centimètres. Une inclinaison correcte des plaques permet aux sédiments de glisser vers le bas du décanteur comme le montre la Figure 6. La station Est et la station Ouest possèdent respectivement sept et cinq décanteurs primaires de type lamellaire. Pendant 19 ans, le traitement a été purement physique, ce qui permettait l'élimination de $\pm 60\%$ des matières en suspension (MeS). Depuis 2 ans, l'ajout d'alun en fait un traitement physico-chimique, ce qui permet d'éliminer 35 % de MeS en plus. Le temps de rétention dans les décanteurs primaires se situe entre 15 et 23 minutes.



4 **Biofiltration :** Trois vis d'Archimède qui ont chacune un diamètre de 3 mètres et une vitesse de 25 tours par minute relèvent le surnageant ($\sim 8000 \text{ m}^3/\text{h}$) recueilli à la décantation de 7,5 mètres. Cette eau ruissèle à travers le filtre d'une épaisseur de 1,6 mètre par gravité (Figure 7). Cette opération sert à éliminer la pollution organique dissoute à l'aide de microorganismes qui sont des bactéries aérobiques. Ces bactéries croissent sur le milieu fixe constitué de grains de biolite (argile chauffée et traitée) et transforment la matière organique en matière inerte (CO_2 et H_2O) et en masse biologique qui produira les boues secondaires. Ce procédé entièrement biologique permet d'éviter l'utilisation de produits chimiques. Les eaux usées qui passent à travers le filtre sont également clarifiées, grâce aux faibles dimensions des grains du lit filtrant (2,6 millimètres). Une pompe à vide permet de siphonner l'air pour permettre à l'eau de passer à travers la biolite plus facilement.



Les stations Est et Ouest possèdent respectivement 30 et 22 biofiltres. Des lavages fréquents à contre-courant sont nécessaires toutes les 48 heures pour décolmater le milieu filtrant. Les eaux contenant les boues secondaires sont redistribuées entre les décanteurs primaires. Une fois les boues secondaires extraites, elles sont dirigées vers des épaisseurs.

5 Désinfection par ultraviolets : Les deux stations possèdent 5 canaux de désinfection, avec un total de 8480 lampes à rayonnement ultraviolet pour pousser le traitement plus loin de juin à septembre. En effet, pendant cette période plus chaude, la réglementation de sécurité vis-à-vis des sports aquatiques est plus exigeante. Le rayonnement ultraviolet modifie l'ADN des virus, des bactéries, des moisissures et des parasites pour qu'ils ne puissent plus se reproduire, de sorte qu'ils sont considérés comme inactivés. Le traitement aux rayons ultraviolets n'altère pas la composition chimique de l'eau puisqu'il n'y ajoute rien, sauf de l'énergie. Ainsi, ce 5^{ème} traitement élimine 99,5 % des coliformes fécaux.

L'eau traitée est ensuite évacuée de chaque station par le biais d'une conduite sous-fluviale, munie d'un diffuseur qui répartit les eaux traitées dans le fleuve Saint-Laurent. Il existe néanmoins des points de dérivation menant directement au fleuve, avant et après les décanteurs, comme le montre la Figure 8. Ces points de dérivation sont utilisés uniquement lors de débordements, en période de fonte ou de fortes pluies.

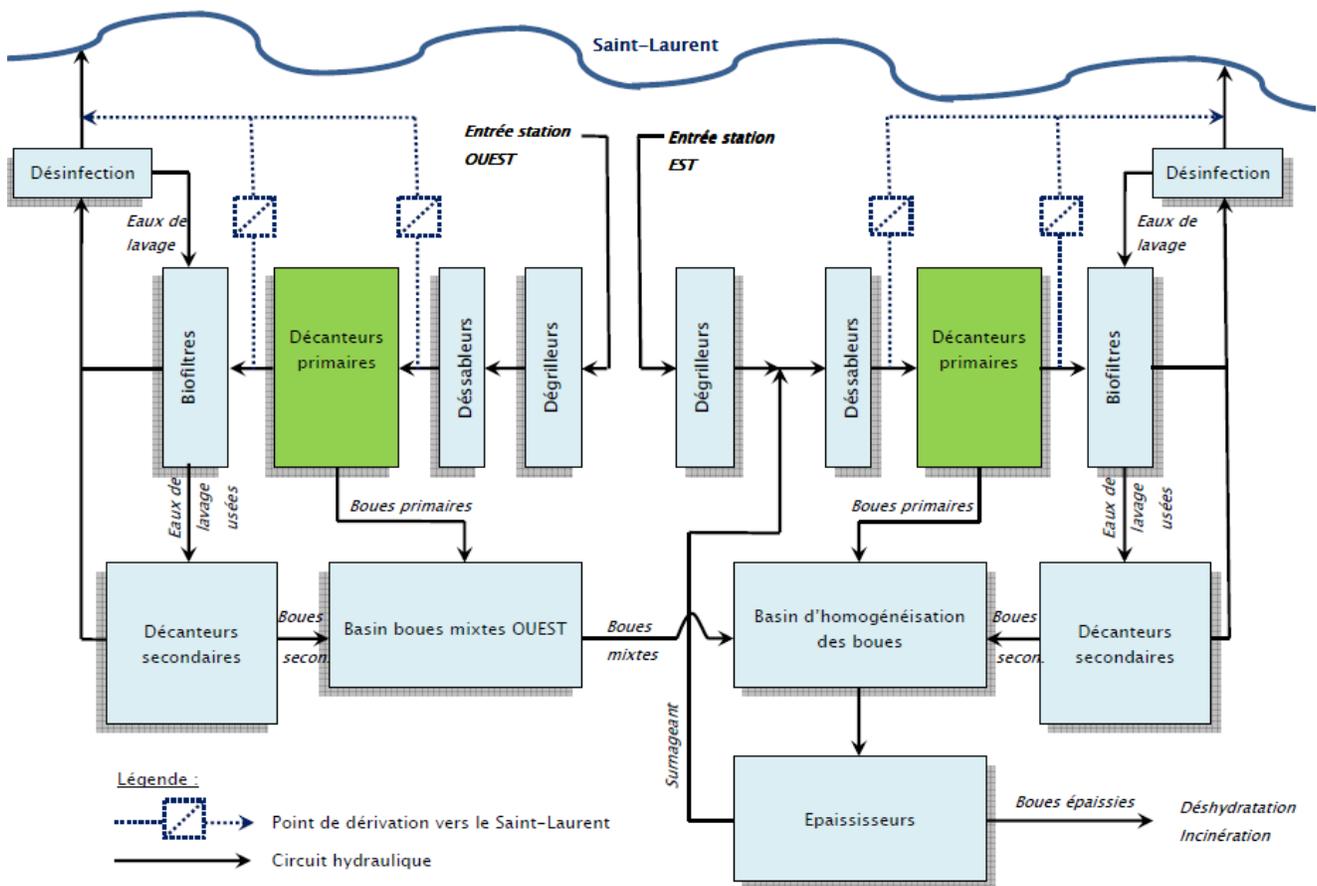


Figure 8 - Flowsheet filière eau et boue

2.1.2 Filière boue

Seule la station Est possède une filière de traitement des boues. Les boues primaires et secondaires de la station Ouest sont mélangées et ensuite pompée sur 11,7 km pour être acheminées vers les quatre épaisseurs de la station Est.

Ces boues mixtes sont récoltées dans un réservoir d'homogénéisation et de répartition des boues à la station Est (Figure 9). La proportion des matières solides passe alors de 1 % à 5 % par décantation.

Les boues épaissies sont alors dirigées vers l'incinérateur, comme le montre la Figure 8, et subissent une déshydratation plus poussée. Elles sont transformées en matière sèche par un système de filtre à bandes qui les déshydrate et produit des boues solides à 25 %. Avant qu'elles ne soient brûlées avec les ordures ménagères, elles sont asséchées davantage (jusqu'à 95 % en matière solide) par les gaz chauds extraits des fours de l'incinérateur. Ce sont 45 tonnes de boues séchées qui sont produites quotidiennement.

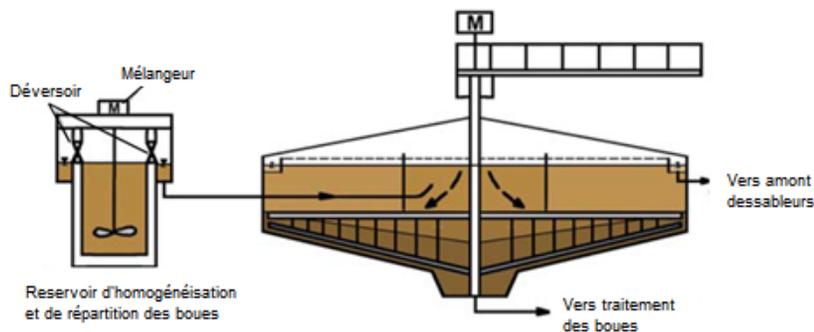


Figure 9 - Mélange et épaissement des boues [1]

2.1.3 Traitement de l'air et des gaz

Un système de traitement d'air et des gaz (Figure 10) est nécessaire, car les stations de traitement d'eau usée de la ville sont entièrement couvertes. Cette opération garantit la qualité de l'air autant à l'intérieur qu'à l'extérieur du bâtiment. L'air est aspiré par des systèmes de ventilation qui l'amène à des tours de lavages qui reçoivent également une solution d'hypochlorite de sodium à 12% (Eau de Javel – NaClO). Cet oxydant puissant permet d'oxyder, neutraliser ou absorber les gaz malodorants.

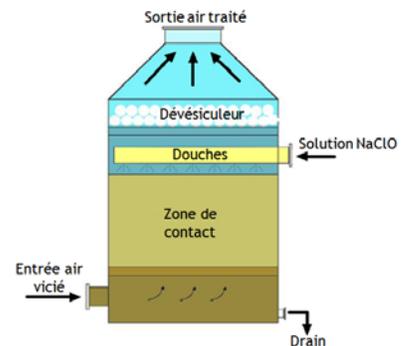


Figure 10 - Système de traitement d'air/gaz [1]

3 La décantation primaire

3.1 Généralités

La décantation primaire se caractérise par la séparation entre la phase solide et liquide d'un effluent. Il s'agit principalement d'un processus physique utilisant la force de gravité et donc la densité des particules pour les faire décanter. Dans les stations d'épuration d'eau usée, il s'agit d'une opération en continu. Les particules sédimentées (boues) sont soustrées dans le fond du bassin de décantation et pompées vers une unité de traitement des boues, tandis que l'eau clarifiée (surverse) est collectée et acheminée vers les traitements secondaires d'assainissement.

La densité des matières en suspension et leur distribution granulométrique définissent leur vitesse de sédimentation. Les particules les moins denses sont plus susceptibles de se retrouver dans la surverse, tandis que les particules les plus denses et donc ayant une vitesse de sédimentation plus importante se retrouvent dans les boues.

3.2 Vitesse de sédimentation

La sédimentation des matières en suspension dans un liquide obéit à la loi de Stokes (Equation 1). Cette dernière montre que la vitesse de chute d'une particule est proportionnelle à la différence des masses volumiques entre la particule et le liquide et au carré du diamètre de la particule. Par conséquent, tout phénomène qui augmente le diamètre des particules, comme la floculation et/ou la coagulation favorise la sédimentation [2].

$$v_s = \frac{g(\rho_p - \rho_l) \times d_p^2}{18\mu} \quad (1)$$

Avec :

v_s = vitesse de sédimentation [m/s]

g = accélération [m/s^2]

ρ_p = masse volumique de la particule [kg/m^3]

ρ_l = masse du liquide [kg/m^3]

d = diamètre de la particule [m]

μ = viscosité dynamique du liquide [$kg/m.s$]

Le Tableau 2 considère le temps de décantation de particules isolées de tailles différentes, obtenues d'après la loi de Stokes. Il montre la relation inverse qui existe entre le diamètre des particules et leurs vitesses de décantation. L'ajout de réactifs chimiques comme les coagulants et floculants augmentant la taille des particules est souvent utilisé pour optimiser le rendement de la décantation primaire.

Type de particule	Diamètre (μm)	Temps de décantation pour 1 m d'eau
Graviers	10 000	1 s
Sables	1 000	10 s
Sables fins	100	2 min
Argiles	10	2 h
Bactéries	1	8 j
Colloïdes	0,1 à 0,001	2 à 200 ans

Tableau 2 - Temps de sédimentation pour différentes particules selon Stokes [2]

Les vitesses de chutes des différentes particules peuvent être évaluées comme suit :

- Dans une éprouvette est versée une certaine quantité d'échantillon d'eau usée ;
- Les gros grains commencent à décanter immédiatement et se déposent dans le fond de l'éprouvette. Il s'agit de la zone (a) de la Figure 11. La hauteur de cette zone augmente alors jusqu'à se stabiliser, une fois que les particules de plus de 0,1 mm de diamètre ont décantées.
- Il apparaît ensuite une interface entre un liquide clair (b) et une phase boueuse, qui elle-même peut être divisée en deux parties d'aspect différent. La partie supérieure de cette phase boueuse possède encore l'aspect de l'eau usée de départ (c), tandis que la partie inférieure est d'aspect intermédiaire (d).

Si l'on porte le temps de sédimentation en fonction de la hauteur de l'interface, on obtient la courbe présentée dans la Figure 12. On peut ainsi délimiter quatre domaines :

- Domaine I : ce domaine correspond à la durée initiale de floculation qui peut être inexistante si la floculation est rapide ;
- Domaine II : les floccs commencent à se rassembler pour former de plus gros floccs. La vitesse de décantation est constante ;
- Domaine III : dans cette zone existent des perturbations entre les floccs formés et les particules encore en suspension ;
- Domaine IV : il s'agit de la zone de compression, où les solides isolés et les floccs sont en contact et forment un pseudo réseau [2] ;

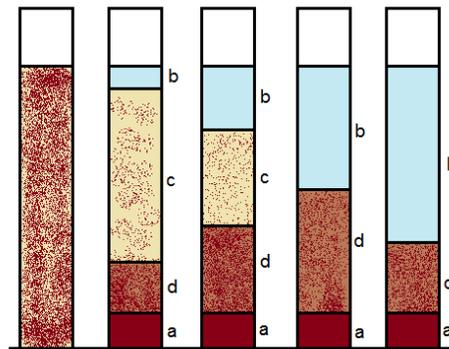


Figure 11 - Évolution de la décantation dans une éprouvette

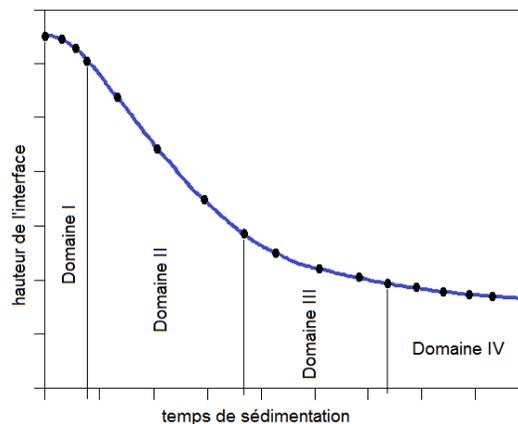


Figure 12 - Aspect de la courbe de décantation

4 Coagulation et floculation

4.1 Les particules en suspension

Les particules en suspension qui se retrouvent dans les eaux usées sont le résultat de l'activité humaine, qu'elle soit domestique, industrielle, artisanale ou encore agricole. Elles se trouvent sous forme de substances minérales et de matières organiques en décomposition. Il s'agit de matière polluante qui doit être éliminée.

4.1.1 Structure

Ces fines particules, ou colloïdes, ont une taille inférieure au micron, ce qui rend leur surface spécifique élevée. Il en résulte que les phénomènes superficiels comme les forces électrostatiques de répulsion et/ou d'attraction jouent un rôle prépondérant dans leur stabilité. Elles possèdent plusieurs couches comme le montre la Figure 13. La première couche qui se situe à la surface du colloïde est chargée négativement. Ces charges attirent les ions positifs (+) en solution dans l'eau. Ceux-ci sont liés aux colloïdes et forment donc la couche liée, aussi appelée couche de Stern. Cette couche attire à son tour les anions de charge négative (-) et une faible quantité de cations. C'est la couche diffuse ou encore couche de Gouy. Il existe donc deux couches ioniques, l'une liée à la particule lors de ces déplacements dans son milieu, l'autre se déplaçant indépendamment de la première et avec un certain retard.

Entre ces deux couches existe un potentiel de Nernst, qui peut varier en fonction de la distance par rapport à la surface du colloïde. Comme les cations qui constituent la couche de Stern sont uniformément répartis, le potentiel de Nernst décroît linéairement au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la surface du colloïde. Le mélange hétérogène des charges qui se trouvent dans la couche de Gouy résulte en une variation non linéaire du potentiel de Nernst.

On appelle potentiel zêta (ζ) la valeur que prend le potentiel de Nernst à l'interface entre les deux couches. Il prend une valeur négative étant donné que les colloïdes sont chargés négativement. Il en découle que les colloïdes à zêta négatif se repoussent fortement.

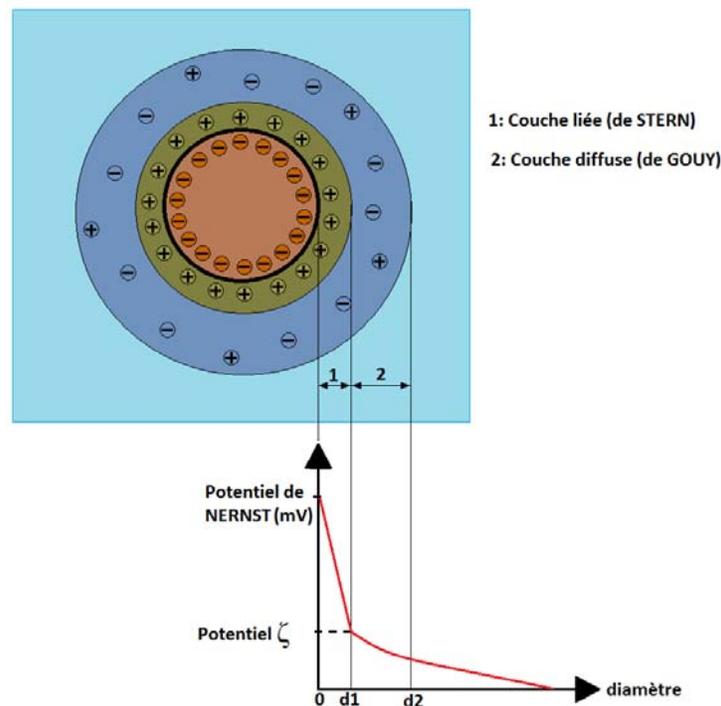


Figure 13 - Structure des colloïdes

Ces colloïdes en suspension sont donc très stables et récalcitrants à toute agglomération. Plus ζ est négatif, plus la solution est stable et donc la décantation difficile.

Pour annuler ces forces de répulsion, il faut donc annuler le potentiel ζ .

4.2 Phénomène de coagulation

4.2.1 La coagulation

Le terme coagulation décrit uniquement le phénomène qui consiste à déstabiliser une solution stable contenant des particules en suspension. Cela se fait par la réduction des forces qui tendent à garder les particules éloignées les unes des autres, par ajout de produits chimiques (coagulants). La durée de coagulation est généralement assez courte, compte tenu d'une agitation importante permettant un temps de contact efficace entre les réactifs et les particules. La coagulation résulte d'interactions entre différentes forces électrostatiques et/ou électriques entre particules voisines.

4.2.2 Forces mises en jeu

Ces colloïdes subissent essentiellement deux types de forces dans leur milieu aqueux. Il s'agit des forces d'attraction de type Van der Waals, électriques – liées aux tensions superficielles dans le milieu – et des forces de répulsion de type électrostatique présentes à leur surface.

En fonction de la distance entre elles, deux particules en suspension sont soumises à des forces de répulsion, résultante des charges négatives à leur surface. L'énergie potentielle d'interaction entre ces particules est la résultante de l'énergie d'attraction de Van der Waals et de l'énergie de répulsion électrostatique, comme le montre la Figure 14.

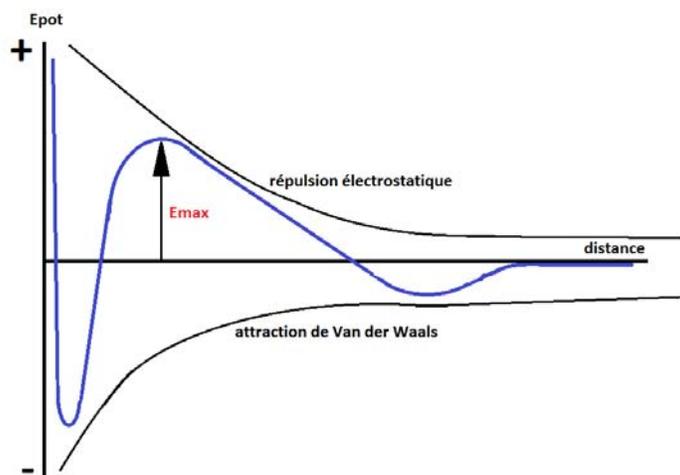


Figure 14 - Résultante de l'interaction entre deux particules

Quand les particules sont fort éloignées les unes des autres, l'interaction est quasi nulle. Sous l'effet du mouvement brownien, ou d'une agitation, la distance qui les sépare diminue. Cette énergie devient négative. Si la distance continue à diminuer, les forces de répulsions deviennent plus importantes. L'énergie de répulsion prend une valeur maximale à un niveau qui correspond à l'énergie d'activation aussi appelée barrière d'énergie, E_{\max} . Plus sa valeur est élevée, plus la solution de matière en suspension est stable. Tout l'enjeu est d'abaisser cette barrière en ajoutant à la solution des cations susceptibles de déstabiliser l'équilibre en neutralisant la charge négative à la surface des particules par adsorption sur ces dernières [3].

4.2.3 Déstabilisation des colloïdes

En faisant varier certains paramètres électrochimiques, il est possible de diminuer le potentiel zêta et donc les forces de répulsion. Cela a pour conséquence d'augmenter l'influence des forces de types Van der Waals et donc de permettre l'agglomération des particules.

Pour diminuer le potentiel zêta, il existe plusieurs solutions :

- Ajuster le pH pour atteindre le point de charge nulle des particules ;
- Augmenter la salinité du milieu pour comprimer la couche diffuse ;
- Neutraliser la charge de surface par des cations polyvalents ;
- Adsorber les colloïdes sur des polymères chargés à longue chaîne.

Vu les volumes importants des eaux usées, l'ajout d'ions de charge opposés aux colloïdes est le plus indiqué. Plus la valence de l'ion ajouté est élevée, plus il sera efficace. Ainsi, un ion bivalent sera 30 à 60 fois plus efficace qu'un ion monovalent, et un ion trivalent sera 700 à 1000 fois plus efficace qu'un ion monovalent [4].

Il existe différents réactifs utilisés dans le traitement des eaux usées :

- | | |
|------------------------------|---|
| - Sulfate d'aluminium (Alun) | $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ |
| - Aluminate de sodium | NaAlO_2 |
| - Chlorure ferrique | $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ |
| - Sulfate ferrique | $\text{Fe}(\text{SO}_4)_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ |
| - Sulfate ferreux | $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ |

Les sels les plus utilisés en station d'épuration sont les sels de fer ferrique ainsi que les sels d'aluminium. La simple libération des ions Al^{3+} et Fe^{3+} à partir des sels correspondants ne suffit pas à neutraliser les forces de répulsion. En effet, les produits d'hydrolyse de ces sels sont des coagulants plus efficaces que les ions seuls.

L'alun est le coagulant utilisé pour la floculation à la station d'épuration de la ville de Québec. Il s'agit de sel d'aluminium commercial caractérisé par sa teneur en aluminium, exprimé en pourcentage d' Al_2O_3 , représentatif de la matière active contenue. Il servira comme exemple dans les explications qui vont suivre.

Comme le montre la Figure 15, la décomposition du sulfate d'aluminium en solution donne des sels différents, en fonction du pH de la solution. Le pH des eaux usées de la station de la ville de Québec se situant au voisinage de $\text{pH}=7$, le sulfate d'aluminium se trouve donc sous la forme $\text{Al}(\text{OH})_3$.

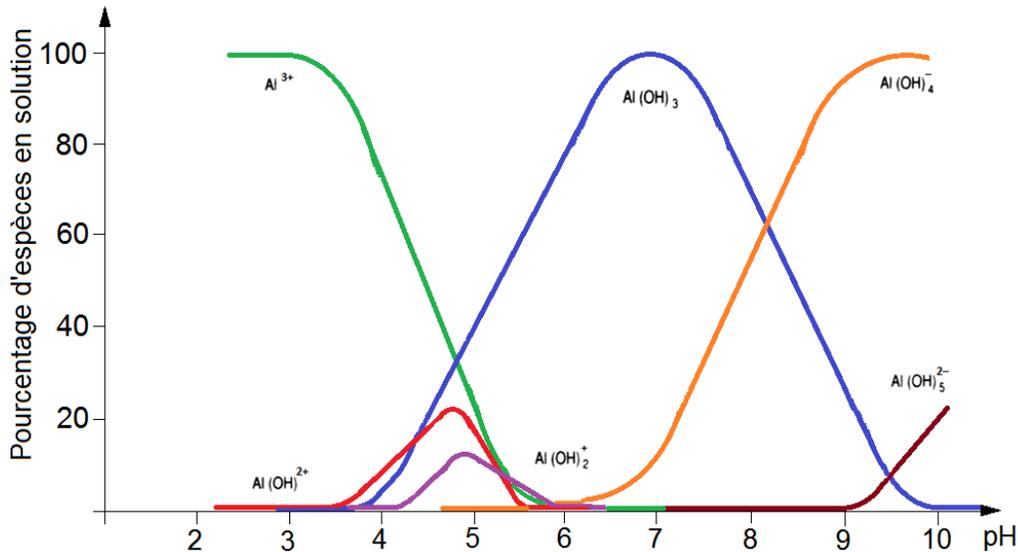
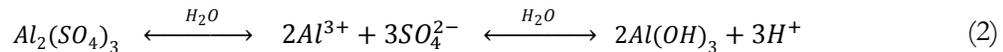


Figure 15 - Répartition des produits d'hydrolyse du sulfate d'aluminium selon le pH

La réaction à lieu suivant l'Equation 2.



L'ion trivalent d'aluminium résultant de l'hydrolyse forme un précipité d'hydroxyde d'aluminium avec libération d'acide. L'acide formé sert à neutraliser les forces de répulsions tandis que le précipité assure la coalescence des colloïdes déstabilisés.

