



**UNIVERSITE D'ANTANANARIVO  
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE  
DEPARTEMENT HYDRAULIQUE**

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur :

**MODÉLISATION ET CONCEPTION  
D'UN SYSTÈME DE DÉCANTATION  
LAMELLAIRE POUR LA  
CLARIFICATION D'EAU BRUTE**

**Cas des stations de la JIRAMA  
Mandroseza et Sabotsy Namehana**

*Présenté par : ANDRIANTOVOHASINA Tsifoimbola*

*Le 28 Avril 2016*

*Encadreur pédagogique :*

Mr RAFALIMANANA Mampitony,  
Enseignant Chercheur en Mécanique des  
Fluides ESPA

*Encadreur professionnel :*

Mr RAJAONAH Haja, Ingénieur  
Hydraulicien, Chef de Département  
Développement et Projets Spécifiques  
/DEO/DGAO/JIRAMA

*Promotion 2014*





**UNIVERSITE D'ANTANANARIVO  
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE  
DEPARTEMENT HYDRAULIQUE**

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur :

**MODÉLISATION ET CONCEPTION  
D'UN SYSTÈME DE DÉCANTATION  
LAMELLAIRE POUR LA  
CLARIFICATION D'EAU BRUTE**

**Cas des stations de la JIRAMA  
Mandrozeza et Sabotsy Namehana**

*Présenté par : ANDRIANTOVOHASINA Tsifoimbola*

*Membres du jury :*

Président de jury : Mr RAMANARIVO  
Solofo mampionona, Chef de Département  
Hydraulique, Enseignant Chercheur de  
l'École Supérieure Polytechnique  
d'Antananarivo

Examinateurs : Mr RANDRIAMAHERISOA  
Alain, Enseignant Chercheur de l'École  
Supérieure Polytechnique d'Antananarivo

Mr RANDRIANASOLO  
David, Enseignant Chercheur de l'École  
Supérieure Polytechnique d'Antananarivo

Encadreur : Mr RAFALIMANANA  
Mampitony, Enseignant Chercheur de  
l'École Supérieure Polytechnique  
d'Antananarivo

Rapporteur : Mr RAJAONAH Haja,  
Ingénieur Hydraulicien, Chef de  
Département Développement et Projets  
Spécifiques /DEO/DGAO/JIRAMA

*Promotion 2014*

## **REMERCIEMENTS**

Avant tout, je compte rendre grâce à Dieu Tout Puissant, qui m'a donné la force de réaliser ce travail. Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué à l'élaboration du présent mémoire.

À Monsieur ANDRIANAHARISON Yvon, Directeur de l'École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo qui mérite la plus haute considération dans le niveau hiérarchique de notre école.

À Monsieur RAMANARIVO Solofo mampionona, Chef de département Hydraulique qui s'engage à donner le maximum de connaissances aux Élèves – Ingénieurs du Département et qui nous a fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.

À Monsieur RABENANDRASANA Henri, Directeur de la Direction d'Équipement EAU (DEO) JIRAMA, qui a donné son accord pour effectuer les travaux de mémoire dans sa direction.

À Monsieur RAJAONAH Haja, Chef de Département Développement et Projets Spécifiques (DDPS) qui, malgré ses nombreuses occupations, n'a pas ménagé son temps pour suivre de près le déroulement des travaux de mémoire et qui m'a initié aux environnements du cadre professionnel.

À Monsieur RAFALIMANANA Mampitony, Enseignant chercheur à l'École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo qui m'a fait l'honneur d'accepter l'encadrement du présent mémoire et qui a guider mon esprit de raisonnement scientifique dans tous les niveaux de notre conception.

J'adresse mes sincères et vifs remerciements également à tous les membres de jury qui ont bien voulu accepter d'examiner ce travail malgré leurs nombreuses occupations.

Je ne peux oublier de remercier tous ceux qui ont, de près ou de loin, apporter leurs parts dans la réalisation de ce mémoire :

- les personnels du Direction d'Équipement EAU (DEO) et de la Direction d'Exploitation EAU (DEXO), qui n'hésitent pas à apporter leurs parts dans le partage des savoirs et l'acquisition des données
- tous les enseignants, personnels administratifs de l'École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, des personnes responsables pour la formation des ingénieurs
- Mes amis, Mes parents et ma famille pour leurs précieux aides et soutiens dont je ne peux estimer la valeur.

## **DECLARATION SUR L'HONNEUR**

Je soussigné, ANDRIANTOVHASINA Tsifoimbola, auteur de ce mémoire intitulé : "**MODÉLISATION ET CONCEPTION D'UN SYSTÈME DE DÉCANTATION LAMELLAIRE POUR LA CLARIFICATION D'EAU BRUTE ; Cas des stations de la JIRAMA Mandroseza et Sabotsy Namehana**" déclare sur l'honneur que :

- Ce document est le résultat de mes recherches personnelles, travaux qui n'ont pas encore été publiés.
- Dans cet écrit, je n'ai ni copié, ni reproduit les œuvres d'autrui.
- Conformément à l'usage en matière de travaux destinés au public, j'ai précisé à partir de la bibliographie les sources exactes des extraits et des documents exploités.

ANDRIANTOVHASINA Tsifoimbola

# TABLE DES MATIÈRES

<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>I</b>
<b>DECLARATION SUR L'HONNEUR .....</b>	<b>II</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES .....</b>	<b>III</b>
<b>LISTE DES ABREVIATIONS .....</b>	<b>VII</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTE DES ILLUSTRATIONS .....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTE DES CARTES.....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>IX</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>PARTIE – I MISE EN CONTEXTE DE L'ETUDE .....</b>	<b>3</b>
<b>CHAPITRE I - SITUATION GEOGRAPHIQUE .....</b>	<b>4</b>
<b>I.1 USINE DE TRAITEMENT DE MANDROSEZA ET LES COMMUNES A DESSERVIR .....</b>	<b>5</b>
<b>I.1.1 Historique de la station de Mandroseza :.....</b>	<b>5</b>
<b>I.1.2 Ressource en eau et communes à desservir.....</b>	<b>5</b>
<b>I.2 USINE DE TRAITEMENT DE SABOTSY NAMEHANA .....</b>	<b>7</b>
<b>I.2.1 Les communes à desservir .....</b>	<b>7</b>
<b>I.2.2 Rivière Mamba, station de référence au pont de Sabotsy .....</b>	<b>8</b>
<b>CHAPITRE II - CONTEXTES REGLEMENTAIRES ET CADRE JURIDIQUE.....</b>	<b>10</b>
<b>II.1 NOTION DE POTABILITE.....</b>	<b>10</b>
<b>II.2 IMPORTANCE DU CADRE DE L'APPROVISIONNEMENT EN EAU POTABLE DANS LA GESTION DE LA RESSOURCE EN EAU.....</b>	<b>11</b>
<b>CHAPITRE III - CADRE DE CONCEPTION LIE AUX PROBLEMES ACTUELS .....</b>	<b>12</b>
<b>III.1 PROBLEMATIQUES DE TRAITEMENT ET D'INFRASTRUCTURE .....</b>	<b>12</b>
<b>III.1.1 Qualité des eaux à traiter .....</b>	<b>12</b>
<b>III.1.2 Besoins exigés par les consommateurs (quantité) .....</b>	<b>15</b>
<b>III.1.3 Insuffisance de performance des infrastructures existantes.....</b>	<b>17</b>
<b>III.2 CONCEPTION DES INFRASTRUCTURES INNOVANTS (EN QUANTITE ET EN QUALITE) .....</b>	<b>18</b>
<b>III.2.1 Application pour augmenter la performance des infrastructures existantes.....</b>	<b>18</b>
<b>III.2.2 Application dans la Conception de nouvelles stations de traitement d'eau de surface .....</b>	<b>18</b>
<b>III.3 METHODES DE CONCEPTION.....</b>	<b>19</b>

III.3.1	<i>Orientation du cadre d'étude</i> .....	19
III.3.2	<i>Outils de conception</i> .....	20
<b>PARTIE – II</b>	<b>BASES THEORIQUES ET OUTILS DE CONCEPTION</b>	
<b>D'UN DECANTEUR LAMELLAIRE</b> .....		<b>21</b>
<b>CHAPITRE IV -</b>	<b>RAPPELS DES NOTIONS IMPORTANTES SUR LE TRAITEMENT DES EAUX</b> .....	<b>22</b>
IV.1	DIFFERENTS TYPES D'EAU .....	22
IV.2	TRAITEMENT DES EAUX DE SURFACE ET DES EAUX SOUTERRAINES .....	22
IV.2.1	<i>Traitemennt des eaux de surface</i> .....	22
IV.2.2	<i>Traitemennt des eaux souterraines</i> .....	22
IV.3	CHAINES HYDRAULIQUE DE TRAITEMENT.....	22
IV.3.1	<i>Prétraitemennt</i> .....	24
IV.3.2	<i>Clarification</i> .....	24
IV.3.2.1	Coagulation.....	25
IV.3.2.2	Flocculation .....	25
IV.3.2.3	Décantation .....	25
IV.3.2.4	Filtration .....	25
IV.3.3	<i>Désinfection</i> .....	26
IV.3.4	<i>Neutralisation</i> .....	26
IV.4	MAITRISE DES PROCESSUS DE FLOCULATION .....	26
IV.4.1	<i>Distribution des matières solides contenus dans l'eau en fonction de leurs dimensions</i> .....	26
IV.4.2	<i>Les suspensions colloïdales</i> .....	27
IV.4.3	<i>Essais de flocculation (Jar-Test)</i> .....	28
IV.4.4	<i>Flocculation avec contact de boue</i> .....	30
<b>CHAPITRE V -</b>	<b>LA "DÉCANTATION LAMELLAIRE"</b> .....	<b>31</b>
V.1	LA DECANTATION .....	31
V.1.1	<i>Différentes types de décantation :</i> .....	31
V.1.2	<i>Paramètres caractéristiques d'un décanteur :</i> .....	33
V.2	ORIGINE DU DECANTEUR A PLAQUE .....	35
V.3	PRINCIPES GENERALES DE LA DECANTATION LAMELLAIRE .....	35
V.4	CARACTERISTIQUES D'UN DECANTEUR LAMELLAIRE ; .....	37
V.4.1	<i>L'espace inter-lamellaire « e » :</i> .....	37
V.4.2	<i>L'inclinaison des lamelles « α »</i> .....	37
V.4.3	<i>Autres caractéristiques</i> .....	37
V.5	DIFFERENTES TYPES.....	38

V.6	OPTIMISATION DE LA SURFACE DE DECANTATION SUIVANT LA VARIANTE FORME (SECTION TRANSVERSALE DES MODULES LAMELLAIRES) EN SE FIXANT LES DIMENSIONS DU CORPS DE L'OUVRAGE ET EN FAISANT VARIER CELLES DES MODULES.....	38
V.6.1	<i>Forme simple</i> .....	39
V.6.2	<i>Forme hexagonal</i> .....	42
V.6.3	<i>Forme ondulée</i> .....	46
V.6.4	<i>Résumé et application numérique</i> .....	48
V.6.5	<i>Détermination de la variation du Nombre de Reynolds</i> .....	50
V.7	APPLICATION.....	51
V.7.1	<i>Calcul de la quantité de matériaux pour le cas des lamelles de forme hexagonale:</i> .....	51
<b>CHAPITRE VI - MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION .....</b>		<b>54</b>
VI.1	MODELES DE CONCEPTION.....	54
VI.1.1	<i>Modèle idéal, élaboré par Hazen</i> .....	54
VI.1.2	<i>Modèle physique rationnel – couplage modèle géométrique et modèle hydrodynamique</i> .....	54
VI.1.2.1	Modélisation hydrodynamique .....	55
VI.1.2.1.1	Hypothèses utilisés en Mécanique des fluides .....	55
VI.1.2.1.1.1	Mode de raisonnement dans les problèmes de dynamique des fluides .....	55
VI.1.2.1.1.2	Notion de particule.....	57
VI.1.2.1.1.3	Hypothèse de continuité.....	57
VI.1.2.1.1.4	Echelle de travail suivant la dimension d* de la particule.....	58
VI.1.2.1.2	Modèles physique et Equations de base de la dynamique des fluides .....	59
VI.1.2.1.2.1	Écoulement monophasique .....	59
VI.1.2.1.2.2	Modèle de turbulence .....	60
VI.1.2.1.2.3	Mécanique des suspensions.....	64
VI.1.2.1.3	Outil de simulation : « <b>COMSOL MULTIPHYSICS</b> » .....	68
VI.1.2.2	Conception assistée par l'ordinateur : .....	72
VI.1.2.2.1	Modélisation géométrique d'un produit.....	72
VI.1.2.2.2	Module classique d'un logiciel CAO.....	73
VI.1.2.2.3	Outil de conception : AutoCad 2012.....	74
VI.2	LES ÉTAPES DE CONCEPTION .....	74
VI.2.1	<i>Pré-dimensionnement – modèle de Hazen</i> .....	74
VI.2.2	<i>Première étape : Conception de la géométrie d'écoulement (dimensionnement)</i> .....	76
VI.2.3	<i>Deuxième étape : Calibrage du modèle physique</i> .....	77
VI.2.4	<i>Troisième étape : Détermination du fonctionnement optimal et rendement de décantation correspondant</i> .....	78
VI.2.5	<i>Synthèse et perspective d'application</i> .....	78
<b>CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE .....</b>		<b>81</b>
<b>PARTIE – III ÉTUDE DE CAS.....</b>		<b>82</b>

<b>CHAPITRE VII - AMÉNAGEMENT D'UN OUVRAGE DE DECANTATION EXISTANT, DECANTEUR PRAT-DANIEL DE MANDROSEZA I.....</b>	<b>83</b>
VII.1     DIAGNOSTIQUE DE LA SITUATION ACTUELLE .....	83
VII.1.1 <i>Qualité de l'eau brute du lac</i> .....	83
VII.1.2 <i>Description de l'ouvrage</i> .....	83
VII.1.3 <i>Fonctionnement actuel des ouvrages.</i> .....	85
VII.2     PROPOSITIONS D'AMENAGEMENT :.....	85
VII.2.1 <i>Implantation de lamelles trapézoïdales</i> .....	85
VII.2.1.1 <i>Simulation des phénomènes de sédimentation dans l'ouvrage</i> .....	88
VII.2.2 <i>Perspective d'application</i> .....	93
VII.3     COUT DES LAMELLES .....	94
<b>CHAPITRE VIII - APPLICATION DE LA DECANTATION LAMELLAIRE DANS LES NOUVELLES CONSTRUCTIONS ; CAS DE LA STATION DE TRAITEMENT D'EAU POTABLE DE SABOTSY NAMEHANA.....</b>	<b>96</b>
VIII.1     PRESENTATION DES DONNEES DU PROJET.....	96
VIII.1.1 <i>Qualité et quantité de la ressource</i> .....	96
VIII.1.2 <i>Plan général d'Aménagement</i> .....	97
VIII.2     CONCEPTION.....	100
VIII.2.1 <i>Implantation des modules hexagonaux – surface de décantation résultant</i> .....	100
VIII.2.2 <i>Conception de la géométrie d'écoulement de l'ouvrage :</i> .....	103
VIII.2.2.1     Première variante, même alimentation que l'ouvrage initial.....	103
VIII.2.2.1.1     Réduction des variantes - Simulation en Deux dimensions (2D).....	104
VIII.2.2.1.2     Simulation en trois dimensions de la première variante.....	110
VIII.2.2.2     Deuxième variante : alimentation en utilisant des canaux de distribution situés dans la partie inférieure de la zone de décantation.....	113
VIII.2.3 <i>Proposition de choix sur les Variantes optimales à retenir</i> .....	117
VIII.2.3.1     Première variante.....	117
VIII.2.3.2     Deuxième variante .....	120
VIII.2.4 <i>Résumé</i> .....	125
VIII.3     EVALUATION DU COUT .....	126
VIII.3.1 <i>Dimensions des ouvrages</i> .....	126
VIII.3.2 <i>L'estimation du coût de construction</i> .....	128
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>	<b>130</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>131</b>

## **LISTE DES ABREVIATIONS**

CAG : Charbon Actif en Grains

CAP : Charbon Actif en Poudre

CAO : Conception assistée par ordinateur

CFAO : Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur

CFD : Computational Fluid Dynamic

DAC : Design Augmented by Computer

DDPS : Département Développement et Projets spécifiques

DEO : Direction d'Equipement Eau

DEXO : Direction d'Exploitation Eau

DGAO : Direction Général Adjointe Eau

ESPA : École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo

JIRAMA : Jiro sy Rano Malagasy

NTU : Nephelometric Turbidity Units

MES : Matières en suspensions

RSM : Reynolds Stress Model

STP : Surface Totale Projetée

2D : Deux dimensions

3D : Trois dimensions

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau I-1 : Mamba au pont Sabotsy, débit mensuel .....	8
Tableau III-1 Différentes valeur de la consommation.....	17
Tableau III-2 : Quelques disciplines et leurs applications dans le cadre de traitement des eau .....	19
Tableau IV-1 : Temps de décantation de particule pour 1 [m] d'eau. DEGREMONT 1989 .....	28
Tableau IV-2 : Correspondance des paramètres au laboratoire et sur ouvrage réel .....	29
Tableau V-1 : Récapitulation des paramètres pour les trois formes.....	48
Tableau V-2 : Application numérique pour "e" constant.....	49
Tableau V-3 : Application numérique pour "D <sub>H</sub> " constant.....	49
Tableau VI-1 : Echelle de travail suivant la dimension d* de la particule.....	58
Tableau VI-2: Constantes du modèle turbulence k-ε .....	63
Tableau VII-1 : Paramètres standard de la qualité d'eau brute du Lac Mandroseza .....	83
Tableau VII-2 Correspondance entre concentration et fraction volumique de la phase dispersée .....	89
Tableau VIII-1 : Paramètres standard mesurés pendant l'année 2015 de la qualité de ressource Eau brute Sabotsy Namehana.....	96
Tableau VIII-2 : Résultats d'essai de flocculation Tableau VIII-3.....	97
Tableau VIII-4 : Séries de Variantes ( <b>A</b> ) suivant la disposition de l'entrée et de la sortie de l'eau à traiter et la position des lamelles .....	105
Tableau VIII-5 : Intensité du vecteur vitesse dans la zone de décantation .....	112
Tableau VIII-6 : comparaison de deux séries de variantes ( <b>B</b> ) suivant le mode de sortie et d'entrée d'eau à traiter .....	113
Tableau VIII-7 : Comparaison et estimation des devis d'un ouvrage de décantation avec et sans lamelles traitant un débit 50 [m <sup>3</sup> /h] .....	128
Tableau VIII-8 : Devis estimatif de l'ouvrage de filtration traitant un débit 50 [m <sup>3</sup> /h].....	129

## **LISTE DES ILLUSTRATIONS**

### Liste des Cartes

Carte 1 : Localisation de la zone d'étude, Les principales communes desservies par la station de traitement de Mandroseza et de Sabotsy Namehana.....	4
Carte 2 : Communes desservies par la station Mandroseza .....	6
Carte 3 : Communes desservies par la station de traitement de Sabotsy Namehana .....	7
Carte 4 : Bassin versant de la rivière Mamba, exutoire au barrage de rehaussement <b>Tsarafara</b> .....	9

## Liste des figures

Figure III-1 : Evolution mensuel de la turbidité d'eau brute du Lac Mandroseza .....	13
Figure III-2 : Tendance de la répartition annuelle de la turbidité, cas eau brute du Lac Mandroseza .....	14
Figure III-3 : Consommation mensuel de la ville de Tana .....	15
Figure III-4 : Tendance de l'augmentation annuelle de la consommation .....	16
Figure IV-1 : possibilité de combinaison entre les principaux traitements unitaires.....	23
Figure IV-2 : Spectre de taille des particules dans les eaux naturelles. J. Rodier 2009.....	27
Figure IV-3 : Détermination du taux optimal de traitement .....	29
Figure V-1 : Principes de décantation élaborés selon le modèle de HAZEN .....	33
Figure V-2 : Décantation étagée, traitant un débit $n^*Q$ .....	35
Figure V-3 : Décantation étagée, traitant un débit $Q$ .....	35
Figure V-4 : Principes généraux de la décantation lamellaire .....	36
Figure V-5 : Dimensions relatives à une simple décantation lamellaire.....	40
Figure V-6 : Triangle remarquable, forme hexagonal de module .....	42
Figure V-7 : Implantation des modules hexagonaux dans la surface de décantation .....	44
Figure V-8 : Partie plane et inclinée dans le sens de la largeur "l" .....	44
Figure V-9 : Relation entre "d" et "e" .....	45
Figure V-10 : Surface d'un module de forme ondulée.....	46
Figure V-11 : Implantation des modules ondulés dans la surface de décantation .....	47
Figure V-12 : Mode de réalisation des modules hexagonaux .....	52
Figure V-13 : Forme particulière de module .....	53
Figure VI-1 : Représentation spatial du volume de contrôle .....	56
Figure VI-2 : Description d'une particule fluide .....	57
Figure VI-3 : Limites de l'hypothèse de continuité .....	57
Figure VI-4 : Lignes de courants, trajectoires des corpuscules en suspensions autour d'un obstacle.....	65
Figure VI-5: Mise à plan d'une structure de bâtiment.....	73
Figure VI-6 : Visualisation réaliste de l'intérieur d'un bâtiment .....	74
Figure VI-7 : Organigramme de pré-dimensionnement basée sur le modèle de Hazen.....	75
Figure VI-8 : Organigramme de conception de la géométrie d'écoulement.....	76
Figure VI-9 : Organigramme de calibrage du modèle physique .....	77
Figure VI-10 : Organigramme d'optimisation du fonctionnement d'un décanteur .....	78
Figure VII-1 : Rendue et coupe en trois dimensions du décanteur Prat-Daniel .....	84
Figure VII-2 : Surface de décantation du décanteur Prat-Daniel .....	85
Figure VII-3 : Perspective en 3D des modules lamellaires implantés dans le décanteur Prat-Daniel .....	86
Figure VII-4 : Lignes de courant (bleu) et trajectoires des particules solides (marron), aux instants $t = 250 ; 1100$ ; $1500 ; 1800$ [s].....	90
Figure VII-5 : Concentration de la phase dispersée exprimée par la fraction volumique $\Phi$ aux instants $t = 50 ; 250;$ $1100; 1500$ [s].....	92
Figure VII-6 : répartition 3D de concentration des particules dans le décanteur Prat – Daniel .....	93

Figure VII-7 : Modélisation géométrique en trois dimensions de l'implantation des lamelles hexagonales dans le décanteur Prat – Daniel .....	94
Figure VIII-1 : Plan de masse de la station de traitement d'eau potable Sabotsy Namehana .....	98
Figure VIII-2 : Description du fonctionnement de l'ouvrage de clarification Sabotsy Namehana.....	100
Figure VIII-3 : Perspective en 3D des modules lamellaires implantés dans le décanteur de Sabotsy Namehana	101
Figure VIII-4 : Géométrie (volume de contrôle) et Maillage en deux dimensions de l'une des variantes.....	104
Figure VIII-5 : Variante <b>A-I</b> , ouvrage sans lamelles, orifice d'ouverture munie d'un déflecteur, douze goulottes de récupération d'eau décantée .....	106
Figure VIII-6 : Variante <b>A-II</b> , décanteur lamellaire, orifice d'ouverture simple sans déflecteur, douze goulottes de récupération d'eau décantée .....	106
Figure VIII-7 : Variante <b>A-III</b> , décanteur lamellaire, ouverture avec déflecteur seul, Onze goulottes de récupération d'eau décantée .....	107
Figure VIII-8 : Variante <b>A-IV</b> , décanteur lamellaire, orifice d'ouverture munie d'un déflecteur, six goulottes de récupération d'eau décantée .....	107
Figure VIII-9 : Variante <b>A-V</b> , décanteur à lamelles dirigées dans le sens de l'écoulement, orifice d'ouverture munie d'un déflecteur, six goulottes de récupération d'eau décantée.....	108
Figure VIII-10 : Variante <b>A-VI</b> , décanteur à lamelles dirigées dans le sens opposé d'écoulement, orifice d'ouverture munie d'un déflecteur, six goulottes de récupération d'eau décantée.....	108
Figure VIII-11 : Répartition de vitesse à la sortie (haut) et au milieu (bas) des compartiments lamellaires.....	111
Figure VIII-12 : Réalisation 3D de la variante <b>A-VI</b> , maillage (haut), et ligne de courant (bas).....	111
Figure VIII-13 : Géométrie et maillage des deux variantes <b>B-I</b> et <b>B-II</b> .....	114
Figure VIII-14 : Variante <b>B-II</b> , alimentation uniforme dirigée vers le bas.....	115
Figure VIII-15 : Variante <b>B-I</b> , alimentation uniforme dirigée vers le haut.....	115
Figure VIII-16 : Dimensions détaillées de la première variante .....	117
Figure VIII-17 : Rendue en trois dimensions (3D) de la première variante.....	118
Figure VIII-18 : Vue en perspective de l'ensemble décanteur-filtre de la deuxième variante.....	120
Figure VIII-19 : Rendue en trois dimensions de la seconde variante.....	121
Figure VIII-20 : Dimensions détaillées de la zone de décantation de la deuxième variante .....	123
Figure VIII-21 : Différence de dimensions des ouvrages d'un décanteur lamellaire et d'un décanteur simple..	127

## INTRODUCTION

Pendant les dernières décennies, l'eau est devenue l'un des plus importantes préoccupations mondiales car c'est l'un des éléments naturels indispensables à l'existence de la vie planétaire. À Madagascar, le Code de l'EAU spécifie : « *Parce qu'élément vital de la Nation, elle est qualifiée de patrimoine commun national. Parce que denrée de plus en plus rare [...] la ressource en eau est classée dans la catégorie juridique des "choses communes"* ».

L'approvisionnement en eau potable consiste à distribuer en permanence une eau dont la potabilité est fixée par les normes en vigueurs. Mais le problème se pose sur le type de traitement à appliquer selon la diversité de nature et la variation temporelle de la qualité de l'eau brute à traiter. En considérant le cas de l'usine de traitement d'eau potable de Mandroseza construit en 1924, la turbidité varie de 80 à 100 [NTU] pendant les évènements pluvieux et reste stable autour de 10 [NTU] pendant la saison sèche. Une telle variation est due aux dégradations de l'environnement et des pollutions venant des zones urbanisées. Les ouvrages de clarifications tels que les décanteurs et les filtres doivent donc travailler dans des conditions extrêmes pendant un courte durée des saisons de pluies et travailler dans des conditions normales pendant une longue durée des saisons sèches. Parallèlement à l'augmentation de la demande des consommateurs, ces ouvrages sont actuellement saturés et nécessitent l'investissement des moyens nécessaires pour soigner les entretiens et rénover les principes de fonctionnements en vue de rehausser leurs performances.

Le cas de Mandroseza bénéficie d'une longue expérience en traitement des eaux donc peut servir de modèle pour les nouvelles infrastructures. En effet, l'objectif de la rénovation des systèmes de clarification consiste non seulement à résoudre les problèmes actuels liés aux traitements des eaux, mais aussi à élaborer un modèle à appliquer dans les conceptions à venir. C'est dans ce sens que trouve l'application des avantages offerts par **la décantation lamellaire**.

La conception d'un tel système pose des défis techniques à relever faisant intervenir la science de l'ingénieur. On détermine l'hydraulique comme la science qui traite des lois de l'équilibre et du mouvement des liquides ainsi que des modes d'application de ces lois à la résolution de problèmes pratiques. Nous orientons notre étude dans l'utilisation des outils informatiques pour surpasser les contraintes dans le but d'assurer le bon fonctionnement du

système. Le concept<sup>1</sup> de l'étude consiste à monter **un modèle de simulation**<sup>2</sup> assez puissant pour être utilisée (1) dans la conception des configurations géométriques, c'est-à-dire dimensionnement de géométrie d'écoulement stable, favorable pour les conditions de séparation de phase (eau claire et boue) ; (2) dans une telle configuration, simuler la distribution de concentration en particule solide dans l'ouvrage, si les moyens utilisées nous offrent les possibilités.

Pour mener une telle étude, ce travail de mémoire se divise en trois parties :

- Première partie, la mise en contexte de l'étude : développe les contextes liés à la distribution spatiale des zones étudiées à l'aide des outils de cartographie, le contexte juridique fixant les normes en vigueur et les problèmes d'actualité.
- Deuxième partie, bases théoriques et outils de conception d'un décanteur lamellaire : développe la partie théorique et méthodique de la conception
- Troisième partie, étude de cas : développe l'application au cas de Mandroseza et de Sabotsy Namehana

---

<sup>1</sup> *Représentation intellectuelle d'un objet conçu par l'esprit.* Le Petit Larousse 1993

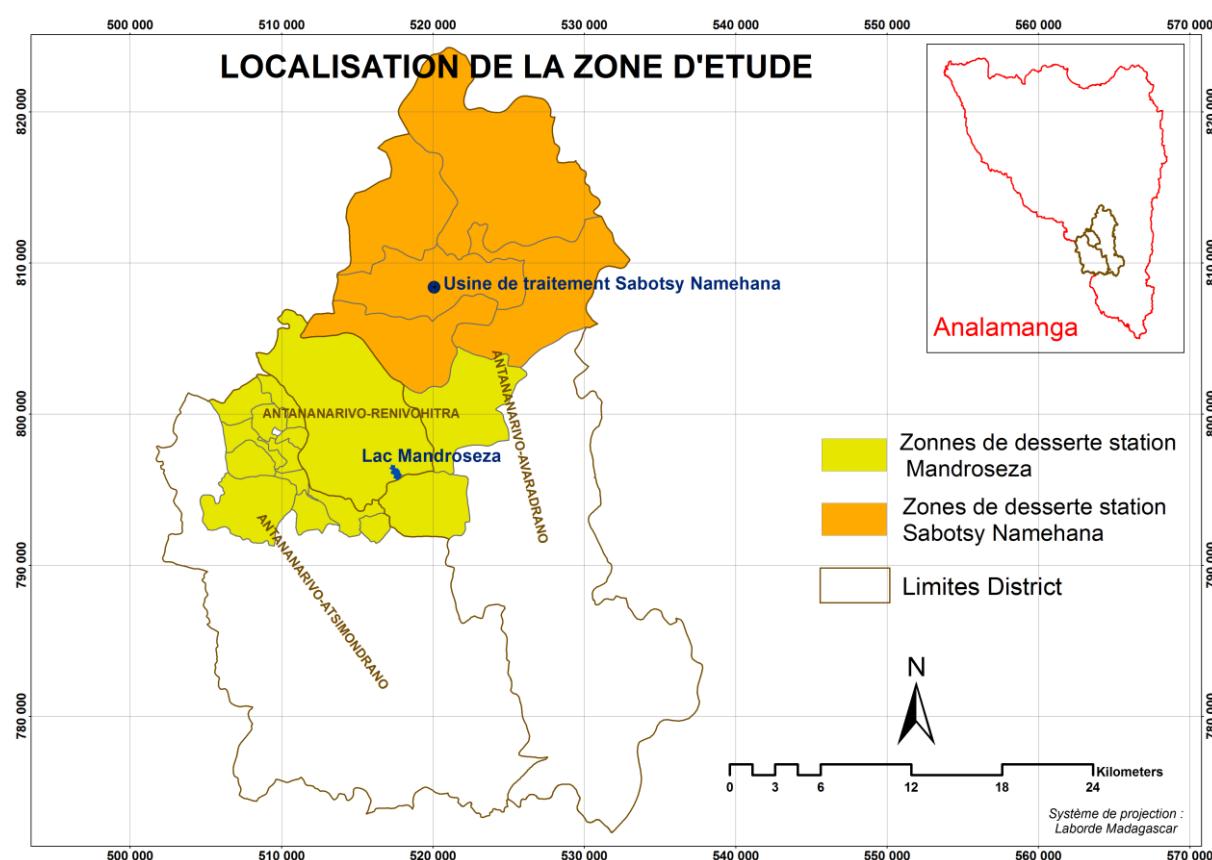
<sup>2</sup> *Méthode de mesure et d'étude consistant à remplacer un phénomène, un système à étudier par un modèle plus simple mais ayant un comportement analogue.* Le Petit Larousse 1993

# **PARTIE – I MISE EN CONTEXTE DE L’ETUDE**

## CHAPITRE I - SITUATION GEOGRAPHIQUE

Avant d'aborder notre étude, nous allons utiliser les outils de la cartographie numérique pour expliquer le contexte lié à la distribution spatiale des communes desservies par la JIRAMA aux alentours de notre zone d'étude.

Dans les années **1924**, les premières installations d'infrastructure de traitement d'eau potable exploitant le Lac Mandroseza ont été installées pour satisfaire aux besoins des Tananariviens. Cette station fait sans doute partie des plus anciennes constructions à Madagascar. Depuis des années, elle a été améliorée en fonction des extensions de la ville et des besoins suivant le rythme d'accroissement de la population, et même après 90 années d'exploitation, elle doit d'assurer la production d'eau potable en quantité et en qualité pour ces clients à desservir.



Carte 1 : Localisation de la zone d'étude, Les principales communes desservies par la station de traitement de Mandroseza et de Sabotsy Namehana

Du point de vue réseau, elle est en mesure de satisfaire parfaitement les besoins de la commune urbaine d'Antananarivo et, pour des raisons d'extensions, quelques communes l'environnant. La population ne cessant de s'accroître et les besoins avec, il serait intéressant d'exploiter des nouvelles ressources pour desservir des nouvelles abonnées. Dans ces conditions, la station de Sabotsy Namehana fait partie des nouvelles extensions et exploitation de la JIRAMA vers la partie Nord (district Antananarivo Avaradrano). La **carte 1** localise la zone d'étude constituant au Sud par la commune urbaine d'Antananarivo et ses environnements, et au Nord par les communes desservies par la station de Sabotsy Namehana.

## I.1 Usine de traitement de Mandroseza et les communes à desservir

### I.1.1 Historique de la station de Mandroseza :

Mandroseza I, l'ancienne station de traitement créée en 1924 s'est agrandie suivant le besoin de la consommation de la capitale et les extensions de réseaux :

- **1924** : la station débitait 800 m<sup>3</sup>/h avec 3 décanteurs verticaux Prat-Daniels ;
- **1958** : installation du premier décanteur Accelerator pouvant traiter 1000 m<sup>3</sup>/h ;
- **1968** : rajout d'un nouveau décanteur appelé Pulsator I avec un débit nominal de 1200m<sup>3</sup>/h ;
- **1978** : installation de Pulsator II avec un débit 1500 m<sup>3</sup>/h ;

Mandroseza II : inaugurée en 1993, fonctionne avec un débit nominal de 70 000 m<sup>3</sup>/j.

### I.1.2 Ressource en eau et communes à desservir

À travers les deux stations de traitement de Mandroseza 1 et Mandroseza 2 et de leurs réseaux de distribution, La JIRAMA couvre à elle seule l'intégralité des communes du district d'Antananarivo Renivohitra composé par les six arrondissements. En raison d'extensions et renforcement, ce réseau s'élargit sur les communes voisines telles qu'Ambohimangakely, Alasora, Ampitatafika, Ilafy.

Les bouts de réseau de distribution sont délimités au Nord par la commune Sabotsy Namehana, au Sud par Amboanjobe, à l'Est par Ambohimangakely, à l'Ouest par Ambohidratrimo. Mais actuellement la partie ouest d'Ambohidratrimo est assurée principalement par la station de Faralaza, le Nord par la nouvelle station de Sabotsy Namehana,

et une nouvelle extension est en plein étude pour la partie Sud. La station de Mandroseza aura donc comme principal charge la commune urbaine d'Antananarivo.



*Carte 2 : Communes desservies par la station Mandroseza*

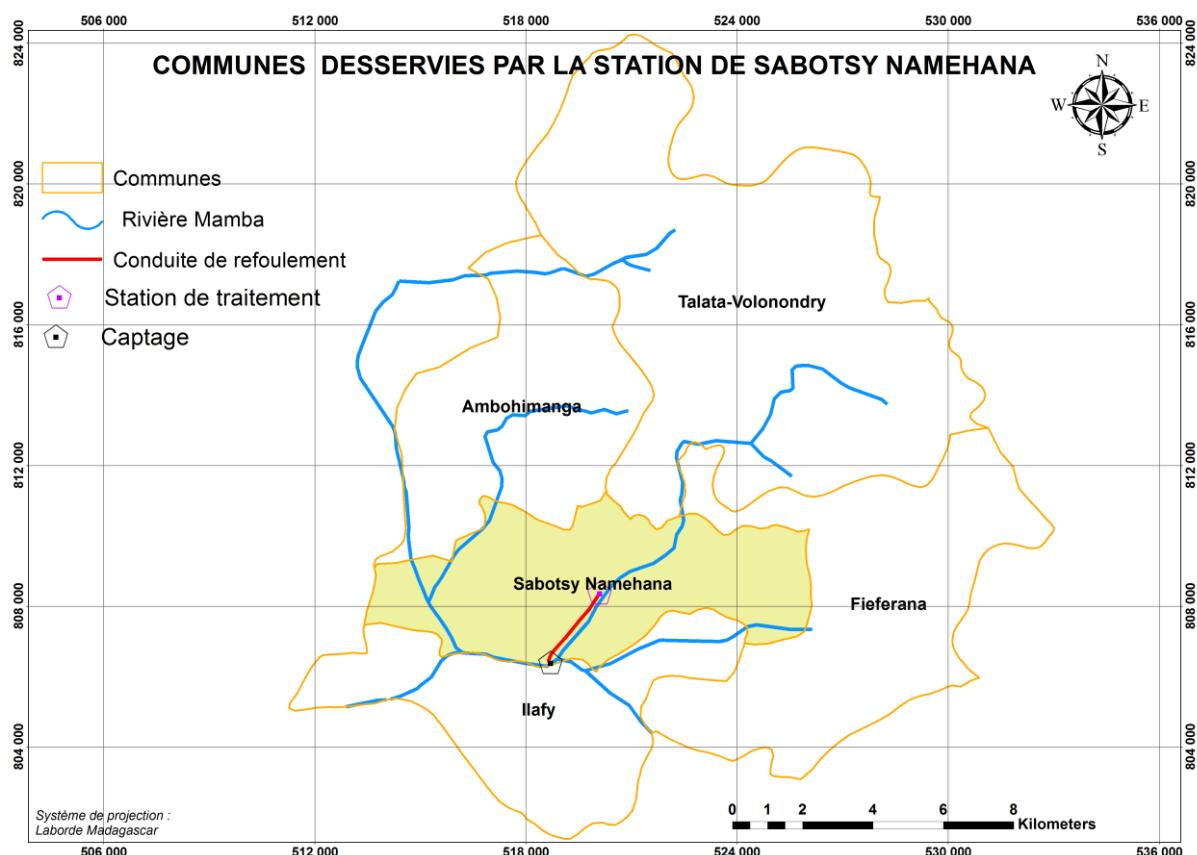
Depuis ces premiers fonctionnements, l'usine de traitement d'eau potable de Mandroseza exploite le lac de 44 [ha] et de profondeur moyenne 3 [m]. En période pluvieuse, les ruissellements venant des versants se déversent directement dans le lac. La zone urbanisée déverse un ruissellement plus ou moins polluant et surtout chargé en matières en suspension et colloïdales. En période d'étiage, elle est renforcée par pompage de la rivière Ikopa. Dans les fonctionnements normaux, ce lac assure un rôle de pré-décantation. Mais à cause de ses problèmes d'envasement, à un moment donné le lac n'assurerait plus correctement le rôle qui lui est confié. Par conséquence, la qualité de l'eau pompée au niveau des captages varient largement ; et, outre la demande des consommateurs augmentant de plus en plus, des fluctuations considérables sur la variation de la qualité de l'eau à traiter influence beaucoup sur la sollicitation des ouvrages de traitement qui étaient dimensionnés dans des conditions moins désastreux.

Parallèlement en application avec les variantes proposées pour la protection du lac, notre étude propose des solutions pour résoudre les influences de ces dégradations sur les infrastructures de traitement. Principalement nous nous intéressons sur l'influence des concentrations élevées en matières en suspensions sur les ouvrages de clarification tels que décanteur et filtre.

## I.2 Usine de traitement de SABOTSY NAMEHANA

### I.2.1 Les communes à desservir

La station de Sabotsy Namehana est conçue pour l'exploitation d'une nouvelle ressource en vue d'élargir le rayon d'action de la JIRAMA vers la partie nord, le district d'Antananarivo Avaradrano. Elle puise ses ressources dans la rivière Mamba pour prélever un débit d'exploitation de 100 [m<sup>3</sup>/h]. Ce débit sert principalement aux satisfactions des besoins de la commune Sabotsy Namehana, et aussi de ses communes voisins.



Carte 3 : Communes desservies par la station de traitement de Sabotsy Namehana

Le captage est localisé 18°50'29.06"S ; 47°33'50.44"E à une élévation de 1262 [m], un peu en amont du pont de Sabotsy Namehana. Une conduite de 3 [km] de long de diamètre 250 [mm] refoule l'eau brute jusqu'à la station de traitement située à Mahatsinjo - Ambatofotsy, 18°49'14.11"S ; 47°34'37.54"E à une élévation de 1306 [m].

### I.2.2 Rivièr e Mamba, station de référence au pont de Sabotsy

La Mamba, petit affluent rive droite de l'Ikopa, l'a rejoint entre le pont de Mahitsy et le confluent de la Sisaony, la station de Sabotsy (18°45'S - 47°48'E) contrôle un bassin de 104 km<sup>2</sup> (Fleuve et Rivière de Madagascar).

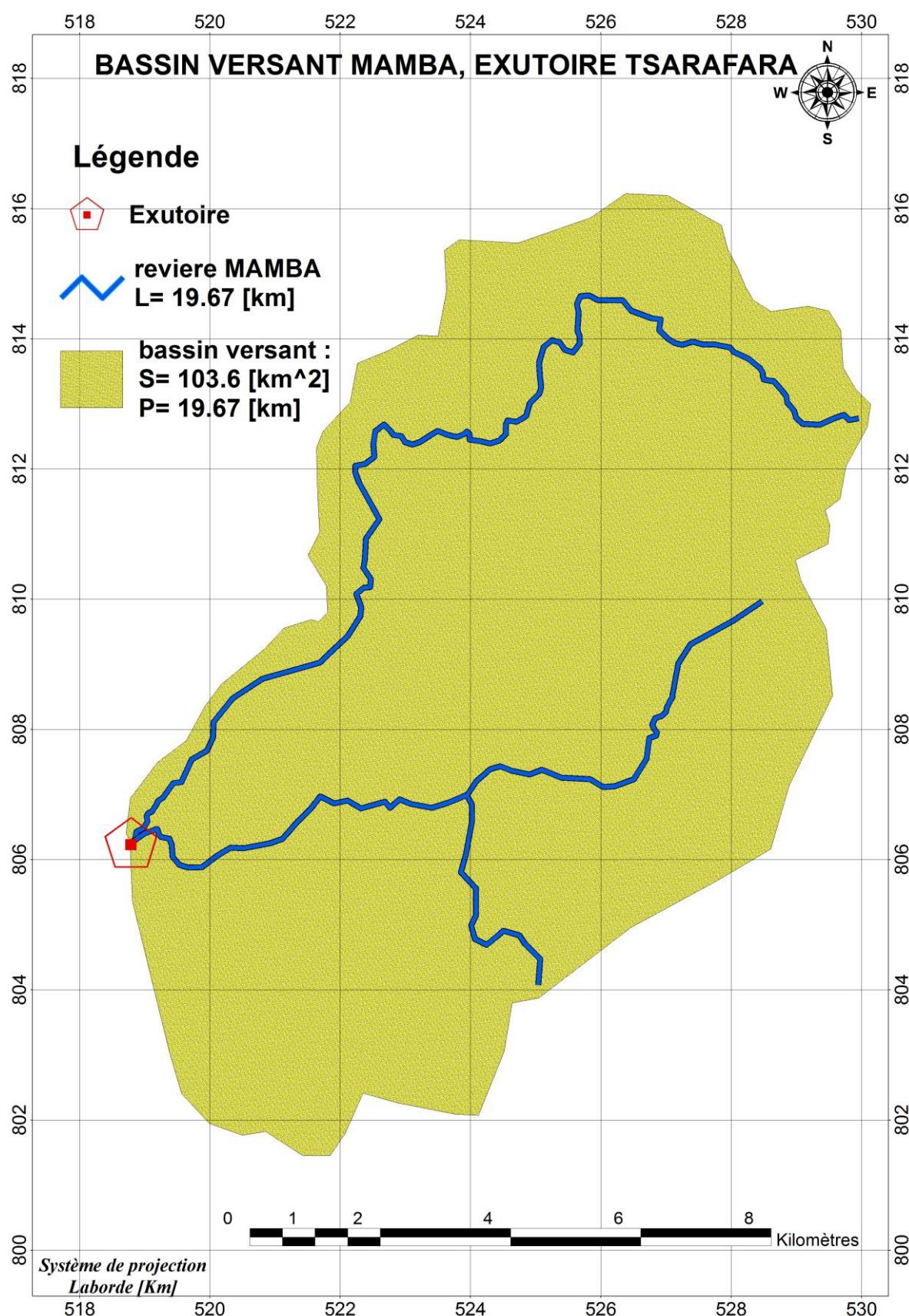
Les valeurs données dans Fleuve et Rivière de Madagascar donne des débits mensuels exprimées en [m<sup>3</sup>/s] au pont Sabotsy depuis les années d'observation 1964 à 1966 qui peuvent servir de référence pour notre bassin dont l'exutoire se situe un peu en amont au barrage de rehaussement Tsarafara :

*Tableau I-1 : Mamba au pont Sabotsy, débit mensuel*

année	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	Moyenne
<b>64-65</b>	0,11	1,05	3,08	2,14	1,05	0,71	0,48	0,31	0,49	0,54	0,49	0,4	0,90
<b>65-66</b>	0,41	0,72	0,76	0,29	0,34	0,31	0,34	0,13	0,26	0,33	0,33	0,2	0,37

Dans la même référence, il donne une valeur de débit minimale journalier de 70 [l/s], soit 252 [m<sup>3</sup>/h] observée du 22 au 24-11-64.

D'après ces références de données, la rivière est suffisante pour l'extraction d'un débit d'exploitation 100 [m<sup>3</sup>/h]. En fonction des évolutions des paramètres hydrologiques et climatologique, ces valeurs servent d'ordre de grandeur, et nous réservons l'étude de l'évaluation quantitative des ressources en eau aux spécialistes du domaine. Néanmoins, ces ordres de grandeurs peuvent servir de référence avant d'entamer le problème de qualité et de traitement des eaux.



Carte 4 : Bassin versant de la rivière Mamba, exutoire au barrage de rehaussement Tsarafara

## CHAPITRE II - CONTEXTES REGLEMENTAIRES ET CADRE JURIDIQUE

Le Droit de l'eau a des racines très anciennes. Mais si depuis l'Antiquité l'accès à l'eau et à ses usages a toujours fait l'objet d'une réglementation, les textes relatifs à la qualité des eaux sont beaucoup plus récents. C'est à Londres que l'hypothèse de la transmission du choléra par l'eau (contaminée par les matières fécales) a été émise pour la première fois par Snow lors de la sévère épidémie de 1852-1854.

Actuellement à Madagascar, le domaine de l'approvisionnement en eau potable fait partie des domaines les plus strictes et possède des textes de bases bien fondée dans les cadres juridiques. Ces textes de bases, mentionnés sous forme de Lois et Décret, spécifient clairement ce qu'on qualifie sous le nom de « Norme Malgache de potabilité des eaux destinées à la consommation humaine ». Ces normes obligent tout acteur dans le cadre de l'approvisionnement en eau potable de se préoccuper préalablement de la qualité de l'eau avant la distribution.

### II.1 Notion de potabilité

Selon la Loi n° 98-029 du 20 janvier 1999 portant Code de l'Eau (J.O. n° 2557 E.S. du 27.01.99, p. 735) (Art. 38) : « Toute eau livrée à la consommation humaine doit être potable. Une eau potable est définie comme une eau destinée à la consommation humaine qui, par traitement ou naturellement, répond à des normes organoleptiques, physico-chimiques, bactériologiques et biologiques fixées par décret. »

Le DECRET N° 2004-635 du 15 juin 2004, Portant modification du décret n°2003-941 du 09 Septembre 2003 relatif à la surveillance de l'eau, au contrôle des eaux destinées à la consommation humaine et aux priorités d'accès à la ressource en eau donne la définition eau potable : « Toute eau destinée à l'alimentation humaine ne doit jamais être susceptible de porter atteinte à la santé de ceux qui la consomment. Elle doit de plus, si possible, être agréable à consommer. »

Et le décret n°2003-941 du 09 Septembre 2003 relatif à la surveillance de l'eau, au contrôle des eaux destinées à la consommation humaine et aux priorités d'accès à la ressource en eau, souligne que « la vérification de la qualité de l'eau est assurée conformément au

programme d'analyse d'échantillons définis, en collaboration avec les laboratoires agréés, par le Ministère de la Santé » (Art 12).

## **II.2 Importance du cadre de l'approvisionnement en eau potable dans la gestion de la ressource en eau**

L'eau a depuis toujours fait l'objet d'un enjeu capital. Actuellement, elle occupe une place aussi importante car, spécifié clairement dans la Loi n° 98-029 du 20 janvier 1999 portant Code de l'Eau (J.O. n° 2557 E.S. du 27.01.99, p. 735), article premier : « L'eau fait partie du patrimoine commun de la Nation. Chaque collectivité en est le garant dans le cadre de ses compétences ».

D'autre texte comme le DECRET N° 2003-941 du 09 septembre 2003 Relatif à la surveillance de l'eau, au contrôle des eaux destinées à la consommation humaine et aux priorités d'accès à la ressource en eau confirme dans son premier article que « l'approvisionnement en eau potable demeure, dans tous les cas, l'élément prioritaire dans la répartition des ressources en eau ».

Considéré donc comme élément prioritaire, le domaine de l'approvisionnement en eau potable fait appel à différentes disciplines pour la maîtrise de ces différentes composantes afin de satisfaire les besoins des clients en quantité et en qualité. Visant particulièrement la qualité, fixée par des normes spécifiées plus haut, ce mémoire développe le cadre de la recherche de nouvelles technologies en application pour réduire au minimum le coût d'exploitation de l'eau tout en respectant les exigences spécifiées dans ces textes règlementaires.

## CHAPITRE III - CADRE DE CONCEPTION LIE AUX PROBLEMES ACTUELS

La performance d'une station de traitement est évaluée par sa capacité de production, c'est-à-dire son débit de production en eau potable. Dans le cas du traitement des eaux de surface, cette capacité est limitée par le débit maximal que peuvent supporter les ouvrages de clarification tels que décanteur et filtre. Ce sont ces ouvrages qui constituent les principales contraintes dans l'augmentation du débit d'exploitation d'une station de traitement. Les ouvrages de clarification doivent avoir la souplesse d'assurer leurs rôles, donner de l'eau claire de **turbidité inférieure à 5 [NTU]**, dans des conditions variables dans le temps.

### III.1 Problématiques de traitement et d'infrastructure

Cette partie cherche à quantifier le dynamisme de fonctionnement des ouvrages suivant la variation saisonnière de la qualité d'eau de surface. On va l'évaluer dans les conditions extrêmes (fonctionnement à court terme) et des conditions normales (fonctionnement à long terme) exprimées par des débits et turbidité évalués mensuellement. Comme exemple de Modèle de fonctionnement, celui de la station de Mandroseza se présente comme le cas idéal servant d'illustration.

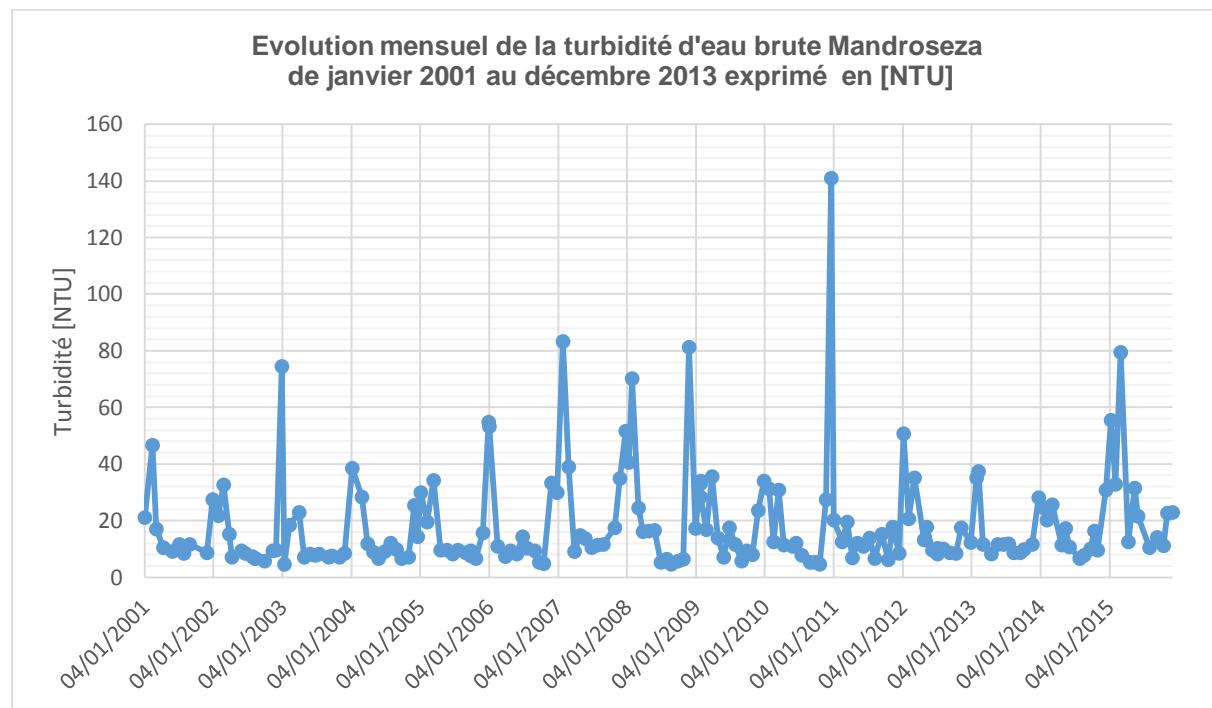
#### III.1.1 Qualité des eaux à traiter

La qualité des ressources exploitées par la JIRAMA sont conformément soumis à des contrôles de qualité en effectuant des échantillonnages et analyses chimiques régulières et fréquentielles donnant les paramètres exigées par les textes en vigueur. Pour des raisons purement disciplinaires, il est impossible d'analyser tous les paramètres mesurés. Nous réservons aux spécialistes des procédées chimiques l'observation un à un de l'évolution de chaque paramètres.

Comme nous nous intéressons aux ouvrages de clarification, notre analyse se focalise donc sur le paramètre « turbidité », un paramètre physique essentiel pour quantifier la variation de la qualité d'eau brute à traiter. En effet, c'est le paramètre qui varie le plus au cours des saisons. La turbidité d'une eau est due à la présence des particules en suspension, notamment colloïdales. L'appréciation de l'abondance de ces particules mesure son degré de turbidité. Celui-ci sera d'autant plus faible que le traitement de l'eau aura été plus efficace.

### **III.1.1.1 Evolution de la turbidité pendant la durée d'observation**

La turbidité est contrôlée au moins une fois par mois. L'analyse se base sur l'évolution temporelle de la variation de la turbidité observée à travers des données mesurées de Janvier 2001 au décembre 2013.



*Figure III-1 : Evolution mensuel de la turbidité d'eau brute du Lac Mandroseza*

La courbe possède des pics qui correspondent à une variation brusque de la turbidité en passant d'un mois à un autre, on observe les valeurs extrêmes pendant les périodes pluvieuses, la majeure partie en décembre et en janvier : 54,9 [NTU] en décembre 2005 ; 83,3 [NTU] en janvier 2007 ; 141 [NTU] en décembre 2010 ; 50,7 [NTU] en janvier 2012. Pendant cette période, qui est assez courte, les ouvrages de clarification travaillent dans leur fonctionnement extrême, l'eau à traiter contient un taux élevé en matériaux en suspension. Le flux massique devient un paramètre déterminant dans le fonctionnement d'un décanteur, c'est à ce moment qu'on va exploiter l'avantage offerte par l'application des lamelles.

La base assez stable correspond aux faibles variations de la turbidité pendant les saisons sèches, ces valeurs se répartissent autour de 10 [NTU]. Pendant cette période, les ouvrages de clarification travaillent dans leur fonctionnement nominal, l'eau à traiter est moins chargé en matières en suspensions et colloïdales.

### III.1.1.2 Moyenne mensuelle interannuelle

Dans cette partie, on va essayer de trouver la tendance moyenne de la variation de la turbidité pendant une année en effectuant la moyenne interannuelle, c'est-à-dire la valeur moyenne des valeurs mensuelles calculées pour les 13 années d'observations. On obtient ainsi une courbe donnant la tendance et la répartition moyenne mensuelle de la turbidité.