4.3 Le phénomène de floculation

4.3.1 La floculation

Il s'agit ici de la seconde phase, complémentaire à la coagulation. Ce terme est réservé au processus de formation des particules assez denses pour décanter. Une fois la solution de particules en suspension déstabilisée, ces dernières peuvent alors s'agglomérer et former des floccs décantables. La floculation résulte des pontages chimiques.

4.3.2 Principe

Une fois les colloïdes déstabilisés, elles sont aptes à se rencontrer et former des floccs. Leur taux d'agglomération dépend de la probabilité de contact, donc de l'agitation du milieu, comme le montre l'Equation 3, qui doit être suffisante pour permettre un mélange homogène, mais sans détruire les floccs formés.

Smoluchowski a démontré que la probabilité de rencontre des particules dues au transport par gradient de vitesse est [5] :

$$J = \frac{4}{3} G d^3 n^2 \quad (3)$$

Avec :

J = probabilité de rencontre des particules

G = gradient de vitesse [s^{-1}]

d = diamètre de la sphère d'attraction des particules [m]

n = nombre de particules par unité de volume [m^{-3}]

4.3.3 Rôle du pH

Dans la solution à présent coagulée se trouvent les précipités d'hydroxydes de métaux d'aluminium ou de fer ($Al(OH)_3$ et $Fe(OH)_3$). Le Tableau 3 montre la prédominance des formes hydroxyde en fonction du pH.

Forme prédominante	pH
$Al(OH)_3$	5,8 – 7,2
$Fe(OH)_3$	5,5 – 8,3

Tableau 3 - Formes prédominantes des hydroxydes selon le pH

Dans cette gamme de pH, les formes dissoutes Al^{3+} et Fe^{3+} sont quasi inexistantes, ce qui non seulement minimise les risques sanitaires par contamination de l'eau de l'ion trivalent d'aluminium, la pollution colorée due à l'ion ferrique, mais réduit également l'oxydoréduction et la corrosion du réseau causé par des ferrobactéries.

4.3.4 Influence du Titre Alcalin Complet (TAC)

L'alcalinité de l'eau est sa capacité à neutraliser un acide. Plus le TAC est élevé, plus l'eau est basique. L'ajout de coagulant et/ou de floculant consomme l'alcalinité de l'eau, ce qui entraîne une chute de pH. Une diminution du pH perturbe la formation des hydroxydes comme expliqué au point 4.3.3. Il est donc parfois nécessaire d'ajouter de la soude, de la chaux ou du calcaire pour rester dans la zone optimale de pH.

4.3.5 Les floculants

L'amélioration de la floculation nécessite l'ajout de réactifs floculants. Il s'agit dans la plupart des cas de polymères linéaires généralement synthétiques de haut poids moléculaire, pouvant aller jusqu'à 15.10^6 [5]. Leur efficacité dépend des groupements chimiques réactifs, greffés sur les chaînes macromoléculaires, ainsi que la configuration des macromolécules au sein de la solution. Il existe trois classes de polymères floculants. Ils peuvent être non ioniques, anioniques ou cationiques. Les chaînes macromoléculaires portent des groupements chargés ou non, réparties le long de la chaîne. Ils se présentent, à l'état sec, comme des poudres ou granulés, ou peuvent être sous forme liquide.

La station d'épuration de la ville de Québec utilise un floculant cationique (Zetag® 4110).

Les groupements actifs de ce polyélectrolyte sont des sels quaternaires. Par l'intermédiaire de ces groupements ammonium, une décharge électrique est provoquée dans la solution et les colloïdes, encore légèrement chargés négativement, viennent s'adsorber à l'interface solide-liquide. Il s'agit d'une réaction irréversible. Cela résultera en une annulation presque complète du potentiel zêta, engendrant l'agglomération des particules, sous une faible agitation du milieu, comme décrit dans la Figure 16. Le polymère s'étend (grâce aux forces de répulsion des groupements chargés positivement le long de sa chaîne), et crée des ponts entre les particules colloïdales et ainsi les rassemble pour former des agrégats plus denses et aptes à décantier.

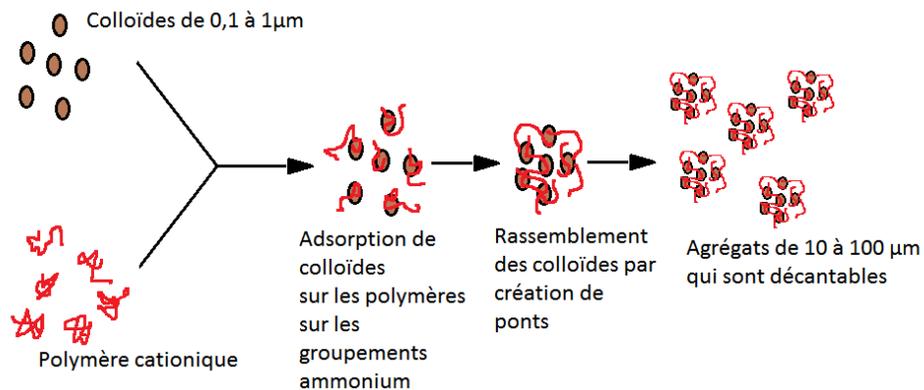


Figure 16 - Agglomération des colloïdes sous l'action du floculant

Le dosage du floculant a beaucoup d'importance, comme le montre la Figure 17. En effet, la turbidité présente un minimum pour des concentrations de floculant de 10^{-6} mol/l. Une fois cette concentration dépassée, la turbidité augmente à nouveau. Il faut donc éviter de surdoser le polymère, sous peine que la macromolécule se comprime sur les colloïdes. Il n'y aurait plus alors suffisamment de sites disponibles pour le pontage, ce qui diminue l'efficacité de la floculation [3].

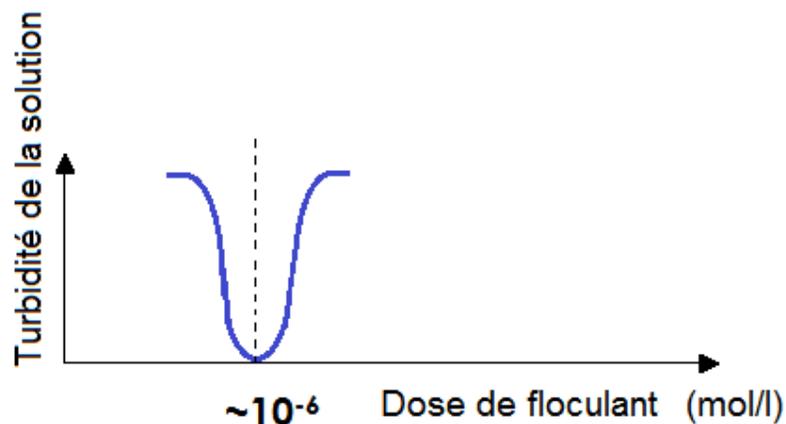


Figure 17 - Influence du dosage de floculant

5 Méthodologie

5.1 Jar-tests

Les jar-tests sont une simulation à petite échelle de ce qui se passe en station de traitement lors de la coagulation/floculation. Ces tests permettent d'évaluer différents paramètres de ce processus comme :

- Le dosage de produits chimiques ajoutés ;
- Les temps nécessaires pour la floculation et la coagulation ;
- Les vitesses d'agitation du milieu.

Ainsi, il est possible de déterminer leurs valeurs optimales pour l'amélioration des performances de la station.

Un banc de jar-test est composé de 6 béchers d'un litre chacun, tous muni d'un axe au bout duquel se trouve une pale rotative. Les axes sont reliés à un même moteur, ce qui permet de maintenir la même vitesse dans chaque bécher, comme illustré dans la Figure 18.

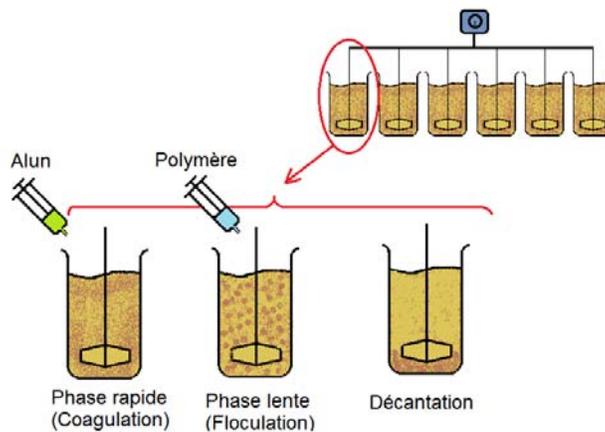


Figure 18 - Banc de jar-test

Le test passe par 3 phases distinctes.

- Il y a d'abord la phase de coagulation, qui nécessite une vitesse relativement rapide (~ 100 rpm). Elle requiert l'ajout d'un coagulant (alun – Sulfate d'aluminium sous forme aqueuse) d'une certaine concentration. Quand le contact entre le coagulant et l'eau est efficace, la solution d'eau et de particules en suspension est déstabilisée ; les charges de répulsions sont annulées, et les particules peuvent alors s'attirer.
- Ensuite vient la phase de floculation, qui nécessite une vitesse plus lente (~ 40 rpm), pour permettre un contact suffisant, mais sans casser les floccs en formation. Elle requiert l'ajout d'un agent floculant (polymère) d'une certaine concentration, souvent basse. Les particules en suspension, préalablement déstabilisées, sont alors adsorbées sur le polymère, et forment des floccs d'une densité assez élevée pour décanter.
- Pendant la phase de décantation, la vitesse d'agitation est nulle, pour permettre la sédimentation des matières en suspension flocculées.

Une fois la phase de décantation effectuée, le surnageant, débarrassé d'une grande partie des MeS (Matières en Suspension) qui sont maintenant dans le fond du bécher, est prélevé et analysé. La concentration des MeS est mesurée et comparée à la concentration en MeS avant traitement. Si nécessaire, une mesure de la turbidité, de l'alcalinité et de la conductivité est effectuée avant et après traitement.

5.2 Facteurs influents

Pour pouvoir étudier la coagulation/floculation qui a lieu dans un décanteur primaire après ajout de produits chimiques, il a tout d'abord fallu déterminer les différents facteurs qui influencent cette dernière.

Huit facteurs ont été identifiés, comme indiqué dans le Tableau 4 :

	Facteurs
Phase rapide (Coagulation)	1) Vitesse de coagulation 2) Temps de coagulation 3) Concentration d'alun 4) Temps d'ajout du polymère
Phase lente (Floculation)	5) Vitesse de floculation 6) Temps de floculation 7) Concentration du polymère
Autres	8) Caractéristique de l'eau : température, concentration en MeS, turbidité, pH, conductivité, etc.

Tableau 4 - Identification des facteurs influençant la coagulation/floculation

Les vitesses de coagulation et de floculation sont celles d'agitation du milieu pour chaque phase.

Les temps de coagulation et de floculation sont ceux nécessaires à ce que la coagulation et la floculation aient lieu.

En ce qui concerne le temps d'ajout du polymère, il a été remarqué, lors d'études précédentes faites à la STEP Est, qu'il était nécessaire d'ajouter le polymère en peu avant la phase de floculation. En effet, comme cette phase nécessite des vitesses d'agitation du milieu faibles. Ces vitesses ne sont pas suffisantes pour permettre un contact suffisant entre le polymère et le milieu. Le fait d'ajouter le polymère avant la fin de la phase de coagulation à des vitesses d'agitation plus importantes permet d'obtenir une meilleure efficacité de contact.

La caractéristique de l'eau est considérée comme une boîte noire sur laquelle on ne peut pas agir. Il s'agit des valeurs de température, concentration en MeS, turbidité, pH, conductivité, etc. qui sont des caractéristiques de l'eau brute, avant traitement.

Une fois ces huit facteurs identifiés, des plans d'expérience particuliers ont été utilisés. Il s'agit des carrés latins et des plans composites centrés.

Les résultats obtenus ont été analysés par analyse de variance ou ANOVA (ANalysis Of VAriance).

5.3 Les plans d'expérience

Les plans d'expérience sont utiles dans beaucoup de domaines d'études. Ils permettent d'organiser de manière optimale des expérimentations. Ainsi, il est possible d'obtenir un maximum d'informations en un minimum d'expériences, donc en un minimum de temps et avec réduction du coût.

Les plans d'expérience sont donc utiles quand on cherche le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt y et des variables explicatives x_i , aussi appelés facteurs. Les facteurs sont quantitatifs et les valeurs prises par ces facteurs sont appelées niveaux.

Le lien entre la réponse et les facteurs s'exprime selon l'Equation 4 :

$$y = f(x_i) \quad (4)$$

Pour ce faire, on choisit à priori une fonction mathématique qui relie la réponse aux facteurs. On prend un développement limité de la série de Taylor-Mac Laurin, dont les dérivées sont supposées constantes. Ce développement prendra alors la forme d'un polynôme de degré plus ou moins important, comme le montre l'Equation 5. À ce polynôme est ajoutée une erreur qui traduit deux phénomènes. Le premier est le fait que le modèle choisi est probablement différent du modèle réel, et qu'il existe un écart entre eux. Il s'agit du manque d'ajustement du modèle. Le deuxième phénomène est la nature aléatoire de la réponse, car en répétant plusieurs fois la même expérience, l'on obtient pas toujours la même réponse, les résultats sont donc dispersés. Il s'agit de l'erreur expérimentale. L'erreur qu'on ajoute au polynôme englobe donc ces deux compléments au modèle [6].

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \beta_{ij} x_i x_j + \dots + \sum \beta_{ii} x_i^2 + \beta_{ij\dots z} x_i x_j \dots x_z + \varepsilon \quad (5)$$

Où :

y = Réponse ou grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation.

x_i = Niveau attribué au facteur i par l'expérimentation.

$\beta_0, \alpha_i, \alpha_{ii}, \alpha_{ij}$ = Coefficient du modèle mathématique adopté à priori. Ils doivent être calculés à partir des résultats des expériences.

ε = Ecart entre la réalité et le modèle. Il englobe l'erreur de manque d'ajustement du modèle et les erreurs expérimentales.

La réponse est obtenue par l'ensemble des points expérimentaux. Elle est modélisée par un polynôme dont les coefficients sont les inconnus à déterminer, ce qui résulte en un système de n équations et p inconnues (pour n essais et p coefficients choisis à priori). La notation matricielle de ce système est décrite par l'Equation 6.

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (6)$$

Où :

Y = Matrice des réponses, de dimension (n,1)

X = Matrice du modèle, qui dépend des points expérimentaux et de dimensions (n, p+1)

β = Matrice des coefficients, de dimensions (p+1, 1)

ε = Vecteur des écarts, de dimension (n, 1)

Il s'agit d'un système de n équations à $p + n$ inconnues. Le nombre d'équations est inférieur au nombre d'inconnues. Il se résout par la méthode de régression basée sur le critère des moindres carrés. L'estimation des coefficients se calcule de manière matricielle, décrite par l'Equation 7:

$$\hat{\beta} = (X^t X)^{-1} X^t Y \quad (7)$$

Où :

$\hat{\beta}$ = Estimation des coefficients

X^t = Matrice transposée de X

Les coefficients de calculent rapidement à l'aide de logiciels statistiques.

5.3.1 Espace expérimental

Chaque facteur x_i est associé à un axe. Ces axes sont orthogonaux 2 à 2 et construisent ainsi un espace expérimental. Les facteurs varient dans un intervalle, dont les deux bornes sont appelées niveau haut (représenté par +1) et niveau bas (représenté par -1). L'intervalle est le domaine de variation du chaque facteur, qui peut prendre la valeur de plusieurs niveaux dans son domaine de variation. L'ensemble des domaines de variation des différents facteurs définissent le domaine d'étude. Un essai va donc correspondre à un point expérimental dans l'espace expérimental prédéfini. Toutes ces notions sont représentées sur la Figure 19.

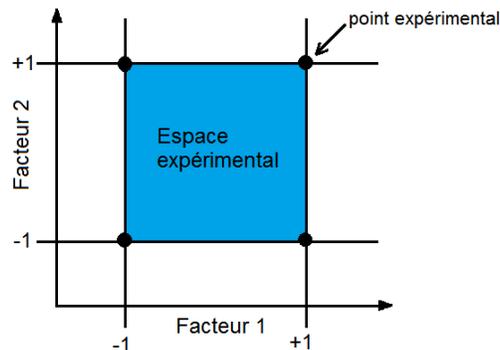


Figure 19 - Domaine d'étude d'un plan d'expérience de deux facteurs à deux niveaux

La Figure 20 illustre la surface de réponse y en évaluant deux facteurs sur trois niveaux.

Les plans d'expérience sont classés en trois catégories : les plans de criblage, les plans de modélisation et les plans de mélange.

Les plans de criblage permettent d'identifier, parmi une série de facteurs, les plus influents sur une réponse donnée. Ils préparent donc à la réalisation d'un plan de modélisation. On trouve dans cette catégorie les plans factoriels complets, fractionnaires, saturés et sursaturés [7].

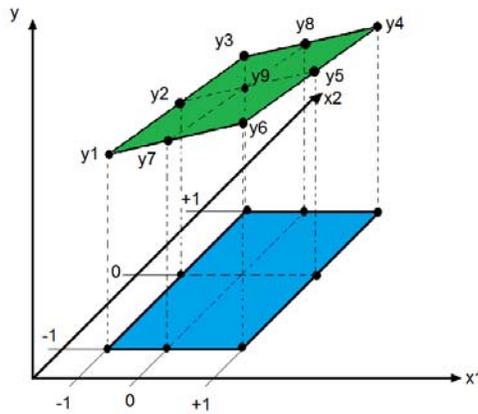


Figure 20 - Visualisation de la réponse y dans l'espace de dimension 3

Les plans de modélisation permettent de déterminer les coefficients du modèle β_i . Ils comportent les plans factoriels complets et fractionnaires, les plans composites, de Doehlert et de Box-Behnken [7].

Le nombre d'expériences nécessaires à la réalisation d'un plan factoriel complet est noté n^k ;

Avec n = nombre de niveaux ;

k = nombre de facteurs.

Utiliser un plan d'expérience sur deux niveaux implique que la relation entre la variable d'intérêt et la variable considérée est linéaire, ce qui n'est pas toujours le cas. Il faudrait alors pouvoir évaluer tous les facteurs sur 3 niveaux chacun, ce qui augmente le nombre d'expériences de manière exponentielle. C'est pourquoi le choix se porte plus volontiers sur un plan fractionnaire correspondant, portant le nom de carré latin.

5.4 Les carrés latins

Les carrés latins sont des plans d'expérience particuliers qui permettent d'étudier 3 facteurs prenant chacun 3 niveaux ou plus. Ils sont utilisés dans le cas où l'on voudrait étudier l'influence d'un facteur, appelé traitement, en contrôlant deux autres facteurs qui sont source de variation.

Ils se présentent sous la forme d'un tableau $n \times n$, où chaque élément n'est présent qu'une fois par ligne et par colonne, comme illustré dans la Figure 21. Ainsi, le plan est divisé en n lignes et n colonnes, créant ainsi 36 carrés plus petits, qui reçoivent chacun la valeur d'un traitement allant de A à F (si $n=6$).

		Facteur 2					
		1	2	3	4	5	6
Facteur 1	1	A	B	C	D	E	F
	2	B	F	D	C	A	E
	3	C	D	E	F	B	A
	4	D	A	F	E	C	B
	5	E	C	A	B	F	D
	6	F	E	B	A	D	C

Figure 21 - Carré latin

Dans notre cas, il s'agirait d'évaluer 3 facteurs sur 6 niveaux, ce qui ferait un total de 36 expériences, au lieu de $3^6=729$ expériences avec un plan factoriel complet. Les facteurs 1 et 2 sont évalués sur 6 niveaux, et le facteur 3, qui est le traitement appliqué est disposé aléatoirement dans le carré. Ainsi, la disposition des points expérimentaux est telle que tous les niveaux sont représentés, sans qu'il y ait de répétitions, et de manière aléatoire.

Le modèle mathématique correspondant au carré latin est représenté par l'Equation 8:

$$y_{ij(k)} = \mu + \rho_i + \gamma_j + \tau_k + \varepsilon_{ij(k)} \quad (8)$$

Avec :

$y_{ij(k)}$ = Réponse de la $i^{\text{ème}}$ ligne de la $j^{\text{ème}}$ colonne ayant reçu le $k^{\text{ème}}$ traitement

$i = 1, 2, \dots, n$

$j = 1, 2, \dots, n$

$k = 1, 2, \dots, n$

μ = Moyenne globale

ρ_i = Effet du facteur 1 de la $i^{\text{ème}}$ ligne

γ_j = Effet du facteur 2 de la $j^{\text{ème}}$ colonne

τ_k = Effet du $k^{\text{ème}}$ traitement

$\varepsilon_{ij(k)}$ = Erreur

Ces plans sont souvent utilisés pour des variables discrètes et le modèle mathématique est un modèle sans interactions entre facteurs [6].

5.5 Plan composite centré

Un plan composite est construit en trois parties :

- Un plan factoriel dont chaque facteur prend 2 niveaux ;
- Au moins un point expérimental qu'on place au centre du domaine d'étude ;
- Des points axiaux, dits « en étoile », situés sur les axes de chacun des facteurs.

Les différents points sont illustrés par la Figure 22 :

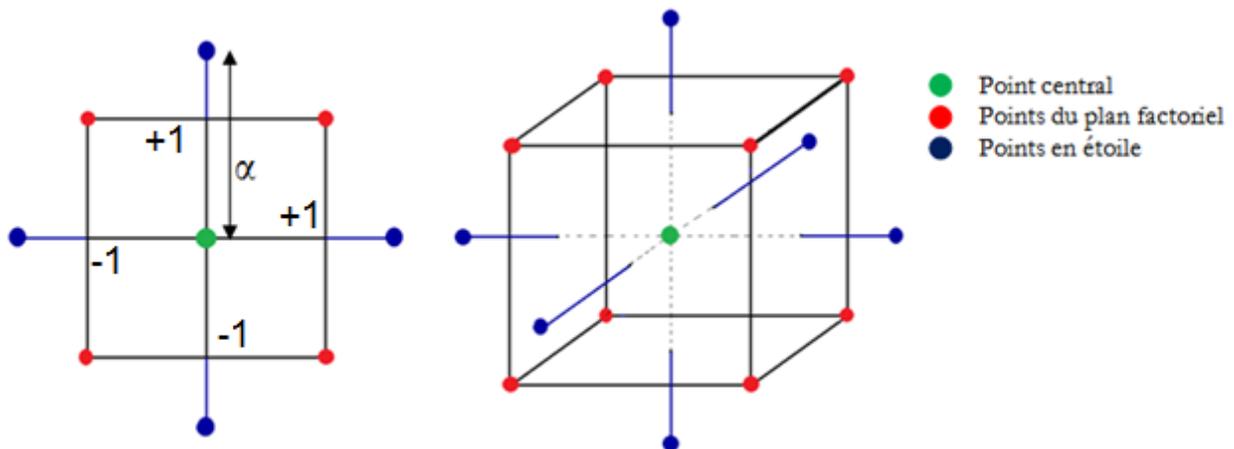


Figure 22 - Plan composite

Ces plans présentent l'avantage de se prêter au déroulement séquentiel d'une étude et d'exiger un nombre d'expériences relativement peu élevé [6].

5.5.1 Construction d'un plan composite

Pour k facteurs, la matrice d'expérience se construit comme suit :

$N_F = 2^k$ expériences suivant un plan factoriel complet à deux niveaux ;

$N_E = 2k$ expériences situées sur l'axe des facteurs, à une distance $\pm\alpha$ du centre du domaine d'étude ;

N_0 expériences au centre du domaine, répété autant de fois que nécessaire. Ce point central permet d'estimer la variation due à l'erreur expérimentale et à analyser le manque d'ajustement du modèle. Il est choisi de manière à assurer la propriété de presque orthogonalité de la matrice du modèle.

N est appelé coût et est égal à la somme de N_F , $2k$ et N_0 .

Ainsi, chaque facteur du plan composite centré prend 5 niveaux en variable codée :

$-\alpha, -1, 0, +1, +\alpha$.

a) *Choix de alpha*

Pour α supérieur à 1, le plan est un plan composite extérieur (CCE) et le domaine d'étude est dit sphérique.

Pour un α égal à 1, le plan est un plan composite intérieur (CCI) et le domaine d'étude est dit cubique.

La valeur de α est choisie de manière à assurer la propriété d'isovariance par rotation du plan. Cela traduit le fait qu'il est possible d'estimer, à partir de ce modèle, la valeur de la réponse avec la même précision en tous points équivalents du centre de domaine d'étude [7].

La valeur de α se calcule suivant l'Equation 9, pour assurer l'isovariance par rotatabilité du plan.

Ou encore par l'Equation 10, pour assurer la presque orthogonalité du plan.

$$\alpha = (N_F)^{1/4} \quad (9)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\sqrt{N_F \times N} - N_F}{2}} \quad (10)$$

b) *Choix de N_0*

N_0 est choisi supérieur à 1. Le nombre répétitions de ce point central est laissé à la discrétion de l'expérimentateur. Souvent, c'est le budget qui détermine le nombre de répétitions.

Cependant, pour assurer l'orthogonalité et la rotatabilité du plan, N_0 peut se calculer selon l'Equation 11 :

$$N_0 = 4\sqrt{N_F} + 4 - 2k \quad (11)$$

5.6 Analyse de variance ANOVA

L'analyse de variance permet entre autres d'identifier quels facteurs influencent le résultat de la mesure. Les facteurs dont on cherche s'ils influencent significativement ou non les résultats de mesure sont les facteurs contrôlés, x_i . L'étude de leur action se fait à partir d'expériences composées de l'ensemble des mesures, qui sont elles-mêmes caractérisées par des valeurs définies, ou niveaux de ces facteurs.

L'analyse de la variance suppose que les résultats de mesure soient distribués selon une même loi de Gauss, quelle que soit la valeur du facteur étudié susceptible d'avoir une influence sur la réponse y . Il s'agit donc d'un test statistique.

Le modèle mathématique théorique suivant l'Equation 12 donne la réponse en fonction des variables explicatives, auxquelles on ajoute une constante et l'erreur [8].

$$y_{ijk\dots} = \mu + f(i, j, k, \dots) + \varepsilon \quad (12)$$

Avec :

$y_{ijk\dots}$ = La variable à expliquer

μ = La constante additive du modèle

$f()$ = La relation entre les variables explicatives et la réponse

ε = L'erreur de mesure et d'ajustement du modèle

On pose l'hypothèse fondamentale que l'erreur suit une loi normale telle que $\varepsilon = N(0, s^2)$.

5.6.1 Conditions d'application

Il existe de nombreuses hypothèses relatives à l'analyse de variance.

L'analyse des résidus (point 5.6.5) est utile pour répondre aux hypothèses de normalité et d'homoscédasticité.

Hypothèse d'indépendance : Les différents échantillons comparés sont indépendants et l'ensemble des essais sont répartis au hasard (randomisation) entre les niveaux de chaque facteur.

Hypothèse de normalité : Les données réelles suivent une loi normale, d'espérance μ et d'écart-type σ strictement positif et donc de variance s^2 .

Hypothèse d'homoscédasticité : Les variances des données sont homogènes. Le facteur considéré n'agit donc pas sur la variance, mais uniquement sur la moyenne de la variable.

5.6.2 Modèle sous H_0 : homogénéité des données

L'analyse de variance teste l'effet d'un facteur contrôlé x_i ayant p niveaux sur la moyenne d'une variable quantitative y .

L'hypothèse nulle testée est la suivante :

Il n'y a pas d'effet du facteur x_i et les p moyennes sont égales à une même moyenne μ .

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_i = \dots = \mu_p = \mu$$

Alors $y_{ij} = \mu + \varepsilon_{ij}$ sous H_0

Avec ε_{ij} variable aléatoire indépendante suivant une loi normale $N(0, \sigma)$.

5.6.3 Modèle sous H_1 : hétérogénéité des données

L'hypothèse alternative est la suivante :

Il y a un effet du facteur x_i et il existe au moins deux moyennes significativement différentes.

$$H_1: \exists \mu_i \neq \mu_j$$

Alors $y_{ij} = \mu + a_i + \varepsilon_{ij}$ sous H_1

Avec ε_{ij} : variable aléatoire indépendante suivant une loi normale $N(0, \sigma)$,

a_i : l'effet du niveau i du facteur x_i sur la variable y .

5.6.4 Régression linéaire multiple

La régression multiple est un outil statistique qui permet d'étudier la relation entre la réponse y et des variables explicatives x_i .

Les coefficients du modèle sont calculés par la méthode des moindres carrés, comme expliqué au point 5.3.

Il en découle que:

$$s^2(Y) = s^2(\hat{Y}) + s^2(E) \quad (13)$$

Où :

S^2 = Variance du vecteur

Y = Vecteur des réponses mesurées

\hat{Y} = Vecteur de réponse calculée par les modèle

E = Vecteur des résidus

L'Equation 13 est l'analyse de variance dont le premier terme est la variance expliquée par le modèle, le deuxième la variance résiduelle.

Le coefficient de détermination se calcule selon la formule donnée par l'Equation 14 :

$$R^2 = \frac{s^2(\hat{Y})}{s^2(Y)} \quad (14)$$

Selon la valeur de ce coefficient, on peut déjà conclure sur le modèle. Si R^2 est proche de zéro, le choix des variables ne contient aucune explication qui permet d'expliquer la réponse, tandis que s'il est proche de 1, le modèle explique très bien la variation de y [9].

5.6.5 Analyse des résidus

L'estimation par intervalle des coefficients et les tests d'hypothèse sont surtout liés au terme d'erreur ε . Ce dernier résume les informations absentes du modèle mathématique. L'analyse de ces résidus est donc nécessaire au préalable pour pouvoir interpréter les résultats [9].

Ces hypothèses se résument comme suit :

- La distribution de l'erreur est symétrique et suit une loi normale ;
- Sa variance est constante ;
- Les erreurs $\varepsilon_i (i = 1, 2, \dots, n)$ sont indépendantes.

Les résidus se calculent selon l'Equation 15 :

$$\hat{\varepsilon}_{ij} = (y_{ij} - \hat{y}_i) \quad (15)$$

Avec :

$\hat{\varepsilon}_{ij}$ = Résidus à analyser

y_{ij} = Valeurs observées

\hat{y}_i = Valeurs prédites par le modèle, tel que $\hat{y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_{i,1} + \dots + \hat{\beta}_p x_{i,p}$

Pour évaluer la qualité d'une régression, l'analyse des résidus s'avère très utile.

Il existe plusieurs graphiques qui servent à les analyser, dont les principes généraux sont :

- Les résidus sont portés en ordonnée ;
- Les points expérimentaux doivent être uniformément répartis de manière aléatoire dans un intervalle ;
- Aucun point ne doit se démarquer ostensiblement des autres ;
- Il ne doit pas apparaître de forme de régularité dans le nuage de points.

a) Résidus vs. Réponse

Il s'agit d'un graphique qui porte les résidus en fonction de la réponse y . Il permet de voir si la prédiction \hat{y} est d'égale qualité sur tout le domaine. Les résidus $\hat{\varepsilon}_i$ devraient être répartis de manière aléatoire autour de zéro et ne pas avoir tendance à prendre des valeurs différentes selon les valeurs de y . Quand, pour une série de valeurs les résidus s'écartent visiblement, cela signifie que la valeur y est mal reconstituée par la modèle.

b) Q-Q plots

Les graphiques Q-Q plots (quantile-quantile plots) sont des graphiques de nuage de points qui comparent les quantiles de la distribution empirique à ceux d'une distribution théorique normale. Les moyennes et les écarts-types sont estimés sur les valeurs observées.

Une distribution qui répond à une loi normale forme une droite oblique, qu'on appelle également « droite de Henry ».

Il s'agit donc d'un test de normalité.

5.6.6 Analyse des résultats

a) Table ANOVA

L'Equation fondamentale 16 de l'analyse de variance s'écrit [8] :

$$\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^p n_i (\bar{y}_i - \bar{y})^2 + \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \quad (16)$$

SCE_{total} $SCE_{facteur}$ $SCE_{résidu}$

Avec :

SCE_{total} = Somme des écarts totaux ou variation totale

$SCE_{facteur}$ = Somme des écarts liés aux effets des facteurs ou variation entre les facteurs

$SCE_{résidu}$ = Somme des écarts résiduels ou variation interne à chaque facteur

Les valeurs que prennent chacun des termes de l'équation sont représentées dans un tableau, dit « table ANOVA ».

Les calculs des sommes des carrés des écarts et de la variance pouvant devenir vite fastidieux, un logiciel de traitement de données statistiques est utilisé. Il s'agira ici du logiciel R, un freeware que l'on trouve facilement sur internet, et qui est celui utilisé par l'équipe modelEAU.

La table ANOVA se présente comme suit (Tableau 5) :

Source de variance	Degrés de liberté	Somme des carrés des écarts	Variance	F	p-value
Inter-classes	$DDL_{facteur}$	$SCE_{facteur}$	$S_{facteur}^2 = \frac{SCE_{facteur}}{DDL_{facteur}}$	$F = \frac{S_{facteur}^2}{S_{résidu}^2}$	$P_{H_0}(F > F_{obs})$
Intra-classes	$DDL_{résidu}$	$SCE_{résidu}$	$S_{résidu}^2 = \frac{SCE_{résidu}}{DDL_{résidu}}$	—	—
Total	DDL_{total}	SCE_{total}	—	—	—

Tableau 5 - Table ANOVA

Dans ce test statistique, la p-value est la probabilité d'obtenir la même valeur du test si l'hypothèse nulle était vraie. Si cette valeur p est inférieure à la valeur du seuil préalablement défini (0,05 ou 0,01 au choix), on rejette l'hypothèse nulle H_0 .

En d'autres termes, la valeur p est la probabilité de commettre une erreur de première espèce, c'est-à-dire de rejeter à tort l'hypothèse nulle et donc d'avoir un faux positif [8].

Les seuils suivants sont considérés :

- p-value < 0,01 : très forte présomption contre l'hypothèse H_0 ;
- 0,01 < p-value < 0,05 : forte présomption contre l'hypothèse H_0 ;
- 0,05 < p-value < 0,1 : faible présomption contre l'hypothèse H_0 ;
- p-value > 0,1 : pas de présomption contre l'hypothèse H_0 .

Pour faciliter la lecture des données, une notation avec des astérisques est souvent adoptée. Les différents niveaux de la p-values se notent :

- '***' p-values < 0,001 ;
- '**' p-values < 0,01 ;
- '*' p-values < 0,05 ;
- '.' p-values < 0,1 ;
- ' ' p-values > 0,1.

b) *Box-plots*

Une manière d'analyser les résultats est l'utilisation des graphiques « Box-plots ».

J. W. Tukey est l'inventeur des *Box & Whiskers Plot*, traduit en français en « boîtes à moustaches ». Elles sont une représentation schématique d'une distribution qui facilite l'approche de certains concepts abstraits de la statistique, en se basant sur les propriétés de la médiane et des quartiles [10].

Pour lire et interpréter les boîtes à moustaches, il faut en connaître la construction, qui se base sur 5 valeurs qui résument l'ensemble des données. Il s'agit du minimum, de trois quartiles Q1, Q2 (la médiane), Q3 et enfin du maximum. Une boîte à moustache et ces valeurs sont illustrées sur la Figure 23.

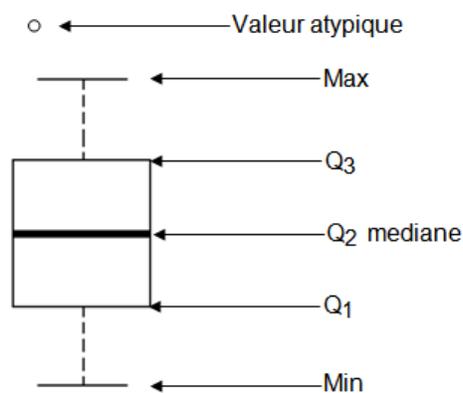


Figure 23 - Illustration d'un box-plot

- La médiane Q2 partage les données en deux groupes d'effectifs égaux.
- Le quartile Q1 partage à nouveau le groupe de données inférieures à la médiane en deux nouveaux sous-groupes d'effectifs égaux.
- Le quartile Q3 partage le groupe de données supérieures à la médiane en deux sous-groupes d'effectifs égaux.
- Les « moustaches » sont les deux traits en pointillés de part et d'autre de la boîte. Elles délimitent les valeurs dites adjacentes.
- Il existe parfois des valeurs exceptionnelles, dites atypiques, qui se situent au-delà des valeurs adjacentes. Celles-là sont individualisées et représentées sur le graphique par de petits cercles. Les valeurs atypiques sont celles qui dépassent de 1,5¹ fois l'écart interquartile en dessous du 1^{er} quartile ou au-dessus du 3^{ème} quartile.
- L'écart interquartile se calcule par la différence entre Q3 et Q1 et correspond à 50 % des effectifs situés dans la partie centrale de la distribution et est utilisé comme indicateur de dispersion.
- La largeur des boîtes n'a pas de signification particulière.

¹ Dans la boîte à moustaches définie par Tukey, la boîte a pour hauteur la distance interquartile et les moustaches sont basées généralement sur 1,5 fois la hauteur de la boîte. En se basant sur les quartiles, c'est-à-dire sur des statistiques d'ordre, la médiane et l'écart interquartile ne sont jamais influencés par les valeurs extrêmes[10].

6 Expérimentation

6.1 Jar-tests

6.1.1 Objectif

Les essais jar-tests vont servir à évaluer les différents facteurs qui influencent la coagulation/floculation. Ces facteurs sont repris dans le Tableau 6.

	Facteurs
Phase rapide (Coagulation)	1) Vitesse de coagulation
	2) Temps de coagulation
	3) Concentration d'alun
	4) Temps d'ajout du polymère
Phase lente (Floculation)	5) Vitesse de floculation
	6) Temps de floculation
	7) Concentration du polymère
Autres	8) Caractéristique de l'eau

Tableau 6 - Les 8 facteurs influençant la coagulation/floculation

Les vitesses de coagulation et de floculation sont les vitesses d'agitation du milieu.

Les temps de coagulation et de floculation sont les temps nécessaires à la coagulation et la floculation.

L'influence de chaque facteur et les interactions qui peuvent exister entre eux seront étudiés, pour déterminer lesquels sont les plus significatifs. Une fois ceux-là identifiés, une valeur fixe pourra être attribuée aux facteurs non significatifs.

Pour les facteurs significatifs, l'on pourra déterminer avec précision la zone du domaine où ils sont les plus efficaces, et ainsi les optimiser pour améliorer la décantation.

6.1.2 Instrumentation

Les différents essais ont été effectués avec le logiciel FLOC2000, qui permet de contrôler la vitesse de chacun des 6 béciers indépendamment.

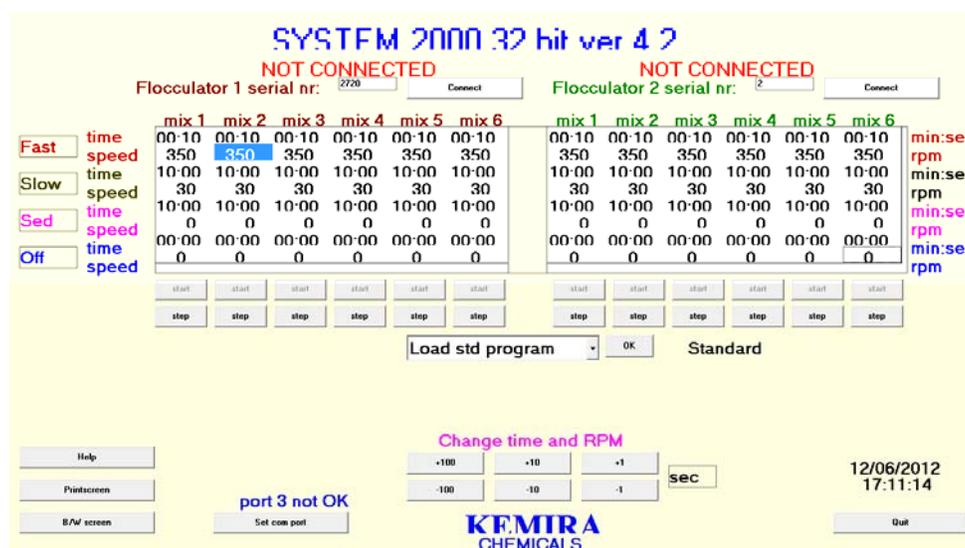


Figure 24 - Interface du logiciel FLOC2000

Ce logiciel sert d'interface (Figure 24) entre l'opérateur et le banc de jar-test. On peut introduire à l'écran les différents paramètres comme le temps et la vitesse de rotation, pour chaque phase de coagulation et floculation. Chaque bécber peut donc recevoir une valeur différente. Une fois les paramètres saisis, le programme est connecté aux différents systèmes d'agitation, indépendant pour chaque bécber (Figure 25).



Figure 25 - Banc de jar-test

Une micropipette est utilisée pour injecter l'alun, à différentes concentrations. Des seringues sont utilisées pour injecter le polymère, qui a préalablement été dissout dans de l'eau. Une seringue de volume plus importante sert à prélever les surnageant, une fois la phase de décantation écoulée. Ces trois opérations sont effectuées par l'orifice situé dans le couvercle du bécber, pour éviter de bouger la pale qui est plongée dans le milieu, et remettre les MeS en suspension.

Caractéristiques de l'alun :

- Sulfate d'aluminium (48,5% en poids) en solution aqueuse ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$)
- Liquide inodore et visqueux de couleur paille
- $\text{pH}=3,5$
- Température d'ébullition : 101°C
- Température de fusion : -16°C
- Densité : 1,335
- Masse molaire : 594 g/mol
- Solubilité dans l'eau : bonne

Caractéristiques du polymère (Zetag ®4110) :

- Forme solide : poudre blanche inodore
- $\text{pH}=7$
- Solubilité dans l'eau : mauvaise
- Forme dissoute : solution visqueuse incolore (0,01% en poids)
- Densité : 1,0015

Mode opératoire :

- Les béchers sont remplis d'un litre d'eau usée ;
- Le logiciel est paramétré puis lancé ;
- Une concentration connue d'alun est ajoutée, pendant la phase de coagulation ;
- Une concentration connue de polymère est ajoutée, juste avant la phase de floculation ;
- Une fois la phase de décantation terminée, le surnageant est prélevé et analysé par mesure de la turbidité et concentration en MeS.

6.1.3 Méthodologie d'échantillonnage

Les échantillons d'eau usée proviennent de la station d'épuration Est de la ville de Québec. Cette station se trouve à 20 minutes en voiture de l'Université Laval.

A la station, l'eau usée est prélevée à l'aide d'un pot fixé au bout d'une longue tige. Le point d'échantillonnage est situé juste avant les dégrilleurs, qui reçoivent l'affluent de la station. Cela permet d'avoir un échantillon exempt d'alun, car ce dernier est ajouté entre les dégrilleurs et les décanteurs primaires à la STEP Est.

L'échantillon est alors transporté dans des seaux jusqu'au laboratoire de l'université. Il est soit directement analysé, ou stocké dans la chambre froide à 4°C.

6.1.4 Turbidité

La mesure de la turbidité permet de déterminer la qualité de l'eau. La clarté et la transparence de celle-ci sont l'image d'une haute qualité.

Cette mesure se base sur le principe de l'interaction entre une onde lumineuse incidente et une particule en suspension qui engendre principalement des phénomènes de diffusion, réflexion, absorption et réfraction.

Elle se mesure en NTU (Nephelometric Turbidity Unit), unité de turbidité néphélométrique. Cette unité est utilisée lorsque la mesure s'effectue en lumière diffusée à 90°, à une longueur d'onde de 860 nm.

Il existe d'autres unités de mesure, comme le FTU (Formazine Turbidity Unit), FNU (Formazine Nephelometric Unit), FAU (Formazine Attenuation Unit), etc[11].

L'appareil utilisé est un turbidimètre 2100N de HACH. L'échantillon à analyser (minimum 20 ml) en versé dans une fiole transparente et placée dans le réceptacle de l'appareil. La valeur de la turbidité se lie directement à l'écran. La précision de l'appareil est de $\pm 2\%$ pour des valeurs de turbidité entre 0,01 et 1 000 NTU.

La comparaison entre la turbidité de l'eau usée non traitée et la turbidité après traitement donnera la diminution de la turbidité, donc l'efficacité du traitement.

6.1.5 Analyse MeS

Un volume connu du surnageant est passé sur des filtres d'une porosité de 1,5 μm , préalablement traités et pesés. La différence entre la masse initiale et la masse finale du filtre donne la concentration en MeS. La conversion entre la masse et la concentration en MeS est donné par l'Equation 17:

$$MeS = \frac{(m_f - m_i)}{V} \quad (17)$$

Avec :

MeS = Matières en suspension [mg/l]

m_f = Masse du filtre après filtration [mg]

m_i = Masse du filtre avant filtration [mg]

V = Volume filtré [l]



Figure 26 - Exemple de filtres MeS

La Figure 26 montre un exemple de filtres qui ont reçu une eau non traitée et une eau traitée.

Les valeurs des concentrations en MeS peuvent être comparées à 40mg/l, qui est la valeur pour laquelle l'on n'observe pas de colmatage des biofiltres, traitement secondaire qui reçoit l'effluent des décanteurs primaires.

6.2 Temps d'ajout du polymère

Le premier facteur testé est le moment où l'on ajoute le polymère à l'eau usée. Le polymère est ajouté un peu avant la phase de floculation, quand la vitesse est encore assez importante pour permettre un contact suffisant et efficace. Les conditions opératoires pour les autres facteurs viennent d'études déjà existantes, qui correspondent aux vitesses, concentrations et temps approximatifs de la coagulation/floculation à la STEP de la ville de Québec.

6.2.1 Conditions opératoires

- Phase de coagulation : temps = 10minutes, vitesse = 150 rpm
- Phase de floculation : temps = 10 minutes, vitesse = 40 rpm
- Phase de sédimentation : temps = 10 minutes, vitesse = 0 rpm
- Concentration d'alun = 45 mg/l
- Concentration du polymère = 0,15 mg/l

Le temps d'ajout du polymère est testé à 30, 25, 20, 15, 10 et 5 secondes avant la phase de floculation.

Les conditions opératoires sont reprises dans le Tableau 7 :

		J1	J2	J3	J4	J5	J6
FAST (coag)	time (min:sec)	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00
	ajout poly à:	00:30	00:25	00:20	00:15	00:10	00:05
	speed (rpm)	150	150	150	150	150	150
SLOW (floc)	time (min:sec)	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00
	speed (rpm)	40	40	40	40	40	40
SED	time (min:sec)	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00
	speed (rpm)	0	0	0	0	0	0

Tableau 7 - Conditions opératoires

6.2.2 Résultats

Les premiers jar-tests ont nécessités plusieurs essais. Cela est du au fait que le surnageant filtré était débarrassé d'un grande partie des MeS. Normalement, un volume d'à peu près 50 ml est suffisant pour avoir une mesure correcte. Cela n'a pas été le cas ici, il a fallu plusieurs essais pour se rendre compte qu'il fallait filtrer plus de 500 ml pour pouvoir mesurer les MeS.

Les 4 essais qui suivent ont été effectués à des dates différentes, et sont donc issus d'échantillons différents. Ils ont comme paramètres les valeurs ci-dessus. Il n'y a que le temps d'ajout du polymère qui change d'un bécher à l'autre et par banc d'essai.

Le débit de l'affluent de la station est pris pour chaque échantillon. Grâce aux débits et au volume total des décanteurs primaires, qui est de 5250 m³, il est possible de calculer le temps de rétention dans les bassins de décantation. Les débits ont donc une influence directe sur le temps de rétention. Plus les débits sont importants, plus le temps de rétention est court.

Ces débits ont également une influence sur la concentration en MeS. Plus les débits sont élevés, plus la concentration en MeS est faible, car elle est diluée.

Ces valeurs doivent être tenues en compte lors de la fonte des neiges ou lors de fortes pluies, car les débits varient beaucoup lors de ces événements.

a) Série 1

Le Tableau 8 donne les résultats obtenus pour le premier essai.

Le bécher « Réf » est celui qui contient l'eau usée non traitée. La mesure sa concentration en MeS permettra de déterminer l'efficacité du traitement.

JT1						
Date (ddmmaa)	05/03/2012					
Débit Q (m ³ /h)	7200					
Volume tot (m ³)	5250					
tps ret (min)	44					
temp (°C)	12					

Bécher	masse i (g)	masse f (g)	vol (ml)	Diff (g)
Réf	1,1173	1,1229	40	0,0056
1	1,0865	1,0868	40	0,0003
2	1,1028	1,1029	43	0,0001
3	1,0883	1,0885	41	0,0002
4	1,0907	1,0908	35	0,0001
5	1,1248	1,1249	37	0,0001
6	1,0998	1,1000	32	0,0002

Tableau 8 - Série 1 : Résultats

Les volumes filtrés étant trop faibles (de l'ordre de 40 ml), cela donne une masse de MeS en dessous de la limite de détection de la balance utilisée, qui est de 0,0010 g. Ces valeurs sont notées en rouge dans le tableau. Ces valeurs ne peuvent donc pas être utilisées pour calculer la concentration des MeS en mg/l.

b) Série 2

Le Tableau 9 donne les résultats obtenus pour le deuxième essai, où les volumes filtrés sont plus importants que l'essai précédent.

JT2							
Date (ddmmaa)	28/03/2012						
heure prélev	10h45						
Débit Q (m ³ /h)	11230						
Volume tot (m ³)	5250						
tps ret (min)	28						

Bécher	masse i (g)	masse f (g)	vol (ml)	Diff (g)	MeS (mg/l)	Comm
Initial	1,1295	1,1359	43	0,0064	148,8	
1	1,1548	1,1558	131	0,0010	7,6	+++
2	1,0631	1,0639	150	0,0008	5,3	++
3	1,0787	1,0795	168	0,0008	4,8	++
4	1,0838	1,0847	182	0,0009	4,9	++
5	1,107	1,1074	192	0,0004	2,1	++
6	1,0817	1,0827	200	0,0010	5	++

Tableau 9 - Série 2 : Résultats

Cette fois-ci, les volumes filtrés ont été triplés. Les masses des MeS sont néanmoins toujours trop faibles pour pouvoir calculer leurs concentrations avec assez de précision. La concentration initiale des MeS est de 148,8 mg/l.

Néanmoins, il est possible de faire des observations visuelles par rapport à la taille des floccs formés. La colonne « comm » reprend les commentaires quant à la taille de ces floccs. Il est alors possible de classer les béchers selon la taille et la quantité de floccs formés, allant de (+++) pour les plus gros floccs en grande quantité à (-) pour les béchers ne contenant pas ou peu de floccs formés. La Figure 27 illustre les floccs formés et décantés, dans un bécher de jar-test.

Il apparaît que l'ajout de polymère à 30 secondes (bécher n° 1) entraîne la formation de plus gros floccs.



Figure 27 - Floccs formés dans l'eau traitée

c) Série 3

Les résultats des pesées de la série 3 sont présentés dans le Tableau 10 - Série 3 : Résultats. Les volumes filtrés ont encore été doublés par rapport à l'essai 2.

JT3							
Date (ddmmaa)	10/04/2012	Bécher	masse i (g)	masse f (g)	vol (ml)	diff	MeS (mg/l)
heure prélev	14h15	Réf	1,1119	1,1172	29	0,0053	182,8
Débit Q (m3/h)	10172	1	1,1426	1,1436	220	0,0010	4,5
Volume tot (m3)	5250	2	1,1269	1,1286	214	0,0017	7,9
Tps ret (min)	31	3	1,0931	1,094	224	0,0009	4,0
		4	1,0965	1,0976	216	0,0011	5,1
		5	1,0808	1,082	206	0,0012	5,8
		6	1,0979	1,1000	264	0,0021	8,0

Tableau 10 - Série 3 : Résultats

Seuls deux résultats sont à la limite de la balance. On peut dire que la mesure des concentrations en MeS commence à être précise. La valeur initiale de la concentration en MeS est de 182,8 mg/l, qui est sensiblement similaire à celle de l'essai 2. On peut aussi remarquer que les débits et les temps de rétention sont proches.

Les valeurs des concentrations des MeS de l'eau traitée peuvent être comparés à la valeur initiale. La diminution de la concentration en MeS est exprimée en pourcentage pour chaque temps d'ajout du polymère. Une mesure de la turbidité a également été effectuée, pour la comparer aux calculs des concentrations en MeS. Ces résultats sont présentés dans Tableau 11.

		J1	J2	J3	J4	J5	J6	
Turb Initial (NTU)	123	Turb (NTU)	5,85	6,17	4,84	5,38	4,48	6,19
		Diminution de la turbidité (%)	95,2	95,0	96,1	95,6	96,4	95,0
MeS Initial (mg/l)	183	MeS (mg/l)	4,5	7,9	4,0	5,1	5,8	8,0
		Diminution des MeS (%)	97,5	95,7	97,8	97,2	96,8	95,6

Tableau 11 - Série 3 : MeS et turbidité

Avant tout, on remarque que la diminution de la turbidité ainsi que la diminution des MeS suit une même tendance. Ensuite, pour les 6 temps d'ajout du polymère, la diminution en MeS est supérieure à 95 %. La Figure 28 illustre ces tendances.