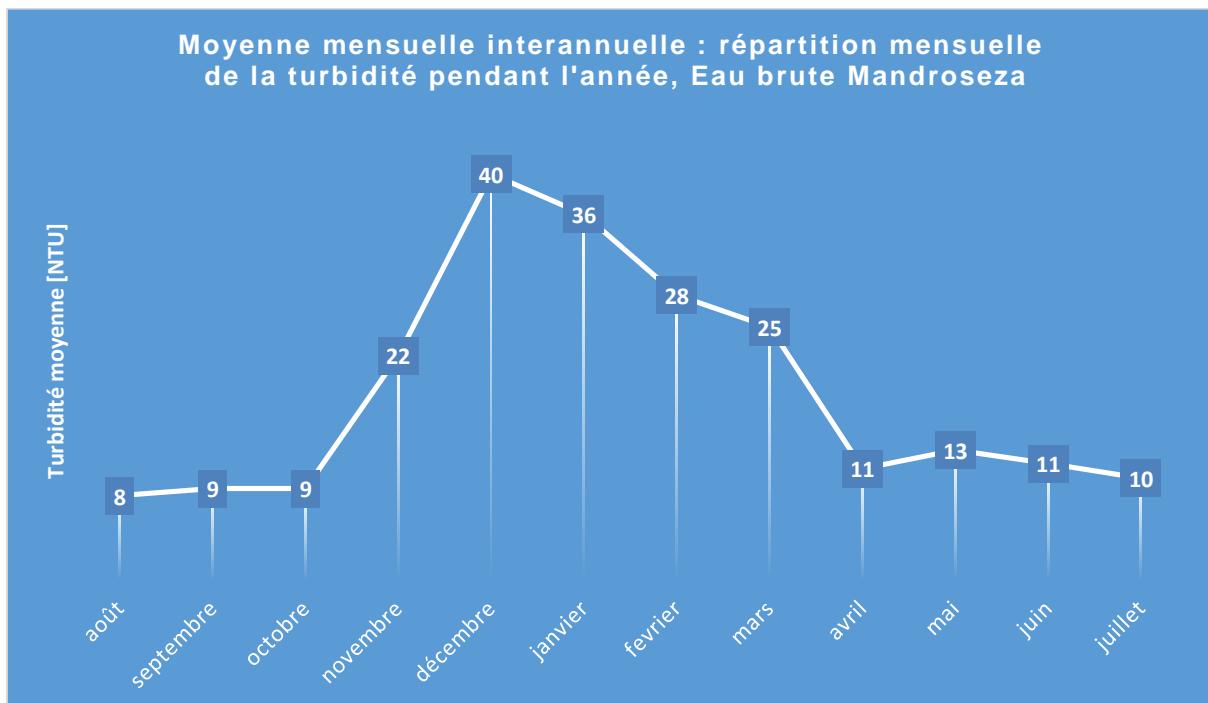


Figure III-2 : Tendance de la répartition annuelle de la turbidité, cas eau brute du Lac Mandroseza

L'allure de la courbe s'apparente à une cloche, assimilable à un hydrogramme de crue. C'est raisonnable de postuler une comparaison entre les deux phénomènes car en réalité, un taux élevé en matières en suspension est toujours véhiculé par un fort débit de pluie ; à l'opposée, ce taux est stable pendant les périodes sèches.

Pour le cas de Mandroseza, la turbidité commence à monter en octobre, atteint son sommet en mois de Novembre puis redescend jusqu'en avril. Pendant les périodes de tarissements, commençant en Avril jusqu'en Octobre, la turbidité de l'eau est assez stable autour 10 [NTU].

### III.1.2 Besoins exigés par les consommateurs (quantité)

La variation de la demande des consommateurs est l'autre paramètre à considérer pour bien gérer le fonctionnement des stations de traitements existantes. Vraisemblablement que la variation de la demande en eau des consommateurs n'influe pas directement sur le fonctionnement en temps réel de la station de traitement en raison du rôle intermédiaire du réseau de distribution ; mais elle influe sur la production mensuel de la station de traitement. Sur base de six années, 2009 à 2015, on peut apprécier la tendance de la variation en [m<sup>3</sup>] de la consommation en eau de la ville de Tananarive. En effet, la maîtrise de cette tendance présente un enjeu important du point de vue dynamisme de production en eau des stations et influence particulièrement sur les dynamismes de fonctionnement des ouvrages de clarification tels que décanteurs et filtres.

#### III.1.2.1 Evolution de la consommation mensuelle pendant la durée d'observation

A travers ces années d'observation, nous pouvons apprécier, pour le cas des abonnées de la ville de TANA, l'évolution de la consommation mensuelle.

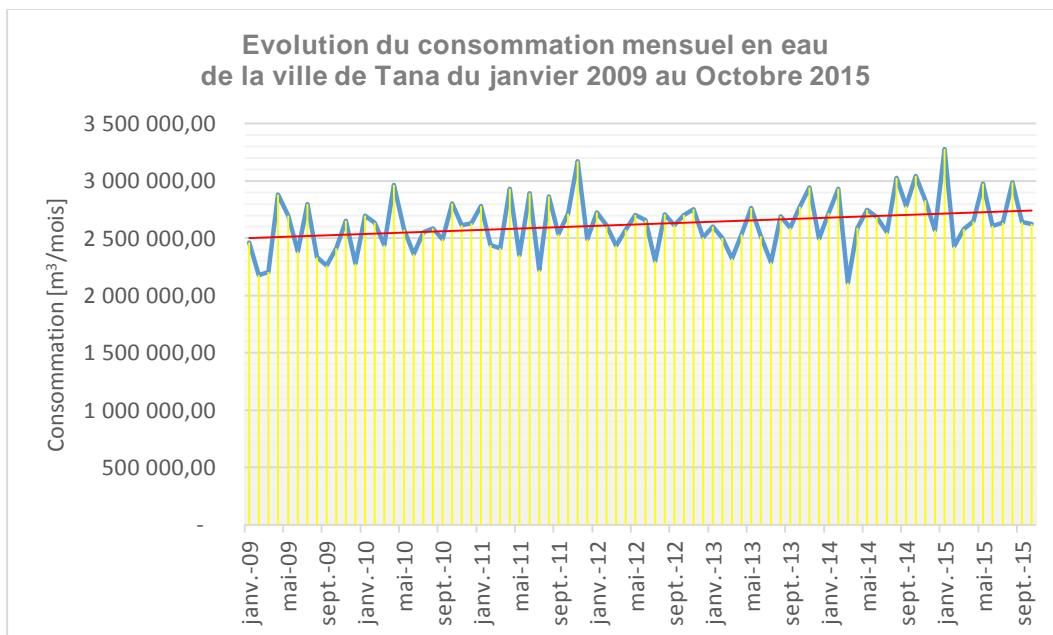


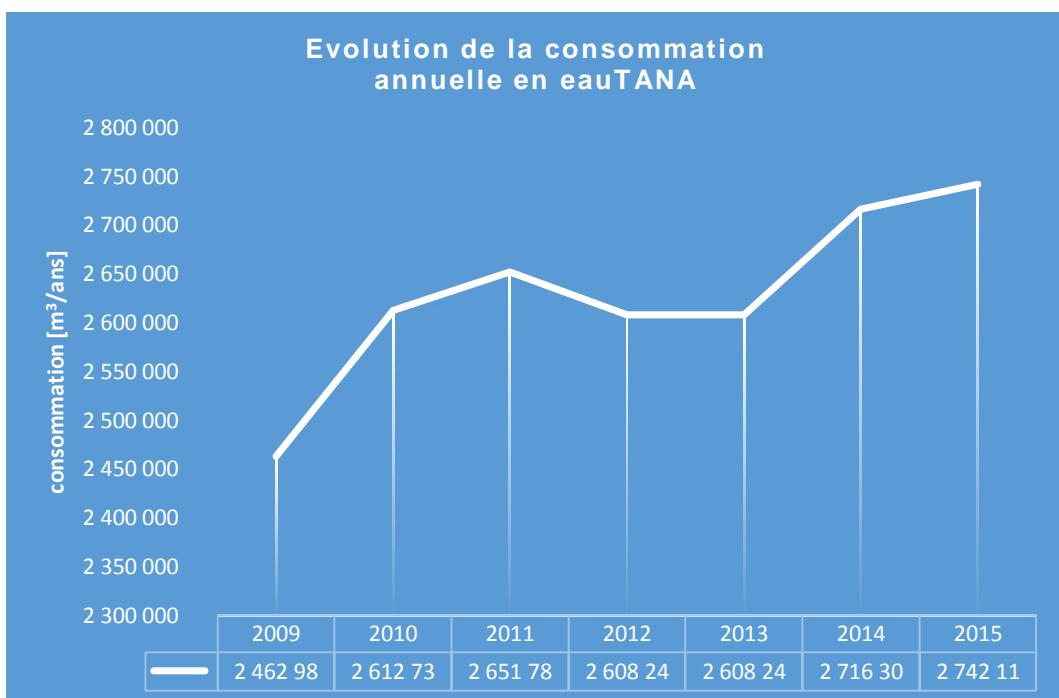
Figure III-3 : Consommation mensuel de la ville de Tana

A ce niveau-là, on constate une variation plus ou moins fréquentiel de cette consommation mensuelle autour de la moyenne 2 622 915,43 [m<sup>3</sup>/mois] (*figure III – 3*). Et toutefois, cette variation se fait brusquement d'un mois à un autre. L'évolution a tendance à

augmenter légèrement, ce qui veut dire que le besoin augmente même à faible pente. On observe la demande maximale 3 281 285 [m<sup>3</sup>] en janvier 2015, la demande minimale 2 110 773 [m<sup>3</sup>] en mars 2014.

### ***III.1.2.2 Evolution de la consommation annuelle pendant la durée d'observation***

D'autre part, si nous passons à l'observation annuelle, nous constatons tout de suite la demande croissante des consommateurs pendant les années d'observation. La consommation annuelle est la somme des consommations mensuelles.



*Figure III-4 : Tendance de l'augmentation annuelle de la consommation*

Cette consommation annuelle est passée de 29 555 831,00 [m<sup>3</sup>] en 2009 à 32 864 952,17 [m<sup>3</sup>] en 2015. On constate à peu près une augmentation de 200 000 à 1 000 000 de [m<sup>3</sup>/ans]. La représentation graphique de la *figure III – 4* témoigne bien la tendance de l'augmentation de cette consommation annuelle.

### ***III.1.2.3 Résumé***

Le *tableau III – 1* résume les différentes valeurs du besoin du consommateur dans lequel nous allons exploiter.

Tableau III-1 Différentes valeur de la consommation

	maximal des moyennes mensuelles interannuelles				MAX	MIN	MOYENNE
	janvier	avril	août	novembre	janv-15	mars-14	avr-14
<b>m<sup>3</sup>/mois</b>	2 753 551	2 732 332	2 743 379	2 828 813	3 281 285	2 110 773	2 625 272,16
<b>m<sup>3</sup>/j</b>	91 795	91 077	91 445	94 293	109 376	70 359	87 509,07

### III.1.2.4 Prise en compte du rendement de réseau

Un bon réseau doit permettre d'obtenir un rendement de 80%. En France, le rendement est inférieur à 70% pour 50% des réseaux ; il est inférieur à 60% pour 25% des réseaux (*source : Mémento Lyonnaise des Eaux*). Pour le cas de la ville d'Antananarivo, le cas est plus critique pour des raisons d'entretien des réseaux de distribution et d'usure des conduites de distribution, on estime un rendement de 60%. La station doit donc produire un volume pouvant satisfaire largement la demande des consommateurs en prenant en considération le rendement du réseau.

### III.1.3 Insuffisance de performance des infrastructures existantes

L'usine de production d'eau potable de Mandroseza fonctionne à une capacité nominale de  $2 * 60\ 000 \text{ [m}^3/\text{j}] = 120\ 000 \text{ [m}^3/\text{j}]$ . En considérant un rendement 60%, vue l'état du réseau de distribution, on estime à  $72\ 000 \text{ [m}^3/\text{j}]$  l'eau arrivant au robinet du consommateur.

Par rapport à la demande des consommateurs, les ouvrages de clarification sont surexploités et parfois même travaillent dans des conditions inattendues. Il suffit de comparer la valeur  $72\ 000 \text{ [m}^3/\text{j}]$  par les différentes valeurs données par le tableau, elle n'est plus en mesure d'assurer la consommation moyenne  $87\ 000 \text{ [m}^3/\text{j}]$  et même ce débit nominal est trop juste par rapport à la consommation minimal  $70\ 300 \text{ [m}^3/\text{j}]$ .

Situation le plus défavorable : En considérant la variation de la turbidité, nous arrivons aux mois les plus critiques du fonctionnement des ouvrages de clarification, le mois de **Novembre** et le mois de **Janvier**. En effet, pendant ces périodes les consommateurs demandent un volume de  $91\ 000$  à  $94\ 000 \text{ [m}^3/\text{j}]$ , et aussi la valeur de la turbidité de l'eau brute à traiter atteint un maximum. De ce fait, pendant ces mois-là, les ouvrages de clarification sont à la fois sollicités par une demande d'augmenter le débit de production, et un taux élevé de

matière en suspension à traiter. Actuellement, pendant ces périodes les ouvrages fonctionnent dans des conditions surexploitation, car ils ont été dimensionnés dans des conditions bien différentes.

### **III.2 Conception des infrastructures innovants (en quantité et en qualité)**

Dans tous les contextes et préoccupations cités précédemment, ce mémoire se développe dans le cadre de la recherche de nouvelles technologies en application pour réduire le coût d'exploitation de l'eau. Les longues années d'expérience dans le cadre du traitement de l'eau potable fait de la JIRAMA l'entreprise le plus crédible dans ce domaine surtout pour les grandes constructions. Les travaux de recherches présentés dans ce mémoire ne met pas en question l'efficacité des techniques appliquée jusqu'à maintenant, au contraire, ces recherches tentent, d'abord de valoriser cette longue expérience et en suite d'aborder des astuces techniques pouvant s'adapter facilement aux techniques antérieures. De toute manière, l'application des lamelles est de nos jours une technique incontournable à cause des performances qu'elle offre (techniques de séparation solide liquide très efficace), dans le cas où les résultats apportés dans cette étude s'avèrent insuffisants d'autres viendront les améliorer.

#### **III.2.1 Application pour augmenter la performance des infrastructures existantes**

Il est tout à fait possible d'augmenter la performance en qualité et en quantité d'un décanteur existant en exploitant les avantages offerte par l'implantation des lamelles dans ces ouvrages. Dans le cas idéal, il serait possible d'augmenter jusqu'à 4 fois cette performance et même plus. Mais cette technique possède différentes étapes à franchir pour bien fonctionner, nous allons étudier spécifiquement le cas du décanteur Prat-Daniel de Mandroseza I qui est un décanteur circulaire.

#### **III.2.2 Application dans la Conception de nouvelles stations de traitement d'eau de surface**

La décantation lamellaire trouve son application dans le traitement des eaux de surfaces, surtout dans le traitement des eaux fortement chargées en matières en suspension. A une comparaison près des coûts d'investissement pour traiter un même débit, il serait raisonnable d'appliquer les lamelles dans le cas où la conception d'un ouvrage simple occupe une énorme surface et dont la réalisation génère un énorme coût par rapport à celle d'un décanteur munie de lamelles.

Le cas concret à traiter est celle de la nouvelle station de Sabotsy Namehana qui traite un débit 100 [m<sup>3</sup>/h] et une turbidité moyenne 100 [NTU], une valeur assez élevée puisque le traitement ne comporte pas de préécantation comme le lac Mandroseza. Les ouvrages de clarification doivent donc beaucoup travailler pour remplir leur rôle.

### **III.3 Méthodes de conception**

#### **III.3.1 Orientation du cadre d'étude**

Le domaine du traitement d'eau potable fait appel à plusieurs disciplines scientifiques pour maîtriser les processus de potabilisation d'une eau brute. Il serait convenable de bien définir au préalable dans quel partie de ce vaste domaine, que ce soit du point de vue ouvrages où des disciplines scientifiques associés, cette étude va se développer.

Les problèmes traités sont celle des ouvrages de clarification dans le traitement des eaux de surface et surtout pour les eaux à fortes turbidités et de contenance élevée en matière en suspension. En effet, le fonctionnement des ouvrages de clarification influe directement sur le débit de production d'une telle station de traitement.

*Tableau III-2 : Quelques disciplines et leurs applications dans le cadre de traitement des eau*

Disciplines		Application
<b>Juridique</b>		Normes de potabilité
<b>Ressour e en eau</b>	Hydrologie	Ressource en eau de surface
	hydrogéologie	Ressource en eau souterraine
<b>Procédés</b>	Chimique	Maîtrise de l'aspect chimique de traitement
	Biologique	Maîtrise de l'aspect biologique de traitement
<b>HYDRAULIQUE</b>	Pompage	Circulation des fluides dans conduites en charges
	Ecoulement en charge	Transport des réactifs et de l'eau à traiter
	Modélisation	Conception et dimensionnement

Une discipline incontournable qui est la CHIMIE des procédées, intervient presque dans toutes les niveaux d'une station de traitement. Nous avons énuméré tout à l'heure le domaine juridique qui fixe ce qu'on convient d'appeler norme Malgache de potabilité.

Cette étude approfondit les aspects physique de la décantation, maîtriser les écoulements afin de créer un environnement favorable pour la séparation Solide-liquide. Nous orientons donc notre étude dans les domaines spécifiques de **la modélisation hydrodynamique**, et la **Résolution numérique par élément fini** pour avoir des solutions numériques pouvant être manipulées et traitées facilement. L'idéal serait de construire une maquette physique de l'une des variantes retenue en numérique avant de réaliser réellement le produit, mais la construction d'un modèle physique peut conduire à d'énormes difficultés pour traduire une similitude parfaite des ouvrages de décantation. Si on arrive à réaliser une telle maquette, les investissements seront énormes comparés à une maquette virtuel. C'est pour ces raisons que nous nous orientons vers la branche du numérique pour donner des solutions aux problèmes physiques posés par la conception d'un ouvrage de décantation.

### III.3.2 Outils de conception

Nous sommes actuellement dans un temps où l'informatique évolue de façon exponentielle. Dans le marché, on trouve plusieurs logiciels offrant des interfaces utilisables pratiquement dans la modélisation d'un produit. La modélisation géométrique est réalisée à l'aide d'un logiciel familier de Conception Assisté à l'Ordinateur, Auto CAD. On peut coupler ces modèles géométriques avec des logiciels de maillage en éléments finis, COMSOL, pour résoudre des modèles hydrodynamiques traduisant l'écoulement dans les ouvrages et dans le cas le plus complexe, associé au phénomène transitoire de décantation. En couplant les deux logiciels (Auto CAD et COMSOL) nous construisons un modèle qui va se présenter sous une réalité virtuelle de ce qui pourrait se passer dans l'ouvrage.

Nous exploitons donc les outils de simulation numérique pour la résolution de certains problèmes complexes ne possédant pas de solution analytique ou ayant une solution trop complexe pour être mise en œuvre facilement. La seule limite est d'une part l'imagination des possibilités de variantes, des idées à réalisés et les astuces à exploiter et d'autre part des performances de nos ordinateurs car les dernières versions des logiciels sont compatibles avec les dernières matériels informatiques qui sont de plus en plus performantes.

**PARTIE – II    BASES  
THEORIQUES ET OUTILS DE  
CONCEPTION D'UN  
DECANTEUR LAMELLAIRE**

## **CHAPITRE IV - RAPPELS DES NOTIONS IMPORTANTES SUR LE TRAITEMENT DES EAUX**

### **IV.1 Différents types d'eau**

Les eaux destinées à la consommation humaine sont de différentes natures. Le choix des ressources à exploiter dépend de plusieurs facteurs et dans la plupart des cas, les décisions se portent sur deux ressources à exploiter : les eaux souterraines et les eaux de surface. L'exploitation des eaux de mer reste la dernière possibilité à choisir dans le cas où les autres ressources ne sont pas disponibles.

### **IV.2 Traitement des eaux de surface et des eaux souterraines**

#### **IV.2.1 Traitement des eaux de surface**

Ces eaux doivent subir un traitement global de clarification qui interviendra sur tous ces paramètres et qui, en fonction des caractéristiques les plus défavorables de l'eau brute et de l'objectif de qualité fixé pour l'eau traitée. En outre, il faut assurer la stabilité biologique et chimique par chloration et ajout chaux.

#### **IV.2.2 Traitement des eaux souterraines**

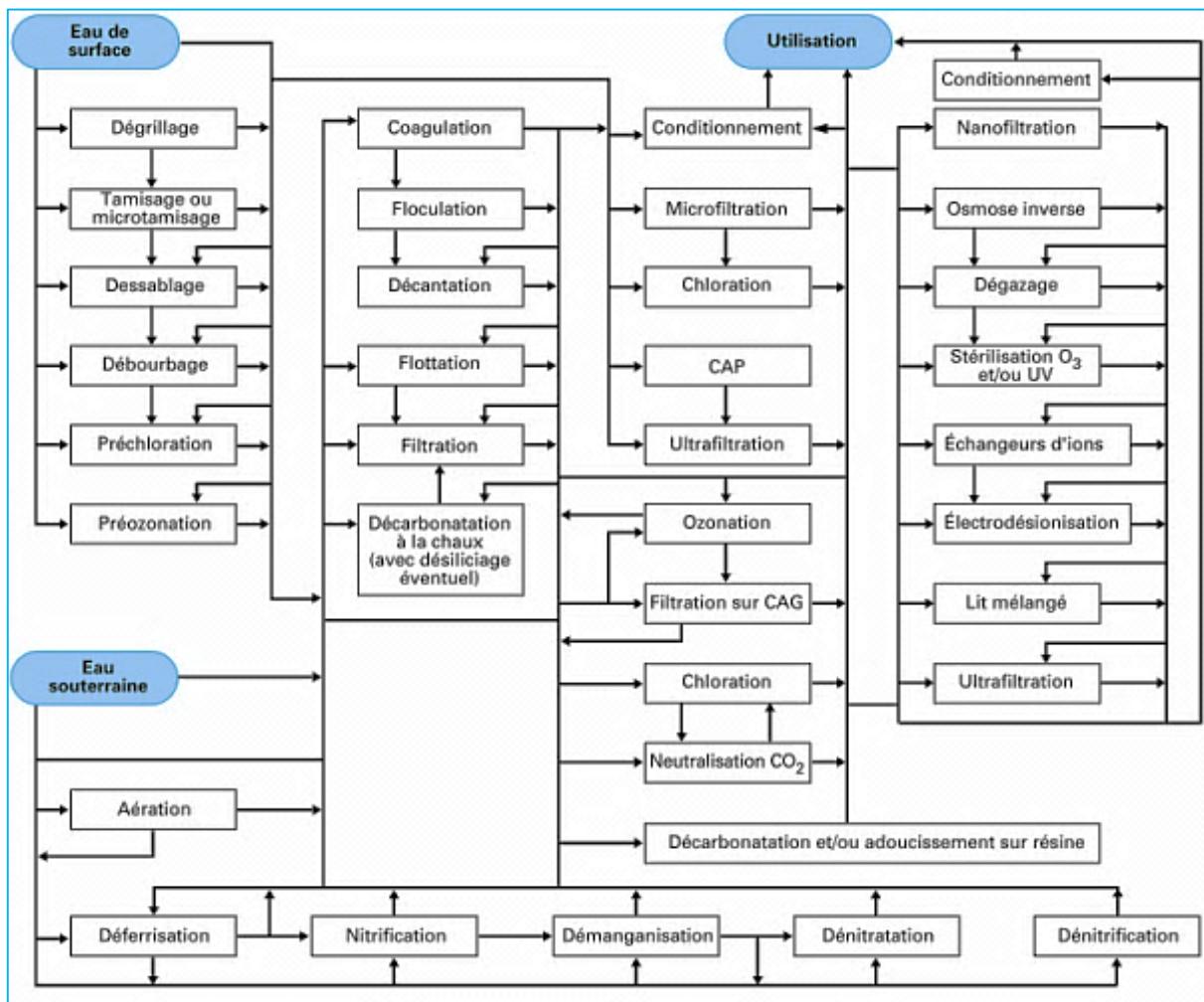
Dans ce domaine, le premier acte de traitement réside dans une bonne protection et une exploitation raisonnée des nappes d'eau souterraine. Généralement claires à l'émergence, ces eaux peuvent, en l'absence de traitement, engendrer des désordres par suite de la présence de  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  (précipitations d'oxydes de fer et de manganèse ou de soufre colloïdal, respectivement). En outre, elles peuvent présenter une forte agressivité carbonique et des chiffres élevés de dureté, sels d'acides forts, ammonium, nitrates, silice, etc. Très souvent, il faudra leur appliquer un traitement spécifique de tel ou tel des éléments qui viennent d'être cités.

### **IV.3 Chaînes hydraulique de traitement**

La chaîne hydraulique de traitement est l'ensemble des processus suivis par une quelconque eau brute depuis le captage dans le milieu naturel jusqu'au refoulement vers le réservoir de distribution, afin de la rendre potable. Il existe de nombreuses variantes de chaînes

hydraulique de traitement suivant la qualité de l'eau brute à traiter, la demande des consommateurs, et surtout les normes en vigueur qui fixent les paramètres admissibles en terme de qualité de l'eau potable.

En partant d'une eau superficielle ou d'une eau souterraine, la **figure IV – 1** récapitule les différentes combinaisons possibles entre les principaux traitements unitaires, aboutissant à une très grande variété de filières dont le choix se fera en fonction de la nature de l'eau brute et de la destination de l'eau traitée.



*Figure IV-1 : possibilité de combinaison entre les principaux traitements unitaires*

Ce cas de figure étant à la fois trop complet et trop complexe, dans ce qui suit, nous allons développer quelques éléments essentiels et pratiques et couramment utilisé dans les stations existantes. La plupart de ces éléments sont fréquemment rencontrés dans le traitement des eaux de surfaces qui est principalement notre champ d'action.

### **IV.3.1 Prétraitement**

- Captage

Une étude détaillée le long du cours d'eau et sur plusieurs sections droites ainsi qu'un relevé des rejets polluants en amont permettront de choisir le point de prise et le mode de prise (fond, milieu, berge, etc.) entraînant le moins de débit solide et de pollution.

Dans le cas de prise dans un réservoir naturel ou artificiel, l'endroit et la profondeur de prise devront pouvoir être choisis en cours d'années pour tenir compte des phénomènes limnologiques modifiant localement ou par strates la qualité des eaux stockées.

- Prétraitement physique

Pour les eaux trop chargées en matières solides sédimentables ou en suspensions telles que les sables ou les déchets humiques, un prétraitement physique s'impose. Les plus souvent utilisés sont le dégrillage et le dessablage.

- Prétraitement chimique

Pour les eaux présentant un taux de matières organiques importants, ou riches en bactéries et germes pathogènes, le prétraitement chimique souvent utilisé est la préchloration ou la préozonisation.

### **IV.3.2 Clarification**

La clarification est l'ensemble des opérations qui permettent d'éliminer les MES (minérales et organiques) d'une eau brute ainsi qu'une partie des matières organiques dissoutes (fraction « floculable »), par la combinaison de plusieurs techniques tels que coagulation-flocculation, décantation et filtration. Dans la plupart des cas, ce sont les eaux de surfaces qui nécessitent des traitements de clarification rigoureux à cause de leur turbidité généralement élevée.

Une eau claire est appréciée à travers la turbidité, l'objectif principal de la clarification est donc de distribuer une eau de **turbidité inférieure à 5 [NTU]** selon la Norme Malgache de potabilité.

#### **IV.3.2.1 Coagulation**

La coagulation est la déstabilisation des particules colloïdales par addition d'un réactif chimique, le coagulant. Dans la théorie de la double couche, la coagulation est l'annulation du potentiel Zéta.

La coagulation consiste à introduire dans l'eau un produit capable :

- De décharger les colloïdes généralement électronégatifs présents dans l'eau
- De donner naissance à un précipité

#### **IV.3.2.2 Floculation**

La floculation est l'agglomération de ces particules "déchargées" en microfloc, puis en flocons volumineux et décantables, le floc. Cette floculation peut être améliorée par l'ajout d'un autre réactif : le floculant ou adjvant de floculation.

#### **IV.3.2.3 Décantation**

Ces procédés sont des méthodes de séparation des matières en suspension et des colloïdes rassemblés en floc, après étape de coagulation-floculation. Si la densité de ces flocs est supérieure à celle de l'eau, il y a décantation. L'eau clarifiée située près de la surface est dirigée vers les filtres à sables.

#### **IV.3.2.4 Filtration**

La filtration est un procédé de séparation qui utilise le passage d'un mélange solide-liquide à travers un milieu poreux (filtre) qui retient les particules solides et laisse passer le liquide (filtrat). L'eau à filtrer passe à travers un lit filtrant constitué de matériau granulaire, dont la hauteur de couche est importante et dépend du type de filtre. Les matières en suspension sont retenues dans les espaces inter-granulaires, sur la plus grande partie de la hauteur de couche.

Les deux filtres les plus appliquées sont les suivantes :

Filtre monocouche ouvert sur sable :

- Hauteur de la couche de sable : 0,70 [m]
- Perte de charge d'un filtre propre : 0,11 [m]

- Vitesse de filtration : 3,23 [m/h]

Filtre bicouche ouvert à sable et anthracite :

- Hauteur de couche d'anthracite : 0,45 [m]
- Hauteur de couche de sable : 0,25 [m]
- Perte de charge totale (filtre propre) : 0,11 [m]
- Vitesse de filtration : 10 [m/h]

#### **IV.3.3 Désinfection**

La plupart des eaux, qu'elles aient subi ou non un traitement préalable et, même si elles sont parfaitement limpides, se trouvent souvent contaminées par des microbes dangereux pour l'organisme humain.

Le chlore, par sa grande efficacité à l'état de traces, et par sa facilité d'emploi, est le réactif le plus utilisé pour assurer la désinfection de l'eau. L'action microbicide, à faible dose, s'explique par la destruction des diastases indispensables à la vie des germes microbiens. En outre, le chlore est doué d'un pouvoir oxydant important, favorable à la destruction des matières organiques.

#### **IV.3.4 Neutralisation**

La mesure de l'agressivité s'effectue par la mesure du pH et du TAC après un temps de contact avec du marbre : mesure de l'agressivité au marbre. La neutralisation peut s'effectuer par différents procédés en particulier par dosage de chaux saturée pour obtenir le pH d'équilibre, égale à celui de la mesure de l'agressivité. Les normes de potabilité Malgache recommandent un PH compris entre 6,5 et 9.

### **IV.4 Maîtrise des processus de flocculation**

#### **IV.4.1 Distribution des matières solides contenus dans l'eau en fonction de leurs dimensions**

Les matières existantes dans l'eau peuvent se présenter sous les trois états suivants :

Etat de suspension : Ces produits peuvent être d'origine minérale (sables, limons, argiles,...) ou organique (produits de la décomposition des matières végétales ou animales,

acides humiques ou fulviques par exemple). A ces composés s'ajoutent les micro-organismes tels que bactéries, plancton, algues et virus. Ces substances sont responsables, en particulier, de la turbidité et de la couleur.

Etat colloïdales (moins de 1 micron) : Ce sont des MES de même origine que les précédentes mais de plus petite taille, dont la décantation est excessivement lente. Elles sont également génératrices de turbidité et de couleur.

Etat dissout (moins de quelques nanomètres) : Ce sont généralement des cations ou des anions. Une partie de la matière organique est également sous forme dissoute. On trouve aussi des gaz ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2S$ , ...).

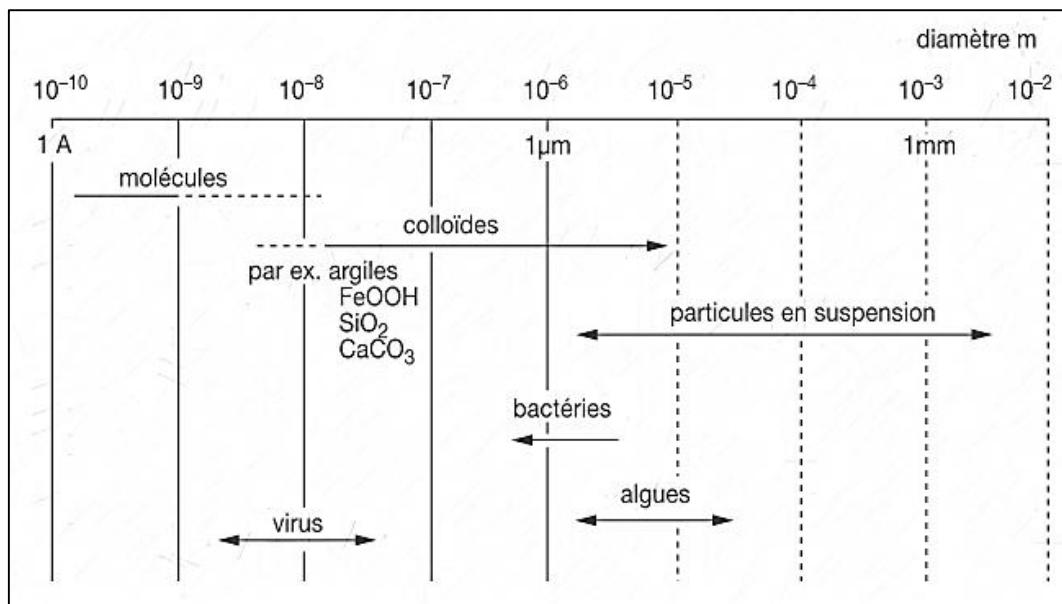


Figure IV-2 : Spectre de taille des particules dans les eaux naturelles. J. Rodier 2009

#### IV.4.2 Les suspensions colloïdales

Dans le tableau ci-dessous sont répertoriés certains matériaux ou organismes avec leur dimension et l'ordre de grandeur du temps nécessaire pour que, sous la seule influence de leur poids, les particules parcourent verticalement, à 20 °C, un mètre d'eau.

Tableau IV-1 : Temps de décantation de particule pour 1 [m] d'eau. DEGREMONT 1989

Type de particules	Diamètre [ $\mu\text{m}$ ]	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	$10^{-1}$	2 [ans]

Ce tableau indique également que les colloïdes sont des particules impossibles à décanter naturellement, et pour lesquelles les phénomènes de surface sont primordiaux. Ces phénomènes régissent la stabilité des suspensions colloïdales.

**Turbidité d'une eau :** Elle est due à la présence des particules en suspension, notamment colloïdales : argiles, limons, grains de silice, matières organiques, etc. L'appréciation de l'abondance de ces particules mesure son degré de turbidité. Celui-ci sera d'autant plus faible que le traitement de l'eau aura été plus efficace (J. Rodier 2009). Les appareils couramment utilisés sont les turbidimètres optiques donnant des résultats exprimés en NTU (Nephelometric Turbidity Units).

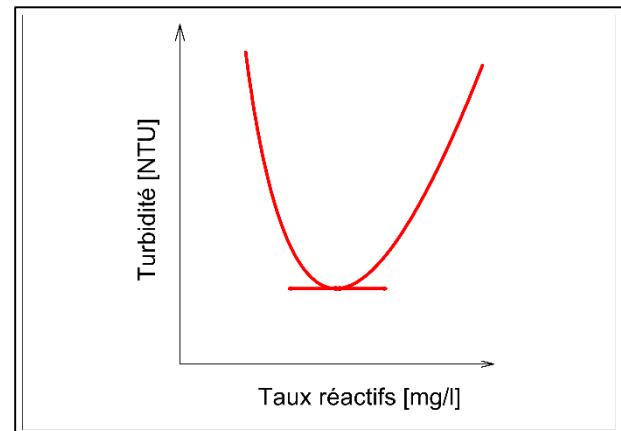
#### IV.4.3 Essais de flocculation (Jar-Test)

L'expérience consiste à associer dans un temps assez court, deux phases distinctes et incompatibles :

- 1ère phase : mélange rapide et vigoureux, nécessaire pour dissiper les additifs dans la totalité du volume de l'eau à traiter.
- 2ème phase : mélange lent, favorise les contacts entre les particules de floc sans les abîmer.

#### **IV.4.3.1 Neutralisation des colloïdes :**

Les colloïdes de charges négatives sont neutralisés par les réactifs coagulants de charges positifs. L'appréciation de ce phénomène se traduit à travers la turbidité de l'eau décantée dans chaque bécher après l'essai. Les précipitées se forment quand les charges négatives des colloïdes sont totalement neutralisées par la charge positive des réactifs. A défaut de réactifs, les charges négatives non neutralisées se repoussent ; en excès de réactifs, les surplus de charges positifs vont se repousser ce qui revient donc à analyser la courbe turbidité en fonction du dose de réactif versé donnant le taux optimale correspondant à une valeur minimale de la turbidité.



*Figure IV-3 : Détermination du taux optimal de traitement*

#### **IV.4.3.2 Formule de base**

La correspondance entre l'échelle réelle et l'échelle en laboratoire se traduit par la formule servant de base pour tout calcul. Cette formule sert à déterminer directement le taux de traitement à appliquer en connaissant le taux optimal retenu d'après l'essai de flocculation, c'est le principal intérêt de cet essai. Cette dose varie en fonction des qualités de l'eau brute à traiter qui changent suivant la variation de la saison. Il est donc nécessaire d'effectuer périodiquement des prises d'essai en fonction de la variation saisonnière.

$$Q \tau = C D \quad (1)$$

*Tableau IV-2 : Correspondance des paramètres au laboratoire et sur ouvrage réel*

	<b>laboratoire</b>	<b>usine</b>
<b>Q</b>	Quantité d'eau à traiter [l]	Débit d'eau à traiter [m <sup>3</sup> /h]
<b>τ</b>	Taux de traitement [mg/l]	Taux de traitement [g/m <sup>3</sup> ]
<b>C</b>	Concentration du réactif [g/l]	Concentration du réactif [g/l]
<b>D</b>	Prise d'essai à partir de la solution mère [ml]	Débit pompe doseuse [l/h]

#### IV.4.4 Floculation avec contact de boue

L'efficacité d'une floculation peut être symbolisée par :

$$e = kC^\alpha G^\beta t^\gamma \quad (2)$$

e : efficacité de la floculation, paramètre lié au floc formé ou à la qualité de l'eau décantée,

C : concentration des boues dans le réacteur de floculation,

G : gradient de vitesse,

t : temps de contact,

$\alpha, \beta, \gamma > 0$

En particulier, l'augmentation de la masse de contact (C) entraîne un accroissement de la probabilité des chocs au sein du réacteur, d'où une floculation plus efficace. Les appareils à contact de boue, créant ou apportant dans la zone de floculation une masse de boue plus importante, utilisent ce principe.

Deux méthodes différentes sont appliquées :

- la recirculation de boue,
- le lit de boue.

Le contact de boue offre de très nombreux avantages :

- amélioration de la floculation : absence de fines particules, floc homogène et réduction du temps de floculation,
- accroissement de la vitesse de décantation et diminution de la taille des ouvrages correspondants,
- achèvement des réactions spécifiques (précipitation, adsorption sur charbon actif..),
- augmentation de l'élimination des matières organiques par adsorption sur le floc,
- économie des réactifs chimiques (meilleure utilisation des réactifs, effet coagulant et flocculant des boues recyclées).

**Remarque:** une concentration de boue trop importante dans le réacteur devient un facteur limitant de décantation.

## CHAPITRE V - LA "DÉCANTATION LAMELLAIRE"

Dans les années 70 est apparu, en série sur le marché, un nouvel appareil : il s'agit du décanteur lamellaire, qui comporte des cloisons inclinées, destiné à la clarification des suspensions diluées. Toutefois, le principe est connu depuis fort longtemps puisque le premier brevet a été déposé aux États-Unis en 1886.

### V.1 La décantation

La décantation consiste à séparer une phase continue et une phase dispersée initialement mélangées. En principe, il s'agit du déplacement, par gravité, de particules solides plus denses que l'eau.

#### V.1.1 Différentes types de décantation :

Divers types de matières décantables sont à distinguer

- les **particules grenues** décantent indépendamment les unes des autres avec chacune une vitesse de chute constante,
- les **particules plus ou moins floculées** ont des tailles et des vitesses de décantation variables. Lorsque la concentration est faible, la vitesse de chute augmente au fur et à mesure que les dimensions du floc s'accroissent par suite de rencontres avec d'autres particules, c'est la **décantation diffuse**.

Pour des concentrations plus élevées, l'abondance des flocs crée une décantation d'ensemble freinée, le plus souvent caractérisée par une interface nettement marquée entre la masse boueuse et le liquide surnageant: c'est la **décantation en piston**.

##### V.1.1.1 Décantation des particules grenues

C'est le cas le plus simple et le seul décrit par des équations. Lorsqu'une particule chute, sa vitesse augmente puis se stabilise rapidement à une vitesse constante, noté  $U_{lim}$ . Lors de cette stabilisation, l'accélération est nulle et la résultante des forces qui agissent sur la particule est nulle.

Suivant le régime d'écoulement, plusieurs hauteurs donnent l'expression de la vitesse limite de chute d'une particule sphérique de diamètre  $d_s$  de masse volumique  $\rho_s$ , dans un fluide de masse volumique  $\rho_f$  et de viscosité cinétique  $\mu_f$ :

- Régime laminaire : loi de Stokes

$$U_{lim} = \frac{(\rho_s - \rho_f) g d_s^2}{18 \mu_f} \quad (3)$$

- Régime intermédiaire : loi de Allen

$$U_{lim} = \frac{[(\rho_s - \rho_f) g]^{0,71} d_s^{1,14}}{\rho_f^{0,24} \mu_f^{0,43}} \quad (4)$$

- Régime turbulent : loi de Newton

$$U_{lim} = 1,74 \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_f) g d_s}{\rho_f}} \quad (5)$$

#### **V.1.1.2 Décantation dite des particules floculées**

Lors de la décantation, la flocculation se poursuit et la vitesse de sédimentation des particules  $V_0$  augmente. Ce processus se produit dès que la concentration en matières floculées est supérieure à environ **50 mg/l** (DEGREMONT 1989).

L'efficacité de la décantation diffuse est liée non seulement à la charge hydraulique superficielle, mais aussi au temps de séjour. Il n'existe pas à ce jour de formule mathématique permettant le calcul de la vitesse de décantation. Des essais de laboratoire et des méthodes graphiques permettent alors de connaître cette vitesse.

#### **V.1.1.3 Décantation en piston des particules floculées**

Dès que la concentration en particules floculées devient importante, les interactions entre particules ne sont plus négligeables. La décantation est freinée. Les particules adhèrent entre elles et la masse décante en piston avec formation d'une interface nette entre les flocs et le liquide surnageant.

Ce phénomène est caractéristique des boues activées et des suspensions chimiques floculées quand leur concentration est supérieure à environ **500 mg/L** (DEGREMONT 1989).

## V.1.2 Paramètres caractéristiques d'un décanteur :

### V.1.2.1 Flux massique

La théorie de Kynch analyse les changements de concentration qui se produisent durant la sédimentation des particules floculées, et postule qu'il n'existe qu'une seule vitesse de sédimentation  $U$  [m/s] pour chaque concentration en solide  $C$  [g/m<sup>3</sup>]. La suspension est de ce fait caractérisée, dans tout le domaine de concentration, par la simple relation entre  $U$  et  $C$ , ce qui implique l'existence d'une courbe de flux  $F$  [g/(s\*m<sup>2</sup>)] pour chaque suspension, dont la relation s'exprime par :

$$F = UC \quad (5)$$

### V.1.2.2 Charge hydraulique superficiel

Pour que les particules décentent, il faut qu'elles mettent moins de temps pour parcourir la distance qui les sépare du fond du bassin, qu'il n'en faut à l'eau pour traverser la longueur de l'ouvrage.

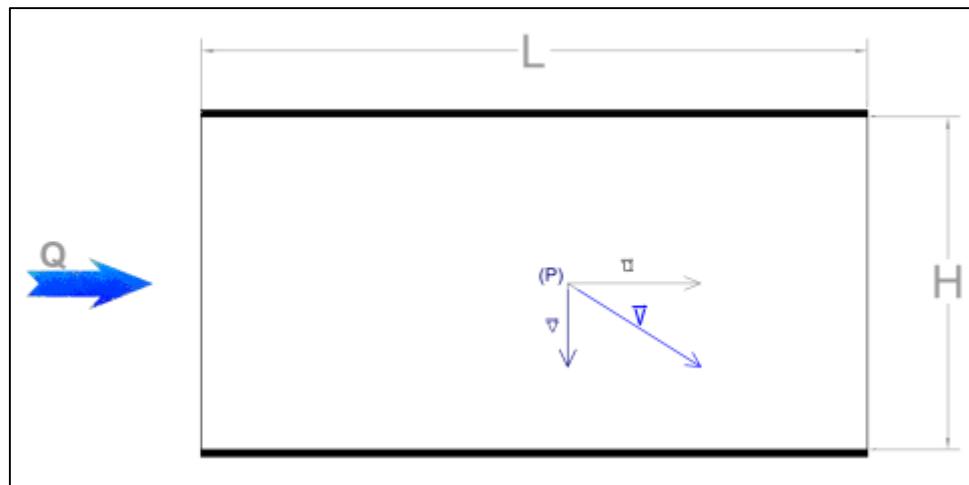


Figure V-1 : Principes de décantation élaborés selon le modèle de HAZEN

Soit  $t_1$  le temps mis par la particule pour parcourir la distance  $H$

$$t_1 = \frac{H}{v}$$

Soit  $t_2$  le temps mis par la particule pour parcourir la distance  $L$

$$t_2 = \frac{L}{u}$$

Il faut donc que  $t_1 < t_2 \Rightarrow \frac{H}{v} < \frac{L}{u}$

$$\frac{H}{v} < \frac{Lh}{Q} \Rightarrow v > \frac{Q}{Lh}$$

$v > \frac{Q}{S}$

(6)

La condition de capture d'une particule dans un décanteur est indépendante de sa hauteur. Un décanteur idéal serait un décanteur sans profondeur (Ce qui ne se concevrait pas en raison de l'accumulation nécessaire des particules décantées). Cette condition résulte de la comparaison entre la vitesse de chute des particules  $v$  et la vitesse de Hazen définie comme le rapport entre le débit de traitement  $Q$  et la surface de décantation  $S$ .

#### V.1.2.3 Généralisation de la notion de « SURFACE DE DECANTATION » :

De la formule de Hazen est née la notion de surface de décantation. Dans le cas général, cette surface est définie comme le rapport entre le volume du décanteur (volume de contrôle) et la hauteur de chute de la particule.

$S_d = \frac{\Omega}{h}$

(7)

Avec :

$S_d$  : Surface de décantation en [m<sup>2</sup>]

$\Omega = S \cdot \gamma$ : Volume de contrôle en [m<sup>3</sup>]

$S$  : Section transversal de l'écoulement en [m<sup>2</sup>]

$\gamma$  : Longueur dans le sens longitudinal de l'écoulement en [m]

$h$  : Hauteur de chute de la particule dans le décanteur en [m]

Le cas le plus particulier est le décanteur rectangulaire à flux horizontal dans lequel :  $h = H$  représente la hauteur de l'ouvrage ;  $\gamma = L$  et  $S_d$  est confondue avec la surface horizontale du décanteur.

## V.2 Origine du décanteur à plaque

L'origine des principes de la décantation lamellaire découle de la compréhension du modèle de Hazen qui consiste à comparer la vitesse de décantation  $V_s$  de la particule avec la charge hydraulique superficielle (ou vitesse de Hazen)  $V_H$  liée aux dimensions de l'ouvrage.

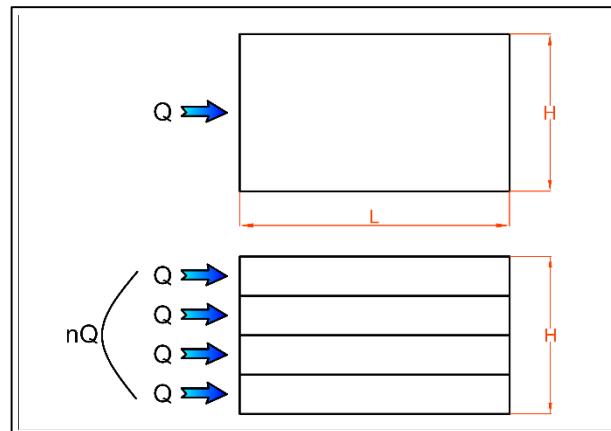
$$V_s > V_H \quad (8)$$

La capture d'une particule dans le décanteur s'effectue donc en théorie si sa vitesse de décantation est supérieure à la vitesse de Hazen. Notons que l'expression de cette vitesse  $V_H$  est indépendante de la hauteur de l'ouvrage.

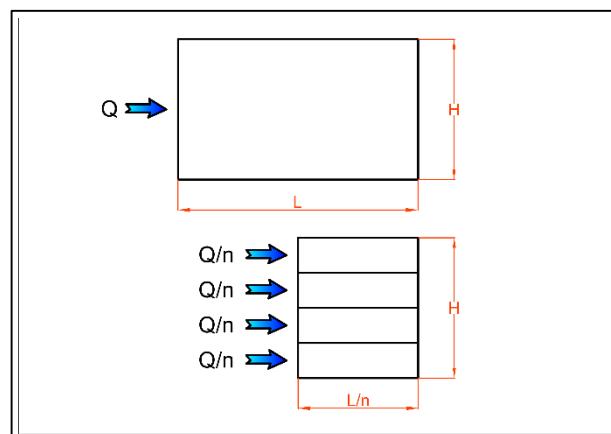
Ainsi, en décantation horizontale, il est théoriquement possible, à performances égales, de traiter :

- Un débit  $n*Q$ , dans le même ouvrage, en superposant  $n$  étages de hauteur élémentaire  $H/n$ . (*figure V-2*)
- Un même débit en superposant  $n$  étages de hauteur élémentaire  $h/n$  et de longueur  $L/n$ . (*figure V-3*)

Dans la pratique, ces superpositions entraînent un problème d'évacuation des boues décantées. Pour cela, il faut que la surface sur laquelle les particules se déposent soit suffisamment inclinée pour qu'elles puissent glisser vers le bas sous l'effet de la pesanteur.



*Figure V-2 : Décantation étagée, traitant un débit  $n*Q$*



*Figure V-3 : Décantation étagée, traitant un débit  $Q$*

## V.3 Principes généraux de la décantation lamellaire

La décantation lamellaire consiste à multiplier dans un même ouvrage les surfaces de séparation eau-boue. Ainsi le positionnement de faisceaux lamellaires (tubes ou plaques parallèles) dans la zone de décantation crée un grand nombre de cellules élémentaires de

séparation. Afin d'assurer l'évacuation des boues, il est nécessaire d'incliner les lamelles d'un angle  $\alpha$  par rapport à l'horizontale.

La décantation en tubes ou entre plaques inclinés est plus rapide que la décantation classique. En effet, les boues se forment assez rapidement sur la génératrice inférieure d'un tube ou sur les plaques d'un faisceau de plaques parallèles, puisque les particules suivent un chemin relativement court pour y parvenir.

La surface de décantation offerte par un élément de décantation inclinée d'un angle  $\alpha$  est donnée par :

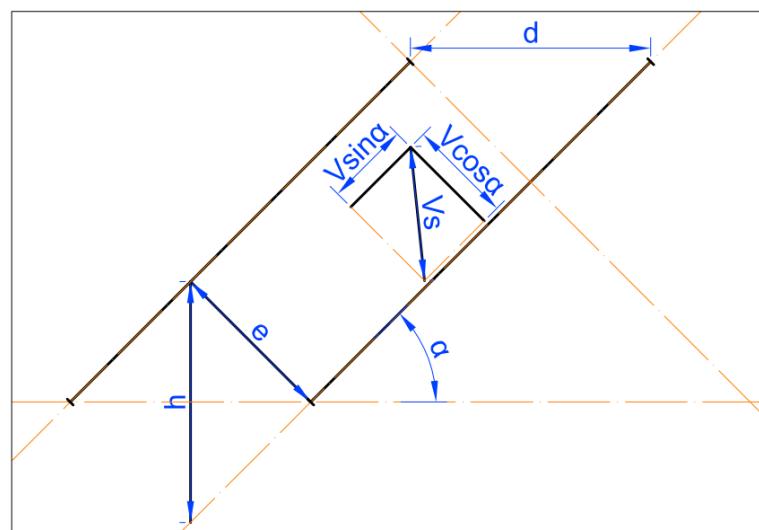
$$S_d' = \frac{\Omega}{h}$$

La hauteur de chute des particules est donnée par :  $h = \frac{e}{\cos \alpha}$

$$S_d' = \frac{\Omega}{e} \cos \alpha$$

$$S_d' = S_d \cos \alpha$$

Et pour un nombre « n » de modules on a une surface total de décantation donnée par :



*Figure V-4 : Principes généraux de la décantation lamellaire*

$$\boxed{STP = n S_d \cos \alpha} \quad (9)$$

Avec  $S_d$  surface élémentaire de décantation définie plus haut.

Pour un débit d'exploitation  $Q$ , l'expression de la charge hydraulique superficielle (vitesse de Hazen) est donnée par :

$$\boxed{v_H = \frac{Q}{n S_d \cos \alpha}} \quad (10)$$

Remarque très importante : A la base de calcul de tout décanteur lamellaire, cette formule est établie dans l'hypothèse que le débit  $Q$  serait réparti équitablement dans chaque module et que le débit qui passe à travers un module est égal à  $\frac{Q}{n}$ . Mais en réalité, cette notion

d'équirépartition de débit n'est qu'hypothétique. A la limite on admet une certaine variation autour de cette valeur ( $\frac{Q}{n}$ ) selon la précision qu'on veut apporter à notre conception. En effet, la répartition du débit dans l'ouvrage dépend en grande partie de la géométrie et surtout des conditions d'entrée et de sortie d'eau. Dans ces conditions, la résolution du problème se fait cas par cas, néanmoins il existe déjà des modèles proposés par les constructeurs.

## **V.4 Paramètres caractéristiques d'un décanteur lamellaire**

Deux caractéristiques fondamentales définissent les décanteurs lamellaires :

- L'espace inter-lamellaire
- Inclinaison des lamelles

### **V.4.1 L'espace inter-lamellaire « e » :**

C'est l'écartement orthogonal de deux lamelles successives. Cet espace constitue un décanteur élémentaire ou un module lamellaire. Sa valeur résulte d'un compromis entre la possibilité de réduire la hauteur de chute et la nécessité de ne pas trop rapprocher les lamelles afin d'éviter la remise en suspension des flocs déposés et pour éviter les risques de bouchage.

### **V.4.2 L'inclinaison des lamelles « a »**

C'est l'angle que font les lamelles avec l'horizontale. Sa valeur résulte d'un compromis entre la nécessité d'adopter une pente permettant l'évacuation facile des flocs déposés par écoulement gravitaire et le gain de performance que procure une faible inclinaison.

### **V.4.3 Autres paramètres**

Il existe aussi d'autre caractéristiques telles que

- Largeur des lamelles : la valeur pratique se situe entre 1 et 1,25 [m]
- Epaisseur : on essaie d'avoir des épaisseurs les plus petites possibles : de l'ordre du millimètre et même moins
- Forme : au début, on a utilisé la forme la plus simple : lamelles à profil plan. Ensuite, différentes formes ont été conçues afin d'obtenir une importante surface de décantation : les formes ondulées, les formes trapézoïdales,...

- Matériaux de construction : les plus utilisés sont les **polystyrènes "choc"**, cependant, toutes matières ayant les propriétés suivantes peuvent servir de lamelles :
- présentent une surface développée plane et lisse
  - facile à travailler
  - résistent aux actions de l'eau et des produits chimiques utilisés : non toxique et aucun effet sur la qualité et le traitement des eaux.
  - assez rigides pour qu'ils ne présentent pas de flambement
  - on la propriété d'être réduite en fine épaisseur.

## V.5 Différentes types

Il existe trois types de décanteur lamellaire :

- A contre-courant : son alimentation se fait par le bas, et la circulation de l'eau s'effectue en sens inverse de la décantation de la boue.
- A courant croisé : L'eau et la boue circulent perpendiculairement. L'alimentation de l'eau floculée se fait par le côté afin d'éviter la collision entre l'eau floculée et la boue dans la zone entre les plaques où l'eau remonte avec une vitesse opposée à la chute du floc.
- A co-courant : dans ce cas, l'eau et la boue circulent dans le même sens et la décantation n'est pas gênée.

La décantation à contre-courant permet le traitement le plus fiable et le plus simple ; la décantation à co-courant résout mal la reprise de l'eau décantée et la décantation à courants croisés se heurte à des difficultés de répartition des flux.

## V.6 Optimisation de la surface de décantation suivant la variante forme (section transversale des modules lamellaires) en se fixant les dimensions du corps de l'ouvrage et en faisant varier celles des modules.

Cette partie consiste à comparer la surface de décantation offerte par des modules lamellaires de différentes formes. Nous verrons dans ce qui va suivre la signification de la notion de surface de décantation dans le cas des décanteurs lamellaire. En effet, démontrée auparavant, la surface de décantation a les dimensions d'une surface  $[L^2]$ , mais ce terme possède un sens physique plus large. Cette notion est élaborée en utilisant le modèle de décantation le

plus simple, celui de Hazen, caractérisé par la charge hydraulique superficiel ou vitesse de Hazen. Ces notions sont à la base du dimensionnement d'un décanteur.

La formule de base pour le calcul de la surface total projetée est la même quel que soit le type de module, donnée par *la formule (9)*

$$\boxed{STP = n \cdot S_d \cdot \cos \alpha} \quad (9)$$

Avec :

STP : Surface Total Projeté

N : Nombre de module lamellaire

$S_d$  : Surface élémentaire de décantation

$\alpha$  : Inclinaison des lamelles

Les décanteurs lamellaires sont considérés comme un assemblage d'un grand nombre de tube inclinées d'un certain angle pour permettre l'autocurage des boues à l'intérieur de chaque élément. Un élément de décantation offre une surface plus ou moins importante suivant les dimensions et la forme de la section transversale de l'élément. Il suffit donc de multiplier cette surface par le nombre d'éléments pour avoir la surface offerte par l'ensemble. Nous démontrerons l'influence de la forme sur chacun des paramètres de cette formule et de retenir ensuite celle qui convient le mieux, c'est celle qui donne une Surface Total Projetée (STP) le plus élevé.