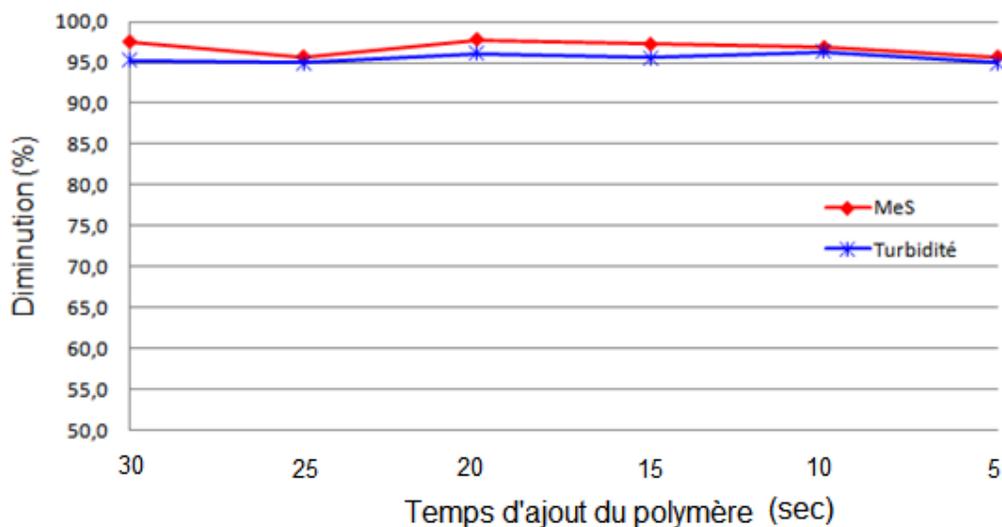


Figure 28 - Diminution des MeS et de la turbidité

d) **Série 4**

Les résultats des pesées de la série 4 se trouvent dans le Tableau 12. Cette fois-ci, les volumes filtrés dépassant les 500 ml et sont suffisants pour avoir toutes les pesées supérieures à la limite de la balance.

JT4		Bécher					
Date (ddmmaa)	10/04/2012	Réf	masse i (g)	masse f (g)	vol (ml)	diff	MeS (mg/l)
heure prélev	14h15	1	1,1146	1,1174	544	0,0028	5,1
Débit Q (m3/h)	10172	2	1,1418	1,1448	492	0,0030	6,1
Volume tot (m3)	5250	3	1,0821	1,0853	512	0,0032	6,2
tps ret (min)	31	4	1,1112	1,1141	500	0,0029	5,8
		5	1,1204	1,1258	512	0,0054	10,5
		6	1,1103	1,1144	504	0,0041	8,1

Tableau 12 - Série 4 : Résultats

La concentration initiale en MeS, le débit et le temps de rétention est une fois similaire aux essais précédents.

Le Tableau 13 donne la comparaison entre chaque bécher et les valeurs initiales de concentration en MeS et de turbidité. Ces valeurs représentent la diminution en pourcentage.

		J1	J2	J3	J4	J5	J6	
Turb Initial (NTU)	125	Turb (NTU)	3,02	4,17	3,92	3,85	7,67	5,11
		Diminution de la turbidité (%)	97,6	96,7	96,9	96,9	93,9	95,9
MeS Initial (mg/l)	184	MeS (mg/l)	5,1	6,1	6,2	5,8	10,5	8,1
		Diminution des MeS (%)	97,2	96,7	96,6	96,8	94,3	95,6
		Comm	++	++	++	+	+	+

Tableau 13 - Série 4 : MeS et turbidité

Ce tableau permet de visualiser graphiquement la diminution de la concentration en MeS et la turbidité (Figure 29).

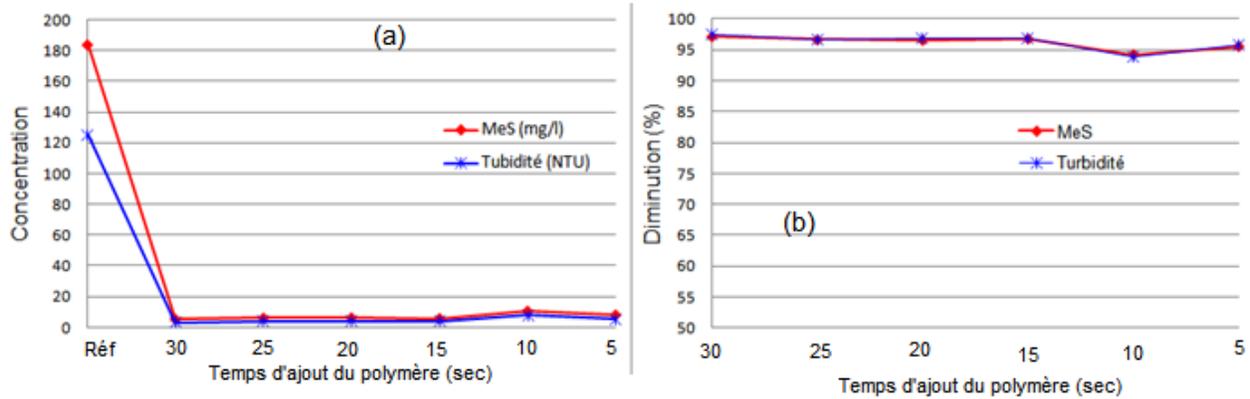


Figure 29 - Série 4 : Diminution des MeS et turbidité

Les six temps d'ajouts du polymère donnent une diminution de la turbidité supérieure à 93 % et une diminution de la concentration en MeS supérieure à 94 %.

La Figure 29 (a) montre la diminution des MeS en mg/l et la diminution de la turbidité en NTU. Le 1^{er} bécher (Jar Réf) est l'eau usée non traitée. On remarque que la diminution des MeS ainsi que celle de la turbidité suit la même tendance.

Les valeurs maximales de MeS et de turbidité sont celles du temps d'ajout de 10 secondes et s'élèvent à 10,5 mg/l et 7,67 NTU respectivement.

Le graphique (b) donne la diminution en pourcentage par rapport à l'eau usée non traitée. Tous temps d'ajout du polymère donnent une diminution, aussi bien pour les MeS que pour la turbidité supérieure à 94 %.

6.2.3 Conclusion

En ce qui concerne le temps d'ajout du polymère avant la phase de floculation, quel que soit le moment où l'on ajoute ce dernier (30, 25, ...5 secondes) avant la phase de floculation, la diminution en MeS et turbidité est supérieure à 90%. Il n'y a aucune différence significative.

Nous retiendrons que la seule observation, visuelle, est la formation de floes plus gros lorsque le polymère est ajouté 30 secondes avant la phase de floculation. Cela peut s'expliquer par le fait qu'il est en contact avec les particules en suspension pendant plus longtemps.

Le temps d'ajout du polymère peut donc être fixé à **30 secondes avant la phase de floculation**. C'est ce temps qui sera utilisé pour tous les essais qui vont suivre.

6.3 Carrés Latins

Le facteur « temps d'ajout du polymère » ayant été fixé, un plan d'expérience basé sur la méthode des carrés latins va nous permettre d'évaluer 3 facteurs sur 6 niveaux. Il s'agira de :

- La concentration en alun ;
- La vitesse de floculation ;
- La caractéristique de l'eau.

Le tableau récapitulatif est repris ci-dessous (Tableau 14) :

	Facteurs	Valeur
Phase rapide (Coagulation)	1) Vitesse de coagulation	
	2) Temps de coagulation	
	3) Concentration d'alun	
	4) Temps d'ajout du polymère	30 secondes
Phase lente (Floculation)	5) Vitesse de floculation	
	6) Temps de floculation	
	7) Concentration du polymère	
Autres	8) Caractéristique de l'eau	

Tableau 14 - Les 3 facteurs du carré latin

La caractéristique de l'eau est prise comme une boîte noire. Elle reprend le pH, la température, la concentration initiaux en MeS, la turbidité initiale et toutes les autres caractéristiques qui sont intrinsèques à l'échantillon d'eau usée.

Ce facteur est le plus problématique à traiter. En effet, en l'espace de quelques minutes, la charge, la turbidité ou encore le pH de l'eau à la station change.

Pour valider cette étude, il faut trouver un moyen de démontrer que les résultats des jar-tests restent valables, quelle que soit la caractéristique de l'eau usée utilisée.

La théorie des carrés latins est expliquée au point 5.4.

6.3.1 Conditions opératoires

- Facteur n°1 : Vitesse de floculation, domaine [20 – 70 rpm] ;
- Facteur n°2 : Caractéristique de l'eau ;
- Facteur n°3 : Concentration en alun, domaine [0 – 75 mg/l] ;
- Phase de coagulation : temps = 10 minutes, vitesse = 150 rpm ;
- Temps d'ajout du polymère = 30 secondes avant floculation ;
- Concentration du polymère = 0,15 mg/l.

6.3.2 Carré latin 1

Le Tableau 15 donne les valeurs des 6 niveaux par facteur pour le carré latin.

Les 6 béchers de la même ligne subissent respectivement une vitesse de floculation de 20, 30, 40, 50, 60 et 70 rpm.

Chaque échantillon a été prélevé à un moment différent de la journée, ce qui donne 6 échantillons différents.

Chaque bécher reçoit une concentration différente d'alun.

Chaque ligne du carré représente donc un banc d'essai de 6 béchers, qui reçoivent chacun 1 litre de l'eau usée d'un même échantillon de 6 litres. L'attribution du traitement reçu par chaque bécher est randomisée.

		Vitesse floculation (rpm)					
		20	30	40	50	60	70
Carac. eau	Eau #1	A	B	C	D	E	F
	Eau #2	B	F	D	C	A	E
	Eau #3	C	D	E	F	B	A
	Eau #4	D	A	F	E	C	B
	Eau #5	E	C	A	B	F	D
	Eau #6	F	E	B	A	D	C

[Alun] mg/l	
A	0
B	15
C	30
D	45
E	60
F	75

Vitesse de floculation = 50 rpm
Echantillon d'eau #3
Concentration d'alun = 75 mg/l

Tableau 15 - Carré latin 1

6.3.3 Résultats Carré latin 1

Les résultats en concentration en MeS et en turbidité de chaque banc se trouvent en Annexe A.1.1.

Le tableau en Annexe A.1.2 donne la diminution des MeS et de la turbidité ainsi que leurs valeurs initiales.

La taille des floes (allant de « +++ » pour beaucoup de gros floes à « - » pour peu ou pas de floes du tout) influence le rendement du traitement. En effet, plus il y a de gros floes, plus le rendement est élevé et inversement. Les valeurs de rendement inférieur aux exigences sont notées en rouge.

Les valeurs de la turbidité et de la concentration en MeS changent beaucoup d'un banc à l'autre, les prélèvements des 6 échantillons ayant eu lieu à différents moments sur deux journées.

Le Tableau 16 donne les résultats de l'analyse dans le logiciel R de la table ANOVA. La théorie de l'analyse de variance est expliquée au point 0. Il existe deux seuils à considérer pour la p-value, qui peut se trouver au-dessus, entre ou en dessous de 0,05 et 0,01.

Selon la notation avec des astérisques expliquée au point 5.6.6 :

- le facteur « caractéristique de l'eau » a une p-value inférieur à 0,05. Cela signifie que la probabilité d'avoir le même résultat en appliquant les mêmes conditions est très faible. Il faut donc rejeter l'hypothèse nulle qui dit que le facteur explicatif considéré n'a pas d'effet sur la réponse. C'est l'hypothèse non nulle qui est vraie, c'est-à-dire que le facteur a un effet sur la réponse. Il s'agit donc d'un facteur significatif.
- le facteur « vitesse de floculation » a une p-value égale à 0,05. Il ne peut donc pas être considéré comme non significatif.

- Le facteur « concentration en alun » a une p-value très inférieure à 0,01, et est donc le facteur le plus significatif pour cet essai.

Analyse dans R	DDL	SCE	S ²	F	p-value	
Carac.Eau (lignes)	5	6488,1	1297,6	5,9719	0,0016	**
Vit.Floc (colonnes)	5	2830,3	566,1	2,6051	0,0570	.
Conc.Alun (traitement)	5	29423,4	5884,7	27,0822	2,9330E-08	***
Erreur	20	4345,8	217,3	—	—	
Total	35	43087,6	—	—	—	

Tableau 16 - Carré latin 1 : Table ANOVA

6.3.4 Box-plots Carré latin 1

Les box-plots (expliqués au point 5.6.6) permettent de visualiser la variation des résultats (en concentration en MeS) en fonction des différentes valeurs attribuées à chaque facteur. Les box-plots du carré latin 1 sont repris à la Figure 30.

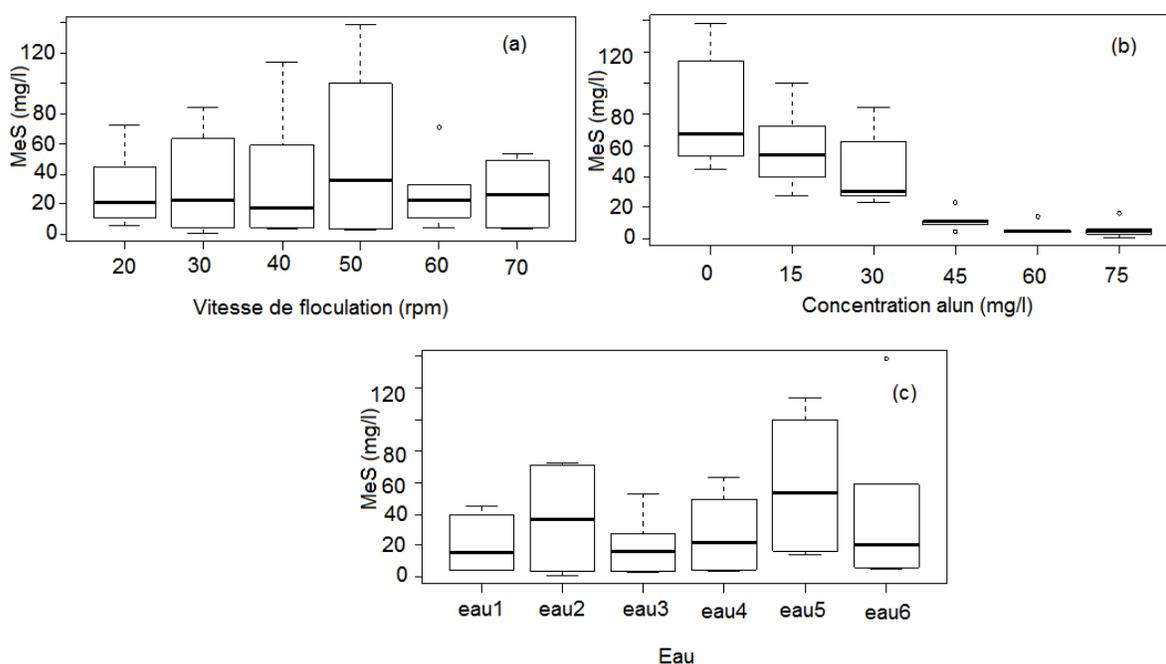


Figure 30 - Carré latin 1 : Box-plots

- La figure (a) montre la variation des MeS en fonction de la vitesse de floculation. Cette variation est faible. Graphiquement, ce facteur semble non significatif, contrairement à la p-value donnée par la table ANOVA. Il faudrait donc d'autres analyses pour pouvoir conclure sur ce facteur.
- La figure (b) montre la variation des résultats en fonction de la concentration en alun ; la variation des MeS est importante. Cela concorde avec la p-value très faible, qui indique que la concentration en alun influence beaucoup la coagulation/floculation. Nous pouvons remarquer qu'une concentration inférieure à 45 mg/l entraîne une forte variation des concentrations en MeS.
- La figure (c) montre la variation des résultats en fonction de la caractéristique de l'eau. Il y a une disparité des résultats, selon l'échantillon d'eau considéré. La variation est surtout due aux 2nd et 5^{ème} échantillon. Il s'agit d'échantillons exceptionnels, car les valeurs initiales de la concentration en MeS et de turbidité sont supérieures à la moyenne. Ces valeurs sont de 204 et 687 mg/l respectivement. Dans ces conditions, le facteur est significatif. La caractéristique de l'eau influence donc la coagulation/floculation dans les jar-tests et ne peut donc pas être négligée.

6.3.5 Conclusion Carré latin 1

Aucun des facteurs ne semble être négligeable, car les trois facteurs étudiés ont une p-value inférieure ou égale à 0,05.

Le facteur « concentration en alun » est le facteur le plus influent sur la coagulation/floculation, et le fait de descendre en dessous de la concentration de 45 mg/l affecte la concentration en MeS d'une manière notable.

Le facteur « caractéristique de l'eau » démontre bien que les résultats sont variables selon la qualité de l'eau de l'échantillon. Néanmoins, même si l'on voit une variation des résultats, les box-plot montrent que la variation n'est pas trop importante. Compte tenu du fait que deux échantillons ont des valeurs initiales de concentration en MeS et de turbidité hors normes, nous pouvons supposer que si tous les échantillons ont la même valeur de concentration en MeS et turbidité, la variabilité des résultats serait amoindrie.

6.3.6 Carré latin 2

Les conditions opératoires sont celles décrites au point 6.3.1.

La grande différence avec le Carré latin 1 est que cette fois-ci, un seul échantillon d'au moins 36 litres a été prélevé en une fois. Cet échantillon a été stocké dans deux seaux séparés et mis dans une chambre froide à 4°C. En effet, à cette température, l'activité microbienne est presque inexistante, ce qui permet de maintenir les propriétés de l'eau presque inchangées pendant un certain temps. Les essais ont été faits après avoir remis l'échantillon à température ambiante (± 15 °C). La Figure 31 illustre le mode opératoire amélioré du carré latin 2.

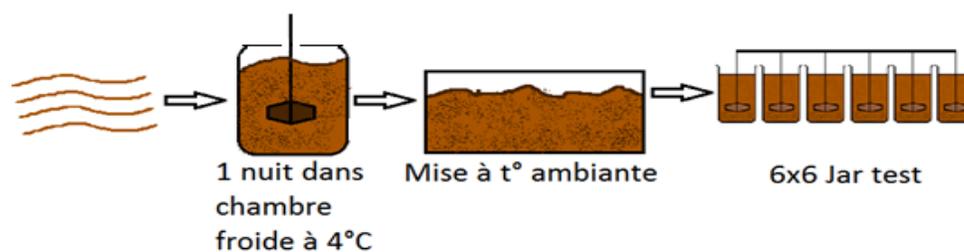


Figure 31 - Mode opératoire

6.3.7 Étude de l'évolution de la caractéristique de l'eau

Une étude de la caractéristique de l'eau a été faite avant et après les 6 essais.

Les conditions opératoires sont résumées dans le tableau en Annexe A.2.1.

La Figure 32 donne l'évolution des MeS et de la turbidité avant et après les 6 essais du carré latin, c'est-à-dire le 17 avril et le 19 avril. La seule variable considérée est la vitesse de floculation, qui varie de 2 à 70 rpm. Tous les autres facteurs sont constants.

Le graphique (a) montre la concentration en MeS de chaque béccher après traitement, pour ces deux jours. On remarque que la diminution de la concentration en MeS évolue de manière similaire. La concentration en MeS du 17 avril est légèrement supérieure à celle du 19 avril, mais pas significativement. Il en est de même pour l'évolution de la turbidité dans le graphique (b).

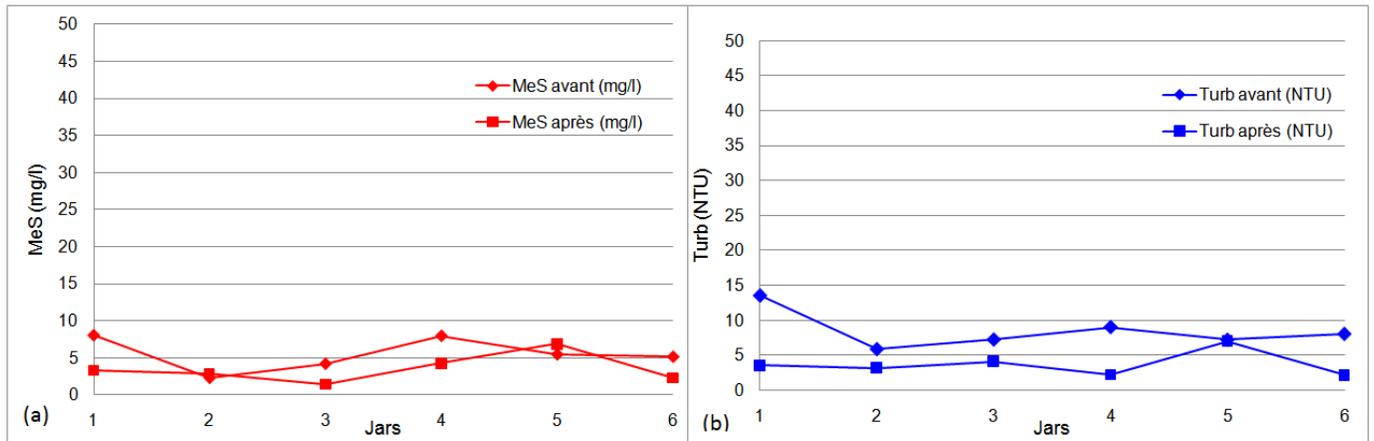


Figure 32 - Évolution des MeS (a) et de la turbidité (b) au cours du temps

L'évolution du pH, de la turbidité et de la concentration en MeS au cours du temps a également été étudiée. Pour ce faire, une mesure de chacun de ces 3 paramètres a été faite sur l'eau non traitée, avant chaque banc du carré latin. On obtient 6 points, espacés dans le temps, qui sont représentés sur la Figure 33.

Les trois graphiques (a) (b) et (c) montrent une légère variation de ces paramètres au cours du temps, mais elle reste insignifiante.

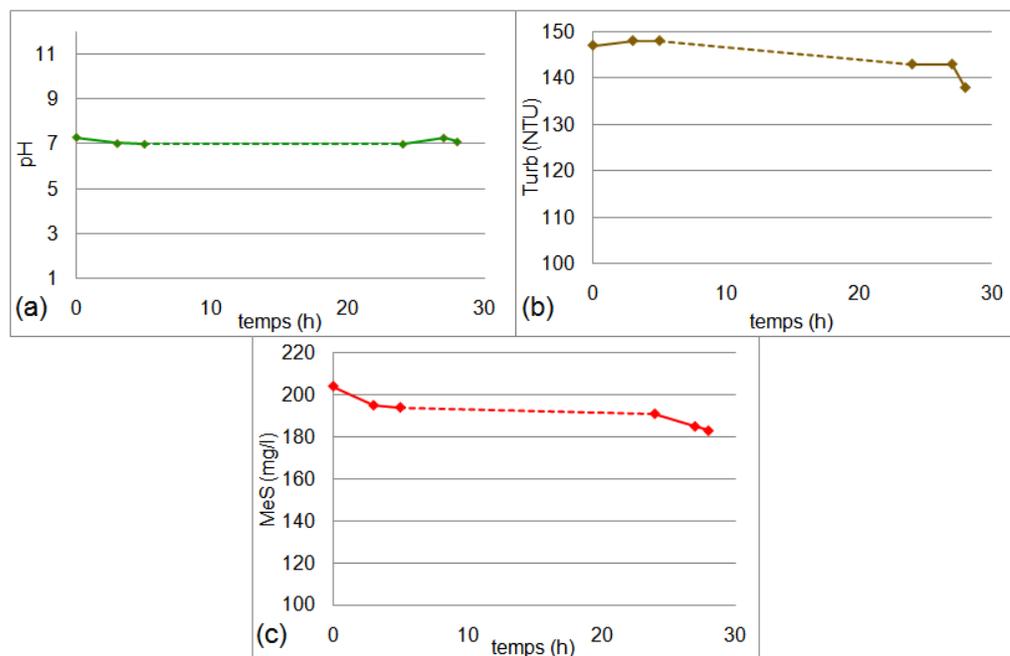


Figure 33 - Évolution du pH (a), de la turbidité (b) et des MeS (c) pour les 6 essais du Carré latin 2

Nous pouvons en conclure que, suivant ce mode opératoire, c'est-à-dire en prélevant la quantité d'eau utilisée nécessaire à tous les essais, en la stockant une nuit dans une chambre froide à 4°C, et en faisant les essais une fois l'eau à température ambiante, la caractéristique de l'eau n'évolue pas de manière significative dans le temps.

6.3.8 Résultats Carré latin 2

Le carré latin randomisé se trouve en Annexe A.2.2.

Les valeurs des concentrations en MeS et turbidité de chaque banc se trouvent en Annexe A.2.3.

Le tableau de la diminution en MeS et turbidité ainsi que leurs valeurs initiales se trouvent en Annexe A.2.4.

Avec ces résultats, une nouvelle table ANOVA a été effectuée (Tableau 17).

Analyse dans R	DDL	SCE	S ²	F	p-value
Carac.Eau (lignes)	5	47,5	9,5	0,9788	0,4547
Vit.Floc (colonnes)	5	69,6	13,9	1,4334	0,2554
Conc.Alun (traitement)	5	4354,4	870,9	89,6541	5,4000E-13 ***
Erreur	20	194,3	9,7		
Total		4665,8			

Tableau 17 - Carré latin 2 : Table ANOVA

- Les facteurs « caractéristique de l'eau » et « vitesse de floculation » ont tous deux des p-values très supérieures au seuil de 0,05. Ils peuvent donc être considérés comme non significatifs pour la coagulation/floculation. L'hypothèse nulle est vérifiée, c'est-à-dire que ces facteurs n'ont pas d'effet sur les résultats.
- Le facteur « concentration en alun » a une p-value inférieure au seuil bas de 0,01. Ce paramètre est le seul significatif dans ces conditions.

6.3.9 Box-plots carré latin 2

Les box-plots (expliqués au point 5.6.6) permettent de visualiser la variation des résultats (en concentration en MeS) de chaque facteur. Les box-plots du carré latin 2 sont repris à la Figure 34.