Selon la forme considérée donc, nous allons calculer dans l'ordre le nombre N de module lamellaire contenu dans les dimensions du corps de l'ouvrage ; en suite calculer la surface unitaire de décantation  $S_d$  affectée d'une proportion suivant l'inclinaison  $\alpha$  des lamelles pour obtenir la surface total projetée.

### V.6.1 Forme simple

Les blocs lamellaires sont formés par l'assemblage des plaques parallèles espacés d'une certaine distance. L'eau floculée passe impérativement par ces plaques, entre dans la partie inférieure ; l'eau claire est recueilli par des goulottes de récupération au niveau supérieur et les boues recueillis dans la partie inférieure de l'ouvrage.

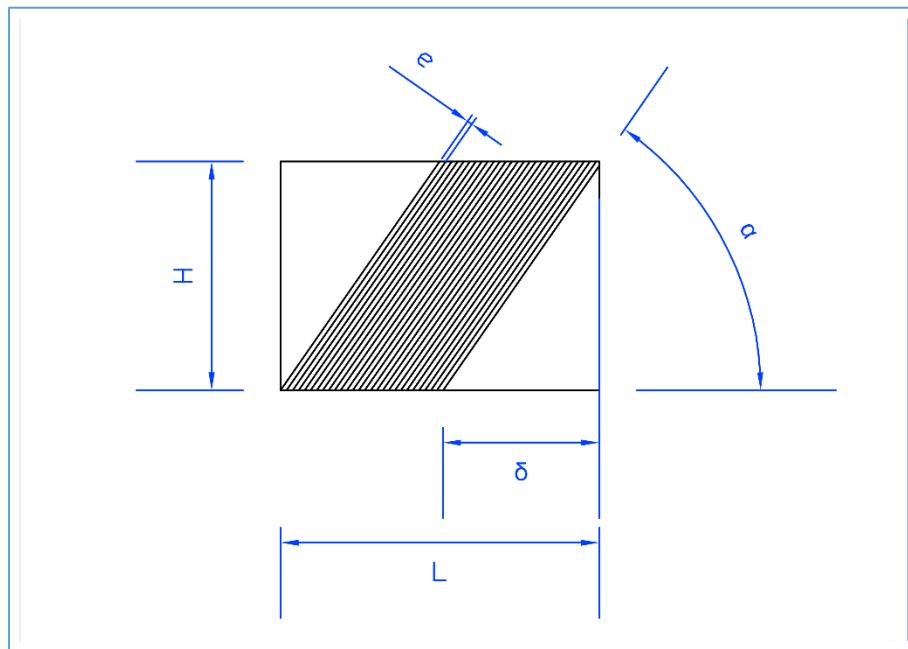


Figure V-5 : Dimensions relatives à une simple décantation lamellaire

- Surface totale projetée

Pour le cas d'un décanteur lamellaire à section rectangulaire, la surface totale projetée s'exprime par la formule suivant :

$$STP = (n - 1) S \cos \alpha$$

Avec :

n : nombre de lamelles

S : surface de décantation d'un module lamellaire

α : inclinaison des plaques

- Surface élémentaire de décantation

$$S_d = L_{lam} l$$

- Longueur disponible :

$$L = (n - 1) \frac{e}{\sin \alpha} + \frac{H}{\tan \alpha}$$

- Nombre de lamelles :

$$n = \frac{\left[ L - \frac{H}{\tan \alpha} \right]}{\frac{e}{\sin \alpha}} + 1$$

- Diamètre hydraulique

$$D_H = \frac{2el}{(e + l)}$$

- Surface total projeté :

$$STP = \frac{\left[ L - \frac{H}{\tan \alpha} \right]}{\frac{e}{\sin \alpha}} l L_{lam} \cos \alpha$$

$$STP = \frac{\left[ L - \frac{H}{\tan \alpha} \right]}{\frac{e}{\sin \alpha}} l \frac{H}{\tan \alpha}$$

$$\boxed{STP = \frac{l \sin \alpha}{e \tan \alpha} \left( LH - \frac{H^2}{\tan \alpha} \right)}$$

(11)

Dérivons cette relation par rapport à H :

$$\frac{d(STP)}{dH} = \frac{l \sin \alpha}{e \tan \alpha} \left( L - 2 \frac{H}{\tan \alpha} \right)$$

$$\frac{d(STP)}{dH} = 0 \text{ équivaut à } \boxed{H = \frac{L \tan \alpha}{2}}$$

$$STP_{max} = \frac{l \sin \alpha}{e \tan \alpha} \left( L \frac{L \tan \alpha}{2} - \frac{\left( \frac{L \tan \alpha}{2} \right)^2}{\tan \alpha} \right)$$

$$STP_{max} = \frac{l \sin \alpha}{e} \left( \frac{L^2}{2} - \frac{L^2}{4} \right)$$

$$STP_{max} = \frac{l \sin \alpha}{e} \left( \frac{L^2}{4} \right)$$

$$\boxed{STP_{max} = \frac{l \sin \alpha}{4e} (L l)}$$

(12) C'est la surface totale projetée maximale obtenu pour

une hauteur  $H = \frac{L \tan \alpha}{2}$  de l'ouvrage pour les modules simples.

Il faut noter que cette hauteur maximale reste applicable quelle que soit la forme.

## V.6.2 Forme hexagonal

- Surface élémentaire de décantation

Nous considérons un cas particulier de configuration géométrique utilisant les propriétés d'un triangle rectangle particulier utilisé en pratique pour les constructions géométriques. Les côtés d'un tel triangle vérifient la relation suivante :  $3^2 + 4^2 = 5^2$ .

Pour le cas de la **figure V - 6** :

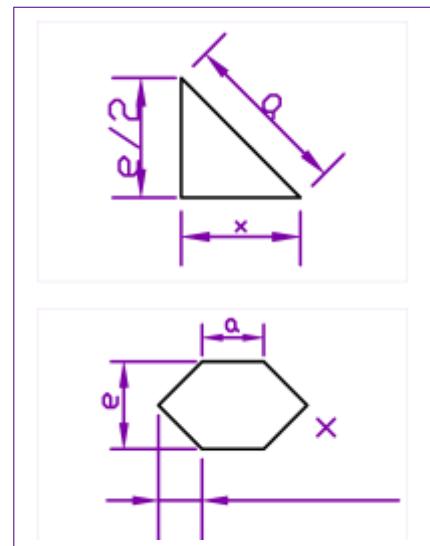
$x = 3 ; \frac{e}{2} = 4 ; a = 5$  (Propriétés d'un triangle rectangle remarquable)

On a :  $a = \frac{5}{8}e$  et  $x = \frac{3}{8}e$

La surface élémentaire de l'hexagone régulier s'exprime par :

$$S = a * e + x * e \text{ ou bien, } S = \left(\frac{5}{8} + \frac{3}{8}\right) e^2$$

La surface élémentaire d'un module s'exprime par  **$S = e^2$** . (13)



*Figure V-6 : Triangle remarquable, forme hexagonal de module*

Et l'expression de la surface élémentaire de décantation, démontré dans une autre partie, est

$$\boxed{S_d = \frac{S}{e} * L_{lam}}$$

Avec

$S$  : surface élémentaire d'un module

$e$  : entre-axe des lamelles ou hauteur de chute des particules dans un module lamellaire,

$L_{lam}$  : longueur des modules.

Finalement :

$$\boxed{S_d = e L_{lam}} \quad (14)$$

- Diamètre hydraulique :

Le diamètre hydraulique s'exprime par la relation :

$$D_H = 4 \frac{S}{P}$$

Avec S surface élémentaire et P périmètre correspondant

Dans notre cas,  $P = 6a = 6 * \frac{5}{8}e$  on a,  $P = \frac{15}{4}e$

$$\boxed{D_H = \frac{16}{15}e} \quad (15)$$

- Nombre de module

Exprimons le nombre de module contenu dans une surface rectangulaire de décantation dont les dimensions sont représentées dans la figure ci-dessous :

Notons par :

$N_{2n}$ ,  $N_{2n+1}$  respectivement le nombre de module suivant les colonnes paires et impaires

$N'_{2n}$  et  $N'_{2n+1}$  respectivement le nombre de colonne paire et impaire sont notées

Le nombre total de module s'exprime par la relation :

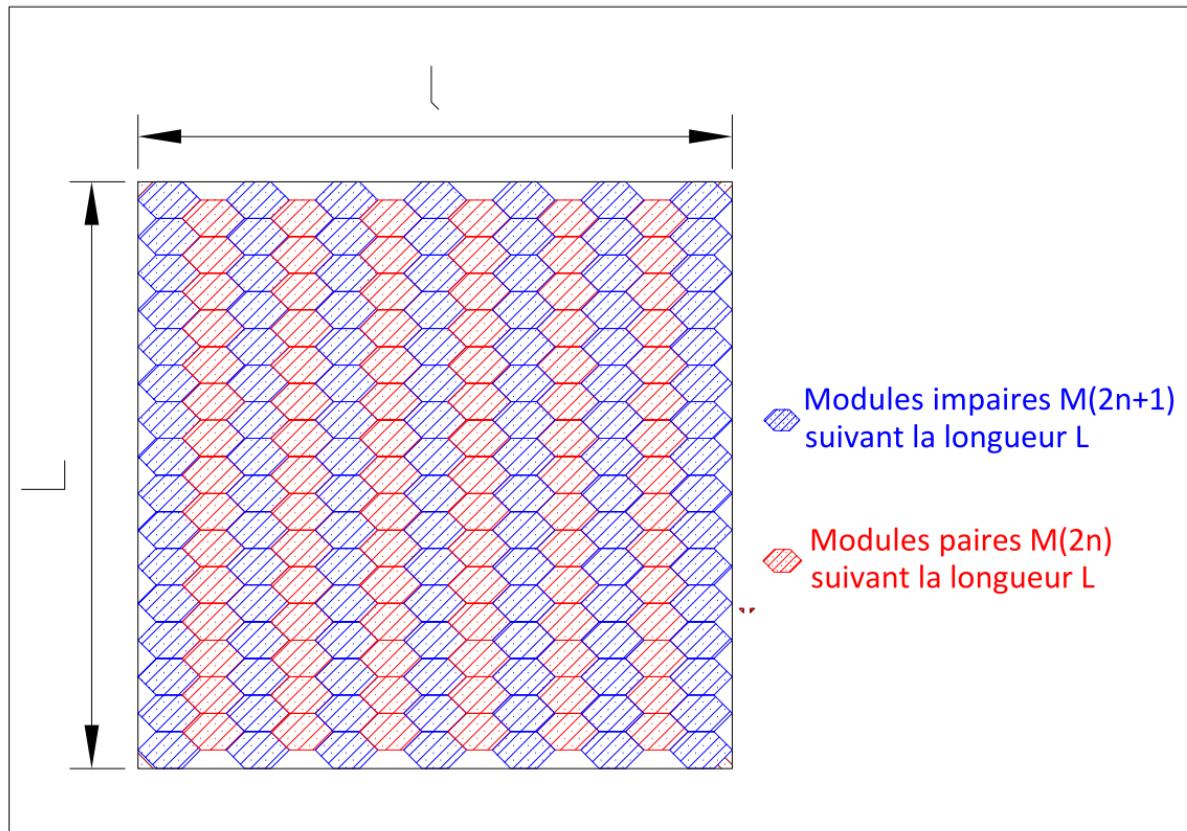
$$\boxed{N = N_{2n} * N'_{2n} + N_{2n+1} * N'_{2n+1}} \quad (16)$$

Dans notre cas on exprime  $N_{2n}$  et  $N_{2n+1}$  en fonction de la longueur L :

$$N_{2n+1} = \frac{L_0}{d} \text{ et } N_{2n} = N_{2n+1} - 1$$

Ce qui fait que

$$\begin{cases} N_{2n+1} = \frac{L_0}{d} \\ N_{2n} = \frac{L_0}{d} - 1 \end{cases}$$



*Figure V-7 : Implantation des modules hexagonaux dans la surface de décantation*

D'autre part, le nombre de colonne paire et impaire  $N'_{2n}$  et  $N'_{2n+1}$ .sont exprimées en fonction de la largeur l.

Et notons par p : le nombre de parties planes et

- $p'$  : le nombre de parties inclinées

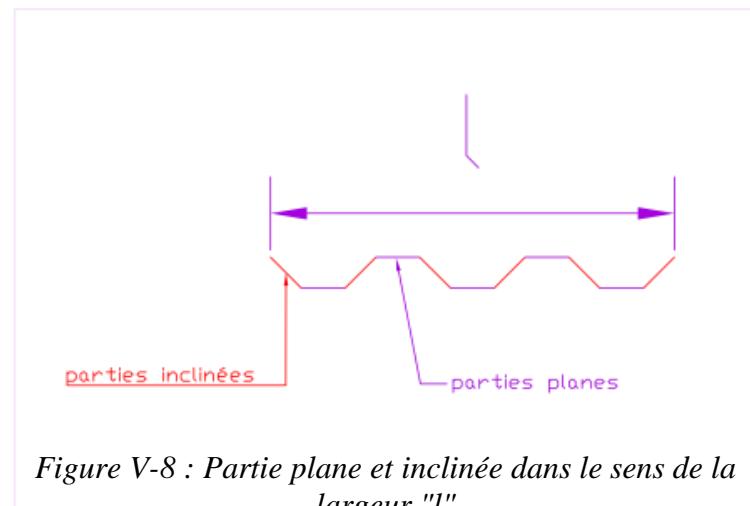
On a :

$$x * p' + a * p = l \text{ et dans notre cas } p' = p + 1$$

$$\frac{3}{8}d p' + \frac{5}{8}d p = l$$

$$\frac{3}{8}d(p + 1) + \frac{5}{8}d p = l$$

$$d p = l - \frac{3}{8}d$$



*Figure V-8 : Partie plane et inclinée dans le sens de la largeur "l"*

L'expression du nombre de parties planes est donnée par :  $p = \frac{l - \frac{3}{8}d}{d}$

Dans notre cas, on peut écrire :  $N'_{2n+1} = N'_{2n}$

$$N'_{2n+1} = \frac{p}{2} = \frac{l - \frac{3}{8}d}{2}$$

$$N'_{2n+1} = N'_{2n} = \frac{l - \frac{3}{8}d}{2d} \quad (17)$$

L'expression du nombre total de module est donnée par :

$$N = \left( \frac{L_0}{d} - 1 \right) \left( \frac{l - \frac{3}{8}d}{2d} \right) + \left( \frac{L_0}{d} \right) \left( \frac{l - \frac{3}{8}d}{2d} \right)$$

$$N = \frac{(L_0 - d)(l - \frac{3}{8}d)}{2d^2} + \frac{L_0(l - \frac{3}{8}d)}{2d^2} = \frac{(L_0 - d + L_0)(l - \frac{3}{8}d)}{2d^2}$$

$$N = \frac{(2L_0 - d)(l - \frac{3}{8}d)}{2d^2} \quad (18)$$

- Remarque 1, la valeur de la longueur  $L_0$  est dans ce cas différent de la longueur disponible, il faut le diminuer d'une certaine valeur  $\delta$  (défini dans la figure forme simple) à cause de l'inclinaison des lames.

Cette valeur est donnée par  $L_0 = L - \delta = L - \frac{H}{\tan \alpha}$  ou bien dans le cas optimal, pour les conditions optimales,  $H = \frac{L \tan \alpha}{2}$  ;

$$L_0 = \frac{L}{2}$$

- Remarque 2, on exprime «  $d$  » en fonction de «  $e$  », dans l'intérêt d'obtenir une relation en fonction de «  $e$  »

$$e = d \sin \alpha, d = \frac{e}{\sin \alpha}$$

- Surface total projeté :  $STP = N * S_d * \cos \alpha$

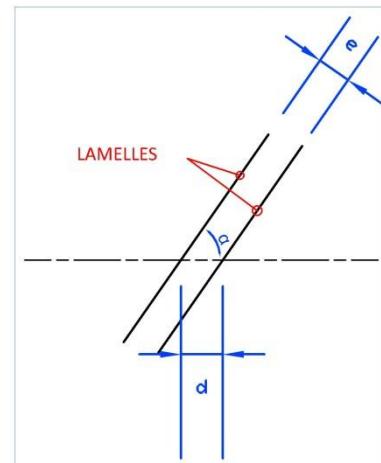


Figure V-9 : Relation entre "d" et "e"

$$STP = \frac{(2L_0 - d)(l - \frac{3}{8}d)}{2d^2} e L_{lam} \cos \alpha \quad (19)$$

Avec  $\alpha$  : inclinaison des lamelles

### V.6.3 Forme ondulée

- surface élémentaire de décantation

Inutile de démontrer à travers une longue démarche la surface élémentaire d'un module de forme ondulée. Il suffit d'observer la **figure V-10** qui suit pour en déduire tout de suite cette surface.

$$S = 2\phi^2$$

Avec  $\Phi$  : diamètre d'un cercle de base composant le module.

En fonction de  $e$ , cette surface a pour expression :

$$S = \frac{e^2}{2}$$

La surface unitaire de décantation est données par

$$S_d = \frac{e L_{lam}}{2} \quad (20)$$

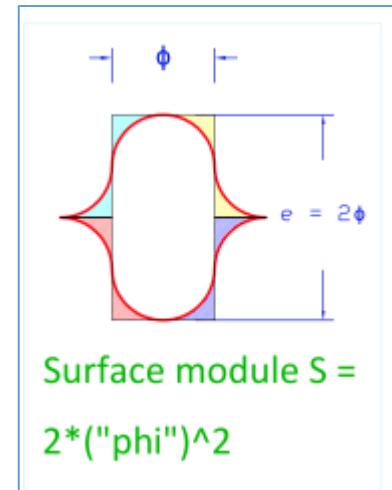


Figure V-10 : Surface d'un module de forme ondulée

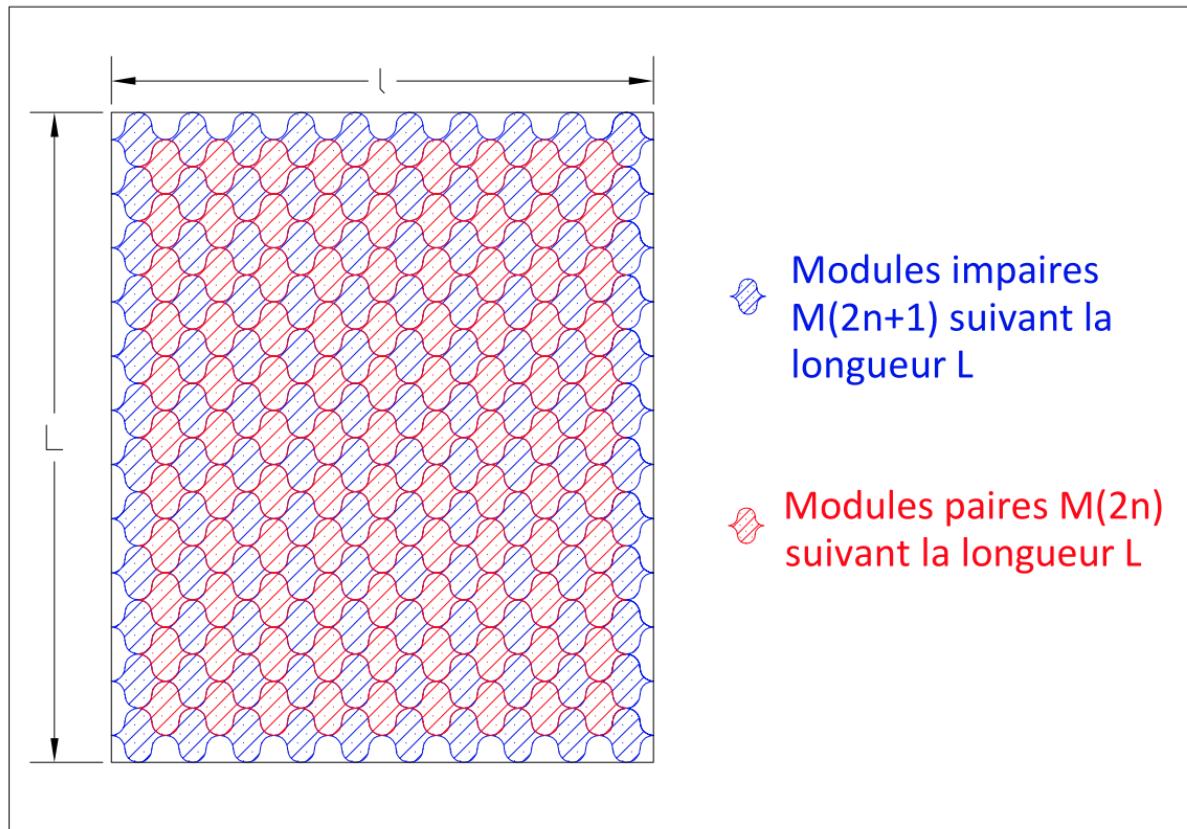
- diamètre hydraulique :  $D_H = 4\frac{S}{P}$ , avec  $P = 2\pi\Phi = \pi e$

$$D_H = \frac{2e}{\pi} \quad (21)$$

- nombre de module

Le calcul du nombre de module est presque le même que pour celle des modules trapézoïdales. Nous définissons les mêmes thermes pour le calcul du nombre total de module.

$$N_{2n+1} = \frac{L_0}{d}; N_{2n} = N_{2n+1} - 1 = \frac{L_0}{d} - 1, \text{ et } N'_{2n} = \frac{l}{d}; N'_{2n} = N'_{2n+1} - 1 = d - 1$$



*Figure V-11 : Implantation des modules ondulés dans la surface de décantation*

$$N = N_{2n} * N'_{2n} + N_{2n+1} * N'_{2n+1}$$

$$N = \frac{l}{d} \left( \frac{L_0}{d} - 1 \right) + \frac{L_0}{d} \left( \frac{l}{d} - 1 \right) = \frac{l(L_0-d)}{d^2} + \frac{L_0(l-d)}{d^2} = \frac{lL_0 - ld + L_0l - L_0d}{d^2}$$

$$\boxed{N = \frac{2L_0l - d(L_0 + l)}{d^2}} \quad (22)$$

- Surface total projeté :  $STP = N * S_d * \cos\alpha$

$$\boxed{STP = \frac{2L_0l - d(L_0 + l)}{d^2} \frac{e L_{lam}}{2} \cos \alpha} \quad (23)$$

- Remarques : en considérant les mêmes remarques que dans le cas des formes trapézoïdales, la valeur  $d = \frac{e}{\sin\alpha}$  et la valeur de  $L_0 = L - \delta = L - \frac{H}{\tan\alpha}$

#### V.6.4 Résumé et application numérique

En résumé, toutes les expressions sont exprimées en fonction de l'entraxe  $e$  qui est un paramètre astucieux dans la conception des décanteurs lamellaires. Le tableau qui suit donne un aperçu du calcul des modules de formes simples, trapézoïdales et ondulées.

*Tableau V-1 : Récapitulation des paramètres pour les trois formes*

	simple	trapézoïdale	ondulée
$S_d$	$L_{lam}l$	$eL_{lam}$	$\frac{e}{2}L_{lam}$
$D_H$	$\frac{2el}{(e + l)}$	$\frac{16}{15}e$	$\frac{2e}{\pi}$
$N$	$\frac{L_0}{d}$	$\frac{(2L_0 - d)\left(l - \frac{3}{8}d\right)}{2d^2}$	$\frac{2L_0l - d(L_0 + l)}{d^2}$
$SPT$	$\frac{l}{d}L_0\delta$	$STP = \frac{(2L_0 - d)\left(l - \frac{3}{8}d\right)}{2d^2}e\delta$	$STP = \frac{2L_0l - d(L_0 + l)}{d^2}e\delta$

Avec

$$d = \frac{e}{\sin \alpha}$$

$$L_0 = L - \frac{H}{\tan \alpha}$$

$$\delta = L_{lam}\cos \alpha = \frac{H}{\tan \alpha}$$

- Commentaires

On a donné ces expressions en fonction des paramètres liés :

- Aux dimensions du corps de l'ouvrage tels que :  $L$ , longueur disponible ;  $l$ , largeur de décantation
- et aux dimensions de chaque module tels que :  $e$ , entraxe des lamelles défini selon le cas ;  $H$ , hauteur des lamelles et  $\alpha$ , inclinaison par rapport à l'horizontal.

Ce tableau va servir de comparaison pour ces différentes variantes en calculant directement la Surface totale de décantation (STP) offerte par chaque variante pour un même cas d'ouvrage ( $L$  et  $l$ ) en faisant varier les paramètres liés au module lamellaire ( $e$ ,  $H$ ,  $\alpha$ ). Cette comparaison va montrer à travers les paramètres calculés les avantages offerts par chaque variante de forme.

- Application numérique :

$$e = 8[\text{cm}]; L = 6[\text{m}]; l = 2[\text{m}]; \alpha = 60[\circ]; H = 2 [\text{m}]$$

*Tableau V-2 : Application numérique pour "e" constant*

	simple	trapézoïdal	ondulée
$S_d [\text{m}^2]$	4,619	0,213	0,107
$D_H [\text{m}]$	0,08	0,099	0,059
$N$	53	1105	2197
$SPT [\text{m}^2]$	122,398	117,867	117,173

Ces résultats sont calculés pour une même valeur de l'entraxe «  $e$  ». On constate tout de suite que la valeur pour le cas des formes simples est le plus grand après celle de la forme trapézoïdal et ondulée. Mais on constate aussi que le diamètre hydraulique suit cette tendance. Ce qui veut dire que dans les mêmes conditions, le régime est plus proche du régime laminaire dans les modules de forme ondulée.

Dans ces conditions, nous obtenons le tableau suivant :

*Tableau V-3 : Application numérique pour "D<sub>H</sub>" constant*

	simple	trapézoïdal	ondulée
$S_d [\text{m}^2]$	4,619	0,173	0,145
$D_H [\text{m}]$	0,08	0,080	0,080
$N$	53	1682	1169
$SPT [\text{m}^2]$	95,398	145,773	84,947

Nous constatons dans ce cas que la forme trapézoïdale offre la meilleure performance en termes de surface de décantation. Cependant, la valeur de cette surface dépend largement de l'entraxe « e » et du critère de comparaison tel que le diamètre hydraulique. Actuellement, les constructeurs choisissent le diamètre hydraulique comme critère de comparaison et donc choisissent la variante trapézoïdale dans le cas des décanteurs à contre-courant.

Mais ce sujet est encore discutable dans le domaine de la recherche, en effet, la surface de décantation augmente à mesure qu'on diminue l'entraxe « e ». L'idéal serait donc de trouver la valeur inférieure limite de « e », et cette valeur peut différentier selon chaque variante de formes. Avant tout comparaison donc, il est raisonnable de trouver d'abord cette limite pour chaque cas et en suite, calculer la surface de décantation correspondante. Pour notre cas, nous adoptons le cas simple que tous les constructeurs adoptent et retenir la forme trapézoïdal pour variante à retenir.

Les modules lamellaires de DEGREMONT, inclinés à 60° sur l'horizontale, sont en polystyrène "choc". Ils sont constitués de tubes à section hexagonale; le diamètre hydraulique est de 80 mm, et la longueur de 1,500 m. L'importance de la section transversale de ces tubes permet de minimiser le risque de bouchage en présence de graisse et particules fibreuses.

La forme hexagonale présente les avantages suivants :

- ouverture maximale pour une performance hydraulique et une longueur de module données.
- absence de flexion sous le poids des boues, à la différence des modules lamellaires à plaques.
- Facile à rassembler et à réaliser par rapport à la forme ondulée

#### V.6.5 Détermination de la variation du Nombre de Reynolds

$$R_e = \frac{V D_H}{\nu} \quad (24)$$

Soit  $q_m$ ,  $S_m$ ,  $P_m$  le débit la surface mouillé le périmètre mouillé respectivement d'un module. Et soit  $Q$ ,  $S$ ,  $P$  le débit, la surface mouillé, le périmètre mouillé de l'ouvrage non équipé de lamelle.

- Dans un module lamellaire on donne l'expression :

- du débit  $q_m = \frac{Q}{N}$
- de la vitesse moyenne :  $V_m = \frac{q_m}{e^2}$
- du diamètre hydraulique :  $D_{H,m} = \frac{16}{15}e$

Dans ce cas, le nombre de Reynolds est donné par :

$$R_{e,m} = \frac{16 Q}{15 N e v}$$

- Dans un décanteur non équipé de lamelles :

- La vitesse  $V = \frac{Q}{l L}$
- Le diamètre hydraulique  $D_H = 2 \frac{l L}{(l+L)}$
- Le nombre de Reynolds  $R_e = \frac{2 Q}{v (l+L)}$

Rapport

$$\frac{R_e}{R_{e,m}} = \frac{15 N e}{8 (l + L)}$$

AN :  $e = 5$  [cm] ;  $l = 2$  [m] ;  $L = 6$  [m] ; on trouve  $N = 1150$

$$\frac{R_e}{R_{e,m}} \sim 21$$

Ou bien :

$$R_e \sim 21 R_{e,m} \quad (25)$$

L'interprétation la plus simple de cette expression est la suivante : le facteur de proportionnalité 21 montre que dans un décanteur muni de lamelles, l'écoulement est beaucoup plus laminaire que dans un décanteur simple. En effet, c'est l'un des principaux avantages de l'application des décanteurs lamellaires.

## V.7 Application

### V.7.1 Calcul de la quantité de matériaux pour le cas des lamelles de forme hexagonale:

Les modules hexagonaux sont obtenus en pliant les plaques et en les disposant côté à côtés, comme le montre la **figure V-12**. La méthode que nous proposons calcule la quantité de matériaux nécessaire pour la construction des modules.

On a noté tout à l'heure

$N_{2n+1}$  : le nombre de module suivant la longueur

p et p' : nombre de partie plane

- Nombre de plaques :

$$N_p = 2(N_{2n+1} + 1)$$

Avec  $N_{2n+1} = \frac{L_0}{d}$  On a  $N_p = 2(\frac{L_0}{d} + 1)$

- Longueur de plaques :

$$L_p = (p + p') * a$$

p et p' sont respectivement les parties planes et les parties inclinées. (Cas simple où p=p' ; ap=5\*l/8)

$$L_p = 2ap = 2 * \frac{5}{8}l$$

$L_p = \frac{5}{4}l$

(26)

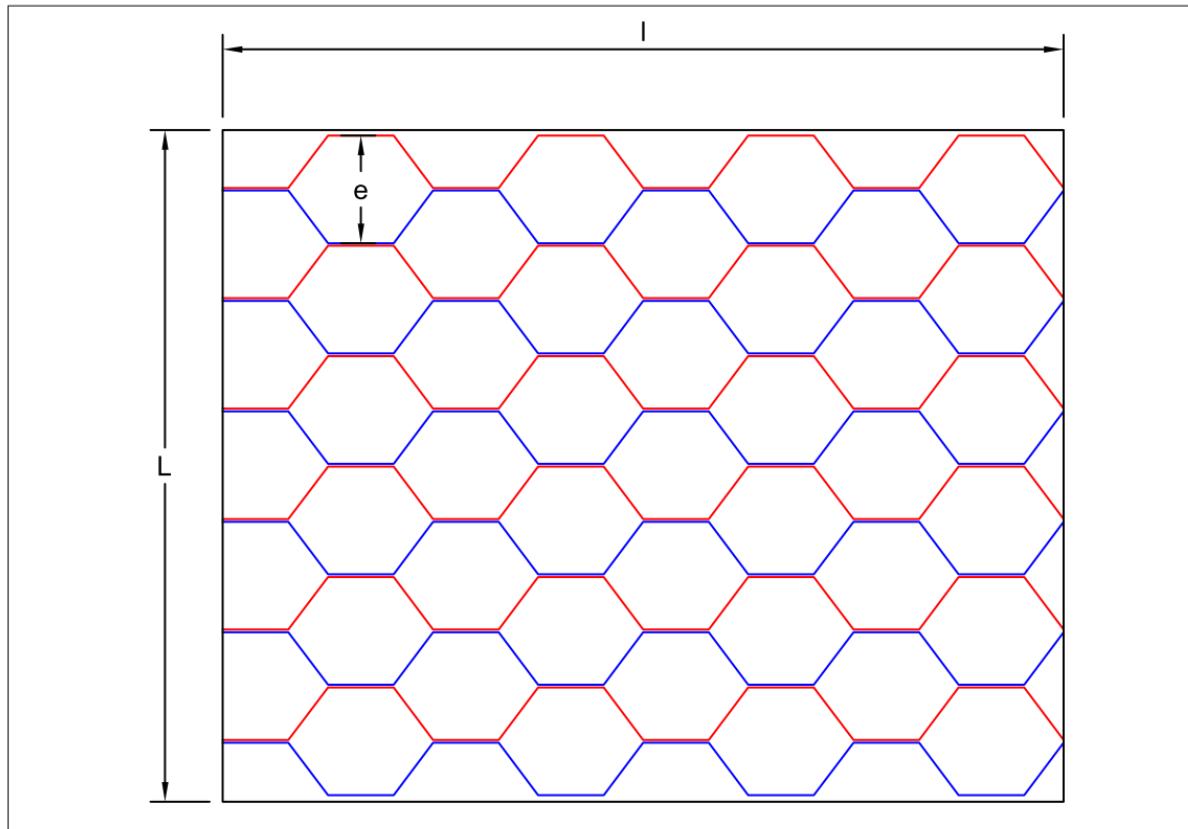


Figure V-12 : Mode de réalisation des modules hexagonaux

### V.7.2 Propriétés des modules lamellaires

Dans les appareils à recirculation de boues, les modules lamellaires, généralement en forme de tubes dont les dimensions doivent être judicieusement choisies pour obtenir les performances requises tout en évitant les risques de bouchages, sont placés dans la zone de décantation dont la surface efficace se trouve ainsi artificiellement augmentée.

Forme usuelle :

- Forme : hexagonale
- Inclinaison :  $60^\circ$
- Diamètre hydraulique : 80 [mm]
- Côté : 50 [mm]
- Longueur : 1,5 [m]
- Nature : polystyrène choc

Forme particulier : Les modules dont la conception est toute particulière, sont formés de plaques et de déflecteurs (SUPERPULSATOR de DEGREMONT). Ils jouent ici un double rôle : ils accroissent l'efficacité du lit de boue par les lents mouvements tourbillonnaires qu'ils créent en son sein permettant ainsi de réduire considérablement le temps nécessaire à la flocculation ; en outre, leur conception permet l'obtention de tourbillon stationnaire et le maintien entre les plaques d'un lit de boues soumis à des vitesses ascensionnelles importantes.

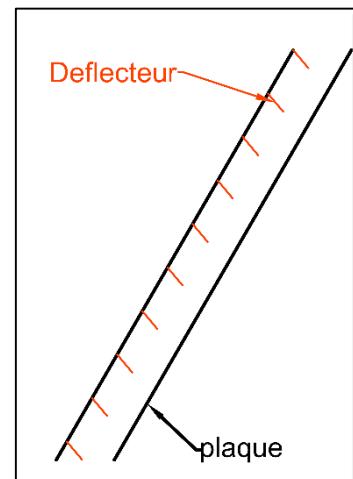


Figure V-13 : Forme particulière de module

### **Remarque importante sur l'optimisation du fonctionnement hydraulique des décanteurs lamellaires !!!**

L'optimisation du fonctionnement hydraulique des décanteurs lamellaires consiste à chercher un modèle de décanteur lamellaire permettant d'homogénéiser au maximum la vitesse qui passe à travers les lames. En effet, L'une des hypothèses utilisée pour le calcul du nombre de lames est la **répartition homogène de l'eau entre toutes les lames**, c'est l'une des clés du bon fonctionnement d'un décanteur lamellaire (Chocat, 1997).

## CHAPITRE VI - MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION

### VI.1 Modèles de conception

#### VI.1.1 Modèle idéal, élaboré par Hazen

Le modèle de Hazen reste le plus simple et le plus pratique. Le principe consiste à comparer la vitesse de sédimentation des particules  $V_s$  avec la charge hydraulique superficielle  $V_H$  (rapport débit  $Q$  et surface de décantation  $S$ ).

Cette notion est établie en adoptant les hypothèses les plus simples mais constitue une base solide pour le dimensionnement de tous les types de décanteur. C'est donc un modèle idéale de décantation donnée par la relation (8) :

$$V_s > V_H \quad (8)$$

- $V_s$  : pour les particules floculées surtout à concentration élevée, la variation de la vitesse de sédimentation suit des lois complexes qui exigent une étude cas par cas à l'aide des approches expérimentales et empiriques.
- $V_H$  : Ce paramètre est influencé par le débit à traiter et la géométrie d'écoulement de l'ouvrage. En effet, dans la réalité, la vitesse d'écoulement change d'intensité et de direction en tout point de l'ouvrage.

Les deux paramètres sont donc variables dans le temps et dans l'espace. Tous les modèles appliqués servent donc à maîtriser les deux paramètres du modèle de Hazen.

N.B. : limite d'application. Pour des concentrations en solide élevées, l'application de ce modèle s'avère insuffisant, un autre paramètre entre en jeu, c'est le flux en matière solide.

#### VI.1.2 Modèle physique rationnel – couplage modèle géométrique et modèle hydrodynamique

Les ingénieurs utilisent des modèles pour représenter les propriétés physiques, chimiques et processus biologique des systèmes réels. Historiquement, un outil de modélisation sophistiquée était un privilège que seules les grandes entreprises pouvaient se permettre, pour lesquels les économies réalisées dans la production en vrac justifient les coûts de logiciels et nécessité d'engager des spécialistes. Les ingénieurs d'aujourd'hui sont éduqués dans l'utilisation

d'outils de modélisation utilisant les logiciels et sont souvent censées créer des modèles réalistes de systèmes avancés sur leurs ordinateurs personnels. Tous les modèles sont des idéalisations de la réalité et en tant que tels possèdent des limites. Ainsi, les résultats de tous les modèles doivent être interprétés et traités avec une certaine prudence.

Le module CFD (Computational Fluid Dynamics) est un package optionnel qui étend l'environnement de modélisation avec des interfaces physiques personnalisés et des fonctionnalités optimisées pour l'analyse de tous les types d'écoulement de fluide. Il est développé pour une grande variété d'utilisateurs, y compris chercheurs, développeurs, les enseignants et les étudiants. Les modules CAO (Conception Assisté par Ordinateur) servent à modéliser des géométries complexes ; elles offrent une interface permettant de construire dans des précisions strictes la géométrie d'un système. Les technologies actuelles offrent la possibilité de combiner les deux modules capable de construire ce qu'on convient d'appeler une « maquette virtuelle ». On exploite cette maquette pour la résolution de certains problèmes complexes ne possédant pas de solution analytique ou ayant une solution trop complexe pour être mise en œuvre facilement.

### **VI.1.2.1 Modélisation hydrodynamique**

*"Il est beaucoup plus facile d'étudier le mouvement d'astres infiniment éloignés de nous que celui d'un ruisseau qui coule à nos pieds"* disait Galilée.

Actuellement, la modélisation hydrodynamique est une partie intégrante dans un nombre sans cesse croissant des processus de développement, et est un domaine bien établi dans de nombreuses et différentes disciplines d'ingénierie tel que mécanique, chimique, Génie civil, aéronautique, et même dans des domaines plus spécialisés tels que l'ingénierie biomédicale.

#### **VI.1.2.1.1 Hypothèses utilisés en Mécanique des fluides**

Il existe dans la mécanique rationnelle et la mécanique classique un mode de raisonnement qui consiste à étudier des systèmes mécaniques matérialisés par des points et des solides.

En mécanique des fluides, on utilise un autre mode de raisonnement. On commence à matérialiser le volume du fluide à étudier, c'est-à dire un ensemble de molécules fluide

déterminé par un domaine ( $\mathcal{D}$ ) appelée volume de contrôle, de volume ( $\Omega$ ) et de surface enveloppe ( $\Sigma$ ).

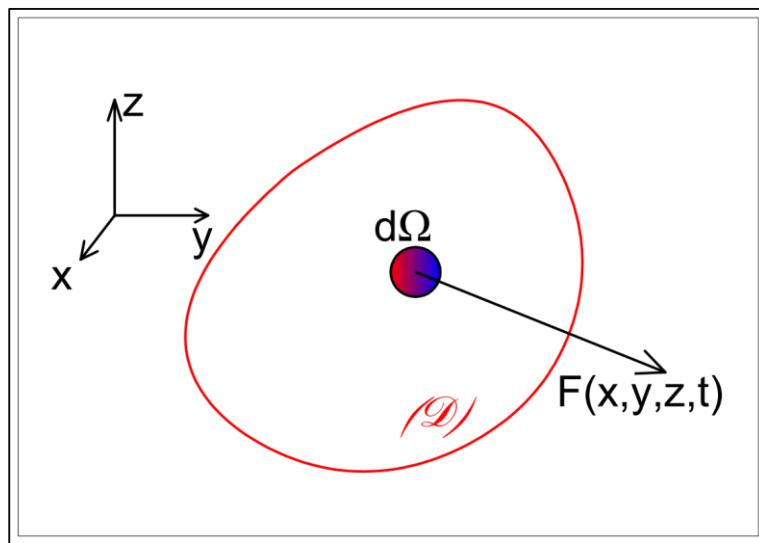


Figure VI-1 : Représentation spatial du volume de contrôle

Les forces agissant sur ce domaine sont exprimées en forces de surfaces et forces de volume. On applique ainsi les principes de la mécanique rationnelle à une particule fluide de volume  $d\Omega$  située dans le volume de contrôle :

$$\vec{F}d\Omega = \frac{d\vec{V}}{dt} \rho d\Omega \quad (27)$$

$\rho(x, y, z, t)$  Définie la masse volumique d'une particule de volume  $d\Omega$  et de masse  $dm$ .

$\vec{V}(x, y, z, t)$ , le vecteur champ de vitesse

$d\vec{F} = \vec{F}d\Omega$  représente la force agissant sur la particule qui est composée de forces de volumes et forces de surfaces.

En intégrant sur le volume  $\Omega$ , on a :

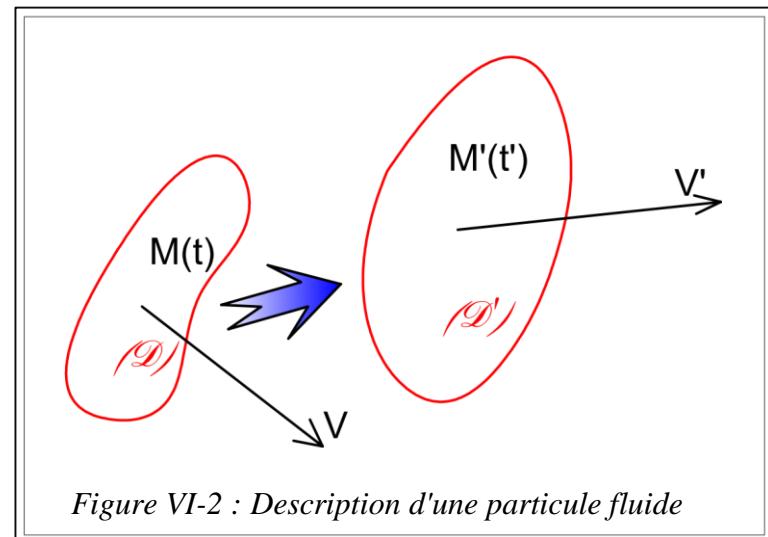
$$\int \vec{F}d\Omega = \int \frac{d\vec{V}}{dt} \rho d\Omega \quad (28)$$

### VI.1.2.1.1.2 Notion de particule

Soit un domaine ( $\mathcal{D}$ ) qui matérialise le volume de contrôle à l'instant  $t$ , qui devient ( $\mathcal{D}'$ ) à l'instant  $t'$  pendant un temps  $t - t'$ .

A l'instant  $t$ , on définit un point  $M$  de vitesse  $\vec{V}$  appartenant au domaine ( $\mathcal{D}$ ).

- Si  $\vec{V}_M$  ne varie pas au cours du temps, on a un écoulement uniforme
- Si non,  $\vec{V}$  varie et devient  $\vec{V}'$



$\forall M \in (\mathcal{D})$ , si la vitesse  $\vec{V}$  est uniforme dans ( $\mathcal{D}$ ), et que cette vitesse devenue  $\vec{V}'$  est uniforme dans ( $\mathcal{D}'$ ), ( $\vec{V}$  peut être  $\neq \vec{V}'$ ) on dit que ( $\mathcal{D}$ ) est une particule dans l'échelle de travail.

### VI.1.2.1.1.3 Hypothèse de continuité

L'hypothèse du continu concerne la dimension de la particule à prendre en considération lorsqu'on travaille à très petite échelle. Si  $b$  est le rayon de la boule considérée comme particule, on ne peut pas descendre d'une certaine valeur concernant  $b$ .

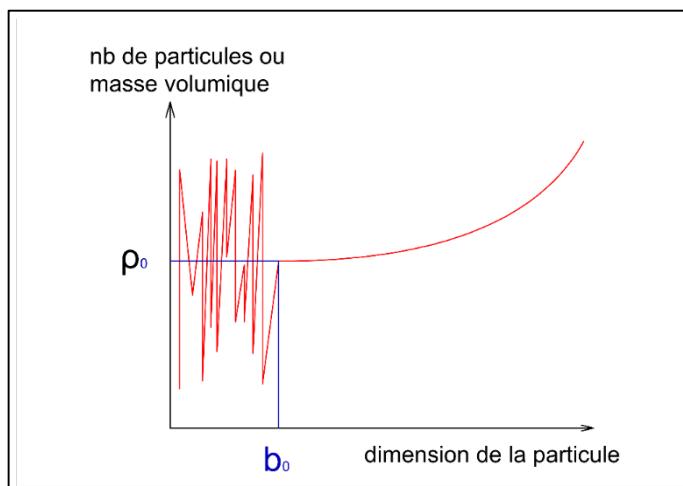


Figure VI-3 : Limites de l'hypothèse de continuité

Si  $b$  décroît, le nombre de molécules décroît pour arriver à la dimension de la molécule, mais à la dimension de l'atome  $b < b_0$  il va y avoir de la discontinuité de la masse volumique (mécanique quantique). Le volume se balade à cause de la vibration. La masse est concentrée au niveau du noyau. On ne peut pas calculer la masse volumique car l'orbite de l'électron est très grande par rapport au volume de l'atome.

En mécanique des fluides, on adopte une dimension des particules supérieure à  $b_0$ .

#### **VI.1.2.1.1.4 Echelle de travail suivant la dimension $d^*$ de la particule**

Selon les disciplines concernées, la dimension de la particule varie de l'ordre de l'Armstrong au kilomètre. En effet par exemple pour les écoulements océaniques, on n'arrive pas à étudier efficacement les gradients de vitesses si on choisit des petits diamètres.

*Tableau VI-1 : Echelle de travail suivant la dimension  $d^*$  de la particule*

<b>discipline</b>	<b>Dimension de la particule <math>d^*</math></b>	<b>Domaine de travail ou échelle de travail</b>
<b>Mécanique quantique</b>	$d^* < b_0$	Nucléaire - atomique
<b>Physique des fluides</b>	$d^* > b_0$	Rétention capillaire ou adsorption - absorption des eaux réticulaire
<b>Mécanique des fluides</b>	$d_{\max}=1 \text{ [mm]}$ $d_{\min}=1 \text{ [\mu m]}$	Aéronautique - aérodynamique ou profil d'ail d'avion aérospatial
<b>Hydraulique</b>	10 [cm]	Hydraulique fluvial
	1 [cm]	Irrigation
	1 [mm]	infiltration
<b>hydrogéologie</b>	10 [m]	Eau souterraine
<b>hydrologie</b>	1 [km]	Etude des bassins versants, étude des ressources en eau
<b>météorologie</b>	1 [km]	Déplacement des cyclones (vortex)
<b>océanographie</b>	10 [km]	Courant marin

### VI.1.2.1.2 Modèles physique et Equations de base de la dynamique des fluides

#### VI.1.2.1.2.1 Écoulement monophasique

##### VI.1.2.1.2.1.1 Equations de Navier-Stokes

L'application du principe fondamental de la dynamique à une particule de masse  $dm$  et de volume  $d\Omega$  située dans un fluide réel délimité par un volume de contrôle (D) conduit à l'établissement des équations de mouvement de la dynamique des fluides réels connues sous le nom d'équation de Navier – Stokes. La forme la plus général de cette formule est donnée par des équations aux dérivées partielles exprimées sous forme indicelle :

$$\frac{\partial \mathbf{u}_i}{\partial t} + \mathbf{u}_j \frac{\partial \mathbf{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu + \mu'}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\partial \mathbf{u}_j}{\partial x_j} \right) + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 \mathbf{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} + \mathbf{f}_i \quad (29)$$

Dans cette expression indicelle,  $i = 1, 2, 3$

Cette équation a été établie dans l'hypothèse du **fluide newtonien** qui dit que l'état de contrainte est la superposition d'un état de contrainte isotrope du fluide parfait et d'un état de contrainte linéaire en fonction des vitesses de déformation.

$$\sigma_{ij} = -p \delta_{ij} + \sigma'_{ij} \quad (30)$$

L'expression représente  $-p\delta_{ij}$  les composantes normales (pression) et  $\sigma'_{ij}$  : Composantes tangentielles (frottements)

$$\sigma'_{ij} = \mu' \operatorname{div} \vec{V} \delta_{ij} + 2 \mu U_{ij} \quad (31)$$

$$U_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (32)$$

Avec :

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si non} \end{cases} : \text{symboles de Kronecker}$$

$U_{ij}$ : Tenseur vitesse de déformation

$\mu$  : Viscosité dynamique

$\mu'$  : Deuxième viscosité (viscosité de dilatation). Pour les gaz monoatomiques,  $\mu$  et  $\mu'$  sont liés par la relation de **Stokes** :  $3\mu' + 2\mu = 0$       (33)

$\rho$  : Masse volumique

$f_i$  : Force par unité de masse

#### **VI.1.2.1.2.1.2 Equation de continuité**

L'équation de continuité est basée sur la loi de conservation de la masse, elle s'écrit de la façon suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (34)$$

Théoriquement, en intégrant les équations aux dérivées partielles et en résolvant les équations qui en découlent (équations de Navier-Stokes et des équations de continuité), on aboutit aux variables fonction du temps  $t$  et de l'espace  $x_i$  suivantes :

La vitesse :  $u_i = u_i(x_i, t)$

La pression :  $p = p(x_i, t)$

La masse volumique :  $\rho = \rho(x_i, t)$

#### **VI.1.2.1.2.2 Modèle de turbulence**

##### **VI.1.2.1.2.2.1 Grandeur caractéristique – nombre de Reynolds**

Reynolds met en évidence à l'aide d'une expérience l'existence de deux régimes d'écoulements. La frontière entre ces deux régime apparaît pour une valeur particulière déterminée expérimentalement d'une grandeur adimensionnel appelé nombre de Reynolds définit par :

$$R_e = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (35)$$

$\rho$  : masse volumique du fluide

$V$  : vitesse de l'écoulement

$\mu$  : viscosité dynamique

$L$  : longueur caractéristique de l'écoulement

L'exemple le plus courant est celui de l'écoulement dans les conduites circulaires, la longueur caractéristique de l'écoulement est définie par le diamètre  $D$  de la conduite. Le nombre de Reynolds critique est  $R_{e_{cr}} = 2\,000$ .

Du point de vue énergie, le nombre de Reynolds apparaît en transformant les équations de Navier-Stokes en écriture adimensionnel. Dans ce cas, ce nombre représente le

rapport entre la force d'inertie et la force de viscosité. De ce point de vue, quand la vitesse augmente, à un certain moment les forces de viscosité n'arrivent plus à stabiliser l'écoulement, le régime devient donc turbulent.

#### *VI.1.2.1.2.2.2 Modélisation statistique de la turbulence*

Strictement parlant un écoulement turbulent est non permanent étant donné que les valeurs des vitesses et des pressions ainsi que les trajectoires des particules liquides y varient avec le temps. En l'absence de conditions variables imposées au fluide, le régime turbulent est un régime permanent en moyenne. Le brassage du fluide s'opère à différentes échelles, toutefois la plus petite échelle de la turbulence est très grande vis-à-vis du libre parcours moyen de l'agitation moléculaire. On définit alors la valeur instantanée d'une grandeur quelconque (vitesse, masse volumique, température, etc.) par la somme :

$$G = \bar{G} + G'(t) \quad (36)$$

Dans laquelle  $\bar{G}$  est la valeur moyenne définie par :  $\bar{G} = \frac{1}{\tau} \int_t^{t+\tau} G dt$

Et  $G'(t)$  est la valeur de la fluctuation dont la moyenne est nulle.

Il est important de remarquer que l'analyse statistique de la turbulence a été possible grâce à **l'anémométrie à fils chauds** et au traitement analogique des signaux de l'anémomètre.

Ainsi, la vitesse et la pression se décompose de la façon suivante :

$$u_i = \bar{u} + u'_i$$

$$p = \bar{p} + p'$$

Avec :

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u_i dt$$

$$\bar{u}' = \frac{1}{T} \int_0^T u'_i dt = 0$$

Et :

$$\bar{p} = \frac{1}{T} \int_0^T p dt$$

$$\bar{p}' = \frac{1}{T} \int_0^T p' dt = 0$$

Cette décomposition en valeur moyenne et fluctuante entraîne au niveau physique, une considération du mouvement moyen et du mouvement d'agitation turbulente.

Les équations de mouvement en fluide incompressible deviennent :

- Conservation de la masse (équation de continuité) :

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (37)$$

- Equations de Navier-Stokes

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j \right) \quad (38)$$

Les termes  $-\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j$  apparaissent, et sont appelés contraintes de Reynolds proviennent de la décomposition de Reynolds. Le but de l'ensemble des modèles de transport de quantités moyennes consiste à estimer ces contraintes de Reynolds.

Les grandeurs relatives du modèle de turbulence :

- $\mu_T$  appelé viscosité turbulente. Contrairement à la viscosité moléculaire, cette viscosité n'est pas un paramètre intrinsèque au fluide, mais dépend essentiellement de l'écoulement et de son niveau de turbulence.
- $k$  représentant l'énergie cinétique turbulente donnée par l'expression :

$$k = \frac{1}{2} \bar{u}'_i^2 \quad (39)$$

#### *VI.1.2.1.2.2.3 Équations de fermeture*

Les équations régissant le modèle statistique de turbulence sont obtenues en injectant dans les équations de mouvement la décomposition de Reynolds des grandeurs en grandeurs moyenne et fluctuante. La non-linéarité de ces équations entraîne, dans ce mode de traitement, l'apparition d'inconnues supplémentaires qui rendent « ouvert » le système classique d'équations (nombre d'inconnues supérieur au nombre d'équations). Il convient donc de formuler des équations complémentaires dites **équations de fermeture** afin de résoudre le problème.

#### VI.1.2.1.2.2.3.1 Modèles k- $\varepsilon$

Depuis l'apparition des ordinateurs dont les moyens de calcul sont de plus en plus puissants, on essaie de modéliser les écoulements turbulents, non seulement pour obtenir les champs des grandeurs moyennes mais aussi ceux des corrélations. Pour cela, on utilise des équations supplémentaires. Le modèle le plus répandu actuellement est le modèle k –  $\varepsilon$  ; il constitue un moyen acceptable entre temps de calcul et de richesse d'information. On écrit sur k, énergie cinétique de turbulence, une équation de bilan dans laquelle apparaît un nouveau terme  $\varepsilon$  appelé dissipation de l'énergie cinétique de turbulence. On établit une autre équation de bilan sur  $\varepsilon$  avec des simplifications pour faciliter l'exploitation. Ces deux équations à deux nouvelles inconnues k et  $\varepsilon$  permettent, par une formule empirique, l'estimation de la viscosité turbulente :

$$\mu_T = \frac{\rho C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (40)$$

Où  $C_\mu$  est une des constantes du modèle.

L'équation de transport pour k s'écrit :

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u \cdot \nabla k = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (41)$$

Où

$$P_k = \mu_T \left( \nabla u (\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3} (\nabla \cdot u)^2 \right) - \frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot u$$

L'équation de transport pour  $\varepsilon$  s'écrit :

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u \cdot \nabla \varepsilon = \nabla \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + C_{\varepsilon^1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon^2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (42)$$

Les constantes des modèles sont déterminées expérimentalement, les valeurs sont listées dans le tableau VI-2.

Constantes	valeurs
$C_\mu$	0,09
$C_{\varepsilon^1}$	1,44
$C_{\varepsilon^2}$	1,92
$\sigma_k$	1,0
$\sigma_\varepsilon$	1,3

Tableau VI-2: Constantes du modèle turbulence k- $\varepsilon$   
(42)

Le modèle contient un jeu de constantes sélectionnées par comparaison des résultats du calcul avec ceux des mesures expérimentales. Ce jeu de constantes devant être légèrement modifié d'une configuration à une autre, on conclut que le modèle k –  $\varepsilon$  n'est pas universel malgré son degré de sophistication. Beaucoup d'études sont conduites pour le rendre plus performant, toutefois le modèle k –  $\varepsilon$  est accessible actuellement dans les logiciels commercialisés.

Référence données par le constructeur :

**D.C. Wilcox**, *Turbulence Modeling for CFD*, 2nd ed., DCW Industries, 1998.

**H.K. Versteeg** et **W. Malalasekera**, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*, Prentice Hall, 1995.

#### VI.1.2.1.2.2.3.2 Le modèle RSM

Le modèle des contraintes de Reynolds ou Reynolds Stress Model (RSM) est un modèle de fermeture du second ordre.

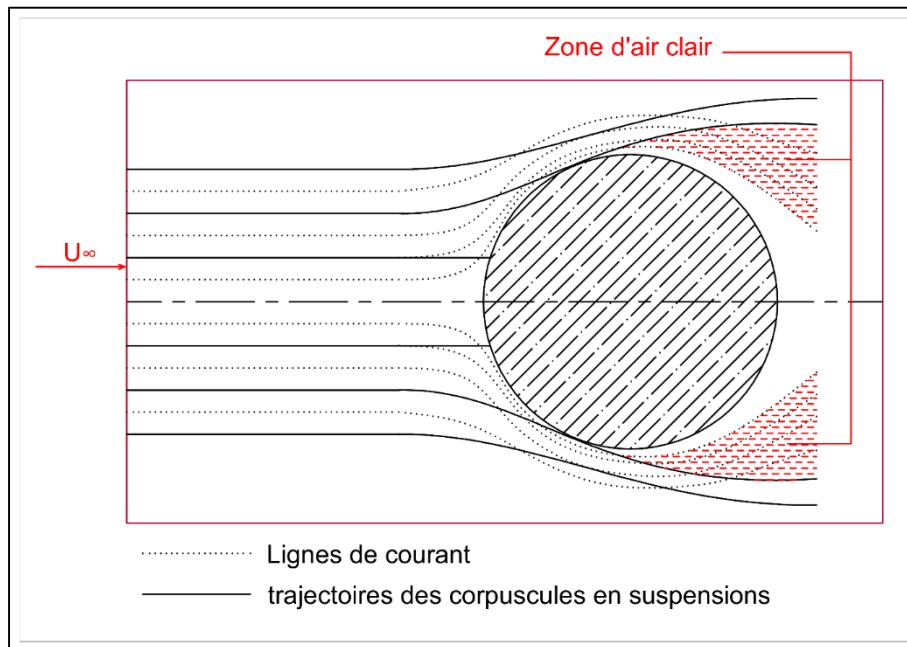
le modèle RSM (Reynolds Stress Model) conserve telles quelles les tensions de Reynolds. Ce modèle, qui utilise des équations de transport pour les tensions de Reynolds, est plus précis que les précédents dans le cas des écoulements complexes car, contrairement aux modèles  $k - \varepsilon$ , l'hypothèse d'une turbulence isotrope n'est pas utilisée.

Ce modèle est potentiellement le plus général et le plus complet des modèles de turbulence classique.

#### VI.1.2.1.2.3 Mécanique des suspensions

Une suspension est un milieu inhomogène diphasique constitué d'une phase continue de masse volumique  $\rho_f$ , de viscosité cinématique  $\mu$ , et d'une phase dispersée de masse volumique  $\rho_c$ .

La suspension étant animée, à l'infini amont, d'une vitesse  $\overrightarrow{U_\infty}$ , plaçons un obstacle G dans l'écoulement (voir figure). Les lignes de courants (lignes en tirets), qui sont rectilignes à l'infini amont, s'incurvent au voisinage de l'obstacle. Les corpuscules suivent les lignes de courants sur leur partie rectiligne, mais ont des trajectoires (traits pleins) distinctes de ces lignes de courant au voisinage de l'obstacle, là où le champ de vitesse n'est plus uniforme.



*Figure VI-4 : Lignes de courants, trajectoires des corpuscules en suspensions autour d'un obstacle*

L'intérêt principal d'établir l'équation générale de la mécanique des suspensions est de savoir comment peuvent se déterminer les trajectoires des corpuscules en suspension dans un champ dynamique non uniforme, mais connu, lorsque le mouvement du fluide est plan ou de révolution, autrement dit, lorsque les lignes de courant sont planes.

L'écoulement des fluides est défini par :

- Les caractéristiques du fluide
  - Sa masse volumique  $\rho_f$
  - Sa viscosité cinématique  $\nu$
  - Sa vitesse à l'infini amont  $\overrightarrow{U_\infty}$
- Les caractéristiques de l'obstacle
  - Sa forme
  - L'un de ses dimensions

A partir des données précédentes, la mécanique des fluides nous permet théoriquement de déterminer le champ de vitesse autour de l'obstacle. Nous supposons qu'il est effectivement connu

La mécanique des suspensions va nous permettre maintenant de tracer les trajectoires de corpuscules si nous nous fixons :

- Les caractéristiques des corpuscules
  - forme
  - masse volumique  $\rho_c$

- volume V ou leur surface total S ou l'une de leurs dimensions D ; dans le cas d'un corpuscule sphérique, D est le diamètre
- fraction volumique  $\Phi_0$  (rapport entre le volume occupé par les particules et le volume total du fluide et des particules)

Remarque sur la Viscosité d'une suspension : l'introduction de particules solides dans un fluide y modifie le champ de vitesse et le champ de contraintes. Leur présence est aussi à la source de modification de la viscosité d'un fluide.

#### *VI.1.2.1.2.3.1 Les équations générales résolue par le logiciel*

Nous utilisons le modèle de mélange qui est un modèle macroscopique de l'écoulement à deux phases. Il suit la concentration de phase moyenne, ou fraction de volume, et résout une équation de mouvement unique pour la vitesse de mélange. Il est adapté à des mélanges constitués de particules solides ou de gouttelettes de liquide immergées dans un liquide. Les deux phases consistent en une phase dispersée et une phase continue.

Le modèle de mélange est valide si la phase continue est un liquide et la phase dispersée est constituée de particules solides. Le modèle de mélange repose sur les hypothèses suivantes :

- La masse volumique de chaque phase est approximativement constante.
- Les deux phases partagent le même champ de pression.
- La vitesse relative entre les deux phases est essentiellement déterminée en supposant un équilibre entre le gradient de pression et la résistance visqueuse.

L'équation de mouvement pour le mélange est donnée par :

$$\rho \mathbf{u}_t + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p - \nabla \tau_{G_m} + \rho g + \mathbf{F} - \nabla \left[ \rho C_d (1 - \rho C_d) \left( U_{slip} - \frac{D_{md}}{(1 - \rho C_d) \phi_d} \nabla \phi_d \right) \left( U_{slip} - \frac{D_{md}}{(1 - \rho C_d) \phi_d} \nabla \phi_d \right) \right] \quad (43)$$

Où :

- $\mathbf{u}$  : vitesse [m/s]
- $\rho$  : densité [kg/m<sup>3</sup>]
- $p$  : pression [Pa]
- $C_d$  : fraction de masse de la phase dispersé [kg/kg]
- $U_{slip}$  : vitesse relative entre les deux phases [m/s]
- $\tau_{G_m}$  : somme de la tension visqueux et de la tension turbulent [kg/(m.s<sup>2</sup>)]

$$\tau_{G_m} = (\mu + \mu_T) [\nabla u + \nabla u^T] \quad (44)$$

- $\mu$  : viscosité de la suspension [Pa.s]

- $\mu_T$  : viscosité turbulente [Pa.s]
- $D_{md}$  : coefficient de dispersion turbulent [ $m^2/s$ ]
- $g$  : accélération de pesanteur [ $m/s^2$ ]
- $F$  : autre force de volume [ $N/m^3$ ]

La vitesse  $u$  utilisée ici est définie par :

$$u = \frac{\phi_c \rho_c u_c + \phi_d \rho_d u_d}{\rho} \quad (45)$$

Où :

- $\phi_c$  et  $\phi_d$  indiquent les fractions de volume de la phase continue et de la phase dispersée, respectivement [ $m^3/m^3$ ]
- $u_c$  et  $u_d$  sont les vitesses de la phase continue et de la vitesse de la phase dispersée [ $m/s$ ]
- $\rho_c$  et  $\rho_d$  sont respectivement la masse volumique de la phase continue et dispersée
- $\rho = \rho_c \phi_c - \rho_d \phi_d$  est la masse volumique du mélange [ $kg/m^3$ ]

En introduisant l'équation de transport de la phase dispersée dans l'équation de continuité du mélange on obtient l'équation :

$$(\rho_c - \rho_d) \left[ \nabla \cdot (\phi_d (1 - C_d) U_{slip} - D_{md} \nabla \phi_d) + \frac{m_{dc}}{\rho_d} \right] + \rho_c (\nabla \cdot u) = 0 \quad (46)$$

Où  $m_{dc}$  le taux de transfert de masse de la phase dispersée à la phase continue [ $kg/(m^3.s)$ ]

#### VI.1.2.1.2.3.2 Vecteur glissement

COMSOL propose dans cette interface trois modèles pour déterminer la vitesse relative entre les deux phases  $U_{slip}$ .

- Modèle de Schiller-Naumann
- Modèle de Haider-Levenspiel
- Modèle de Hadamard-Rybczynski

Les trois modèles utilisent la relation suivante pour déterminer  $U_{slip}$  :

$$\frac{3}{4} \frac{C_d}{d_d} \rho_c |U_{slip}| U_{slip} = - \frac{(\rho - \rho_d)}{\rho} \nabla p \quad (47)$$

Où  $C_d$  est le coefficient de résistance de la particule. Essentiellement interprète l'équilibre entre la résistance visqueuse et les forces de poussée qui agissent sur la phase dispersée.

Le modèle de Schiller-Naumann donne la relation :

$$C_d = \begin{cases} \frac{24}{Re_p} (1 + 0,15 Re_p^{0,687}) & \text{pour } Re_p < 1000 \\ 0,44 & \text{pour } Re_p > 1000 \end{cases} \quad (48)$$

Le modèle de Haider-Levenspiel est applicable à une particule non sphérique :

$$C_d = \frac{24}{Re_p} \left( 1 + A(S_p) Re_p^{B(S_p)} + \frac{C(S_p)}{1 + D(S_p)/Re_p} \right) \quad (49)$$

Où A, B, C, D sont des paramètres liés au facteur de sphéricité de la particule.

Le modèle de Hadamard-Rybczynski n'est valide que pour des nombres de Reynolds inférieurs à 1. Ce modèle donne l'expression :

$$C_d = \frac{24}{Re_p} \left( \frac{1 + \frac{2\mu_c}{3\mu_c}}{1 + \frac{2\mu_c}{3\mu_c}} \right) \quad (50)$$

Références données par le constructeur :

**M. Manninen, V. Taivassalo, and S. Kallio,** *On the Mixture Model for Multiphase Flow*, VTT Publications, 288, VTT Energy, Nuclear Energy, Technical Research Center of Finland (VTT), 1996.

**C. Crowe, M. Sommerfeld, and Y. Tsuji,** *Multiphase Flows with Droplets and Particles*, CRC Press, 1998.

#### VI.1.2.1.3 Outil de simulation : « **COMSOL MULTIPHYSICS** »

Le Groupe COMSOL propose une solution sur logicielle pour la simulation multiphysique. La société a été fondée en juillet 1986 à Stockholm en Suède par Dr Svante Littmarck, éditeur de logiciel de haute technologie à croissance rapide, avec une expérience reconnue et une approche de leader de son secteur. La société encourage la créativité dans une ambiance stimulante, dans laquelle chacun développe ses aptitudes.

##### VI.1.2.1.3.1 *Etapes de modélisation*

Les étapes à suivre pour le processus de modélisation dans le logiciel est la suivante :

- Définitions des paramètres et des variables de composants
- Création, importer et manipuler la géométrie
- Spécification des matériaux à inclure dans la composante
- Définition de la physique de l'écoulement de fluide dans des domaines et à des limites, et le couplage physique avec une autre
- Mettre en place un maillage approprié pour le domaine de la modélisation en tenant compte du comportement de l'écoulement de fluide système

- La résolution des équations qui décrivent un comportement de système fixe ou dynamique, ou comme une étude paramétrique ou optimisation
- La collecte et l'analyse des résultats à présenter pour une utilisation ultérieure dans d'autres analyses.

#### **VI.1.2.1.3.2 Les modèles physiques**

L'environnement de COMSOL® est une plate-forme flexible qui permet aux utilisateurs de modéliser tous les aspects physiques pertinents de leurs conceptions. Cette plateforme donne la possibilité de construire un modèle physique des phénomènes réels en utilisant les modules suivants :

- Electromagnétique et électrostatique
  - Champs magnétiques
  - Champs magnétiques et électriques
  - Circuit électriques
  - Courants électriques sur coque
  - Electrostatique
  - Machine tournante
- Acoustique
  - Pression acoustique
  - Interaction acoustique-structure
  - Aéroacoustique
  - Thermoacoustique
- Transport des espèces chimiques
  - Transport des espèces diluées
  - Transport des espèces concentrées
  - Equation de Nernst-Planck
  - Transport de soluté
  - Transport d'espèces en milieux poreux
  - Ecoulement réactif
  - Ecoulement réactif en milieux poreux
  - Machine tournante, écoulement réactif
  - Réaction de surface
  - Transport d'espèces diluées en conduites
  - Ecoulement réactif en conduites
  - Génie réactionnel
- Electrochimie
  - Distribution de courant primaire
  - Distribution de courant secondaire
  - Distribution de courant tertiaire, Nernst-Planck
  - Electroanalyse
  - Interfaces pour batteries
  - Corrosion, géométrie déformée
  - Electrodéposition, géométrie déformée
- Ecoulement fluide
  - Ecoulement monophasique
  - Ecoulement de film mince
  - Ecoulement diphasique
  - Ecoulement en milieux poreux et souterrain
  - Ecoulement non-isotherme
  - Ecoulement à haut nombre de Mach
  - Ecoulement raréfié
- Transfert de chaleur
  - Transfert de chaleur dans les solides
  - Transfert de chaleur dans les fluides
  - Transfert de chaleur en conduites
  - Transfert de chaleur en milieu poreux
  - Transfert de chaleur en milieu biologique
  - Transfert de chaleur dans des coques

- Transfert de chaleur fluide-solide
- Rayonnement
- Chauffage électromagnétique
- Effet thermoélectrique
- Optique
  - Optique ondulatoire
- Plasma
  - Dérive-diffusion
  - Plasma inductif
  - Transport d'espèces massives
  - Plasma micro-ondes
  - Plasma capacitif
  - Décharge
- Radio fréquence
  - Ligne de transmission
  - Onde électromagnétiques, analyse fréquentielle
  - Onde électromagnétiques, explicite en temps
  - Onde électromagnétiques, transitoire
- Mécanique des Structures
  - Mécanique du solide
  - Plaque
  - Poutre
  - Treillis
  - Dynamique Multicorps
  - Thermomécanique
  - Thermoélasticité
  - Chauffage par effet Joule et thermodilatation
  - Dispositifs piézoélectriques
  - Electromécanique
  - Fatigue
  - Section de poutre
- Semi-conducteur

#### **VI.1.2.1.3.3 Les modèles d'écoulement fluide : « computational fluid dynamics (CFD) »**

La modélisation et la simulation de l'écoulement du fluide est un moyen rentable pour les ingénieurs et les scientifiques à comprendre, développer et optimiser les dessins de contrôle et des processus d'élaboration d'un produit. À un coût donné, ces types de simulations conduisent généralement à de nouveaux et de meilleurs produits et à l'amélioration des opérations de dispositifs et processus par rapport aux études purement empiriques impliquant l'écoulement du fluide.

Le module CFD de COMSOL offre d'énormes possibilités selon le problème à résoudre :

- Régime permanent – Régime transitoire
- Ecoulement monophasiques
- Modèles de turbulence
- Ecoulement biphasique
  - Milieux poreux
  - Solide en suspension
- Transfert de chaleur
- Transport des espèces chimiques
- Possibilité de couplage des modèles physiques
- Et bien d'autre

#### **VI.1.2.1.3.4 Résultats de simulation**

Contrairement aux analyses expérimentales, qui sont le plus souvent effectuées dans un laboratoire où les mesures sont limitées à un petit nombre de points, une simulation CFD donne une « grande image » vue sur le champ d'écoulement. Une interprétation qualitative des champs de vitesse et de pression est généralement la première étape vers la création ou l'amélioration d'une conception.

En plus des qualitatives, « grande image », les simulations effectuées avec le module CFD donnent des estimations quantitatives précises de propriétés du champ d'écoulement, tels que le débit moyen à une différence de pression donnée, les coefficients traînée et de portance des organes soumis à un flux ou la qualité de l'air dans une pièce bien aérée.

Les études qualitatives forment généralement la base pour la compréhension, ce qui peut à son tour susciter de nouvelles idées. Ces idées peuvent alors conduire à des améliorations significatives pour les produits et les processus. Les études quantitatives, d'autre part,

constituent la base pour l'optimisation et le contrôle, qui peut également améliorer considérablement les produits et procédés, mais généralement le faire à travers une série de nombreuses petites étapes.

#### **VI.1.2.2 Conception assistée par l'ordinateur :**

« *Un bon dessin vaut mieux qu'un long discours* », André Chevalier – Guide du dessinateur industriel.

La conception assistée par ordinateur est née aux États-Unis aux environs de 1950 au moment où la General Motors et le Massachusetts Institute of Technology ont imaginé de converser avec un ordinateur par d'autres méthodes que la carte perforée, le ruban magnétique et le ruban perforé. En 1960, après un projet très élaboré, General Motors et IBM ont groupé leurs efforts pour mettre sur pied le premier écran graphique et ont abouti au projet nommé DAC 1 (Design Augmented by Computer). L'équipement comprenait un tube cathodique de grandes dimensions, un crayon électronique, un projecteur de microfilm, le tout branché sur un calculateur IBM 7094 ; le prototype de tube a ensuite été commercialisé, uniquement pour la CAO, sous l'appellation IBM 2250.

##### **VI.1.2.2.1 Modélisation géométrique d'un produit**

Nous modélisons le produit pour permettre la représentation d'une idée mais aussi pour l'utiliser en tant qu'outil de communication irremplaçable pour transmettre sans ambiguïté cette idée. Un modèle de produit est une représentation sémantique de l'information géométrique et technologique attachée à un produit technologique. Pour ce faire, nous utilisons les outils puissants des systèmes de Conceptions Assistés à l'Ordinateur.

Pour dessiner un objet, on crée, dans la mémoire de l'ordinateur, une représentation de la géométrie des formes de l'objet. Cette représentation géométrique s'appelle la modélisation. La modélisation géométrique des formes d'un objet est construite en trois dimensions (3D). Il en résulte que toute vue à l'écran n'est qu'une représentation de l'objet suivant une direction et un sens d'observation donnés. Chevalier « Guide du Dessinateur Industriel »

## VI.1.2.2.2 Module classique d'un logiciel CAO

Nous présentons les propriétés spécifiques qui nous intéresse et qui trouve application dans notre conception. Nous laissons le concept mathématique de la modélisation géométrique sur ordinateur aux innovateurs de ce domaine, mais on se contente d'appliquer les techniques actuelles et utiliser les logiciels de dernières versions disponibles à notre portée.

### VI.1.2.2.2.1 Conception de formes et de systèmes

La fonctionnalité première d'un logiciel de CAO étant de définir des formes de pièces et des systèmes mécaniques, on trouve les modules suivants :

- définition des formes 2D
- définition de formes 3D générales : c'est l'utilisation basique des modeleurs surfaciques et volumiques pilotés ou pas par un modeleur sous contraintes de type paramétrique ou variationnel ;

### VI.1.2.2.2.2 Mise en plan

Sortir des plans cotés contenant des informations technologiques selon les conventions du dessin industriel reste toujours nécessaire pour communiquer au sein de l'entreprise. Cette mise en plan est, de nos jours, hautement automatisée à partir du modèle tridimensionnel. Il suffit de désigner les vues, les coupes (locales ou partielles), les sections qui intéressent le dessinateur, et le dessin se fait automatiquement. Celui-ci n'a plus, par la suite, qu'à compléter l'habillage, c'est-à-dire définir les types de hachurage, les commentaires, désigner les vues dans lesquelles il désire qu'apparaisse une cote.

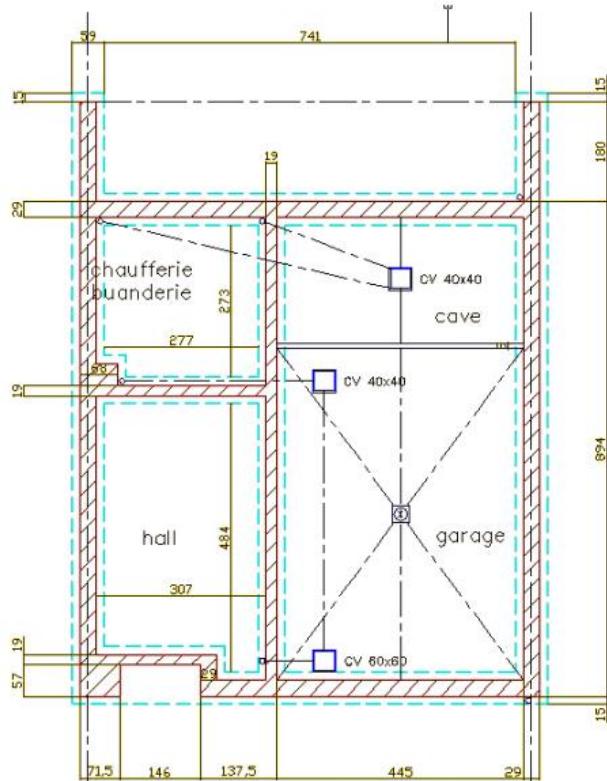


Figure VI-5: Mise à plan d'une structure de bâtiment

#### VI.1.2.2.2.3 Visualisation réaliste

Il s'agit d'avoir une vision réaliste, colorée, d'une pièce ou d'un assemblage, pour mieux appréhender son aspect en conception ou en faire une brochure publicitaire. De manière générale, tous les logiciels fournissent, en standard, une procédure élémentaire de coloration.

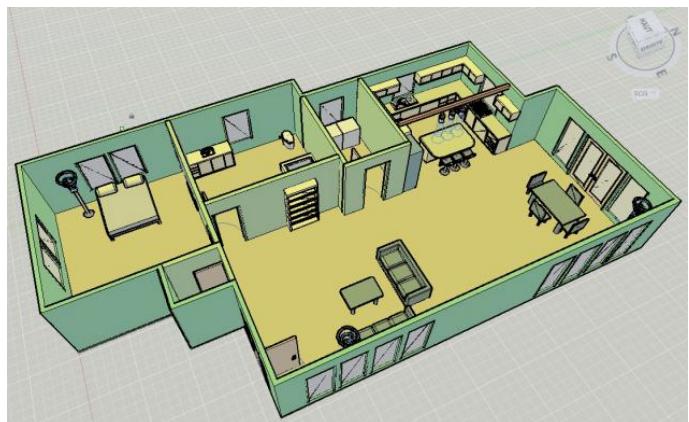


Figure VI-6 : Visualisation réaliste de l'intérieur d'un bâtiment

#### VI.1.2.2.2.4 Sortie des données géométriques sous un format particulier

Il s'agit d'export vers un autre logiciel de CFAO sous format IGES, SET ou bientôt STEP, de sauvegarde sous un format de dessin PostScript, TIFF, etc. ; d'export de la géométrie vers un maillage à éléments finis de type ANSYS ou COMSOL et d'export de la géométrie pour faire de la stéréo-lithographie.

#### VI.1.2.2.3 Outil de conception : AutoCad 2012

Le logiciel AutoCAD, créé par la société AUTODESK basée à San Raphael en Californie existe depuis 1982. Les mises à jour se sont rapidement succédées, si bien que depuis 2004, Autodesk lance une nouvelle version de son logiciel tous les ans.

L'échange de fichiers est possible grâce à la composante "Inventor Fusion" permettant de convertir les formats ".dwg" en format exploitable dans "COLSOL".

## VI.2 Les Etapes de conception

### VI.2.1 Pré-dimensionnement – modèle de Hazen

Le pré-dimensionnement consiste à calculer au préalable le nombre de modules N et la surface totale projetée STP correspondant :

(1) en fixant les dimensions concernant les modules lamellaires :

- Débit d'exploitation  $Q$  [ $m^3/s$ ]
- Forme : Hexagonal
- Inclinaison :  $60 [^\circ]$
- Longueur :  $1,5 [m]$
- Entraxe :  $8 [cm]$

On a démontré tout à l'heure l'expression de la vitesse de Hazen :  $V_H = \frac{Q}{STP}$

(2) en mesurant la vitesse  $V_s$  de décantation de particules floculées à l'aide :

- De l'essai de flocculation
- De l'essai de décantation
- Formule de Stokes

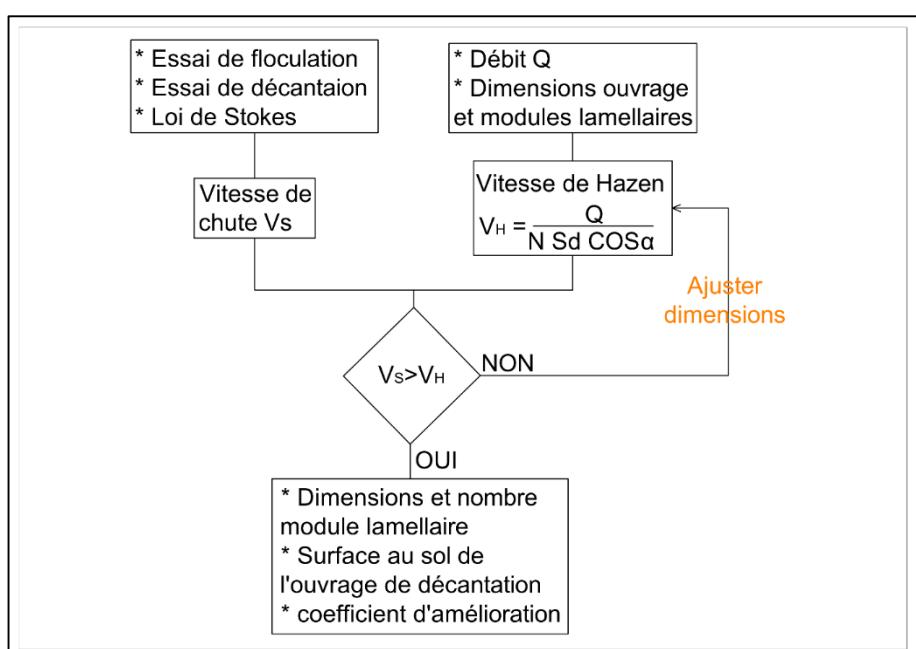


Figure VI-7 : Organigramme de pré-dimensionnement basée sur le modèle de Hazen

La condition de capture relie la vitesse de décantation avec la vitesse de Hazen  $V_s > V_H$ . On déduit de cette inégalité la surface totale projetée (STP) minimale du décanteur pour qu'il soit capable de retenir des particules de vitesse de décantation au moins égale à  $V_s$ .

Résultats : à ce niveau, obtient les dimensions liées aux modules lamellaires et la surface d'occupation au sol de l'ouvrage. On obtient aussi un rapport entre vitesse de Hazen fourni par un ouvrage contenant des lamelles et un ouvrage de même surface (occupation au sol). Ce rapport est de l'ordre de 5 à 15, appelé par certains auteurs coefficient d'amélioration, témoigne l'efficacité des décanteurs lamellaires par rapport aux décanteurs simples.

On n'a pas encore tenu compte ni de la forme de l'ouvrage (rectangulaire ou circulaire), ni de la répartition de flux dans la zone de décantation, ni de la répartition de concentration instantanée pendant le fonctionnement de l'ouvrage. Mais par contre, notons que toute conception débute par les dimensions calculées dans cette partie.

## VI.2.2 Première étape : Conception de la géométrie d'écoulement

### (dimensionnement)

La première étape consiste à fixer les paramètres liés au modèle physique :

- un modèle physique standard :
  - Ecoulement permanent fluide incompressible
  - Equation de fermeture en régime turbulent : "k- $\varepsilon$ "
- Fixer paramètre de fonctionnement ouvrage :  
Débit d'exploitation : 50 [m<sup>3</sup>/h]

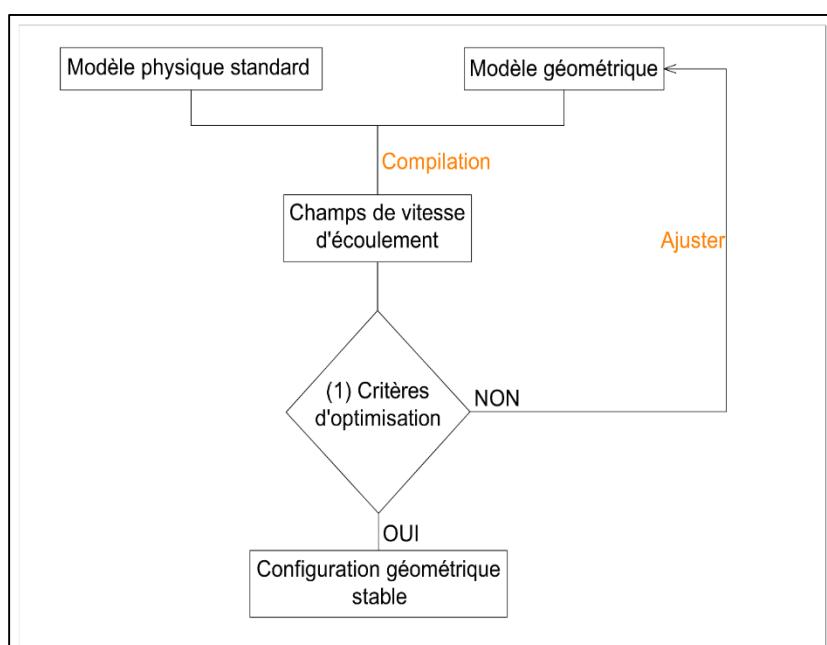


Figure VI-8 : Organigramme de conception de la géométrie d'écoulement

Première Critère d'optimisation : Obtenir un modèle de décanteur lamellaire permettant d'homogénéiser au maximum la vitesse qui passe à travers les lames.

La conception de géométrie d'écoulement consiste à utiliser les modèles géométriques afin de chercher une configuration géométrique qui satisfait le plus au critère d'optimisation. En effet, la construction des géométries complexes est beaucoup plus facile dans un modeleur géométrique tel qu'Auto CAD avant l'importation dans le logiciel de maillage élément fini tel que COMSOL. La répartition de flux dans la zone de décantation lamellaire dépend en grande partie de la forme du décanteur et surtout des conditions d'alimentation et de sortie d'eau à traiter.

Les paramètres nécessaires du modèle semblent complets, on lance la simulation. La compilation sur COMSOL résout les équations de mouvement et donne les résultats de champs de vecteur vitesse en tout point de l'écoulement. On ajuste la géométrie et on relance la simulation jusqu'à ce que la condition d'optimisation soit vérifiée à une limite près. On profite ainsi des possibilités offertes par la méthode de résolution numérique.

Résultats : A ce niveau, on obtient une géométrie d'écoulement stable et le dimensionnement de l'ouvrage est ainsi plus précis.

### VI.2.3 Deuxième étape : Calibrage du modèle physique

La seconde étape consiste à calibrer le modèle physique à travers un ouvrage pilote. La méthode consiste à comparer les champs de vitesse et la distribution de la concentration donnée, d'une part par les simulations numériques et d'autre part par des mesures réelles effectuées sur un même ouvrage pilote. L'objectif est de paramétrier convenablement le modèle physique utilisé dans le simulateur pour qu'il donne les résultats les plus proches possibles de la réalité. Le modèle ainsi obtenu peut être utilisé aisément dans d'autres conceptions.

**Second critère d'optimisation : Ecart négligeable entre valeur mesuré et valeur donnée par simulation.**

**Méthodologie :** La mesure locale des vitesses et de la concentration en matière solide dans un fluide en écoulement nécessite l'utilisation d'appareils complexes dont les méthodes optiques sont les plus développées et donnent des résultats précis. L'application de ces méthodes dépend du coût pour lequel on est prêt à mettre en œuvre et du gain (qualité du produit, fiabilité du contrôle, etc.) qu'on obtiendrait en effectuant ces mesures.

**Résultats :** On ajuste les paramètres du modèle physique, et même parfois, on change d'approche et on tente d'utiliser plusieurs modèles physiques pour en déduire qui est celui qui traduit au mieux le phénomène réel parmi les possibilités offertes par les constructeurs. Parfois même on peut tenter d'utiliser plusieurs codes offerts par plusieurs logiciels. A ce niveau on a à notre disposition un modèle physique bien calibré.

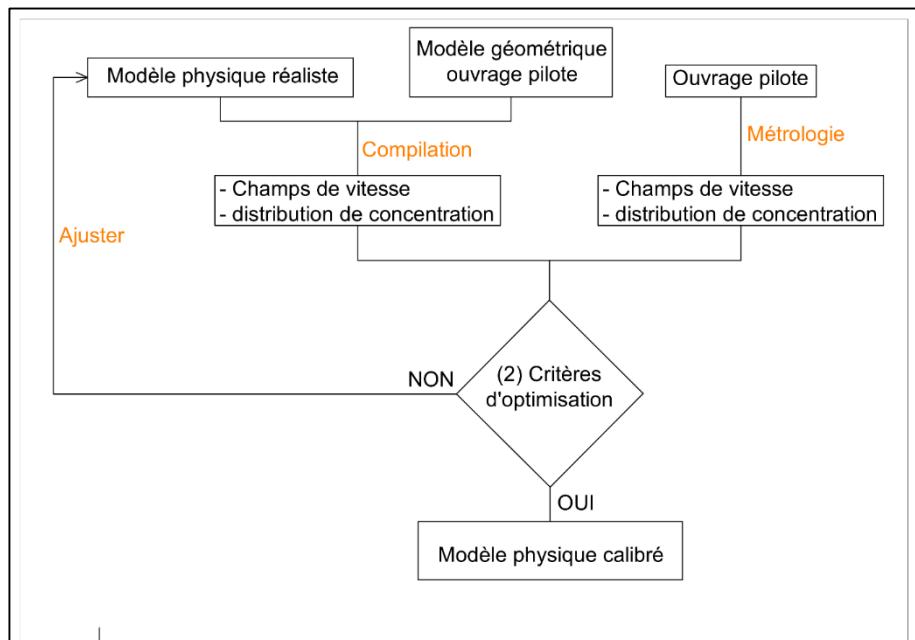
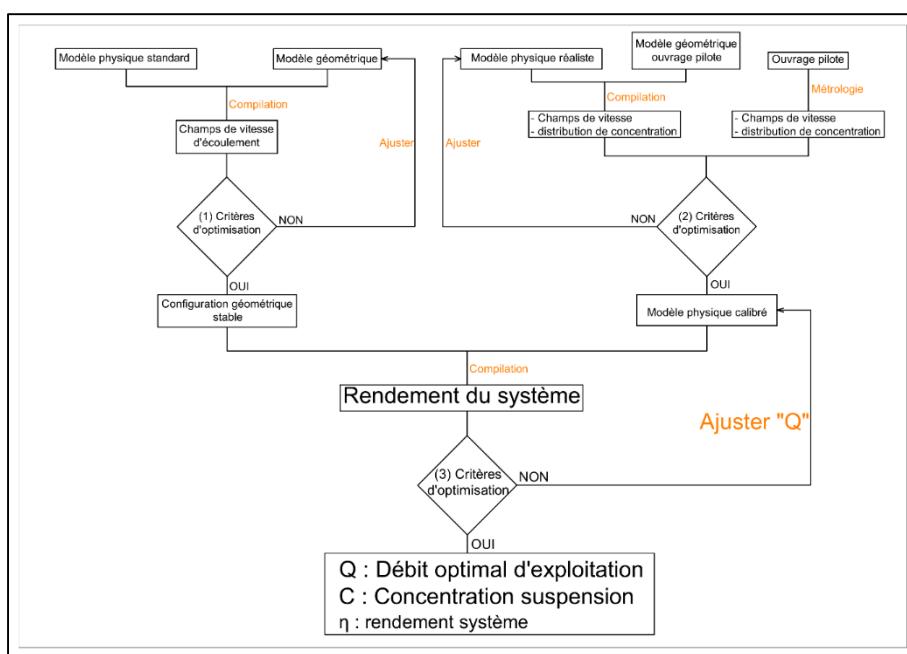


Figure VI-9 : Organigramme de calibrage du modèle physique

#### **VI.2.4 Troisième étape : Détermination du fonctionnement optimal et rendement de décantation correspondant**

On arrive à un niveau dans lequel on a à notre disposition un modèle physique bien calibré sur un ouvrage réel et une configuration géométrique stable satisfaisant aux principes de conception. La dernière étape consiste à simuler le phénomène de décantation dans l'ouvrage. Il est intéressant de simuler plusieurs scénarios dans l'intérêt de prévoir le fonctionnement de l'ouvrage en fonction de la variation saisonnière de la qualité d'eau brute.

On obtient ainsi un modèle formulé par le couplage du modèle physique et géométrique obtenue dans les étapes précédentes. La dernière application consiste à varier les paramètres de fonctionnement de l'ouvrage tel que débit d'exploitation  $Q$ , Concentration  $C$  en matière en suspension de l'eau à traiter. L'intérêt est de déterminer, pour une concentration  $C$ , le débit maximal admissible correspondant à un rendement  $\eta$  de décantation, c'est-à-dire la charge que doit supporter les filtres.



*Figure VI-10 : Organigramme d'optimisation du fonctionnement d'un décanteur*

## Synthèse et perspective d'application

### **Difficultés :**

- Les premières difficultés se présentent sur **la métrologie**. En effet, les différentes méthodes de mesure nécessitent l'utilisation des matériels sophistiqués, souvent

coûteux en fonction des précisions sur les grandeurs qu'on veut mesurer. A Madagascar, ce sont les organisations liées à l'étude hydrologique des fleuves qui sont réputés à effectuer les mesures de vitesses en utilisant des moulinets, des traceurs, ... . Mais le domaine est loin d'être comparable, les mesures de vitesses en hydrologie s'effectuent sur des sections, c'est-à-dire des surfaces. Or dans notre cas on a besoin d'une part la connaissance de la vitesse en tout point du volume de contrôle, son intensité, sa direction et son sens et d'autre part la distribution de la concentration en tout point et en tout instant du fonctionnement.

- Vennent ensuite les difficultés liées aux **matériels informatiques**. Des problèmes surviennent car nous utilisons une version " COMSOL 4.4 " qui est sortie en 2013. De ce fait, les générations de matériels informatiques de cette année ont des performances assez élevées.

Tentative d'application :

- Simplification des modèles hydrodynamiques : pour simplifier le problème, on ramène le problème dans l'espace en problème plan. Pour cela, on adopte l'hypothèse de l'écoulement plan pour les ouvrages rectangulaires et l'hypothèse des écoulements à symétrie axial pour les ouvrages circulaires. Le principal avantage des problèmes plans est la réduction de calcul pendant la compilation, des calculs que peuvent supporter notre matériel informatique.
- Limite d'application suivant les moyens investis dans les travaux de mémoire : Ce mémoire s'arrête sur le dimensionnement des ouvrages pour deux raisons : (1) aucun résultats sur la métrologie des vitesses et des concentrations sur les ouvrages pilotes faute de matériels de mesure ; (2) la simulation en régime permanent du phénomène de sédimentation présente peu de résultats, même en deux dimensions, l'intervention du dimension temps augmente le nombre de calculs à faire et demande donc des performances très élevées des matériels informatiques.

Recherche et Développement pour l'application du décanteur lamellaire dans le monde, exemple de la société PARKSON, " Treating Water Right " :

- Savoir sur les procédés : Parkson détient un savoir unique sur les procédés étant données ses 4 000 installations, 6 000 tests de laboratoire et 900 tests pilotes.

- Centre de recherche sur l'eau : Le centre de recherche sur l'eau de Parkson est doté d'experts en séparation qui peuvent effectuer des études d'optimisation personnalisées pour toute application. Parkson a des appareils d'essai pilote Lamella ® EcoFlow™ pleine grandeur pour effectuer des tests sur place.
- Conversions de décanteurs lamellaires : Parkson peut installer son système dans des décanteurs de la plupart des fabricants. Une conversion de plaque EcoFlow™ est la manière la plus rentable d'augmenter la capacité sans changer l'espace qu'occupe l'appareil. Parkson peut effectuer le travail avec son personnel et offre l'option de superviser les employés du client. Les deux options bénéficient des 41 années d'expérience en conversions de décanteurs lamellaires et la main d'œuvre est garantie.

## **CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE**

Dans son mémoire de fin d'études intitulé " Aménagement d'un ouvrage de décantation existant, Essai sur l'application des lamelles " de la filière Hydraulique en 1986, RAMAMONJISOA Irène Viviane s'est arrêté au niveau de l'application du modèle de Hazen (pré-dimensionnement dans notre conception). Cette étude applique la décantation lamellaire dans le traitement de la rivière Farafaty. En utilisant des modules de forme hexagonale, l'auteur trouve un ratio de 12 pour le coefficient d'amélioration.

On a repris le travail effectué dans ce mémoire et on a approfondi la conception de la géométrie d'écoulement en utilisant les outils les plus développés actuellement, les outils informatiques. Notre recherche se développe dans l'utilisation des bases solides de la mécanique des fluides, et l'utilisation des logiciels informatiques pouvant résoudre numériquement les équations établies dans ce domaine, pour la conception de forme géométrique dans le but de calculer avec précision les dimensions de l'ouvrage et d'établir un environnement d'écoulement stable et surtout favorable à la séparation physique des phases liquide d'eau claire de la phase solide de boue décantée.

La décantation lamellaire est, de nos jours un domaine en plein développement. En effet, l'application des lamelles demande l'intervention de plusieurs spécialités, précisons celles qui interviennent directement dans notre cadre d'étude : spécialiste en procédé, spécialistes de séparation, spécialistes d'écoulement, spécialistes de métrologie, spécialistes en construction. La difficulté se présente dans le perfectionnement des modèles, de l'amélioration des performances des systèmes pour maîtriser le phénomène et pour ensuite mieux l'appliquer. Ceux-ci nécessitent un investissement sur l'étude et sur les moyens nécessaires pour les effectuer. Cette mémoire atteint l'un de ses objectifs si l'un de ces problèmes éveillerait la curiosité des décideurs car les résultats fournis sont en général ceux obtenus à la limite des simples moyens de l'étudiant.

Il est important de noter que pour les étapes de conceptions, on s'arrête à la première étape pour une seule raison : les étapes suivantes nécessitent l'utilisation des appareils plus sophistiqués pour mesurer les vitesses en tout point, la concentration en tout point et la distribution granulométrique en tout point d'un ouvrage pilote utilisé pour caler le modèle de simulation numérique.

# **PARTIE – III**

# **ÉTUDE DE CAS**

# **CHAPITRE VII - AMÉNAGEMENT D'UN OUVRAGE DE DECANTATION EXISTANT, DECANTEUR PRAT-DANIEL DE MANDROSEZA I**

## **VII.1 Diagnostique de la situation actuelle**

### **VII.1.1 Qualité de l'eau brute du lac**

Parmi les paramètres standards, on constate une forte variation de la turbidité qui est la plupart des cas des eaux de surface. Les caractéristiques issus des contrôles effectués pendant les années d'exploitation du lac, permet d'affirmer que du point de vue qualité, actuellement, le lac est encore exploitable. Mais les fortes variations causées par la dégradation de l'environnement imposent une énorme contrainte aux infrastructures de traitement.

*Tableau VII-1 : Paramètres standard de la qualité d'eau brute du Lac Mandroseza*

	<b>MIN - MAX</b>	<b>MOYENNE</b>
<b>TURBIDITE [NTU]</b>	1,5 - 141	21,11
<b>PH</b>	5,5 – 8,51	7,14
<b>MINERALISATION [mg/l]</b>	13 - 55	24,65
<b>DURETE TOTAL [°F]</b>	0,5- 4,8	1,25
<b>FER [mg/l]</b>	0 - 5	0,38
<b>MATIERES ORGANIQUES [mg/l]</b>	0,15 – 4,1	1,32

### **VII.1.2 Description de l'ouvrage**

Le décanteur Prat-Daniel est un décanteur circulaire à flux vertical. L'eau brute est transportée par une conduite (1) qui débouche dans la partie centrale de l'ouvrage à un diamètre de 1[m]. L'eau déborde dans le tube hexagonal (2) et redescend vers le bas de l'ouvrage pour y remonter en suite dans la zone de décantation (3). Les réactifs coagulants sont injectés dans la conduite d'amenée avant d'entrée dans l'ouvrage. L'eau décantée déborde à surface libre dans le canal (4) pour ensuite sortir dans deux conduites (5) pour rejoindre les filtres.

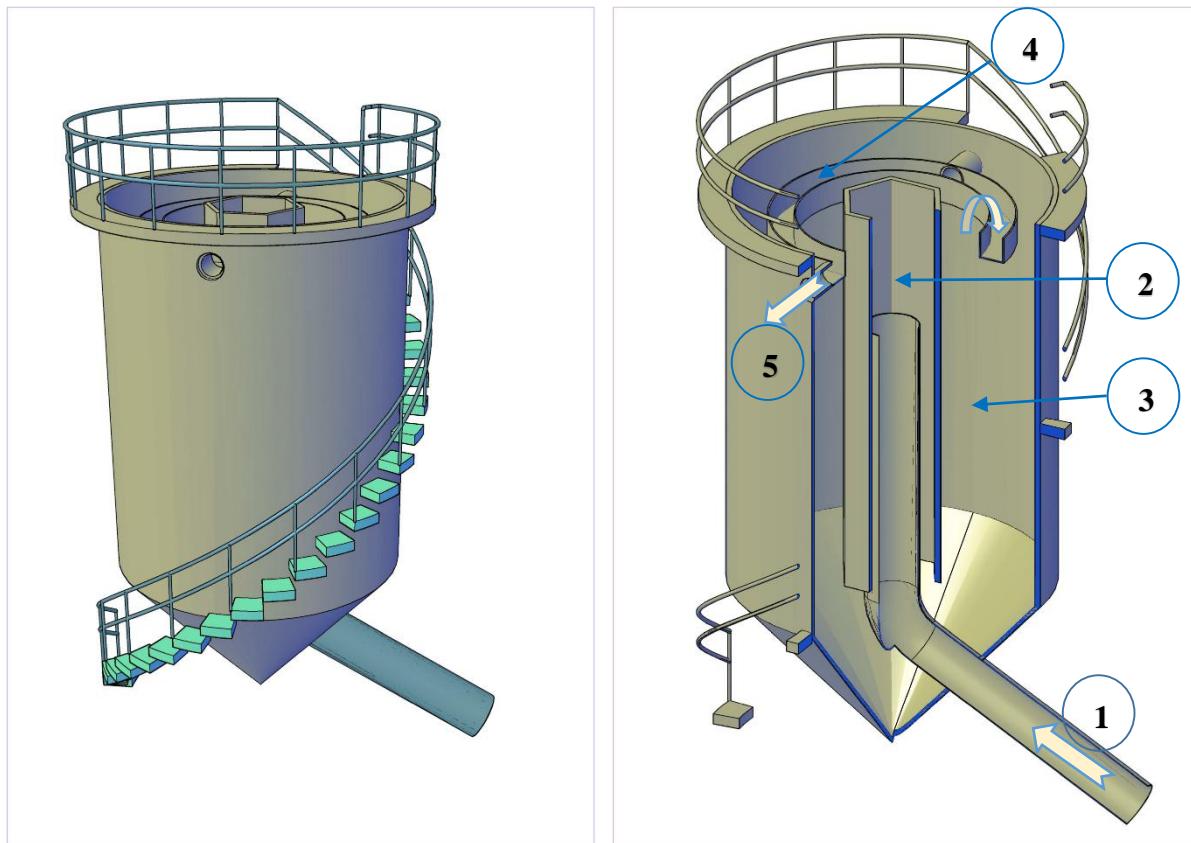


Figure VII-1 : Rendue et coupe en trois dimensions du décanteur Prat-Daniel

Les dimensions de l'ouvrage sont données par :

- $D = 6 \text{ m}$  diamètre totale du décanteur
- $d_{\text{int}} = 1 \text{ m}$  diamètre de la cheminée centrale.
- $d = 2[\text{m}]$  diamètre du cercle circonscrit à l'hexagone
- $H = 10\text{m}44$  hauteur du décanteur (sol au sommet)
- $He = 3.\text{m}40$  hauteur de la forme évasée
- $Hc = 7\text{m}$  hauteur de la forme cylindrique

La surface de décantation est donnée par :

$$S = \pi \frac{D^2}{4} - \frac{1}{2} \left( \frac{d^2}{4} \sin 60 \right)$$

$$\boxed{S = 25,68 [m^2]}$$

La charge hydraulique superficielle ou vitesse de Hazen :

$$V_H = \frac{Q}{S}$$

$$V_H = \frac{200 [m^3/h]}{25,68 [m^2]}$$

$$\boxed{V_H = 7,8 [m/h]}$$

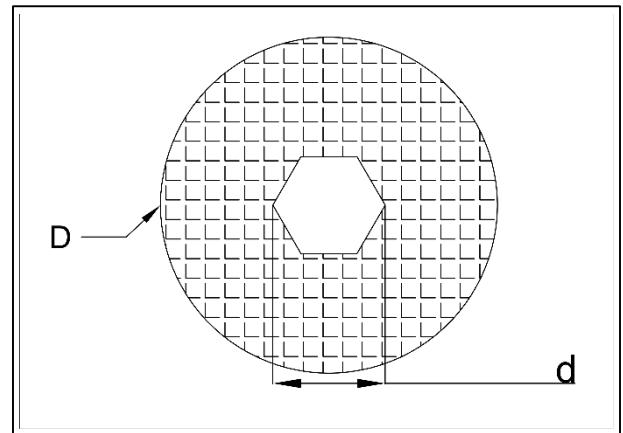


Figure VII-2 : Surface de décantation du décanteur Prat-Daniel

### VII.1.3 Fonctionnement actuel des ouvrages.

- Débit actuel estimé est :
  - o  $Q = 200 \text{ m}^3/\text{h}$  soit  $200\,000 \text{ l/h}$  par décanteur
  - o  $Q_{\text{tot}} = 600 \text{ m}^3/\text{h}$  pour les trois décanteurs

Il est à noter que pour des nécessités de pointe, le débit Eau Brute est parfois augmenté à  $800 \text{ m}^3/\text{h}$ .

## VII.2 Propositions d'aménagement :

### VII.2.1 Implantation de lamelles trapézoïdales

Les modules lamellaires qu'on va utiliser sont celles de DEGREMONT, inclinés à  $60^\circ$  sur l'horizontale, sont en polystyrène "choc". Ils sont constitués de tubes à section hexagonale; le diamètre hydraulique est de 80 mm, et la longueur de 1,500 m. L'importance de la section transversale de ces tubes permet de minimiser le risque de bouchage en présence de graisse et particules fibreuses.

#### VII.2.1.1 Paramètres caractéristiques du décanteur

Calculons donc les nouveaux paramètres caractéristiques du décanteur qui sont dans un tableur Excel utilisant les formules démontrées dans la partie V.2.6. Les résultats suivants sont obtenus avec les caractéristiques d'un module lamellaire suivant :

Entraxe :  $e = 8 \text{ [cm]}$

Inclinaison :  $\alpha = 60 [^\circ]$

Hauteur :  $h = 1,5 [\text{m}]$

- Surface de décantation :

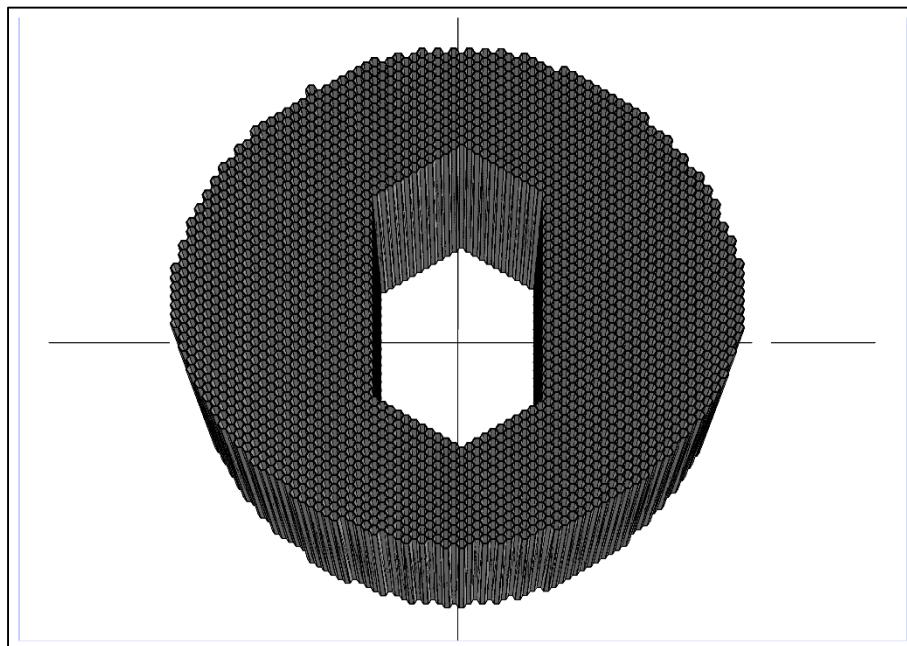
$$S_d = e L_{lam}$$

$$S_d = 0,138 [\text{m}^2]$$

- Nombre de lamelles (N) :

Il y a deux façons de calculer le nombre de lamelles contenu dans un ouvrage circulaire :

La première consiste à construire en trois dimensions l'ouvrage avec les lamelles introduit dedans, il suffit juste de sélectionner toutes les lamelles pour que le logiciel (Auto CAD) calcul automatiquement le nombre d'objets sélectionnées. Cette méthode est la plus précise mais les difficultés se présentent dans la construction de la géométrie en trois dimensions sur AutoCAD qui nécessite une parfaite maîtrise du 3D. Pour cette méthode, le logiciel compte **2364** lamelles.



*Figure VII-3 : Perspective en 3D des modules lamellaires implantés dans le décanteur Prat-Daniel*

La deuxième consiste à utiliser les formules démontré dans la partie V.2.6.2 en développant le terme surface en Longueur\*largeur, surface disponible 25 [ $\text{m}^2$ ] soit pour le calcul ( $L = 5[\text{m}]$ )\*( $l = 5[\text{m}]$ ). Il faut noter avant de les appliquer que ces formules ont été établies

dans le cas d'un ouvrage rectangulaire. Dans le calcul des ouvrages circulaires, nous utilisons cette deuxième méthode à défaut de logiciel. Le calcul donne **2378**.

- Surface total projetée (STP en [m<sup>2</sup>]) :

Cette surface est donnée par la formule générale :

$$STP = NS_d \cos\alpha$$

$$\boxed{STP = 164,793 [m^2]}$$

- Vitesse de Hazen correspondant (débit Q = 200 [m<sup>3</sup>/h]) :

$$V_H = \frac{Q}{STP}$$

$$\boxed{V_H = 1,21 [m/h]}$$

### VII.2.1.2      *Nouvelle performance*

Pour comparer les performances des décanteurs vis-à-vis de la charge hydraulique superficiel, analysons le rapport entre les surfaces de décantation offert par l'ouvrage avec et sans lamelles.

$$\frac{S}{STP} = \frac{25,68}{164,79} \text{ ou bien } \frac{S}{STP} = \frac{1}{6}$$

Avec

S : surface de décantation de l'ouvrage sans lamelles

STP : surface de décantation de l'ouvrage avec lamelles

En considérant le seul paramètre charge hydraulique superficiel les avantages que présente la décantation lamellaire sont les suivantes :

- le nouvel ouvrage possède une performance élevée (Six fois) par rapport à l'ancien. C'est-à-dire, à même débit d'exploitation, la décantation lamellaire peut retenir des particules plus fines ayant une vitesse de chute plus faible.
- A performance égale la décantation lamellaire peut produire six fois le même débit

Remarque importante :

Ce résultat est obtenu dans l'hypothèse que le débit serait uniformément réparti dans les modules lamellaires, c'est-à dire partager uniformément le débit 200 [m<sup>3</sup>/h] dans les

2300 lamelles, il passe dans chacun un débit Q/N, à peu près 0,087 [m<sup>3</sup>/h]. En réalité, cette proposition n'est qu'hypothèse. On admet une légère variation de la répartition en concevant bien la géométrie de l'écoulement au sein de l'ouvrage. C'est dans ce domaine de géométrie d'écoulement que nous allons exploiter les outils de résolution numériques, chercher un optimum qui permet une répartition la plus uniforme que possible.

### VII.2.1.1 Simulation des phénomènes de sédimentation dans l'ouvrage

Le cas du décanteur Prat-Daniel ne présente pas beaucoup de possibilités de configuration géométrique, et de plus l'écoulement dans les décanteurs lamellaire ne peut être représenté en deux dimensions. Nous allons donc simplifier le problème en le ramenant au problème plan en utilisant le modèle d'**écoulement à symétrie axial** (le modèle est détaillé en annexe III) et simuler le phénomène de sédimentation en utilisant la théorie de la mécanique des suspensions.