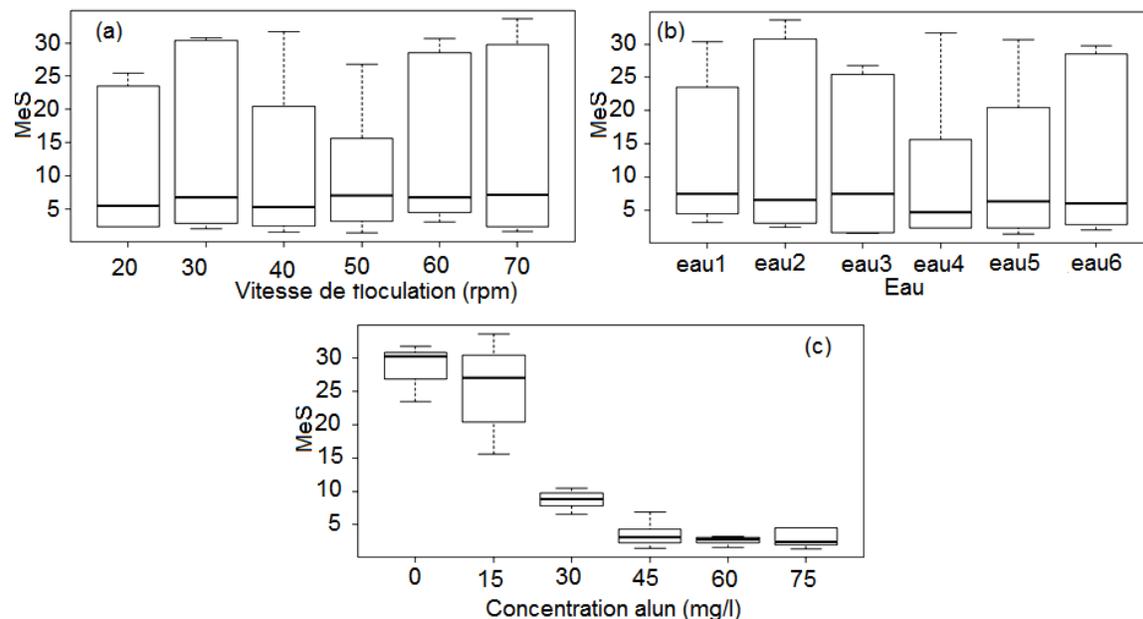


Figure 34 - Carré Latin 2 : Box-plots

- Comme le montrait déjà l'analyse de variance, la vitesse de floculation (a) ainsi que la caractéristique de l'eau (b) ont tous deux une variation des résultats non significative. Cela se traduit par le fait que la valeur médiane des résultats représentée dans les box-plots par le trait horizontal épais ne varie pas d'un essai à l'autre.
- La concentration en alun (c) fait beaucoup varier la concentration en MeS de l'eau traitée. Une concentration inférieure à 30 mg/l affecte beaucoup les résultats. La coagulation/floculation est moins efficace aux basses concentrations en alun.

6.3.10 Conclusion Carré latin 2

Le fait de changer de méthodologie en prélevant un même échantillon de taille suffisante pour les essais permet de stabiliser la caractéristique de l'eau. Dans ces conditions, le pH, la turbidité et la concentration en MeS ne changent pas sensiblement dans le temps. Il en ressort que ce facteur peut être éliminé de la liste pour les essais suivants, si et seulement si les essais sont faits avec le même échantillon, préalablement stocké à 4°C et remis à température ambiante avant les essais. Cela donne une p-value supérieure au seuil supérieur de 0,05, donc une variation non significative des résultats en MeS.

Ce deuxième carré latin permet également de confirmer les résultats précédents, la vitesse de floculation est un facteur non significatif, et qui peut donc être fixé à une valeur quelconque dans le domaine considéré. Il a été choisi de travailler à 40 rpm, qui est la valeur qui décrit les vitesses de floculation à la station. De la même manière, la concentration en alun est le facteur le plus significatif. La concentration en alun est effective au-delà de 30 mg/l.

6.4 Plans composites centrés

Les essais précédents ont permis de réduire la liste de facteurs à 5. Ceux-ci sont repris dans le Tableau 18 - Les 5 facteurs du plan composite centré

	Facteurs	Valeur
Phase rapide (Coagulation)	1) Vitesse de coagulation	
	2) Temps de coagulation	
	3) Concentration d'alun	Significatif
	4) Temps d'ajout du polymère	30 secondes
Phase lente (Floculation)	5) Vitesse de floculation	Non significatif
	6) Temps de floculation	
	7) Concentration du polymère	
Autres	8) Caractéristique de l'eau	Non significatif

Tableau 18 - Les 5 facteurs du plan composite centré

Un plan composite centré permettra d'évaluer l'influence de ces 5 facteurs sur 5 niveaux, comme expliqué au point 5.5. Il s'agira des deux niveaux d'un plan factoriel complet, d'un point central, répété 6 fois, et de 2 points en étoile par facteur.

6.4.1 Construction du plan

Un certain nombre de paramètres doivent être calculés pour le plan composite centré. Ces paramètres permettent de calculer la valeur de α , qui servira pour déterminer les coordonnées des points en étoiles.

Ces valeurs sont reprises dans le Tableau 19.

Paramètres	Notation	Formule	Valeur
Nombre de facteurs	k	—	5
Points du plan factoriel	N_F	2^k	32
Points en étoile	N_E	$2k$	10
Nombre de réplicats du point central	N_0	—	3(*)
Coût	N	$N_F + 2k + N_0$	45
Alpha	$\pm \alpha$	$\sqrt{\frac{N_F \times N - N_F}{2}}$	1,72

Tableau 19 - Paramètres du plan composite centré

(*) Chaque banc étant composé de 6 béchers, le point central sera répété en réalité 6 fois.

Tout d'abord, les deux niveaux du plan factoriel sont choisis. Ils représentent les extrêmes du domaine d'étude du facteur considéré. Il est alors facile de déterminer le point central, qui est leur valeur médiane. Le rayon est la moyenne des deux points du plan factoriel.

Les deux points en étoile se calculent comme illustré sur la Figure 35.

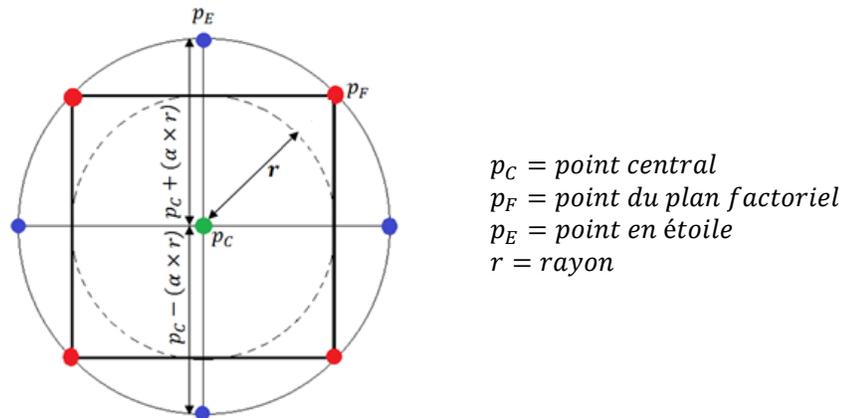


Figure 35 - Construction des points de plan composite centré

Le Tableau 20 reprend les valeurs des points expérimentaux de chaque facteur. Il s'agit des points qui seront testés par le plan composite centré.

	Vcoag (rpm)	Tcoag (min)	Tfloc (min)	Ccoag (mg/l)	Cfloc (mg/l)	Ordre
p_E min	21	2	2	23	0,07	$-\alpha$
p_F min	50	4	5	30	0,09	-1
p_C	90	7	8,5	40	0,12	0
p_F max	130	10	12	50	0,15	+1
p_E max	159	12	15	57	0,17	$+\alpha$

Tableau 20 - Valeurs de points expérimentaux du plan composite centré

6.5 Plan composite 1

6.5.1 Conditions opératoires

Le plan composite permet donc d'évaluer les 5 facteurs restant sur 5 niveaux chacun. Chaque facteur possède deux niveaux du plan factoriel complet, 2 points « en étoile », et un point central, répété 6 fois. Cela fait un total de 48 essais, c'est-à-dire 8 bancs de 6 béchers chacun.

Pour ne pas devoir tenir compte du facteur « caractéristique de l'eau », au moins 48 litres d'eau usée sont prélevés, stockés à 4°C pendant une nuit, et remis à température ambiante pour les essais.

L'Annexe A.3.1 donne les valeurs expérimentales de chaque banc. Il s'agit d'un tableau randomisé.

L'Annexe A.3.2 donne les résultats des concentrations en MeS et turbidité pour chaque essai.

L'Annexe A.3.3 donne la diminution des MeS et de la turbidité de chaque essai ainsi que les valeurs initiales des MeS et de la turbidité.

6.5.2 Étude de la caractéristique de l'eau

L'Annexe A.3.4 donne les concentrations en MeS et la turbidité initiale de chaque banc pour l'étude de l'évolution de l'eau. Les essais ont été faits sur une durée de 60 h. La Figure 36 illustre cette évolution.

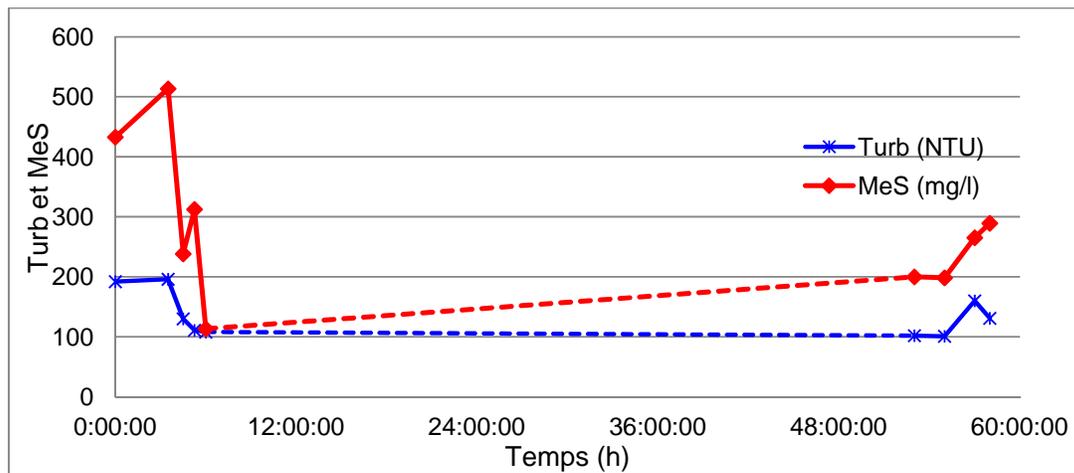


Figure 36 - Évolution des MeS et de la turbidité au cours du temps

Il apparaît que les valeurs des MeS et de la turbidité changent beaucoup sur un temps de 60 heures. En effet, la turbidité chute de 196 à 101 NTU, tandis que la concentration initiale en MeS varie entre 513 et 113 mg/l. Cela traduit le fait que l'eau usée, qui a été stockée dans des contenants différents, n'est pas stable.

Cela peut s'expliquer par le fait que :

- Le temps de prélèvement des 48 litres de cet échantillon (~15 minutes) étant assez long, la qualité de l'eau de la station à changer dans cet intervalle de temps.
- Les 48 litres ont été stockés dans la chambre froide dans 4 contenants séparés. Les différents phénomènes qui ont pu avoir lieu dans ces contenants ont pu faire évoluer chaque volume d'eau de manière distincte.

Dans ces conditions, les résultats de l'analyse de variance pourraient ne pas être concluants.

6.5.3 Résultats Plan composite 1

Le modèle mathématique testé avec la première analyse de variance ne prend pas en compte les interactions. Il répond au modèle de l'Equation 5, et prend la forme ci-dessous (l'Equation 18), en considérant les 5 facteurs.

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_4x_4 + \beta_5x_5 + \varepsilon \quad (18)$$

Où :

x_i = Facteurs

y = Grandeur d'intérêt, aussi appelé réponse

β_0 = Constante du modèle

$\beta_{1,2,\dots,5}$ = Coefficient du facteur i

ε = Résidus

Le Tableau 21 donne la p-value de chacun des 5 facteurs. La phase de coagulation semble être la plus significative, avec la vitesse de coagulation, le temps de coagulation ainsi que la concentration de l'alun. Une fois de plus, la concentration d'alun a la p-value la plus faible, donc la plus significative.

	Facteur	DDL	SCE	S ²	F	p-value	
x_1	Vit.Coag	1	119,2	119,2	14,3	0,00048	***
x_2	Tps.Coag	1	61,9	61,9	7,4	0,00926	**
x_3	Tps.Floc	1	10,9	10,9	1,3	0,25745	
x_4	Conc.Alun	1	181,8	181,8	21,9	0,00003	***
x_5	Conc.Poly	1	2,6	2,6	0,3	0,57950	
	Modèle	5	376,3	75,3			
	Résidus	42	349,1	8,3			
	Total	47	725,4	15,4	R²	0,5188	

Tableau 21 - Plan composite 1 : Table ANOVA

Les autres facteurs, c'est-à-dire le temps de floculation et la concentration du polymère semblent être négligeables, car leur p-value est supérieure au seuil supérieur de 0,05.

L'analyse dans R permet également de calculer les coefficients du modèle, leurs intervalles de confiance ainsi que l'erreur qui les affecte. Ces valeurs sont reprises dans le Tableau 22.

Coefficients	Valeur	Erreur	Intervalle de Confiance (95 %)	
			2,50 %	97,50 %
β_0	21,514	3,2876	14,9	28,1
β_1	-0,0443	0,0117	-0,07	-0,02
β_2	-0,4278	0,1568	-0,74	-0,11
β_3	-0,1516	0,1321	-0,42	0,11
β_4	-0,2193	0,0469	-0,31	-0,12
β_5	8,7574	15,6816	-22,89	40,40

Tableau 22 - Plan composite centré : Coefficients du modèle

La valeur du coefficient de corrélation R^2 est assez mauvaise, ce qui veut dire que ce modèle choisi n'explique pas la relation entre les facteurs explicatifs et la réponse. Cela peut être dû à la qualité de l'eau, qui a changé sur les 60 heures qu'il a fallu pour faire les 8 bancs d'essai. Les résultats peuvent être faussés. Cela peut aussi s'expliquer par le fait que les interactions n'ont pas été prises en compte.

Un deuxième modèle mathématique a été testé avec la première analyse de variance, prenant en compte les interactions. Il répond également au modèle de l'Equation 5, et prend la forme ci-dessous (Equation 19), en considérant les 5 facteurs et leurs interactions.

$$\begin{aligned}
 y = & \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_4x_4 + \beta_5x_5 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{13}x_1x_3 + \beta_{14}x_1x_4 \\
 & + \beta_{15}x_1x_5 + \beta_{23}x_2x_3 + \beta_{24}x_2x_4 + \beta_{25}x_2x_5 + \beta_{34}x_3x_4 + \beta_{35}x_3x_5 \\
 & + \beta_{45}x_4x_5 + \beta_{124}x_1x_2x_4 + \varepsilon
 \end{aligned} \tag{19}$$

Où :

x_i = Facteurs

y = Grandeur d'intérêt, aussi appelé réponse

x_{ij} = Interaction entre le facteur i et j

β_0 = Constante du modèle

$\beta_{1,2,\dots,5}$ = Coefficient du facteur i

ε = Résidus

La même étude de variance est alors effectuée, pour voir si le modèle correspond mieux à l'expérience. Cette information est fournie par le coefficient de corrélation.

Une étude des résidus est aussi effectuée pour valider les hypothèses fondamentales de l'analyse de variance. Les paramètres de cette étude sont expliqués au point 5.6.5.

6.5.4 Analyse des résidus : graphiques de diagnostics

Deux mesures distinctes ont été faites, il s'agit de la mesure des MeS et de la turbidité après traitement.

L'analyse des résidus permet de confirmer les hypothèses de départ de l'analyse de variance, c'est-à-dire la répartition homogène des erreurs et le fait qu'elles répondent à une loi normale. En comparant l'allure des graphiques de diagnostic des résidus des MeS et ceux de la turbidité, il sera également possible de voir si l'une des mesures est plus sensible que l'autre ou si elles expriment la même chose pour l'analyse de la variance.

Le point 5.6.5 explique les différents graphiques de diagnostic.

a) *Résidus vs. Réponse*

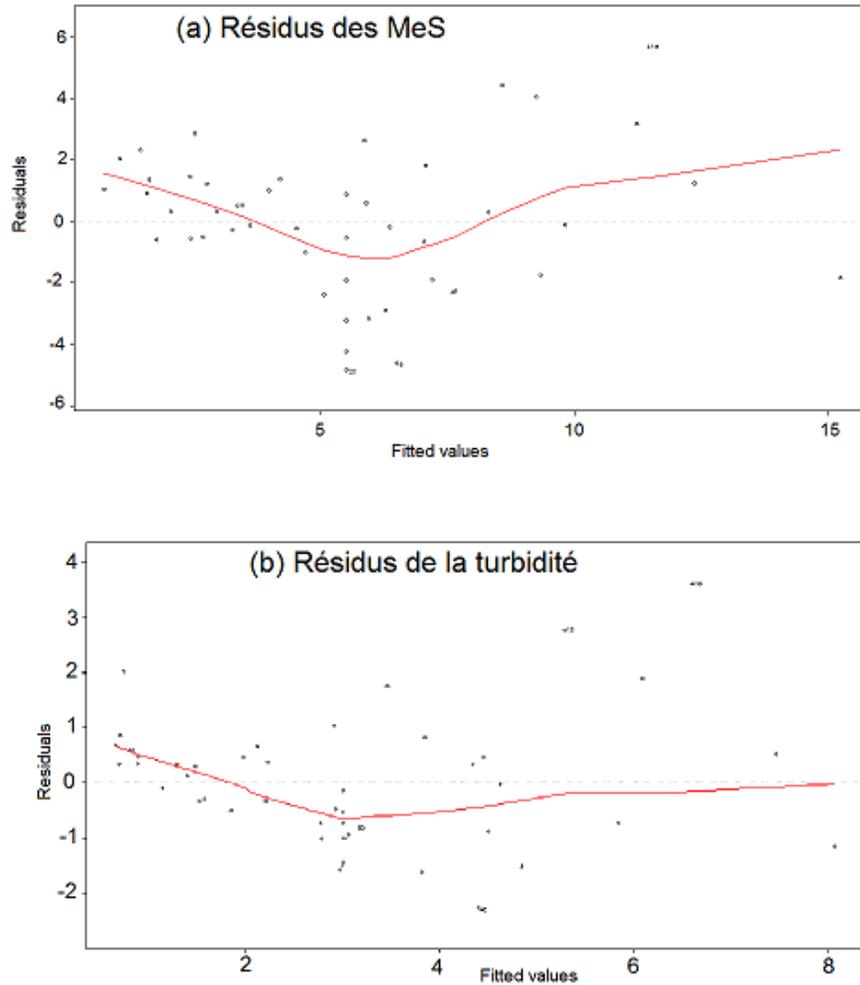


Figure 37 - Plan composite 1 : Résidus en fonction de la réponse pour les MeS et la turbidité

La Figure 37 compare les résidus des MeS et de la turbidité en fonction de la réponse. Ces graphiques expriment la distribution normale ou non de ces résidus autour de zéro.

L'on remarque que les deux graphiques sont semblables. Ils présentent tous deux une déviation négative. Les résidus ne sont donc pas distribués aléatoirement. Cela indique que la relation entre les variables explicatives n'est pas la même sur tout le domaine de définition. On appelle ça une rupture de structure.

Cette comparaison montre également que la turbidité est les MeS sont directement liés, et que quelque soit l'expression des résultats, ils exprimeront la même chose. La mesure des MeS et celle de la turbidité sont également sensibles.

b) Q-Q plots

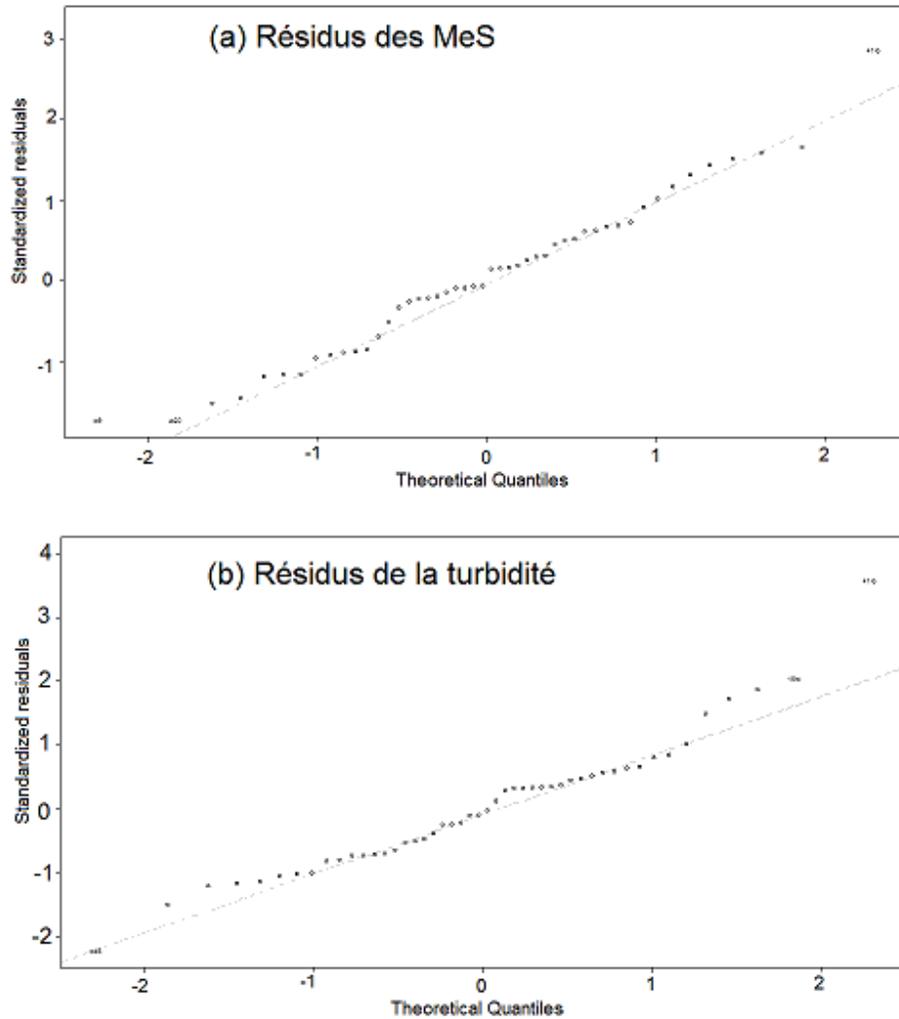


Figure 38 - Plan composite 1 : Comparaison Q-Q plot MeS et turbidité

La Figure 38 présente les graphiques quantile-quantile des MeS et de la turbidité. Leur construction est expliquée au point 5.6.5.

Les deux graphiques sont fort semblables, comme pour les graphiques des résidus en fonction de la réponse.

Le fait d'obtenir une droite oblique témoigne du fait que la distribution des erreurs suit une loi normale, qui est une hypothèse fondamentale de l'analyse de variance.

Les deux types de graphiques d'analyse des résidus étant semblables pour les MeS et pour la turbidité, quelle que soit le choix de l'expression des résultats, ils témoigneront de la même chose, en terme d'analyse de variance.

Les résultats seront donc exprimés en concentration en MeS en fonction des variables explicatives, qui est un choix arbitraire.

6.5.5 Table ANOVA

Une fois l'analyse des résidus faite, une analyse de variance permet d'évaluer l'influence de chaque variable explicative. Elle est présentée dans le Tableau 23, qui contrairement à la première analyse de variance, prend en compte les interactions entre les 5 facteurs.

	Facteurs	DDL	SCE	S ²	F	p-value
x_1	Vit.Coag	1	119,1	119,1	15,1	0,0005 ***
x_2	Tps.Coag	1	61,8	61,8	7,8	0,0086 *
x_3	Tps.Floc	1	10,9	10,9	1,3	0,2467
x_4	Conc.Alun	1	181,7	181,7	23,1	$3,71 \cdot 10^{-5}$ ***
x_5	Conc.Poly	1	2,5	2,5	0,3	0,5690
x_1x_2	Inter Vit.Coag et Tps.Coag	1	0,2	0,2	$0,3 \cdot 10^{-1}$	0,8560
x_1x_3	Inter Vit.Coag et Tps.Floc	1	0,3	0,3	$0,4 \cdot 10^{-1}$	0,8365
x_1x_4	Inter Vit.Coag et Conc.Alun	1	12,8	12,8	1,6	0,2099
x_1x_5	Inter Vit.Coag et Conc.Poly	1	5,6	5,6	0,7	0,4011
x_2x_3	Inter Tps.Coag et Tps.Floc	1	6,3	6,3	0,8	0,3740
x_2x_4	Inter Tps.Coag et Conc.Alun	1	16,1	16,1	2,0	0,1622
x_2x_5	Inter Tps.Coag et Conc.Poly	1	3,7	3,7	0,4	0,4960
x_3x_4	Inter Tps.Floc et Conc.Alun	1	24,6	24,6	3,1	0,0860 .
x_3x_5	Inter Tps.Floc et Conc.Poly	1	1,9	1,9	0,2	0,6219
x_4x_5	Inter Conc.Alun et Conc.Poly	1	32,6	32,6	4,1	0,0503 .
$x_1x_2x_4$	Inter Vit.Coag,Tps.Coag et Conc.Alun	1	0,8	0,8	0,1	0,7404
	Modèle	16	481,8	30,1		
	Résidus	31	243,6	7,8		
	Total	47	725,4	15,4	R ²	0,6642

Tableau 23 - Plan composite centré 1 : Table ANOVA avec interactions

Le calcul des coefficients du modèle, leurs intervalles de confiance ainsi que l'erreur qui les affecte sont repris dans le Tableau 24.

Coefficients	Valeur	Erreur	Intervalle de Confiance (95 %)	
			2,50 %	97,50 %
β_0	23,41	18,48	-13,76	60,59
β_1	-0,11	0,14	-0,40	0,18
β_2	-0,85	1,85	-4,61	2,91
β_3	-1,11	0,93	-3,01	0,80
β_4	-0,25	0,39	-1,04	0,54
β_5	158,20	95,26	-36,11	352,40
β_{12}	0,00	0,02	-0,04	0,03
β_{13}	0,00	0,00	-0,01	0,01
β_{14}	0,00	0,00	-0,01	0,01
β_{15}	0,35	0,41	-0,49	1,19
β_{23}	0,04	0,05	-0,05	0,14
β_{24}	0,01	0,04	-0,07	0,09
β_{25}	-3,79	5,51	-15,01	7,45
β_{34}	0,03	0,01	0,00	0,05
β_{35}	-2,35	4,72	-11,98	7,27
β_{45}	-3,37	1,65	-6,73	$4,4 \cdot 10^{-3}$
β_{124}	$0,1 \cdot 10^{-3}$	$0,4 \cdot 10^{-3}$	$0,7 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$

Tableau 24 - Plan composite 1 : Coefficients du modèle avec interactions

Comme pour l'analyse de variance sans interactions, la vitesse de coagulation, le temps de coagulation ainsi que la concentration d'alun sont les facteurs les plus significatifs.