### VII.2.1.2 Préparation du modèle de simulation

La simulation utilise " mixture model " de COMSOL pour simuler la séparation de phase dans le décanteur circulaire. Les propriétés d'un tel model est donnés par :

- Ecoulement non permanent
- Phase dispersé : particules solides
- Phase continue : eau
- Modèle de glissement : écoulement homogène
- Modèle de turbulence : RANS, k-ε
- Entrée :
  - Débit : 360 [m<sup>3</sup>/h]
  - Vitesse correspondant : 0,127 [m/s]
- Paramètres du modèle :
  - Concentration de la phase dispersée : Fraction volumique  $\phi = 0,003$
  - Propriétés physique de la phase dispersée :
    - Masse volumique : 1100 [kg/m<sup>3</sup>]
    - Diamètre : 0,2 [mm]
  - Propriétés physiques de la phase continue
    - Masse volumique :  $\rho_f = 1000 [kg/m^3]$
    - Viscosité dynamique :  $\mu_f = 0,1 [kg/(m.s)]$

**REMARQUE IMPORTANTE,** correspondance entre Concentration (C) et Fraction Volumique ( $\Phi$ ) :

$$C = \frac{m_{solide}}{V_{total}} ; \quad \Phi = \frac{V_{solide}}{V_{total}} \text{ ou bien } \frac{C}{\Phi} = \frac{m_{solide}}{V_{solide}} = \rho$$

On a donc  $\boxed{C = \rho\Phi}$

*Tableau VII-2 Correspondance entre concentration et fraction volumique de la phase dispersée*

$\rho = 1200 \text{ [kg/m}^3]$	C	$\Phi$
Décantation des particules floculées	50 [mg/l]	$0,42 \cdot 10^{-4}$
Décantation en piston des particules floculées	500 [mg/l]	$0,42 \cdot 10^{-3}$

### VII.2.1.3 Résultats et commentaires

Le premier résultat de la simulation de l'écoulement des suspensions donne les lignes de courants des particules fluides et les trajectoires des corpuscules solides en suspensions, *figure VI – 4*. Dans les fonctionnements normaux, l'accumulation des boues en bas du cône concentrateur explique la perturbation des lignes de courant et la trajectoire des particules. On constate par contre que ces lignes d'écoulements sont stables dans la zone de décantation. Cette propriété assure l'efficacité du fonctionnement du décanteur Prat – Daniel.

Le Flux massique de sédimentation  $M_s$  à travers une surface S est calculé à l'entrée et à la sortie du décanteur pour évaluer le rendement de décantation :

$$M_s = \int \rho_s \Phi_s \vec{v}_s \cdot \vec{n} dS$$

Avec :

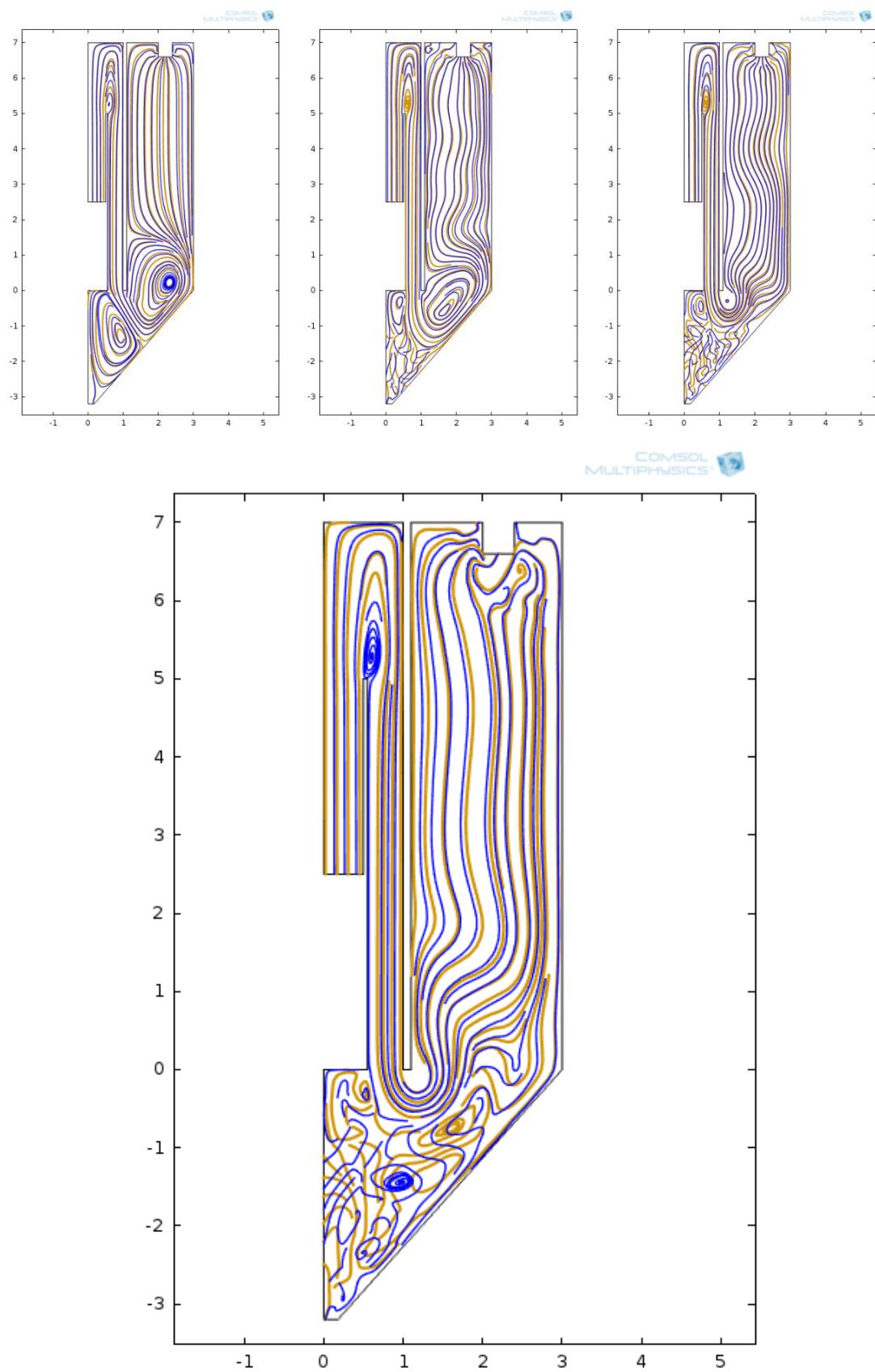
$\rho_s$  : masse volumique des solides ;

$\Phi_s$  : fraction volumique des phases solides ;

$\vec{v}_s$  : Vitesse des phases solides ;

$\vec{n}$  : Vecteur normal à l'élément de surface  $dS$

On évalue à l'entrée  $M_s = 0,33 \text{ [kg/s]}$  et à la sortie  $M_s = 0,072 \text{ [kg/s]}$ . Ce qui correspond à un rendement de **78,18 %** pour le cas simple du décanteur Prat – Daniel traitant une concentration en solide 360 [mg/l].



*Figure VII-4 : Lignes de courant (bleu) et trajectoires des particules solides (marron), aux instants  $t = 250 ; 1100 ; 1500 ; 1800 [s]$*

La simulation en régime non permanent nous donne un aperçu plus réaliste sur le fonctionnement du décanteur circulaire. L'écoulement est transitoire, les lignes de courants varient dans le temps. Dans ce cas on considère un pas de temps petit  $t + dt$  (photo par flash) pour apprécier le phénomène de sédimentation des particules solides en suspensions dans l'eau.

Après 250 [s] de marche (4 [min]), les particules commencent à entrer dans la zone de décantation. Ce phénomène devient de plus en plus appréciable, après 1100 [s] (20 [min]), on commence à constater une forte concentration de boue dans le bas du cône concentrateur. Après 30 min de fonctionnement on peut diviser la zone de décantation en fonction de la concentration locale en particule (*figure VI – 5*) :

- zone A : le liquide est clarifié et passe en surverse 5,5 à 7 [m] :  $\Phi = 4 \cdot 10^{-4}$  ou 0,4%
- zone B : la suspension a une concentration en solide relativement uniforme et les conditions de sédimentation libre sont prédominantes 2 à 5,5 [m] :  $\Phi = 2,5 \cdot 10^{-3}$  ou 2,5 %;
- zone C : on se trouve en zone de transition où les conditions évoluent du régime de sédimentation libre au régime de compression 0 à 2 [m] :  $\Phi = 4 \cdot 10^{-3}$  ou 4 %
- zone D : la compression des solides force le liquide à sortir de l'espace interparticulaire, dans le cône de concentration -3 à 0 [m], la concentration varie de  $\Phi = 0,006$  à 0,1 ou 6% à 10%.

L'implantation des lamelles se fait dans la zone A et B là où une partie des particules s'est déjà décantée sous l'effet de la surface de décantation de l'ouvrage. Les modules lamellaires servent à retenir le surplus de particules qui peuvent s'échapper dans l'ouvrage simple quand on augmente le débit de traitement ou quand les concentrations sont trop élevées pendant les événements orageux véhiculant une forte suspension.

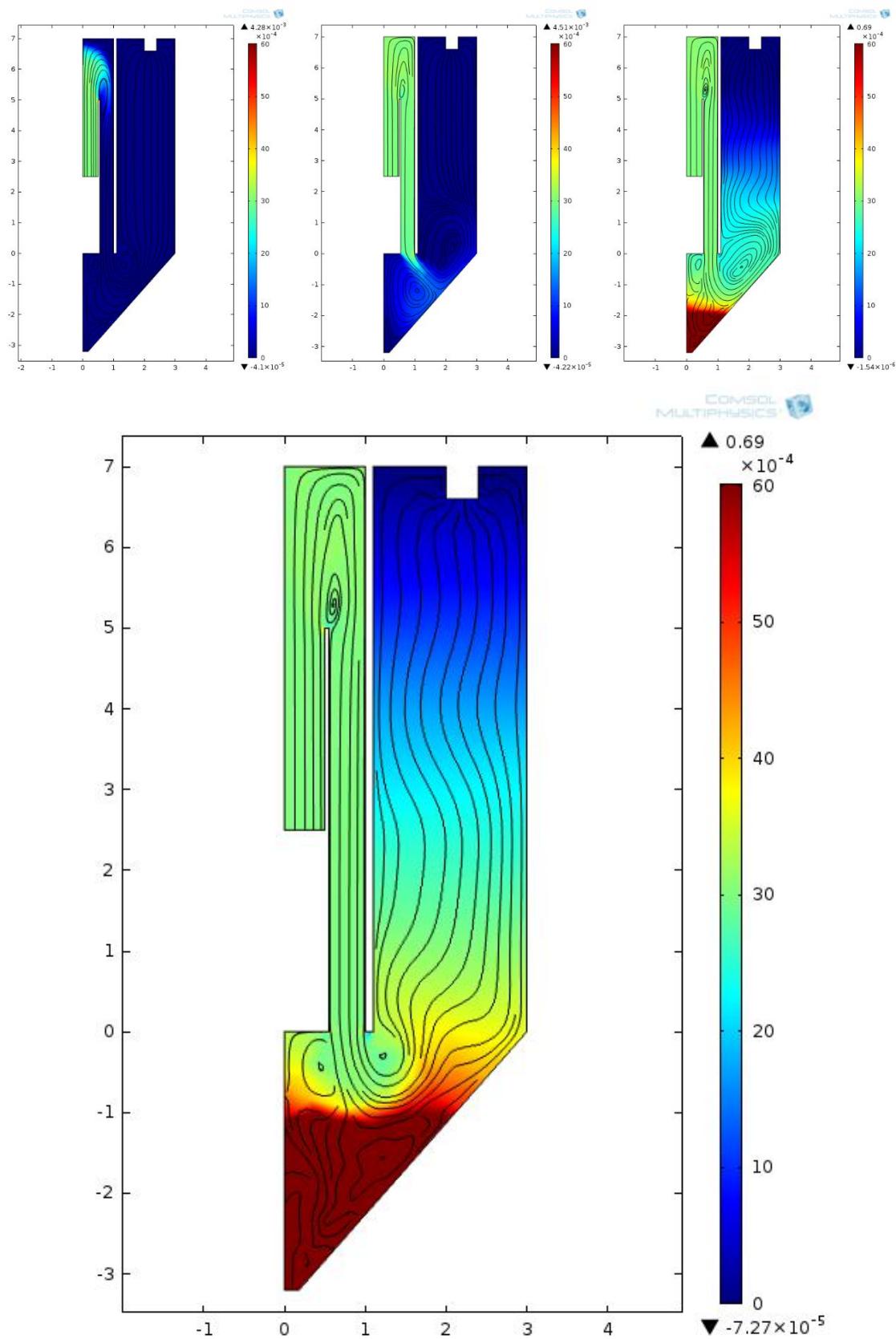


Figure VII-5 : Concentration de la phase dispersée exprimée par la fraction volumique  $\Phi$  aux instants  $t = 50 ; 250 ; 1100 ; 1500$  [s]

Par révolution autour de l'axe de rotation, on obtient un aperçue en trois dimension et plus réaliste de la distribution des particules dans la zone de décantation. Ce dernier résultat consiste à mieux comprendre l'écoulement à symétrie axial, en effectuant une révolution de 180 [°] autour de l'axe de révolution, on obtient un aperçue 3D des concentrations des particules en suspension dans l'ouvrage. Notons que les résultats sont tous donnés dans les représentations planes des figures ci-dessus.

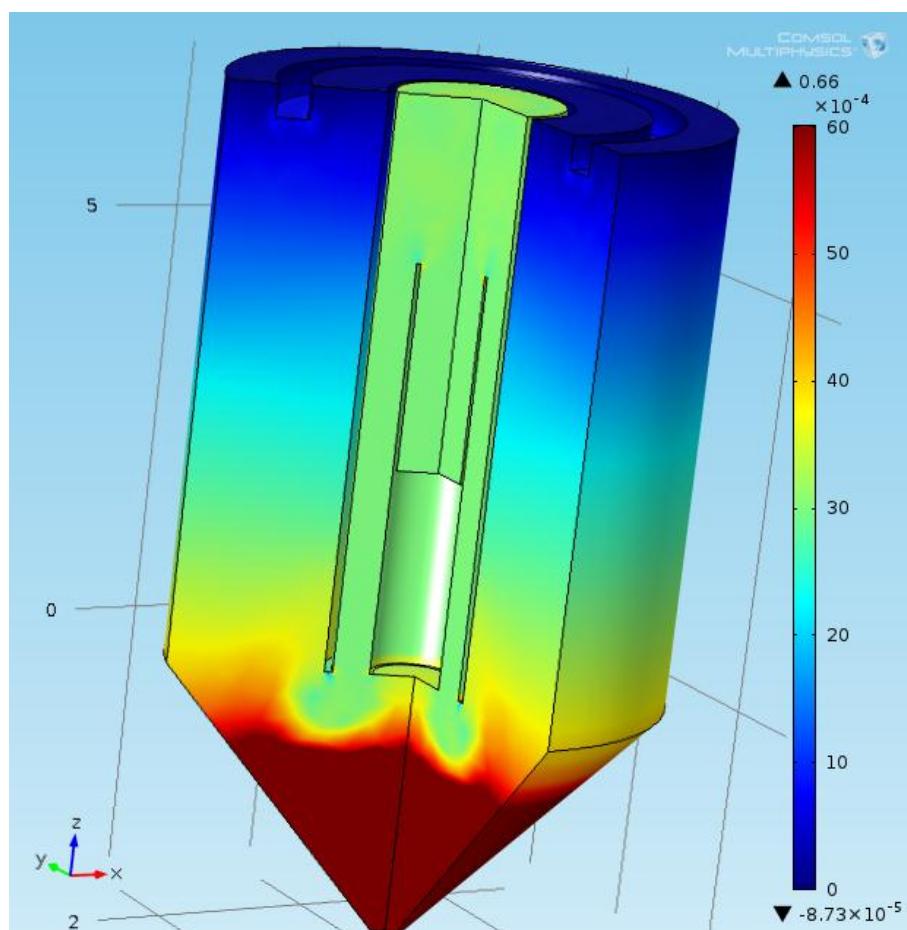


Figure VII-6 : répartition 3D de concentration des particules dans le décanteur Prat – Daniel

### VII.2.2 Perspective d'application

- Métrieologie : Le premier intérêt de modéliser le décanteur Prat – Daniel, dans le cas idéal, est de procéder à une mesure des vitesses réelles et des concentrations réelles des particules en suspensions dans l'ouvrage. Ces mesures servent à calibrer le modèle physique de simulation des suspensions. Nous mentionnons cette perspective pour la curiosité d'application d'une méthode plus sûre pour valider les modèles de simulation.

- Simulation en trois dimensions de l'ouvrage avec lamelles : nous avons construit un projet de simulation en trois dimensions de l'ouvrage contenant des lamelles. Pour des raisons de performance des matériels informatiques, la compilation des équations de mouvement en trois dimensions demande une performance qui dépasse les matériels qu'on a utilisés. De toute façon, la configuration géométrique de ce décanteur ne présente pas beaucoup de variantes. L'implantation des lamelles dans la zone de décantation ne doit pas présenter beaucoup de contraintes vis-à-vis de la distribution d'écoulement. La figure VI-7 montre la modélisation géométrique de la variante réalisée en trois dimensions.

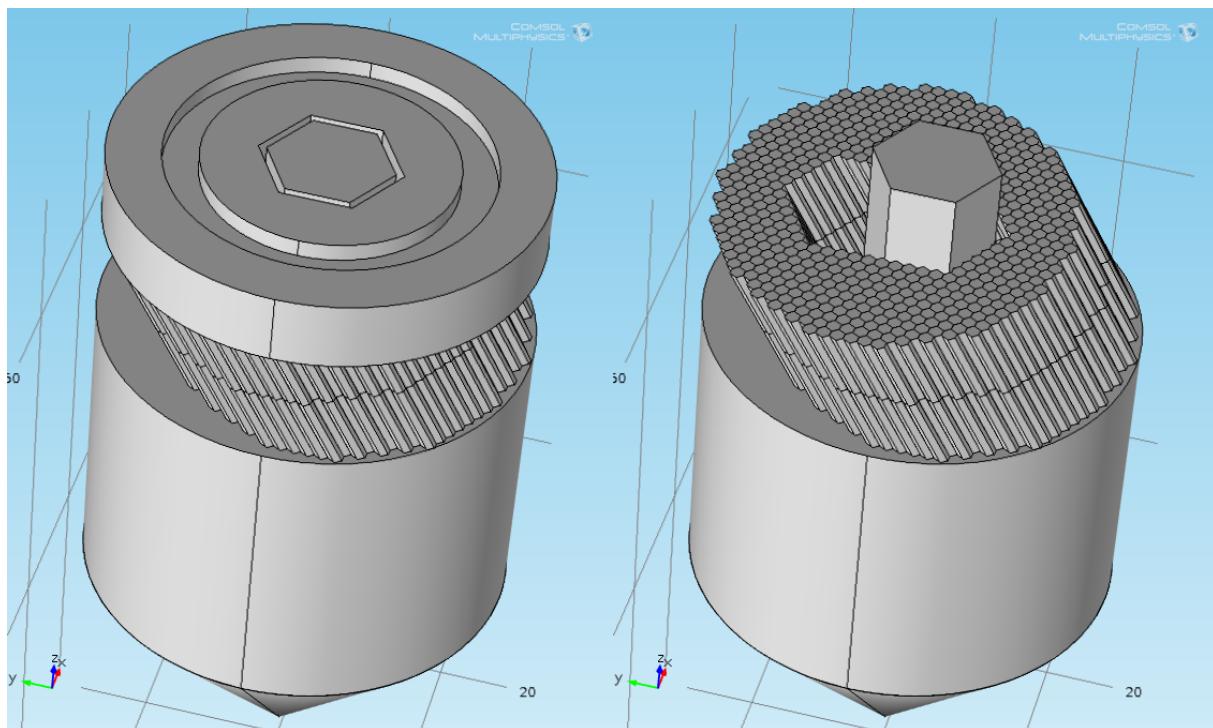


Figure VII-7 : Modélisation géométrique en trois dimensions de l'implantation des lamelles hexagonales dans le décanteur Prat – Daniel

### VII.3 Coût des lamelles

- Quantités de lamelles nécessaires :

Le matériau utilisé est le polystyrène choc. La quantité de lamelles est calculée à l'aide de la formule établi dans le paragraphe V.7.1. Et pour faciliter la mise en œuvre dans

l'implantation des lamelles dans l'ouvrage circulaire, on assemble les lamelles en bloc de 1 [m]. Le calcul montre les résultats suivants : On a besoin de 483, soit 500 plaques de 1,25\*1,5 [m].

Sur le marché nous retrouvons des plaques en polystyrène choc dont les dimensions sont les suivantes :

- Epaisseur : 1 [mm]
- Couleur : noir
- Dimension : 2 000 [mm] \* 1 200 [mm]

Le coût d'une telle plaque incluant le prix, le fret, les tarifs douanier, les frais de transit, et les frais intérieurs est estimé à 137 100 [Ar]. Le coût des 500 plaques nécessaires pour aménager le décanteur Prat-Daniel s'élève donc à **68 550 000 [Ar]**.

En augmentant par exemple le débit de 200 [ $m^3/h$ ] à 360 [ $m^3/h$ ], soit un ratio de **1,8**. On obtient ainsi un gain de 160 [ $m^3/h$ ]. Pour une station travaillant 10 h par jour et en estimant un prix du  $m^3$  à 500 [Ar] ; on obtient un gain de 800 000[Ar/j]. Et en conséquence, le prix des lamelles sera comblé en 86 jours, soit environ **trois mois**.

# **CHAPITRE VIII - APPLICATION DE LA DECANTATION LAMELLAIRE DANS LES NOUVELLES CONSTRUCTIONS ; CAS DE LA STATION DE TRAITEMENT D'EAU POTABLE DE SABOTSY NAMEHANA**

## **VIII.1 Présentation des données du projet**

### **VIII.1.1 Qualité et quantité de la ressource**

La station de traitement de Sabotsy Namehana traite une eau de surface, la rivière Mamba. La qualité de l'eau brute varie largement suivant les saisons. Les données ci-contre sont issues d'une année d'exploitation 2015, les paramètres standards permettent d'affirmer que ce type de ressource est classé dans la deuxième catégorie d'eau de surface qui est une eau douce faiblement minéralisé, de forte turbidité (en comparant avec celle du lac Mandroseza 20 [NTU] en moyenne) qui nécessite un traitement rigoureux de clarification.

*Tableau VIII-1 : Paramètres standard mesurés pendant l'année 2015 de la qualité de ressource Eau brute Sabotsy Namehana*

	<b>MIN - MAX</b>	<b>MOYENNE</b>
<b>TURBIDITE [NTU]</b>	3,49 - 290	61,68
<b>PH</b>	6,52 - 8,26	7,28
<b>MINERALISATION [mg/l]</b>	7 - 70	48,28
<b>DURETE TOTAL [°F]</b>	1,2 - 6,2	3,18
<b>FER [mg/l]</b>	0,15 - 4	1,27
<b>MATIERES ORGANIQUES [mg/l]</b>	1,5 – 6,7	2,77

Les résultats des essais de flocculation témoignent l'efficacité de l'utilisation des réactifs coagulants dans les opérations de séparation liquide – solide en comparant la turbidité

avant et après l'essai. Le réactif coagulant utilisé est le Sulfate d'alumine qui utilise les propriétés du cation  $\text{Al}^{3+}$  pour la neutralisation des colloïdes. Les résultats présentés dans le tableau suivant résument les valeurs indispensables données par l'essai.

*Tableau VIII-2 : Résultats d'essai de flocculation Tableau VIII-3*

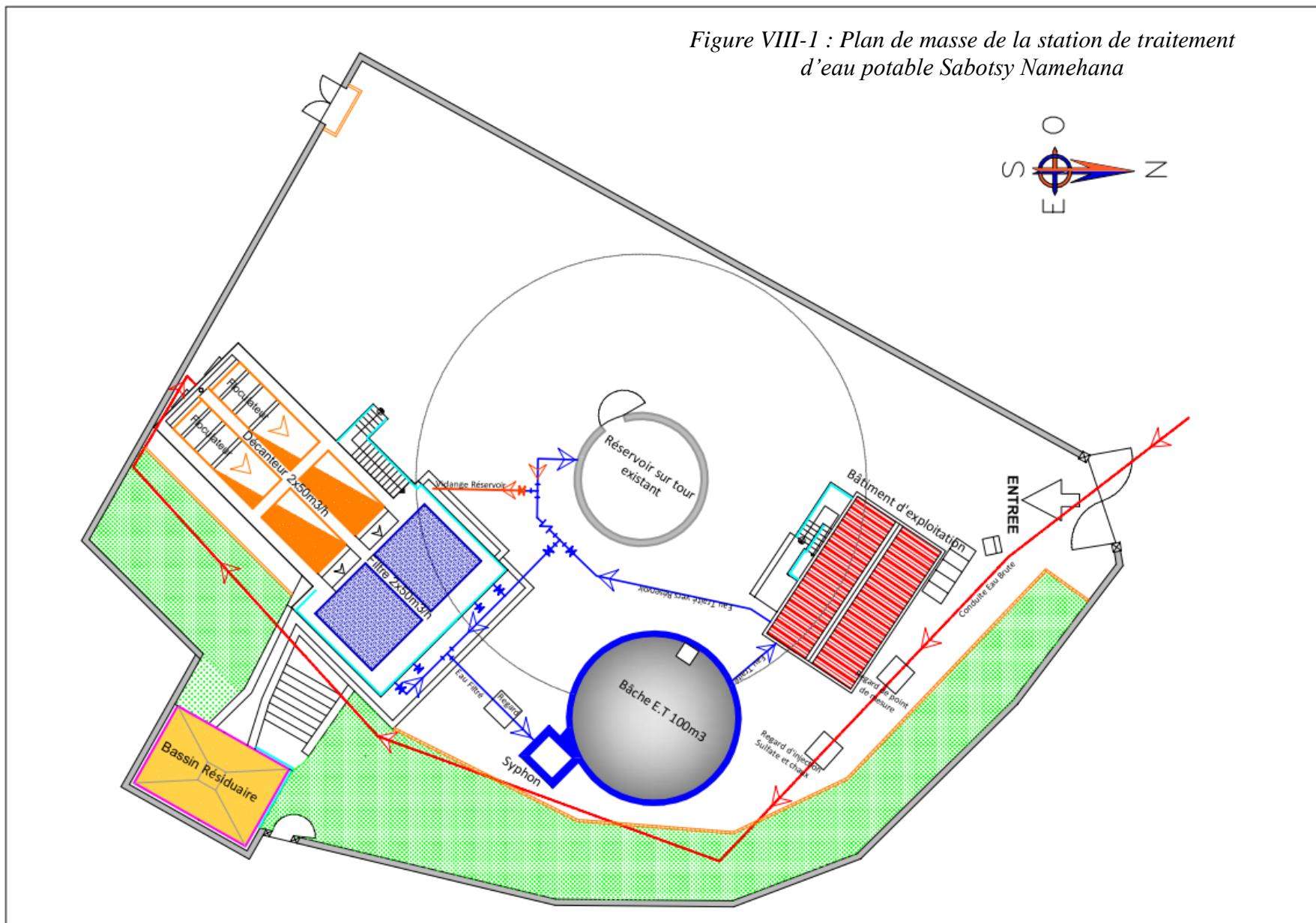
	TURBIDITE [NTU]		SULFATE D'ALUMINE [g/m <sup>3</sup> ]
	Eau brute	Eau décanté	
<b>29/01/2015</b>	113	35	35
<b>05/02/2015</b>	160	20,1	38
<b>05/06/2015</b>	14,4	1,3	27,5
<b>28/07/2015</b>	52,7	5,91	27,5
<b>22/12/2015</b>	259	5,5	38

## VIII.1.2 Plan général d'Aménagement

### VIII.1.2.1 Plan de masse et plan d'ensemble

- Conduite d'amenée : L'eau brute est amenée dans une conduite Φ250, les réactifs chimiques tels que sulfate et chaux sont injectés dans la conduite avant d'entrer dans les ouvrages de clarifications. Le mélange déborde ainsi en surface libre dans un déversoir situé en amont du floculateur.
- Ouvrages de clarification : L'eau passe ensuite dans les ouvrages de clarification constitués de deux compartiments symétriques travaillant en parallèle. L'eau à traiter passe d'abord par un floculateur dont le principe consiste à mélanger l'eau brute et les réactifs coagulant dans en courant ascendant puis descendant de l'eau à traiter. L'eau passe ensuite dans un décanteur pour la séparation des particules lourdes et enfin dans un filtre carré pour retenir les particules restant qui se sont échappés du la décantation. A la sortie du filtre on a de l'eau parfaitement claire.
- Bâche de chloration : L'eau ainsi clarifiée passe dans une bâche de 100 [m<sup>3</sup>] pour la désinfection au chlore.

Figure VIII-1 : Plan de masse de la station de traitement d'eau potable Sabotsy Namehana



- Réservoir sur tour : L'eau désinfectée dans la bâche de chloration est pompée vers le réservoir sur tour existant pour stockage avant leur distribution dans les réseaux d'adduction d'eau potable.
- Bâtiment d'exploitation, constitué de:
  - dans le Rez de chassé : une salle de pompage abritant une pompe soit pour remonter l'eau dans le réservoir sur tour soit pour injecter les eaux de lavages des filtre ; une salle de traitement pour préparer les réactifs de traitement et magasin de stockage pour stocker les réactifs à utiliser.
  - Au premier étage : une salle réservée pour un laboratoire d'analyse et de contrôle pour la surveillance en permanence de l'évolution de la qualité de l'eau dans son parcours lors du traitement et d'ajuster les doses nécessaires correspondant ; un bureau.
- Bassin d'eaux résiduaires : L'eau de lavage des filtres et les boues purgées dans les décanteurs passent dans un bassin pour un éventuel traitement avant leur rejet vers le milieu naturel.

**Remarque importante sur la notion de pré – décantation :** En comparant avec le système de traitement de Mandroseza, de Faralaza et de Vontovorona, la station de traitement de Sabotsy Namehana ne comporte pas de bassin de pré-décantation. Le rôle de ce bassin consiste à séparer au préalable les matières en suspensions lourdes et en conséquence une diminution de la turbidité de l'eau brute avant de les traiter soigneusement dans les compartiments de flocculation, de décantation et de filtration. En l'absence d'un tel système, les ouvrages de clarifications, en particulier les filtres de la station de Sabotsy Namehana doivent travailler plus par rapport aux autres.

#### **VIII.1.2.2      *Description des ouvrages de clarifications (structure, plan d'ensemble)***

Cette partie développe la description des corps des ouvrages de clarification. L'ensemble est contenu dans une seule structure en béton permettant le fonctionnement en série de la flocculation, décantation, et filtration comme décrit dans la figure VII-3. Les dimensions seront données en annexe.

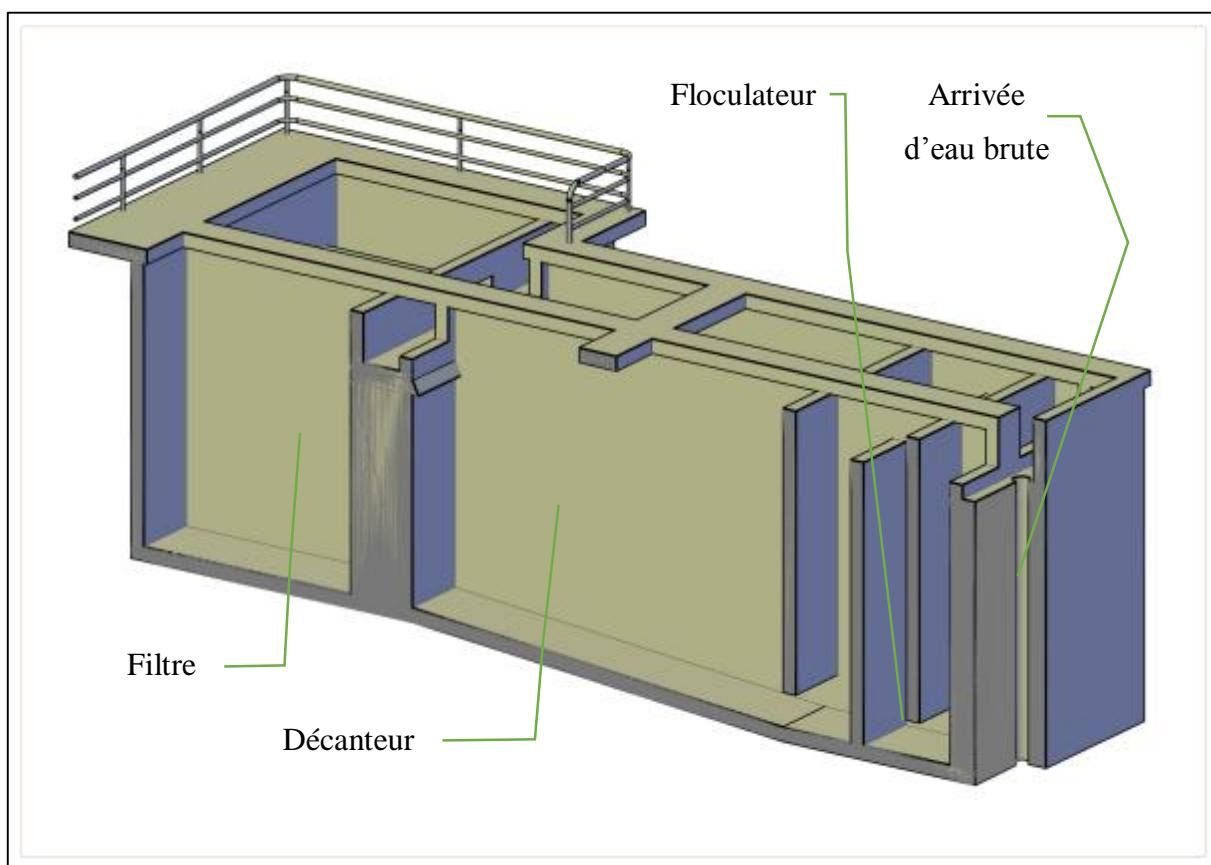


Figure VIII-2 : Description du fonctionnement de l'ouvrage de clarification Sabotsy Namehana

## VIII.2 Conception

### VIII.2.1 Implantation des modules hexagonaux – surface de décantation résultant

L'ouvrage de clarification est un assemblage de deux structures parfaitement symétrique et travaille en parallèle. Chacun des compartiments fonctionne avec un débit d'exploitation : 50 [m<sup>3</sup>/h]. Dans tous ce qui va suivre, en raison de simplification, nous étudions l'une des deux compartiments car chacune d'elles peuvent être étudiée séparément.

#### VIII.2.1.1 Les dimensions liées au corps du décanteur :

- Surface de décantation : 2 [m] \* 6 [m], S = 12 [m<sup>2</sup>]
- Hauteur disponible de l'ouvrage : 4,50 [m]
- Charge hydraulique superficiel ouvrage sans lamelles :  $V_H = \frac{Q}{S}$
- $V_H = 4,16 [m/h]$

**VIII.2.1.2 Dimensions liées aux modules lamellaires :**

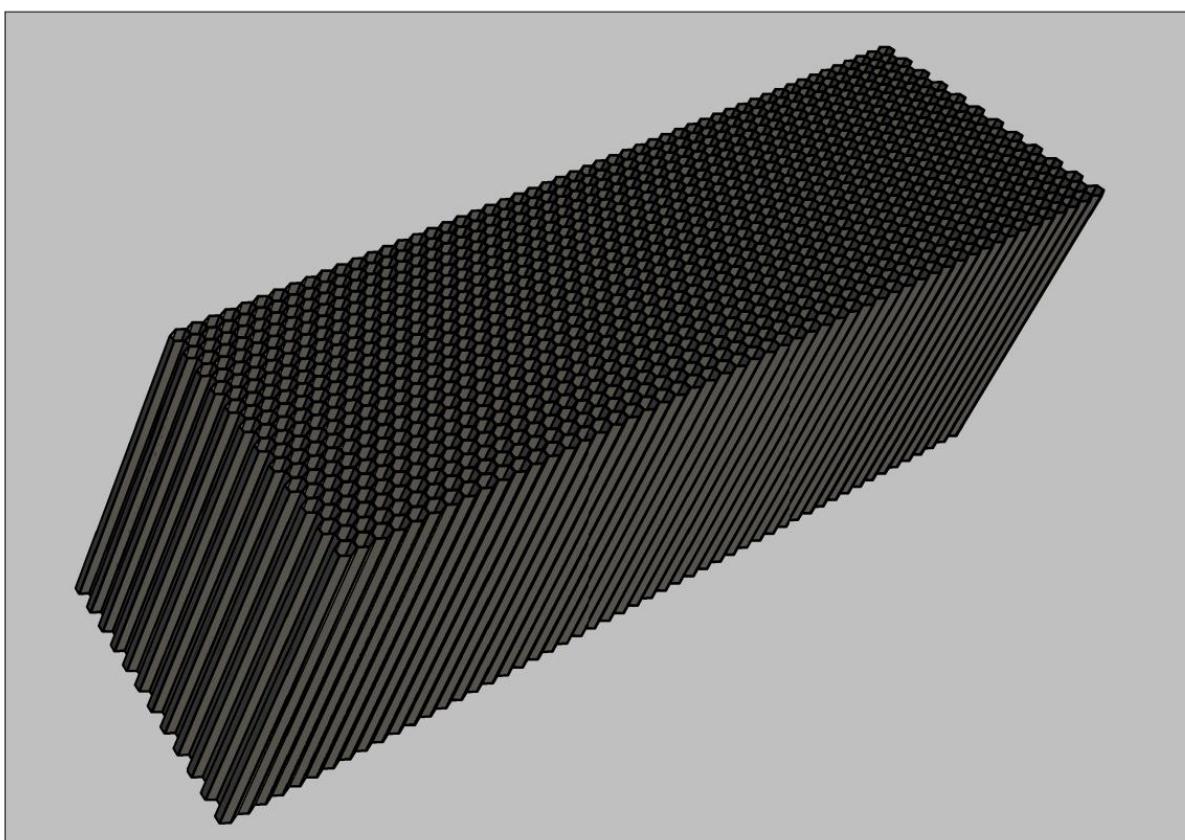
Forme : hexagonal

Inclinaison :  $\alpha = 60 [°]$

Longueur :  $L_{\text{lam}} = 1,8 [\text{m}]$

Espace inter-lamellaire :  $e = 8 [\text{cm}]$

Nombres de module : pour le nombre, nous utilisons deux méthodes tout à fait indépendant mais qui donne le même ordre de résultat. La première donnant le nombre exact obtenu en construction en trois dimensions sur Auto CAD est :  $N = 1185$ . La seconde utilisant les formules démontrée dans la partie V.2.6.2 et calculé sur un tableur Excel  $N = 1158$ .



*Figure VIII-3 : Perspective en 3D des modules lamellaires implantés dans le décanteur de Sabotsy Namehana*

Surface élémentaire de décantation :  $S_d = 0,138 [\text{m}^2]$

Surface total projetée : elle est donnée par la formule démontrée ultérieurement :

$$STP = N S_d \cos\alpha$$

$$STP = 80 [m^2]$$

Charge hydraulique superficiel pour le débit 50 [m<sup>3</sup>/h]

$$V_H = \frac{Q}{STP}$$

$$V_H = 0,625 [m/h]$$

#### **VIII.2.1.3     *Ordre de grandeur de la vitesse de sédimentation des particules floculées :***

Mesurée accours d'un essai de flocculation effectuée le 18 septembre 2015, les données suivantes peuvent être nécessaires :

- Vitesse de sédimentation des flocs : 2 à 3 [min] pour 16[cm] ou bien 3,2 à 4,8 [m/h]
- Apparition des premiers flocs : aux alentour 1,5 à 2 [min]
- Dimensions des flocs avant décantation : aux alentours de 1[mm]

#### **VIII.2.1.4     *Rapport de surface entre un ouvrage simple et un ouvrage avec lamelles :***

Pour apprécier l'influence des lamelles dans l'ouvrage, et déduire le débit théorique maximal qu'on ne peut pas dépasser, on définit le rapport :

$$\frac{S}{STP} = \frac{12}{80} = \frac{3}{20}$$

$$\boxed{\frac{S}{STP} = \frac{1}{6}}$$

Interprétation :

- à performance égale (même qualité eau produit), le décanteur contenant des lamelles fonctionne à un débit six fois (6 fois) supérieur au décanteur simple sans lamelles, c'est-à-dire qu'à même performance, on peut multiplier le débit par 6.
- En traitant un même débit, le décanteur lamellaire peut retenir des particules ayant une vitesse de sédimentation 6 fois plus petite que dans un décanteur simple, c'est-à-dire 6 fois plus performant.

### **VIII.2.2 Conception de la géométrie d'écoulement de l'ouvrage :**

Nous essayons de montrer à travers des modèles de simulations hydrodynamiques l'influence de la géométrie sur la distribution du flux d'écoulement. La modélisation hydrodynamique de l'ouvrage va permettre de montrer comment se répartissent les vitesses, de localiser les zones de recirculations, de turbulences, et les chemins préférentiels d'écoulement à l'amont, à l'aval, et entre les lames du décanteur.

Le critère d'optimisation consiste à **avoir une répartition du débit le plus homogène possible entre les lames**.

Le Modèle physique utilisé est un modèle résolvant les équations de mouvement de l'écoulement permanent monophasique d'un fluide réel en régime turbulent qui utilise les **équations de fermeture du type k-ε**. En fait, COMSOL offre plusieurs modèles de fermeture pour la résolution des écoulements turbulents, nous choisissons ce modèle car c'est en quelque sorte le standard pour l'écoulement turbulent.

Notre objectif est de chercher une configuration géométrique stable, capable de répondre au mieux au critère d'optimisation défini ci-dessus qui est notre première préoccupation. Ainsi, nous gardons constants les paramètres liés aux modèles physiques et faire varier la configuration géométrique. La méthode consiste en premier lieu à adopter l'approximation des **écoulements plans** (dont la méthode est détaillée en **annexe III**) pour construire plusieurs variantes réalisées en deux dimensions (2D) afin de comprendre la tendance du phénomène à travers la réalisation de différents scénarios. Nous comptons après réaliser en trois dimensions (3D) celle qui répondent le mieux aux critères d'optimisations.

#### **VIII.2.2.1 Première variante, même alimentation que l'ouvrage initial**

La première variante s'adapte aux principes de fonctionnement de la décantation simple sans lamelles de Sabotsy Namehana. Le principe consiste à transformer l'écoulement en écoulement vertical en disposant des goulottes de récupération d'eau décantée dans la partie supérieure de la zone de décantation. On implante ensuite les lamelles dans la zone de décantation.

Les paramètres du modèle sont :

- Débit : 50 [m<sup>3</sup>/h]
- Largeur de décantation : 2 [m]

- Liquide de viscosité dynamique  $0,1[\text{kg/m.s}]$  et de masse volumique  $1000[\text{kg/m}^3]$
- Maillage : taille minimal :  $0,675 [\text{mm}]$  ; taille maximal :  $392 [\text{mm}]$

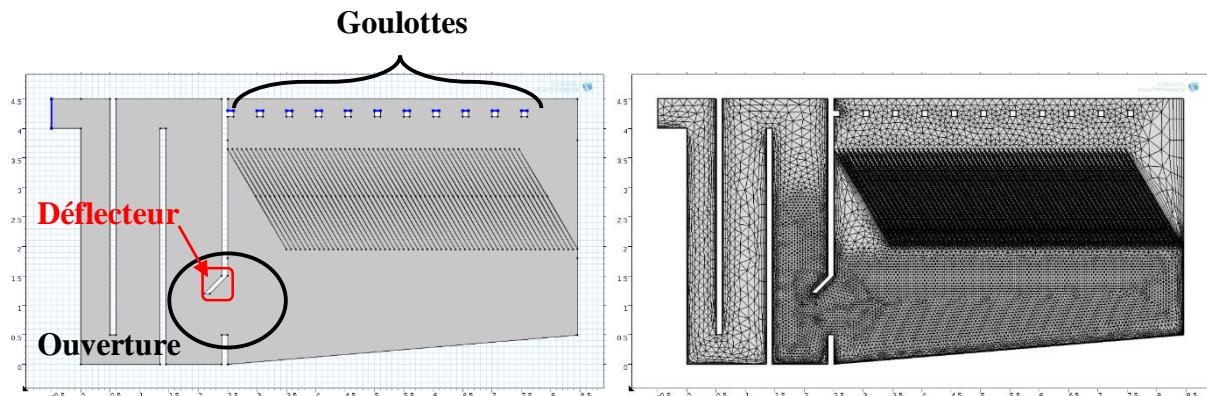


Figure VIII-4 : Géométrie (volume de contrôle) et Maillage en deux dimensions de l'une des variantes

Les conditions aux limites sont exprimées sous différentes formes :

- Vitesse d'entrée :  $0,0139 [\text{m/s}]$
- Parois : hauteur équivalente de rugosité :  $0,02 [\text{mm}]$
- Sortie : sortie à la pression atmosphérique dans les goulottes de récupération

#### VIII.2.2.1.1 Réduction des variantes - Simulation en Deux dimensions (2D)

Dans le cas de décanteur rectangulaire, on peut aisément adopter l'hypothèse des écoulements plans. Cela veut dire que dans une direction N dirigée dans le sens de la largeur de décantation, toutes les vitesses du champ sont perpendiculaires et dans tous les plans perpendiculaires à N, le champ conserve son aspect. On décrit ainsi le champ par l'un des champs de vitesses dans un plan perpendiculaire à N.

Les différents scénarios consistent à trouver la configuration adéquate concernant la disposition des lamelles, l'ouverture de la géométrie d'alimentation de la zone de décantation, et les dimensions des goulottes de récupérations. Nous proposons **Six variantes** (tableau) pour illustrer l'influence de ces configurations sur la répartition de vitesse dans les compartiments lamellaires. Les caractères **Gras** dans le contenu du tableau met en relief les particularités de chaque variante.

*Tableau VIII-4 : Séries de Variantes (A) suivant la disposition de l'entrée et de la sortie de l'eau à traiter et la position des lamelles*

variantes	Entrée	lamelles	sortie
<b>A-I</b>	orifice d'ouverture munie d'un déflecteur	ouvrage <b>sans lamelles</b>	Douze goulottes de récupération d'eau décantée
<b>A-II</b>	orifice d'ouverture <b>simple sans déflecteur</b>	Disposé dans le sens opposé à l'écoulement	Douze goulottes de récupération d'eau décantée
<b>A-III</b>	ouverture avec <b>déflecteur seul</b>	Disposé dans le sens opposé à l'écoulement	Douze goulottes de récupération d'eau décantée
<b>A-IV</b>	orifice d'ouverture munie d'un déflecteur	Disposé dans le sens opposé à l'écoulement	<i>Six goulottes</i> de récupération d'eau décantée
<b>A-V</b>	orifice d'ouverture munie d'un déflecteur	Disposé dans le <b>sens de l'écoulement</b>	Douze goulottes de récupération d'eau décantée
<b>A-VI</b>	orifice d'ouverture munie d'un déflecteur	Disposé dans le sens opposé à l'écoulement	<b>Douze goulottes</b> de récupération d'eau décantée

#### *VIII.2.2.1.1 Présentation des résultats*

Pour chaque cas de variante, l'appréciation de la distribution de vitesse dans l'ouvrage s'observe à travers trois résultats :

- Vitesse en tout point de l'ouvrage, dont l'intensité est appréciée à travers les couleurs et les directions à travers les vecteurs
- Lignes de courant, servent à localiser les chemins préférentiels d'écoulement
- Profil de vitesse au milieu de la Zone de décantation, qui est notre principal intérêt servant à apprécier le critère d'optimisation (répartition uniforme de vitesse).

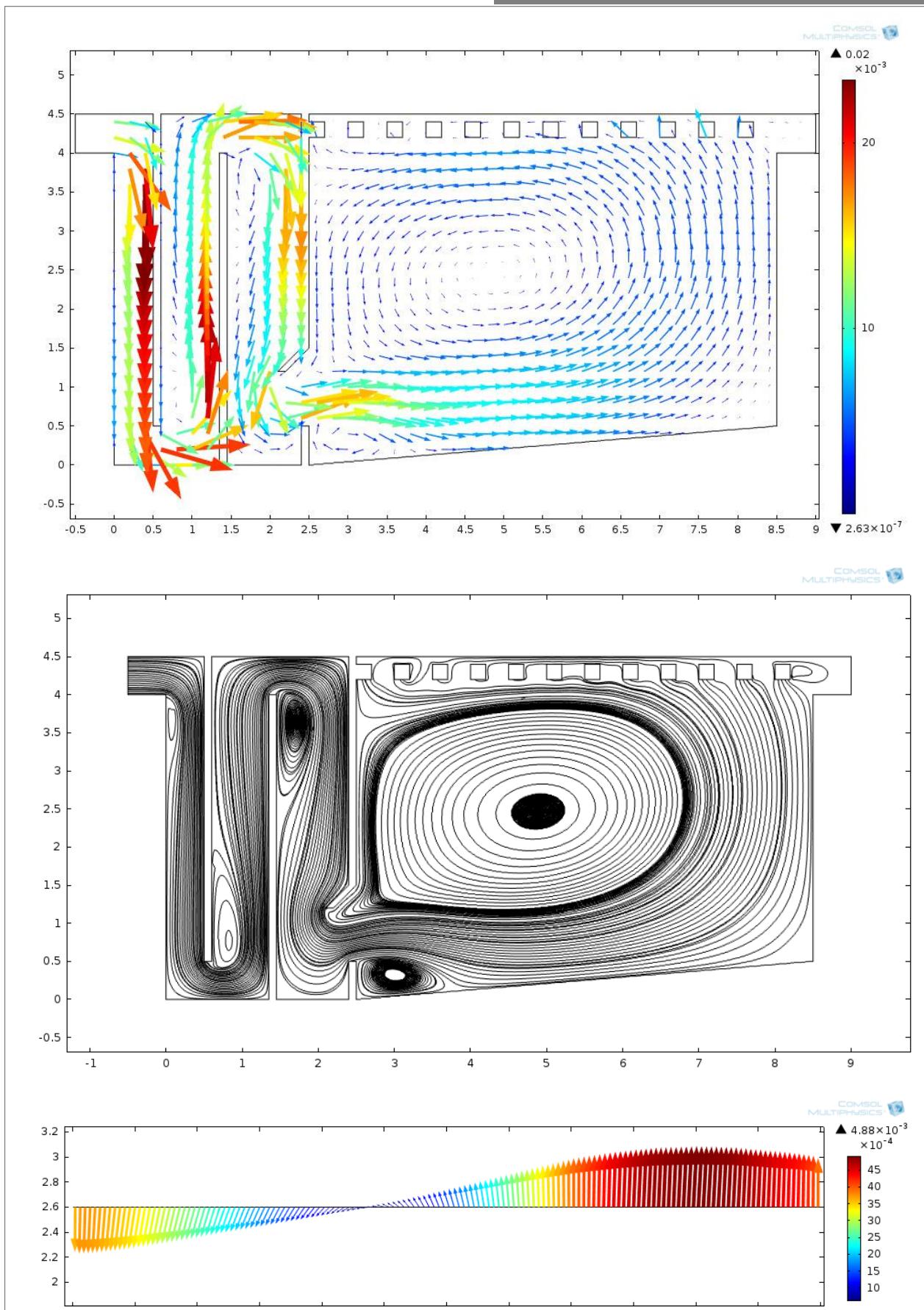


Figure VIII-5 : Variante A-I, ouvrage sans lamelles, orifice d'ouverture munie d'un déflecteur, douze goulottes de récupération d'eau décantée

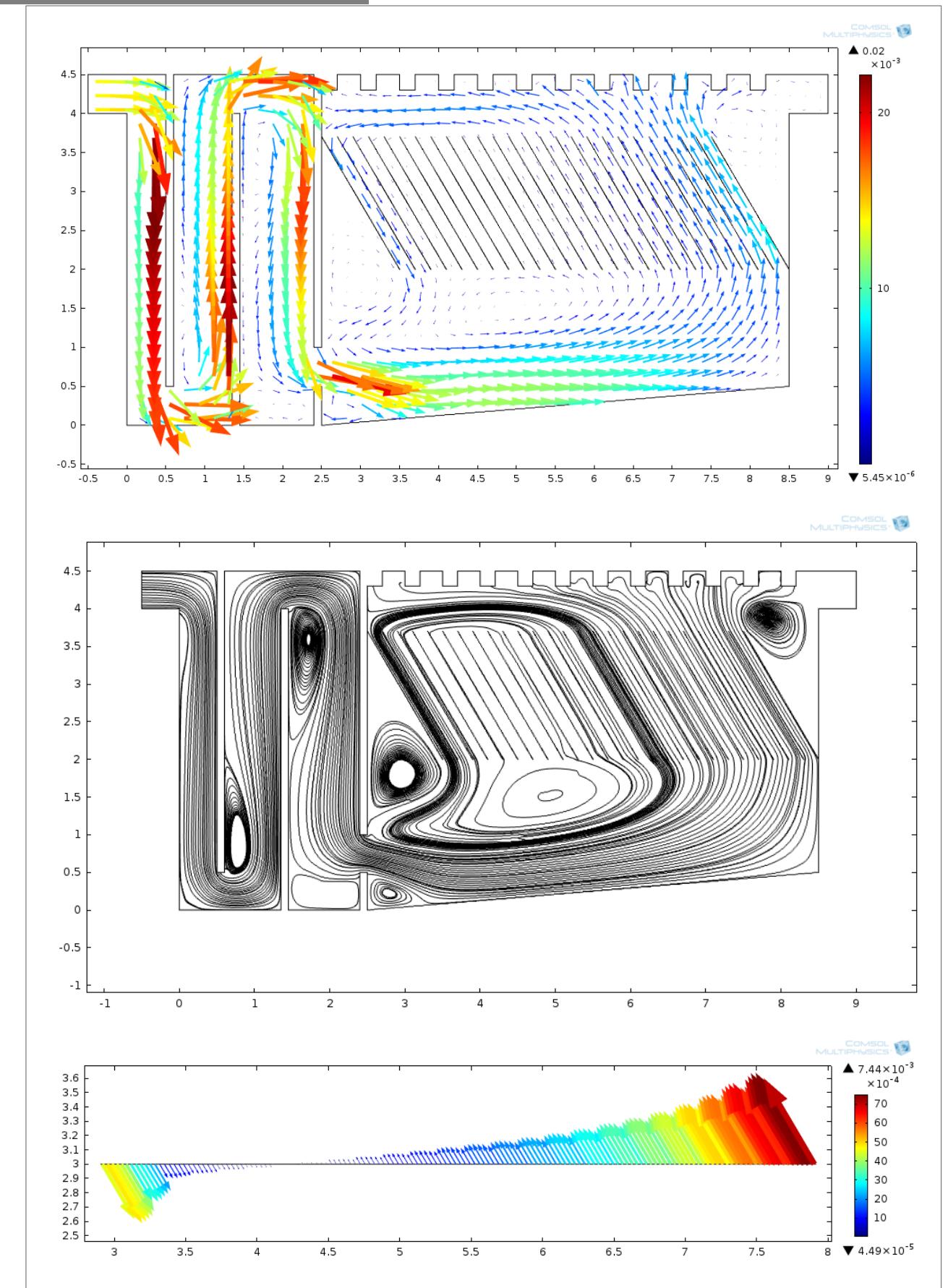


Figure VIII-6 : Variante A-II, décanteur lamellaire, orifice d'ouverture simple sans déflecteur, douze goulottes de récupération d'eau décantée

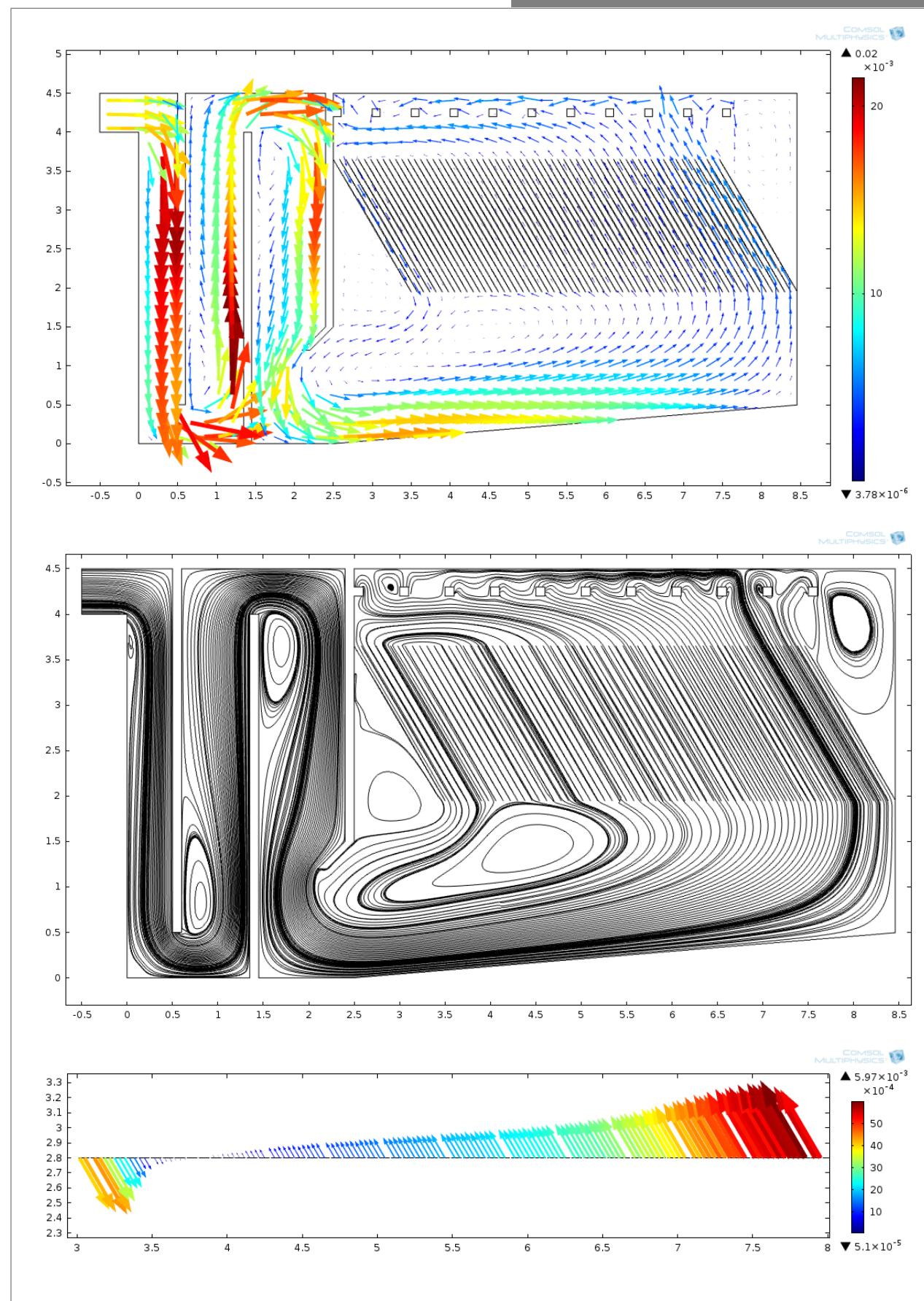


Figure VIII-7 : Variante A-III, décanteur lamellaire, ouverture avec déflecteur seul, Onze goulottes de récupération d'eau décantée

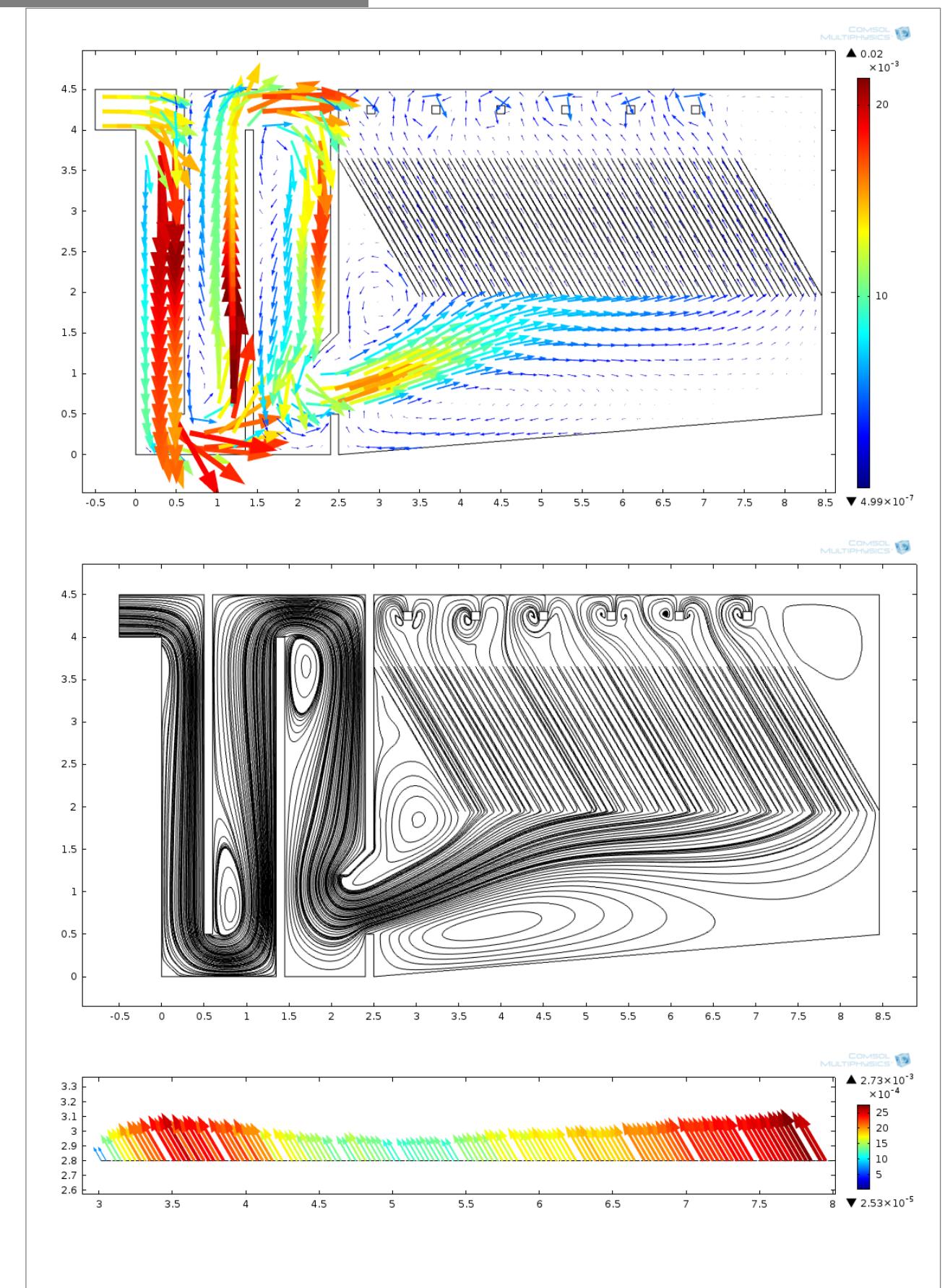


Figure VIII-8 : Variante A-IV, décanteur lamellaire, orifice d'ouverture munie d'un déflecteur, six goulottes de récupération d'eau décantée

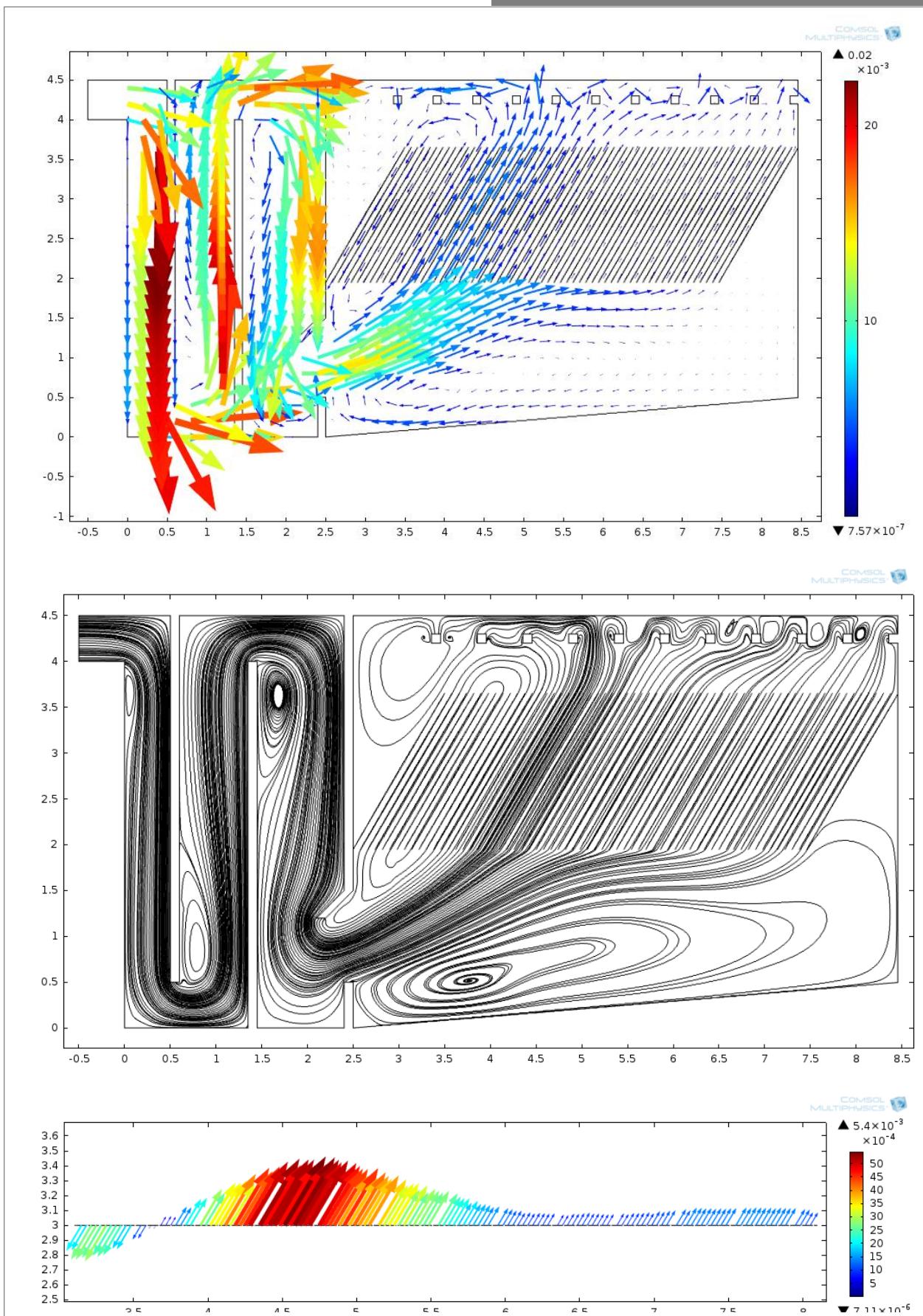


Figure VIII-9 : Variante A-V, décanteur à lamelles dirigées dans le sens de l'écoulement, orifice d'ouverture munie d'un déflecteur, six goulottes de récupération d'eau décantée

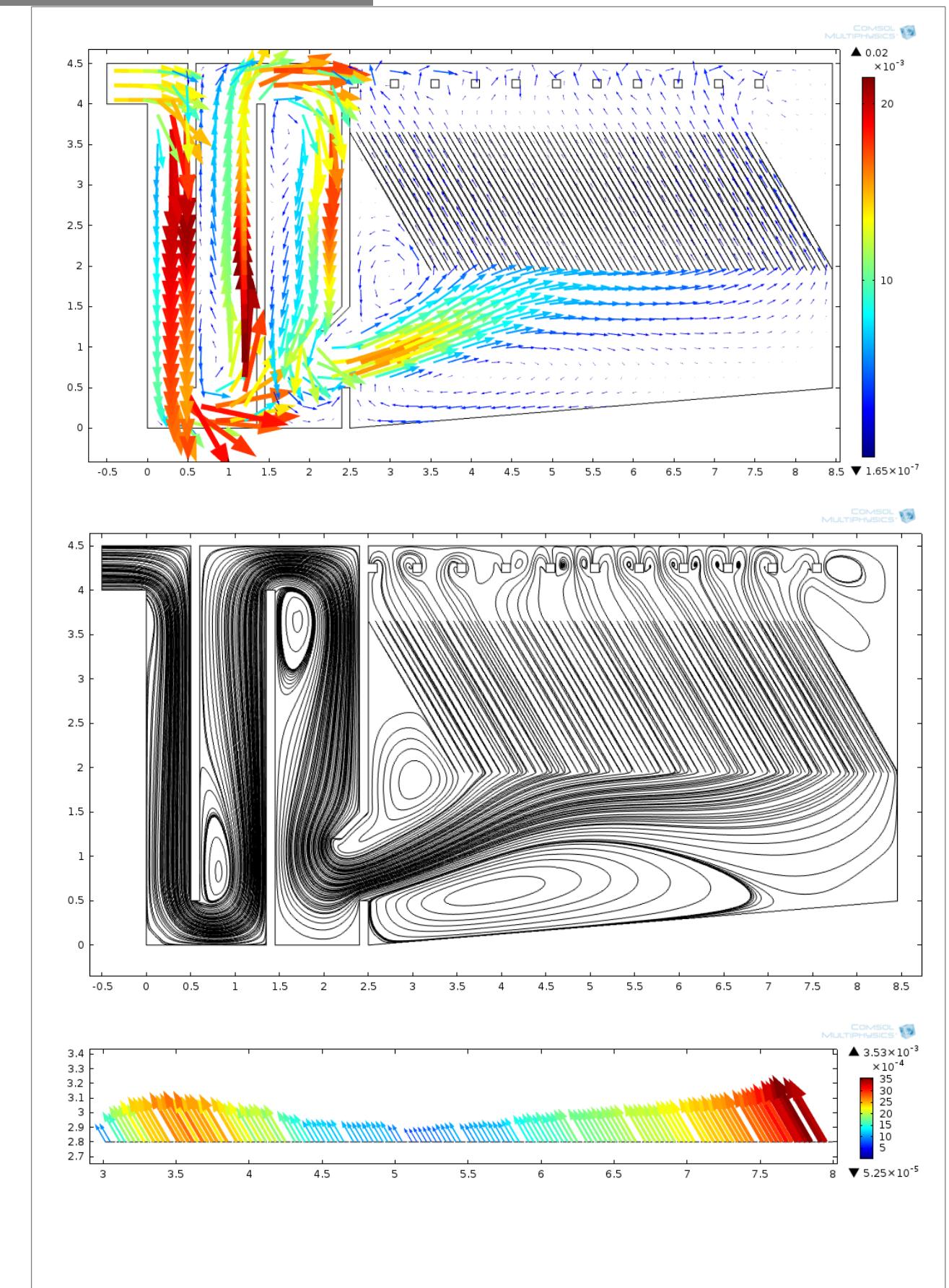


Figure VIII-10 : Variante A-VI, décanteur à lamelles dirigées dans le sens opposé d'écoulement, orifice d'ouverture munie d'un déflecteur, six goulottes de récupération d'eau décantée

### **VIII.2.2.1.1.2 Commentaire des résultats**

- Variante A-I, Ouvrage sans lamelles : Les résultats montrent clairement la présence d'un tourbillon au niveau de la zone de décantation. L'écoulement ne se répartie pas uniformément même si on dispose des goulottes de récupération au niveau supérieur de l'ouvrage. Le profil de vitesse montre une partie ascendante (loin de l'ouverture) et une partie descendant (proche de l'ouverture). Cette variante sert de **comparaison**.
- Variante A-II, Orifice d'ouverture simple sans déflecteur : En disposant ainsi l'ouverture, l'entrée du flux d'écoulement est dirigée vers le bas, ce flux heurte le fond, remonte et passe dans la partie éloignée des compartiments lamellaires. Les tourbillons dans la variante A-I sont remplacés par une zone de recirculation au niveau des compartiments plus proches de l'entrée. Le profil de vitesse montre un fort gradient dans la zone de décantation. cette configuration d'entrée **ne convient donc pas** à notre conception.
- Variante A-III, Ouverture avec déflecteur seul : Les résultats obtenus avec cette configuration d'entrée se rapprochent de celle de la variante A-II. Le déflecteur seul **ne suffit donc pas** à uniformiser le flux d'écoulement dans les compartiments lamellaires.
- Variante A-IV, Orifice d'ouverture munie d'un déflecteur avec Six goulottes de récupération d'eau décantée : (1) En combinant l'orifice simple avec le déflecteur, on arrive à dévier vers le haut le sens d'entrée du flux d'écoulement. L'énorme zone de turbulence aperçue dans les variantes ultérieures est réduite et complètement déplacée dans les zones où il n'y a aucun écoulement. Les flux qui entrent dans la zone de décantation forment ensemble un tube de courant et sont canalisé totalement dans les lamelles. Cette configuration d'entrée reste **le plus convenable** parmi les possibilités qu'on peut exploiter de la première variante. (2) En diminuant le nombre de goulottes de récupération, on constate un profil de vitesse témoignant une distribution plus uniforme du flux d'écoulement dans les compartiments lamellaires.
- Variante A-V, lamelles dirigé dans le sens de l'écoulement : En disposant les lamelles dans le sens de l'écoulement, on observe que la répartition de l'écoulement au niveau des lamelles est loin d'être satisfaisante (variation de couleur dans le profil de vitesse). On observe une zone de recirculation de l'eau dans la partie proche de l'ouverture des compartiments lamellaires, cette partie ne peut donc plus assurer le rôle auquel il est

consacré. Cette disposition des lamelles fait partie donc des **cas le plus défavorable** pour la répartition des flux en comparaison de la variante A-VI.

- **Variante A-VI** lamelles dirigé dans le sens opposé d'écoulement : la comparaison avec la variante A-V rend compte la différence que peut engendrer l'orientation des compartiments lamellaire. Ce qui nous conduit à adopter l'orientation dans le sens opposée à l'écoulement.

L'influence de l'entrée, de la disposition des lamelles, de la sortie de l'eau à traiter :

- adoptons l'entrée constituée d'un orifice muni d'un déflecteur.
- Influence de la géométrie de sortie : en comparant les variantes A-IV et A-VI, on constate que le nombre de goulottes convenable est de Six (6).
- Influence de l'orientation des lamelles : la comparaison des variantes A-V et A-VI, nous conduit à adopter l'orientation dans le sens opposée\* à l'écoulement.

À notre niveau de conception, ces résultats nous conduisent à retenir la **variante A-IV**, offrant les meilleures performances dans la répartition du flux d'écoulement dans les compartiments lamellaires. C'est donc cette variante qui va être réalisée en trois dimensions.

#### VIII.2.2.1.2 Simulation en trois dimensions de la première variante

- Description de la variante
  - Entrée : débordement à vitesse constante en amont des floculateurs
  - Sortie : goulottes de récupération situées dans la partie supérieure de la zone de décantation, débordement dans des canaux rectangulaires.
  - Lamelles : lamelles de forme hexagonale orientées dans le sens opposée au courant
  - Maillage : taille maximum : 10 [mm], taille minimum : 120 [mm]

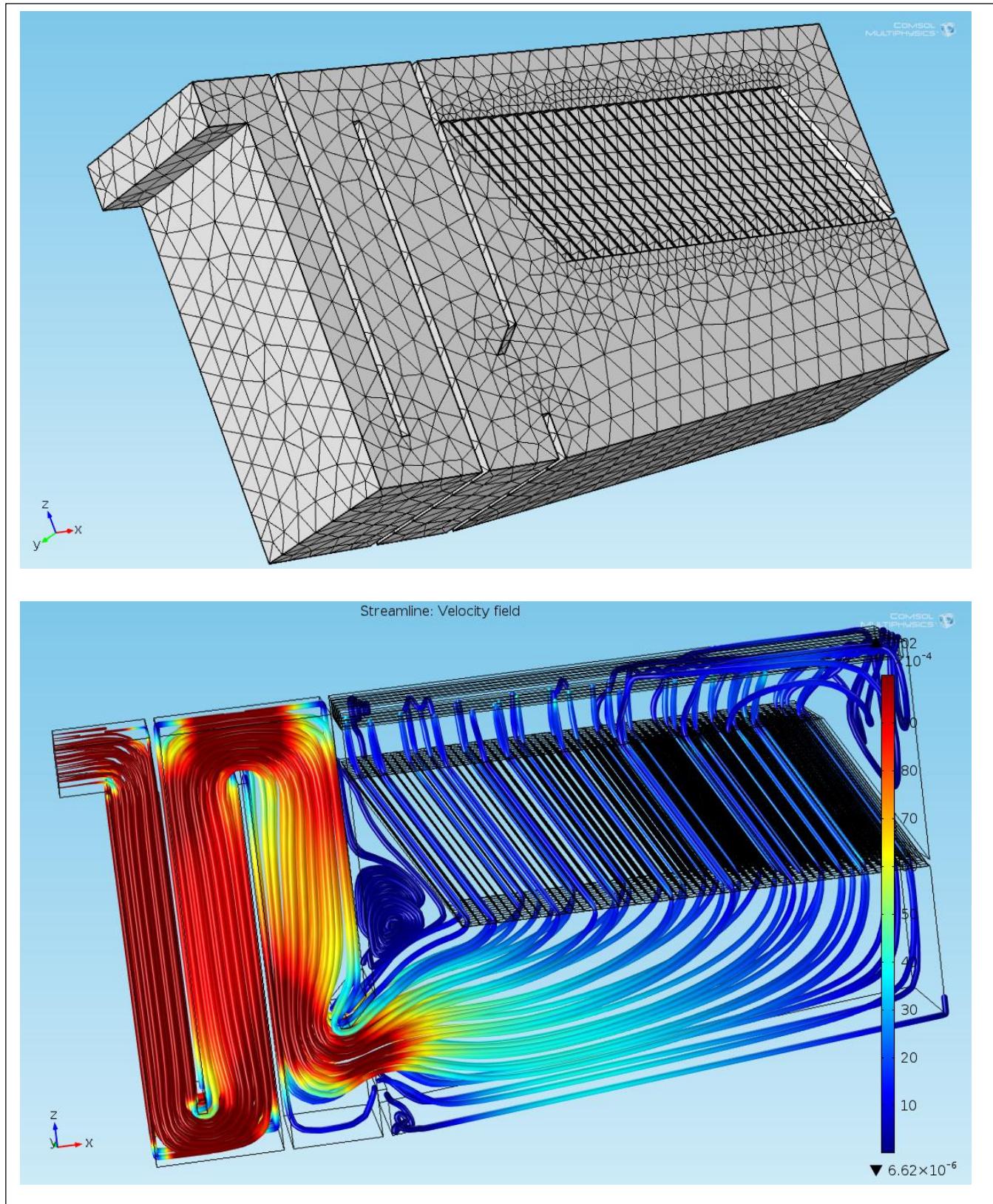


Figure VIII-12 : Réalisation 3D de la variante A-VI, maillage (haut), et ligne de courant (bas)

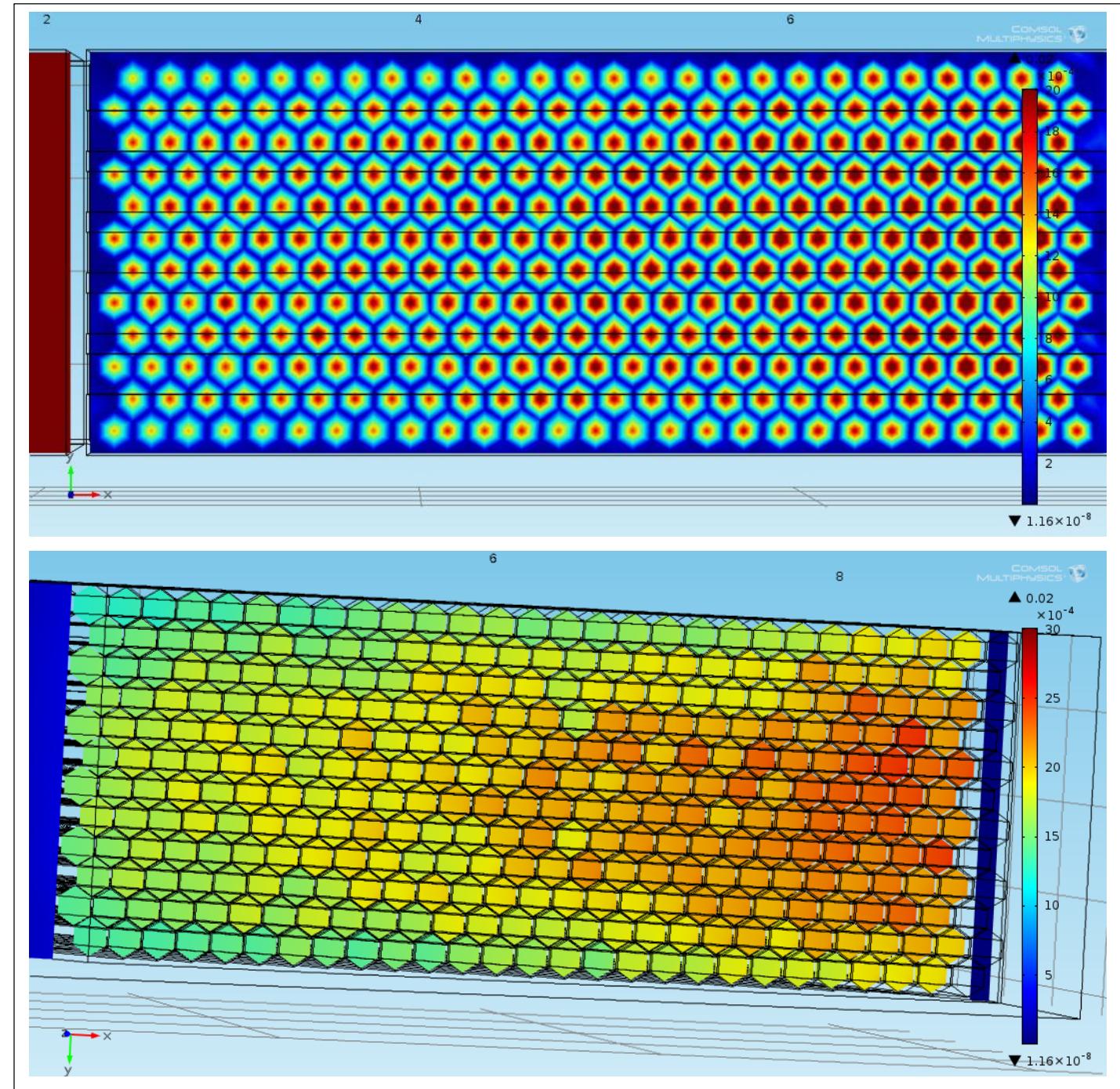


Figure VIII-11 : Répartition de vitesse à la sortie (haut) et au milieu (bas) des compartiments lamellaires

- Commentaires :

En réalisant en trois dimensions l'une des variantes, on peut apprécier la répartition de flux dans chaque compartiment du module lamellaire. On localise aussi dans cette dimension la répartition des tourbillons dans l'ouvrage.

Qualitativement, on constate la fiabilité du modèle d'écoulement plan. En effet, en réalisant en trois dimensions l'un des variantes les plus performantes en deux dimensions, le modèle conserve la majorité des propriétés de l'écoulement plan, nous comptons juste de donner le surplus d'information apportée par le modèle 3D. La première figure montre que les zones de turbulences semblent disparaître dans le fond du décanteur. À travers la seconde figure, on peut apprécier la distribution de vitesse dans les modules lamellaires.

Quantitativement, en évaluant la vitesse qui passe dans chaque module, et en comparant avec la vitesse idéale, on constate que la configuration géométrique de la première variante satisfait à 2% près la condition d'équi-répartition de flux dans les modules lamellaires.

*Tableau VIII-5 : Intensité du vecteur vitesse dans la zone de décantation*

VITESSE [m/s]	
<b>MIN</b>	0,00124 [m/s]
<b>MAX</b>	0,00255 [m/s]
<b>MOYENNE</b>	0,00183 [m/s]
<b>IDEAL</b>	0,00188 [m/s]

### VIII.2.2.2 Deuxième variante : alimentation en utilisant des canaux de distribution situés dans la partie inférieure de la zone de décantation

Ce modèle est Inspiré du modèle de décanteur PULSATON lamellaire qui consiste à disposer des tuyaux perforés uniformément dans le bas de la zone de décantation. L'eau sort dans les orifices des tuyaux de répartitions, passe dans la zone de décantation et récupérée par des goulottes disposées dans la partie supérieure de la zone de décantation. On a ainsi un décanteur à flux vertical.

#### VIII.2.2.2.1 Simulation en Deux dimensions (2D)

Les résultats offerts par un modèle d'écoulement plan de cette variante possèdent une limite d'acceptations. En effet, ces variantes ne traduisent pas en totalité l'écoulement dans le modèle géométrique qu'on cherche à concevoir car la totalité de l'écoulement ne peut être simulée en deux dimensions. Pour ce faire donc, on adopte l'hypothèse que le débit de traitement  $Q$  est déjà divisé en le nombre  $n$  de tuyaux de répartition. Il sort donc dans chaque entré un débit  $Q/n$ .

Il est nécessaire de réaliser ces variantes en trois dimensions pour le dimensionnement des compartiments d'alimentation de la zone de décantation. Mais, notons que l'applicabilité de ces modèles plans dépend de la façon dont on va réaliser ces variantes en trois dimensions.

Pour ce type de configuration, on propose de comparer deux variantes B-I et B-II :

*Tableau VIII-6 : comparaison de deux séries de variantes (B) suivant le mode de sortie et d'entrée d'eau à traiter*

Variantes	Entrée		Sortie		Autres Dispositifs
	nombre	dimension	nombre	dimensions	
<b>B-I</b>	10	0,2 [m]	10	0,2 [m]	
<b>B-II</b>	6	0,1 [m]	10	0,1 [m]	

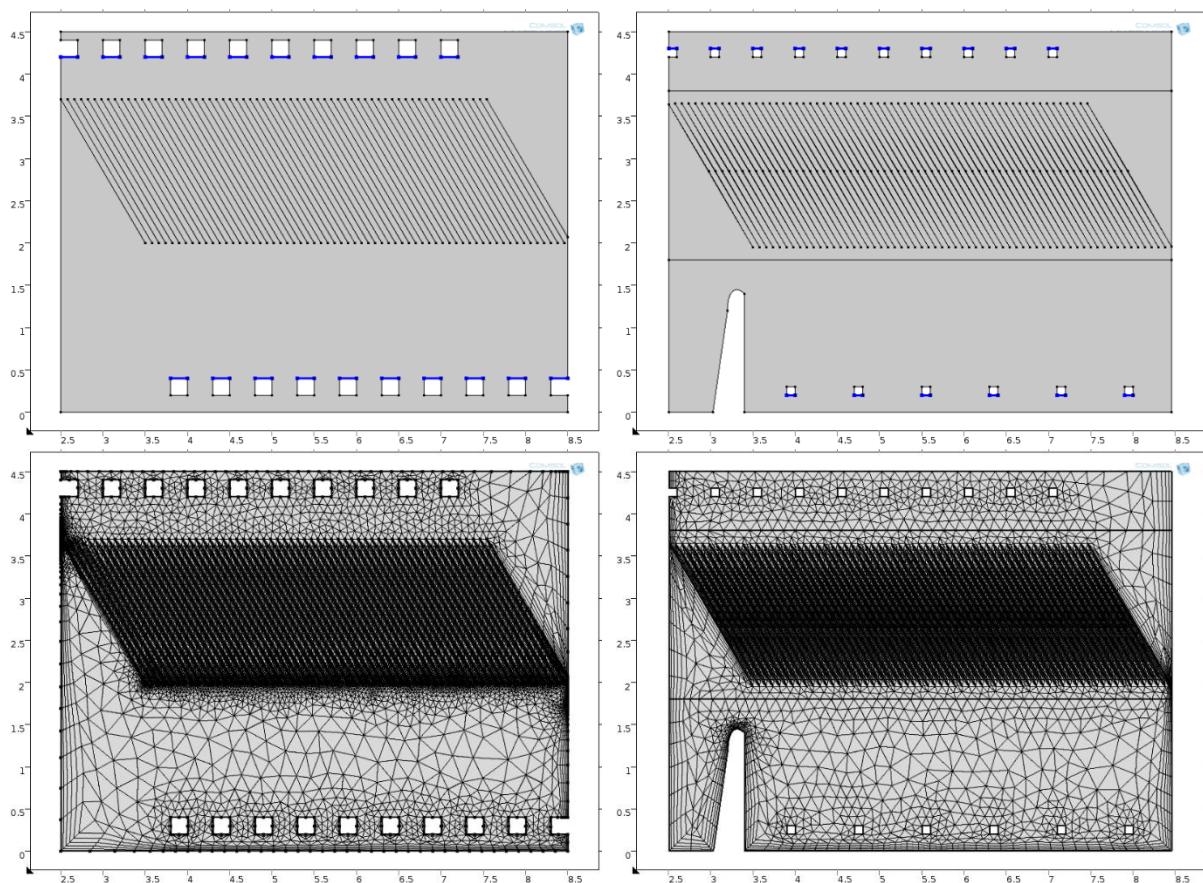


Figure VIII-13 : Géométrie et maillage des deux variantes **B-I** et **B-II**

Géométrie du corps de l'ouvrage :

- Hauteur : 4,5 [m]
- Longueur : 6 [m]
- Largeur : 2 [m]

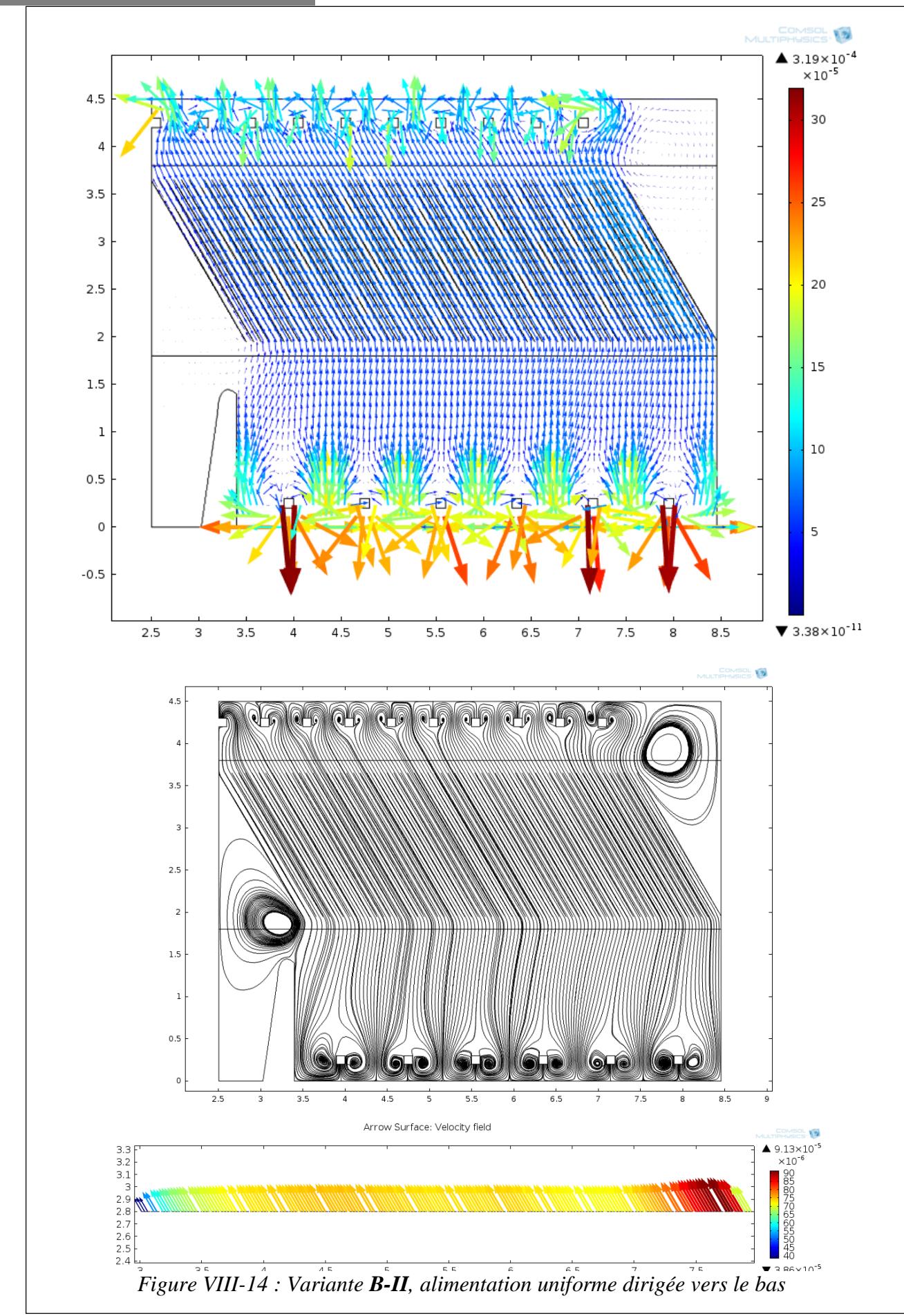
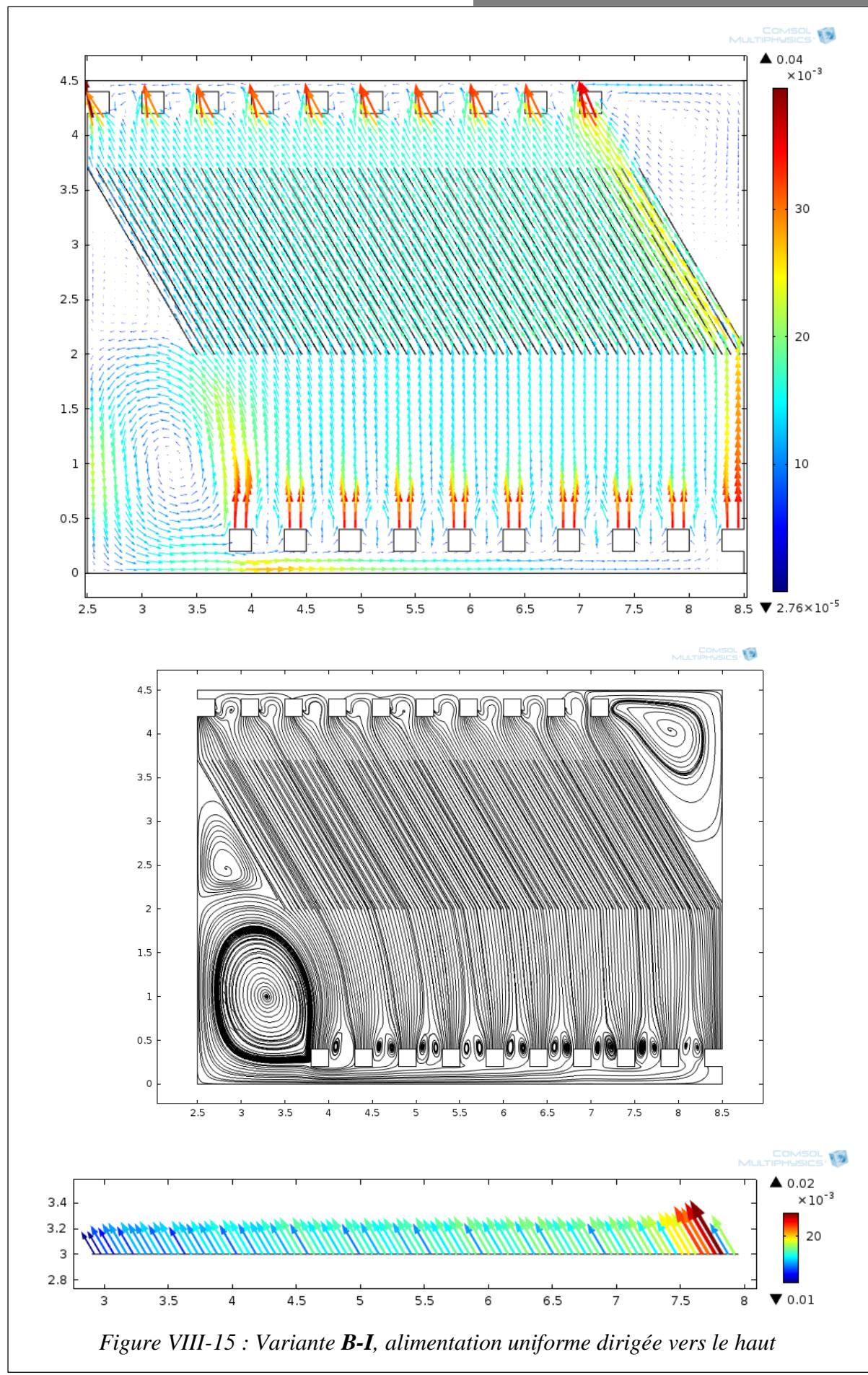
Le maillage d'élément fini des deux variantes :

- Taille d'élément maximal : 0,99 [m]
- Taille d'élément minimal : 0,0315 [m]

#### VIII.2.2.2.1.2 Présentation des résultats

Pour chaque cas de variante, l'appréciation de la distribution de vitesse dans l'ouvrage s'observe à travers trois résultats :

- Vitesse en tout point de l'ouvrage, dont l'intensité est appréciée à travers les couleurs et les directions à travers les vecteurs
- Lignes de courant, servent à localiser les chemins préférentiels d'écoulement
- Profil de vitesse au milieu de la Zone de décantation, qui est notre principal intérêt servant à apprécier le critère d'optimisation (répartition uniforme de vitesse)



### **VIII.2.2.1.3 Commentaire des résultats**

- **Variante B-I :** Cette variante offre des meilleures performances par rapport à celle qui ont été données dans la série des variantes (A). La répartition des flux semble satisfaisante, mais en pratique, cette configuration pose des problèmes d'évacuation de boue. En effet, dans cette configuration, l'extraction des boues sera une opération difficile et posera quelques problèmes. La variante précédente tente de donner des solutions adéquates pour adapter cette configuration.
- **Variante B-II :** (i) En diminuant les dimensions et en inversant la direction d'alimentation (dirigée vers le bas) nous constatons que la performance est encore plus élevée du point de vue répartition, la faible variation de couleur montre un faible gradient de vitesse en général en tout point de l'ouvrage. Ces configurations sont celles adaptées par de nombreux constructeurs. (ii) Le mur de séparation contribue aussi à la répartition du flux, mais son principal rôle est de séparer la zone de décantation et la zone de concentration et d'extraction de boue (partie gauche). De plus dans cette zone, le fluide est presque au repos, condition idéale pour l'extraction des boues.

Les deux scénarios nous conduit à une configuration plus utilisée pratiquement par de nombreux constructeurs. Il est nécessaire de réaliser la variante **B-II** en trois dimensions pour pouvoir l'appliquer dans un cas réel.

### **VIII.2.2.2 Simulation en trois dimensions de la deuxième variante**

La réalisation de la deuxième variante en trois dimensions pose des complexités qui restent encore à résoudre. La complexité de la géométrie construit en trois dimensions génère un nombre très élevé de mailles. La grande difficulté se pose sur la forte variation de la taille des maillages en différents points du domaine (quand la géométrie est compliquée, en certains points il est nécessaire d'affiner le maillage pour que les résultats soient significatifs), ce qui génère des calculs énormes pour la résolution du problème. Simplement, ça veut dire qu'on a besoin de matériels informatiques très performants pour ce genre de calcul.

On compte donner en annexe les détails concernant les modèles géométriques et les maillages d'élément fini de la version en trois dimensions de cette variante, qui, actuellement, attend compilation.

### VIII.2.3 Proposition de choix sur les Variantes optimales à retenir

#### VIII.2.3.1 Première variante

##### VIII.2.3.1.1 Description

La première variante exploite les possibilités les plus simples pour l'adaptation des lamelles dans le type d'ouvrage de Sabotsy Namehana. L'intégrité de la structure reste intacte ; les résultats de simulation donnent les aménagements à effectuer sur l'ouverture de l'alimentation de la zone de décantation (**r**, **s**, **t**, **ω**), Les goulottes de récupérations d'eau décantée (**p**, **q**, **δ**) et les supports des modules lamellaires. Si les dimensions des modules lamellaires (**e**, **h**, **a**) étant fixées à l'avance, la position dans la zone de décantation est repérée par la grandeur (**d**), ces dimensions sont développées clairement dans la *figure VII – 17*.

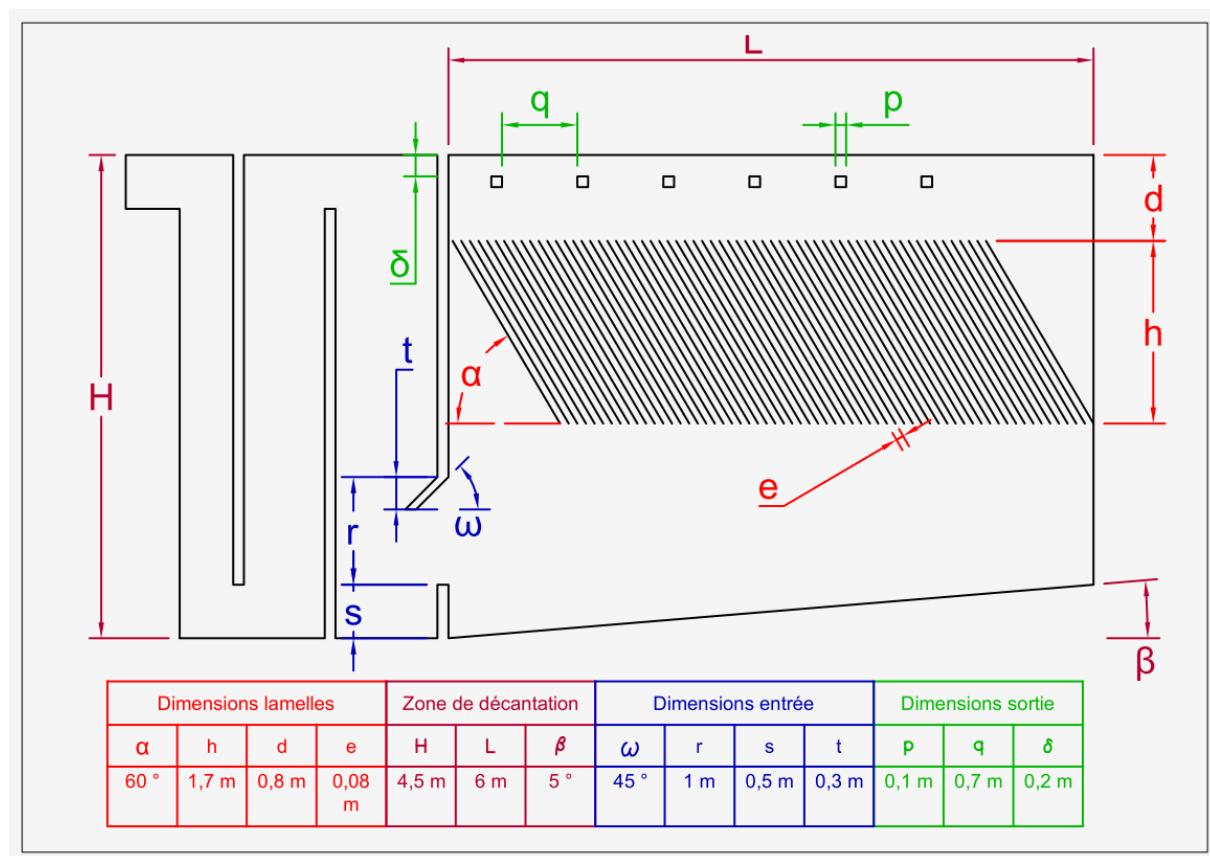
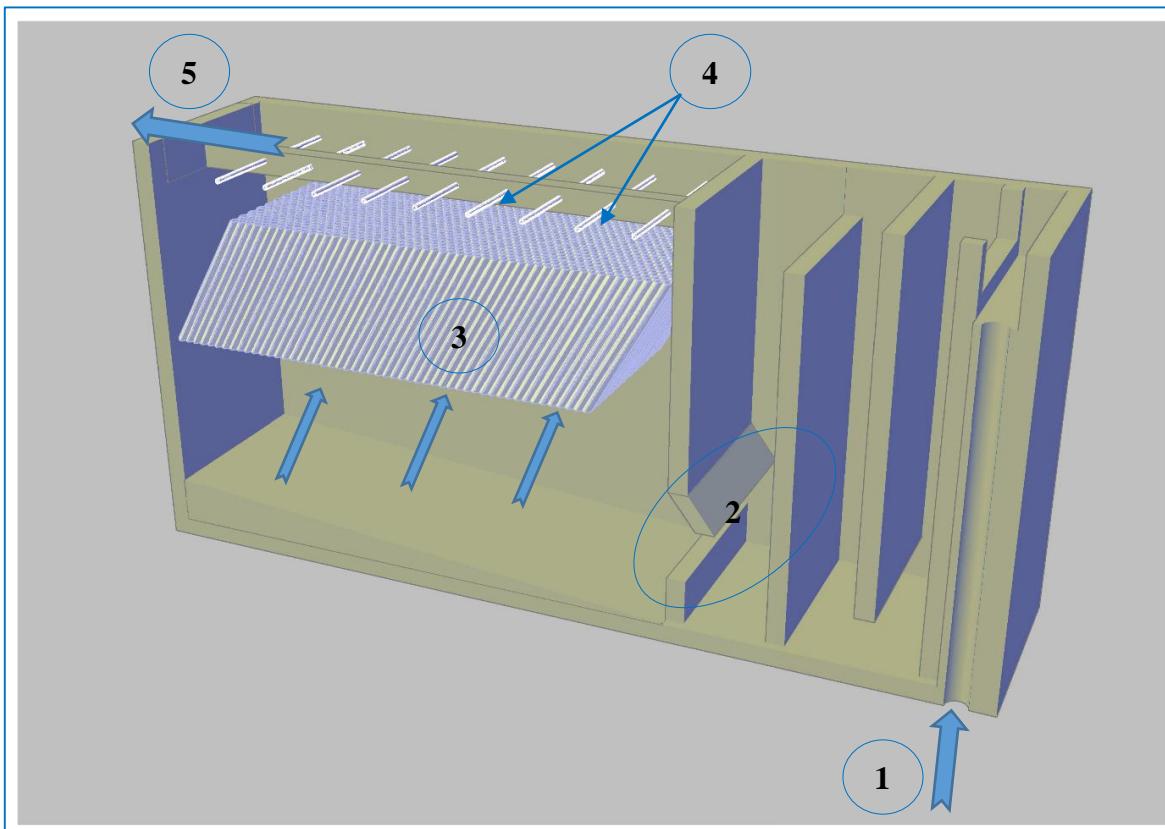


Figure VIII-16 : Dimensions détaillées de la première variante

Le principe de fonctionnement, décrit dans la conserve une grande partie de celle de l'ouvrage initial. L'eau brute avec les réactifs coagulants est amenée dans une conduite (1)

débouchant à l'air libre en amont de la zone de flocculation assurant son rôle tel qu'il est destiné, un cheminement de l'eau de bas en haut permettant un mélange parfaite des réactifs coagulants avant d'entrer dans la zone de décantation (*Figure VII-18*).



- 1 : entrée eau brute injectée de réactif coagulant
- 2 : ouverture de la zone de décantation
- 3 : Compartiment lamellaires
- 4 : tuyaux perforées de récupération d'eau décantée
- 5 : sortie de l'eau décantée

*Figure VIII-17 : Rendue en trois dimensions (3D) de la première variante*

Sortant de l'ouverture d'alimentation de la zone de décantation (2), le flux de l'eau flokulée passe dans la zone de décantation avant d'être canalisée dans chaque compartiment des modules lamellaires (3). Les boues qui se déposent sur le fond du module glisse lentement vers le bas tandis que l'eau claire, séparée de tout particules décantables sort du compartiment lamellaire et débordent en surface libre dans les goulottes de récupération (4) pour continuer en suite leur cheminement vers les cellules filtrantes pour la dernière étape de clarification. L'ouvrage ainsi aménagé est **un décanteur statique à module lamellaire**.

Les boues sortant du bas des lamelles s'alourdissent et atteignent le fond de l'ouvrage. Une légère inclinaison du fond permet le glissement des boues vers une zone où ils sont purgés et rejoignent le bassin des eaux résiduaires.

Note importante : La répartition uniforme de flux est en grande partie fonction de la géométrie de l'ouverture d'alimentation de la zone de décantation. Dans cette variante, ce sont ces dimensions qui sont les plus significatives, donc la construction doit être exécutée avec soins.

#### VIII.2.3.1.2 Avantages

- Infrastructure et construction : simple à réaliser, n'exige pas trop d'aménagement, moindre coût.
- Répartition de flux : performance de répartition atteint par des aménagements simples de l'ouverture de la zone de décantation.

#### VIII.2.3.1.3 Inconvénients

- Evacuation de boues : l'évacuation de boue utilisant l'inclinaison du fond s'avère insuffisante quand l'eau est fortement chargée en matière en suspension.
- Répartition de flux : les simulations montrent que le flux d'écoulement passe en grande partie dans les modules éloignées (figure simulation en 3D). Cette faiblesse est incontournable dans ce genre de configuration, à la limite on peut juste l'atténuer.
- Performance limitée : moins de coalescence entre floc dans la zone de décantation,

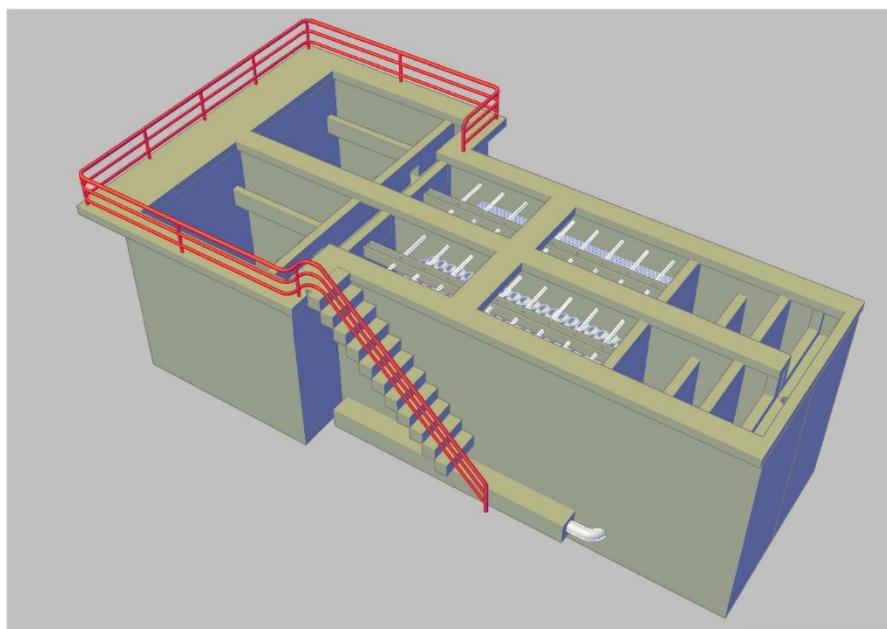
L'adoption de la première variante se présente comme un bon départ dans l'application des lamelles. Cette variante est retenue dans le cas où les exigences en termes de qualité et débit de production ne sont pas trop accentuées et si le débit actuel peut assurer les besoins des consommateurs.

Vue son simplicité d'adaptation à l'ancien système, en affinant les calculs de simulation et en étudiant bien les dimensions d'entrée de l'eau dans la zone de décantation, on peut avoir une satisfaction du point de vue répartition de flux. Le principe d'évacuation de boue reste le même que celui de l'ouvrage initial.

### VIII.2.3.2 Deuxième variante

#### VIII.2.3.2.1 Description

Le type d'alimentation de la deuxième variante nécessite d'autres aménagements permettant le transport de l'eau flokulé vers les répartiteurs de débit dans le bas de la zone de décantation. Une perspective de l'ouvrage rénové construit dans un modeleur géométrique ressemble à peu près à la *figure VII-19*.



*Figure VIII-18 : Vue en perspective de l'ensemble décanteur-filtre de la deuxième variante*

La zone de flocculation reste la même, le principe de fonctionnement reste inchangé. L'eau brute avec les réactifs coagulants est amenée dans une conduite (1) débouchant à l'air libre en amont de la zone de flocculation assurant son rôle tel qu'il est destiné.

On a bouché l'ouverture de la zone de décantation, cela permet de dévier l'écoulement vers une canalisation rectangulaire (2) à l'extérieur de l'ouvrage. Cette canalisation a pour rôle de répartir le flux dans les tuyaux perforés (3) situé dans la partie inférieure de la zone de décantation. L'eau à traiter est injectée dans la zone de décantation à travers chaque orifice orienté vers le bas des tuyaux, cette orientation offre l'avantage d'offrir un flux plus calme dans la zone de décantation.

Le mélange eau-boue passe dans la zone de décantation. Les boues formées par la floculation constituent une masse en expansion à travers laquelle l'eau passe de bas en haut, de manière régulière et uniforme. Cette masse est ce qu'on appelle un **lit de boue**. L'eau flocule en passant à travers le "lit filtrant" que constitue les boues et ressort clarifiée à la partie supérieure de la zone de décantation.