Il existe des interactions notables entre le temps de floculation et la concentration d'alun, qui ont une p-value légèrement supérieure au seuil supérieur de 0,05. Il en est de même pour les interactions entre la concentration d'alun et la concentration de polymère dont la p-value est égale au seuil de 0,05. Ces p-values ne nous permettent pas d'affirmer que les interactions sont significatives ou non. Il faudrait donc d'autres résultats pour le confirmer ou l'infirmier

La valeur du coefficient de corrélation est améliorée, mais reste encore fort basse.

Tous les facteurs ont les coefficients négatifs, ce qui signifie que si l'on augmente la valeur d'un facteur, il faudrait diminuer celle des autres facteurs, pour garder l'égalité de l'équation du modèle.

6.5.6 Box-plots

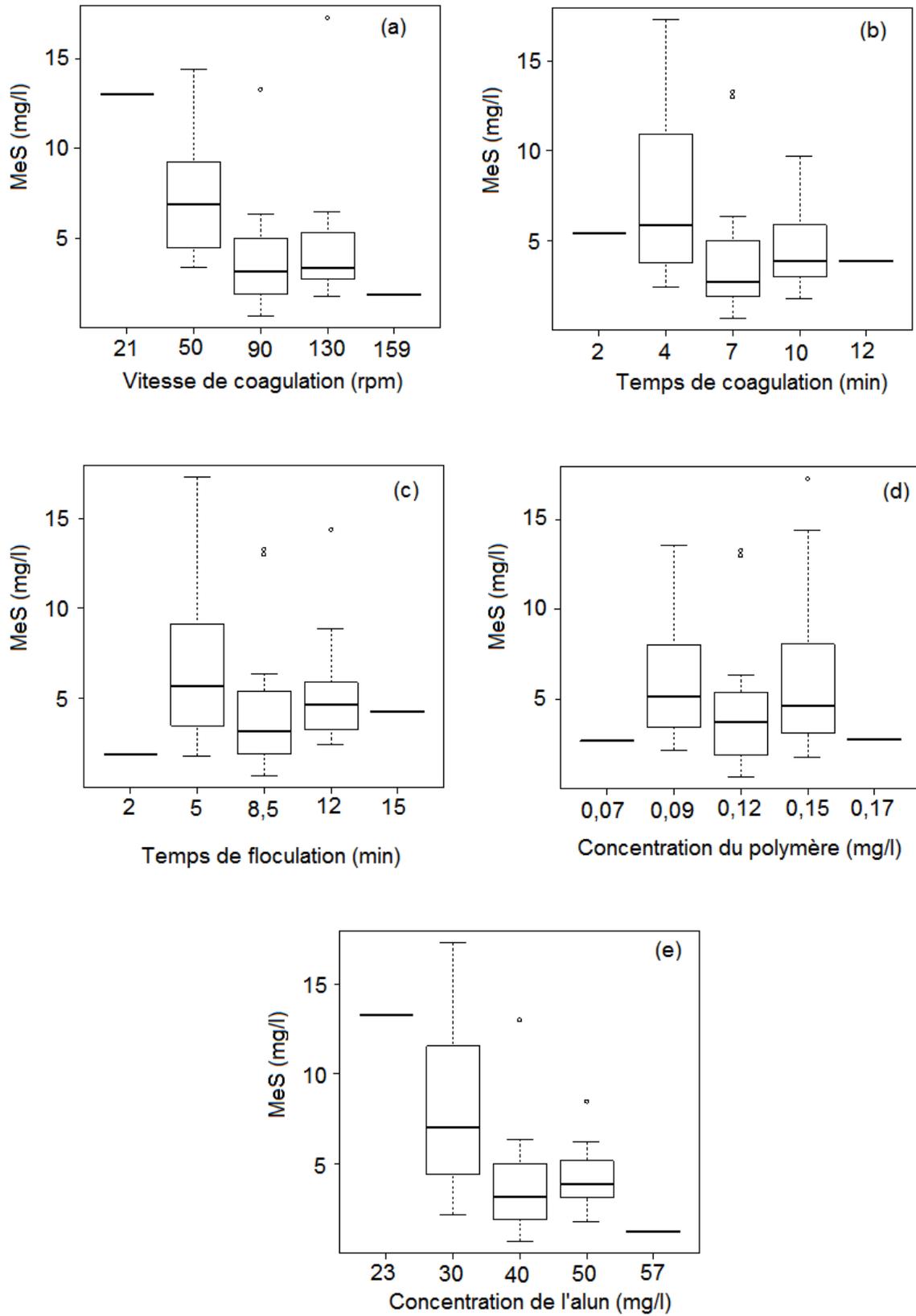


Figure 39 - Plan composite 1 : Box-plots

La Figure 39 montre graphiquement la concentration en MeS de l'eau après traitement en fonction de la vitesse de coagulation (a), du temps de coagulation (b), du temps de floculation (c), de la concentration du polymère (d) et finalement de la concentration de l'alun (e).

(a) MeS = fct (vitesse de coagulation) :

Il y a une variation importante de la valeur médiane des résultats entre 13 mg/l et 2 mh/l. Changer la vitesse de floculation entraîne donc un effet sur la coagulation/floculation. On peut noter un plateau à partir de 90 rpm ; le fait d'augmenter la vitesse au-delà de cette valeur n'améliore pas la coagulation/floculation. Cela confirme la p-value donnée par l'analyse de variance, qui indique ce facteur comme significatif.

(b) MeS = fct (temps de coagulation) :

Contrairement aux résultats obtenus par l'analyse de variance, qui indiquent le temps de coagulation comme un facteur influent ($p\text{-value} < 0,01$), la moyenne des mesures pour chaque temps de coagulation n'entraîne pas une forte variation de la réponse, selon le graphique. Déjà à quatre minutes, la concentration en MeS de l'eau traitée est majoritairement inférieure à 10 mg/l (il n'existe qu'une seule mesure pour le temps égal à deux minutes, il s'agit du point en étoile minimum, on ne peut donc pas conclure sur une mesure unique). Plus de résultats seraient nécessaires pour confirmer l'influence ou non de ce facteur.

(c) MeS = fct (temps de floculation) :

La variation du temps de floculation n'entraîne pas de grande variation de la réponse. Seule la mesure à 2 minutes est significativement différente des autres valeurs médianes. Elle entraîne une concentration en MeS inférieure à toutes les autres valeurs. Vu qu'il s'agit du point en étoile et impliquant une mesure unique, cette différence peut être due à une erreur de mesure. Toutes les autres mesures entraînent une concentration en MeS de l'eau traitée inférieure de 10 mg/l. Le facteur « temps de floculation » semble être un facteur non significatif.

(d) MeS = fct (concentration polymère) :

La concentration du polymère semble ne pas avoir un grand effet sur la réponse. De même, la mesure à 0,07 mg/l paraît invraisemblable, et peut être due à une erreur de mesure sur ce point en étoile. Toutes les autres concentrations du polymère entraînent une concentration en MeS après traitement inférieure à 10 mg/l. Ce facteur s'avère non révélateur pour la coagulation/floculation, comme déjà indiqué par sa p-value de l'analyse de variance.

(e) MeS = fct (concentration alun) :

Il existe une forte différence entre les valeurs médianes des mesures à chaque concentration. Comme il a déjà été noté lors des carrés latins au point - 24 -5.4, il s'agit d'un facteur très significatif. En effet, une forte variation des résultats aux alentours de 40 mg/l avait été identifiée lors des essais précédents. Cette zone est bien comprise dans le domaine d'étude du facteur, allant de 23 mg/l à 57 mg/l. On peut remarquer, une fois de plus un plateau pour les concentrations au-delà de 40 mg/l. En outre, augmenter la concentration n'entraîne pas une amélioration de la coagulation/floculation.

Il est tout de même à remarquer que toutes les valeurs testées entraînent une concentration en MeS après traitement inférieure à 15mg/l.

6.5.7 Conclusion Plan composite 1

Les deux études de variances effectuées sur ce premier plan composite nous permettent de mettre en évidence l'influence de la phase de coagulation. La vitesse de coagulation, le temps de coagulation ainsi que la concentration de coagulation sont des facteurs qui possèdent une p-value égale ou inférieure au seuil inférieur de 0,01. Ceci confirme ce que l'on savait pour la concentration en alun et nous en dit plus sur les autres facteurs de la coagulation, qui n'avaient pas encore été évalués.

Néanmoins, il existe une différence entre l'analyse de variance et les box-plots pour le temps de coagulation. Ce facteur a une p-value inférieure à 0,01, pourtant, cela n'apparaît pas graphiquement. Un nouveau plan factoriel devrait confirmer l'un des deux résultats.

Les autres facteurs, c'est-à-dire le temps de floculation et la concentration du polymère ne sont pas révélateurs, que ce soit pour le modèle sans et avec interactions, ou pour les box-plots.

L'analyse des résidus montre que la distribution des erreurs suit une loi normale. Elle témoigne aussi du fait que la régression n'est pas parfaite, et que le modèle n'explique pas totalement la réponse. Il existe une déviation négative des erreurs, appelée rupture de structure. Les graphiques de diagnostic des résidus des MeS et de la turbidité sont semblables, ce qui montre que quelle que soit l'expression des résultats, ils sont les mêmes, qu'ils soient exprimés en concentration en MeS ou en turbidité.

En ce qui concerne les interactions, elles ne semblent pas manifestes. Les p-values des interactions « temps de floculation – concentration du coagulant » et « concentration du coagulant – concentration du floculant », sont toutes deux supérieures ou égales au seuil supérieur de 0,05. Un deuxième plan composite permettra également de confirmer ou d'infirmer l'influence de ces interactions.

Il est à noter que la caractéristique de l'eau n'a pas été constante lors des 8 essais. La concentration en MeS et la turbidité ont beaucoup fluctué sur les 3 jours qu'ils ont pris. Les résultats ci-dessus devraient donc être pris avec quelques réserves.

Le second plan composite centré sera effectué en prélevant un même échantillon d'une taille suffisante pour les 8 essais (au moins 48 litres), qui seront stockés dans la chambre froide, la différence majeure avec le premier plan composite étant que tout le volume d'eau usée est stocké dans un même contenant.

6.6 Plan composite 2

6.6.1 Analyse des résidus : Graphiques de diagnostic

Les graphiques de diagnostic se trouvent en Annexe A.4.1.1 et Annexe A.4.1.2.

Il n'y a pas de différence notable entre les graphiques pour les MeS et la turbidité. Comme pour le premier plan composite, les erreurs suivent bien une loi normale, et présentent également une rupture de structure. Le Q-Q plot des résidus en MeS s'écarte moins de la droite, aux valeurs extrêmes, contrairement au même graphique pour la turbidité..

Comme précédemment, les résultats seront exprimés en concentration en MeS.

6.6.2 Résultats Plan composite 2

Ce deuxième plan composite a été effectué en prélevant 48 litres d'eau usée, comme dans le premier plan composite. La seule différence étant qu'au lieu de stocker l'eau dans des seaux différents, elle a été stockée dans un même grand contenant. De cette manière, la concentration en MeS et la turbidité seront semblables pour les 8 essais.

Au lieu de 60 heures entre le premier et le dernier essai, ce plan second plan composite a été fait en 24 heures seulement, ce qui diminue également l'évolution de la caractéristique de l'eau.

L'Annexe A.3.2 donne les valeurs expérimentales de chaque banc.

L'Annexe A.4.2 donne les valeurs des concentrations et valeurs initiales des MeS et de la turbidité pour chaque essai.

L'Annexe A.4.3 donne la diminution des MeS et de la turbidité.

Comme au point 6.5.3, le modèle mathématique est celui décrit à l'Equation 5.

Le Tableau 25 reprend la table d'analyse de variance pour ce deuxième plan composite centré.

	Facteurs	DDL	SCE	S ²	F	p-value
x_1	Vit.Coag	1	117,2	117,2	59,8	$9,94 \cdot 10^{-9}$ ***
x_2	Tps.Coag	1	44,8	44,8	22,9	$3,96 \cdot 10^{-5}$ ***
x_3	Tps.Floc	1	0,2	0,2	0,1	0,7615
x_4	Conc.Alun	1	77,2	77,2	39,4	$5,55 \cdot 10^{-7}$ ***
x_5	Conc.Poly	1	2,7	2,7	1,3	0,2462
x_1x_2	Inter Vit.Coag et Tps.Coag	1	1,4	1,4	0,7	0,3968
x_1x_3	Inter Vit.Coag et Tps.Floc	1	20,8	20,8	10,6	0,0027 **
x_1x_4	Inter Vit.Coag et Conc.Alun	1	15,7	15,7	8,0	0,0081 **
x_1x_5	Inter Vit.Coag et Conc.Poly	1	0,1	0,1	0,1	0,8216
x_2x_3	Inter Tps.Coag et Tps.Floc	1	2,0	2,0	1,0	0,3199
x_2x_4	Inter Tps.Coag et Conc.Alun	1	1,4	1,4	0,7	0,4107
x_2x_5	Inter Tps.Coag et Conc.Poly	1	4,2	4,2	2,1	0,1528
x_3x_4	Inter Tps.Floc et Conc.Alun	1	5,1	5,1	2,6	0,1159
x_3x_5	Inter Tps.Floc et Conc.Poly	1	0,8	0,8	0,4	0,5322
x_4x_5	Inter Conc.Alun et Conc.Poly	1	6,8	6,8	3,5	0,0709
$x_1x_2x_4$	Inter Vit.Coag,Tps.Coag et Conc.Alun	1	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$0,6 \cdot 10^{-3}$	0,9800
	Modèle	16	300,5	18,8		
	Résidus	31	58,5	1,9		
	Total	47	358,9	7,6	R ²	0,8371

Tableau 25 - Plan composite centré 2 : Table ANOVA avec interactions

Le Tableau 26 reprend les coefficients du modèle, ainsi que leurs intervalles de confiance et leur erreur.

Coefficients	Valeurs	Erreur	Intervalle de Confiance (95 %)	
			2,50 %	97,50 %
β_0	23,44	9,10	4,89	42,00
β_1	-0,18	0,07	-0,33	-0,04
β_2	-0,13	0,92	-2,01	1,75
β_3	-0,65	0,47	-1,60	0,30
β_4	-0,26	0,19	-0,66	0,13
β_5	89,30	47,54	-7,67	186,26
β_{12}	$1,98.10^{-3}$	0,01	-0,02	0,02
β_{13}	0,01	$1,73.10^{-3}$	0,00	0,01
β_{14}	$1,79.10^{-3}$	$1,54.10^{-3}$	0,00	0,00
β_{15}	0,05	0,20	-0,37	0,47
β_{23}	-0,02	0,02	-0,07	0,02
β_{24}	0,01	0,02	-0,03	0,05
β_{25}	-4,03	2,75	-9,63	1,58
β_{34}	0,01	0,01	0,00	0,03
β_{35}	-1,49	2,36	-6,29	3,32
β_{45}	-1,54	0,81	-3,22	0,14
β_{124}	$-5,21.10^{-6}$	$2,02.10^{-4}$	$-4,20.10^{-4}$	$4,15.10^{-4}$

Tableau 26 - Plan composite 2 : Coefficients du modèle avec interactions

Les facteurs avec la p-value la plus basse, inférieure au seuil de 0,01 sont, comme précédemment la vitesse de coagulation, le temps de coagulation ainsi que la concentration en alun. Les valeurs de la p-value sont encore plus faibles que celles obtenues lors du premier plan composite.

Toutes ces différences avec le premier plan composite laissent penser que le premier plan composite était sujet à de fortes variations de la caractéristique de l'eau, ce qui a entraîné de faux résultats. Les interactions qui étaient alors apparues, avec une p-value égale ou supérieure au seuil de 0,05 n'étaient due qu'à des fausses valeurs.

De nouvelles interactions apparaissent. Il s'agit des interactions « vitesse de coagulation – temps de floculation » et « vitesse de coagulation – concentration alun ».

Ces quatre facteurs, deux à deux, ont un coefficient négatif. Si on réécrit l'équation du modèle mathématique, cela traduit le fait que si on augmente la valeur de l'un, il faudrait diminuer la valeur de l'autre, pour chaque couple de facteur d'une interaction.

Cela peut s'expliquer par :

- Le fait d'augmenter la vitesse de coagulation permet un meilleur contact entre le milieu et l'alun, ce qui améliore la coagulation/floculation. Ainsi, le temps nécessaire à la floculation pourrait être réduit.
- De même, si l'on diminue la vitesse de coagulation, il faudrait augmenter le temps de floculation pour permettre une bonne décantation.
- Le fait d'augmenter la vitesse de coagulation permet également de pouvoir diminuer la concentration en alun, car la quantité réduite d'alun aurait un meilleur contact avec le milieu.
- De même, si l'on diminue la vitesse de coagulation, il faudrait augmenter la concentration en alun, pour assurer qu'un maximum de molécules puissent réagir.

6.6.3 Box-plots

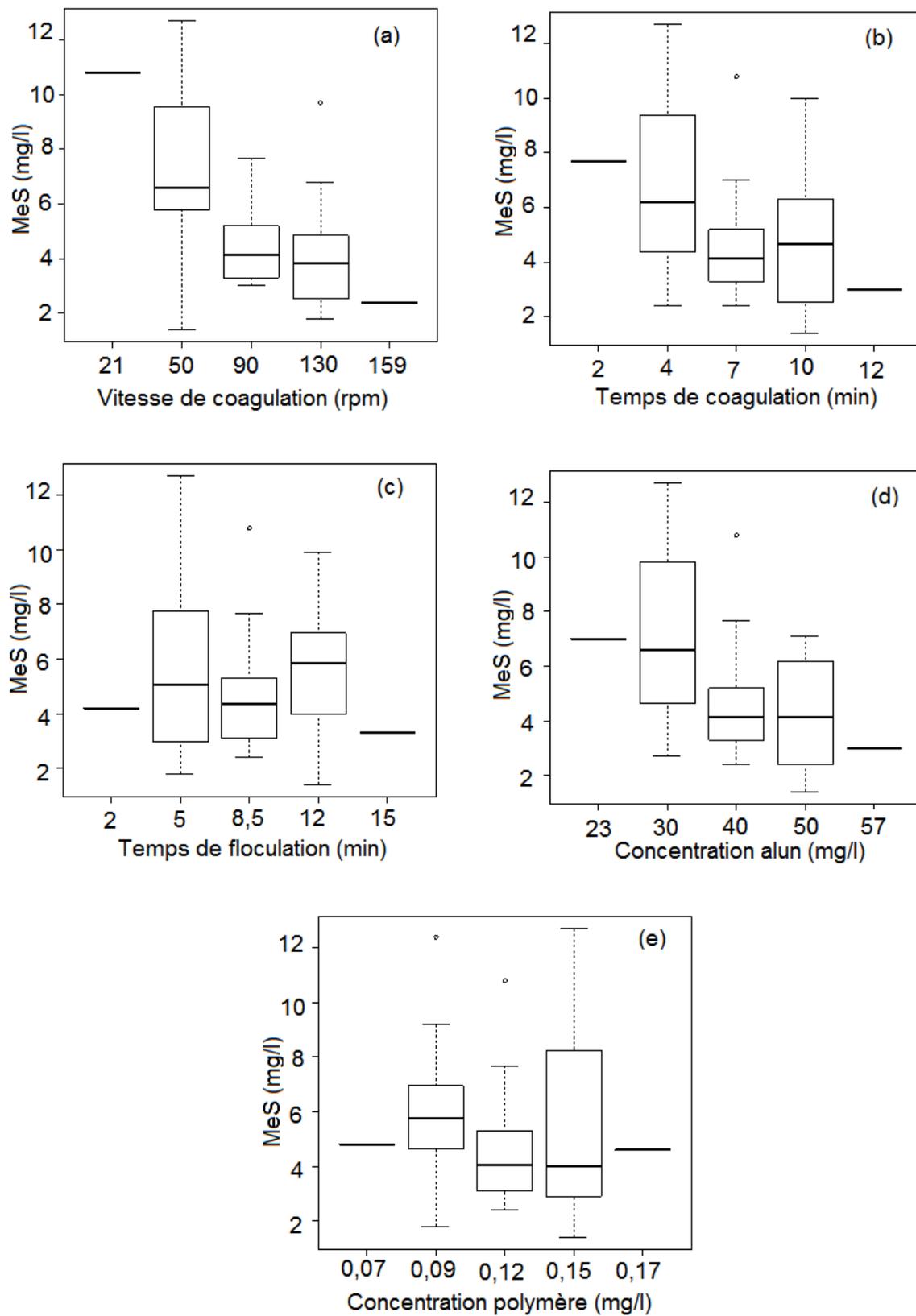


Figure 40 - Plan composite 2 : Box-plots

La Figure 40 montre graphiquement la concentration en MeS après traitement en fonction de la vitesse de coagulation (a), du temps de coagulation (b), du temps de floculation (c), de la concentration en alun (d) et de la concentration en polymère (e).

(a) MeS = fct (vitesse de coagulation) :

Comme le montrait le premier plan composite centré, la vitesse de coagulation est un facteur significatif, car la concentration en MeS après traitement présente une forte variabilité quand on fait varier la vitesse de coagulation.

(b) MeS = fct (temps de coagulation) :

Le temps de coagulation apparait être un facteur significatif, car il fait varier la concentration en MeS de l'eau traitée. Toutefois, les valeurs de la concentration restent assez basses, en dessous de 10 mg/l, malgré une certaine variabilité. La concentration en MeS est la plus basse pour des temps de coagulation supérieurs à 7 minutes.

(c) MeS = fct (temps de floculation) :

Le temps de floculation n'a pas d'influence sur la concentration en MeS de l'eau traitée. Il n'y a pas de variation des résultats quand on fait varier le temps de floculation.

(d) MeS = fct (concentration alun) :

La concentration en alun fait varier la concentration en MeS de l'eau traitée. On remarque une fois de plus un plateau au-delà de 40 mg/l.

(e) MeS = fct (concentration polymère) :

La concentration en polymère n'a pas d'influence sur la concentration en MeS de l'eau traitée, il s'agit d'un facteur non significatif.

6.6.4 Étude de la caractéristique de l'eau

L'Annexe A.4.4 reprend les valeurs de la turbidité et des MeS initiales pour chacun des 8 bancs. Ces valeurs permettent de construire la Figure 41, sur une durée de 24 heures.

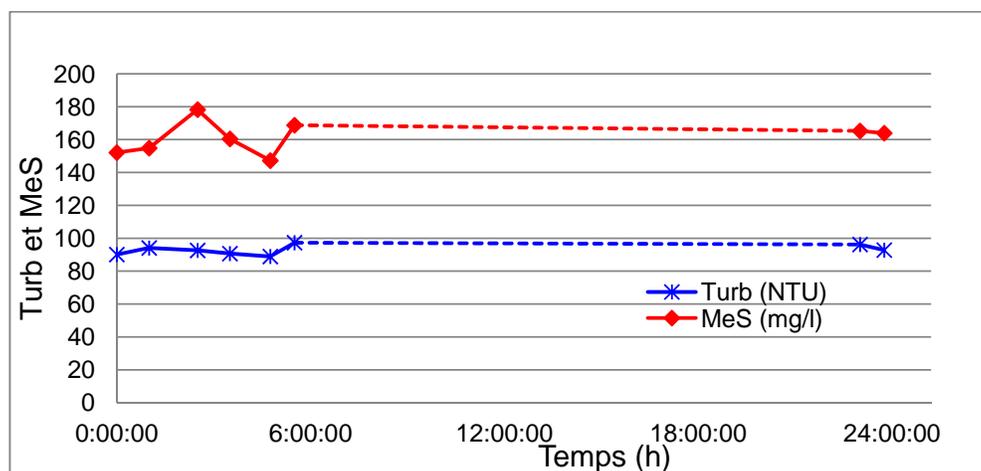


Figure 41 - Plan composite 2 : Évolution de la turbidité et des MeS au cours du temps

La turbidité varie de 97 à 89 NTU et les MeS évoluent de 169 à 147 mg/l. Pour rappel, les 8 bancs ont été effectués avec 48 litres d'eau usée, stockés dans un même contenant dans la chambre froide.

De cette manière, il y a une très faible variation des deux caractéristiques étudiées. Nous pouvons alors émettre l'hypothèse que le facteur « caractéristique de l'eau » n'est pas significatif, et donc valider les résultats obtenus pour l'analyse de variance pour le deuxième plan composite centré.

6.6.5 Conclusion Plan composite 2

L'étude de l'évolution de la turbidité et des MeS au cours du temps, qui montre qu'il n'y a pas de variation importante sur les 24 heures qu'ont pris les essais, permet de dire que l'eau usée utilisée était stable pendant cette période. Ainsi, les résultats obtenus peuvent être validés et l'on peut considérer qu'ils ne sont pas influencés par une variation de la turbidité et de la concentration en MeS initiales.

L'analyse des résidus montre que les erreurs suivent une loi normale. Toutefois, ils présentent une rupture de structure quand on analyse la répartition aléatoire des erreurs. Il faudrait donc faire plus de régressions linéaires pour que le modèle explique la réponse.

La valeur du coefficient de corrélation est néanmoins améliorée par rapport au premier plan composite. Cela s'explique par le fait que les concentrations en MeS et la turbidité initiale de l'échantillon n'ont pas évoluées au cours du temps.

L'analyse de variance confirme l'importance de la vitesse de coagulation, du temps de coagulation et de la concentration en alun pour la coagulation/floculation. Ces facteurs ont tous trois une p-value très inférieure à 0,01.

Les box-plots montrent la même tendance. La vitesse de coagulation est efficace aux alentours de 90 rpm et la concentration en alun nécessaire pour améliorer la décantation se trouve au voisinage 40 mg/l.

L'étude précédente ne nous permettait pas de conclure sur le temps de coagulation, car l'analyse de variance et les box-plots présentaient des tendances qui divergeaient. Le deuxième plan composite confirme que ce paramètre est influant, car les box-plots présentent cette fois-ci une variabilité de la réponse par rapport au temps de coagulation. La concentration en MeS après traitement est la plus basse au-delà de 7 minutes de coagulation.

Les autres facteurs, c'est-à-dire le temps de floculation et la concentration en polymère n'influencent pas la coagulation/floculation. Cela est confirmé par l'analyse de variance et box-plots des deux plans composites. Le temps de floculation est alors fixé à 10 minutes et la concentration du polymère à 1,5 mg/l, qui sont les valeurs qui reflètent celles utilisées à la station.

En ce qui concerne les interactions, il apparaît que celle entre la vitesse de coagulation et le temps de floculation ainsi que celle entre la vitesse de coagulation et la concentration en alun ont une p-value inférieure à 0,01. Ils influencent donc la coagulation/floculation. Les coefficients de chaque facteur nous apprennent que si l'on augmente la vitesse de coagulation, il faudrait diminuer le temps de floculation et inversement. De même, si l'on augmente vitesse de coagulation, il faudrait diminuer la concentration d'alun.