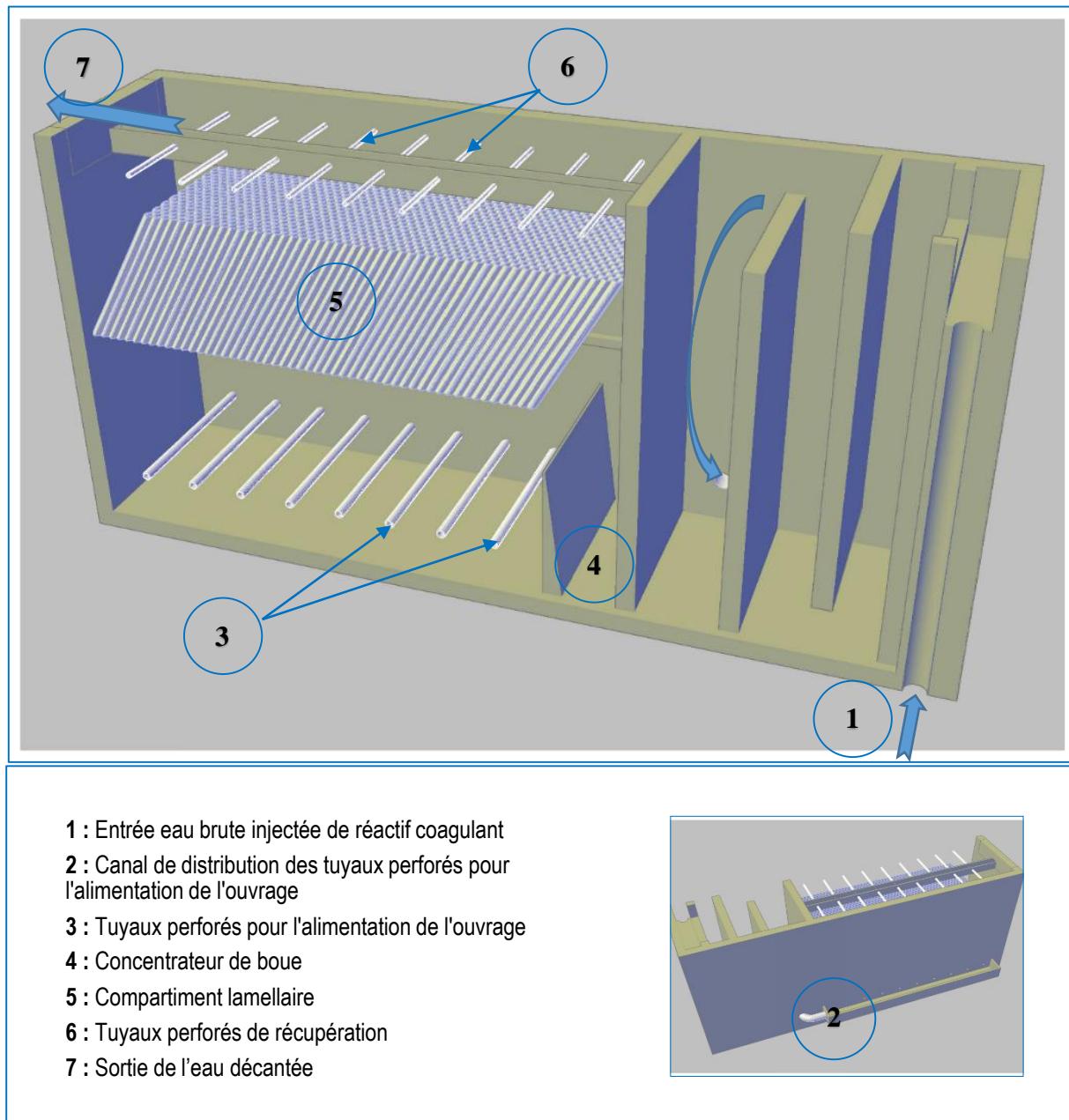


Figure VIII-19 : Rendue en trois dimensions de la seconde variante

En plein régime, ce lit filtrant monte dans la zone de décantation jusqu'au seuil du concentrateur de boue (4). Les boues fortement concentrées se déversent alors dans le

concentrateur par différence de concentration. En principe, dans cette zone, la purge s'effectue à une valeur critique de la concentration, donc la concentration reste modérée.

Dans ce cas, l'inclinaison du fond ne servira plus à rien. En aplatisant le fond, on gagne en hauteur pour un surplus d'espace pour le lit de boue. Dans le cas où la hauteur ne suffit pas, on a encore le choix entre aplatisir le fond et rehausser la structure de l'ouvrage.

En sortant du lit de boue les fines particules sont capturées dans la zone de décantation lamellaire (5). On combine ainsi les avantages offerts par **un décanteur à lit de boue et un décanteur lamellaire** pour avoir un décanteur à haute performance. Les goulottes de reprises (6) ainsi que la sortie de l'eau décantée (7) reste le même que celle de la première variante.

La simulation en deux dimensions donne les dimensions de l'ouvrage relatif à la zone de décantation (**L, H**), le mur séparateur du zone de décantation et zone de purge des boues (**a, b**), l'alimentation de la zone de décantation (**r, s, t**), Les goulottes de récupérations d'eau décantée (**p, q, δ**). Comme dans le cas de la première variante, les dimensions des modules lamellaires (**e, h, α**) étant fixées à l'avance, la position dans la zone de décantation est repérée par la grandeur (**d**), ces dimensions sont développées clairement dans la *figure VII – 21*.

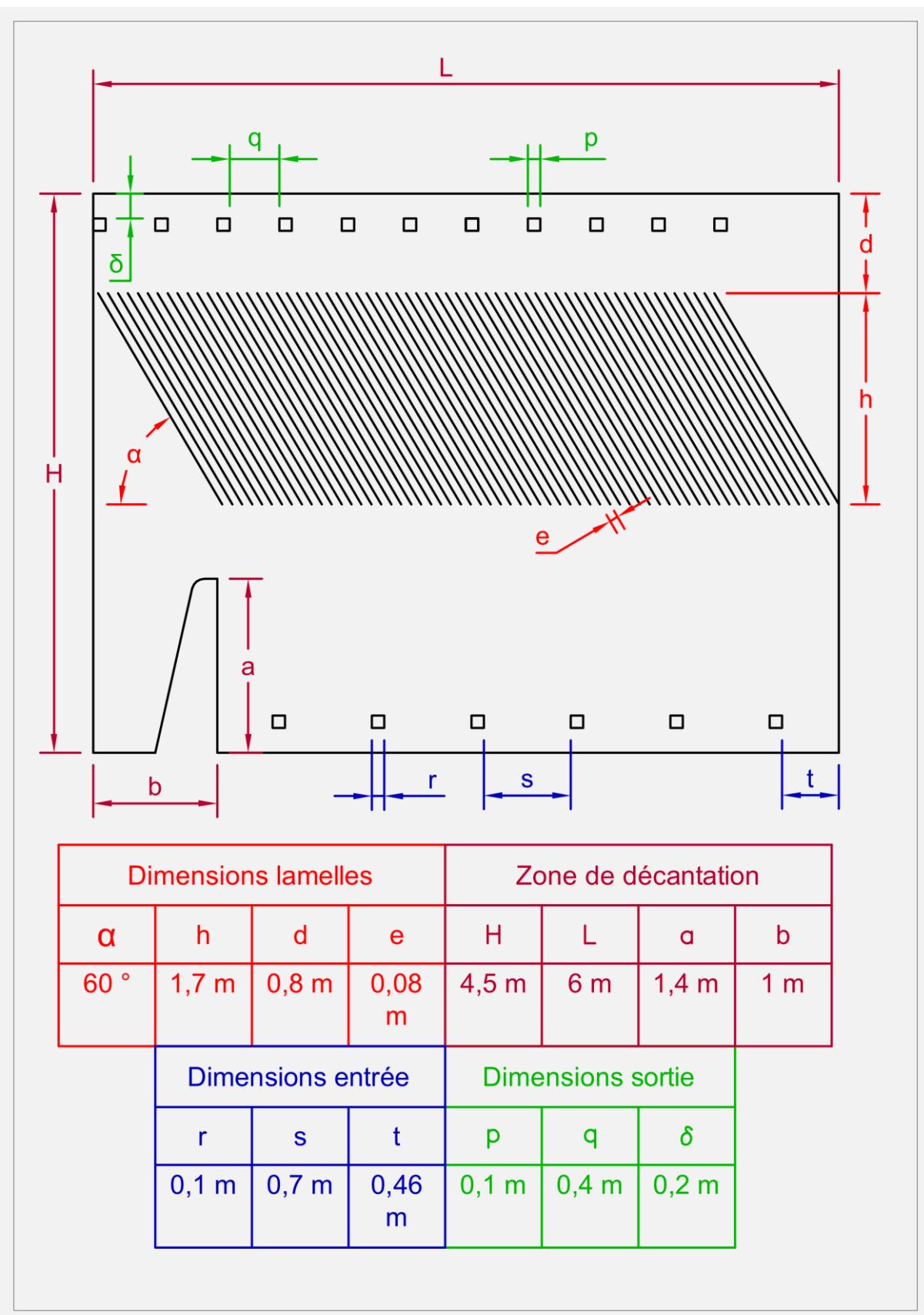


Figure VIII-20 : Dimensions détaillées de la zone de décantation de la deuxième variante

### VIII.2.3.2.2 Avantages

- Répartition de flux : meilleures de toutes les possibilités
- Profite les avantages des décanteurs à lit de boue :
  - rôle tampon du lit de boue : pas de conséquence néfaste immédiate à cause d'un mauvais ajustage du taux de traitement ou une variation du pH de l'eau brute
  - économie de réactif
  - Amélioration de la floculation : absence de fines particules, floc homogène et réduction du temps de floculation
- Haute performance : combinaison des performances du décanteur à lit de boue et du décanteur lamellaire
- Boue :
  - Aucune zone de dépôt de boue dans le fond de l'ouvrage, à cause des vitesses d'écoulement élevées engendrée par la sortie dirigé vers le bas
  - Evacuation plus efficace et plus rapide grâce au concentrateur

### VIII.2.3.2.3 Inconvénients

- Complexité du système qui nécessite des surplus d'ouvrages et d'infrastructures :
  - Système de répartition de flux à l'entrée
  - Système d'évacuation de boue
  - Chambre à vide
- Coût : Investissement considérable dans la phase de conception et dans la phase de réalisation :
  - Matériels informatiques performant (pour la conception) : cette variante nécessite d'énormes précisions avant d'être appliquée. Vue la complexité de la configuration géométrique, l'atteinte des exigences sur les précisions nécessite des matériels informatiques très performants.
  - Construction des infrastructures :
- Difficultés sur la maîtrise du fonctionnement du système :
  - Dimensionnement des éléments du système de distribution d'entrée :
    - Collecteur général : doit être une grande section

- orifice sur les tuyaux de répartition d'entrée (calculés de telle sorte qu'il se constitue, dans la moitié inférieure du décanteur, un lit de boues homogène)
- hauteur d'implantation des lamelles : au-dessus du lit de boue
- maîtrise de la qualité des boues : le seul paramètre " Turbidité " s'avère insuffisant pour la maîtrise du processus de flocculation. D'autres essais sont indispensables, tels que "essai à l'éprouvette", mesure du coefficient de cohésion de boue, mesure de l'indice de Mohlman (Sludge Volume Index : SVI).

Cette variante offre les meilleures des performances en qualité et en quantité d'eau traitée. Mais l'investissement correspondant dépasse sûrement celle de la première variante. Il serait raisonnable donc d'adopter cette variante quand, dans les années à venir, la demande des consommateurs vont augmenter suivant l'augmentation de la population et l'élargissement du réseau.

En utilisant des matériels informatiques adéquats et en effectuant les essais pour la maîtrise des phénomènes de flocculation, il est tout à fait possible de bien dimensionner les éléments clés de cette variante pour pouvoir l'appliquer à merveille.

#### **VIII.2.4 Résumé**

En résumé, en implantant des modules lamellaires de forme trapézoïdale dans l'ouvrage rectangulaire, on augmente la performance de 6 fois celle sans lamelle. Or ces résultats s'appuient sur des hypothèses d'équi-répartition du débit dans chaque compartiment d'un module lamellaire. On a donc utilisé les avantages offerte par la modélisation hydrodynamique dans le but de concevoir la géométrie de l'écoulement capable d'atteindre, à une limite près, une configuration qui permet d'homogénéiser au maximum le partage du débit dans chaque module lamellaire.

On a proposé deux variantes applicables dont le niveau de performance croit en fonction du niveau de complexité du système et à qui correspond chacun leur niveau d'investissement. Pour les premières applications, je propose d'adopter la première variante. Et je propose perfectionner la conception de la deuxième variante pour l'application dans les projets d'avenir.

## VIII.3 Evaluation du coût

Pour traiter un débit de 50 [m<sup>3</sup> /h]. On va comparer le fond nécessaire à investir dans la construction de deux systèmes de clarification :

- Floculation / décantation lamellaire / filtration monocouche
- Floculation / décantation simple / filtration monocouche

### VIII.3.1 Dimensions des ouvrages

- Décanteurs sans lamelle :

Pour calculer la surface, on utilise souvent une charge hydraulique superficielle de V<sub>H</sub> = 1 [m/h].

La surface est calculée par

$$S = \frac{Q}{V_H} = \frac{50 \text{ [m}^3/\text{h]}}{1 \text{ [m/h]}}$$

$S = 50 \text{ [m}^2]$  Soit : **S = 4 [m] \* 12,5 [m]**

- Décantation lamellaire :

Il a été démontré que le rapport de surface peut aller jusqu'à **6 fois** celle d'un décanteur simple. Pour des raisons de performances, la conception de la station de traitement de Sabotsy Namehana s'arrête à **un ratio de l'ordre de 4**. Soit une surface de **12 [m<sup>2</sup>]** ou bien, **2[m] \* 6[m]**.

- Filtre :

Dans l'un ou l'autre des deux cas, la décantation est suivie d'une filtration monocouche. Le dimensionnement d'un filtre monocouche est basé sur la vitesse de filtration V<sub>f</sub> = 3 [m/h].

Pour un débit de 50 [m<sup>3</sup>/h], on a besoin d'une surface de filtration :

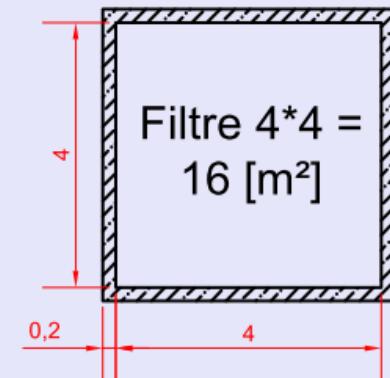
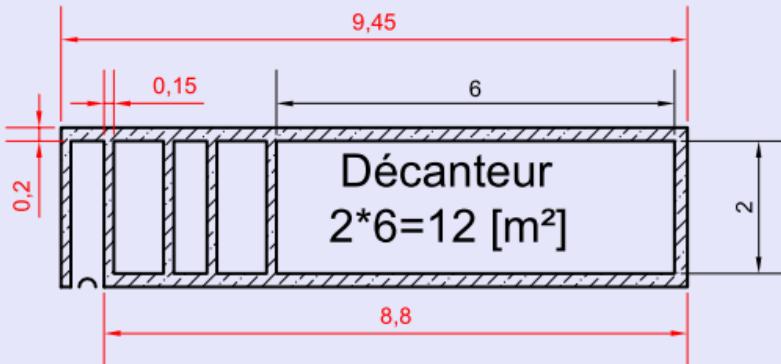
$$S = \frac{Q}{V} = \frac{50}{3}$$

On a une surface de filtration 16 m<sup>2</sup> soit un filtre carré de **4 [m] \* 4[m]**

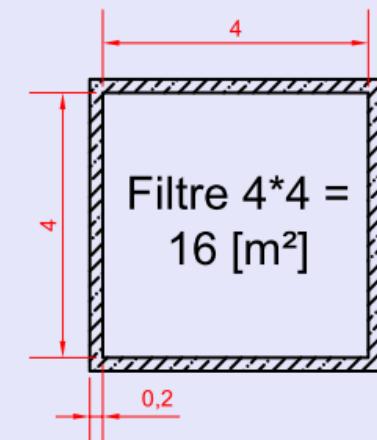
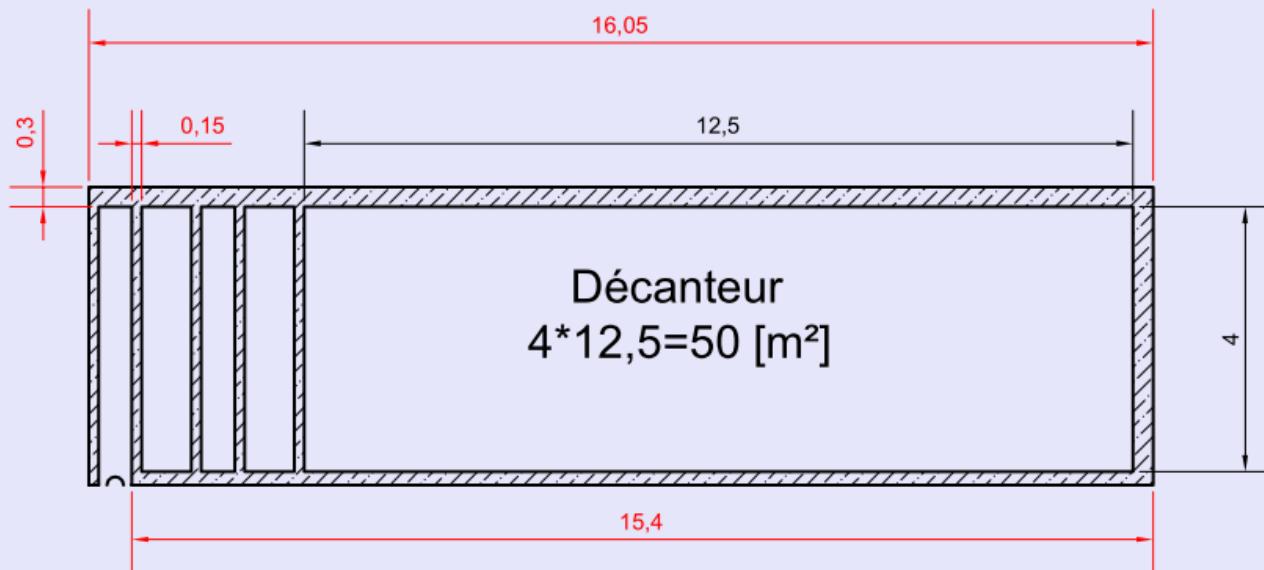
La description des dimensions est donnée par la *figure VIII-22*, on voit la différence de surface, entre décanteur simple et décanteur lamellaire. Et dans l'évaluation de prix, nous essayons de montrer l'impact de cette différence sur le coût.

## ouvrages de clarification utilisant des lamelles traitant 50 m<sup>3</sup>/h

Figure VIII-21 :  
Différence de dimensions des ouvrages d'un décanteur lamellaire et d'un décanteur simple



## ouvrages de clarification sans lamelles traitant 50 m<sup>3</sup>/h



### VIII.3.2 L'estimation du coût de construction

Les principales dépenses pour la construction de ces ouvrages de clarifications sont :

- Les travaux de génie civil
- Le prix des matériaux (installation des lamelles et des matériaux filtrants)

Pour les travaux de Génie Civil, les quantités de matériaux sont estimées à partir des dimensions calculées ci-dessus. Les prix unitaires sont des standards dans les constructions en béton armé.

*Tableau VIII-7 : Comparaison et estimation des devis d'un ouvrage de décantation avec et sans lamelles traitant un débit 50 [m<sup>3</sup>/h]*

DECANTEUR (50 m <sup>3</sup> /h)						
N° PRIX	DESIGNATION	UNITE	Quantité		PU	MONTANT
			sans lamelles	avec lamelles		sans lamelles      Avec lamelles
	<b>Terrassement</b>					
1	Fouille en déblais	m3	109	57	6600	719 400      376 200
2	Remblais provenant de déblais	m3	37	19	4500	166 500      85 500
3	Evacuation de terres excédentaires	m3	71	37	7200	511 200      266 400
	<b>Maçonnerie et béton</b>					
1	Béton de propreté dosé à 200kg	m3	4	2	482600	1 930 400      965 200
2	Réalisation du Béton dosé à 350kg	m3	50,2	26,5	664540	33 359 908      17 610 310
3	Armatures en acier haute adhérence	kg	5522	2915	5680	31 364 960      16 557 200
4	Coffrage en bois ordinaire	m <sup>2</sup>	559	295	19400	10 844 600      5 723 000
5	Echafaudage	m <sup>2</sup>	365	193	25000	9 125 000      4 825 000
6	Enduit étanche dosé à 400kg	m <sup>2</sup>	109	57	27000	2 943 000      1 539 000
7	Enduit ordinaire dosé à 350kg	m <sup>2</sup>	64	34	19500	1 248 000      663 000
8	Chape étanche dosé à 400kg	m <sup>2</sup>	21	11	35000	735 000      385 000
9	Chape ordinaire dosé à 400Kg	m <sup>2</sup>	31	16	27800	861 800      444 800
10	Garde-fou	ml	28	15	56000	1 568 000      840 000
11	Badigeonnage à la chaux	m <sup>2</sup>	64	34	1600	102 400      54 400
12	Peinture plastique	m <sup>2</sup>	64	34	4600	294 400      156 400
13	Peinture antirouille	m <sup>2</sup>	7	3	7200	50 400      21 600
14	Peinture à L'huile	m <sup>2</sup>	7	3	8000	56 000      24 000
15	Echelle métallique	ml	7	3	55000	385 000      165 000
	<b>Installation des lamelles</b>					
1	Polystyrène choc 2000*1200 [mm]	u	0	120	137100	0      16 452 000
2	Demi-buse diamètre 300	ml	0	6	25000	0      150 000
3	cornière galvanisée de 50x50x5	barres	0	4	110000	0      440 000
	<b>TOTAL DECANTEUR (Ar)</b>					<b>96 265 968      67 744 010</b>

Tableau VIII-8 : Devis estimatif de l'ouvrage de filtration traitant un débit 50 [m<sup>3</sup>/h]

FILTRES ET REGULATEUR (50 [m <sup>3</sup> /h])					
N° PRIX	DESIGNATION	UNITE	Quantité	PU	MONTANT
	<b>Terrassement</b>				
1	Fouille en déblais	m <sup>3</sup>	39	6 600	257 400
2	Remblais provenant des déblais	m <sup>3</sup>	9	4 500	40 500
3	Evacuation de terres excédentaires	m <sup>3</sup>	29	7 200	208 800
	<b>Maçonnerie et béton</b>				
4	Béton de propreté dosé à 200kg de	m <sup>3</sup>	1	482 600	482 600
5	Béton dosé à 350kg	m <sup>3</sup>	13	664 540	8 639 020
6	Armatures en acier haute adhérence	kg	1235,00	5 680	7 014 800
7	Coffrage en bois ordinaire	m <sup>2</sup>	62,00	19 400	1 202 800
8	Echafaudage	m <sup>2</sup>	43,00	25 000	1 075 000
9	sable	m <sup>3</sup>	3,00	22 000	66 000
10	Busulures de diamètre 40mm	u	322,00	30 000	9 660 000
11	Enduit étanche dosé à 500kg	m <sup>2</sup>	76,00	27 000	2 052 000
12	Enduit ordinaire dosé à 350kg	m <sup>2</sup>	69,00	19 500	1 345 500
13	Chape étanche dosé à 500kg	m <sup>2</sup>	26,00	35 000	910 000
14	Chape ordinaire dosé à 450kg	m <sup>2</sup>	10,00	27 800	278 000
15	Badigeonnage à la chaux	m <sup>2</sup>	69,00	1 600	110 400
16	Peinture plastique	m <sup>2</sup>	69,00	4 600	317 400
17	Echelle métallique	ml	1,00	55 000	55 000
18	Garde-fou	ml	11,00	7 200	79 200
19	Peinture antirouille	m <sup>2</sup>	2,00	7 200	14 400
20	Peinture à L'huile	m <sup>2</sup>	2,00	8 000	16 000
<b>TOTAL FILTRE ET REGULATEUR (Ar)</b>					<b>33 824 820</b>

D'après ces estimations, on tire les coûts suivants :

- Floculation / décantation lamellaire / filtration monocouche 101 568 830 [Ar]
- Floculation / décantation simple / filtration monocouche 130 090 788 [Ar]

On obtient ainsi un bénéfice de **28 521 958 [Ar]** en utilisant la décantation lamellaire pour traiter un débit de 50 [m<sup>3</sup>/h], soit un gain de **23%**. En conséquence, pour un débit de 100 [m<sup>3</sup>/h] le bénéfice sera le double, soit **75 034 916**.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

La recherche de solution adéquate aux problèmes de qualité fait l'un des préoccupations actuelles dans le traitement d'eau à Madagascar. L'application de la décantation lamellaire se postule comme la solution conforme car elle offre plusieurs avantages, à savoir :

- Principe simple mais offrant une performance élevé en qualité d'eau traité
- Gain de surface au sol et en volume de béton par rapport aux décanteurs sans lamelles donc gain financiers pour les nouvelles constructions
- Augmentation de performance en qualité et en débit des ouvrages existants

Ce mémoire abouti à deux résultats : (1) Les approches simplistes du modèle de Hazen permettent d'élaborer une note de **calcul de la décantation lamellaire** donnant le nombre, la forme, les dimensions des lamelles et la surface de décantation correspondant. (2) La mise en équation des phénomènes physiques permet de construire un modèle capable de simuler le comportement d'un système physique donnée. La résolution numérique de ces équations couplées avec des modèles géométriques permet de simuler une infinité de configuration géométrique, permettant ainsi d'optimiser notre système. Cette approche nous a permis de **concevoir les dimensions optimisées de la géométrie d'écoulement** tout en respectant les conditions imposées dans les calculs par le modèle de Hazen.

La méthode de conception proposée dans ce mémoire représente un énorme pas vers l'application de la décantation lamellaire à Madagascar. En effet, l'exploitation des avantages offerts par les modèles de simulation permet d'atteindre à une vitesse exceptionnelle un niveau de qualité assez satisfaisant pour le développement d'un produit. Après les travaux d'optimisation du fonctionnement hydraulique, la réalisation de l'ouvrage nécessite l'intervention des spécialistes en procédé pour la maîtrise de la floculation et des spécialiste en structure pour réalisation et la construction de l'ouvrage.

Pour les études à venir, nous proposons de s'orienter vers la construction des ouvrages métalliques amovibles. En effet, la construction métallique offre l'avantage de rapidité et facilité d'installation et offre beaucoup plus de possibilités de configuration géométrique par rapport aux ouvrages en béton.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] CANLER J. P. (C.E.M.A.G.R.E.F). *La décantation lamellaire des boues activées*, Documentation technique F.N.D.A.E N°18, 1994. 46p.
- [2] CARDOT C. *Les traitements de l'eau pour l'ingénieur*. Edition Ellipses, 2010. 302p.
- [3] CHAPERON P. - DANLOUX J. - FERRY L, *Fleuves et rivières de Madagascar*. ORSTOM 1993, édition IRD 2005, 882p.
- [4] CHEVALIER A., Expert à l'association française de normalisation (AFNOR). *Guide du dessinateur industriel*. HACHETTE technique, 2004. 338p.
- [5] COMSOL (2013), "CDF module, User's guide ". 654p.
- [6] COMSOL (2013), "Introduction to Comsol Multiphysics ®". 162p.
- [7] COMOLET R. *Mécanique expérimentale des fluides*. Masson 2<sup>e</sup> éd. 1976.
- [8] COX C. R. *Technique et contrôle du traitement des eaux*. Organisation mondiale de la santé série de monographie N°49, GENEVE 1967. 421p.
- [9] DEGREMONT. - *Mémento technique de l'eau*. Edition du Cinquantenaire 1989, Neuvième édition, 2 tomes. 1 426p.
- [10] FIGUE J-F., MORIN A. et AIRES N. *Simulations numériques des écoulements dans un décanteur lamellaire à contre-courant*. 2009. 14p.
- [11] LAVRENTIEV M. et CHABAT B. *Effet hydrodynamique et modèles mathématiques*. Edition MIR. Moscou, 1977. 363p.
- [12] LIPEME G. *Expérimentations et modélisations tridimensionnelles de l'hydrodynamique et de la séparation particulaire dans les déversoirs d'orage*. Thèse doctorat de l'Université Louis Pasteur – Strasbourg I, 2004. 274p.
- [13] RAMAMONJISOA Irène Vivianne. Antananarivo 1986 (15M86), *Aménagement d'un décantation existant : " essai sur l'application des lamelles "*. Mémoire de fin d'étude DH-ESPA, 83p.
- [14] RODIER J. *L'Analyse de l'Eau* 9<sup>e</sup> édition. © Dunod Paris, 2009. 1 578p.
- [15] VAZQUEZ J., MORIN A., DUFRESNE M. et WERTEL J. « Optimisation de la forme des décanteurs lamellaires par la modélisation hydrodynamique 3D ». NOVATECH, 2010. 10p.

[16] VERSTEEG H. K., MALALASEKERA W. *An introduction to computational fluid dynamics, the finite volume method*, Prentice Hall, 1995. 257 p.

Références de cours :

[17] RAFALIMANANA Mampitony, Cours *mécanique des fluides*, hydraulique 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> année ESPA

[18] RAFALIMANANA Mampitony, Cours *transfert de chaleur et de masse*, hydraulique 4<sup>ème</sup> année ESPA

[19] RAMANTSOA Benjamen, Cours *Station et traitement d'eau potable*, hydraulique 5<sup>ème</sup> année, ESPA

[20] RAMANARIVO Solofomampionona, Cours *mécanique des fluides II*, hydraulique 4<sup>ème</sup> année, ESPA

[21] RANDRIANASOLO David, Cours *hydraulique urbaine*, hydraulique 4<sup>ème</sup> année, ESPA.

## ANNEXES

<b>ANNEXE – I Normes malgaches de potabilité (Décret n°2004-635 du 15/06/04):.....</b>	<b>I</b>
<b>ANNEXE – II Dimensions des ouvrages de clarification de la station Sabotsy Namehana .....</b>	<b>III</b>
<b>ANNEXE – III QUELQUES DÉFINITIONS DANS « le Petit Larousse 1993 » .....</b>	<b>IV</b>
<b>ANNEXE – IV LES DIFFERENTS TYPES DE DECANTEURS.....</b>	<b>IV</b>
<b>ANNEXE – V Modèle semi-empirique, théorie de Kynch de la décantation en piston des particules floculées.</b>	<b>XI</b>
<b>ANNEXE – VI Simplification des modèles d'écoulements .....</b>	<b>XV</b>
<b>ANNEXE – VII Méthode de résolution par la méthode des différences finis, éléments finis, volumes finis.....</b>	<b>XVII</b>
<b>ANNEXE – VIII Conditions initiales et conditions aux limites .....</b>	<b>XVIII</b>
<b>ANNEXE – IX Consommation eau mensuel de Tana en [m3] .....</b>	<b>XXI</b>
<b>ANNEXE – X Suivi d'analyse physico-chimique de l'eau brute du lac Mandroseza.....</b>	<b>XXII</b>
<b>ANNEXE – XI Caractéristiques eau Sabotsy Namehana 2014 – 2015.....</b>	<b>XXIV</b>
<b>ANNEXE – XII Résultats d'essai de flocculation de l'eau brute Sabotsy Namehana .....</b>	<b>XXIV</b>
<b>ANNEXE – XIII Résultats d'essai de flocculation eau brute Mandroseza .....</b>	<b>XXV</b>

**ANNEXE - I Normes malgaches de potabilité (Décret n°2004-635 du 15/06/04):**

PARAMETRES ORGANOLEPTIQUES	NORME	
ODEUR	ABSENCE	
COULEUR	INCOLORE	
SAVEUR DESAGREABLE	ABSENCE	

PARAMETRES PHYSIQUES	UNITE	NORME
TEMPERATURE	°C	<25
TURBIDITE	NTU	<5
CONDUCTIVITE	µS/cm	<3000
pH		6,5 - 9,0

PARAMETRES CHIMIQUES	UNITE	NORME	
		MAXIMA	ADMISSIBLE
		MINIMA	

ELEMENTS NORMAUX

CALCIUM	mg/l		200
MAGNESIUM	mg/l		50
CHLORURE	mg/l		250
SULFATE	mg/l		250

OXYGENE DISSOUS % de saturation	%	75	
DURETE TH	mg/l en CaCO <sub>3</sub>		500

ELEMENTS INDESIRABLES

MATIERES ORGANIQUES	mg/l		2 (milieu Alcalin)
			5 (milieu Acide)
AMMONIUM	mg/l		0,5
NITRITE	mg/l		0,1
AZOTE TOTAL	mg/l		2
MANGANESE	mg/l		0,05
FER TOTAL	mg/l		0,5
PHOSPHORE	mg/l		5
ZINC	mg/l		5
ARGENT	mg/l		0,01
CUIVRE	mg/l		1
ALUMINIUM	mg/l		0,2
NITRATE	mg/l		50
FLUORE	mg/l		1,5
BARYUM	mg/l		1

ELEMENTS TOXIQUES

ARSENIC	mg/l		0,05
CHROME TOTAL	mg/l		0,05
CYANURE	mg/l		0,05
PLOMB	mg/l		0,05
NICKEL	mg/l		0,05
POLYCHLORO-BIPHENYL PCB	mg/l		0
CADMIUM	mg/l		0,005
MERCURE	mg/l		0,001

GERMES PATHOGENES ET INDICATEURS DE POLLUTIONS FÉCALE:

COLIFORMES TOTAUX	0 / 100ml
STREPTOCOQUES FÉCAUX	0 / 100ml
COLIFORMES THERMO-TOLERANTS (E.COLI)	0 / 100ml
CLOSTRIDIUM SULFITO-REDUCTEUR	<2 / 20ml

## ANNEXE - II Dimensions des ouvrages de clarification de la station Sabotsy Namehana

### 1) Floculateur :

- Type : floculateur statique, à l'opposé des floculateurs à hélices, l'écoulement du fluide à traiter subisse des changements brusques de direction. Les pertes de charge résultantes fournissent l'énergie nécessaire à la flocculation.
- Dimensions :
  - Nombre de compartiment : trois
  - Longueur : 0,75 [m]
  - Largeur : 2 [m]
  - Hauteur : 4,5 [m]

### 2) Décanleur :

- Type : décanleur rectangulaire statique à flux horizontal
- Dimensions :
  - Longueur : 6[m]
  - Largeur : 2 [m]
  - Hauteur : 4,5[m]
  - Surface de décantation : 12 [m<sup>2</sup>]
- Evacuation des boues : les boues, plus ou moins lourdes, qui se sont rassemblées lors de la décantation se déposent sur le fond de l'ouvrage. Le fond possède une légère inclinaison vers l'alimentation permettant une concentration des boues pour un éventuel purge.

### 3) Filtre :

Le type de filtre adopté actuellement est le filtre bicouche à sable et anthracite. Ce type de filtre fonctionne à une vitesse de filtration nominal de 8 [m/h] mais capable de fonctionner à une vitesse maximale de filtration 10 [m/h].

#### i. Dimension d'une cellule filtrante :

- Filtre carré de côté 3,5 [m]
- Hauteur :
- Surface de filtration : 12,25 [m<sup>2</sup>]

#### ii. Caractéristique des matériaux filtrants

- Couche supérieure :
  - Nature : Anthracite
  - Granulométrie : 1,4 – 2,5 [mm]
  - Taille effective : 1,5 [mm]
  - Porosité : environ 48,5 %
  - Densité 1,65
  - Hauteur de la couche : 0,45 [m]
- Couche inférieure :
  - Nature : Sable
  - Granulométrie : 0,8 – 1,2 [mm]
  - Taille effective ; 0,82 [mm]
  - Densité : supérieure à 2,4
  - Hauteur : 0,25 [m]
- Couche de gravier support :
  - Nature : Sable
  - Granulométrie : 3 – 5 [mm]
  - Hauteur de la couche : 0,05 [m]

### ANNEXE - III    QUELQUES DÉFINITIONS DANS « le Petit Larousse 1993 »

**Concept** : Représentation intellectuelle d'un objet conçu par l'esprit.

**Conception** : Action d'élaborer quelque chose dans son esprit ; résultat de cette action.

**Conception Assisté par Ordinateur (CAO)** : Ensemble des techniques informatiques utilisées pour la conception d'un produit nouveau.

**Conceptisme** : Dans la littérature Espagnol, style caractérisé par un excès de recherche, de raffinement dans le jeu des idées.

**Modèle** : Structure formalisé utilisé pour rendre compte d'un ensemble de phénomènes qui possèdent entre eux certaines relations.

**Modèles mathématiques** : Représentation mathématique d'un phénomène physique, économique, humain, ... réalisé afin de pouvoir mieux étudier celui-ci.

**Simulacre** : (du latin simulacrum, représentation figuré) ce qui n'a que l'apparence de ce qu'il prétend être.

**Simulateur** : Dispositif Capable de reproduire le comportement d'un appareil dont on désire soit étudier le fonctionnement, soit enseigner l'utilisation, ou d'un corps dont on veut suivre l'évolution.

**Simulation** : Méthode de mesure et d'étude consistant à remplacer un phénomène, un système à étudier par un modèle plus simple mais ayant un comportement analogue.

### ANNEXE - IV    LES DIFFERENTS TYPES DE DECANTEURS

La séparation par décantation peut être réalisée de façon discontinue ou continue. Les procédés discontinus, ou décantation par cuvée, ne sont mis en œuvre que dans des petites installations de fortune ou dans des stations biologiques à cuvettes programmées, dans lesquelles les phases d'aération et de décantation sont réalisées dans une même enceinte ("séquence batch reactor"). Dans le cas le plus général, le procédé de décantation est continu il est mis en œuvre dans des décanteurs.

#### 1) Décanteurs statiques

L'usage a consacré le terme "statique" pour désigner les décanteurs qui ne sont ni à circulation de boues ni à lit de boues, bien que, dans ces appareils, la décantation s'effectue en fait selon un processus dynamique.

Selon la quantité et la nature des MES de l'eau brute, le volume des précipités à évacuer et la pente du fond de l'ouvrage, le décanteur peut être équipé ou non d'un système de raclage des boues.

On retrouve :

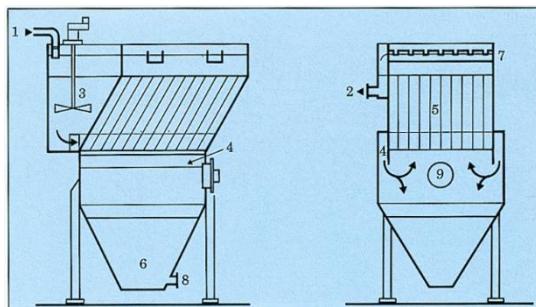
- Les décanteurs simples
- Les SÉDIPAC
- Et les décanteurs à succion des boues

#### ➤ Les décanteurs simples

Ce type regroupe les décanteurs circulaire et rectangulaire avec ou sans raclage simple sans recirculation ni contact de boue. Pour les détails concernant ces variantes, il est nécessaire de consulter la référence bibliographique « Mémento technique de l'eau » de DEGREMONT.

## ➤ Les SÉDIPAC

Le SÉDIPAC est un appareil combiné qui réunit dans une même enceinte, une zone de coagulation flocculation (3), et une zone de décantation lamellaire.



1-Entrée d'eau brute. 4 - Canal de répartition d'eau flokulée 8-Extraction des boues.  
2-Sortie d'eau décantée. 5-Décantation lamellaire 9 - Tampon de visite  
3-Flocculation. 6 - Concentration des boues  
7-Reprise d'eau décantée.

Le transfert de l'eau flokulée entre ces deux zones est assuré par des canaux (4) placés de part et d'autre de la zone de décantation lamellaire, qui répartissent le débit d'eau à décantner dans les chambres de tranquillisation localisées sous les canaux. Le liquide pénètre ensuite transversalement sous les modules lamellaires (5).

La majeure partie des boues décante alors sur le fond (6) de l'appareil, alors que la séparation du floc résiduel s'effectue dans les modules lamellaires. L'eau clarifiée, récupérée en surface dans des goulottes (7), est évacuée par le canal (2). Un tampon de visite (9) est prévu.

Les modules lamellaires, inclinés à 60° sur l'horizontale, sont en polystyrène "choc". Ils sont constitués de tubes à section hexagonale; le diamètre hydraulique est de 80 mm, et la longueur de 1500 mm. L'importance de la section transversale de ces tubes permet de minimiser le risque de bouchage en présence de graisse et particules fibreuses

Modules hexagonaux			
Diamètre hydraulique mm	80	50	
Écartement entre plaques mm	80	50	
Angle d'inclinaison	60°	60°	
Longueur m	0,75	1,5	0,75 1,5
Surface projetée m <sup>2</sup> module/m <sup>2</sup> de décanteur	5,4	10,8	8,7 17,4

La forme hexagonale présente les avantages suivants:

- une ouverture maximale pour une performance hydraulique et une longueur de module données.
- une absence de flexion sous le poids des boues, à la différence des modules lamellaires à plaques.

Les SÉDIPAC sont surtout utilisés pour traiter des eaux résiduaires industrielles ou urbaines, dont le temps de flocculation est de 5 à 10 minutes.

## ➤ Les décanteurs à succion des boues

Les décanteurs raclés à succion des boues sont essentiellement utilisés dans la clarification des boues activées. Leur différence essentielle avec les décanteurs utilisés à seule fin de séparation est de permettre un recyclage très important des boues sédimentées (de 50 à 100 %, du débit traité, voire plus).

Pour éviter les perturbations hydrauliques liées au transfert et à la reprise en un point d'un grand débit de boue, tout en assurant la recirculation rapide de celle-ci, il est préférable de multiplier les points de soutirage.

La technique des décanteurs à succion, qui associe à chaque élément racleur un tube suceur, répond à cet objectif. Elle peut être appliquée aussi bien à des décanteurs circulaires que rectangulaires

et de nombreux modes de mise en œuvre sont possibles.

## 2) Décanteurs à contact de boue

Les décanteurs à contact de boue regroupent deux types :

### ➤ DÉCANTEUR A LIT DE BOUE

Dans ce type de décanteur, les boues formées par la floculation constituent une masse en expansion à travers laquelle l'eau passe de bas en haut, de manière régulière et uniforme. L'eau brute à traiter est introduite à la base du lit de boues par un système de répartition qui provoque un brassage continu. L'eau flocule en passant à travers le "lit filtrant" que constituent les boues et ressort clarifiée à la partie supérieure du décanteur.

Si on introduit l'eau à la base du lit de boues de façon continue, on constate qu'au bout d'un certain temps la boue ne reste pas en suspension dans le liquide. Elle se tasse au contraire progressivement dans certaines zones et, finalement, on observe **une masse compacte de boue tassée**, au sein de laquelle l'eau s'est créé des passages préférentiels. Dans ces conditions, il n'y a plus de contact efficace entre l'eau qui traverse le lit de boues et les boues qui le constituent.

Par contre, si on effectue l'admission d'eau **d'une manière intermittente**, en introduisant l'eau avec un fort débit pendant un instant très court, suivi d'une période de repos prolongé, on constate que **la masse de boue se maintient en suspension régulière**. Toute la boue se trouve entraînée vers le haut pendant l'introduction de l'eau, mais ensuite, pendant la période de repos qui succède, elle décante d'une manière régulière comme elle le ferait dans une éprouvette d'eau boueuse maintenue au repos absolu. On aboutit ainsi à l'obtention d'une masse de boues homogène en tous ses points.

On peut réaliser une telle expérience, en éprouvette, en laboratoire, et mesurer ainsi la vitesse ascensionnelle limite à laquelle on peut soumettre un lit de boue c'est la mesure du coefficient de cohésion de la boue. Cette vitesse ascensionnelle limite dépend de nombreux facteurs : nature de l'eau à traiter, taux de traitement en coagulant, en adjuvant de flocculation, température, etc.

Les plus utilisées des décanteurs à lit de boue sont la famille des PULSATORE.

### ▪ Le décanteur PULSATORE

C'est le décanteur le plus répandu dans le monde : plus d'un million de mètres cubes d'eau est traité chaque heure, dans des décanteurs PULSATORE. C'est un décanteur à lit de boues simple, d'une grande fiabilité, souple d'emploi, facilement adaptable à des bassins existants pour en augmenter la capacité de traitement.

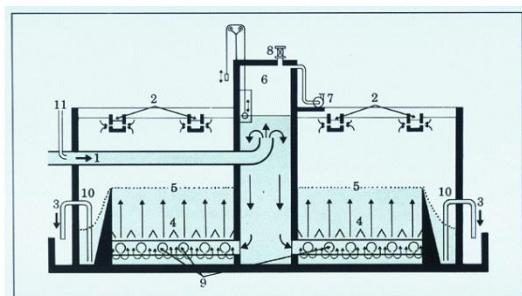
Généralement utilisé en clarification des eaux, il permet d'atteindre des vitesses ascensionnelles comprises entre 2 et 4 m/h, voire plus dans des cas exceptionnels, suivant la valeur du coefficient de cohésion de la boue.

Le décanteur est constitué par un bassin à fond plat, muni à sa base d'une série de tuyaux perforés (9) permettant d'introduire l'eau brute uniformément sur tout le fond du décanteur. À la partie supérieure, une série de tuyaux perforés ou de goulottes (2) permet une reprise uniforme de l'eau décantée en évitant toute irrégularité de vitesse dans les différentes parties de l'appareil.

Pour alimenter le collecteur inférieur d'une manière discontinue, différents moyens peuvent être employés. Ils se ramènent tous à stocker pendant un certain temps un certain volume d'eau

brute qu'on fait ensuite pénétrer rapidement dans l'appareil.

Le procédé le plus économique pour effectuer cette opération consiste à introduire l'eau brute dans une cloche (6) à l'intérieur de laquelle on aspire l'air à l'aide d'une machine aspiratrice (7) déplaçant un débit d'air sensiblement égal à la moitié du débit maximal d'eau à traiter. Cette cloche est mise en communication avec le collecteur inférieur du décanteur.



- 1 - Arrivée d'eau brute.
- 2 - Sortie d'eau décantée.
- 3 - Extraction des boues.
- 4 - Tranquillisateurs.
- 5 - Niveau supérieur du lit de boues.
- 6 - Cloche à vide.
- 7 - Pompe à vide.
- 8 - Vanne automatique casse-vide.
- 9 - Tuyaux perforés de répartition d'eau brute.
- 10 - Concentrateurs des boues.
- 11 - Introduction des réactifs.

Dans ces conditions, le niveau de l'eau brute monte progressivement dans la cloche. Lorsqu'il a atteint une valeur comprise entre 0,60 m et 1,00 m au-dessus du niveau de l'eau dans le décanteur, un relais électrique commande l'ouverture brusque d'une vanne (8) de mise en communication de la cloche avec l'atmosphère. La pression atmosphérique s'applique donc immédiatement sur l'eau stockée dans la cloche, qui pénètre dans le décanteur avec une grande vitesse.

Ces appareils sont généralement réglés de telle sorte que la vidange de la cloche dans le décanteur s'effectue en 5 à 20 secondes, alors que le remplissage de cette cloche dure de 20 à 40 secondes.

L'aspiration dans la cloche s'effectue à l'aide d'un ventilateur ou d'un surpresseur

fonctionnant en pompe à vide. Les ouvertures et les fermetures de la vanne de mise en communication avec l'atmosphère sont commandées en fonction des niveaux de l'eau contenue dans la cloche.

Le collecteur général, situé à la partie inférieure du décanteur, possède une très grande section, afin de réduire sa perte de charge. Les orifices disposés sur ses ramifications sont calculés de telle sorte qu'il se constitue, dans la moitié inférieure du décanteur, un lit de boues homogène. Ce lit est animé de mouvements alternatifs verticaux et tend à augmenter de volume du fait des impuretés apportées par l'eau brute et des réactifs introduits : son niveau monte régulièrement. Une certaine zone du décanteur est réservée pour former les fosses à fond incliné (10) dans lesquelles la boue en excès se déverse et se concentre. On effectue les purges d'une manière intermittente, par les conduites (3). Un avantage important du dispositif est que, si l'on effectue une purge trop importante de boue, on observe une perte d'eau sans que le lit de boues en soit affecté : la qualité de fonctionnement en reste inaltérée.

L'appareil ne comporte aucun système de brassage mécanique des boues susceptible de briser les flocons déjà formés.

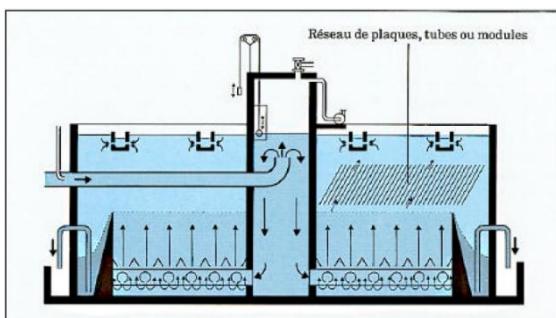
Du fait de la haute concentration du lit de boues et de son rôle tampon, un mauvais ajustage du taux de traitement, une variation du pH de l'eau brute, n'ont pas de conséquence néfaste immédiate: on constate une variation lente de la turbidité de l'eau décantée, mais sans qu'il se produise de départ massif des boues contenues dans le décanteur.

Il est facile de réaliser un décanteur PULSATOR dans une cuve existante, ancien filtre ou réservoir. Ceci permet de moderniser d'anciennes

installations et de multiplier leur débit par 2 ou 3. Une telle transformation a été faite par exemple à Buenos-Aires, Argentine : 1 300 000 m<sup>3</sup>/j à Alexandrie, Egypte : 240 000 m<sup>3</sup>/j

#### ■ Le décanteur Pulsator Lamellaire ou PULSATUBE

La mise en place, au-dessus du lit de boues du PULSATATOR, de modules DEGRÉMONT, permet soit d'améliorer la qualité de l'eau produite, à vitesse de décantation égale, dans un appareil classique, soit d'accroître cette vitesse qui est alors généralement comprise entre 4 et 8 m/h

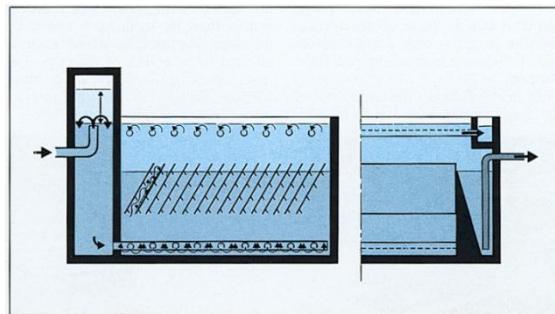


Dans ce dernier cas, il convient toutefois d'apporter une attention particulière au système de répartition de l'eau brute et au système de reprise de l'eau décantée. Une augmentation du débit traité provoque, en effet, une modification du régime hydraulique au travers de ces systèmes.

Les particules de floc ayant échappé au lit de boues se déposent sur les parois inférieures des modules et s'y accumulent en une légère couche jusqu'à ce que leur cohésion leur permette de glisser et de redescendre dans le lit de boues.

#### ■ SUPERPULSATATOR

Le SUPERPULSATATOR est un appareil à lit de boues dérivé du PULSATATOR. C'est un appareil très compact, économique.



Le SUPERPULSATATOR combine les avantages respectifs de la décantation à contact de boues, de la pulsation d'un lit de boues et de la densification de la boue par l'effet de la décantation lamellaire. Il possède plusieurs points communs avec le PULSATATOR dont il accroît les possibilités. C'est ainsi qu'il en conserve le principe d'alimentation en eau brute et de répartition à la base de l'appareil.

Le mélange "eau coagulée boues déjà floclées" s'élève verticalement en filets parallèles, à travers la zone profonde située entre les tuyaux inférieurs de distribution et les plaques inclinées qui sont ainsi alimentées de façon uniforme. Les "tranquillisateurs" utilisés dans le PULSATATOR, peuvent être supprimés ici.

L'eau floclée, parfaitement équirépartie par le réseau de distribution, pénètre ensuite dans le réseau de plaques parallèles inclinées à 60 ° sur l'horizontale et perpendiculaires au concentrateur. La face inférieure de chaque plaque est équipée de déflecteurs qui servent à la fois de supports et d'organes créateurs de mouvements de brassage favorisant la flocculation. Les plaques à déflecteurs permettent de maintenir dans le lit de boues une concentration élevée, deux fois supérieure à celle d'un PULSATATOR fonctionnant à la même vitesse (figure ci-dessous).



Cette forte concentration du lit de boues permet au SUPERPULSATORE de jouer le rôle d'un véritable filtre à impuretés, avantage majeur des décanteurs à lit de boues concentrées, de grande hauteur.

Comme dans le PULSATORE, le niveau supérieur du lit de boues est limité par son déversement dans la zone du concentrateur où ne s'exerce aucune poussée due à la vitesse ascensionnelle. La reprise d'eau décantée est réalisée par un réseau de collecteurs. La souplesse de fonctionnement du SUPERPULSATORE lui permet un démarrage très rapide. Les vitesses ascensionnelles adoptées en clarification varient entre 4 et 8 m/h.

### ➤ Décanteur à recirculation de boue

Dans ce type d'appareil, les boues sont séparées de l'eau clarifiée dans une zone de décantation. Elles sont ensuite recyclées vers une zone de mélange munie d'une agitation mécanique (ACCELERATOR, TURBOCIRCULATOR, CLARICONTACT) ou hydraulique (CIRCULATOR). L'eau brute, additionnée des réactifs, est introduite dans cette même zone de mélange.

### ■ Décanteur

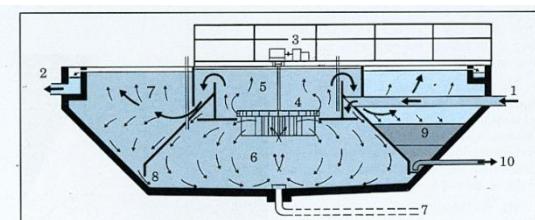
#### ACCELERATOR

Le décanteur ACCELERATOR comporte une zone centrale de réaction entourée d'une zone de décantation. Ces deux zones communiquent par le haut et par le bas.

Une turbine, située à la partie supérieure de la zone de réaction, fait circuler l'eau vers la zone de décantation. Les boues qui se déposent dans cette dernière reviennent par circulation induite dans la zone centrale. L'enrichissement en boue qui en résulte permet une flocculation rapide et la formation d'un précipité dense.

Éventuellement, un agitateur de fond assure un mélange de l'eau brute avec la boue et les réactifs. Il évite en outre (accumulation des dépôts lourds susceptibles de boucher l'appareil). Une ou plusieurs fosses à boues permettent d'extraire les boues en excès, sous une forme aussi concentrée que possible.

L'ACCELERATOR IS est une variante de l'ACCELERATOR comportant un racleur à la partie inférieure de l'appareil. Ce racleur permet un épaississement des boues qui sont dirigées vers les fosses à boues, situées au niveau du radier, d'où elles sont extraites.

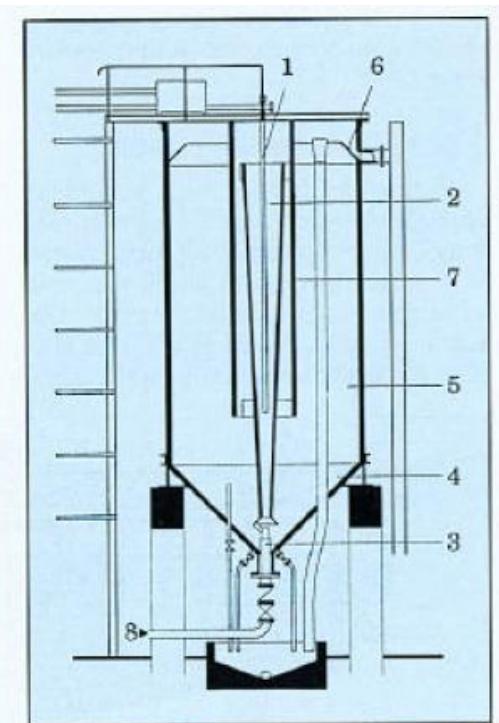


1 - Arrivée d'eau brute. 2 - Départ d'eau traitée. 3 - Groupe d'entraînement 4 - Turbine. 5 - Zone de mélange primaire. 6 - Zone de mélange secondaire. 7 - Eau clarifiée. 8 - Recirculation des boues. 9 - Concentrateur de boues. 10 - Boues en excès.

## ■ Décanteurs CIRCULATOR

Le CIRCULATOR est un appareil très simple qui s'adapte parfaitement aux installations moyennes avec de petits diamètres.

Ce type de décanteur comporte un dispositif hydraulique particulièrement étudié assurant l'accélération des réactions par recirculation méthodique des précipités formés avec les réactifs et l'eau à traiter. Il est aussi couramment employé quand on désire obtenir une flocculation et une décantation accélérée sous pression.



1 - Réactifs. 2 - Zone de réaction. 3 - Hydro-ejecteur. 4 - Concentration des boues.  
5 - Zone de décantation. 6 - Collecteur d'eau décantée. 7 - Jupe déflectrice. 8 - Entrée d'eau brute.

L'appareil comporte un fond conique pour aider le glissement des boues vers l'éjecteur qui assure la recirculation. Il n'est équipé d'aucun organe mécanique.

Le CIRCULATOR peut normalement clarifier ou adoucir une eau avec un temps de rétention compris

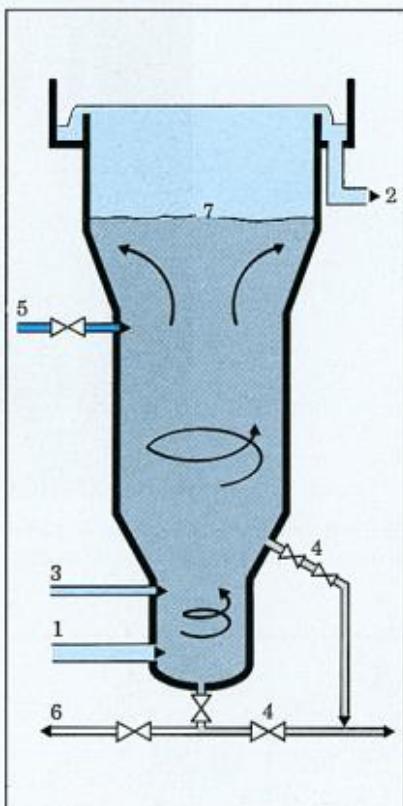
entre 45 min et 2 h selon les cas; la vitesse ascensionnelle de l'eau ne doit pas dépasser 2,5 m/h en clarification et 5 à 7 m/h en adoucissement.

## ➤ DÉCANTEUR A MASSE DE CONTACT GRANULAIRE LE GYRAZUR

La différence essentielle avec les appareils de précipitation à contact de boue réside dans l'utilisation de germes de plus grande dimension. Alors que dans les appareils précédents la taille des cristaux élémentaires de carbonate de calcium est de l'ordre de 1/100e de mm, on utilise ici une masse dite "catalysant", constituée généralement de grains de sable de dimension initiale comprise entre 0,2 et 0,4 mm, contenue dans un appareil de forme conique. Le carbonate de calcium précipite en cristallisant à la surface des grains entre lesquels la percolation ascendante de l'eau s'effectue à grande vitesse. La grande quantité de grains assure une réaction rapide et complète.

Ces appareils présentent trois avantages

- faible encombrement,
- possibilité de fonctionner sous pression; en les combinant avec des filtres fermés, ils permettent de décarbonater une eau sans rupture de la charge hydraulique,
- obtention, au lieu de boues, de billes de l'ordre de 1 à 2 mm de diamètre, s'essorant très rapidement.



- 1 - Entrée d'eau à traiter.  
 2 - Sortie des eaux traitées.  
 3 - Injection de réactif  
 4 - Évacuation de la masse catalysante.  
 5 - Introduction des germes fins.  
 6 - Vidange.  
 7 - Niveau supérieur de la masse catalysante.

## ANNEXE - V Modèle semi-empirique, théorie de Kynch (1952) de la décantation en piston des particules floculées

Quand l'eau à traiter est fortement chargé en matière en suspension, la décantation se fait en piston :

- Les phénomènes de décantation sont indépendantes des caractéristiques individuelles des particules

- Le Processus de décantation s'effectuant comme si des liaisons existaient entre les particules : mouvement d'ensemble de type piston

Ce phénomène est caractéristique des boues activées et des suspensions chimiques flokulées quand leur concentration est supérieure à environ 500 mg/L.

### VIII.3.2.1 Observation visuelle

Quand on réalise une décantation en piston dans un tube de hauteur et de diamètre suffisants (au minimum une éprouvette de un litre), on observe généralement l'apparition de quatre zones

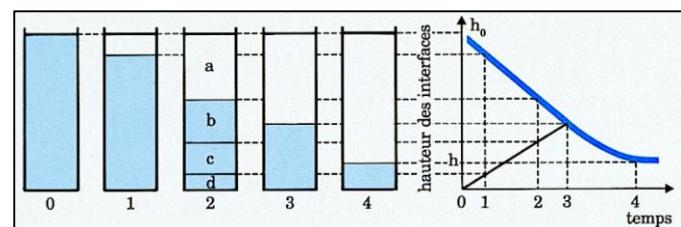


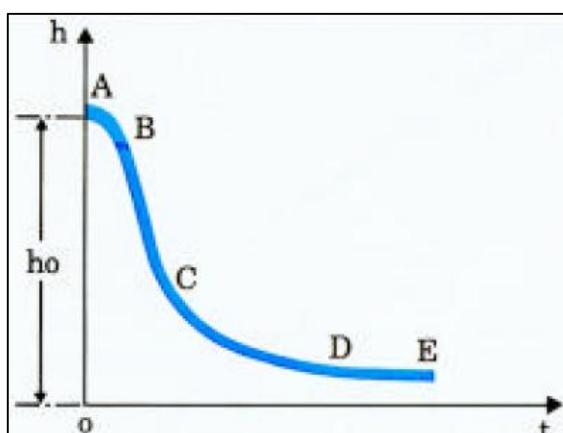
Schéma représentatif de la décantation en piston

- a : Zone de clarification où le liquide est clair.
- b : Zone de suspension homogène de même aspect que la solution de départ avec une interface a-b nette.
- c : Zone de transition (pas toujours observable).
- d : Zone d'épaisseissement des boues dont le niveau augmente rapidement avant de diminuer lentement.

A partir d'un certain état, les zones b et c disparaissent, c'est le point critique. L'évolution de la hauteur de l'interface a-b, puis a-d en fonction du temps, constitue la **courbe de Kynch**.

### 1) Courbe de Kynch

- De A à B, la surface de séparation est plus ou moins nette: c'est la phase de coalescence des flocons. Cette phase est parfois inexiste.
- De B à C, une partie rectiligne qui traduit une vitesse de chute constante  $V_0$  (pente de la droite).  $V_0$  est fonction, pour un tube de dimensions données, de la concentration initiale en MES et des caractéristiques de flocculation de la suspension. Lorsque, la concentration initiale  $C_0$  augmente, la vitesse de décantation  $V_0$  de la masse diminue: par exemple, pour une boue activée urbaine dont la concentration en MES passe de 1 à 4 g/l,  $V_0$  varie de 6 à 1,8 m/h.
- Le tronçon CD, concave vers le haut, correspond à un ralentissement progressif de la vitesse de chute de la couche supérieure du dépôt.
- A partir de D, les flocons se touchent en exerçant une compression sur les couches inférieures.



*Courbe de KYNCH*

La théorie de Kynch s'applique aux tronçons BC et CD qui couvrent le domaine essentiel de la décantation des boues activées.

La modélisation de la sédimentation est due à Kynch (1952) qui propose la théorie suivante : la vitesse de chute de particules rigides en sédimentation libre ne dépend que de la concentration locale en solide de la suspension. Elle est une fonction décroissante de la concentration en solide. Les particules de même dimension, de même forme et de même masse volumique sont équitombantes et leur concentration est uniforme pour chaque niveau de la colonne de sédimentation.

### 2) Interprétation

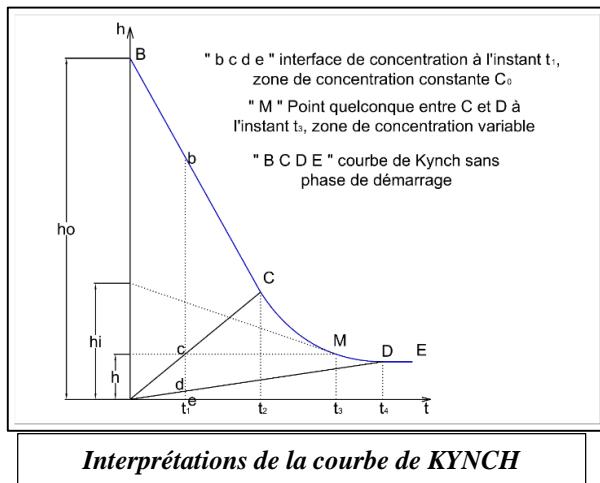
Si l'on considère une suspension dont la décantation ne comporte pas de phase de coalescence le calcul montre que :

- dans le triangle BOC, la concentration et la vitesse de chute sont constantes et égales aux valeurs initiales régnant en B,
- dans le triangle COD, les courbes d'équiconcentration sont des droites passant par l'origine, ce qui signifie que, dès les premiers moments de la décantation, les couches les plus voisines du fond sont amenées à passer par toutes les concentrations comprises entre la concentration initiale et celle correspondant au point D, début de la compression.

Le milieu boueux de hauteur  $e-b$ , à l'instant  $t_1$  présente donc trois zones distinctes

- une zone supérieure b-c où la concentration et la vitesse de chute sont uniformes et ont gardé leurs valeurs initiales  $C_0$  et  $V_0$ ,
- une zone intermédiaire cd dans laquelle la concentration augmente progressivement

- de c en d et la vitesse de chute diminue en conséquence,
- une zone inférieure de où les flocons de boues se touchent et sont soumis à la compression.



Dans le milieu considéré au temps  $t_2$  la zone supérieure disparaît, et au temps  $t_4$  la zone inférieure seule subsiste.

Pour le point M de la partie CD, deux concentrations peuvent être définies :

- $C_M^i$  : concentration à l'interface
- $C_M$  : concentration moyenne

D'après l'hypothèse de Kynch

$$C_M^i = C_0 \frac{h_0}{h_i}$$

$$\text{Par ailleurs : } C_m = C_0 \frac{h_0}{h}$$

Les trois parties BC, CD et DE de la courbe de Kynch trouvent leur application dans le calcul des ouvrages en sédimentation freinée. La phase BC correspond au domaine des décanteurs à contact de boue. La phase CD est relative aux ouvrages dans

lesquels une concentration de la boue est recherchée (appareils à recirculation de boues épaissees).

La phase DE est exploitée pour l'épaississement de boues.

### 3) Indices de Mohlman (Sludge VolumeIndex: SVI)

Un point particulier est considéré sur la courbe de Kynch, celui d'abscisse 30 minutes : l'indice de Mohlman  $I_M$  destiné principalement à la caractérisation des boues biologiques.

$$I = \frac{V}{M}$$

V : Volume de boue après 30 min de décantation (cm<sup>3</sup>).

M : MES présentes dans ce volume (g).

Pour une même boue, l'indice de Mohlman dépend en partie des caractéristiques géométriques de l'éprouvette d'essai, mais surtout de la concentration initiale de la boue.

C'est pourquoi, il est recommandé si nécessaire de diluer au préalable la boue avec de l'eau épurée pour que le volume final soit voisin de 250 ml (dans une éprouvette de un litre). Le maintien d'une lente agitation pendant l'essai est prévu dans certains protocoles mais son intérêt est aléatoire. Les boues activées de bonne décantabilité possèdent des indices de Mohlman de 50 à 100 cm<sup>3</sup>/g.

### 4) Influence du flux massique dans le calcul des décanteurs

Dans le cas de la décantation freinée des particules floculées où les phénomènes d'épaississement interviennent, le flux massique est généralement déterminant pour le calcul de la surface de décantation.

Soit un décanteur de section S alimenté par un débit d'entrée  $Q_E$  avec la concentration en MES  $C_E$ ; les boues sont soutirées à sa partie inférieure à un débit  $Q_s$  avec la concentration  $C_s$ . En l'absence de réactions chimiques ou biologiques influençant les concentrations en MES, et en considérant un rendement d'élimination de 100 %, on a :

- Débit traité :  $Q = Q_E - Q_s$
- Bilan matières :  $Q_s C_s = Q_E C_E$
- En flux massique :  $\frac{Q_s C_s}{S} = \frac{Q_E C_E}{S}$

Le flux massique décantable est donné par la courbe de Kynch. A un niveau quelconque de la hauteur de la couche boueuse, la concentration est  $C_i$ , la vitesse  $V_i$  de décantation est donnée par la tangente à ce point. Le flux correspondant est  $F_i = C_i V_i$ . A ce flux  $F_i$ , il faut ajouter le flux de soutirage  $F_s$  donné par  $C_i V_s$ , avec  $V_s = Q_s/S$ .

Dans un décanteur en marche continue, la vitesse de décantation des solides est augmentée de la vitesse  $V_s$ , du fluide soutiré. A un niveau quelconque i de la phase boueuse cylindrique où la concentration est  $C_i$  et la vitesse de décantation propre des particules est  $V_i$ , le flux massique total est  $F = C_i V_i + C_i V_s$

La figure suivant indique l'évolution de ces différents flux. Il existe à un certain niveau L une concentration critique  $C_L$  qui impose une section maximale  $S_m$  pour qu'il ne se forme pas de goulot et que les conditions d'évacuation de la boue décantée soient satisfaisantes. Le flux F présente un minimum  $F_L$ , associé à la concentration critique  $C_L$ , imposant une section minimale  $S_m$  pour le décanteur telle que :

$$S_m = \frac{Q_E C_E}{F_L}$$

Ce point particulier "L" peut être déterminé directement sur la courbe de flux massique par :

$$\left( \frac{dF}{dC_i} \right)_L = \left( \frac{dF_i}{dC_i} \right)_L + V_s = 0$$

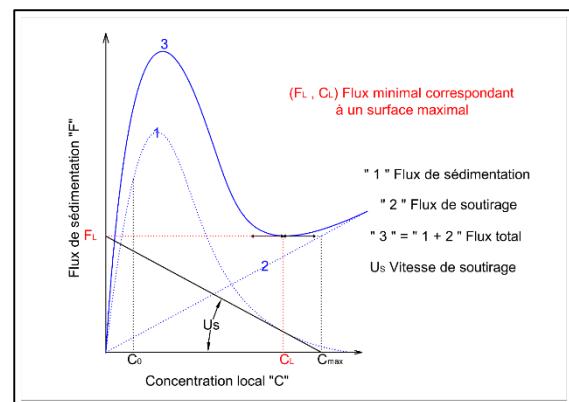
Le point L est donc le point de la courbe de flux  $F_i$  où la tangente est égale en valeur absolue à la vitesse de soutirage  $V_s$ . Ces résultats peuvent être exprimés différemment en considérant la courbe de Kynch.

En égalisant les flux, on obtient par des artifices mathématiques :

$$\frac{Q_E C_E}{S} = F_L = C_L (V_L - V_s) = C_L \left( V_L + \frac{Q_E C_E}{S} \frac{1}{C_s} \right)$$

$V_L$  étant la vitesse de décantation au point L.

Soit, pour que la décantation soit possible :  $\frac{Q_E C_E}{S} < \frac{V_L}{\frac{1}{C_L} - \frac{1}{C_s}}$

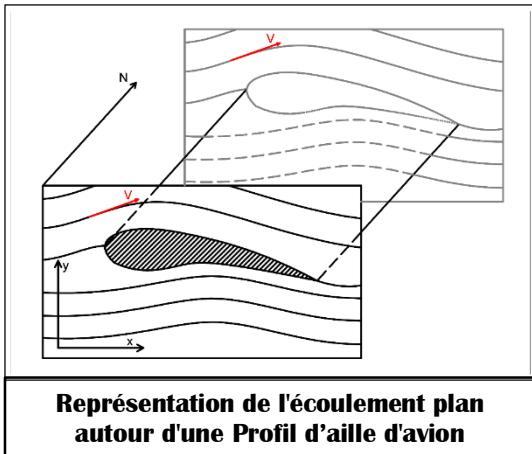


**Flux de sédimentation en fonction de la concentration dans un décanteur travaillant en continu**

## ANNEXE - VI Simplification des modèles d'écoulements

### 1) Ecoulement plan

Il est beaucoup plus aisé de résoudre des problèmes plans sous l'hypothèse que le champ de vitesse est plan. Cela veut dire qu'il existe une direction N à laquelle toutes les vitesses du champ sont perpendiculaires et dans tous les plans perpendiculaires à N, le champ conserve son aspect (de sorte que les champs sont confondus à une translation suivant N). Un tel champ est complètement décrit par l'un des champs de vitesses dans un plan perpendiculaire à N.



Dirigeons N suivant l'axe des z et désignons par  $V_x$  et  $V_y$  respectivement les composantes du vecteur vitesse V sur les axes x et y. Les conditions d'incompressibilité et de potentialité, se mettent alors de la forme :

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0 ; \frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{\partial V_x}{\partial y} = 0 \quad (A)$$

Le potentiel de vitesse  $\varphi$  sera fonction harmonique de deux variables, autrement dit sera solution de l'équation de Laplace

$$\Delta\varphi = \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} = 0$$

Les composantes de la vitesse s'expriment comme suit en fonction de  $\varphi$  :

$$V_x = \frac{\partial\varphi}{\partial x} ; V_y = \frac{\partial\varphi}{\partial y}$$

La première équation (A) montre que l'expression  $-V_x dx + V_y dy$  est (localement) la différentielle exacte d'une fonction  $\psi(x; y)$ , de sorte que

$$-V_y = \frac{\partial\psi}{\partial x} ; V_x = \frac{\partial\psi}{\partial y}$$

La direction de la tangente à la courbe  $\psi(x; y) = Const$  déduite de l'égalité  $d\psi = -V_y dx + V_x dy = 0$ , coïncide effectivement avec celle du vecteur vitesse  $(\frac{dy}{dx} = \frac{V_y}{V_x}$ , voir figure) si bien que les courbes de niveau  $\psi = Cte$  sont les directions vectorielles du champ de vitesse. En écoulement stationnaire, ces courbes sont confondues avec les trajectoires des particules mobiles, c'est-à-dire avec les lignes de courant, d'où le nom de fonction de courant donnée à  $\psi$ . De la seconde équation (A) il s'en suit que  $\psi$  tout comme  $\varphi$  est une fonction harmonique et la comparaison des deux dernières équations montre qu'entre ces fonctions on a les relations :

$$\frac{\partial\varphi}{\partial x} = \frac{\partial\psi}{\partial y} ; \frac{\partial\varphi}{\partial y} = -\frac{\partial\psi}{\partial x} \quad (B)$$

De telles fonctions sont dites conjuguées harmoniques.

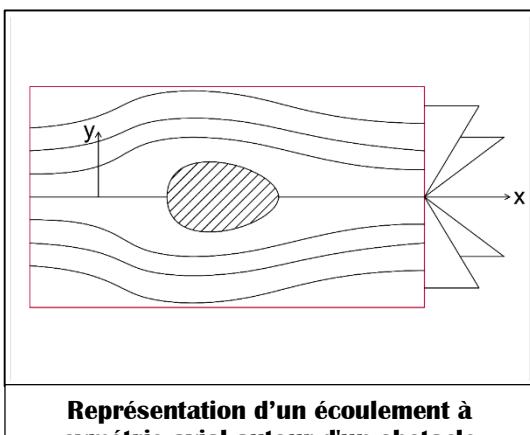
Les simplifications notables apportées par l'hypothèse d'écoulement plan s'expliquent par les deux faits suivant : (1) la fonction de courant en termes de laquelle sont formulés plusieurs problèmes est définie de façon naturelle dans le cas plan alors qu'elle l'est difficilement dans le cas spatial ; (2) dans les problèmes plans le potentiel et la fonction de courant forment ensemble une fonction

analytique dont la théorie est très bien élaborée tant qualitativement que quantitativement.

Le schéma de l'écoulement plan ne s'applique pas seulement aux champs de vitesses plans. Il est utilisé aussi à la description approchée de cas plus généraux, par exemple l'étude de l'écoulement autour d'une aile d'avion sur une grande partie de son envergure (la théorie de l'aile d'envergure infinie) ; aux extrémités de l'aile, le schéma n'est plus valable et doit être précisé.

## 2) Ecoulement à symétrie axial

Un écoulement est dit à symétrie axial si tous les vecteurs vitesses sont contenus dans des demi-plans passant par une droite dite axe de symétrie, la configuration du champ étant la même dans tous ces demi-plans, voir figure ci-dessous. Le champ de vitesse d'un écoulement à symétrie axiale est complètement décrit par un champ plan dans n'importe lequel de ces demi-plans.



Prenons pour axe des  $x$  l'axe de symétrie et désignons par  $y$  la distance à l'axe, part  $V_x$  et  $V_y$  respectivement les coordonnées du vecteur vitesse dans ce système. Les conditions d'incompressibilité et de potentialité s'écrivent :

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{V_y}{y} = 0 \quad (C)$$

Il découle de la second équation que l'expression  $V_x dx + V_y dy$  est la différentielle exacte (localement) de la fonction  $\varphi$ , qui est dite potentiel des vitesses. On a :

$$V_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad V_y = \frac{\partial \varphi}{\partial y}$$

et de la première équation, il suit que  $\varphi$  est solution de l'équation :

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{1}{y} \frac{\partial \varphi}{\partial y} = 0$$

qui n'est autre que l'équation de Laplace en coordonnée cylindriques, de sorte que  $\varphi$  est une fonction harmonique en  $x$  et  $y$ .

La première équation nous apprend que l'expression  $-yV_y dx + yV_x dy$  est la différentielle exacte (localement, elle aussi) de la fonction  $\psi$ , qui est dite fonction de courant. On a :

$$V_x = \frac{1}{y} \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad V_y = -\frac{1}{y} \frac{\partial \psi}{\partial x}$$

d'où, tout comme dans le cas plan, on déduit que les courbes de niveau  $\psi = Cte$  sont des lignes de courant. La fonction  $\psi$  satisfait à l'équation :

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} - \frac{1}{y} \frac{\partial \psi}{\partial y} = 0$$

qui n'est plus une équation de Laplace, de sorte que  $\psi$  en coordonnées cartésienne n'est plus une fonction harmonique. La fonction de courant et le potentiel sont liés par les relations :

$$y \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad y \frac{\partial \varphi}{\partial y} = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (D).$$

On voit donc que les écoulements à symétrie axiale ont beaucoup de traits communs avec les écoulements plans. Les avantages de l'écoulement plan mentionnés plus haut valent, le

premier intégralement, le second partiellement, pour les écoulements à symétrie axiale : il est possible d'élaborer une théorie qualitative assez complète des solutions du système (D), alors que la théorie quantitative est loin de pouvoir l'être aussi bien que pour les solutions du système d'équation (B) pour les fonctions analytiques.

---

## ANNEXE - VII Méthode de résolution par la méthode des différences finies, éléments finis, volumes finis

D'une façon générale, toute méthode de résolution numérique d'un problème continu permettant d'obtenir une approximation de la solution d'une équation aux dérivées partielles comporte deux étapes : une phase de discréétisation et une phase de résolution.

### 1) La phase de discréétisation

La phase de discréétisation transforme le problème continu en un problème discret. L'espace physique occupé par l'écoulement est représenté par l'ensemble des éléments d'un maillage. Sur chaque élément ou maille, l'hypothèse est faite que les grandeurs physiques à déterminer ont un comportement simple constant, linéaire ou défini par une expression polynomiale de bas degré qui assure la continuité de cette grandeur (et éventuellement de ses dérivées) à l'interface entre deux éléments. Plus le degré de ce polynôme est important, meilleure est l'approximation, mais plus le coût du calcul augmente.

On a donc remplacé le système d'équations aux dérivées partielles à résoudre par un système algébrique dont le nombre de degrés de liberté  $N$  est défini par le maillage (le nombre d'inconnues par maille correspondant au nombre d'équations à résoudre).

### 2) La méthode de résolution

La méthode de résolution de l'équation  $E_q = 0$  se fait par l'intégration pondérée à l'aide de  $N$  fonctions tests  $\Phi_i$  ( $N$  étant le nombre de degrés de liberté du système), soit sur le domaine de calcul  $D$  :

$$\left\{ \int E_q \Phi_i d\tau \right\}_D = 0$$

L'équation n'est plus satisfaite en chaque point mais seulement en moyenne pondérée : c'est la méthode des éléments finis.

La méthode des volumes finis consiste à prendre comme fonctions tests  $\varphi_i$  les fonctions caractéristiques de chaque élément (qui valent 1 sur l'élément et 0 ailleurs).

Si les éléments sont définis par des réseaux de courbes orthogonales (axes par exemple) la méthode prend le nom de différences finies.

Avec cette présentation, les méthodes des différences finies et des volumes finis apparaissent comme des cas particuliers de la méthode des éléments finis.

Historiquement, les méthodes des différences finies et des volumes finis ont été obtenues par une autre démarche conduisant au même résultat.

En différences finies, les dérivées d'une fonction sont approchées par combinaison linéaire des valeurs de la fonction au sommet du maillage, les coefficients de la combinaison étant déterminés grâce aux formules de développement de Taylor.

En volume finis, la formulation (physique) pourrait être trouvée en écrivant les conservations des différentes quantités (masse,

quantité de mouvement, énergie) par élément avec les échanges (flux) entre deux éléments adjacents.

---

## ANNEXE - VIII Conditions initiales et conditions aux limites

### 1) Conditions initiales

Il faut fournir au modèle numérique les conditions initiales qui représentent l'état de l'écoulement lors du démarrage de la simulation.

Il est nécessaire de donner des vitesses initiales de l'écoulement dans différents domaines fluides (au niveau des volumes d'eau et d'air), ainsi que les valeurs initiales pour la turbulence, la pression et la fraction volumique (position initiale de la surface libre).

Si les variables possèdent des valeurs initiales constantes, il est possible de les livrer directement au logiciel. Dans le cas contraire, l'utilisateur peut créer un sous-programme (fonctions définies par l'utilisateur ou User Define Fonction) dans lequel il est possible d'établir des profils initiaux non uniformes pour chacune des variables de l'écoulement.

### 2) Conditions aux limites

Les conditions aux limites définissent la valeur des paramètres hydrauliques (débit, tirant d'eau,...) permettant de représenter l'effet en terme hydrodynamique de ce qui n'a pas pu être modélisé.

L'étude des conditions aux limites est déterminante dans une modélisation. Il faut représenter, par le biais des conditions aux limites, l'influence hydraulique du reste du réseau au sein duquel l'ouvrage est inséré.

#### a) Conditions aux limites (fluide incompressible non visqueux)

Revenons au schéma de l'écoulement

à potentiel. La résolution des problèmes d'hydrodynamique ainsi schématisé se ramène à la recherche de la solution de l'équation aux dérivées partielles qui satisfait à certaines conditions supplémentaires traduisant précisément le côté spécifique du problème. L'examen des propriétés des solutions de cette équation ne réalisant pas ces conditions supplémentaires ne nous renseigne que sur les propriétés générales des écoulements à potentiel, le gros problème restant la formulation de ces conditions et la construction de la solution les vérifiant.

Il existe deux types de conditions supplémentaires : les conditions initiales et les conditions aux limites. Les conditions initiales doivent être posées uniquement pour les écoulements non stationnaires. Elles consistent en la donnée, à l'instant initial (ordinairement  $t = 0$ ), de domaine  $D_0$  occupé par le fluide et en la distribution du potentiel sur ce domaine.

$$\varphi(x, 0) = f(x)$$

La fonction donnée  $f$  doit être solution de l'équation de Laplace dans  $D_0$ , c'est-à-dire être harmonique dans  $D_0$ .

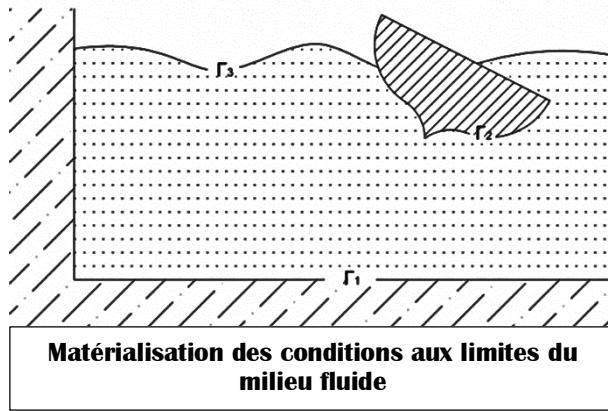
L'écoulement ultérieur est déterminé à partir des conditions aux limites posées sur la frontière  $\Gamma_t$  du domaine d'écoulement  $D_t$  pour tout instant  $t \geq 0$ . Dans beaucoup de problèmes  $\Gamma_t$  est divisé en trois parties : une frontière solide immobile  $\Gamma_1$ , une frontière solide mobile  $\Gamma_2$  et une frontière libre  $\Gamma_3$ . Ecrivons les conditions aux limites correspondant à ces parties.

##### (i) Frontières solides mobiles

Soit  $F(x, t) = 0$  l'équation de cette frontière ; la fonction  $F$  est supposée donnée. La vitesse de

déplacement de la frontière dans la direction de sa normale est égale à :

$$U_n = -\frac{\frac{\partial F}{\partial t}}{|\operatorname{grad} F|}$$



où le gradient est comme toujours calculé par rapport aux conditions spatiales. Pour les frontières solides on adopte encore la *condition d'imperméabilité*, selon laquelle  $U_n$  doit coïncider avec la composante normale (par rapport à la frontière) de la vitesse du fluide, c'est-à-dire avec la quantité :

$$V_n = \left( \operatorname{grad} \varphi, \frac{\operatorname{grad} F}{|\operatorname{grad} F|} \right)$$

Ainsi donc, la condition aux limites s'énonce ici : pour tous les  $x$  et  $t$  vérifiant l'équation  $F(X, t) = 0$ , où  $F$  est donnée, on a la relation :

$$\frac{\partial F}{\partial t} + (\operatorname{grad} \varphi, \operatorname{grad} F) = 0$$

## (ii) Les frontières solides immobiles

Les frontières solides immobiles pourraient être considérées comme un cas particulier des mobiles lorsque la fonction  $F$  ne dépend pas de  $t$ . La condition aux limites correspondante s'énonce par conséquent : pour tous les  $x$  vérifiant l'équation  $F(X) = 0$  et pour tous les  $t$  on doit avoir :

$$(\operatorname{grad} \varphi, \operatorname{grad} F) = 0$$

Ou :

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$$

Où  $\frac{\partial}{\partial n}$  est la dérivée dans la direction de la normale à la frontière.

## (iii) Frontières libres

La forme de ces frontières n'est pas connue *a priori*, la condition des frontières immobiles (ou des frontières immobiles) reste valable comme condition aux limites avec une fonction inconnue  $F$ . Par ailleurs, on admet généralement que sur la surface libre la pression  $p$  est constante (est égale à la pression atmosphérique s'il s'agit des réservoirs d'eau à découverts). En vertu de la formule de Cauchy-Lagrange, ceci nous conduit à une relation complémentaire, satisfaite à la frontière libre :

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{2} |\operatorname{grad} \varphi|^2 - U = C^{te}$$

La formule de Cauchy-Lagrange est donné par :  $\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} - U = \Phi(t)$

Où  $U$  est le potentiel des forces extérieures s'exerçant sur la frontière (la fonction  $\Phi$  du second membre de l'équation de Cauchy-Lagrange pouvant être incluse dans  $\varphi$  comme terme additif non essentiel).

Dans le cas d'un écoulement stationnaire, les frontières ne dépendent pas du temps  $t$  si bien que sur les portions solides (connues) doit être réalisée la condition aux limites des frontières solides mobiles et sur les portions libres la même condition avec  $F$  inconnue ainsi que la condition des frontières libres privée du terme en  $\frac{\partial \varphi}{\partial t}$ .

Pour un écoulement plan ou un écoulement stationnaire à symétrie axiale les

conditions aux limites se formulent particulièrement bien en termes de fonction de courant. En effet, pour ces écoulements, les lignes de courants  $\psi = Cte$  et les lignes  $\varphi = Cte$  sont deux à deux orthogonales et en outre, la nullité de la dérivée  $\frac{\partial \varphi}{\partial t}$  suivant la direction quelconque  $l$  entraîne celle de la dérivée  $\frac{\partial \psi}{\partial t}$  dans une direction  $m$  perpendiculaire à  $l$ . De sorte que sur la frontière de l'écoulement on peut remplacer la condition  $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$  par la condition  $\frac{\partial \psi}{\partial s} = 0$ , la dérivée étant prise dans la direction de la frontière. Or, la dernière condition traduit le fait que  $\psi = Cte$  sur la frontière, autrement dit que **la frontière est une ligne de courant.**

Cette formulation simple des conditions aux limites dans les problèmes plans et à symétrie axiale constitue précisément l'une des deux circonstances simplificatrices mentionnées plus haut.

#### b) Condition aux limites (fluides visqueux incompressible)

L'augmentation de l'ordre de l'équation différentielle quand on considère un fluide visqueux entraîne un accroissement du nombre de conditions aux limites. Ainsi, sur les frontières rigides immobiles, en théorie du fluide non visqueux on pose une condition d'imperméabilité  $(V, n) = 0$ , alors qu'en théorie du fluide visqueux, on en pose trois (scalaires) :

$$\vec{V} = \vec{0}$$

Cette condition dite *condition d'adhérence* est justifiée par de nombreuses expériences et traduit le fait qu'entre la surface du corps solide et le fluide visqueux, il existe des forces de cohésion moléculaire.

Sur les frontières rigides mobiles, la condition d'adhérence se réduit à la coïncidence de

la vitesse du fluide avec celle des points correspondants de la surface. Sur la surface limite libre soit s'annuler le vecteur des contraintes :

$$T \cdot \mathbf{n} = 0,$$

où  $\mathbf{n}$  est le vecteur de la normale à la surface, et de plus doit être réalisée la condition cinématique d'après laquelle la composante normale du vecteur vitesse coïncide avec la vitesse de déplacement de la surface dans le sens de sa normale.

**ANNEXE - IX Consommation eau mensuel de Tana en [m<sup>3</sup>]  
(JIRAMA/DGAO/DEXO/DAGDL)**

	<b>janvier</b>	<b>février</b>	<b>mars</b>	<b>avril</b>	<b>mai</b>	<b>juin</b>	<b>juillet</b>	<b>août</b>	<b>sept</b>	<b>oct.</b>	<b>nov.</b>	<b>déc.</b>
2009	2 465 567	2 177 249	2 204 772	2 879 990	2 698 470	2 386 534	2 799 058	2 335 454	2 263 906	2 412 012	2 655 191	2 277 628
2010	2 695 814	2 634 365	2 443 397	2 965 235	2 575 231	2 362 338	2 555 114	2 587 087	2 488 612	2 803 206	2 613 274	2 629 155
2011	2 782 082	2 440 635	2 414 049	2 931 351	2 352 062	2 895 311	2 222 729	2 867 744	2 533 576	2 717 037	3 174 509	2 490 371
2012	2 725 105	2 614 063	2 435 573	2 573 441	2 700 958	2 660 639	2 298 927	2 707 399	2 612 455	2 705 956	2 756 399	2 508 052
2013	2 604 507	2 502 274	2 321 938	2 535 716	2 762 796	2 519 976	2 287 325	2 690 660	2 593 014	2 774 461	2 944 055	2 496 467
2014	2 720 501	2 931 086	2 110 773	2 593 032	2 748 688	2 689 385	2 550 568	3 025 837	2 783 274	3 043 774	2 829 448	2 569 272
2015	3 281 285	2 432 134	2 581 582	2 647 560	2 978 620	2 610 266	2 635 956	2 989 477	2 641 361			

**ANNEXE - X Suivi d'analyse physico-chimique de l'eau brute du lac  
Mandrozeza (JIRAMA/DGAO/DEXO/DGQO)**

<b>2002</b>	04-01-	13-02-	06-03-	11-04-	31-05-	05-07	30-07-	29-08-	28-09-	29-11-	28-12-
	EB	EB	EB	EB	EB	EB	EB	EB	EB	EB	EB
CARACTERISTIQUES	Lac	Lac	Lac	Lac	Lac	Lac	Lac	Lac	Lac	Lac	Lac
TEMPERATURE °C	23,5	24,7	20,1	20,5	19,2	16,1	17,9	16,1	17,2	23,1	25
TURBIDITE NTU	<b>21,8</b>	<b>32,8</b>	<b>15,3</b>	<b>7,2</b>	<b>9,4</b>	<b>8,6</b>	<b>7,4</b>	<b>6,7</b>	<b>6,8</b>	<b>5,8</b>	<b>9,4</b>
pH	6,9	7,1	7,5	7,5	7,1	7,4	7,3	7,7	7,4	7,6	7,1
CONDUCTIVITE µS/cm	38,8	27,9	30,7	29,5	30,7	28,8	24,2	20	18,4	24	23,1
MINERALISATION mg/l	36	26	27	27	28	27	22	18	17	22	22
DURETE TOTALE °F	0,8	1	1	1,1	0,7	0,7	0,6	0,5	0,7	0,5	0,6
DURETE CALCIQUE °F	0,7	0,6	0,8	0,6	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,45	0,3
TITRE ALCALIMETRIQUE °F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TITRE ALCALIMETRIQUE COMPLET °F	2,5	1,1	1,3	1	1,8	0,9	0,9	0,6	0,6	0,9	0,9
CALCIUM mg/l	2,8	2,4	3,2	2,4	2	2	2	1,6	1,6	1,8	1,2
MAGNESIUM mg/l	0,24	0,97	0,49	1,22	0,49	0,49	0,24	0,24	0,73	0,12	0,73
CARBONATES mg/l	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BICARBONATES mg/l	30,5	13,42	15,86	12,2	21,96	10,98	10,98	7,32	7,32	10,98	10,98
MATIERES ORGANIQUES mg/l	4,1	1,3	1,7	1,2	0,5	0,6	0,4	0,6	2	1,3	0,8
AMMONIUM mg/l	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FER TOTALE mg/l	0,8	0,8	0,6	0,9	0,8	0,9	0,4	0,4	0,55	0,3	0,7
CHLORURES mg/l	5,32	5,32	3,55	3,55	3,55	5,32	3,55	3,55	3,55	3,55	3,55
SULFATES mg/l	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NITRITES mg/l	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NITRATES mg/l	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ARSENIC mg/l	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CHROME HEXAVALENT mg/l	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SODIUM mg/l	3,45	2,76	2,3	2,3	3,45	3,22	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3

<b>2009</b>	04-01-	13-02-	06-03-	11-04-	31-05-	05-07	30-07-	29-08-	28-09-	29-11-	28-12-
	EB	EB	EB	EB	EB	EB	EB	EB	EB	EB	EB
CARACTERISTIQUES	Lac	Lac	Lac	Lac	Lac	Lac	Lac	Lac	Lac	Lac	Lac
TEMPERATURE °C	24,5	23,6	24,3	22,7	20,9	24,2	24,2	20,7	14	19,6	19,8
TURBIDITE NTU	<b>34</b>	<b>28,5</b>	<b>16,8</b>	<b>35,6</b>	<b>14</b>	<b>33,2</b>	<b>1,5</b>	<b>7,06</b>	<b>17,6</b>	<b>11,7</b>	<b>5,81</b>
pH	6,89	7,34	7,4	6,8	6,5	6,99	6,92	7,1	8	6,8	7,41
CONDUCTIVITE µS/cm	20,5	24,5	21,6	26,1	30,6	21,6	31,5	28,3	28,7	21,3	21,2
MINERALISATION mg/l	19	22	20	24	25	20	29	27	26	20	29
DURETE TOTALE °F	0,9	1	1,4	1,6	2	0,9	1,2	1,5	1	1,3	1,5
DURETE CALCIQUE °F	0,8	0,8	0,9	1	1	0,8	1	0,8	0,6	0,6	0,5
TITRE ALCALIMETRIQUE °F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TITRE ALCALIMETRIQUE COMPLET °F	0,9	1	1,2	1,4	0,9	1	1,1	1,7	0,7	0,8	1,1
CALCIUM mg/l	3,2	3,2	3,6	4	4	3,2	4	3,2	2,4	2,4	2
MAGNESIUM mg/l	0,24	0,49	1,22	1,46	2,43	0,24	0,49	1,70	0,97	1,70	2,43
CARBONATES mg/l	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BICARBONATES mg/l	10,98	12,2	14,64	17,08	10,98	12,2	13,42	20,74	8,54	9,76	13,42
MATIERES ORGANIQUES mg/l	1,3	1,4	1,18	2,08	1,1	1,2	0,2	0,76	1,36	1,04	1
AMMONIUM mg/l	0,04	0,04	0	0	0	0,05	0,01	0,02	0	0,02	0,106
FER TOTALE mg/l	0,08	0,1	0,15	0,06	1	0,1	0,02	0,35	0,25	0,25	0,04
CHLORURES mg/l	2,66	3,55	3,55	3,55	3,55	2,66	3,55	3,55	4,26	2,84	5,32
SULFATES mg/l	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,897
NITRITES mg/l	0,05	0,04	0	0	0	0,04	0	0,03	0	0	0,006
NITRATES mg/l	0,82	0,87	0,13	1,43	0,12	0,92	0,57	0	0	0,28	0,194
ARSENIC mg/l	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CHROME HEXAVALENT mg/l	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SODIUM mg/l	1,72	2,3	2,3	2,3	2,3	1,72	2,3	2,3	2,76	1,84	4,22

<b>2015</b>	04-01-	13-02-	06-03-	11-04-	31-05-	05-07	30-07-	29-08-	28-09-	29-11-	28-12-
	EB	EB	EB	EB	EB	EB	EB	EB	EB	EB	EB
CARACTERISTIQUES	Lac	Lac	Lac	Lac	Lac	Lac	Lac	Lac	Lac	Lac	Lac
TEMPERATURE °C	23,2	22,8	22,2	23,4	20,7	20,4	20,2	20	20,6	20,4	20,4
TURBIDITE NTU	<b>55,6</b>	<b>33</b>	<b>79,6</b>	<b>12,5</b>	<b>31,5</b>	<b>21,6</b>	<b>8,2</b>	<b>10,5</b>	<b>14,2</b>	<b>11,3</b>	<b>22,8</b>
pH	6,84	7,85	7,3	7,3	6,6	6,49	6,9	6,93	7,1	7,4	7,25
CONDUCTIVITE µS/cm	42,3	36,2	46,8	31	33,2	26,5	37,5	23,9	21,6	21,9	24,8
MINERALISATION mg/l	35	33	44	29	31	25	35	22	20	21	20
DURETE TOTALE °F	2,2	4,8	2,2	2,3	2,1	1,2	1,3	1,3	1,2	1	1,2
DURETE CALCIQUE °F	1	3	1,4	1,7	1,4	0,9	0,9	0,8	0,9	0,6	0,7
TITRE ALCALIMETRIQUE °F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TITRE ALCALIMETRIQUE COMPLET °F	1	0,6	0,6	1	0,6	0,6	1	1	0,6	0,6	0,6
CALCIUM mg/l	4	12	5,6	6,8	5,6	3,6	3,6	3,2	3,6	2,4	2,8
MAGNESIUM mg/l	2,92	4,37	1,94	1,46	1,70	0,73	0,97	1,22	0,73	0,97	1,22
CARBONATES mg/l	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BICARBONATES mg/l	12,2	7,32	7,32	12,2	7,32	7,32	12,2	12,2	7,32	7,32	7,32
MATIERES ORGANIQUES mg/l	1,5	1,5	1,3	1,1	1,1	1,6	1,7	2,6	1,8	1,6	3,1
AMMONIUM mg/l	0,074	0,05	0,12	0,03	0,022	0,023	0,02	0	0,09	0,09	0,043
FER TOTALE mg/l	0,6	1	0,3	1	0,6	0,25	1	1	0,02	0,1	0,15
CHLORURES mg/l	3,35	3,55	3,55	6,39	3,55	3,55	2,84	3,55	3,55	2,06	7,81
SULFATES mg/l	1,297	0	1,89	0,19	4,738	1,149	1,35	0	0	2,26	1,727
NITRITES mg/l	0,032	0,07	0,09	0,02	0,026	0,016	0	0,023	0,02	0,01	0,029
NITRATES mg/l	3,8	0	1,95	0	0,487	0,287	0,97	0,98	1,34	2,22	2,347
ARSENIC mg/l	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CHROME HEXAVALENT mg/l	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SODIUM mg/l	2,17	2,3	2,3	4,14	2,3	2,3	2,51	2,36	2,3	0,02	1,47

**ANNEXE - XI      Caractéristiques eau Sabotsy Namehana 2014 – 2015  
(JIRAMA/DGAO/DEXO/DGQO)**

CARACTERISTIQUES	21/09	02/10	05/11	10/12	08/01	22/01	19/03	28/05	11/06	21/07	15/08	27/08	17/09	05/10	06/10	29/10	26/11
	RIV	RIV	RIV	RIV	RIV	RIV	RIV	RIV	RIV	RIV	RIV	RIV	RIV	RIV	RIV	RIV	RIV
TEMPERATURE °C	17,2	21	23,3	24,5	23,9	21,3	24,3	20	22,2	17,4	16,6	20,7	20,6	20,3	25,2	23,2	20,7
TURBIDITE NTU	<b>18,1</b>	<b>72,1</b>	<b>98,4</b>	<b>3,49</b>	<b>290</b>	<b>86,8</b>	<b>25,8</b>	<b>14,5</b>	<b>33,7</b>	<b>70,1</b>	<b>38,5</b>	<b>49,4</b>	<b>64</b>	<b>46,7</b>	<b>24,9</b>	<b>79,2</b>	<b>94,8</b>
pH	7,4	6,83	7,13		8,26	7,71	7,56	6,77	6,95	7,4	7,07	7,35	7,9	7,26	6,52	7,34	7,52
CONDUCTIVITE µS/cm	56,3	66,5	70,4	37,5	19	37,1	45,2	49,6	50	46,2	51,7	50,3	51,9	52,9	52,1	57,2	53,2
MINERALISATION mg/l	52	61	66	31	17	36	42	46	46	42	48	46	48	49	48	53	46
DURETE TOTALE °F	6,2	4,5	2,7	1,2	1,2	2	4,7	3,2	3,1	2,8	3,4	3,1	3,2	2,2	1,9	3	2,3
DURETE CALCIQUE °F	5,3	1,5	0,9	0,5	0,5	1,4	3	2	1,8	1	1,8	1,8	2,3	1,6	1,3	1,6	1,2
TITRE ALCALIMETRIQUE °F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TITRE ALCALIMETRIQUE COMPLET °F	0,9	3,3	3,3	1,3	1	1,2	2	2,6	2,6	2,7	2,7	2	2	2,9	2,8	1,9	1,8
CALCIUM mg/l	21,2	6	3,6	2	2	5,6	12	8	7,2	4	7,2	7,2	9,2	6,4	5,2	6,4	4,8
MAGNESIUM mg/l	2,19	7,29	4,37	1,70	1,70	1,46	4,13	2,92	3,16	4,37	3,89	3,16	2,19	1,46	1,46	3,40	2,67
CARBONATES mg/l	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BICARBONATES mg/l	10,98	40,26	40,26	15,86	12,2	14,64	24,4	31,72	31,72	32,94	32,94	24,4	24,4	35,38	34,16	23,18	21,96
MATIERES ORGANIQUES mg/l	1,5	1,7	3,8	4,08	4,05	1,6	1,6	2	1,6	1,9	2,6	2,4	2,7	2,5	1,9	3,1	5
AMMONIUM mg/l	0,02	0,167	0,08	0,185	0	0	0,026	0,042		0,03	0,02	0,058	0,04	0,07	0,03	0,13	0
FER TOTALE mg/l	0,3	4	2,3	1,3	1,2	0,15	0,8	1	1,5	2,5	1	1	0,6	0,6	2	0,4	4
CHLORURES mg/l	7,81	10,65	9,23	7,1	7,45	7,1	3,9	4,97	4,97	4,26	3,55	3,55	3,55	3,55	3,55	6,39	7,1
SULFATES mg/l	2,47	3,924	24,59	2,684	0	0	0	0	0	0	5,56	0,559	0	7,42	1	2,894	23,587
NITRITES mg/l	0	0,094	0,12	0,075	0	0,197	0	0,055	0,01	0	0,02	0,032	0,04	0,03	0,01	0,075	0,016
NITRATES mg/l	0,35	0,954	4,21	10,212	0	7,925	0	1,785	0,78	0,75	0	0,908	1,23	1,68	1,13	3,264	1,324
SODIUM mg/l	5,06	6,9	14,61	6,03	0,13	1,47	2,53	3,22	3,22	2,76	2,79	2,3	2,3	2,3	2,54	3,36	4,57

**ANNEXE - XII      Résultats d'essai de flocculation de l'eau brute Sabotsy Namehana (JIRAMA/DGAO/DEXO/DGQO)**

Paramètres	29/01/2015		05/02/2015		05/02/2015		05/06/2015		28/07/2015		22/12/2015	
	EB	ED	EB	ED	EB	ED	EB	ED	EB	ED	EB	ED
Températures (°C)	22	22,3	22	22,4	20,2	20,9	14,8	15,0	15,2	15,0		
Turbidité (NTU)	<b>113</b>	<b>35,6</b>	<b>160</b>	<b>20,1</b>	<b>95</b>	<b>18,7</b>	<b>14,4</b>	<b>1,3</b>	<b>52,7</b>	<b>5,91</b>	<b>259</b>	<b>5,5</b>
Conductivité (µS/cm)	29,5	44,6	413	328	30,6	36,3	49,6	55,3	13,4	118		
Minéralisation (mg/l)	27	42	386	301	28	33	46	51	96	110		
Matières Organiques (mg/l)	1,47	0,48	1,4	0,70	1,9	0,60	2,0	1,70	2,5	2,00	4,8	2,5
Fer (mg/l)	0,3	0,2	0,15	0,02	2	0,6	1	0,01	1,3	0,08	1,5	0,3
pH	7,7	6,3	10,3	10,23	6,9	6,5	6,7	6,4	7,1	7	7	6,9
SULFATE D'ALUMINE	35		38		32		27,5		27,5		38	
CHAUX D'EPURATION							5,33				4,58	
TAUX [g/m3]												

**ANNEXE - XIII Résultats d'essai de flocculation eau brute Mandroseza  
(JIRAMA/DGAO/DEXO/DGQO)**

Date	Taux de traitement		Nature eau	Turbidité (NTU)	pH	Fer (mg/l)	M.O. (mg/l)	Minéralisation (mg/l)	Conductivité ( $\mu$ S/cm)	Température (°C)
	S.A	CH.								
10/01/2005	11	1,83	E B	<b>48,9</b>	7,15	0,9	1,6	24	28,5	24,4
			E D	<b>7,57</b>	6,65	0,15	0,75	31	36,6	24,8
03/03/2005	10	1	E B	<b>35,3</b>	6,79	0,35	1,25	20	21,9	22,8
			E D	<b>4,24</b>	6,63	0,04	0,6	27	29	22,8
16/03/2005	10	1,66	E B	<b>10,2</b>	7,11	0,55	1	27	29,2	23,1
			E D	<b>2,67</b>	6,96	0,01	0,85	33	35,8	22,5
25/04/2005	10	1,66	E B	<b>9,8</b>	7,5	0,7	1,45	26	29	23,3
			E D	<b>1,4</b>	7,1	0,08	1,5	32	35,5	23,2
23/05/2005	10	2	E B	<b>10,8</b>	7,5	0,35	0,85	21	22,6	18,5
			E D	<b>2,29</b>	7,2	0,05	0,3	27	29,3	18,4
17/06/2005	7	1,16	E B	<b>8,34</b>	7,31	0,25	0,5	25	26,8	
			E D	<b>1,79</b>	7,12	0,01		28	30,7	
01/07/2005	7	1,16	E B	<b>6,53</b>	7,22		1,2	18	19,2	18,2
			E D	<b>1,81</b>	7,17			23	24,8	19
02/09/2005	8	0,67	E B	<b>8,02</b>	7,63	0,25	0,7	18	19,5	16,9
			E D	<b>2,04</b>	7,2	0,06	0,6	23	24,7	16,9
29/11/2005	10	2	E B	<b>15,6</b>	7,05	0,45	0,9	20	21,8	22,8
			E D	<b>2,26</b>	6,86	0,03	0,5	27	29,9	22,5
08/12/2005	12	2	E B	<b>36,5</b>	7,36	0,4		26	28	23,3
			E D	<b>4,31</b>	6,42	0,03	0,85	32	33,6	25,5
12/12/2005	12	2,4	E B	<b>72,4</b>	6,36	1,2		26	27,6	26,6
			E D	<b>4,7</b>	6,54	0,04	1,05	32	38,3	26,6

Date	Taux de traitement		Nature eau	Turbidité (NTU)	pH	Fer (mg/l)	M.O. (mg/l)	Minéralisation (mg/l)	Conductivité ( $\mu$ S/cm)	Température (°C)
	S.A	CH.								
21/01/2009	11	2,2	E B	<b>53,9</b>	7,05	0,15	1,2	22	23,1	22,3
			E D	<b>6,62</b>	6,35	0	0,7	31	33,1	22
23/02/2009	9	2,25	E B	<b>19</b>	6,93	0,15	1,1	28	29,9	21,4
			E D	<b>5,6</b>	6,86	0,02	0,68	32	34	23,3
30/03/2009	21	3,5	E B	<b>30,4</b>	7,73	0,3	3,26	17	18,8	22,4
			E D	<b>14,2</b>	6,81	0,04	1,16	32	34,8	23,1
30/03/2009	10	1,66	E B	<b>49,2</b>	7,45	0,25	2,1	31	39,8	20,8

			E D	<b>7,64</b>	7,37	0,04	1,25	32	34,1	20,9
22/06/2009	10	1,66	E B	<b>13,5</b>	7,3	0,35	0,9	25	26,4	17,6
			E D	<b>4,26</b>	7,27	0,04	0,3	32	33,5	18,3
			E B	<b>19</b>	7,41	0,45	0,65	25	27,2	18,2
08/07/2009	10	1,66	E D	<b>3,64</b>	7,38	0,03	0,5	33	35,9	18,1
			E B	<b>18,6</b>	7,13	0,1	0,6	14	15,6	20,9
			E D	<b>1,95</b>	7,02	0,04	0,1	21	22,4	20,2
19/11/2009	11	1,83	E B	<b>57,9</b>	6,16	0	1,3	27	29,4	26,1
			E D	<b>4,74</b>	6,06	0	0,8	28	30,8	26,8
			E B	<b>62,6</b>	6,22	0	1,5	27	28,4	24,9
07/12/2009	10		E D	<b>6,68</b>	6,02		1,2	28	30,5	25,2

Date	Taux de traitement		Nature eau	Turbidité (NTU)	pH	Fer (mg/l)	M.O. (mg/l)	Minéralisation (mg/l)	Conductivité (µS/cm)	Température (°C)
17/01/2013	10	2	E B	<b>13,8</b>	7,1	0,15	2,1	30	31,8	24
			E D	<b>2,89</b>	7,2	0,04	0,9	35	37,1	23,4
21/01/2013	12	2	E B	<b>28,4</b>	6,3	0,3	1,4	29	30,8	24,1
			E D	<b>5,61</b>	6,6					
31/01/2013	13	2,16	E B	<b>58,9</b>	6,96	0,3	2,1	32	34,5	23,3
			E D	<b>4,97</b>	7,1	0,04	0,7	37	40,4	23,2
05/03/2013	11	1,83	E B	<b>11,7</b>	7,12	0,3	1,7	37	33	23,3
			E D	<b>3,18</b>	6,84	0,02	0,95	37	40,1	24
28/06/2013	9	1,8	E B	<b>11,6</b>	6,96	0,08	1,2	30	32,3	19,3
			E D	<b>5,8</b>	6,62	0,04	0,9	42	45,4	19,9
06/09/2013	9	1,55	E B	<b>14,9</b>	7,06	0,06	2,4	22	24	19,2
			E D	<b>0,77</b>	6,83	0	0,8	28	30,3	20,1
02/10/2013	11	2,2	E B	<b>9,04</b>						
			E D	<b>1,42</b>						
14/10/2013	14	2,33	E B	<b>45,6</b>	6,8	0,35	1,4	23	24,6	21,8
			E D	<b>3,31</b>	6,7	0,02	0,8	28	30,1	21,9
17/10/2013	15	2,5	E B	<b>126</b>	6,7	0,5	4,1	29	31,2	24
			E D	<b>5,01</b>	6,8	0,02	1,3	40	42,7	22,6
18/10/2013	14	2,33	E B	<b>48,5</b>	6,8	0,2	1,8	28	30,9	22,2
			E D	<b>4,83</b>	6,8	0,01	1,2	37	39,9	23,3
21/10/2013	14	2,8	E B	<b>22,9</b>	6,8	0,25	4,2	32	34,4	22,9
			E D	<b>2,97</b>	6,8	0,02	3,5	40	43,1	23,3
30/10/2013	12	2	E B	<b>11,1</b>	6,8	0,25	1,1	19	20,8	22,5
			E D	<b>2,44</b>	6,7	0,02	0,9	29	31,1	22,3
21/11/2013	12	2	E B	<b>12,4</b>	7,8	0,06	2,05	21	25,2	25,4
			E D	<b>1,73</b>	7,6	0	1,1	27	31,8	25,2

**Nom :** ANDRIANTOVHASINA  
**Prénom :** Tsifoimbola  
**Contact :** 033 76 832 72  
**E-mail :** tsifoymbola@gmail.com

***Titre du mémoire :***

**MODÉLISATION ET CONCEPTION D'UN SYSTÈME DE DECANTATION LAMELLAIRE POUR LA CLARIFICATION D'EAU BRUTE ; Cas des stations de la JIRAMA Mandroseza et Sabotsy Namehana**

**Nombre de pages :** 132  
**Nombre de tableaux :** 19  
**Nombre d'illustrations (Figures et Cartes) :** 78

**Résumé**

Les ouvrages de clarifications (décanteur et filtre) doivent fournir en permanence de l'eau claire, turbidité inférieure à 5 [NTU] selon la Norme Malgache de potabilité, en dépit de la variation de la qualité d'eau brute à traiter et de l'augmentation des demandes des consommateurs. Actuellement, la saturation des ouvrages existants nous conduit à rénover ces systèmes de clarification.

À un coût raisonnable, l'application de la décantation lamellaire peu offrir des performances élevée en séparation de boue et de l'eau claire. Ce mémoire propose d'exploiter les outils puissants offerts par le couplage des logiciels de modélisation géométrique et les logiciels de simulation hydrodynamique pour la conception et l'optimisation du système.

Avec l'une des variantes étudiées appliquée (1) à un ouvrage existant [cas du décanteur Prat-Daniel de Mandroseza] on peut augmenter jusqu'à 6 fois la performance, soit en débit, soit en qualité, soit les deux à la fois selon le besoin. (2) à une nouvelle station [cas de Sabotsy Namehana] la conception conduit à un modèle capable de remplacer le rôle de la filtration bicouche d'anthracite et d'obtenir un gain en surface au sol et en volume de béton : un bénéfice de 75 034 916 [Ar], soit 23% des investissements de construction.

***Abstract***

Clarification works (clarifier and filter) must continuously provide clean water, turbidity of less than 5 [NTU] according to Malagasy Standard potability, despite the change in the quality of raw water and the increased consumer demands. Currently, saturation of existing structures leads us to renovate the clarification systems.

At a reasonable cost, the implementation of the lamellar settling little to offer high performance separation of sludge and clear water. This thesis proposes to use the powerful tools offered by the coupling of geometric modeling and hydrodynamic simulation software for the design and optimization of the system.

With one of the variants studied, applied (1) to an existing structure [case of Prat-Daniel decanter Mandroseza] can be increased up to 6 times the performance, either in speed or quality, or both at once as required. (2) A new station [case Sabotsy Namehana] design leads to a model that can replace the role of the bilayer anthracite filtration and a gain in floor space and in concrete volume: a profit of 75.034.916 [Ar], 23% of construction.

**Mots clés :** Turbidité, Charge hydraulique superficiel, décantation lamellaire, Computational Fluid Dynamic (CFD), Conception Assisté par Ordinateur (CAO)