Toutes ces valeurs peuvent être résumés dans le Tableau 27 :

	Facteurs	Valeur
Phase rapide (Coagulation)	1) Vitesse de coagulation	90 rpm
	2) Temps de coagulation	7 min
	3) Concentration d'alun	40 mg/l
	4) Temps d'ajout du polymère	30 secondes
Phase lente (Floculation)	5) Vitesse de floculation	40 rpm
	6) Temps de floculation	10 minutes
	7) Concentration du polymère	1,5 mg/l
Autres	8) Caractéristique de l'eau	Non significatif

Tableau 27 - Récapitulatif des résultats

7 Conclusion générale

L'objectif de ce travail était l'étude de l'impact qu'ont l'ajout de produits chimiques dans une installation de décantation primaire. Les informations recueillies aideront à la réalisation d'un nouveau modèle de la décantation primaire, qui est le thème de recherche développé par primEAU.

La coagulation/floculation est un processus qui a lieu dans les bassins de décantation. Sous l'action de certaines forces, les particules en suspension s'agglomèrent et forment des floccs de densité plus importante, qui peuvent alors décanter. L'ajout de produits chimiques accélère et améliore ce processus, et permet de diminuer la concentration en matières en suspension plus efficacement.

Des jar-tests ont permis d'évaluer l'ajout d'alun (coagulant) et de polymère (floculant) dans les eaux usées de la station Est de la ville de Québec. Ces tests reproduisent à petite échelle ce qui se passe dans la station de traitement. Ils ont permis d'évaluer huit facteurs qui influencent la coagulation/floculation. Ces facteurs sont la vitesse et le temps de coagulation, la concentration d'alun, le temps d'ajout du polymère, la vitesse et le temps de floculation, la concentration du polymère et enfin la caractéristique de l'eau. Ils en ont été analysés en terme de diminution de la concentration des matières en suspension et de turbidité.

Le premier facteur évalué était le temps d'ajout du polymère qui est le moment où l'on ajoute le polymère, avant la fin de la phase de coagulation. Les essais ont montré qu'il n'y avait pas de différence significative, qu'on ajoute le polymère entre 30 et 5 secondes avant la floculation. Néanmoins, le fait d'ajouter le polymère 30 secondes avant la floculation permettait la formation de floccs plus gros, résultat d'observations visuelles. C'est cette valeur qui a été retenue pour les essais qui ont suivi.

Les autres facteurs ont été évalués à l'aide de plans d'expériences différents. La concentration en alun, la vitesse de floculation, ainsi que la caractéristique de l'eau qui regroupe le pH, la température, la conductivité etc. de l'affluent de la station ont été analysés avec des carrés latins. Une analyse de variance (ANOVA) a permis de dire que seule la concentration en alun influençait fortement la coagulation/floculation. Cela est vrai uniquement lorsqu'un même échantillon d'eau usée est utilisé pour tous les bancs d'essai. La vitesse de floculation, fixée à 40 rpm, et la caractéristique de l'eau sont alors considérées comme non significatives.

Ensuite, la vitesse et le temps de coagulation, la concentration en alun, le temps de floculation et la concentration du polymère ont été évalués avec des plans composites centrés. Ainsi, il a été possible de voir l'influence de plus de facteurs en même temps, sur différents niveaux et de voir les interactions qu'il peut y avoir. L'analyse de variance montre que la phase de coagulation est déterminante pour la coagulation/floculation. Il s'agit de la vitesse et du temps de coagulation, ainsi que la concentration en alun. Cette vitesse est optimale au-delà de 90 rpm, le temps nécessaire pour la phase de coagulation est de 7 minutes au moins, et la concentration en alun ne devrait pas descendre en dessous de 40 mg/l. Les autres facteurs peuvent prendre une valeur quelconque, dans leur domaine d'étude. Les conditions choisies sont 10 minutes pour le temps de floculation, 1,5 mg/l pour la concentration du polymère, 40 rpm pour la vitesse de floculation.

Il existe également des interactions qui influencent faiblement le processus. Si l'on augmente la vitesse de coagulation, on peut alors diminuer le temps de coagulation, de même, si l'on augmente la vitesse de coagulation, on peut diminuer la concentration en alun.

Toutes ces informations permettront de mettre au point le modèle de la décantation primaire, en prenant en compte l'effet des produits chimiques ajoutés. Les facteurs influents ayant été identifiés, il sera alors facile de se concentrer sur ceux qui le sont, pour optimiser la décantation.

Bibliographie

- [1] Ville de Québec
- [2] BERSILLON, J., BLAZY,P., JDID, E. Décantation – Aspects théoriques, *Techniques de l'ingénieur*, 1999, Réf: J3450.
- [3] Mottot, Y. Coagulants et floculants, *Texte de la 279^e conférence de l'Université de tous les savoirs*, 2000.
- [4] Chambre syndicale de la Recherche et de la Production du Pétrole et du Gaz Naturel, Circuits Eau de Mer : Traitement et Matériaux, *Editions Technip*, pp.144-153
- [5] Boeglin, J. Traitement physico-chimique de la pollution insoluble, *Techniques de l'ingénieur*, 2002, Réf: G1270
- [6] Goupy, J., Les plans d'expériences, *Revue MODULAD*, 2006, No.34, pp.74-116
- [7] Vanden Cruyce, Cours de mathématiques de 1^{ère} Master, *Notes de cours, Institut des Ingénieur de Bruxelles (ISIB)*
- [8] SCHERRER, B. Comparaison des Moyennes de Plusieurs Echantillons Indépendants, *Biostatistiques, Editions Gaëtan Morin Éditeur*, 1984, pp. 422-463
- [9] Rakotomalala, R., Pratique de la Régression Linéaire Multiple, Diagnostics et sélection de variables, *Cours d'économétrie*, 2011
- [10] LE GUEN, M., La Boite à Moustache de TUKEY, Un Outil Pour Initier à la Statistique, *CNRS-MATISSE*
- [11] PELLETIER, C., Mesure de la turbidité, *Techniques de l'ingénieur*, 2009, Réf: 2350

A Annexes

A.1 Carré latin 1

A.1.1 Valeurs des MeS

JT1	Eau #1	Bécher	masse i (g)	masse f (g)	vol (ml)	diff	MeS (mg/l)
Date (ddmmaa)	28/03/2012	Réf	1,1003	1,106	50	0,0057	114,0
heure prélev	13h30	1	1,1121	1,1194	164	0,0073	44,5
Débit Q (m3/h)	11450	2	1,0922	1,0946	61	0,0024	39,3
Volume tot (m3)	5250	3	1,1012	1,1037	108	0,0025	23,1
tps ret (min)	28	4	1,0694	1,0712	202	0,0018	8,9
		5	1,1455	1,1464	202	0,0009	4,5
		6	1,0887	1,0897	208	0,0010	4,8
JT2	Eau #2	Bécher	masse i (g)	masse f (g)	vol (ml)	diff	MeS (mg/l)
Date (ddmmaa)	28/03/2012	Réf	1,1128	1,1234	52	0,0106	203,8
heure prélev	15h30	1	1,1016	1,1082	91	0,0066	72,5
Débit Q (m3/h)	11300	2	1,1244	1,1246	206	0,0002	1,0
Volume tot (m3)	5250	3	1,1043	1,1057	126	0,0014	11,1
tps ret (min)	28	4	1,1406	1,1476	112	0,0070	62,5
		5	1,0863	1,0904	58	0,0041	70,7
		6	1,148	1,1488	196	0,0008	4,1
JT3	Eau #3	Bécher	masse i (g)	masse f (g)	vol (ml)	diff	MeS (mg/l)
Date (ddmmaa)	29/03/2012	Réf	1,0982	1,1047	48	0,0065	135,4
heure prélev	9h45	1	1,1495	1,1518	82	0,0023	28,0
Débit Q (m3/h)	11068	2	1,1108	1,1118	218	0,0010	4,6
Volume tot (m3)	5250	3	1,1324	1,1332	206	0,0008	3,9
tps ret (min)	28	4	1,1048	1,1054	200	0,0006	3,0
		5	1,1191	1,121	68	0,0019	27,9
		6	1,0711	1,0750	74	0,0039	52,7
JT4	Eau #4	Bécher	masse i (g)	masse f (g)	vol (ml)	diff	MeS (mg/l)
Date (ddmmaa)	29/03/2012	Réf	1,1423	1,1518	54	0,0095	175,9
heure prélev	11h00	1	1,1134	1,1157	204	0,0023	11,3
Débit Q (m3/h)	11303	2	1,1087	1,1163	120	0,0076	63,3
Volume tot (m3)	5250	3	1,1029	1,1039	210	0,0010	4,8
tps ret (min)	28	4	1,1159	1,1167	208	0,0008	3,8
		5	1,0974	1,1008	104	0,0034	32,7
		6	1,1187	1,1243	114	0,0056	49,1
JT5	Eau #5	Bécher	masse i (g)	masse f (g)	vol (ml)	diff	MeS (mg/l)
Date (ddmmaa)	29/03/2012	Réf	1,0786	1,1116	48	0,0330	687,5
heure prélev	12h00	1	1,0958	1,0979	149	0,0021	14,1
Débit Q (m3/h)	13570	2	1,1173	1,121	44	0,0037	84,1
Volume tot (m3)	5250	3	1,106	1,1116	49	0,0056	114,3
tps ret (min)	23	4	1,0831	1,087	39	0,0039	100,0
		5	1,0939	1,0962	140	0,0023	16,4
		6	1,1325	1,1373	206	0,0048	23,3
JT6	Eau #6	Bécher	masse i (g)	masse f (g)	vol (ml)	diff	MeS (mg/l)
Date (ddmmaa)	29/03/2012	Réf	1,085	1,0958	45	0,0108	240,0
heure prélev	14h00	1	1,1419	1,1428	150	0,0009	6,0
Débit Q (m3/h)	12248	2	1,1028	1,1037	170	0,0009	5,3
Volume tot (m3)	5250	3	1,0603	1,0656	90	0,0053	58,9
tps ret (min)	26	4	1,1067	1,1164	70	0,0097	138,6
		5	1,1376	1,1388	104	0,0012	11,5
		6	1,0933	1,0952	66	0,0019	28,8

Annexe A.1.1 - Carré latin 1 : valeurs des MeS

A.1.2 Diminution des MeS et de la turbidité

JT1		Eau #1	1	2	3	4	5	6
Turb Initial	119	Turb (NTU)	87	72	48	13	5	7
		Diminution de la turbidité (%)	26,9	39,5	59,7	89,1	95,8	94,1
MeS Initial	114	MeS (mg/l)	44,5	39,3	23,1	8,9	4,5	4,8
		Diminution des MeS (%)	61,0	65,5	79,7	92,2	96,1	95,8
		Commentaires	-	+	+	++	++	++
JT2		Eau #2	1	2	3	4	5	6
Turb Initial	168	Turb (NTU)	125	5	34	107	130	8
		Diminution de la turbidité (%)	25,6	97,0	79,8	36,3	22,6	95,2
MeS Initial	204	MeS (mg/l)	72,5	1,0	11,1	62,5	70,7	4,1
		Diminution des MeS (%)	64,4	99,5	94,5	69,3	65,3	98,0
		Commentaires	-	+++	++	-	-	++
JT3		Eau #3	1	2	3	4	5	6
Turb Initial	145	Turb (NTU)	47	6	4	5	60	120
		Diminution de la turbidité (%)	67,6	95,9	97,2	96,6	58,6	17,2
MeS Initial	135	MeS (mg/l)	28,0	4,6	3,9	3,0	27,9	52,7
		Diminution des MeS (%)	79,3	96,6	97,1	97,8	79,4	61,1
		Commentaires	+	+++	+++	+++	++	-
JT4		Eau #4	1	2	3	4	5	6
Turb Initial	184	Turb (NTU)	22	133	6	7	70	96
		Diminution de la turbidité (%)	88,0	27,7	96,7	96,2	62,0	47,8
MeS Initial	176	MeS (mg/l)	11,3	63,3	4,8	3,8	32,7	49,1
		Diminution des MeS (%)	93,6	64,0	97,3	97,8	81,4	72,1
		Commentaires	++	-	+++	+++	++	+
JT5		Eau #5	1	2	3	4	5	6
Turb Initial	478	Turb (NTU)	42	185	227	197	25	52
		Diminution de la turbidité (%)	91,2	61,3	52,5	58,8	94,8	89,1
MeS Initial	687	MeS (mg/l)	14,1	84,1	114,3	100,0	16,4	23,3
		Diminution des MeS (%)	97,9	87,8	83,4	85,5	97,6	96,6
		Commentaires	+++	++	-	-	++	++
JT6		Eau #6	1	2	3	4	5	6
Turb Initial	264	Turb (NTU)	10	7	131	164	17	83
		Diminution de la turbidité (%)	96,2	97,3	50,4	37,9	93,6	68,6
MeS Initial	240	MeS (mg/l)	6,0	5,3	58,9	138,6	11,5	28,8
		Diminution des MeS (%)	97,5	97,8	75,5	42,3	95,2	88,0
		Commentaires	+++	+++	+	-	++	+

Annexe A.1.2 - Carré latin 1 : Diminution des MeS et de la turbidité

A.2 Carré latin 2

A.2.1 Etude de l'évolution des caractéristiques de l'eau

Paramètres Évolution EAU			J1	J2	J3	J4	J5	J6
Date (ddmmaa)	17/04/2012		10:00	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00
heure prélev	14h40	FAST (coag)	time (min:sec)	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00
Débit Q (m3/h)	9060		Alun (mg/l)	45	45	45	45	45
			speed (rpm)	150	150	150	150	150
Volume tot (m3)	5250	SLOW (floc)	time (min:sec)	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00
tps ret (min)	35		Polymère (mg/l)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
			speed (rpm)	20	30	40	50	60
		SED	time (min:sec)	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00
			speed (rpm)	0	0	0	0	0

Annexe A.2.1 - Carré latin 2 : Conditions opératoires pour caractéristique de l'eau

A.2.2 Table randomisée du carré latin 2

		Vitesse floculation (rpm)					
		20	30	40	50	60	70
Carac. eau	Eau #1	A	B	C	E	D	F
	Eau #2	D	A	F	C	E	B
	Eau #3	B	C	D	A	F	E
	Eau #4	F	E	A	B	C	D
	Eau #5	E	D	B	F	A	C
	Eau #6	C	F	E	D	B	A

	[Alun] mg/l
A	0
B	15
C	30
D	45
E	60
F	75

Annexe A.2.2 - Carré latin 2 : Table randomisée

A.2.3 Valeurs des MeS

JT1	Eau #1	Bécher	masse i (g)	masse f (g)	vol (ml)	diff	MeS (mg/l)
Date (ddmmaa)	17/04/2012	Réf	1,1388	1,1545	77	0,0157	203,9
heure prélev	14h40	1	1,1080	1,1096	68	0,0016	23,5
Débit Q (m3/h)	9060	2	1,1394	1,1422	92	0,0028	30,4
Volume tot (m3)	5250	3	1,1055	1,1071	202	0,0016	7,9
tps ret (min)	35	4	1,0706	1,0713	218	0,0007	3,2
temp (°C)	15	5	1,1150	1,1168	262	0,0018	6,9
pH	7,3	6	1,1500	1,1515	336	0,0015	4,5
JT2	Eau #2	Bécher	masse i (g)	masse f (g)	vol (ml)	diff	MeS (mg/l)
Date (ddmmaa)	17/04/2012	Réf	1,11	1,1272	88	0,0172	195,5
heure prélev	14h40	1	1,1118	1,1125	210	0,0007	3,3
Débit Q (m3/h)	9060	2	1,1454	1,1494	130	0,0040	30,8
Volume tot (m3)	5250	3	1,154	1,1545	206	0,0005	2,4
tps ret (min)	35	4	1,0896	1,0916	206	0,0020	9,7
temp (°C)	16	5	1,1089	1,1095	196	0,0006	3,1
pH	7,03	6	1,1155	1,1203	143	0,0048	33,6
JT3	Eau #3	Bécher	masse i (g)	masse f (g)	vol (ml)	diff	MeS (mg/l)
Date (ddmmaa)	17/04/2012	Réf	1,0968	1,1143	90	0,0175	194,4
heure prélev	14h40	1	1,1265	1,129	98	0,0025	25,5
Débit Q (m3/h)	9060	2	1,1115	1,1137	210	0,0022	10,5
Volume tot (m3)	5250	3	1,103	1,1033	206	0,0003	1,5
tps ret (min)	35	4	1,0814	1,0844	112	0,0030	26,8
temp (°C)	18	5	1,1123	1,1133	222	0,0010	4,5
pH	7	6	1,1006	1,1010	256	0,0004	1,6
JT4	Eau #4	Bécher	masse i (g)	masse f (g)	vol (ml)	diff	MeS (mg/l)
Date (ddmmaa)	17/04/2012	Réf	1,1483	1,159	56	0,0107	191,1
heure prélev	14h40	1	1,1198	1,1203	214	0,0005	2,3
Débit Q (m3/h)	9060	2	1,1208	1,1214	218	0,0006	2,8
Volume tot (m3)	5250	3	1,1103	1,1141	120	0,0038	31,7
tps ret (min)	35	4	1,1377	1,1396	122	0,0019	15,6
temp (°C)	15	5	1,1461	1,1475	212	0,0014	6,6
pH	7	6	1,0761	1,0767	262	0,0006	2,3
JT5	Eau #5	Bécher	masse i (g)	masse f (g)	vol (ml)	diff	MeS (mg/l)
Date (ddmmaa)	17/04/2012	Réf	1,1156	1,1304	80	0,0148	185,0
heure prélev	14h40	1	1,151	1,1515	218	0,0005	2,3
Débit Q (m3/h)	9060	2	1,1207	1,1213	206	0,0006	2,9
Volume tot (m3)	5250	3	1,1178	1,1207	142	0,0029	20,4
tps ret (min)	35	4	1,0981	1,0984	212	0,0003	1,4
temp (°C)	16	5	1,112	1,1147	88	0,0027	30,7
pH	7,2	6	1,1205	1,1230	254	0,0025	9,8
JT6	Eau #6	Bécher	masse i (g)	masse f (g)	vol (ml)	diff	MeS (mg/l)
Date (ddmmaa)	17/04/2012	Réf	1,1612	1,1788	96	0,0176	183,3
heure prélev	14h40	1	1,1509	1,1524	192	0,0015	7,8
Débit Q (m3/h)	9060	2	1,0913	1,0917	200	0,0004	2,0
Volume tot (m3)	5250	3	1,1437	1,1443	214	0,0006	2,8
tps ret (min)	35	4	1,0911	1,092	210	0,0009	4,3
temp (°C)	17	5	1,1171	1,1212	144	0,0041	28,5
pH	7,1	6	1,0946	1,0977	104	0,0031	29,8

Annexe A.2.3 - Carré latin 2 : MeS

A.2.4 Diminution des MeS et turbidité

JT1		Eau #1	1	2	3	4	5	6
Turb Initial	147	Turb (NTU)	56,6	47,1	10,3	2,51	6,99	2,94
		Diminution de la turbidité (%)	61,5	68,0	93,0	98,3	95,2	98,0
MeS Initial	204	MeS (mg/l)	23,5	30,4	7,9	3,2	6,9	4,5
		Diminution des MeS (%)	88,5	85,1	96,1	98,4	96,6	97,8
JT2		Eau #2	1	2	3	4	5	6
Turb Initial	148	Turb (NTU)	3,53	53,8	2,31	11,9	3,54	45,4
		Diminution de la turbidité (%)	97,6	63,6	98,4	92,0	97,6	69,3
MeS Initial	195	MeS (mg/l)	3,3	30,8	2,4	9,7	3,1	33,6
		Diminution des MeS (%)	98,3	84,3	98,8	95,0	98,4	82,8
JT3		Eau #3	1	2	3	4	5	6
Turb Initial	148	Turb (NTU)	46,1	13,3	4,1	53,2	6,99	2,4
		Diminution de la turbidité (%)	68,9	91,0	97,2	64,1	95,3	98,4
MeS Initial	194	MeS (mg/l)	25,5	10,5	1,5	26,8	4,5	1,6
		Diminution des MeS (%)	86,9	94,6	99,3	86,2	97,7	99,2
JT4		Eau #4	1	2	3	4	5	6
Turb Initial	143	Turb (NTU)	1,97	1,65	49,3	26,6	8,19	2,15
		Diminution de la turbidité (%)	98,6	98,8	65,5	81,4	94,3	98,5
MeS Initial	191	MeS (mg/l)	2,3	2,8	31,7	15,6	6,6	2,3
		Diminution des MeS (%)	98,8	98,6	83,4	91,8	96,5	98,8
JT5		Eau #5	1	2	3	4	5	6
Turb Initial	143	Turb (NTU)	2,4	3,2	34,3	2,29	52,8	10,5
		Diminution de la turbidité (%)	98,3	97,8	76,0	98,4	63,1	92,7
MeS Initial	185	MeS (mg/l)	2,3	2,9	20,4	1,4	30,7	9,8
		Diminution des MeS (%)	98,8	98,4	89,0	99,2	83,4	94,7
JT6		Eau #6	1	2	3	4	5	6
Turb Initial	138	Turb (NTU)	10,4	0,8	0,9	2,18	36	49,5
		Diminution de la turbidité (%)	92,5	99,4	99,3	98,4	73,9	64,1
MeS Initial	183	MeS (mg/l)	7,8	2,0	2,8	4,3	28,5	29,8
		Diminution des MeS (%)	95,7	98,9	98,5	97,7	84,5	83,7

Annexe A.2.4 - Carré latin 2 : Diminution des MeS et turbidité

A.3 Plan composite centré 1

A.3.1 Conditions opératoires

Banc	JT	Vcoag		Tcoag		Tfloc		Ccoag		Cfloc	
1	JT1	50	-1	10	1	5	-1	50	1	0,15	1
	JT2	90	0	7	0	8,5	0	40	0	0,12	0
	JT3	130	1	4	-1	12	1	50	1	0,09	-1
	JT4	130	1	10	1	12	1	50	1	0,09	-1
	JT5	21	-2	7	0	8,5	0	40	0	0,12	0
	JT6	50	-1	10	1	5	-1	50	1	0,09	-1
2	JT1	159	2	7	0	8,5	0	40	0	0,12	0
	JT2	50	-1	4	-1	5	-1	30	-1	0,09	-1
	JT3	90	0	7	0	2	-2	40	0	0,12	0
	JT4	130	1	10	1	5	-1	50	1	0,15	1
	JT5	90	0	2	-2	8,5	0	40	0	0,12	0
	JT6	50	-1	4	-1	12	1	30	-1	0,15	1
3	JT1	90	0	7	0	8,5	0	40	0	0,12	0
	JT2	50	-1	10	1	5	-1	30	-1	0,09	-1
	JT3	90	0	7	0	8,5	0	23	-2	0,12	0
	JT4	130	1	10	1	5	-1	30	-1	0,15	1
	JT5	50	-1	4	-1	12	1	30	-1	0,09	-1
	JT6	50	-1	10	1	12	1	30	-1	0,09	-1
4	JT1	90	0	7	0	8,5	0	57	2	0,12	0
	JT2	90	0	7	0	8,5	0	40	0	0,12	0
	JT3	130	1	4	-1	12	1	30	-1	0,09	-1
	JT4	130	1	10	1	5	-1	30	-1	0,09	-1
	JT5	50	-1	4	-1	5	-1	50	1	0,09	-1
	JT6	130	1	10	1	12	1	30	-1	0,15	1
5	JT1	130	1	10	1	12	1	50	1	0,15	1
	JT2	130	1	4	-1	12	1	50	1	0,15	1
	JT3	90	0	7	0	8,5	0	40	0	0,12	0
	JT4	50	-1	10	1	5	-1	30	-1	0,15	1
	JT5	90	0	7	0	8,5	0	40	0	0,17	2
	JT6	50	-1	10	1	12	1	50	1	0,09	-1
6	JT1	130	1	10	1	12	1	30	-1	0,09	-1
	JT2	90	0	7	0	8,5	0	40	0	0,07	-2
	JT3	50	-1	4	-1	12	1	50	1	0,15	1
	JT4	50	-1	4	-1	5	-1	30	-1	0,15	1
	JT5	50	-1	4	-1	5	-1	50	1	0,15	1
	JT6	90	0	7	0	8,5	0	40	0	0,12	0
7	JT1	130	1	4	-1	5	-1	50	1	0,09	-1
	JT2	130	1	10	1	5	-1	50	1	0,09	-1
	JT3	130	1	4	-1	5	-1	30	-1	0,09	-1
	JT4	90	0	7	0	8,5	0	40	0	0,12	0
	JT5	130	1	4	-1	5	-1	30	-1	0,15	1
	JT6	90	0	7	0	15	2	40	0	0,12	0
8	JT1	90	0	12	2	8,5	0	40	0	0,12	0
	JT2	50	-1	4	-1	12	1	50	1	0,09	-1
	JT3	130	1	4	-1	5	-1	50	1	0,15	1
	JT4	130	1	4	-1	12	1	30	-1	0,15	1
	JT5	50	-1	10	1	12	1	30	-1	0,15	1
	JT6	50	-1	10	1	12	1	50	1	0,15	1

Annexe A.3.1 - Plan composite centré 1 et 2 : Conditions opératoires

A.3.2 Valeurs des MeS

JT1	Eau #1	Bécher	masse i (g)	masse f (g)	vol (ml)	diff	MeS (mg/l)
Date (ddmmaa)	24/04/2012	Réf	1,073	1,1007	64	0,0277	432,8
heure prélev	14h30	1	1,0800	1,0827	712	0,0027	3,8
Débit Q (m3/h)	20574	2	1,0860	1,0883	464	0,0023	5,0
Volume tot (m3)	5250	3	1,020	1,0226	482	0,0026	5,4
tps ret (min)	15	4	1,0688	1,0707	478	0,0019	4,0
temp (°C)	18	5	1,0899	1,0955	432	0,0056	13,0
		6	1,077	1,0804	686	0,0034	5,0
JT2	Eau #2	Bécher	masse i (g)	masse f (g)	vol (ml)	diff	MeS (mg/l)
Date (ddmmaa)	24/04/2012	Réf	1,1032	1,1132	32	0,0100	312,5
heure prélev	14h30	1	1,0821	1,083	468	0,0009	1,9
Débit Q (m3/h)	20574	2	1,0951	1,1016	478	0,0065	13,6
Volume tot (m3)	5250	3	1,0570	1,0578	416	0,0008	1,9
tps ret (min)	15	4	1,0682	1,0689	398	0,0007	1,8
temp (°C)	18	5	1,0828	1,0849	386	0,0021	5,4
		6	1,0939	1,0999	418	0,0060	14,4
JT3	Eau #3	Bécher	masse i (g)	masse f (g)	vol (ml)	diff	MeS (mg/l)
Date (ddmmaa)	24/04/2012	Réf	1,0725	1,0837	47	0,0112	238,3
heure prélev	14h30	1	1,1025	1,1051	406	0,0026	6,4
Débit Q (m3/h)	20574	2	1,0771	1,0807	420	0,0036	8,6
Volume tot (m3)	5250	3	1,0749	1,0803	406	0,0054	13,3
tps ret (min)	15	4	1,0761	1,0788	414	0,0027	6,5
temp (°C)	18	5	1,1091	1,1119	369	0,0028	7,6
		6	1,1339	1,1379	448	0,0040	8,9
JT4	Eau #4	Bécher	masse i (g)	masse f (g)	vol (ml)	diff	MeS (mg/l)
Date (ddmmaa)	24/04/2012	Réf	1,0888	1,0947	52	0,0059	113,5
heure prélev	14h30	1	1,0848	1,0853	410	0,0005	1,2
Débit Q (m3/h)	20574	2	1,1115	1,1118	442	0,0003	0,7
Volume tot (m3)	5250	3	1,1152	1,1169	492	0,0017	3,5
tps ret (min)	15	4	1,1235	1,1245	460	0,0010	2,2
temp (°C)	18	5	1,0125	1,0156	366	0,0031	8,5
		6	1,0882	1,0896	464	0,0014	3,0
JT5	Eau #5	Bécher	masse i (g)	masse f (g)	vol (ml)	diff	MeS (mg/l)
Date (ddmmaa)	24/04/2012	Réf	1,0730	1,0822	46	0,0092	200,0
heure prélev	14h30	1	1,0812	1,0826	474	0,0014	3,0
Débit Q (m3/h)	20574	2	1,0858	1,0869	450	0,0011	2,4
Volume tot (m3)	5250	3	1,0195	1,0212	468	0,0017	3,6
tps ret (min)	15	4	1,0704	1,0751	484	0,0047	9,7
temp (°C)	18	5	1,0876	1,0889	460	0,0013	2,8
		6	1,0783	1,0800	506	0,0017	3,4
JT6	Eau #6	Bécher	masse i (g)	masse f (g)	vol (ml)	diff	MeS (mg/l)
Date (ddmmaa)	24/04/2012	Réf	0,9781	0,9904	62	0,0123	198,4
heure prélev	14h30	1	1,1196	1,121	458	0,0014	3,1
Débit Q (m3/h)	20574	2	1,0496	1,051	510	0,0014	2,7
Volume tot (m3)	5250	3	1,0086	1,0108	396	0,0022	5,6
tps ret (min)	15	4	1,0990	1,1054	478	0,0064	13,4
temp (°C)	18	5	1,0844	1,0863	514	0,0019	3,7
		6	1,0843	1,0853	438	0,0010	2,3
JT7	Eau #7	Bécher	masse i (g)	masse f (g)	vol (ml)	diff	MeS (mg/l)
Date (ddmmaa)	24/04/2012	Réf	1,0681	1,0803	46	0,0122	265,2
heure prélev	14h30	1	1,0993	1,1008	380	0,0015	3,9
Débit Q (m3/h)	20574	2	1,0744	1,0756	484	0,0012	2,5
Volume tot (m3)	5250	3	1,0701	1,0731	470	0,0030	6,4
tps ret (min)	15	4	1,0706	1,0738	2446	0,0032	1,3
temp (°C)	18	5	1,1050	1,1128	452	0,0078	17,3
		6	1,1306	1,1333	628	0,0027	4,3
JT8	Eau #8	Bécher	masse i (g)	masse f (g)	vol (ml)	diff	MeS (mg/l)
Date (ddmmaa)	24/04/2012	Réf	1,0830	1,0992	56	0,0162	289,3
heure prélev	14h30	1	1,0829	1,0848	488	0,0019	3,9
Débit Q (m3/h)	20574	2	1,1087	1,1117	480	0,0030	6,2
Volume tot (m3)	5250	3	1,1167	1,1183	482	0,0016	3,3
tps ret (min)	15	4	1,1197	1,1222	474	0,0025	5,3
temp (°C)	18	5	1,0117	1,0143	490	0,0026	5,3
		6	1,0857	1,0876	478	0,0019	4,0

Annexe A.3.2 - Plan composite centré 1 : MeS

A.3.3 Diminution des MeS et de la turbidité

JT1		Eau #1	1	2	3	4	5	6
Turb Initial	192	Turb (NTU)	1,33	2,01	1,57	1,52	4,93	2,61
		Diminution de la turbidité (%)	99,3	99,0	99,2	99,2	97,4	98,6
MeS Initial	433	MeS (mg/l)	3,8	5,0	5,4	4,0	13,0	5,0
		Diminution des MeS (%)	99,1	98,9	98,8	99,1	97,0	98,9
JT2		Eau #2	1	2	3	4	5	6
Turb Initial	111	Turb (NTU)	1,29	8,7	2,21	1,4	3,64	7,99
		Diminution de la turbidité (%)	99,3	95,6	98,9	99,3	98,1	95,9
MeS Initial	313	MeS	1,9	13,6	1,9	1,8	5,4	14,4
		Diminution des MeS (%)	99,4	95,6	99,4	99,4	98,3	95,4
JT3		Eau #3	1	2	3	4	5	6
Turb Initial	130	Turb (NTU)	2,48	4,61	8,05	2,46	5,12	4,67
		Diminution de la turbidité (%)	98,1	96,5	93,8	98,1	96,1	96,4
MeS Initial	238	MeS	6,4	8,6	13,3	6,5	7,6	8,9
		Diminution des MeS (%)	97,3	96,4	94,4	97,3	96,8	96,3
JT4		Eau #4	1	2	3	4	5	6
Turb Initial	108	Turb (NTU)	2,76	2,88	3,95	2,44	5,21	1,78
		Diminution de la turbidité (%)	97,4	97,3	96,3	97,7	95,2	98,4
MeS Initial	113	MeS	1,2	0,7	3,5	2,2	8,5	3,0
		Diminution des MeS (%)	98,9	99,4	97,0	98,1	92,5	97,3
JT5		Eau #5	1	2	3	4	5	6
Turb Initial	102	Turb (NTU)	1,03	1,38	1,58	4,68	1,41	1,78
		Diminution de la turbidité (%)	99,0	98,6	98,5	95,4	98,6	98,3
MeS Initial	200	MeS	3,0	2,4	3,6	9,7	2,8	3,4
		Diminution des MeS (%)	98,5	98,8	98,2	95,1	98,6	98,3
JT6		Eau #6	1	2	3	4	5	6
Turb Initial	101	Turb (NTU)	1,24	2,12	2,77	6,93	2,04	1,54
		Diminution de la turbidité (%)	98,8	97,9	97,3	93,1	98,0	98,5
MeS Initial	198	MeS	3,1	2,7	5,6	13,4	3,7	2,3
		Diminution des MeS (%)	98,5	98,6	97,2	93,3	98,1	98,8
JT7		Eau #7	1	2	3	4	5	6
Turb Initial	160	Turb (NTU)	1,64	1,05	3,33	2,28	10,3	1,88
		Diminution de la turbidité (%)	99,0	99,3	97,9	98,6	93,6	98,8
MeS Initial	265	MeS	3,9	2,5	6,4	1,3	17,3	4,3
		Diminution des MeS (%)	98,5	99,1	97,6	99,5	93,5	98,4
JT8		Eau #8	1	2	3	4	5	6
Turb Initial	131	Turb (NTU)	1,19	2,37	1,34	2,14	2,38	1,43
		Diminution de la turbidité (%)	99,1	98,2	99,0	98,4	98,2	98,9
MeS Initial	289	MeS	3,9	6,2	3,3	5,3	5,3	4,0
		Diminution des MeS (%)	98,7	97,8	98,9	98,2	98,2	98,6

Annexe A.3.3 - Plan composite 1 : Diminution des MeS et turbidité

A.3.4 Caractéristique de l'eau

Heure de l'essai	JT	Turb (NTU)	MeS (mg/l)	t (°C)
0:00:00	JT1	192	433	18
3:30:00	JT2a(*)	196	513	18
4:30:00	JT3	130	238	14
5:15:00	JT2b(*)	111	313	14
6:00:00	JT4	108	113	14
53:00:00	JT5	102	200	14
55:00:00	JT6	101	198	14
57:00:00	JT7	160	265	13
58:00:00	JT8	131	289	13

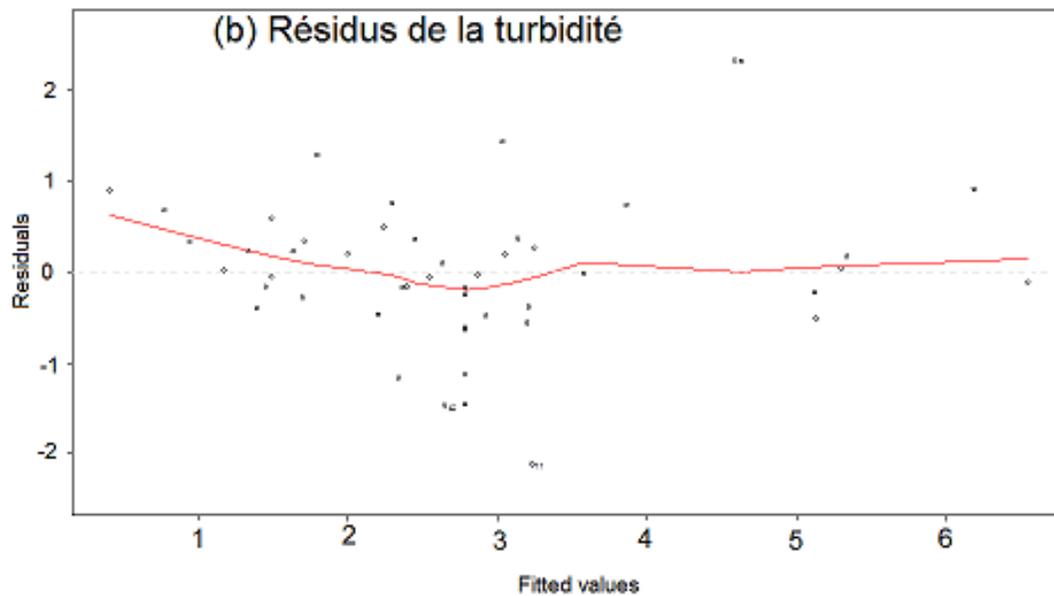
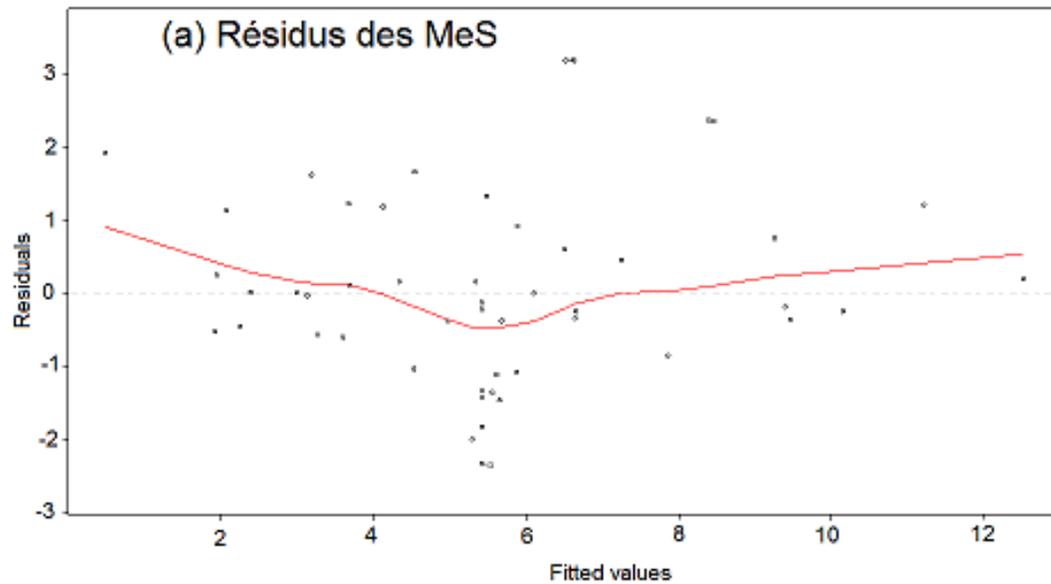
Annexe A.3.4 - Plan composite 1 : Caractéristique de l'eau

(*) Suite à une erreur dans la paramétrisation du banc JT2, il a été fait deux fois. Néanmoins, les mesures de la turbidité et des MeS des deux bancs (JT2a) et (JT2b) ont été utilisées pour la caractéristique de l'eau.

A.4 Plan composite centré 2

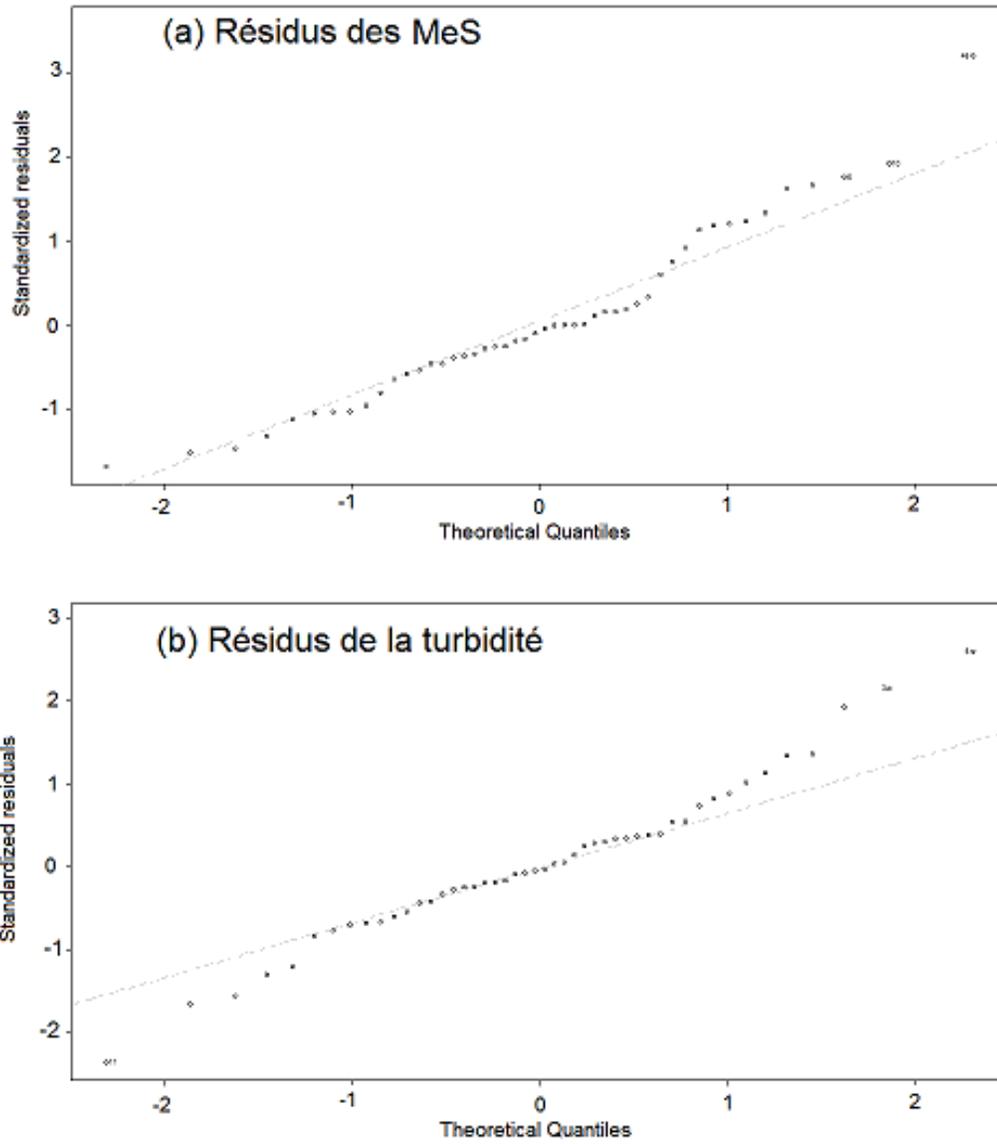
A.4.1 Analyse des résidus : graphiques des diagnostics

A.4.1.1 Résidus vs. Réponse



Annexe A.4.1.1 - Plan composite 2 : Résidus en fonction de la réponse pour les MeS et la turbidité

A.4.1.2 Q-Q plots



Annexe A.4.1.2 - Plan composite 2 : Comparaison Q-Q plot MeS et turbidité

A.4.2 Valeur des MeS

JT1	Eau #1	Bécher	masse i (g)	masse f (g)	vol (ml)	diff	MeS (mg/l)
Date (ddmmaa)	23/05/2012	Réf	1,1113	1,1186	48	0,0073	152,1
heure prélev	16h40	1	1,1104	1,1122	470	0,0018	3,8
Débit Q (m3/h)	14855	2	1,0981	1,1003	416	0,0022	5,3
Volume tot (m3)	5250	3	1,140	1,1431	454	0,0031	6,8
tps ret (min)	21	4	1,1423	1,1447	528	0,0024	4,5
temp (°C)	14	5	1,1065	1,1110	418	0,0045	10,8
		6	1,0862	1,0887	476	0,0025	5,3
JT2	Eau #2	Bécher	masse i (g)	masse f (g)	vol (ml)	diff	MeS (mg/l)
Date (ddmmaa)	23/05/2012	Réf	1,0922	1,1018	62	0,0096	154,8
heure prélev	16h40	1	1,1142	1,1151	376	0,0009	2,4
Débit Q (m3/h)	14855	2	1,0981	1,1028	378	0,0047	12,4
Volume tot (m3)	5250	3	1,0920	1,094	474	0,0020	4,2
tps ret (min)	21	4	1,0744	1,0755	452	0,0011	2,4
temp (°C)	14	5	1,1196	1,1233	478	0,0037	7,7
		6	1,1143	1,1188	456	0,0045	9,9
JT3	Eau #3	Bécher	masse i (g)	masse f (g)	vol (ml)	diff	MeS (mg/l)
Date (ddmmaa)	23/05/2012	Réf	1,1162	1,1244	46	0,0082	178,3
heure prélev	16h40	1	1,0777	1,0791	454	0,0014	3,1
Débit Q (m3/h)	14855	2	1,0787	1,0825	414	0,0038	9,2
Volume tot (m3)	5250	3	1,0887	1,0916	414	0,0029	7,0
tps ret (min)	21	4	1,0808	1,0819	412	0,0011	2,7
temp (°C)	14	5	1,1164	1,1204	440	0,0040	9,1
		6	1,0944	1,0974	466	0,0030	6,4
JT4	Eau #4	Bécher	masse i (g)	masse f (g)	vol (ml)	diff	MeS (mg/l)
Date (ddmmaa)	23/05/2012	Réf	1,1143	1,122	48	0,0077	160,4
heure prélev	16h40	1	1,0849	1,0863	460	0,0014	3,0
Débit Q (m3/h)	14855	2	1,0842	1,0858	396	0,0016	4,0
Volume tot (m3)	5250	3	1,0959	1,0975	354	0,0016	4,5
tps ret (min)	21	4	1,0946	1,0966	414	0,0020	4,8
temp (°C)	14	5	1,1222	1,1249	430	0,0027	6,3
		6	1,0895	1,0909	454	0,0014	3,1
JT5	Eau #5	Bécher	masse i (g)	masse f (g)	vol (ml)	diff	MeS (mg/l)
Date (ddmmaa)	23/05/2012	Réf	1,0771	1,0877	72	0,0106	147,2
heure prélev	16h40	1	1,0704	1,0713	412	0,0009	2,2
Débit Q (m3/h)	14855	2	1,1175	1,119	434	0,0015	3,5
Volume tot (m3)	5250	3	1,1015	1,1038	442	0,0023	5,2
tps ret (min)	21	4	1,0951	1,0996	450	0,0045	10,0
temp (°C)	14	5	1,0991	1,1011	432	0,0020	4,6
		6	1,1076	1,1104	454	0,0028	6,2
JT6	Eau #6	Bécher	masse i (g)	masse f (g)	vol (ml)	diff	MeS (mg/l)
Date (ddmmaa)	23/05/2012	Réf	1,1008	1,1116	64	0,0108	168,7
heure prélev	16h40	1	1,1140	1,116	408	0,0020	4,9
Débit Q (m3/h)	14855	2	1,1048	1,1068	414	0,0020	4,8
Volume tot (m3)	5250	3	1,0972	1,0994	400	0,0022	5,5
tps ret (min)	21	4	1,0769	1,0821	410	0,0052	12,7
temp (°C)	14	5	1,0888	1,0912	396	0,0024	6,1
		6	1,1044	1,1059	362	0,0015	4,1
JT7	Eau #7	Bécher	masse i (g)	masse f (g)	vol (ml)	diff	MeS (mg/l)
Date (ddmmaa)	23/05/2012	Réf	1,0989	1,1108	72	0,0119	165,3
heure prélev	16h40	1	1,1096	1,1108	494	0,0012	2,4
Débit Q (m3/h)	14855	2	1,1143	1,1154	601	0,0011	1,8
Volume tot (m3)	5250	3	1,1136	1,1161	473	0,0025	5,3
tps ret (min)	21	4	1,1046	1,1066	562	0,0020	3,6
temp (°C)	14	5	1,0943	1,0965	530	0,0022	4,2
		6	1,0983	1,1003	612	0,0020	3,3
JT8	Eau #8	Bécher	masse i (g)	masse f (g)	vol (ml)	diff	MeS (mg/l)
Date (ddmmaa)	23/05/2012	Réf	1,1218	1,1336	72	0,0118	163,9
heure prélev	16h40	1	1,1161	1,1175	474	0,0014	3,0
Débit Q (m3/h)	14855	2	1,1077	1,1111	478	0,0034	7,1
Volume tot (m3)	5250	3	1,1308	1,1324	494	0,0016	3,2
tps ret (min)	21	4	1,1085	1,112	360	0,0035	9,7
temp (°C)	14	5	1,1110	1,114	438	0,0030	6,8
		6	1,1054	1,1060	440	0,0006	1,4

Annexe A.4.2 - Plan composite 2 : valeur des MeS

A.4.3 Diminution des MeS et turbidité

JT1		Eau #1	1	2	3	4	5	6
Turb Initial	90,1	Turb (NTU)	2,23	2,53	4,47	2,49	6,95	2,64
		Diminution de la turbidité (%)	97,5	97,2	95,0	97,2	92,3	97,1
MeS Initial	152	MeS (mg/l)	3,8	5,3	6,8	4,5	10,8	5,3
		Diminution des MeS (%)	97,5	96,5	95,5	97,0	92,9	96,5
JT2		Eau #2	1	2	3	4	5	6
Turb Initial	94,1	Turb (NTU)	1,27	7,1	2,44	1,3	1,12	5,51
		Diminution de la turbidité (%)	98,7	92,5	97,4	98,6	98,8	94,1
MeS Initial	155	MeS (mg/l)	2,4	12,4	4,2	2,4	7,7	9,9
		Diminution des MeS (%)	98,5	92,0	97,3	98,4	95,0	93,6
JT3		Eau #3	1	2	3	4	5	6
Turb Initial	92,6	Turb (NTU)	1,66	5,34	4,6	1,42	4,62	3,56
		Diminution de la turbidité (%)	98,2	94,2	95,0	98,5	95,0	96,2
MeS Initial	178	MeS (mg/l)	3,1	9,2	7,0	2,7	9,1	6,4
		Diminution des MeS (%)	98,3	94,9	96,1	98,5	94,9	96,4
JT4		Eau #4	1	2	3	4	5	6
Turb Initial	90,7	Turb (NTU)	2,05	2,15	2,2	3,05	3,5	1,44
		Diminution de la turbidité (%)	97,7	97,6	97,6	96,6	96,1	98,4
MeS Initial	160	MeS (mg/l)	3,0	4,0	4,5	4,8	6,3	3,1
		Diminution des MeS (%)	98,1	97,5	97,2	97,0	96,1	98,1
JT5		Eau #5	1	2	3	4	5	6
Turb Initial	88,9	Turb (NTU)	1,19	1,73	2,61	4,9	2,19	2,81
		Diminution de la turbidité (%)	98,7	98,1	97,1	94,5	97,5	96,8
MeS Initial	147	MeS (mg/l)	2,2	3,5	5,2	10,0	4,6	6,2
		Diminution des MeS (%)	98,5	97,7	96,5	93,2	96,9	95,8
JT6		Eau #6	1	2	3	4	5	6
Turb Initial	97,3	Turb (NTU)	2,73	2,82	2,73	6,44	2,84	2,17
		Diminution de la turbidité (%)	97,2	97,1	97,2	93,4	97,1	97,8
MeS Initial	169	MeS (mg/l)	4,9	4,8	5,5	12,7	6,1	4,1
		Diminution des MeS (%)	97,1	97,1	96,7	92,5	96,4	97,5
JT7		Eau #7	1	2	3	4	5	6
Turb Initial	96,2	Turb (NTU)	1,29	1,86	0,99	1,33	1,56	1,18
		Diminution de la turbidité (%)	98,7	98,1	99,0	98,6	98,4	98,8
MeS Initial	165	MeS (mg/l)	2,4	1,8	5,3	3,6	4,2	3,3
		Diminution des MeS (%)	98,5	98,9	96,8	97,8	97,5	98,0
JT8		Eau #8	1	2	3	4	5	6
Turb Initial	92,8	Turb (NTU)	1,17	3,24	1,45	3,08	3,51	2,08
		Diminution de la turbidité (%)	98,7	96,5	98,4	96,7	96,2	97,8
MeS Initial	164	MeS (mg/l)	3,0	7,1	3,2	9,7	6,8	1,4
		Diminution des MeS (%)	98,2	95,7	98,0	94,1	95,8	99,2

Annexe A.4.3 Plan composite centré 2 : Diminution des MeS et turbidité

A.4.4 Caractéristique de l'eau

Heure de l'essai	JT	Turb NTU	MeS (mg/l)	t°
0:00:00	JT1	90	152	14
1:00:00	JT2	94	155	14
2:30:00	JT3	93	178	17
3:30:00	JT4	91	160	18
4:45:00	JT5	89	147	14
5:30:00	JT6	97	169	15
23:00:00	JT7	96	165	15
23:45:00	JT8	93	164	13

Annexe A.4.4 - Plan composite 2 : Caractéristique de l'eau